

Aus der Klinik für Neurologie  
Prof. Dr. med. M. Bähr  
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Darstellung von  
Artikulationsbewegungen stotternder  
Erwachsener in der  
Hochgeschwindigkeits-  
Magnetresonanztomographie**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizinischen Fakultät der  
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

**Daniela Irene Ponßen**

aus

Berlin

Göttingen 2023

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

**Betreuungsausschuss**

Betreuer: Prof. Dr. med. M. Sommer

Ko-Betreuer: Professor Dr. J. Frahm

**Prüfungskommission**

Referent/in: Prof. Dr. med. M. Sommer

Ko-Referent/in: .....

Drittreferent/in: .....

Datum der mündlichen Prüfung: .....

[Das Datum wird nachgetragen]

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "Darstellung von Artikulationsbewegungen stotternder Erwachsener in der Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den 14.01.2023

.....

(Unterschrift)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Theoretischer Hintergrund.....	1
1.1.1 Terminologie und Definition.....	1
1.1.2 Epidemiologie und genetische Faktoren.....	1
1.1.3 Symptomatik.....	3
1.1.4 Begleiterscheinungen und Komorbiditäten .....	3
1.1.5 Stottern und Artikulation in bildgebenden Studien .....	4
1.2 Die Magnetresonanztomographie .....	6
1.2.1 Historische Entwicklung.....	6
1.2.2 Physikalische Grundlagen der Magnetresonanztomographie .....	7
1.2.3 Das Schnellbildverfahren FLASH und die Entwicklung der Echtzeit- Magnetresonanztomographie.....	10
1.3 Hypothesen.....	11
1.3.1 Hypothese 1.....	11
1.3.2 Hypothese 2.....	11
1.3.3 Hypothese 3.....	12
1.3.4 Hypothese 4.....	12
1.3.5 Hypothese 5.....	12
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>13</b>
2.1 Patientenkollektiv.....	13
2.1.1 Gruppenprofil: .....	13
2.1.2 Stotternde Probanden .....	14
2.1.3 Kontrollgruppe.....	14
2.2 Studiendesign.....	15
2.2.1 Videoaufnahmen.....	15
2.2.2 MRT-Untersuchung .....	16
2.3 Analysedesign .....	19
2.3.1 Analyse der Stottersymptome .....	19
2.3.2 Statistische Analyse.....	21
<b>3 Ergebnisse .....</b>	<b>24</b>
3.1 Kohortenvergleich.....	24
3.2 Kernsymptome des Stotterns in der MRT-Darstellung.....	26
3.3 Ergebnisse der hypothesen-nahen Analyse.....	27
3.4 Hypothese 1: Stottern innerhalb versus außerhalb des MRT-Scanners.....	28
3.5 Hypothese 2: Der Einfluss linguistischer Faktoren .....	28

---

3.6	Hypothese 3: Einfluss des Stotterschweregrads auf Anzahl und Art der Stotterereignisse ....	34
3.7	Hypothese 4: Veränderte Bewegungsmuster innerer und äußerer Artikulatoren.....	40
3.8	Hypothese 5: Flüssige Sprache bei Stotternden .....	40
3.9	Hypothesenfreie Clusteranalyse.....	41
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>49</b>
4.1	Ziel der Studie .....	49
4.2	Limitationen der Studie.....	60
4.3	Ausblick.....	61
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	62
<b>5</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>67</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Artikulationsorte der deutschen Sprache.....	21
Abbildung 2: Stottertypische Sprechunflüssigkeiten bei stotternden (links) und nicht-stotternden Teilnehmern der Studie (rechts).....	25
Abbildung 3: QR-Code zum Video "Der Nordwind und die Sonne".....	26
Abbildung 4: QR-Code zum Beispielvideo "Pseudowörter".....	27
Abbildung 5: Verteilung der Stotterereignisse nach Proband.....	28
Abbildung 6: Verteilung der individuellen Stottersymptomatik nach Symptom und Proband.....	29
Abbildung 7: Verteilung der Stotterereignisse am Wortanfang oder in der Wortmitte.....	31
Abbildung 8: Stottersymptomatik sortiert nach Vokal/Konsonant pro Proband. ....	32
Abbildung 9: Artikulationsort je Proband.....	33
Abbildung 10: Verteilung der Artikulationsweise individuell nach Proband. ....	34
Abbildung 11: Vergleich der Basisdaten von leichtstotternden und schwerstotternden Probanden.....	36
Abbildung 12: Heatmap: Art der Stotterereignisse nach Schweregrad.....	39
Abbildung 13: Häufigkeit der Stotterereignisse geordnet nach Schweregrad und Art der Symptome.....	39
Abbildung 14: Multiple Korrespondenzanalyse aller Stotterereignisse.....	42
Abbildung 15: Multiple Korrespondenzanalyse für Vokale.....	43
Abbildung 16: Multiple Korrespondenzanalyse für Konsonanten.....	43
Abbildung 17: Multiple Korrespondenzanalyse für Konsonanten ohne palatale Ereignisse.....	44
Abbildung 18: Multiple Korrespondenzanalyse für Konsonanten ohne uvulare und palatale Ereignisse. ....	44
Abbildung 19: Heatmap der korrelationsbasierten Clusteranalyse der durchschnittlichen Stotterereignisse auf Grundlage des Stotterprofils pro Proband.....	47
Abbildung 20: Dendrogramm der korrelationsbasierte Clusterbildung der Probanden auf Grundlage ihres durchschnittlichen Stotterereignisprofils.....	48

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich epidemiologischer Daten der stotternden und flüssigsprechenden Kohorte.....	15
Tabelle 2: <i>Stuttering severity instrument</i> .....	16
Tabelle 3: Lautklassen der deutschen Sprache.....	20
Tabelle 4: Verteilung der Stottereignisse nach Wortart.....	30
Tabelle 5: Vergleich epidemiologischer Daten der leicht- und schwerstotternden Probanden.....	35
Tabelle 6: Modellkoeffizienten eines gemischten Effekt-Null-Inflationsmodells der Anzahl nach Schweregrad und Stottertyp.....	38
Tabelle 7: Metadaten der Clusterbildung der Probanden auf Grundlage des Stotterprofils.....	45

## Abkürzungsverzeichnis

APA	<i>American Psychiatric Association</i>
DIMDI	Deutsches Institut für medizinische Dokumentation und Information
DSM	Diagnostisches und statistisches Manual psychischer Störungen
EMA	Elektromagnetische Artikulographie
FLASH	<i>fast low angle shot</i>
ICD 10	Internationale Klassifikation der Krankheiten
MCA	Multiple Korrespondenzanalyse
MRT	Magnetresonanztomographie
SSI 4	<i>stuttering severity instrument</i>
UTI	Zungenultraschalluntersuchung
STU	Stottertypische Unflüssigkeit

# 1 Einleitung

## 1.1 Theoretischer Hintergrund

### 1.1.1 Terminologie und Definition

Stottern wird neben dem Poltern zu den Redeflussstörungen gezählt. In der Internationalen Klassifikation der Erkrankungen (ICD- 10) wird es unter der Überkategorie Verhaltens- und emotionale Störungen mit der Nummer F98.5 kodiert (DIMDI - ICD-10-GM 2020). Diese Redeflussstörung geht mit einer gestörten Sprechplanung und einem gestörten Sprechablauf einher. Die interdisziplinären Leitlinie der deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie definiert es in Anlehnung an das amerikanische Diagnostische und Statistische Manual der *American Psychiatric Association* als eine Erkrankung mit diskontinuierlichem Sprechfluss, der mit zeitlicher Verzögerung des Sprechablaufs einhergeht (APA 2013). Der gestörte Sprechfluss beim idiopathischen Stottern ohne organische Ursache beginnt in früher Kindheit und ist über längere Zeit andauernd. Bei den betroffenen Kindern findet sich mindestens eine für Stottern charakteristische sprachliche Unflüssigkeit (Neumann et al. 2017).

Zu den charakteristischen Unflüssigkeiten des Stotterns, auch als Kernsymptome bezeichnet, zählen Wiederholungen, Dehnungen von Lauten und Silben oder einsilbigen Wörtern und Blockaden vor oder in Wörtern und Silben. Außerdem finden sich bei Betroffenen Störungen im Sprechrhythmus und in der Sprechmotorik, sowie in Artikulation, Phonation und Atmung. Es finden sich im Vergleich zu Nichtstotternden funktionelle und morphologische Unterschiede auf neurologischer Ebene (Neumann 2010).

### 1.1.2 Epidemiologie und genetische Faktoren

Auf Grundlage der auslösenden Faktoren erfolgt die Einteilung des Stotterns in originäres und erworbenes Stottern. Als originäres neurogenes, nicht-syndromales Stottern wird jenes Stottern bezeichnet, welches im Kindesalter plötzlich und ohne erkennbaren Auslöser auftritt. Weiterhin kann das originär-neurogene Stottern begleitend bei Syndromen auftreten und wird in diesem Zusammenhang als originär neurogenes, syndromales Stottern bezeichnet.

Der Terminus des erworbenen Stotterns beschreibt das Auftreten der Symptomatik nach einer auslösenden Ursache wie akuter Hirnschädigung oder im Rahmen psychiatrischer Erkrankungen (Neumann et al. 2017).

Das originäre Stottern tritt meist spontan in der frühen Kindheit auf. Bei der Hälfte der Betroffenen liegt der Anfangszeitpunkt vor dem vierten Lebensjahr. In den meisten Fällen liegt das Auftreten schon zwischen dem zweiten und dritten Lebensjahr, in selteneren Fällen kann es bereits vor dem zweiten Lebensjahr auftreten (Andrews und Harris 1964; Bloodstein und Bernstein Ratner 2007).

Bis zu einem Lebensalter von fünf Jahren liegt die Inzidenz beim Stottern bei 11,2% (Reilly et al. 2013). Im Schulalter sind ca. 1,3 – 1,4% Kinder von Stottern betroffen (Craig et al. 2002; Craig und Tran 2005; Natke et al. 2006). Die Prävalenz variiert je nach Alter, Geschlecht und Methodik, international liegt sie im Alter zwischen dem zweiten und 18. Lebensjahr ungefähr bei einem Prozent (Bloodstein und Bernstein Ratner 2007). Für Schulkinder ergab eine australische Studie eine Prävalenz von 1,3% - 1,4% (Craig et al. 2002; Craig und Tran 2005). Im Erwachsenenalter ist die Prävalenz deutlich abnehmend. So variieren die Zahlen zwischen 0,2% bei weiblichen Erwachsenen und bei 0,8% bei männlichen Erwachsenen (Craig und Tran 2005). Die Inzidenz liegt deutlich höher als die Prävalenz, dies macht deutlich, dass die Remission beim Stottern eine tragende Rolle spielt (Neumann et al. 2017). So finden sich bei 70 – 80% der in der Kindheit von Stottern betroffenen Kinder bis zur Pubertät ein vollständiger Rückgang der Symptome (Craig und Tran 2005). Der größte Anteil dieser Remissionen tritt schon vor dem siebten Lebensjahr ein. Dabei zeigt sich eine Geschlechtsabhängigkeit der Remission. Mädchen haben eine höhere Remissionsrate als Jungen (Ambrose und Yairi 1999).

Das Geschlechterverhältnis der männlichen zu weiblichen Betroffenen liegt in der Kindheit bei 1,7 - 2,6 betroffenen Jungen zu einem betroffenen Mädchen (Andrews und Harris 1964; Yairi und Ambrose 1992). Im Jugend- und jungen Erwachsenenalter liegt das Geschlechterverhältnis bei vier bis fünf männlichen Betroffenen zu einer weiblichen Betroffenen (Craig und Tran 2005; Bloodstein und Bernstein Ratner 2007).

Die familiäre Häufung des Stotterns legt eine genetische Komponente des Stotterns nahe (Ambrose et al. 1997; Ambrose und Yairi 1999; Suresh et al. 2006; Kraft und Yairi 2012). In Zwillingsstudien waren eineiige Zwillinge häufiger von Stottern betroffen als gleichgeschlechtliche zweieiige Zwillinge. In 44,9% der Fälle waren eineiige Zwillinge betroffen, wohingegen die Konkordanz bei gleichgeschlechtlichen zweieiigen Zwillingen bei 12% lag (Godai et al. 1976; Howie 1981; Felsenfeld et al. 2000; Dworzynski et al. 2007).

Genetische Untersuchungen zeigen, dass genetische Disposition bei Stottern eine Rolle spielt. In molekulargenetischen Untersuchungen fanden sich auf den Chromosomen 1, 2, 3, 5, 7, 9, 12, 13, 15, 16, 18 und 21 Genorte, die mit einer Disposition für Stottern einhergehen (Suresh et al. 2006; Wittke-Thompson et al. 2007; Kang et al. 2010; Kraft und Yairi 2012).

### 1.1.3 Symptomatik

Man unterscheidet folgende Kernsymptome des Stotterns: Repetitionen, Prolongationen und Blockaden. Blockaden können weiterhin in stille und hörbare Blockaden unterschieden werden.

In einer Studie von Natke et al. (2006) werden Repetitionen als Wiederholungen von kurzen, einsilbigen Wörtern, Lauten und Silben beschrieben. Die Repetition von Wörtern mit mehr als einer Silbe sieht er dabei nicht als Stottern an. Bei Kleinkindern, die anfangen zu stottern, finden sich am häufigsten Repetitionen als Kernsymptomatik (Guitar 2014).

Persistieren Laute länger, als es der zu erwartenden Dauer des Lautes entspricht, wird dies als Prolongation bezeichnet. Die Zeitdauer dieser Prolongationen kann mehrere Sekunden überdauern und die Sprechgeschwindigkeit wird durch Prolongation einzelner Laute erheblich verringert.

Aufgrund ihrer phonetischen Lautbildung können Frikative, Nasale und Vokale von Prolongationen betroffen sein (Natke et al. 2006; Sandrieser und Schneider 2015). Bei Prolongationen nehmen die beteiligten Artikulationsmuskeln eine statische Position ein, sodass es zu einer Unterbrechung der Bewegung kommt. Der Fluss der Luft und die Lautproduktion an sich sind jedoch nicht unterbrochen (Natke et al. 2006).

Eine weitere Kernsymptomatik des Stotterns stellen Blockaden dar. Diese können unterschieden werden in stille und hörbare Blockierungen. Als hörbare Blockade wird ein ungewollter, hörbarer Abbruch des Sprechflusses bezeichnet, wohingegen stille Blockaden eine verzögerte Phonation aufweisen, die stimmlos geschieht (Sandrieser und Schneider 2015, S. 25).

Blockaden können sich auf Ebene der oralen Muskulatur (Lippen, Zungenmuskulatur, Gaumen- und Schlundmuskulatur, Muskulatur im Bereich des Larynx und Pharynx) und auf Ebene der Glottis bilden und außerdem die Atemmuskulatur betreffen. Dabei zeigt sich, dass entgegengesetzte Muskelgruppen zu stark aktiviert werden und teilweise der zur Lautbildung benötigte Luftstrom unterbrochen wird, sodass es zu einer Art Einfrieren der Lautbildung kommt, bei dem die Bewegung der beteiligten Muskeln zum Stillstand kommt (Sandrieser und Schneider 2015, S. 25).

### 1.1.4 Begleiterscheinungen und Komorbiditäten

Die Unterbrechung des Sprechflusses wird oft begleitet von Mitbewegungen der mimischen Muskulatur und anderer Körperteile, von Unterbrechung des Atemflusses, sowie von Stress-, Angst- und Vermeidungsreaktionen bei den Betroffenen (Wingate 1964). Diese Symptomatik kann von vielen Betroffenen nicht willentlich kontrolliert werden. Das DSM-5 führt Sprechangst, die Beeinträchtigung von Kommunikation, die Einbuße an sozialer Teilhabe und die Einschränkungen im schulischen und beruflichen Bereich als entscheidende Co-Merkmale des Stotterns (APA 2013).

Außerdem können Komorbiditäten begleitend zum Stottern auftreten. So zeigte sich bei stotternden Erwachsenen ein erhöhtes Risiko für alle Arten von Angststörungen (Iverach et al. 2009; Iverach und Rapee 2014). Insbesondere ist das Risiko erhöht, an einer generalisierten Angststörung, sozialen Phobie oder Panikattacken zu erkranken (Yaruss und Quesal 2004; Smith et al. 2010; Craig und Tran 2014). Stottern kann außerdem gehäuft im Kombination mit einer Tic- oder Tourette-Störung und im Rahmen genetischer Syndrome auftreten (Van Borsel und Tetnowski 2007; Neumann et al. 2017).

### 1.1.5 Stottern und Artikulation in bildgebenden Studien

Aus einem feinabgestimmten Zusammenspiel aus artikulatorischen und phoniatischen Organen entsteht die gesprochene Sprache. In der Lunge entsteht ein Luftstrom, der durch den Vokaltrakt aus Kehlkopf, Rachen, Mund, Nase und Lungen fließt. Bei Initiierung der Phonation fungieren die Stimmlippen als Ventil, die durch den Luftstrom aus den Lungen in Schwingungen versetzt werden. Sie wandeln den Luftstrom je nach Grad der Anspannung in hörbare Töne um. Zusammen mit den artikulatorischen Muskeln entsteht so eine komplexe Tonproduktion verschiedener Höhen und Tiefen.

Das Verständnis der menschlichen Sprachentstehung ist sowohl aus linguistischer als auch aus phonetischer Sicht von großem Interesse. Auch bei der Untersuchung von gestottertem Sprechen lag ein Fokus auf den Vorgängen im Bereich der Artikulatoren während des Sprechens. Schon seit den 1940er Jahren versuchten Wissenschaftler, veränderte Bewegungsmuster bei stotternden Probanden zu erfassen. Die Visualisierung der Artikulationsbewegungen während des Stotterns stellte lange Zeit eine große Herausforderung dar, da die Darstellung von Artikulationsbewegungen einer hohen zeitlichen Auflösung von bildgebenden Verfahren bedarf und die intraorale Darstellung der Artikulation bisher nur eingeschränkt möglich war.

Zunächst wurden vor allem elektromyografische, spektrografische und aerodynamische Studien durchgeführt, um Bewegungsmuster und muskuläre Aktivität der Artikulatoren während des Stotterns zu beurteilen. Der Fokus dieser Untersuchungsmethoden lag dabei hauptsächlich auf Kieferbewegungen und Lippen.

Travis (1934), Morley, Steer (beide 1937) und Williams (1955) fanden in elektromyografischen Studien bei Stotternden eine defekte Synchronisation der paarigen Muskeln und abnormale Aktionspotentiale in den paarigen Muskeln des Sprechapparats bei Stottersymptomatik. 1954 zeigten Sheehan und Voas, dass sich während eines Blocks die muskuläre Spannung der artikulatorischen Muskeln kontinuierlich aufbaut (Bloodstein und Bernstein Ratner 2007, S. 13).

Zimmermann (1980) nutzte Röntgen-Bewegungsbildfotographie, um die Bewegungen von Unterlippe, Kiefer und Zunge zu beurteilen. Er fand unter anderem heraus, dass es zu einer Neupositionierung der Artikulatoren kommt, welche einem Block folgt und vor allem in

einer Verlagerung des Kiefers, der Unterlippe nach unten und der Zunge besteht (Bloodstein und Bernstein Ratner 2007, S. 16).

In einer Studie von Shapiro (1980) zeigten Probanden mit Elektroden an Lippen und Zunge eine hohe muskuläre Aktivität während gestotterter Wörter sowie eine schlechtere Koordination der Muskeln. Thürmer, Thumfart und Kittel (1983) fanden exzessive Aktivität im *Musculus orbicularis oculi* und der Zunge während des Stotterns (Bloodstein und Bernstein Ratner 2007, S. 13).

Ann Smith zeigte 1989 bei 6 von 10 Stotternden hochfrequente Oszillationen in den Muskeln von Hals, Lippen und Kiefer. 1991 fand sie zusammen mit Denny und Wood ähnliche tremorartige Oszillationen, die zeitnah zu Stotterereignissen auftraten (Bloodstein und Bernstein Ratner 2007, S. 14).

Ann Smith et al. (2010) untersuchten in einer weiteren Studie den Einfluss der phonologischen Komplexität in der Sprachmotorik von stotternden Erwachsenen. In einer Studie mit Nicht-Wort-Wiederholungen unterschiedlicher Länge zeigte sich in den kinematischen Aufzeichnungen ein erheblicher Unterschied zwischen Untersuchungs- und Kontrollgruppe. Stotternde Erwachsene zeigten weniger konsistente koordinative Muster. Mit zunehmender Länge und Komplexität der Nichtwörter wurde der Gruppenunterschied ausgeprägter. Diese Ergebnisse unterstützen ein multifaktorielles, dynamisches Modell des Stotterns und zeigen, dass sprachliche und semantische Komplexität und Wortlänge Faktoren sind, die Stotterereignisse begünstigen können. Daran anknüpfend fanden Smith et al. 2012 in einer weiteren Studie bei einer Gruppe von Stotternden weniger stabile Lippenbewegungszyklen in der gestotterten Sprache und eine höhere Variabilität in der Lippenöffnung bei Stotternden.

In keiner der zuvor angewendeten Untersuchungsmethoden gelang es den Sprechakt oder gestotterte Sprechabschnitte zufriedenstellend und in Echtzeit darzustellen.

Alle vorhergehenden Untersuchungsmethoden erlaubten zwar in Ansätzen eine Untersuchung von Artikulationsbewegungen, es blieb jedoch weiterhin schwierig, den vollständigen oralen Sprechapparat während des Sprechens mit hoher zeitlicher Auflösung zu untersuchen. Auch die Zunge als wichtiger Artikulationsmuskel konnte mit Hilfe dieser Techniken nur marginal beurteilt werden.

Dies gelang erst durch die Entwicklung von Untersuchungstechniken wie der elektromagnetischen Artikulographie (EMA) und des *ultrasound tongue imaging* (UTI) (Platt und Basili 1973; McClean et al. 1984; Heyde et al. 2016).

Für die elektromagnetische Artikulographie werden mehrere elektromagnetische Spulen auf den vorderen Zungenabschnitts mittig in der sagittalen Ebene gesetzt. Diese Spulen zeichnen die Bewegungen der Zunge anhand der vier Messpunkte dreidimensional auf. Zur genauen Analyse werden die kinematischen Messdaten auf 2D in einer kranialen midsagittalen Ebene reduziert.

Bei der Zungenultraschalluntersuchung wird der Ultraschallkopf zwischen Unterkieferknochen und Hyoidknochen aufgesetzt und erfasst ein Bild der Zunge in der midsagittalen Ebene der Zunge. So gelingt die Erfassung der Bewegung der ganzen Zungenoberfläche in einer Schichtung mit kranialer midsagittaler Ausrichtung. Es können sowohl Bewegungsdaten der Zungenoberfläche als auch der inneren Zungenmuskeln erfasst werden. Die Messung der Bewegung der Zunge ist in der Ultraschalluntersuchung nicht auf vier Messpunkte beschränkt, sondern es lässt mit dieser Untersuchungstechnik die vollständige Zungenoberfläche abbilden (Heyde et al. 2016).

Trotz aller Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Artikulographie blieb die Untersuchung von Artikulationsbewegungen weiterhin schwierig. Diese Situation veränderte sich mit der Erfindung der Echtzeit-Magnetresonanztomographie. Diese Untersuchungsmethode ermöglicht die zeitgleiche Darstellung der Sprechbewegungen des gesamten Vokaltrakts zwischen Lippen und Stimmlippen. Mit allen bisher angewendeten Untersuchungsmethoden gelang es nur, jeweils einen kleinen Anteil des Sprechapparats darzustellen. Meist scheiterte die Untersuchung an einer zu geringer zeitlicher Auflösung oder an der nur beschränkt anwendbaren Aufnahmemethodik mit behindertem Sprechfluss durch intraoral angebrachte Elektroden (Platt und Basili 1973; McClean et al. 1984).

Im Fokus der dieser Dissertation zugrunde liegenden Studie steht die Darstellung von dynamischen Artikulationsprozessen mit Hilfe der Weiterentwicklung der Magnetresonanztomographie zur dynamischen Echtzeit-Magnetresonanztomographie. In früheren Studien unter Verwendung der Magnetresonanztomographie standen vor allem die Bildgebung von strukturellen und funktionellen Veränderungen im Gehirn von stotternden Menschen im Fokus der Untersuchungen (Belyk et al. 2015).

Die Artikulation wurde jedoch mittels Magnetresonanztomographie bisher nicht untersucht. Erst durch die Weiterentwicklung der Magnetresonanztomographie durch Prof. Dr. Jens Frahm und Kollegen zu einem Echtzeit-Verfahren mit hoher Auflösung, ist es nun erstmalig möglich, große Teile des oralen Sprechapparats dynamisch und simultan darzustellen und zu beurteilen. Dies wird mit einer hohen zeitliche Auflösung mit 30 bis 100 Bildern pro Sekunde erreicht, zu der zeitgleich die zugehörige Tonspur aufgezeichnet werden kann (Uecker et al. 2010b; Zhang et al. 2010).

## **1.2 Die Magnetresonanztomographie**

### **1.2.1 Historische Entwicklung**

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist mittlerweile aus der medizinischen Bildgebung kaum mehr wegzudenken. Dieses bildgebende Verfahren ermöglicht schonende und nicht-invasive Aufnahmen von Körperstrukturen ohne potenziell schädliche Röntgenstrahlen. Besonders wasserhaltige Weichteilstrukturen und Nervengewebe sind mit Hilfe der

Magnetresonanztomographie gut darstellbar. So entstehen Schnittbilder beliebiger Ebenen des menschlichen Körpers. Als Grundlage der Bilderzeugung dienen ein starkes Magnetfeld und die besonderen Eigenschaften der magnetischen Kerndipole des Wasserstoffs. Die magnetischen Dipole werden im starken Magnetfeld mit Radiofrequenz-Impulsen in einen energetisch höheren Zustand gehoben. Die Zeiten für die Rückkehr in den Grundzustand hängen von der Energiedissipation im Gewebe ab und werden zusammen mit der Intensität (Anzahl der Wasserstoffatome) gemessen. Die durch die Relaxationszeiten T1 und T2 gewichtete Intensität der einzelnen Gewebepunkte werden in Schnittbilder umgerechnet und dargestellt.

Die naturwissenschaftlichen Grundlagen, auf denen die Bildberechnung in der Magnetresonanztomographie beruht, wurde bereits um 1800 durch den französischen Mathematiker Jean-Baptiste Fourier gelegt und 1946 von Felix Bloch und Edward Mills weiterentwickelt. Die eigentliche Magnetresonanztomographie wurde 1973 von Paul Lauterbur erfunden, als dieser seine Erkenntnisse zur Ortskodierung beschrieb. Zunächst konnte sich die vielversprechende Erfindung Lauterburs allerdings nicht durchsetzen, da die Messungen sehr aufwändig waren und sehr lange dauerten. Dies änderte sich ab 1985, als der Physiker Jens Frahm und Kollegen das sogenannte FLASH-Verfahren entwickelten, welches die Messzeiten verkürzte und die Messungen alltagstauglicher machten. Dieses Schnellbildverfahren verkürzte die Messzeit um ein Vielfaches und so gelang der Durchbruch der Magnetresonanztomographie in der medizinischen Schnittbildgebung (Matthaei et al. 1985; Haase et al. 1986). Mittlerweile ist die herkömmliche Magnetresonanztomographie aus der Diagnostik kaum mehr wegzudenken.

Die Weiterentwicklung der Magnetresonanztomographie zu einem Echtzeitverfahren gelang dem Team um Jens Frahm im Jahr 2010. Mit Hilfe eines neuen mathematischen Verfahrens, welches für die Rekonstruktion der Bilder nur noch einen Bruchteil der ursprünglichen Datensätze benötigte, gelang es, dynamische Prozesse im Körper im Videoformat mit bis zu 100 Bildern pro Sekunde darzustellen (Uecker et al. 2010b; Zhang et al. 2010).

### 1.2.2 Physikalische Grundlagen der Magnetresonanztomographie

Grundlage der magnetresonanztomographischen Schnittbilder sind Wasserstoffatome und starke Magnetfelder.

Jedes Wasserstoffatom enthält ein Proton im Kern und ein Elektron in der Hülle. Die Kerne von Atomen mit ungerader Nukleonenzahl besitzen einen sogenannten Eigendrehimpuls, das heißt, die Atomkerne drehen sich um ihren eigenen Schwerpunkt. Diesen Eigendrehimpuls, auch Spin genannt macht man sich in der MRT zunutze, durch ihn werden die Protonen zu einer Art kleinem Magneten. Die Rotationsachsen des Spins sind dabei normalerweise ungeordnet und zufällig im Raum ausgerichtet. (Weishaupt et al. 2014).

Der Funktionsweise der Magnetresonanztomographie liegt ein starkes Magnetfeld zugrunde. In diesem Magnetfeld richten sich die Rotationsachsen der Atomkerne entlang der Linien des Magnetfelds parallel oder antiparallel aus, wie bei einem Kompass. Die parallele oder antiparallele Ausrichtung der Atomkerne geschieht dabei zufällig. Die Rotationsachsen richten sich dabei stärker im energetisch günstigeren Zustand aus. Entsprechend entsteht ein Gesamtvektor in der Längsausrichtung des Magnetfelds. Dieser Längsvektor wird auch Längsmagnetisierung genannt. Neben der Rotation um die eigene Achse rotieren die Protonen auch kreiselartig um die Feldlinien des Magnetfelds. Diese Kreiselbewegung wird auch Präzessionsbewegung genannt. Sie erfolgt in einer bestimmten charakteristischen Frequenz. Diese Frequenz bezeichnet man als Larmorfrequenz und sie ist von der Stärke des Magnetfelds abhängig (Weishaupt et al. 2014; Rinck 2019).

Für die Entstehung von Schnittbildern müssen die Protonen angeregt werden. Dies geschieht durch kurzzeitiges Einstrahlen eines kurzen Hochfrequenzimpulses in das Magnetfeld. Dieser Hochfrequenzimpuls hat die gleiche Frequenz wie die Larmorfrequenz der Wasserstoffatomkerne. Durch das Einstrahlen dieses Impulses werden alle Kreiselbewegungen der Atomkerne für kurze Zeit synchronisiert (Phasenkohärenz). Einige Rotationsachsen der Protonen werden in der Folge verändert und die Kreiselbewegung der Wasserstoffatomkerne erfolgt phasengleich um die Längsachse des Magnetfelds. Daraus resultiert ein um  $90^\circ$  gekippter Gesamtvektor in der Transversalebene, der Quervektor genannt wird. Nach dem Abschalten des Hochfrequenzimpulses streben die Protonen wieder zurück in den energieärmeren Ausgangszustand und geben dabei Energie an das umliegende Gewebe ab. Die unterschiedlich schnelle Wiederausrichtung der Wasserstoffatomkerne entlang der Feldlinien (Dephasierung) hängt unter anderem vom untersuchten Gewebetyp und der uneinheitlichen Verteilung des Magnetfelds ab. Die Zeit, die die Protonen dazu benötigen, um wieder in den ursprünglichen Zustand zu gelangen, wird als Relaxation bezeichnet. Durch das Zurückkippen der Rotationsachsen in den Ausgangszustand kippt der Hauptvektor allmählich in Richtung der Magnetfeldlinien zurück. Hierbei nimmt der Längsvektor wieder zu (longitudinale T1-Relaxation), der Quervektor nimmt hingegen ab (transversale T2-Relaxation). Die beiden Relaxationen laufen parallel, aber unabhängig voneinander ab (Nitz et al. 2007; Weishaupt et al. 2014; Rinck 2019).

Für die Entstehung eines MRT-Bildes sind mehrere Faktoren entscheidend. Jeder Abschnitt des zu untersuchenden Körpers muss mehrfach hintereinander in einzelnen Messungen angeregt werden, um ein Bild errechnen zu können. Für die Entstehung eines Kontrasts sind dabei die sogenannten T1- und T2-Wichtungen verantwortlich. Als T1-Wichtung bezeichnet man dabei die Zeit, die zwischen den Anregungen der Protonen liegt und in der sich diese wieder entlang der Feldlinien ausrichten. Die Größe der Längsmagnetisierung und damit die Signalstärke bei erneuter Anregung ist dabei direkt abhängig von der Zeitdauer der Repetitionszeit der einzelnen Messungen. Die Echozeit bestimmt die T2-Wichtung. Sie bezeichnet die Zeit zwischen der Hochfrequenzanregung

und dem Zeitpunkt, an dem das Signal gemessen wird. Um die unterschiedlichen Schichten des Körpers jeweils unabhängig voneinander anregen zu können, schaltet man zum ursprünglichen Magnetfeld ein zusätzliches räumlich variables Magnetfeld (auch z-Gradient genannt) hinzu. Am Kopf wird dadurch das Magnetfeld verstärkt, am Fuß ist die Stärke etwas geringer. Dadurch verändert sich auch die charakteristische Larmorfrequenz des jeweiligen Abschnitts, die benötigt wird, um die Teilchen der jeweiligen Schicht anzuregen (Nitz et al. 2007; Weishaupt et al. 2014; Rinck 2019).

Die Dicke der Schichten und die Position der Strukturen im MRT-Bild werden durch den oben genannten zusätzlich gewählten Magnetfeldgradienten in Kombination mit dem hinzugeschalteten Hochfrequenzimpuls bestimmt. Um aus den erhaltenen Daten ein Bild zu berechnen und festzustellen, wo die Protonen im Raum liegen, wird eine Art künstliches Koordinationsystem über den Patientenkörper gelegt. Dies wird als Ortskodierung bezeichnet. Hierfür wird kurz nach der Einstrahlung des Hochfrequenzimpulses ein kurzer weiterer Magnetfeldimpuls hinzugeschaltet (y-Gradient). Das führt dazu, dass die Protonen im oberen Teil der MRT-Röhre eine etwas schnellere Kreisbewegung um die Feldlinien durchführen als die weiter unten liegenden Protonen. Durch den zusätzlich hinzugeschalteten Impuls werden die schon angeregten Protonen also in ihrer Phase verschoben, dadurch kann man anhand der Phase jede einzelne Zeile von oben nach unten senkrecht erfassen (Phasenverschiebung). Um die Lage der Teilchen in der waagerechten Ebene zu erfassen, wird zusammen mit dem z-Gradienten ein weiterer Impuls in der dritten Raumrichtung hinzugeschaltet (x-Gradient). Dadurch entsteht auch von links nach rechts in der Waagerechten ein zusätzliches Gefälle im Magnetfeld und die Stärke der Kreisbewegung der Protonen um die Feldlinien des Magnetfelds (Präzessionsbewegung) nimmt von links nach rechts ab (Frequenzverschiebung). Hierbei verändern sich auch die spezifischen Larmorfrequenzen von links nach rechts und bei der Messung des Signals werden viele verschiedene Frequenzen empfangen, sodass sich auch in der Waagerechten eine spezifische Frequenzinformation für jede Schicht ergibt. Aus den drei Informationen aus den drei Dimensionen im Datenraum lässt sich nun jedes Volumenelement, auch Voxel genannt, genau nach Lage festlegen und es kann daraus ein genaues Bild des zu untersuchenden Körpers berechnet werden (Nitz et al. 2007; Weishaupt et al. 2014; Rinck 2019).

Im Gegensatz zu Röntgenuntersuchungen und der Computertomographie erfolgt die Untersuchung in der Magnetresonanztomographie ohne ionisierende Strahlung, was einen erheblichen Vorteil der Untersuchungsform darstellt. Langzeitschäden für die Gesundheit sind bisher nicht bekannt (Weishaupt et al. 2014).

Nachteilig war bisher die - im Vergleich zu bildgebenden Verfahren wie Röntgen und Computertomographie - verhältnismäßig lange Untersuchungsdauer. Auch die potenzielle Wechselwirkung des Magnetfelds mit ferromagnetischen Metallen, welche eine

Untersuchung von Patienten mit metallischen Implantaten nicht oder nur eingeschränkt möglich macht, schränken die Anwendbarkeit der MRT-Technik teilweise ein.

### 1.2.3 Das Schnellbildverfahren FLASH und die Entwicklung der Echtzeit-Magnetresonanztomographie

Bei der Echtzeit-Magnetresonanztomographie handelt es sich um eine Weiterentwicklung der sogenannten FLASH-Technik. Diese wurde erstmalig 1986 von Haase et al. beschrieben. Hierzu werden kurze Echozeiten, schnelle Messsequenzen und eine sogenannte radiale *fast low angle shot* -Technik (FLASH) kombiniert. Es handelt sich dabei um eine Gradienten-Echo-Sequenz, bei der die Hochfrequenzimpulse nur eine kleine Leistung, das heißt einen kleinen Kippwinkel besitzen. Dadurch trifft nach ersten Messung ein weiterer Hochfrequenzimpuls auf eine weiterhin hinreichende Longitudinalmagnetisierung. Entsprechend kann die Repetitionszeit einzelnen Messungen sehr klein sein und es stellt sich ein ausgewogenes Verhältnis aus Anregungszustand und Relaxationszustand ein. Anschließend wird ein weiterer Gradient am Ende der Repetitionszeit geschaltet und die Transversalmagnetisierung beendet. Durch die eingesetzte FLASH-Technik wird die Untersuchungszeit erheblich reduziert macht die Aufzeichnung der Bilder weniger anfällig für Artefakte. Das FLASH-Verfahren bietet neben einer hohen zeitlichen Auflösung auch eine hohe Ortsauflösung (Zhang et al. 2010).

Wird das FLASH-Verfahren mit einer radialen räumlichen Codierung kombiniert, wird der Datenraum bei der Messung radial wie bei den Speichen eines Rades abgetastet. Durch gleichzeitige Unterabtastung des Raums gelingen sehr kurze Messzeiten, die eine völlig neuartige Berechnung der Bilder als nichtlineares, inverses Problem erforderlich machen. Dabei werden nicht notwendige Daten einfach weggelassen und es sind beispielsweise nur 5% der eigentlichen Daten erforderlich, um ein dynamisches Bild zu erzeugen. Die Bildverarbeitung erfolgt iterativ mittels nicht-linearer Inversion. Diese wird zusätzlich um eine zeitliche Regularisierung erweitert wurde. Dieser Ansatz nutzt die Ähnlichkeit aufeinanderfolgender Bilder mathematisch aus und passt damit das Verfahren an die Aufnahme von dynamischen Bildserien an. Mittels kurzer Echozeiten werden Artefakte reduziert und die Datenverarbeitung erlaubt eine Erfassung hoher Datenmengen und eine Rekonstruktion von Bildern hoher zeitlicher Auflösung in kurzer Zeit (Uecker et al. 2010a; Zhang et al. 2010).

Diese technische Weiterentwicklung der herkömmlichen MRT-Technik wird sehr erfolgreich zur Darstellung von dynamischen Prozessen im Körper genutzt. In der nicht-invasiven kardiologischen Bildgebung und in der Darstellung des Schluckakts zu diagnostischen Zwecken stellt sie mittlerweile ein etabliertes diagnostisches Verfahren dar (Uecker et al. 2010a; Zhang et al. 2010). Daran anknüpfend entstand auch die Idee, die Echtzeit-MRT für die Darstellung des Sprechakts bei stotternden Probanden zu nutzen.

Die Darstellung des Sprechakts erforderte vor Einführung der Echtzeit-Magnetresonanztomographie einige technische Anstrengungen. So ließ sich die Charakterisierung des Stotterns auf artikulatorischer Ebene bisher immer nur eingeschränkt durchführen. Die einfache Anwendbarkeit der Echtzeit-MRT ermöglichte es sehr anwenderfreundlich und nicht-invasiv, den Nasen- und Rachenraum beim Sprechakt und auch die Bewegungsmuster von stotternden Probanden zu analysieren und mit den Bewegungsmustern von Flüssigsprechenden zu vergleichen. Die neuartige Echtzeit-Magnetresonanztomographie erlaubt erstmalig die Darstellung von Sprechbewegungen bei gestottertem Sprechen. Auf Basis der in der Echtzeit-Magnetresonanztomographie entstandenen Sprechproben entwickelten wir folgende Hypothesen:

### 1.3 Hypothesen

#### 1.3.1 Hypothese 1

Durch verschiedene Umgebungsbedingungen kann das Auftreten von Stottersymptomen reduziert werden. Zu diesen Konditionen zählen beispielsweise das Sprechen mit einem externen Metronom (Brady 1969; Davidow 2014) oder auditives Feedback wie dem Hören der eigenen Stimme während des Sprechens (Picoloto et al. 2017). Die Messung in der Magnetresonanztomographie ist trotz Gehörschutz mit einer Geräuschkulisse für die Teilnehmenden der Studie verbunden, sodass das Geräusch des Scanners einen metronomartigen Effekt auf die Auftretenswahrscheinlichkeit des Stotterns haben könnte.

Daran anknüpfend vermuteten wir, dass die Messung innerhalb der Magnetresonanztomographie zu einer Reduktion der Stottersymptomatik führt im Gegensatz zur analysierten Videoaufnahme von Sprechsituationen außerhalb des MRT-Scanners.

Als Alternativhypothese formulierten wir, dass Stotterereignisse innerhalb und außerhalb des Scanners gleich häufig auftreten.

#### 1.3.2 Hypothese 2

Schon früh wurde der Einfluss linguistischer Faktoren auf das Auftreten von Stottern untersucht (Brown 1938; Bernstein 1981; Logan und Conture 1995). So ist es beispielsweise wahrscheinlicher, dass Sprechunflüssigkeiten bei längeren, syntaktisch anspruchsvolleren Wörtern auftreten (vgl. Buhr und Zebrowski 2009).

In Anlehnung daran vermuten wir, dass das Auftreten von Stotterereignissen bei den untersuchten stotternden Probanden nicht zufällig verteilt, sondern von linguistischen Faktoren beeinflusst wird.

Als Alternativhypothese resultiert hier, dass linguistische Faktoren keinen Einfluss auf das Auftreten von Stottern haben.

### 1.3.3 Hypothese 3

Es erscheint logisch, dass der Stotterschweregrad einen Einfluss auf die Ausprägung der Stottersymptome hat. Zur Objektivierung dieser naheliegenden Vermutung formulierten wir die Hypothese, dass sich alle relevanten Stotterereignisse bei Schwerstotternden häufiger als bei Leichtstotternden finden. Andererseits vermuteten wir, dass sich hinsichtlich der Qualität der Stotterereignisse der schwerstotternden Probanden kein Unterschied zwischen den schwer- und den leichtstotternden Probanden finden lassen.

Als Alternativhypothese formulierten wir, dass die relevanten Stotterereignisse bei Leicht- und Schwerstotternden gleich häufig auftreten und dass durchaus qualitative Unterschiede in der Art der Stotterereignisse zwischen Leicht- und Schwerstotternden bestehen.

Für die Einschätzung des Stotterschweregrads nutzen wir die vierte Version des *stuttering severity instruments* (Riley 2009).

### 1.3.4 Hypothese 4

Die Echtzeit-Magnetresonanztomographie ermöglicht eine Darstellung dynamischer Prozesse des Körpers in hoher zeitlicher Auflösung mit 30 bis 100 Bildern pro Sekunde (Uecker et al. 2010b; Zhang et al. 2010). So lassen sich dynamische Prozesse im Körper nahezu in Echtzeit darstellen und ermöglichen eine non-invasive Diagnostik. Auch der gestotterte Sprechakt und die Bewegungsmuster der meisten Artikulatoren während des Stotterns lassen sich mit Hilfe der dynamischen Echtzeit-Magnetresonanztomographie beurteilen.

Daraus resultiert als vierte Hypothese unserer Studie, dass die Bewegungsmuster der äußeren und inneren Artikulatoren bei stotternden Probanden im Vergleich zu flüssigsprechenden Probanden auffällig sind.

Als erste Teilhypothese vermuten wir, dass sich hörbare Stotterereignisse in auffälligen Bewegungen der inneren und äußeren Artikulatoren widerspiegeln.

In einer zweiten Teilhypothese nehmen wir an, dass sich die unhörbaren Stotterereignisse in stummen Blocks widerspiegeln.

Als Alternativhypothese resultierte, dass sich bei Stotternden keine auffälligen Bewegungsmuster finden lassen.

### 1.3.5 Hypothese 5

Anknüpfend an die vierte Hypothese lassen sich diese bei Stotternden veränderten artikulatorischen Muster nicht bei flüssigsprechenden Probanden und auch nicht in den flüssigen Sprechabschnitten der stotternden Probanden finden.

Als Alternativhypothese folgte daraus, dass die veränderten Bewegungsmuster auch bei flüssigsprechenden Probanden zu finden sind.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Patientenkollektiv

Insgesamt wurden 18 stotternde Probanden und 16 nicht-stotternde Probanden in die Studie eingeschlossen. Die Gruppe der stotternden Probanden umfasste 3 Frauen und 15 Männer. Die Kontrollgruppe der flüssig-sprechenden Teilnehmer setzte sich aus vier Frauen und zwölf Männern zusammen. Während der Messungen entstand eine Fülle an Videomaterial gestotterter und nicht-gestotterter Sprechbeispiele. Aufgrund der großen Datenmenge als Grundlage vieler Fragestellungen beschränkten wir uns in der vorliegenden Arbeit zunächst nur auf die semiquantitative Analyse der stotternden Kohorte. In weiteren Analysen, die auf den Grundlagen der vorliegenden Arbeit aufbauen, soll der Fokus in einem nächsten Schritt auf den Vergleich zwischen Stotternden und Nichtstotternden gelegt werden. Dieser Vergleich ist Inhalt weiterer, derzeit laufender oder geplanter Dissertationen und soll an entsprechender Stelle vertieft werden.

Für die epidemiologischen Daten und die Zahlen zum Kohortenvergleich werden im Fließtext Zahlenwerte mit Standardabweichungen (SD) in der Form Zahlenwert  $\pm$  SD angegeben. Aus Vereinfachungsgründen wird nicht jedes Mal die Abkürzung SD angegeben, bei Zahlenwerten mit der Angabe des Zeichens  $\pm$  und einem weiteren folgenden Zahlenwert handelt es sich entsprechend um die Angabe der Standardabweichung.

#### 2.1.1 Gruppenprofil:

Um ein einheitliches Gruppenprofil zu erhalten, wurden den Einschlusskriterien folgende Punkte als Kriterien hinzugefügt: Grad der Ausbildung, Händigkeit und Geschlecht.

Der Grad der Ausbildung wurde durch ein Punktesystem erfasst: 1  $\hat{=}$  Haupt- oder Realschulabschluss, 2  $\hat{=}$  Abitur/abgeschlossene Berufsausbildung, 3  $\hat{=}$  Studium vor Bachelor/ Vordiplom/ Physikum, 4  $\hat{=}$  abgeschlossenem Bachelor/ Vordiplom/ Physikum, 5  $\hat{=}$  Diplom/ Master/ Staatsexamen und 6  $\hat{=}$  Promotion/ Habilitation.

Die Händigkeit wurde mit Hilfe des *Edinburgh handedness score* berechnet (Oldfield 1971). Dieser Fragebogen erfasst jeweils die Links- oder Rechtshändigkeit des Probanden. Dazu werden zehn Tätigkeiten genannt. Für jede dieser Tätigkeiten muss der Proband festlegen, ob er die Tätigkeit eher mit der linken oder der rechten Hand durchführt. Es können dafür 20 Punkte vergeben werden. Anschließend wird daraus ein Lateralisierungsquotient errechnet. Dieser liegt zwischen +100 (vollständige Rechtshändigkeit) und -100 (vollständige Linkshändigkeit).

In älteren Studien gab es Hinweise darauf, dass es Zusammenhänge zwischen Stottern und der Händigkeit bestehen könnten. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass die Variable Händigkeit ein prognostischer Faktor für die Persistenz von idiopathischem Stottern in jungen Jahren darstellt (Johannsen 2001). Mit dem Händigkeitsinventar wollten wir einerseits eine vergleichbare ausgeglichene Händigkeit in beiden Gruppen garantieren. Andererseits sollte damit festgelegt werden, dass sich die stotternde und die flüssig-sprechende Kohorte nur durch den Stotterschweregrad signifikant unterscheiden und ansonsten ähnliche Gruppenzusammensetzungen bestehen. In

Tabelle 1 sind die epidemiologischen Daten der stotternden Kohorte im Vergleich zur flüssig-sprechenden Kontrollgruppe dargestellt.

Für die epidemiologischen Werte beider Kohorten und der Zahlenwerte zum Gruppenvergleich werden im Folgenden jeweils immer Zahlenwerte mit Standardabweichungen angegeben in der Form „Zahlenwert  $\pm$  Standardabweichung (SD)“. Aus Gründen besserer Lesbarkeit wird darauf verzichtet, dass es sich bei oben genannter Darstellung von Zahlenwerten um die Angabe einer Standardabweichung handelt.

### **2.1.2 Stotternde Probanden**

Die Teilnehmer der Untersuchungsgruppe wurden aus dem Online-Forum der Bundesvereinigung Stottern und Selbsthilfe, über Emailverteiler der Flow-Gruppen (Junge Stotterselbsthilfe) und Emailverteiler weiterer Stotterselbsthilfegruppen in ganz Deutschland rekrutiert. Das Durchschnittsalter der stotternden Probanden lag bei  $29 \text{ SD} \pm 8,21$  Jahren. Für die Händigkeit der stotternden Probanden ergab sich ein Wert von  $71,8 \pm 43,86$ . Der Bildungsgrad der stotternden Teilnehmer lag bei  $3,6 \pm 1,58$ .

Probanden konnten in der stotternden Kohorte eingeschlossen werden, wenn ihr Stottern seit der Kindheit bestehend war und nicht durch organische Ursachen zu erklären war, wenn die Probanden zwischen 18 und 60 Jahren alt waren, keine internistischen oder psychiatrischen Vorerkrankungen bestanden, keine Hörstörung und des Weiteren keine Kontraindikationen gegen eine MRT-Untersuchung (Metallimplantate etc.) vorlagen.

### **2.1.3 Kontrollgruppe**

Die Rekrutierung der flüssig-sprechenden Studienteilnehmer erfolgte über Aushänge in der Universitätsklinik Göttingen, sowie über Anzeigen im StudIP der Universität Göttingen. Das Durchschnittsalter der flüssig-sprechenden Kohorte betrug  $26,1 \text{ Jahre} \pm 2,32$ . Für die Händigkeit der Kontrollgruppe ergab sich ein Wert von  $37,26 \pm 66,74$ . Der Bildungsgrad der flüssig-sprechenden Probanden lag bei  $4,19 \pm 0,54$ .

Um als Probanden in die Kontrollgruppe eingeschlossen werden zu können, durfte kein Stottern oder andere sprachliche Unflüssigkeiten vorliegen, keine Hörstörung oder eine logopädische Vorbehandlung bestehen. Außerdem war ein Alter zwischen 18 und 60

Jahren erforderlich, zudem durfte es keine positive Familienanamnese hinsichtlich Stottern geben. und keine Kontraindikationen hinsichtlich einer MRT-Untersuchung.

Tabelle 1: Vergleich epidemiologischer Daten der stotternden und flüssigsprechenden Kohorte

Epidemiologische Daten	Stotternde Probanden	Flüssigsprechende Probanden	Signifikanzniveau
Anzahl Probanden	18 (m = 15, w = 3)	16 (m = 12, w = 4)	-
Alter	29 ± 8,21	26,1 ± 2,32	p = 0,002 (nicht signifikant)
Händigkeit	71,84 ± 43,86	37,26 ± 66,74	p = 0,066 (nicht signifikant)
Bildungsgrad	3,6 ± 1,58	4,19 ± 0,51	p = 0,138 (nicht signifikant)
SSI-Score gesamt	22,94 ± 8,04	5,3 ± 2,3	p < 0,001 (signifikant)

## 2.2 Studiendesign

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Universitätsmedizin Göttingen mit der Nummer 38/2/16 vom 07.11.2016 genehmigt.

Vor Beginn wurden die Teilnehmer über Untersuchungsablauf, Risiken und Studienziel aufgeklärt. Es erfolgte eine schriftliche Einwilligung nach Ausschluss möglicher Kontraindikationen.

### 2.2.1 Videoaufnahmen

Vor der MRT-Untersuchung wurden mehrere Sprechproben der Probanden auf Video aufgezeichnet. Diese Sprechproben wurden von der Logopädin Bettina Helten mit Hilfe des Stuttering Severity Index im Hinblick auf potentielle Sprechunflüssigkeiten ausgewertet (Riley 2009). Für die Analyse zur Einschätzung des Stotterschweregrads wurden je ein Lesetext und eine etwa fünfminütige Sequenz mit Spontansprache aufgezeichnet. Aus diesen Sequenzen wurden anschließend die gestotterten Silben in Bezug auf die Gesamtzahl der gesprochenen Silben ermittelt. Dabei wurden die Dauer der auftretenden Stotterereignisse und die Frequenz dieser Ereignisse erfasst, sowie Begleitbewegungen und Begleitgeräusche während des Sprechens. Hieraus ergab sich für jeden Probanden ein Punktwert. Anhand des Punktwerts resultiert ein Score, der den Schweregrad der Symptomatik kategorisiert, welcher von sehr mild bis sehr schwer reicht. In Tabelle 2 ist die Verteilung des Schweregrads des Stotterns anhand des *stuttering severity instrument* gezeigt.

Dieser SSI-Score diene bei den stotternden Probanden zur Einschätzung des Schweregrad des Stotterns, jedoch nicht zur Erstdiagnose. Bei allen Teilnehmern der stotternden Kohorte war zuvor bereits durch einen Logopäden die Diagnose „Idiopathisches Stottern“ gestellt worden.

In der Gruppe der flüssigprechenden Teilnehmer wurden durch die Videoaufnahme Sprechunflüssigkeiten ausgeschlossen.

Die Videoaufnahmen umfassten zwei Sequenzen: den Lesetext „Der kleinste Schneesturm“ und eine Sequenz aus Spontansprache. Diese Videosequenz spontanen Sprechens umfasste die Beantwortung von fünf standardisierten Fragen in fünf Minuten, um ausreichend spontane Sprache mit einem Umfang von 500 Wörtern zu generieren. Die fünf standardisierten Fragen betrafen die Beschreibung der aktuellen beruflichen Situation/ des Studiums, persönliche Hobbies, zuletzt gesehene Serien oder zuletzt gelesene Bücher und etwaige Nebenjobs.

Für die stotternden Probanden ergab sich ein SSI-Score von  $22,94 \pm 8,04$ . Für die Teilnehmer der Kontrollgruppe ergab sich ein SSI-Score von  $5,3 \pm 2,3$ . Die Werte der SSI-Skala rangieren zwischen 0 und 46, die Obergrenze der SSI-Skala liegt bei 46. Steigende Werte auf der Skala stehen für stärker ausgeprägtes Stottern.

Tabelle 2: *Stuttering severity instrument*

SSI-Score	Perzentilenrang	Schweregrad
0 - 2	/	Kein Stottern
3 - 10	/	Fragliches Stottern
10 – 12	1 – 4	Sehr leichtes Stottern
13 – 17	5 – 11	
18 – 20	12 – 23	Leichtes Stottern
21 – 24	24 – 40	
25 – 27	41 – 60	Mittelschweres Stottern
28 – 31	61 – 77	
32 – 34	78 – 88	Schweres Stottern
35 – 36	89 – 95	
37 – 46	96 – 99	Sehr schweres Stottern

### 2.2.2 MRT-Untersuchung

Alle MRT-Messungen wurden in den Räumen der biomedizinischen NMR GmbH am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen, durchgeführt. Es handelt sich

dabei um ein 3 Tesla MRT-Gerät mit der Bezeichnung Magnetom Tim Trio, Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland. Es wurde eine 64-Channel-Kopfspule für die Messungen genutzt (Siemens Healthcare, Erlangen, Deutschland).

Die Messung der Probanden erfolgte in Rückenlage. Zum Schutz des Gehörs erhielt jeder Teilnehmer Ohrenstöpsel. Um den Einfluss von Bewegungsartefakten auf die Messung zu verringern, wurde der Kopf der Teilnehmer mit Schaumstoff abgepolstert.

Über einen MR-kompatiblen Bildschirm und Spiegel wurden den Teilnehmern die Texte während der Messung gezeigt. Die Tonaufnahme erfolgte durch ein MR-kompatibles Mikrofon: FOMRI III+, Optoacoustics Ltd, Israel.

Jeder Proband erhielt zu Beginn der Messung eine Alarmklingel und zwischen den Aufgaben bestand Sprechkontakt mit den Untersuchern.

Nach der Vorbereitung wurden zunächst native Übersichtsaufnahmen aufgezeichnet. Es wurde während der gesamten Untersuchung kein Kontrastmittel verwendet.

Die Aufnahme der Videos erfolgte in sagittaler und coronarer Schnittebene. Die sagittale Schnittebene erfasste den gesamten Vokaltrakt mit Lippen, Zunge, Nasopharynx und einschließlich des Larynx und den Bereich der Stimmlippen. Die coronare Schnittebene umfasste die Höhe des Kehlkopfes und die Ebenen parallel dazu.

Folgende Parameter wurden für die Bildakquisition in der Echtzeit-Magnetresonanztomographie genutzt: Schichtdicke: 8 mm, Field of View: 192 mm x 192 mm, Voxel: 1,4 x 1,4 x 8 mm, Echozeit (TE): 1,28 ms, Repetitionszeit (TR): 2,02 ms, zeitliche Auflösung: 18,18 ms, Bildrate: 55 Bilder/Sekunde und einen Flipwinkel von 5°.

Bei den Einstellungen handelte es sich um die gängigen Messparameter. Diese haben sich in multiplen Vorstudien für die Beurteilung des Mundraums bewährt haben (Iltis et al. 2015; Iltis et al. 2016). Die Bildakquisition erfolgte mittels FLASH-Sequenz und radialer Akquisition. Die Bildrekonstruktion erfolgte durch nichtlineare Inversion. Der Algorithmus wurde mit der Programmiersprache C, C++ im Haus geschrieben und ist in einem Rechner mit 8 GPU-Grafikkarten-Karten implementiert.

### **2.2.2.1 Studienprotokoll**

Über einen MR-kompatiblen Bildschirm wurden den Probanden Textabschnitte gezeigt. Vor Messbeginn wurden die Probanden gebeten, von eins bis zehn zu zählen, um die Einstellungen des Scanners zu adjustieren.

Die Sprechaufgaben umfassten Lese-, Spontanspracheaufgaben, rhythmisches Vorlesen, wiederholtes Vorlesen des gleichen Texts und Singen. Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine explorative Studie. Aus diesem Grund erfolgte die Auswahl der Aufgaben auf möglichst breiter Basis und teilweise auf Grundlage älterer Studien mit anderer Methodik. Zum Untersuchungsprotokoll gehörten unterschiedliche Sprechaufgaben:

Die erste Aufgabe bestand im Vorlesen von Texten mit ansteigendem Schwierigkeitsgrad. Anschließend erfolgte die viermalige Wiederholung des Textes mit der stärksten Stottersymptomatik aus der vorhergehenden Teilaufgabe. Die drei Texte unterschieden sich im Schwierigkeitsgrad des Vorleseniveaus. Dies diente zur Provokation von Stottersymptomatik. Sobald bei einem Probanden durch einen der Textabschnitte eine stärkere Stottersymptomatik ausgelöst wurde, sollte dieser Abschnitt in der folgenden Teilaufgabe vier Mal wiederholt werden. Dies diente der Untersuchung, ob sich nach mehrmaliger Wiederholung eines Textes eine Habituation in Form einer Reduktion der Stottersymptomatik beobachten ließe (Bloodstein und Bernstein Ratner 2007).

Es handelte sich um Ausschnitte aus folgenden Texten: „Der Nordwind und die Sonne“ (Brady 1969; Davidow 2014), „Die Verwandlung“ von Franz Kafka (Kafka 1915) und einem Ausschnitt aus dem Beipackzettel des Wirkstoffs „Secukinumab“ (Cosentyx-Beipackzettel, Novartis Pharma).

Die zweite Aufgabe umfasste das rhythmische Vorlesen eines der obigen Textes mit Hilfe eines Taktgebers. Dazu wurde ein blauer Balken, der wie ein Metronom immer im gleichen Zeitabstand unter der jeweilig vorzulesenden Silbe erschien, verwendet, um ein staccatohaftes Vorlesen des Textes zu provozieren. Mit Hilfe des Taktgebers sollte untersucht werden, ob das staccatohafte Vorlesen mit externem Taktgeber in Form eines visuellen Reizes zu einer Reduktion oder zur völligen Abwesenheit von Stottersymptomatik führen würde, wie dies für andere Formen externer Taktgeber vorbeschrieben wurde (Brady 1969; Davidow 2014).

In der folgenden, dritten Teilaufgabe wurden die Probanden gebeten, zuerst den Text des Liedes „Hänschen klein“ in veränderter Reihenfolge vorzulesen und im Anschluss daran den entsprechenden Text in richtiger Reihenfolge vorzusingen. Diese Aufgabe wählten wir vor dem Hintergrund, dass sich in früheren Studien gezeigt hatte, dass lautes Singen die Stotterrate reduziert (Healey et al. 1976; Glover et al. 1996).

Die vierte Teilaufgabe umfasste das wiederholte Vorlesen von 4 Pseudowörtern innerhalb einer Trägerphrase. Es handelte sich dabei um die Wörter „gakscheitideuk“, „maptibibi“, „natscheitideut“ und „mapscheitideup“. Die Pseudowörter wurden in Vierer-Blocks fünfzehn Mal in randomisierter Reihenfolge wiederholt und umfassen vor allem labial gebildete Laute wie m, p oder b. Die Auswahl der Wörter orientierte sich dabei an einer Studie von Smith et al. (Smith et al. 2010), in der Lippenbewegungszyklen bei stotternden Erwachsenen untersucht wurden. Dabei wurde festgestellt, dass sich bei Stotternden instabilere Lippenbewegungszyklen zeigten (Smith et al. 2010). Diese Teilaufgabe sollte dazu genutzt werden, um zu untersuchen, ob sich diese Lippenbewegungszyklen auch in der Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie nachweisen ließen.

In einer fünften Aufgabe wurden den Probanden nacheinander reale Wörter, zwei kurze Sätze, sowie einfache Pseudowörter gezeigt, die sie vorlesen sollten. Dieses Wortmaterial und die Ausführung der Teilaufgabe orientierte sich an einer Studie von Niebergall et al.

(2013). In dieser Studie untersuchten Niebergall et al. die oralen Hauptartikulatoren bei flüssiger Sprachproduktion in deutscher Sprache. Um dies mit der Sprachproduktion gestotterter Probanden zu vergleichen, fügten wir das Aufgabenset auch unserer Studie hinzu. Zusätzlich wurde das Aufgabenset von uns um eine zusätzliche fünfte Präsentation erweitert, um noch eine coronare Messung auf Larynxebene zu erhalten.

Abschließend wurde jeder Teilnehmer gebeten, in einer kurzen Aufnahme von einer Minute ihren Tagesablauf zusammenzufassen. Diese Aufgabe wählten wir, um noch mehr Stottersymptomatik durch Spontansprache zu provozieren, da einige Probanden in den Lesetexten nur eine geringe Anzahl an Stottersymptomen zeigten.

Nach der Messung von sieben Probanden wurden zwei weitere Textaufgaben hinzugefügt, da zuvor auffiel, dass bei vielen Probanden während der Lesetexte wenig Stottersymptomatik auftrat. In dieser Aufgabe sollten die Probanden mit eigenen Worten den zuvor in der Videoaufnahme verwendeten Text „Der kleinste Schneesturm“ in einer Minute zusammenfassen (Brautigam, R. 1980). Außerdem wurden sie gebeten, in einer Minute eine Prognose zur Bundestagswahl 2017 abzugeben.

Der Auswertung der vorliegenden Studie wurden aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit nur die gelesenen Texte zugrunde gelegt.

Das Aufgabenprotokoll der Kontrollgruppe umfasste im Wesentlichen die gleichen Präsentationen, wie das der stotternden Kohorte.

Im Unterschied zur Gruppe der stotternden Probanden las jeder Teilnehmer der Kontrollgruppe alle drei Texte. Außerdem beinhaltete das Protokoll der Kontrollgruppe das Lesen aller drei Präsentationen mit Pacer. Es entfielen die Zusammenfassung des Textes „Der kleinste Schneesturm“ und die Prognose zur Bundestagswahl.

## **2.3 Analysedesign**

### **2.3.1 Analyse der Stottersymptome**

Die Echtzeit-MRT-Videos wurden auf Stottersymptome untersucht. Anschließend wurden diese kategorisiert. Aus Gründen der Vergleichbarkeit beschränkt sich die vorliegende Analyse nur auf die Ergebnisse der Lesetexte. Wir entschieden uns, die Stottersymptome zunächst grundlegend nach anhand der vier Kernsymptome des Stotterns, sowie nach Lautart und Artikulationsort gemäß des internationalen phonetischen Alphabets zu kategorisieren (Wiese 2000; IPA - Internationales phonetisches Alphabet).

Die Stottersymptome wurden nach den Kategorien Symptomart, Lautart, Artikulationsort (nur Konsonanten), Lautklasse (nur Konsonanten) und Phonationsart des Lauts kategorisiert.

In der Kategorie Symptomart unterschieden wir zwischen Repetition, Prolongation, sowie hörbarem oder stummen Block. Es gab vereinzelt außerdem Symptome, die sich nicht einer eindeutigen Symptomart zuordnen ließen, für diese wurde die Kategorisierung um kombinierte Symptome erweitert.

In Bezug auf die Lautart erfolgte die Unterscheidung der gestotterten Symptome in Konsonant und Vokal.

Für Konsonanten erfolgte die Kategorisierung weiterhin anhand ihres Artikulationsortes nach bilabialen, labiodentalen, dentalen alveolaren, postalveolaren, retroflexiven, palatalen, uvularen, pharygealen oder glottalen Artikulationsorten.

Konsonanten wurden desweiteren hinsichtlich ihrer Lautklasse unterschieden in Frikativ, Plosiv, Nasal, Approximant, lateraler Approximant, Vibrant und Affrikate. Daran anknüpfend unterteilten wir die Konsonanten anhand ihrer Phonation nach stimmhaften Laut und stimmlosen Laut.

Abbildung 1 zeigt die Artikulationsorte der deutschen Sprache. In

Tabelle 3 ist die Entstehung der verschiedenen Lautklassen für Konsonanten der deutschen Sprache dargestellt (Brünjes et al. 2012; IPA - Internationales phonetisches Alphabet).

Tabelle 3: Lautklassen der deutschen Sprache

Lautklasse	Entstehung
Plosiv	Verschlusslaut, der zuerst durch völlige Blockade im Mundraum und anschließende Mundöffnung entsteht (zum Beispiel p und b)
Nasal	Laute, die durch einen kompletten Verschluss des Mundraums entstehen, bei dem die Luft durch die Nase entweicht (Beispiel: m und n).
Frikativ	Reibelaut, der durch eine Engstellung des Mund-/Rachenraums entsteht, durch die der Luftstrom hindurch gepresst wird (Beispiele: v, f).
Laterale	Laute, die dadurch entstehen, dass der Mund mittig verschlossen ist und der Luftstrom seitlich daran vorbei strömt (Beispiel: l).
Vibranten	Laute, die durch Schwingungen von flexiblen Artikulationsorganen entstehen.
Affrikate	Ein Laut, der durch eine Kombination von Plosiv und Frikativ gebildet wird. Aus phonetischer Sicht Kombination von 2 Konsonanten wie das „pf“ in Pferd.
Approximant	Gleitlaut, bei dem der Luftstrom ungehemmt durch den Mundraum fließt (Beispiel: j).



Abbildung 1: Artikulationsorte der deutschen Sprache. Zu sehen ist ein mitt-sagittaler Schnitt durch den menschlichen Kopf mit Fokus auf die Mund-Rachenregion. Die Artikulationsorte der deutschen Sprache sind nummeriert: (1) bilabial; (2) labiodental; (3) dental; (4) alveolar; (5) postalveolar; (6) palatal; (7) velar; (8) uvular; (9) pharyngeal; (10) glottal. Nicht abgebildet: retroflexiv. Die Abbildung entstammt dem der Dissertation zugrundeliegenden MRT-Datensatz und die Darstellung erfolgt mit Genehmigung des Probanden.

## 2.3.2 Statistische Analyse

### 2.3.2.1 Analyse der epidemiologischen Daten

Die epidemiologischen Daten der beiden Probandenkollektive wurden mittels ungepaarten zweiseitigen t-Tests verglichen (Alter, Bildungsgrad, Händigkeit). Die epidemiologischen Daten wurden nach absoluten und relativen Häufigkeiten, Mittelwerten, Standardabweichungen ( $\pm$ ) und Median (min; max) zusammengefasst. Die Verteilung der Variablen für diskrete Variablen wurde für jeden Probanden als Balkendiagramme dargestellt.

### 2.3.2.2 Der Einfluss des Schweregrads auf Anzahl und Art der Stottersymptome

Zur Untersuchung des Einflusses des Schweregrads auf die Anzahl der Stottereignisse wurde ein zero-inflated Mischeffekt-Poisson-Regressions-Modell verwendet. Zero-

Inflationsmodelle werden in der Statistik für Wahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt, in denen oft Beobachtungen mit Nullwerten auftreten. Das Zero-inflated-Poisson-Modell wird angewendet, wenn die Zahl der tatsächlich registrierten Nullen höher ist als die Menge der ursprünglich erwarteten Zahl an Nullen. Dieses berücksichtigt zusätzlich die Art des Stotterereignisses und die Interaktion zwischen Art des Stotterersymptoms und des Schweregrad.

Mithilfe von Heatmaps wurden die Anzahl der Stotterereignisse nach Ereignistyp und Proband dargestellt. Die Heatmap dient dabei der vereinfachten Darstellung der Vorkommenswahrscheinlichkeit bestimmter Symptomatik je nach Proband. Ziel der Darstellung war, herauszufinden, ob sich bestimmte Variablen-gruppierungen finden ließen.

Die Verteilung der Anzahl pro Stotterereignistyp mit den verschiedenen Schweregraden wurde in Balkendiagrammen mit der relativen Häufigkeit dargestellt.

Mit t-Test oder Mann-Whitney-U-Tests wurden die Probandeneigenschaften zwischen leicht und schwer stotternden Probanden verglichen und mit Box-Violin-Diagrammen dargestellt.

### **2.3.2.3 Untersuchung auf Häufung von individuellen Ähnlichkeiten innerhalb der Symptomatik**

Für die Untersuchung auf eine Häufung individueller Ähnlichkeiten innerhalb der Stotterersymptomatik der einzelnen Studienteilnehmer wurde eine Multiple-Korrespondenzanalyse angewendet. Eine multiple Korrespondenzanalyse ist eine Erweiterung einer individuellen Korrespondenzanalyse. Mit dieser Analyse wird untersucht, wie sich ordinalskalierte Daten in ihren Effekten unterscheiden, und ob sich bei der Betrachtung bestimmter Variablen statistische Ähnlichkeiten erkennen lassen. Der Fokus der Analyse lag in der vorliegenden Studie darin, zu untersuchen, ob sich innerhalb der Stotterersymptome eine Häufung von Ähnlichkeiten, also eine Art Clusterbildungen beobachten lässt. Die Daten aus einer zweidimensionalen Kreuztabelle lassen sich in einem ebenso zweidimensionalen Diagramm darstellen und somit Ähnlichkeiten zwischen den Variablen im Diagramm veranschaulicht werden. Im Koordinatensystem liegen die Durchschnittswerte der Variablen im Ursprung des Koordinatensystems. Die Abstände zwischen den Punkten auf der Grafik entsprechen den Unterschieden der aufgetretenen Ereignisse. Je näher zwei Ereignisse beieinander liegen, umso mehr Ähnlichkeit haben sie. Liegt eine Eigenschaft weit vom Ursprung des Koordinatensystems entfernt, unterscheidet sie sich umso mehr vom Durchschnitt (Backhaus et al. 2016)

Die multiple Korrespondenzanalysen wurden für alle Stotterereignisse und für erkennbare Subcluster ausgeführt. Die Variablen wurden unter Verwendung des nicht-parametrischen Mann-Whitney-U-Test auf Unterschiede zwischen den detektierten Probanden-Clustern getestet. Um zu überprüfen, ob sich zwei unabhängige Stichproben in ihrer grundsätzlichen

Tendenz unterscheiden, kann man den Mann-Whitney-U-Test anwenden. Besonders wenn die Grundbedingungen für einen t-Test für unabhängige Stichproben nicht anwendbar sind, wird er angewendet (Mann-Whitney-U-Test, Statologie 2020).

#### **2.3.2.4 Clusteranalyse auf Basis des Stotterprofils**

Die Stotterereignisse wurden auf Basis des Stotterprofils auf eine Clusterbildung untersucht. Es wurde eine korrelationsbasierte hierarchische Analyse auf Grundlage der durchschnittlichen Stotterprofile der Probanden durchgeführt. Die Variablen wurden unter Verwendung des nicht-parametrischen Mann-Whitney-U-Test auf Unterschiede zwischen den detektierten Probanden-Clustern getestet.

#### **2.3.2.5 Signifikanzniveau und Darstellung**

Die statistische Auswertung erfolgt mit Hilfe von Dr. Leha vom Institut für medizinische Statistik an der Universität Göttingen. Für alle statistischen Tests wurde das Signifikanzniveau auf  $\alpha = 5\%$  festgelegt. Die statistischen Analysen wurden mit der Statistiksoftware R Version 3.6.2 (R Core Team 2018) unter Verwendung des R-Pakets FactoMineR Version 2.1 (Lê et al. 2008) für die Mehrfachkorrespondenzanalyse und des R-Pakets glmmTMB Version 0.2.1.0 durchgeführt (Brooks et al. 2017) für die zero-inflated Mischeffekt-Poisson-Regression.

Für die Darstellung wurden die R-Pakete 'ggstatsplot' Version 0.2.0 (Indrajeet Patil et al. 2020), 'ComplexHeatmap' Version 1.20.0 (Gu et al. 2016) und 'dendextend' Version 1.8.0; (Galili 2015) verwendet (Bates et al. 2015; R Core Team 2018).

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Kohortenvergleich

Der Kohorte mit 18 stotternden Probanden wurde eine Kontrollgruppe mit 16 flüssigsprechenden Probanden gegenübergestellt. Der Schweregrad des Stotterns wurde von der Logopädin Bettina Helten anhand des *stuttering severity instruments* (SSI) berechnet (Riley 2009). In Abbildung 2 ist die prozentuale Verteilung der stottertypischen Unflüssigkeiten (STU) beider Kohorten in Boxplots dargestellt. Dies dient dazu, um zu zeigen, dass sich die stotternde Kohorte in Bezug auf die Anzahl gestotterter Silben sowohl in den Leseaufgaben als auch während des freien Sprechens von der flüssigsprechenden Kohorte unterscheidet. Der SSI-Gesamtwert für die stotternde Kohorte betrug  $22,94 \pm 8,04$ . Der prozentuale Anteil gestotterter Silben innerhalb der Lesetexte betrug bei der stotternden Kohorte  $7,3\% \pm 7,2\%$  und innerhalb des freien Sprechens  $8,9 \pm 5,8\%$ . Für die flüssigsprechende Kohorte betrug der SSI-Gesamtwert  $5,3 \pm 2,3$ ; der prozentuale Anteil gestotterter Silben innerhalb der Lesetexte betrug bei der flüssigsprechenden Kohorte  $0,5\% \pm 0,5\%$  und während des freien Sprechens  $0,7\% \pm 0,6\%$ . Innerhalb der flüssigsprechenden Kohorte waren der Mittelwert und die individuelle Anzahl der stottertypischen Sprechunflüssigkeiten deutlich niedriger als in der Kohorte der stotternden Probanden. Ein ungepaarter t-Test zeigte eine deutliche Signifikanz ( $p \leq 0,0001$ ). Es wurden somit mehr stottertypische Unflüssigkeiten in der Gruppe der stotternden Probanden gemessen. Auf der Skala des SSI-Gesamtscores gilt erst ein Gesamtscore ab zehn Punkten als sehr leichtes Stottern und in der Literatur wird oftmals ein prozentualer Anteil von 3% gestotterter Silben als Grenze für Stottern angegeben. Die Werte der flüssigsprechenden Probanden liegen bei unserer Studie unterhalb dieser Grenze, somit gehen wir davon aus, dass kein Teilnehmer der flüssigsprechenden Kohorte stottert.

Die Beantwortung der nachfolgenden Hypothesen und die folgenden Ergebnisse der vorliegenden Arbeit beschränken sich in der Folge nur auf die Kohorte der stotternden Probanden. Hierbei erfolgte zunächst eine semi-quantitative Analyse der Stotterereignisse der stotternden Kohorte. Der Vergleich mit der flüssigsprechenden Kohorte ist aktuell Gegenstand weiterer Doktorarbeiten, die auf den Daten der vorliegenden Studie aufbauen.

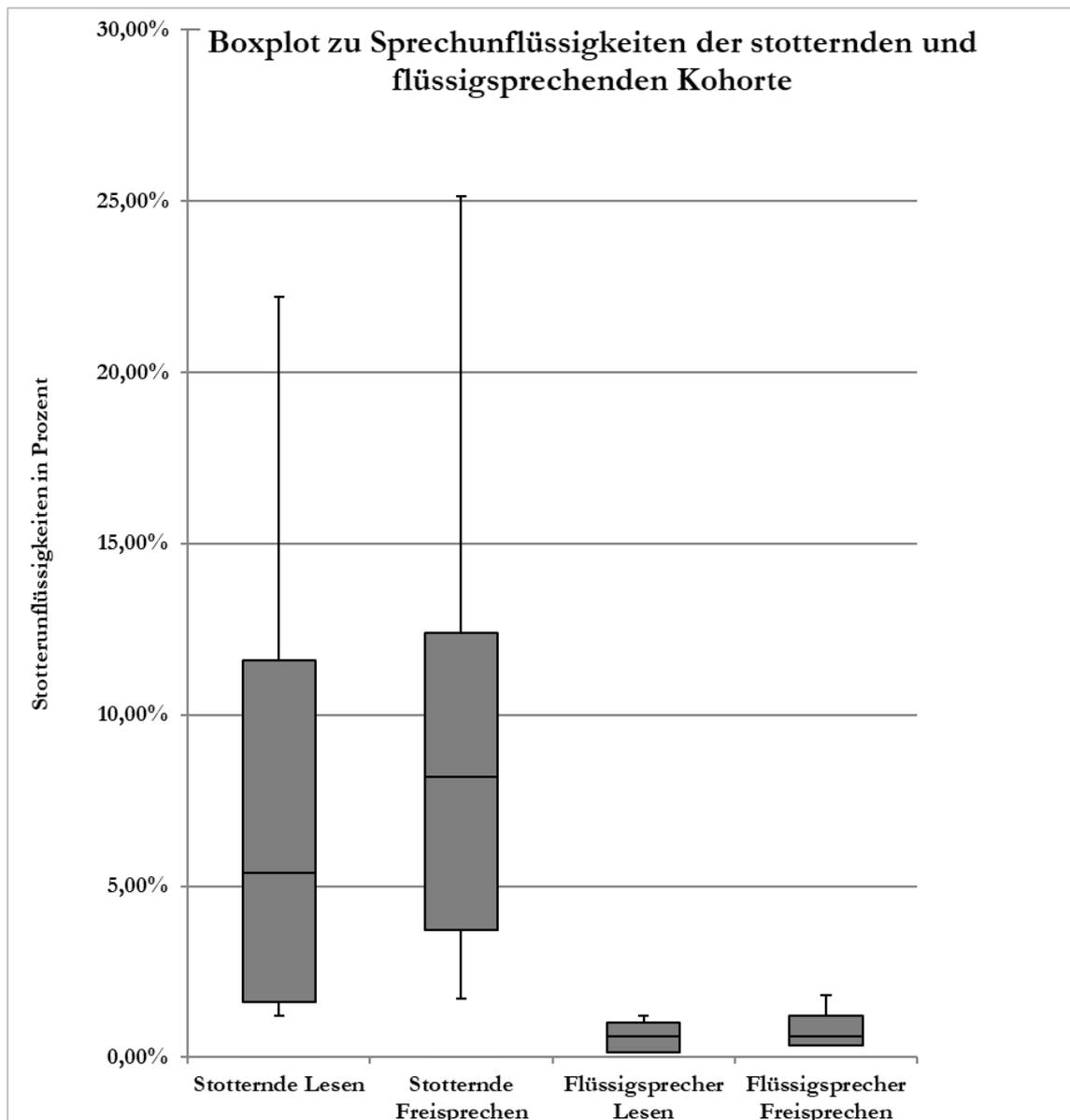


Abbildung 2: Stottertypische Sprechunflüssigkeiten bei stotternden (links) und nicht-stotternden Teilnehmern der Studie (rechts). Es zeigten sich deutlich mehr stottertypische Unflüssigkeiten in der stotternden Kohorte.

Die Probanden wurden außerdem auf Grundlage des Alters, des Bildungsgrads und der Händigkeit gepaart. In Bezug auf das Alter ergab sich für beide Gruppen kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,19$ ), in Bezug auf den Bildungsgrad unterschieden sich beide Gruppen ebenfalls nicht signifikant ( $p = 0,14$ ). In Bezug auf die Händigkeit wichen die Gruppen in den Werten geringfügig voneinander ab, hierbei zeigte sich für die stotternde Kohorte ein Lateralisierungsquotient von  $71,84 \pm 43,86$  und für die flüssigprechende Kohorte ein Lateralisierungsquotient von  $37,26 \pm 66,74$ ; ( $p = 0,066$ ). Diese Abweichung ist jedoch ebenfalls nicht signifikant.

Die Rekrutierung der flüssig sprechenden Studienteilnehmer erfolgte über Aushänge in der Universitätsklinik Göttingen, sowie über Anzeigen im StudIP der Universität Göttingen. Das Durchschnittsalter der flüssigprechenden Kohorte betrug  $26,1$  Jahre alt  $\pm 2,32$ . Für

die Händigkeit der Kontrollgruppe ergab sich ein Wert von  $37,26 \pm 66,74$ . Der Bildungsgrad der flüssigsprechenden Probanden lag bei  $4,19 \pm 0,51$ .

### 3.2 Kernsymptome des Stotterns in der MRT-Darstellung

Wie anfänglich erwähnt, bilden Repetitionen, Prolongationen, stille und hörbare Blockierungen die Kernsymptomatik des Stotterns. Diese Kernsymptomatik soll durch zwei Beispielvideos veranschaulicht werden. Mit Hilfe des untenstehenden QR-Codes gelangt man auf den Youtube-Kanal Stottern MRT Göttingen. Auf diesem Kanal wurden beispielhaft zwei Videos aus der vorliegenden Studie „Stottern in der Echtzeit-MRT“ veröffentlicht, um die Kernsymptomatik des Stotterns zu verdeutlichen. Die Veröffentlichung der Videos erfolgt mit ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung des Probanden und die Videos wurden anonymisiert veröffentlicht, sodass keine Rückschlüsse auf den Probanden möglich sind. Außerdem sind die Videos nicht öffentlich gelistet, sondern nur mit Kenntnis des Links zugänglich. Das Copyright der Videos liegt bei Professor Frahm, MPI für biophysikalische Chemie Göttingen und die Veröffentlichung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Professor Frahm.



Abbildung 3: QR-Code zum Video "Der Nordwind und die Sonne". Die Veröffentlichung erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Probanden und Professor Frahm. Das Copyright liegt bei Professor Frahm, MPI für biophysikalische Chemie Göttingen.

Link zum Beispielvideo „Der Nordwind und die Sonne“: [https://youtu.be/RR\\_15T-2-ac](https://youtu.be/RR_15T-2-ac)

Die Stotterkernsymptome finden sich beispielhaft an folgenden Zeitabschnitten im Video:

0:09 Min.: Prolongation am Beginn des Wortes „Sonne“

0:11 Min.: Hörbarer Block am Beginn des Wortes „einst“

0:25 Min.: Repetition am Beginn des Wortes „stärkere“

0:40 Min: Stiller Block am Beginn des Wortes „Mantel“



Abbildung 4: QR-Code zum Beispielvideo "Pseudowörter". Die Veröffentlichung erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Probanden und Professor Frahm. Das Copyright liegt bei Professor Frahm, MPI für biophysikalische Chemie Göttingen.

Link zum Beispielvideo „Pseudowörter“: <https://youtu.be/bWUA5nFwKVw>

### 3.3 Ergebnisse der hypothesen-nahen Analyse

Insgesamt umfasste das Lesematerial 950 Silben für jeden Probanden. Die gelesenen Silben verteilten sich wie folgt: 342 Silben Pseudowörter, 94 Silben Adjektive, 133 Silben Verben und 164 Silben Substantive.

In Abbildung 5 ist die Verteilung der aufgetretenen Stottereignisse innerhalb des Lesematerials nach Probanden dargestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass das Auftreten der Stottersymptome sehr heterogen unter den Probanden verteilt ist. Dabei zeigt sich, dass bei den meisten Probanden bis maximal 100 Stottersymptome innerhalb der Lesetexte auftraten. Nur Proband S07 sticht mit einer größeren Anzahl an Stottersymptomen deutlich heraus.

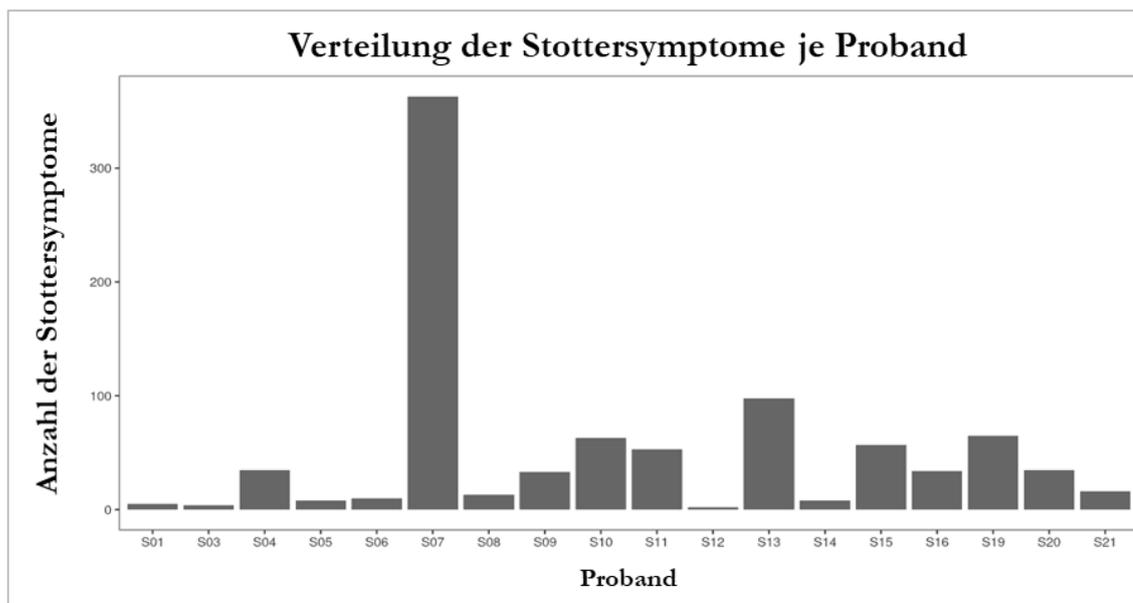


Abbildung 5: Verteilung der Stotterereignisse nach Proband. Auf der X-Achse sind die Probanden aufgetragen. Die Y-Achse zeigt die Anzahl der Stottersymptome. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.4 Hypothese 1: Stottern innerhalb versus außerhalb des MRT-Scanners

Die erste Hypothese ist, dass mehr Stotterereignisse außerhalb des MRT-Scanners auftreten als innerhalb des MRT-Scanners.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde der Prozentanteil gestotterter Silben des Lesetext außerhalb des Scanners mit den gestotterten Silben der Leseaufgaben innerhalb des Scanners verglichen. Außerdem wurde ein gepaarter zweiseitiger t-Test angewendet. Es zeigten sich bei 16 von 18 stotternden Probanden außerhalb des Scanners mehr gestotterte Silben. Außerhalb des Scanners betrug die Stotterrate 7,3% aller Silben  $\pm$  7,2%. Im Scanner traten 2,4% gestotterte Silben auf  $\pm$  3,9% (gepaarter zweiseitiger t-test  $p = 0,002$ ).

### 3.5 Hypothese 2: Der Einfluss linguistischer Faktoren

Unsere zweite Hypothese ist, dass das Auftreten von Stotterereignissen von linguistischen Faktoren beeinflusst wurde.

In der Analyse wurde der Fokus auf folgende linguistische Faktoren gelegt: Wortart, Position der gestotterten Silbe innerhalb des Wortes, Lautart der gestotterten Silbe, Artikulationsweise (für gestotterte Konsonanten) und Artikulationsort (für gestotterte Konsonanten).

### 3.5.1 Symptomatik

Wir analysierten 894 Stotterereignisse bei 18 Probanden. Am häufigsten zeigten sich hierbei stille Blocks mit 30,6% aller gestotterten Ereignisse.

Nachfolgend waren Prolongationen mit 29,2% die zweithäufigsten Stotterereignisse. Es zeigten sich 13,2% Repetitionen bei den Probanden. Es ergab sich eine signifikante Assoziation der Art des Stottersymptoms und des Probanden (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Einige der Stotterereignisse ließen sich nicht eindeutig einer Symptomklasse zuordnen, sodass auch 121 kombinierte Symptome in die Analyse mit einfließen. Dies entspricht einem Prozentsatz von 13,5% aller gestotterten Symptome.

Abbildung 6 zeigt die individuelle Verteilung der Stottersymptome nach Proband.

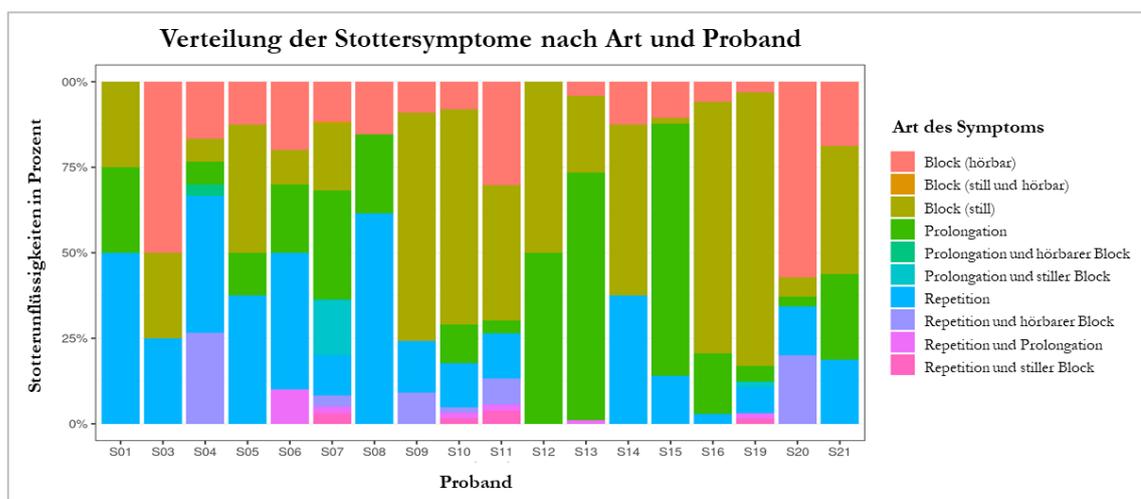


Abbildung 6: Verteilung der individuellen Stottersymptomatik nach Symptom und Proband. Auf der X-Achse sind die Probanden aufgelistet, die Y-Achse zeigt die Stottersymptome in Prozent. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen Stottersymptom und Proband (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.5.2 Wortart

Von allen 894 Stotterereignissen traten 75 Ereignisse bei Adjektiven, 281 bei Substantiven, 105 bei Verben und 298 bei Pseudowörtern auf.

Tabelle 4 zeigt die Verteilung der Stotterereignisse geordnet nach der Wortart. Von allen gestotterten Wörtern wurden - neben Pseudowörtern - Substantive am häufigsten gestottert (31,4% aller gestotterten Silben).

Tabelle 4: Verteilung der Stotterereignisse nach Wortart

Wortart	Summe gestotterter Ereignisse	Ereignisse in Prozent
Adjektiv	75	8,4
Adverb	16	1,8
Artikel	29	3,2
Konjunktion	28	3,1
Partikel	11	1,2
Präposition	14	1,6
Pronomen	32	3,6
Pseudowort	298	33,3
Relativpronomen	3	0,3
Substantiv	281	31,4
Verb	105	11,7
Zahlwort	2	0,2

### 3.5.3 Pseudowörter

Der Anteil der Pseudowörter an allen Stotterereignissen wurde in einem Einstichproben-Proportionstest getestet. Der Anteil an Pseudowörtern aller vorgelesenen Silben betrug dabei 36%. Unter allen Stotterereignissen waren 33,3% Pseudowörter (Einstichproben-Proportionstest, 95% - CI 30,0 - 36,2%;  $p = 0,069$ ). Verglichen wurde die Häufigkeit des Auftretens der Stottersymptome innerhalb der Wortklassen. Dabei waren die Pseudowörter die Wortklasse, die am häufigsten zu Stotterereignissen führte. Der  $p$ -Wert betrug lag hierbei jedoch  $>0,05$ , somit ist dieses Ergebnis nicht signifikant.

### 3.5.4 Auftreten der Stottersymptomatik am Wortanfang oder in der Wortmitte

Es zeigten sich mehr Stotterereignisse am Wortanfang als in der Mitte der Wörter (79,1% gegenüber 20,9%). Die individuelle Verteilung der Symptomatik am Wortanfang bzw. in der Wortmitte sind in Abbildung 7 dargestellt.

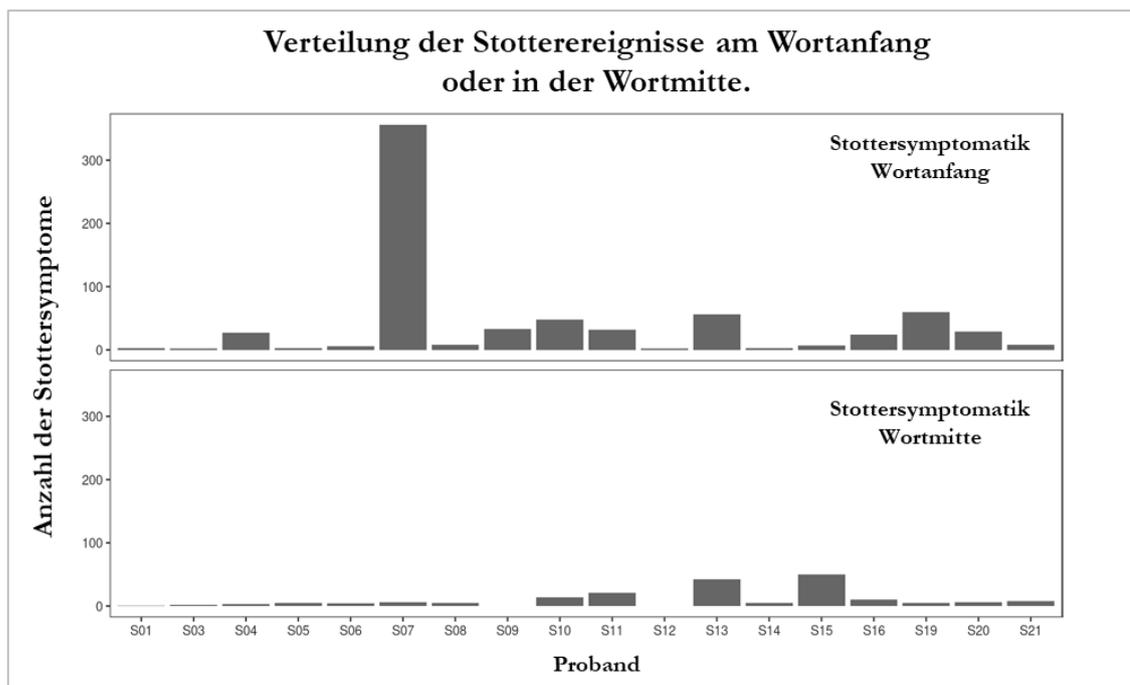


Abbildung 7: Verteilung der Stotterereignisse am Wortanfang oder in der Wortmitte. Die X-Achse zeigt die Probanden. Auf der Y-Achse ist die Anzahl der Stottersymptome dargestellt. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.5.5 Lautart

Stottersymptome traten häufiger bei Konsonanten als bei Vokalen auf (87,0% vs. 13,0%). Die individuelle Verteilung der Stottersymptomatik bei Vokalen oder Konsonanten sind in Abbildung 8 dargestellt. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen Lautart und Proband (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Das bedeutet, dass das Auftreten der Variable Lautart wahrscheinlicher mit der Variable Proband in Beziehung steht und dass die Variablen somit nicht unabhängig voneinander sind. Es besteht hierbei eine statistisch signifikante Beziehung zwischen den Probanden und der Lautart des entsprechenden Stottersymptoms.

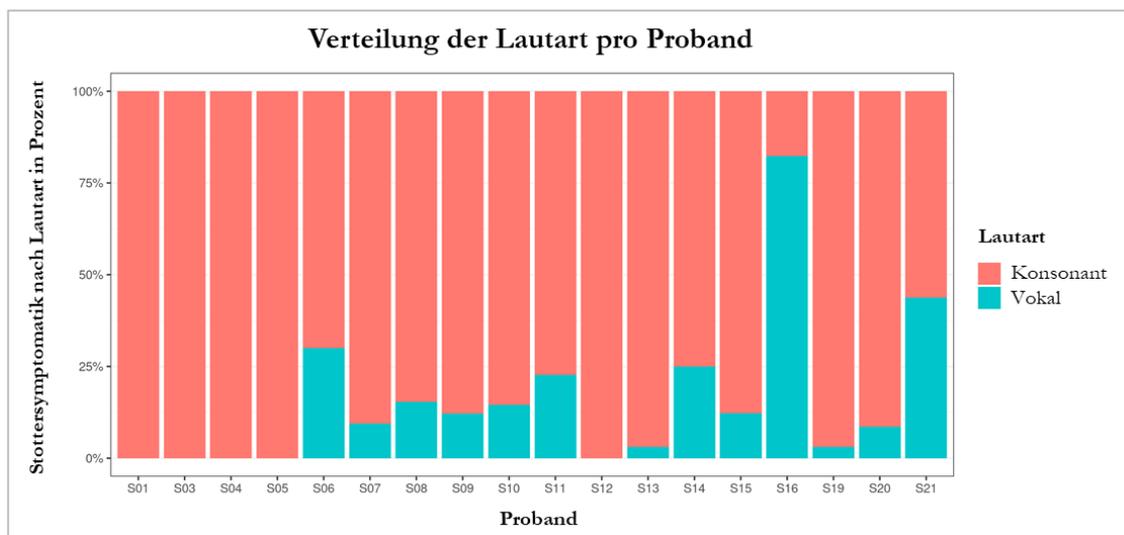


Abbildung 8: Stottery symptomatik sortiert nach Vokal/Konsonant pro Proband. Die X-Achse zeigt die Probanden. Auf der Y-Achse sind die Stottery symptome in Prozent dargestellt. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen Stottery symptomatik und Vokal/Konsonant (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.5.6 Konsonanten

#### 3.5.6.1 Artikulationsort

In der Analyse der Artikulationsorte der gestotterten Konsonanten ergab sich eine Häufung gestotterter Silben bei bilabialen Konsonanten und alveolärer Konsonanten (31,2% vs. 29,6%). Abbildung 9 zeigt die individuelle Verteilung der Artikulationsorte gestotterter Silben bei Konsonanten pro Proband. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen den Artikulationsorten und Proband (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Somit ist es wahrscheinlich, dass die beiden Variablen Artikulationsort und Probanden nicht unabhängig voneinander sind, sondern eine statistisch signifikante Beziehung zwischen den Variablen Probanden und der Variable der aufgetretenen Stottery symptome an den jeweiligen Artikulationsorten besteht.

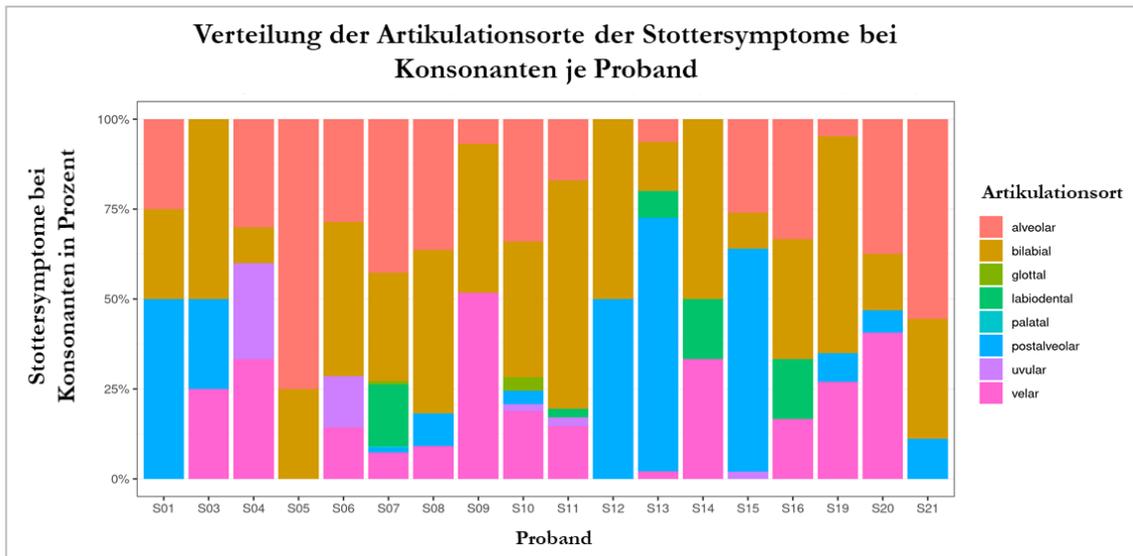


Abbildung 9: Artikulationsort je Proband. Die X-Achse zeigt die Probanden. Auf der Y-Achse sind die Stottersymptome in Prozent dargestellt. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen Artikulationsort und Proband (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.5.6.2 Artikulationsweise

Innerhalb der Stotterereignisse bei Konsonanten waren Plosive die häufigsten gestotterten Laute mit 42,5%. Am zweithäufigsten aller gestotterten Konsonanten waren Frikative mit 34,6%. Die Erklärung der einzelnen Lautklassen sind der Tabelle 3 unter Punkt 2.3.1 zu entnehmen.

In Abbildung 10 ist die individuelle Verteilung der Stottersymptome sortiert nach der Artikulationsweise der Konsonanten zu sehen. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen der Artikulationsweise und Proband (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Das bedeutet, dass die beiden Variablen Probanden und Artikulationsweise nicht unabhängig voneinander sind und, dass eine statistisch signifikante Beziehung zwischen den Probanden und der Artikulationsweise der aufgetretenen Stottersymptome besteht.

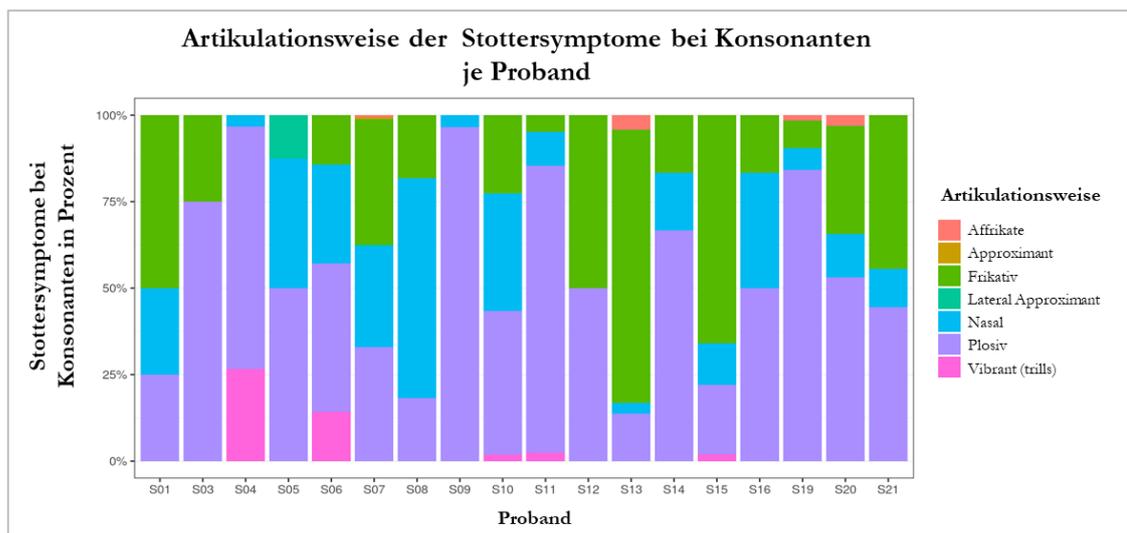


Abbildung 10: Verteilung der Artikulationsweise individuell nach Proband. Auf der X-Achse sind die Probanden aufgeführt. Die Y-Achse zeigt die Stottersymptome bei Konsonanten in Prozent. Es ergab sich eine signifikante Assoziation zwischen Artikulationsweise und Proband (Fischer's Exact Test:  $p = <0,01$ ). Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.6 Hypothese 3: Einfluss des Stotterschweregrads auf Anzahl und Art der Stotterereignisse

Die dritte Hypothese ist, dass alle relevanten Stotterereignisse bei Schwerstotternden Probanden häufiger auftreten würden als bei Leichtstotternden. Außerdem vermuteten wir, dass es keine qualitativen Unterschiede in der Art der Stotterereignisse zwischen Leicht- und Schwerstotternden gibt.

#### 3.6.1 Vergleich der epidemiologischen Daten von leicht- und schwerstotternden Probanden

Die stotternden 18 Probanden wurden in zwei Gruppen nach Ausprägung des Stotterschweregrads unterteilt. Es wurden neun sehr leicht- bis leichtstotternde Probanden und neun mittel- bis schwerstotternden Probanden ermittelt. Zunächst erfolgte ein Vergleich der epidemiologischen Daten beider Gruppen. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in

Tabelle 5 und in Abbildung 11 dargestellt.

Zur Beantwortung der Frage, ob der Schweregrad des Stotterns die Verteilung der Stotterereignisse beeinflusst, fungierte der Schweregrad des Stotterns als Kovariante und es wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Zur Einschätzung des Schweregrads des Stotterns nutzen wir den SSI-Wert.

Die Gruppe der leichter Stotternden unterschied sich nur in Hinblick auf den SSI-Gesamtscore signifikant von der Gruppe der Schwerstotternden ( $p < 0,01$ ): Für die gesamte stotternde Kohorte ergab sich ein SSI- Gesamtscore von  $22,94 \pm 8,04$ .

Die Gruppe der Leichtstotternden erzielte einen SSI-Gesamtscore  $16,00 \pm 2,8$ .

Für die schwerstotternde Kohorte ergab sich ein SSI-Score von  $30,00 \pm 4,2$ .

Tabelle 5: Vergleich epidemiologischer Daten der leicht- und schwerstotternden Probanden. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

Parameter	Level	Ganze Kohorte	Leichtstotternd	Schwerstotternd	p-Werte	Tests
Anzahl der Probanden		18	9	9		
Alter					0,34	Welch Two Sample t - test
	Mean $\pm$ SD	$29 \pm 8,21$	$31 \pm 8,90$	$27 \pm 7,20$		
	Median (Min; Max)	28 (18; 45)	28 (19; 45)	28 (18; 42)		
Bildungsgrad					0,53	Wilcoxon rank sum test with continuity correction
	Mean $\pm$ SD	$3,6 \pm 1,58$	$3,8 \pm 1,20$	$3,2 \pm 1,90$		
	Median (Min; Max)	4 (1; 6)	4 (2; 5)	3 (1; 6)		
Händigkeit					1	Wilcoxon rank sum test with continuity correction
	Mean $\pm$ SD	$71,8 \pm 43,86$	$80 \pm 27,00$	$87 \pm 8,40$		
	Median (Min; Max)	92 (17; 100)	92 (17; 100)	92 (75; 100)		
SSI-Gesamtscore					$< 0,01$	Wilcoxon rank sum test with continuity correction
	Mean $\pm$ SD	$22,94 \pm 8,04$	$16 \pm 2,80$	$30 \pm 4,20$		
	Median (Min; Max)	22 (12; 37)	15 (12; 20)	29 (25; 37)		

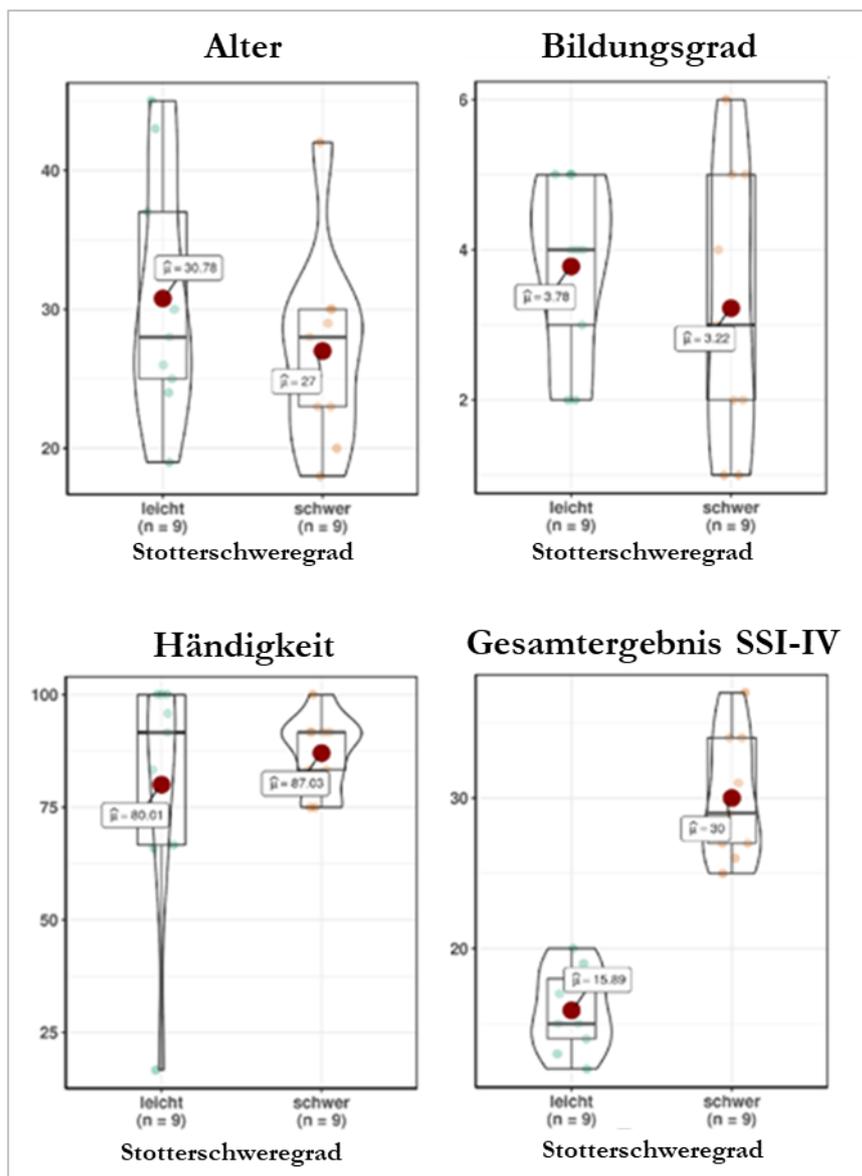


Abbildung 11: Vergleich der Basisdaten von leichtstotternden und schwerstotternden Probanden. Auf der X-Achse ist jeweils der Stotterschweregrad dargestellt. Auf der Y-Achse sind von links oben nach rechts unten jeweils Alter, der SSI-Score, der Bildungsgrad bzw. die Händigkeit aufgebracht. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen

### 3.6.2 Einfluss des Stotterschweregrads auf Anzahl der einzelnen Stotterereignisse

In einer weiteren Berechnung wurde der Einfluss des Haupteffekts des Stotterschweregrads auf die Anzahl der Stotterereignisse betrachtet. Zur Untersuchung des Einflusses des Schweregrads auf die Anzahl der Stotterereignisse wurde ein zero-inflated Mischmodell-Poisson-Regressions-Modell angewendet. Im Gruppenvergleich zeigte der Haupteffekt des Schweregrads einen signifikanten Unterschied in der Anzahl der Stotterereignisse. In dem Modell wurde für die Gruppe der Schwerstotternden eine um den Faktor 5,52 erhöhte Anzahl an Stotterereignissen im Vergleich zu den Leichtstotternden vorausgesagt.

### 3.6.3 Einfluss des Stotterschweregrads auf die Art der Stotterereignisse

Außerdem wurde die Interaktion zwischen Stotterschweregrad und Stottersymptomtyp untersucht und ob sich innerhalb der Gruppe der leichtstotternden Probanden und der Gruppe der Schwerstotternden ein Unterschied in der Verteilung der Symptomatik besteht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung finden sich in

Tabelle 5.

Generell geht es in der Tabelle um die Darstellung von Verhältnismäßigkeiten. Alle angegebenen Zahlenwerte beziehen sich auf einen Stottersymptomtyp als Referenz. Dafür wurden hierbei Blocks ausgewählt.

Im ersten Teil der Tabelle geht es um die Haupteffekte zwischen Stotterschweregrad und Stottersymptomtyp. Dabei untersuchten wir, inwiefern sich die Häufigkeit aller Stottersymptome innerhalb der Gruppen verändert. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass innerhalb der schwerstotternden Gruppe wesentlich häufiger Stotterereignisse auftreten. Hierbei zeigte sich eine Korrelation zwischen dem Schweregrad und der Art der Stotterereignisse. Dieser Unterschied war für Prolongationen signifikant: Für Schwerstotternde sagte das Modell eine um den Faktor 3,27 erhöhte Anzahl an Prolongationen voraus als für Leichtstotternde. Dieser Unterschied zwischen leicht- und schwerstotternder Kohorte war signifikant. Für Repetitionen bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen: Diese kommen in beiden Gruppen gleich häufig vor und unterschieden beide Gruppen nicht signifikant. Für einige kombinierte Symptome trat ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen auf: Bei den kombinierten Symptomen aus Repetition und Blocks wurde eine um den Faktor 0,073 erhöhte Anzahl an Stotterereignissen in der schwerstotternden Kohorte vorausgesagt. Für die kombinierten Symptome aus Repetition und Prolongation sagte das Modell eine um den Faktor 0,05 erhöhte Anzahl an Stotterereignissen für die Schwerstotternden voraus. Prolongationen und die kombinierten Symptome (Repetition und Block; Repetition und Prolongation) traten bei Schwerstotternden häufiger auf als bei Leichtstotternden und unterschieden die beiden Gruppen somit signifikant. Es ist somit beispielsweise wesentlich wahrscheinlicher, dass in der Gruppe der Schwerstotternden Prolongationen auftreten als Blocks.

Im zweiten Teil geht es um Interaktionseffekte zwischen dem Stotterschweregrad und dem Stottersymptomtyp. Es wurde untersucht, ob der Effekt in beiden Gruppen (leichtstotternd vs. schwerstotternd) signifikant anders ist. Es ergab sich ein signifikanter Interaktionseffekt: Verglichen mit dem Anstieg der Anzahl an Blocks in der schwerstotternden Gruppe, war der Anstieg der Stotterereignisse in der schwerstotternden Kohorte für Prolongationen und Repetitionen signifikant geringer als innerhalb der Gruppe der Leichtstotternden. Ein Wert oberhalb 1 bedeutet, dass der Interaktionseffekt innerhalb der entsprechenden Kategorie in der schwerstotternden Gruppe signifikant anders ist als in der Gruppe der mildstotternden Probanden. Bei Werten unterhalb von eins ist der Effekt kleiner und nicht signifikant. Für Schwerstotternde zeigen sich insgesamt

weniger Repetitionen und Prolongationen als für Mildstotternde. Für Repetitionen und Blockaden ist der Effekt nicht signifikant anders.

Tabelle 6: Modellkoeffizienten eines gemischten Effekt-Null-Inflationsmodells der Anzahl nach Schweregrad und Stottertyp. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und statistische Bioinformatik.

Term	estimate	Konfidenzintervall	P-Wert
(Intercept)	1,9	[0,92; 3,89]	0,081
Schwereschwer	5,52	[2,09; 14,55]	0,001
Stottersymptom Prolongation	3,27	[2,14; 4,98]	< 0,001
Stottersymptom Repetition	1,31	[0,86; 2,01]	0,214
Stottersymptom Repetition und Block	0,0734	[0,02; 0,25]	< 0,001
Stottersymptom Repetition und Block	0,05	[0,01; 0,40]	0,005
Stotterschweregrad: schwer, Symptomart Prolongation	0,453	[0,29; 0,72]	0,001
Stotterschweregrad: schwer, Symptomart Repetition	0,549	[0,34; 0,90]	0,017
Stotterschweregrad: schwer, Symptomart Repetition und Block	3,28	[0,92; 11,1]	0,067
Stotterschweregrad: schwer, Symptomart Repetition u. Prolongation	1,66	[0,19; 14,43]	0,648

Außerdem wurden die Stotterereignisse entsprechend ihres Schweregrads in einer Heatmap dargestellt. Diese Heatmap ist in Abbildung 12 dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht eine vereinfachte Darstellung der Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Stottersymptome je nach Proband. Ziel der Darstellung ist die Untersuchung, ob sich innerhalb der Stotterereignisse bestimmte Gruppierungen von Charakteristiken finden ließen. Links der Heatmap sind die unterschiedlichen Stottersymptome und Symptomkombinationen vertikal aufgelistet. Auf der horizontalen Achse sind die stotternden Probanden ihrem Stotterschweregrad sortiert. Weiter links finden sich dabei die Probanden mit einem leichteren Stotterschweregrad, je weiter rechts die Probanden aufgelistet sind, desto schwerer ist das Stottern ausgeprägt. Bei der Darstellung der Daten in der Heatmap handelt es sich um eine logarithmische Darstellung. Die in der Heatmap dargestellten Ereignisse sind nicht unabhängig. Die Kästchen stehen hier nicht für eine genaue Anzahl an Ereignishäufigkeiten, die Häufigkeitswahrscheinlichkeit ist hier in der Farbtiefe kodiert. Die Häufigkeit des Vorkommens eines Stottersymptoms beim jeweiligen Probanden ist durch die Farbtiefe kodiert.

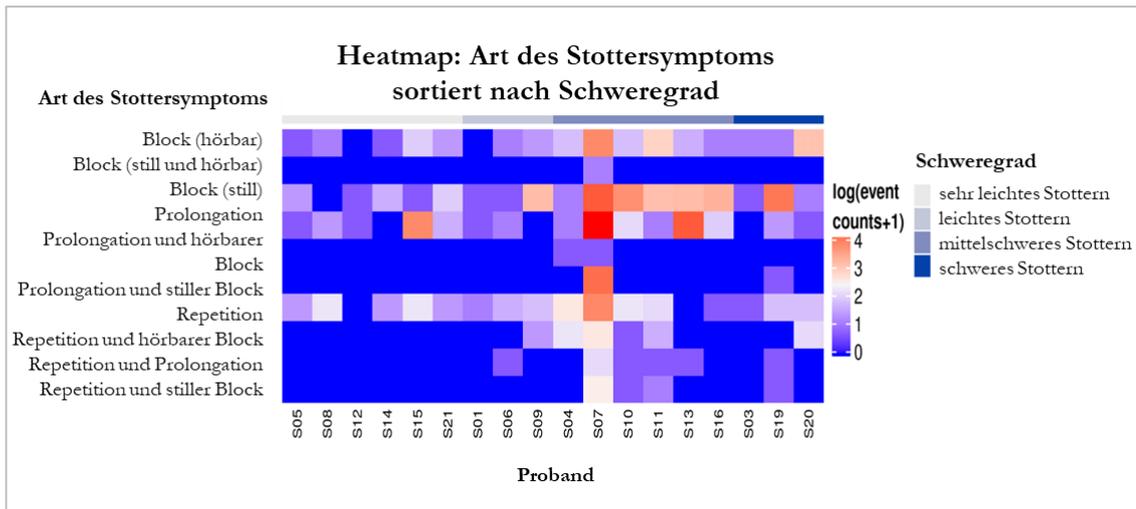


Abbildung 12: Heatmap: Art der Stottereignisse nach Schweregrad. Die Y-Achse entspricht der Art des Stottereignisses. Auf der X-Achse finden sich die Probanden geordnet von links nach rechts aufsteigend sortiert nach Schweregrad des Stotterns. Auf der Y-Achse ist die Verteilung der Art der Stottersymptome dargestellt. Je stärker ein Feld in der Heatmap in Rot dargestellt ist, desto häufiger trat das entsprechende Symptom auf. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

Die Verteilung der Stottereignisse aufgeteilt nach ihrem Schweregrad und der prozentualen Verteilung der Art der Stottereignisse innerhalb der einzelnen Schweregrade ist in Abbildung 13 dargestellt. Auf der Y-Achse sind dabei die Schweregradkategorien von unten nach oben aufsteigend dargestellt. Die X-Achse zeigt die prozentuale Verteilung der Art der Stottereignisse innerhalb der einzelnen Schweregradkategorien. Diese Verteilung ist farblich kodiert.

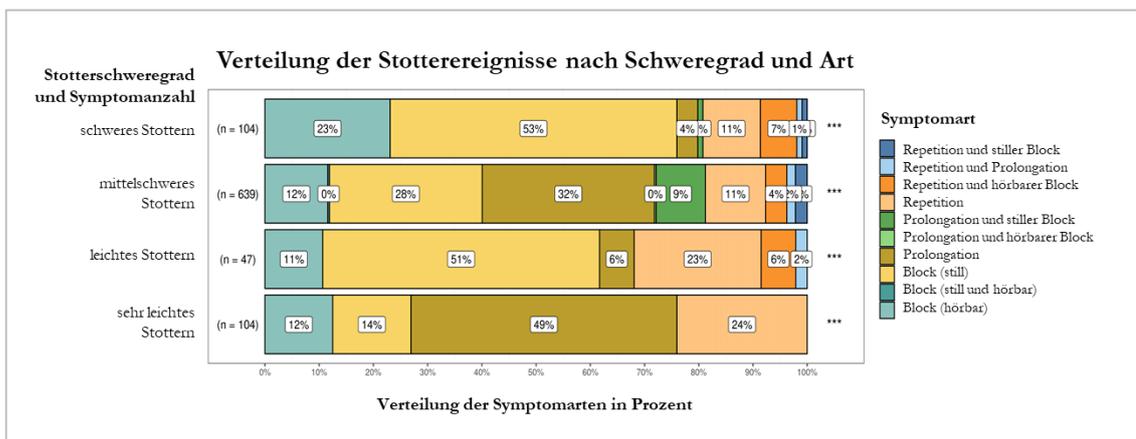


Abbildung 13: Häufigkeit der Stottereignisse geordnet nach Schweregrad und Art der Symptome. Die X-Achse zeigt die Verteilung der Stottereignisse in Prozent. Auf der Y-Achse ist der Schweregrad des Stotterns dargestellt. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen

### **3.7 Hypothese 4: Veränderte Bewegungsmuster innerer und äußerer Artikulatoren**

In der vierten Hypothese nahmen wir an, dass die Bewegungsmuster der inneren und äußeren Artikulatoren bei stotternden Probanden gegenüber den nicht-stotternden Probanden verändert wären.

In der ersten Teilhypothese vermuteten wir, dass sich hörbare Stotterereignisse in auffälligen Bewegungen der äußeren und inneren Artikulatoren widerspiegeln würden.

Die zweite Teilhypothese bestand darin, dass sich unhörbare Stotterereignisse in stummen Blocks widerspiegeln würden.

Mit der vorliegenden Arbeit sollte zunächst das vorliegende Videomaterial gesichtet werden. Wir entschieden uns für eine semi-quantitative Erfassung und eine rein optische Analyse der Stotterereignisse. Auf Grundlage der Analyse der vorliegenden Arbeit wurden im Verlauf weitere Ansätze entwickelt, die in ihrem Umfang Inhalt für eine eigene Dissertation bieten. Dementsprechend stellt die vorliegende Arbeit eine Grundlage der Datenanalyse dar, an die weitere Analysen und Untersuchungen anknüpfen. Somit lässt sich diese Hypothese im Rahmen der vorliegenden Dissertation nicht vollumfänglich beantwortet werden. So wurde für die detaillierte Untersuchung der Bewegungsmuster der artikulatorischen Muskeln eine automatisierte Analysemethodik entwickelt, bei der die Bewegungsmuster anhand festgelegter Markerpunkte analysiert und verglichen werden können. Dementsprechend ist die Beantwortung dieser Hypothese aktuell Gegenstand einer weiteren Dissertation, deren Ergebnisse separat veröffentlicht werden und auf den Daten der vorliegenden Dissertation aufbauen.

### **3.8 Hypothese 5: Flüssige Sprache bei Stotternden**

Bei der fünften Hypothese gingen wir davon aus, dass sich die auffälligen artikulatorischen Muster nicht bei flüssigsprechenden Probanden finden ließen.

In einer zweiten Teilhypothese vermuteten wir, dass sich die auffälligen artikulatorischen Muster der Stottersymptome sich nicht in den flüssigen Sprechabschnitten der stotternden Probanden finden ließen. Für die Beantwortung dieser Hypothese bedarf es zunächst einer Analyse der häufigsten Muster der gestotterten Silben. Eine rein optische Analyse dieser Sprechmuster wäre aus Gründen der objektivierbaren Vergleichbarkeit nicht ausreichend. Es bedarf hierfür die Programmierung einer Software zur automatisierten Analyse der Sprechmuster und für den Vergleich der entsprechenden flüssigen Sprechabschnitte von stotternden Probanden mit denen der flüssigsprechenden Kohorte. Wie auch schon die vorhergehende Hypothese bietet die Beantwortung dieser Hypothese eine sehr umfangreiche Grundlage einer eigenen Dissertation, die derzeit in Planung ist und separat veröffentlicht wird.

### 3.9 Hypothesenfreie Clusteranalyse

Die statistische Auswertung wurde durch eine Clusteranalyse ergänzt. Hierbei wurden zunächst alle 894 Stotterereignisse einer Reihe von Multiple-Korrespondenz-Analysen unterzogen.

#### 3.9.1 Untersuchung auf individuelle Häufigkeiten innerhalb der Symptomatik

Aufgrund der großen Vielfalt an Daten wurden die Ergebnisse neben der hypothesennahen Analyse einer multiplen Korrespondenzanalyse unterzogen. Mit dieser Erweiterung der individuellen Komponentenanalyse wird untersucht, inwiefern sich ordinalskalierte Daten bestimmter Variablen unterscheiden und ob sich innerhalb aller Variablenmerkmale eine Häufung von Ähnlichkeiten bzw. Clusterbildungen beobachten lassen. In den dargestellten Koordinatensystemen werden die Ähnlichkeiten innerhalb der Variablen zweidimensional dargestellt. Dabei liegen die Durchschnittsprofile der Stottervariablen im Ursprung des Koordinatensystems. Die Abstände zwischen den Punkten auf der Grafik entsprechen den Unterschieden der aufgetretenen Ereignisse. Je näher zwei Merkmale beieinander liegen, umso mehr Ähnlichkeit haben sie. Liegt eine Eigenschaft weit vom Ursprung des Koordinatensystems entfernt, unterscheidet sie sich umso mehr vom Durchschnitt (Backhaus et al. 2016).

In der durchgeführten Korrespondenzanalyse wurden die Variablen Symptomart, Lautart, Artikulationsort für Konsonanten, Lautklassen für Konsonanten und Stimmhaftigkeit/Stimmlosigkeit ebenfalls für Konsonanten näher betrachtet.

In den Abbildungen der multiplen Korrespondenzanalyse werden alle Stotterereignisse nach Ähnlichkeiten sortiert und es erfolgte eine stufenweise Analyse nach Ähnlichkeiten bzw. Unähnlichkeiten der Merkmale. Es folgen die Darstellungen der multiplen Korrespondenzanalyse in eigenen Koordinatensystemen zunächst für alle Variablen, dann nochmals gesondert je für Vokale und Konsonanten. In mehreren Schritten wurden aufgrund der besseren Darstellbarkeit Faktoren entfernt, die nur für eine kleine Anzahl der Merkmale relevant waren. Jede Abbildung besteht aus zwei Koordinatensystemen. Im jeweils linken Koordinatensystem sind alle individuellen Stotterereignisse nach der Ähnlichkeit ihres Auftretens dargestellt. Ein blauer Punkt steht dabei für ein Stotterereignis. Es entstanden für jede Obervariable Punktwolken, mit individueller Verteilung der blauen Punkte. Das jeweils rechte Koordinatensystem visualisiert in diesem Zusammenhang die Ähnlichkeit der einzelnen Stottervariablen zueinander und den Einfluss der Variablen auf die Clusterung. Die roten Punkte befinden sich in der gleichen Dimension und zeigen die Verteilung der Variablen. An dieser Verteilung der Variablen lässt sich ablesen, welche Variablen am meisten zur Ähnlichkeit der Merkmale beigetragen haben. Im ersten Schritt erfolgte die nähere Betrachtung aller Stotterereignisse. In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der multiplen Korrespondenzanalyse aller Stotterereignisse dargestellt. In der linken Darstellung findet sich die Darstellung aller

Hauptkomponenten in Form der blauen Punkte. Daraus wird ersichtlich, dass palatale und uvulare Ereignisse eine Sonderstellung innehaben. In einer weiteren Darstellung sind in Abbildung 15 die Ergebnisse der multiplen Korrespondenzanalyse nur für Vokale gezeigt. Hierbei zeigt sich eine weitgehend homogene Verteilung der Vokale anhand ihrer beschreibenden Merkmale. Außerdem wurde eine weitere Korrespondenzanalyse nur mit Konsonanten durchgeführt. Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der multiplen Korrespondenzanalyse für Konsonanten ohne Ausschluss von Ausreißern. Es zeigt sich jedoch eine inhomogene Verteilung der Merkmale verteilt über die Matrix: palatale und uvulare Stotterereignisse sind in dieser Abbildung weit entfernt vom Ursprung des Koordinatensystems dargestellt und nehmen somit eine Sonderstellung ein. Es zeigen sich zwei Punktwolken und zwei herausstechende Punkte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in Abbildung 17 und Abbildung 18 die Ergebnisse der multiplen Korrespondenzanalyse der Konsonanten ohne palatale und uvulare Ergebnisse dargestellt. Nach Ausschluss palataler und uvularer Stotterereignisse ergibt sich somit eine weitgehend homogene Verteilung der gestotterten Ereignisse für Konsonanten und entsprechende Nebenfaktoren.

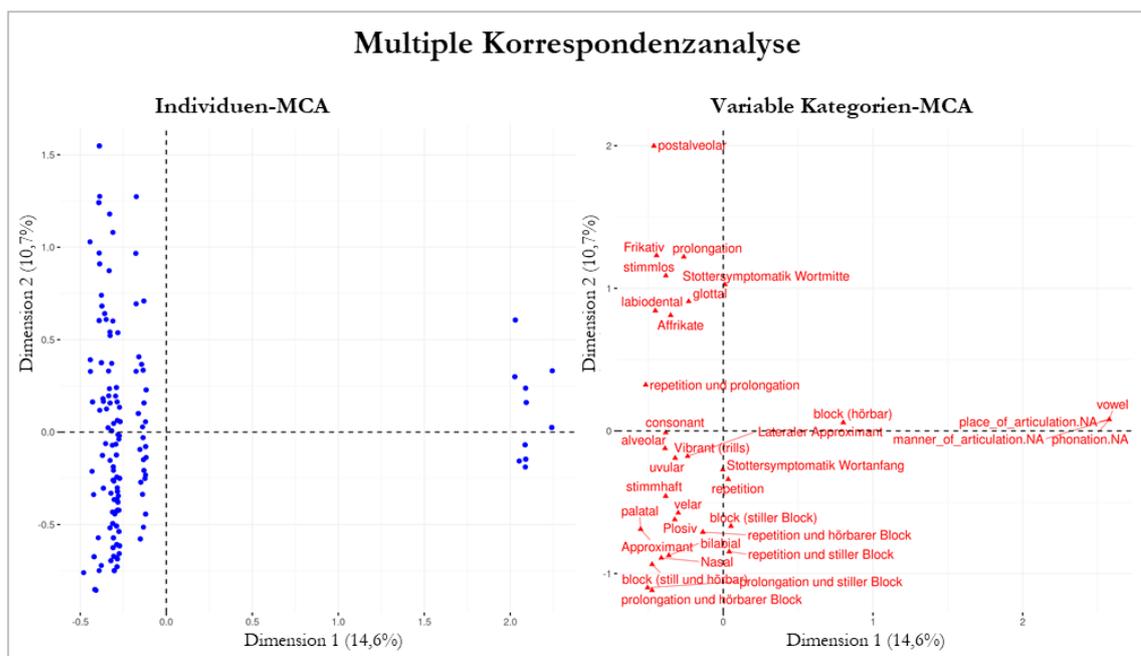


Abbildung 14: Multiple Korrespondenzanalyse aller Stotterereignisse. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen

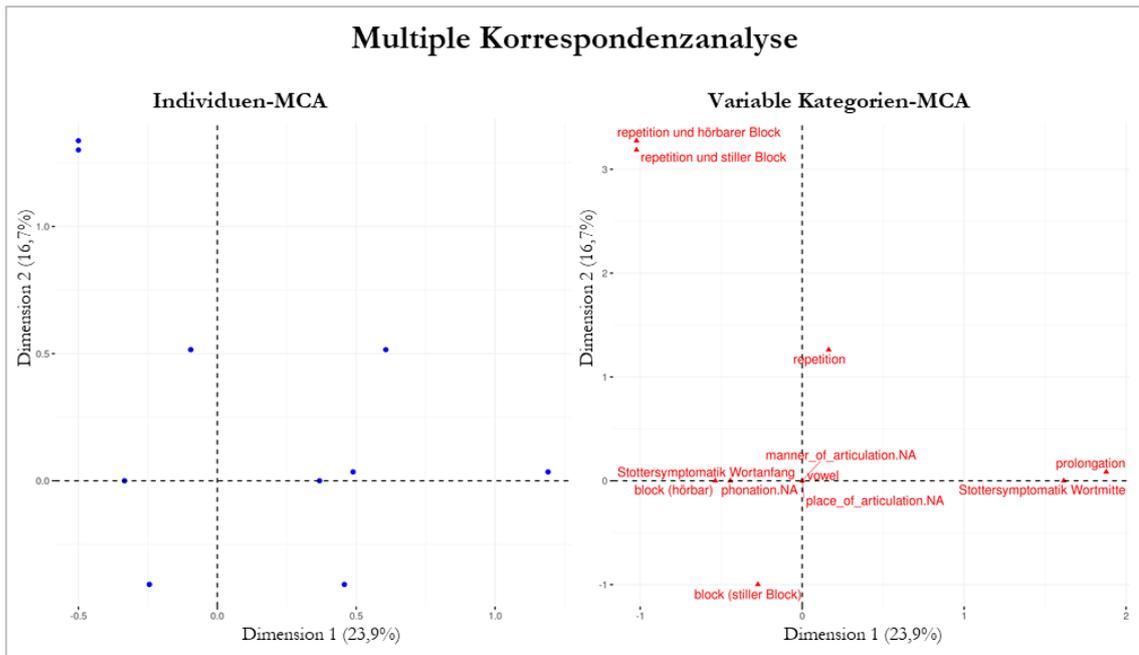


Abbildung 15: Multiple Korrespondenzanalyse für Vokale. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

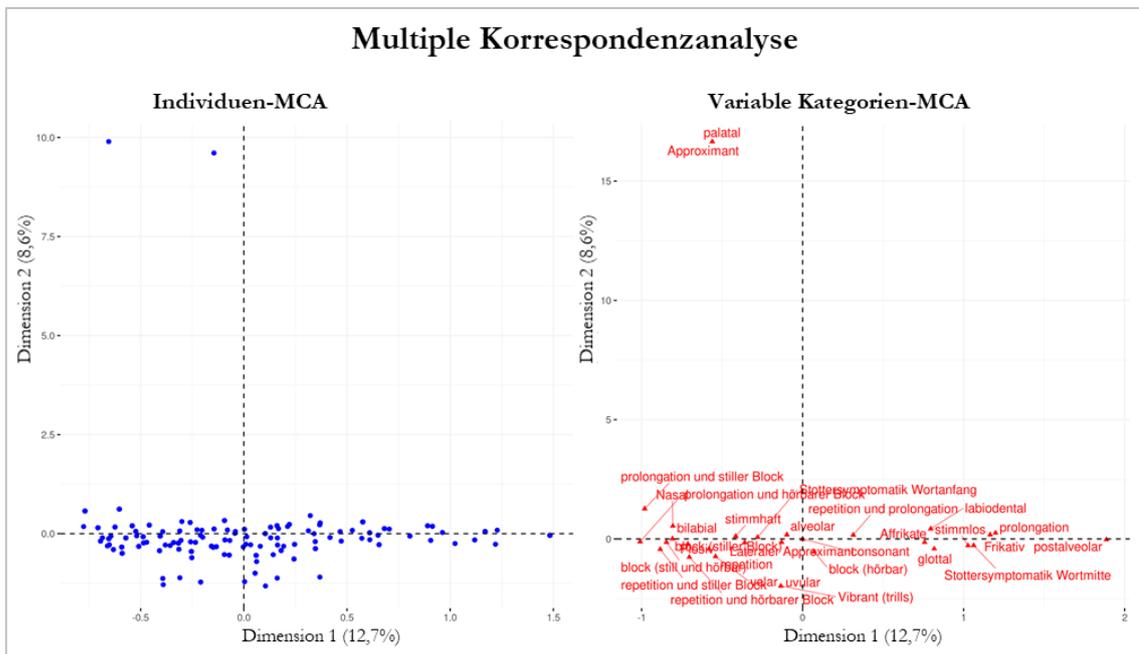


Abbildung 16: Multiple Korrespondenzanalyse für Konsonanten. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

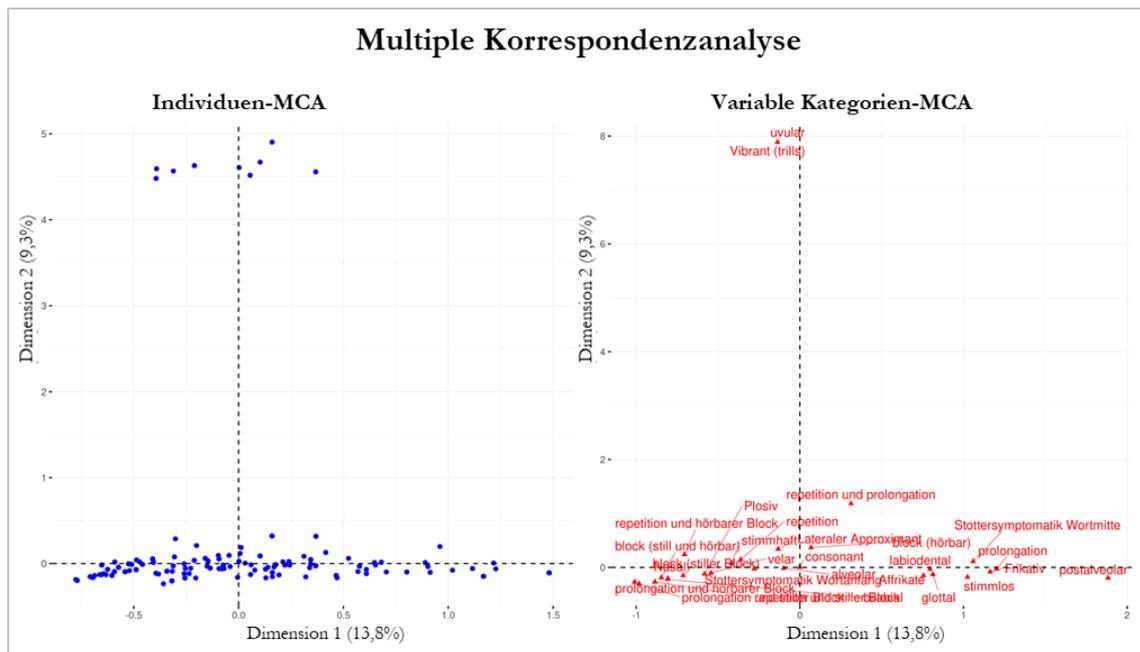


Abbildung 17: Multiple Korrespondenzanalyse für Konsonanten ohne palatale Ereignisse. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

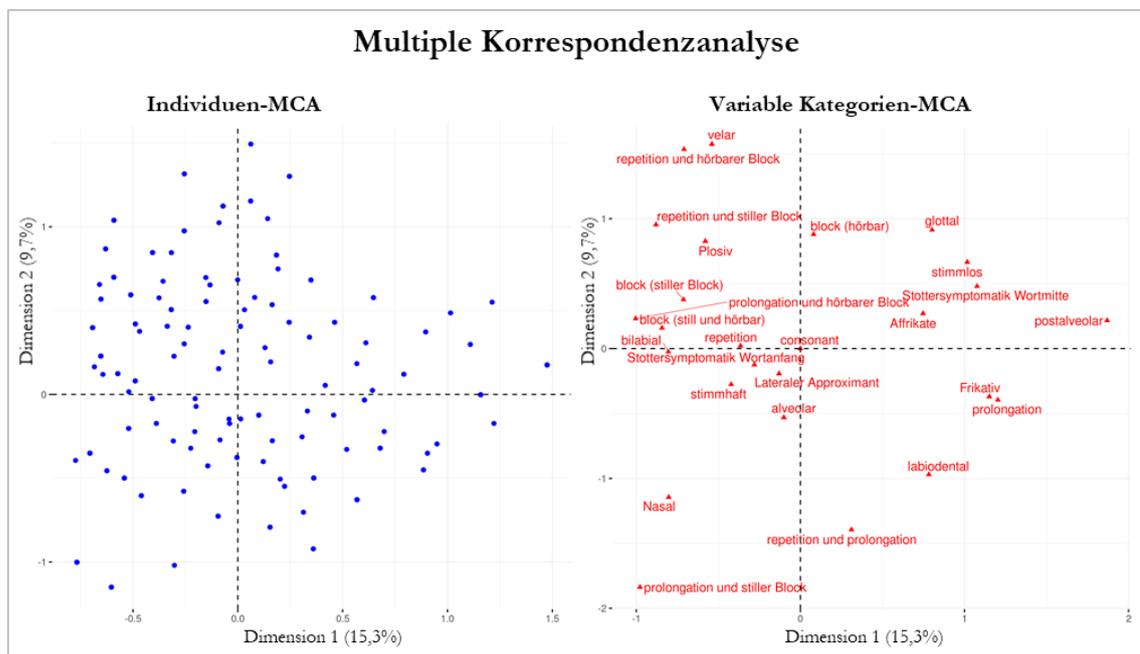


Abbildung 18: Multiple Korrespondenzanalyse für Konsonanten ohne uvulare und palatale Ereignisse. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

### 3.9.2 Clusterbildung auf Grundlage des Stotterprofils

In einer zweiten Analyse untersuchten wir, ob es auf Grundlage des individuellen Stotterprofils der Probanden zu einer Clusterbildung kam. Mittels einer

korrelationsbasierten hierarchischen Clusteranalyse wurden die Probanden hierbei anhand ihres individuellen Stotterprofils gruppiert. Mit Clusterbildung ist hierbei gemeint, ob sich bestimmte charakteristische Symptomgruppen auf Grundlage des individuellen Stotterprofils abgrenzen ließen, in denen die Stotternden gleiche Symptome bei gleichen Lauten und in gleicher Artikulationsart zeigen. Es ließen sich dabei drei Subgruppen anhand ihrer Symptomcharakteristiken definieren.

In der ersten Gruppe zeigte sich die Stottersymptomatik in Form von Prolongationen, außerdem trat die Symptomatik vor allem bei Konsonanten am Wortanfang oder nach Beginn des Wortes. Gestotterte Konsonanten waren eher stimmlos, am häufigsten stotterten die Probanden bei Frikativen.

In der zweiten Gruppe zeigten sich vor allem stille Blocks, die Stottersymptomatik trat dabei eher bei stimmhaften Konsonanten und am Wortbeginn auf.

Die dritte Gruppe sticht etwas heraus, hierbei wurden Vokale etwas häufiger gestottert als Konsonanten, am häufigsten traten stille Blocks auf. Ansonsten zeigt sich eine heterogene Verteilung der untersuchten Kategorien innerhalb dieser Gruppe.

In Tabelle 7 sind die zunächst Metadaten der drei erkennbaren Clustergruppen zusammengefasst.

Tabelle 7: Metadaten der Clusterbildung der Probanden auf Grundlage des Stotterprofils. Die P-Werte kennzeichnen die Signifikanz der Mann-Whitney-U Tests zwischen Cluster 1 und Cluster 2. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

Parameter	Level	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	p-Werte	Korrigierter p-Wert
Anzahl der Probanden im jeweiligen Cluster		6	10	2		
Alter					0,87	1,00
	Mean $\pm$ SD	29 $\pm$ 7	30 $\pm$ 9	24 $\pm$ 7		
	Median (Min; Max)	26 (23; 43)	26 (18; 45)	24 (19; 29)		
Bildungsgrad					0,70	1,00
	Mean $\pm$ SD	3,3 $\pm$ 1,2	2,6 $\pm$ 1,8	3,5 $\pm$ 2,1		
	Median (Min; Max)	3,5 (2; 5)	4 (1; 6)	3,5 (2; 5)		
Händigkeit					0,70	1,00
	Mean $\pm$ SD	59 $\pm$ 71	82 $\pm$ 25	79 $\pm$ 187		
	Median (Min; Max)	87 (- 83; 100)	92 (17; 100)	79 (66; 92)		
SSI-Score					0,38	1,00
	Mean $\pm$ SD	21 $\pm$ 9	25 $\pm$ 8	20 $\pm$ 8		
	Median (Min; Max)	18 (12; 34)	26 (13; 37)	20 (14; 25)		
Schweregrad					0,34	1,00
	Sehr leichtes Stottern	3 (50 %)	2 (20 %)	1 (50 %)		
	Leichtes Stottern	1 (16,7 %)	2 (20 %)	0 (0,0 %)		
	Mittelschweres Stottern	1 (16,7 %)	4 (40 %)	1 (50,0%)		
	Schweres Stottern	1 (16,7 %)	2 (20 %)	0 (0,0 %)		

Die korrelationsbasierte Clusteranalyse auf Basis der durchschnittlichen Stotterprofile wurde ebenfalls in einer Heatmap dargestellt.

Abbildung 19 zeigt diese Heatmap. In dieser Heatmap ist die Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Stotterereignisse dargestellt und Häufungen von Symptomähnlichkeiten bei den unterschiedlichen Probanden werden in Form von Subgruppen kategorisiert. Unterhalb der Heatmap sind die Merkmale aufgelistet, nach denen die Stotterereignisse kategorisiert wurden. Rechts der Heatmap sind die Probanden sortiert nach Häufungen von Stotterereignischarakteristiken nach Ähnlichkeit der Stotterereignisse in drei Subgruppen sortiert. Es handelt sich bei den Stotterereignissen nicht um unabhängige Ereignisse. Ein Kästchen stellt hierbei nicht die eine genaue Anzahl an Ereignishäufigkeiten dar, die Häufigkeitswahrscheinlichkeit wird hier in der Farbtiefe kodiert. Bei den dargestellten Merkmalen handelt es sich nicht um unabhängige Variablen, die Variablen interferieren miteinander und die Berechnung des korrelationsbasierten Clusters diene dazu, um relative Abhängigkeiten zu berechnen. Die Darstellung dient der Klärung der Frage, ob sich bestimmte Variablengruppierungen feststellen ließen. Wichtig dabei ist, dass die Kategorisierung nach getrennten Merkmalen erfolgte (Symptomtyp, Wortart, Lautart, Artikulationsweise). Es können sich beispielsweise Probanden mit vielen Prolongationen an stimmlosen Konsonanten zeigen, es muss sich dabei jedoch nicht um das gleiche Ereignis handeln. Die horizontal unterhalb der Heatmap aufgelisteten Merkmale sind entsprechend einer ähnlich häufigen Auftretenswahrscheinlichkeit angeordnet, das heißt nah beieinander aufgelistete Merkmale treten ähnlich häufig auf. Rechts neben der Heatmap sind horizontal die stotternden Probanden aufgelistet, diese wurden hierbei nach ähnlichen Symptommerkmalen sortiert. Dabei ist die Bildung von 3 Subgruppen anhand ihrer Symptommerkmale ablesbar. Die Probanden S01, S03, S12, S13, S14 und S15 bilden eine Subgruppe mit ähnlichen Merkmalsausprägungen, die Probanden S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S19 und S20 bilden eine zweite Subgruppe. Die Probanden S16 und S21 bildeten die dritte Subgruppe.

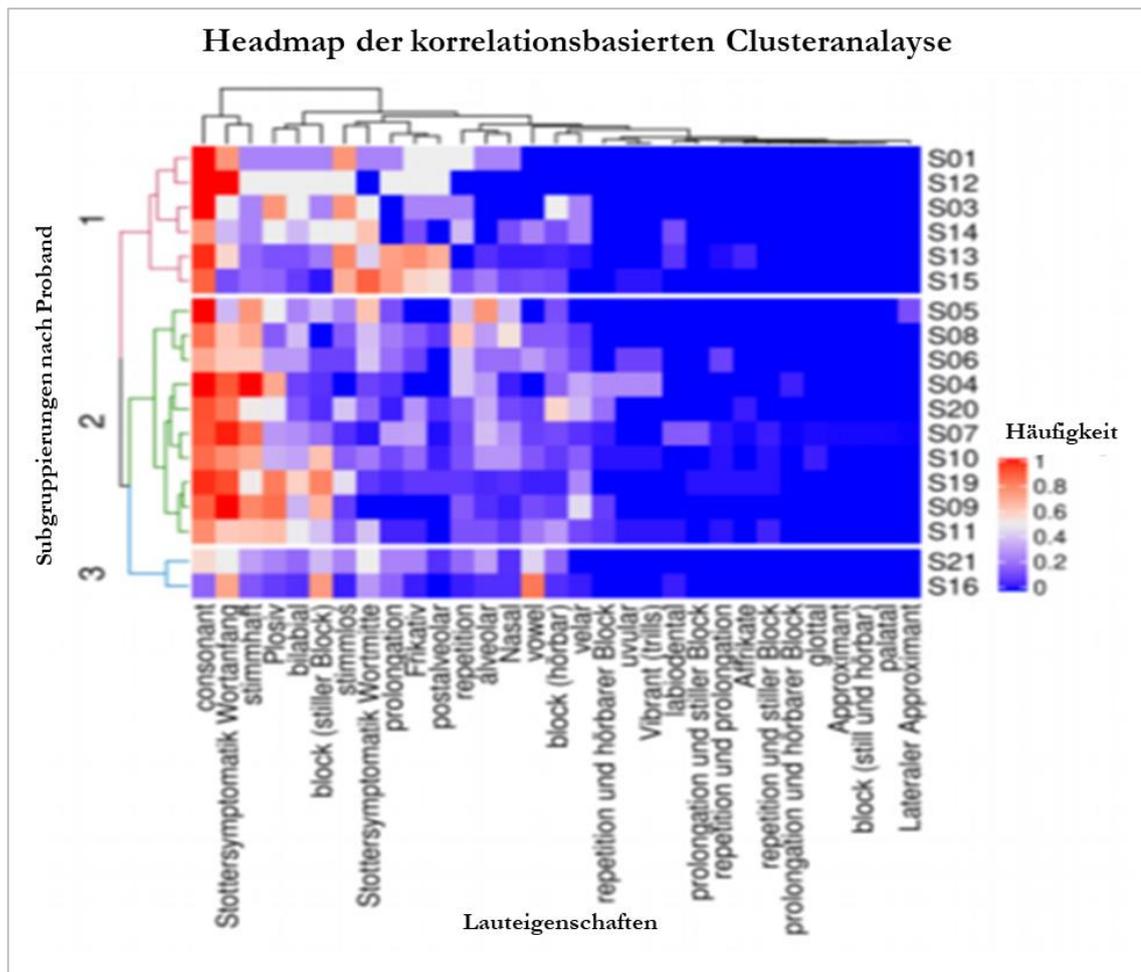


Abbildung 19: Heatmap der korrelationsbasierten Clusteranalyse der durchschnittlichen Stotterereignisse auf Grundlage des Stotterprofils pro Proband. Auf der X-Achse sind die Stottersymptome nach Art, Lautart, Artikulationsart und Artikulationsweise aufgetragen. Die Y-Achse zeigt die Verteilung der Probanden sortiert nach ihrem Stotterprofil. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

In Abbildung 20 ist das Dendrogramm der korrelationsbasierten Clusteranalyse auf Grundlage des individuellen Stotterprofils zu sehen und zeigt nochmals gesondert die Clusterung der einzelnen Subgruppen sortiert nach ihrer Merkmalsausprägung. Mit einem Dendrogramm können hierarchische Clusterungen übersichtlicher dargestellt werden. Dabei werden die Datenmengen in immer kleinere Untermengen aufgeteilt dargestellt. Im Ursprung des Dendrogramms wird der Kern des gemeinsamen Clusters dargestellt, den die Gesamtmenge aller Individuen gemeinsam enthält. Die einzelnen Äste des Dendrogramms stellen die Gruppierungen bzw. Ähnlichkeiten bestimmter Merkmale dar, die alle zur Gesamtdatenmenge zugehörig sind. Die vertikale Achse links neben dem Dendrogramm dient der Darstellung von Ähnlichkeiten. An den Punkten, an denen zwei Untercluster zusammenlaufen, lässt sich anhand der Höhe der Zusammenführung die Ähnlichkeit der beiden Subgruppierungen auf der Skala der y-Achse ablesen. Im vorliegenden Dendrogramm lässt sich eine hierarchische Clusterung innerhalb der Probanden erkennen: die Äste des Dendrogramms laufen auf verschiedenen Höhen auseinander und unterteilen sich nach und nach in ihre Subgruppen (Galili 2015). Hierbei ist analog zur dargestellten

Heatmap die Bildung von drei Subgruppen anhand ihrer Symptommerkmale ablesbar. Die Probanden S01, S03, S12, S13, S14 und S15 bilden eine Subgruppe mit ähnlichen Merkmalsausprägungen, die Probanden S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S19 und S20 bilden eine zweite Subgruppe. Die Probanden S16 und S21 bildeten die dritte Subgruppe mit ähnlicher Merkmalsausprägung.

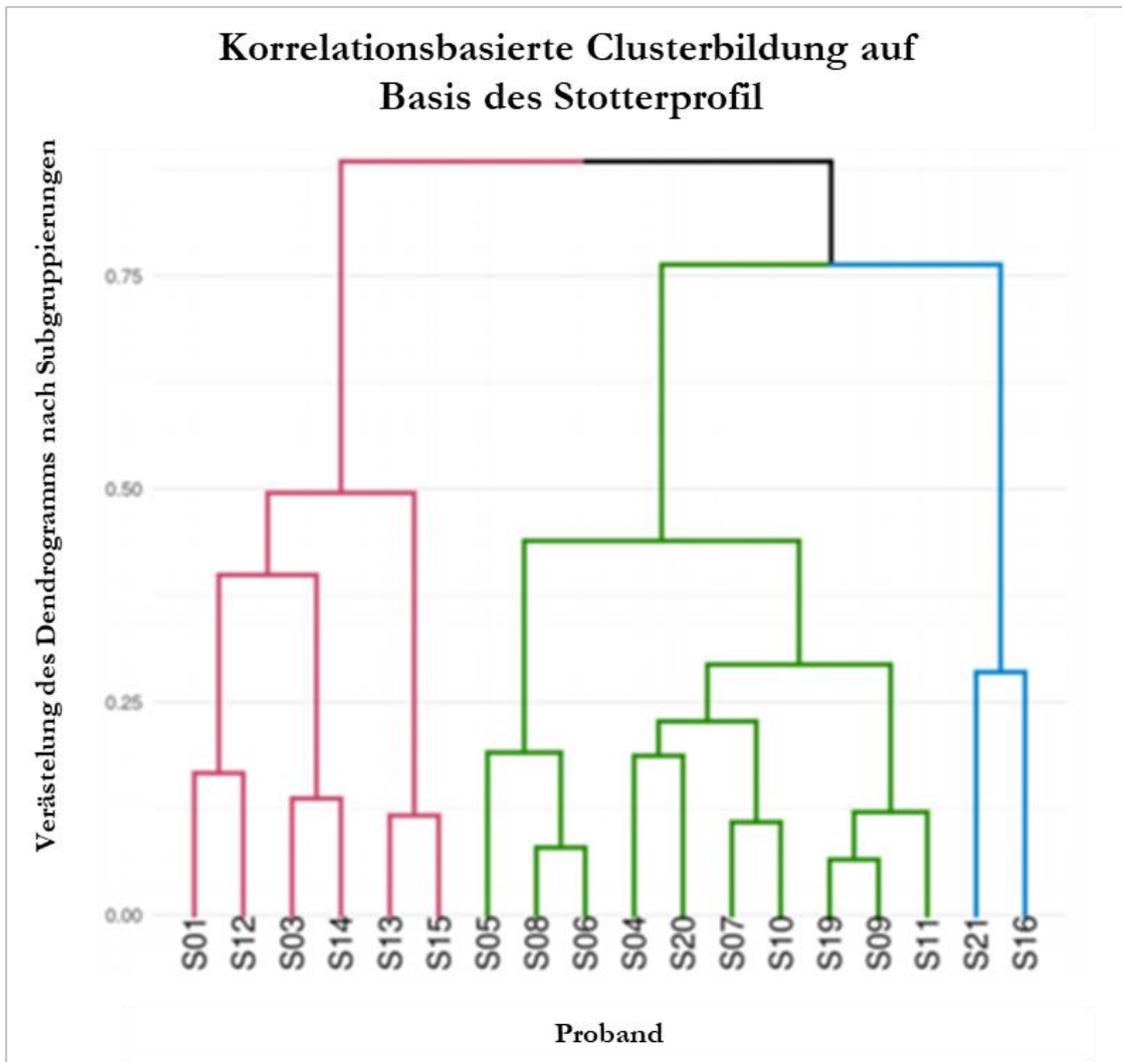


Abbildung 20: Dendrogramm der korrelationsbasierten Clusterbildung der Probanden auf Grundlage ihres durchschnittlichen Stotterereignisprofils. Dargestellt sind die beiden im Text beschriebenen auf Basis des individuellen Stotterprofils entstandenen Stotterprofilgruppen in rot und blau. Proband 16 ließ sich keiner der beiden Profilgruppen zuordnen und wurde aus diesem Grund hier grün dargestellt. Die Verwendung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Dr. Leha, Medizinische Biometrie und Statistische Bioinformatik Universität Göttingen.

## 4 Diskussion

### 4.1 Ziel der Studie

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine Studie mit mehreren explorativen Schritten. Das Auswertungsdesign ergab sich schrittweise während der Aufzeichnung der Messungen. Erstmals wurden in dieser Studie die Sprechbewegungen bei gestotterter Sprache mit der Technik der neuartigen Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie sichtbar gemacht, um gestotterte Sprache näher zu charakterisieren. Bei diesen Messungen entstand eine Vielzahl an Filmsequenzen des Probandenkollektivs von 40 stotternden und nicht-stotternden Probanden. Aufgrund dieser Masse an Material gestaltete sich die Entscheidung, auf welche Art und Weise das Filmmaterial ausgewertet und analysiert werden sollte, herausfordernd. Die neuartige Methodik der Untersuchung von gestotterter Sprache verlangte die endgültige Entscheidung zur Analysemethodik der Studie mehrfache Abstimmungen und Nachjustierung. Dementsprechend erfolgten eine Sichtung des Materials und eine erste semiquantitative Auswertung der Stottereignisse. Im Rahmen dieser semiquantitativen Statistik wurden weitere umfangreiche Fragestellungen erarbeitet, die in weiteren Doktorarbeiten beantwortet werden sollen.

Die vor der Entwicklung der Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie eingesetzten Untersuchungsmethoden zur Untersuchung von Stotterbewegungen basierten auf elektromyographischen, aerodynamischen und spektrographischen Methoden. Die eingeschränkte Anwendbarkeit der bisher genutzten Methoden hat verschiedene Gründe. Für die Darstellung von Bewegungsabläufen ist eine gewisse zeitliche Auflösung der Bildaufnahmen notwendig. Diese lässt sich durch elektromyographische Methoden oder den Einsatz von Hochgeschwindigkeitsultraschall erzielen. In der Aufzeichnung mangelt es dann allerdings wiederum an der Darstellbarkeit aller Abschnitte des Sprechapparats. So kann beispielsweise im Hochgeschwindigkeitsultraschall, einer Untersuchung mit einer höheren Anzahl an Bildern pro Zeiteinheit, zwar die Bewegung der Zunge erfasst werden. Nachteilig ist dabei jedoch, dass die Zungenspitze teilweise vom Unterkiefer verdeckt wird. Bei einem anderen hochauflösendem Verfahren, der elektromagnetischen Artikulographie wird wiederum der Sprechfluss durch Spulen auf der Zunge beeinträchtigt (Platt und Basili 1973; McClean et al. 1984; Heyde et al. 2016). Ein weiteres Problem stellt die mangelnde parallele Darstellung intra- und extraoraler Sprechbewegungen dar. Diese simultane und dynamische Abbildung von Bewegungsabläufen in allen Bereichen des oralen Sprechapparats ist nur unter wenigen Untersuchungsbedingungen mit Modalitäten wie optomagnetischen Untersuchungsmethoden verlässlich möglich. Aber auch diese Untersuchungsmethode beschränkt sich vor allem auf Lippen und Hautoberfläche und

bietet nur eingeschränkt Einblick in die Bewegungsabläufe des inneren Sprechapparats (Smith et al. 2012).

Eine tiefere Analyse des Bewegungsvorgangs bei gestotterter Sprache erfordert somit eine Kombination einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung, die Erfassung möglichst vieler Anteile des oralen Sprechapparats, eine dynamische Erfassung der Bewegungsabläufe sowie eine simultane Aufzeichnung der zugehörigen Tonspur.

Die neuartige Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie vereint diese Anforderungen in eindrucksvoller Art und Weise. Durch die Weiterentwicklung der Magnetresonanztomographie wurden die technischen Limitationen der Untersuchungsmethoden aufgehoben. Diese technische Revolutionierung ermöglicht eine Erfassung von 30 bis 100 Bildern pro Sekunde (Uecker et al. 2010b).

Hier knüpft auch die vorliegende Studie an: Mit der Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie gelingt eine detaillierte Erfassung der Artikulationsbewegungen der inneren und äußeren oralen Artikulatoren mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung und der simultanen Aufzeichnung der Tonspur. Die vorliegende Arbeit versuchte, mit Hilfe der Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie-Studie die Artikulation von stotternden Erwachsenen zu charakterisieren und Aussagen darüber zu treffen, inwiefern sich die Artikulationsbewegungen von stotternden Menschen von den flüssig-sprechenden Menschen unterscheiden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einzeln diskutiert:

#### **4.1.1 Stottereignisse treten außerhalb des MRT-Scanners häufiger auf**

Beim Vergleich der gestotterten Symptome innerhalb und außerhalb des MRT-Scanners ergab sich eine Häufung der Symptome außerhalb des Scanners.

Dieses Ergebnis war zu erwarten und bestätigte unsere zweite Hypothese. Wir nahmen an, dass das Geräusch des Scanners als externer Taktgeber fungieren würde, der die Stotterfrequenz reduzieren würde. Dieses Ergebnis findet Bestätigung in mehreren Studien zuvor. Cherry et al. postulierten schon 1955, dass es durch externe Geräusche zu einer akustischen Maskierung und Reduktion der Stotterfrequenz käme. Andere Autoren berichten von einem Metronomeffekt, bei denen externe Geräusche als Taktgeber fungieren und einen positiven Einfluss auf den Sprechfluss von Stotternden haben (Brady 1969; Bloodstein und Bernstein Ratner 2007).

Auch Körperpositionen haben einen Effekt auf die Ausprägung des Stotterschweregrads. Almudhi et al. (2019) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Körperpositionen auf den Schweregrad des Stotterns und stellten für die liegende Position die stärkste Abnahme des Stotterschweregrads fest. Dieser Effekt könnte auch einen Einfluss auf Ergebnisse der vorliegenden Studie gehabt haben: Vor der Messung im MRT-Scanner wurde von jedem

Probanden eine Sprechprobe zur Einschätzung des Stotterschweregrads auf Video aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Videoaufnahmen erfolgte in sitzender Position im Untersuchungsraum. In der anschließend folgenden Messung im MRT-Scanner waren die Probanden liegend positioniert. Im Verhältnis sitzend/außerhalb des Scanners und liegend/innerhalb des Scanners zeigte sich eine deutliche Reduktion der Symptomanzahl für die Situation liegend/innerhalb des Scanners.

#### **4.1.2 Das Auftreten von Stotterereignissen ist von linguistischen Faktoren beeinflusst**

In zahlreichen Studien wurde der Einfluss von linguistischen Faktoren auf das Auftreten und die Verteilung von Stotterereignissen untersucht (vgl. z.B. Brown 1938; Bernstein 1981; Logan und Conture 1995). Brown postulierte schon 1938 verschiedene phonologische und lexikalische Faktoren, die Sprechunflüssigkeiten begünstigen. Zu diesen Faktoren zählte er die phonetische Komplexität des Wortes, die grammatikalische Komplexität, die Wortposition und die Wortlänge (Brown 1938; Howell et al. 1999; Dworzynski und Howell 2004)

In unserer Analyse untersuchten wir den Einfluss der Wortart, der Lautart, des Ortes der Lautbildung und der Silbenposition auf das Auftreten von Stottersymptomen: So traten bei den von uns untersuchten Probanden vor allem bei Pseudowörtern und Substantiven Stotterereignisse auf. Es zeigte sich außerdem eine Häufung von Stotterereignissen am Anfang eines Worts und bei Konsonanten im Vergleich zu Vokalen.

Diese Ergebnisse bestätigen unsere erste Hypothese, in der wir vermuten, dass Stottern von verschiedenen linguistischen Faktoren beeinflusst wird.

Im Folgenden werden die verschiedenen linguistischen Faktoren, die das Stottern beeinflusst haben, näher diskutiert:

#### **4.1.3 Inhaltswörter werden häufiger gestottert als Funktionswörter**

Zu den Inhaltswörtern zählen neben Substantiven auch Adjektive und Verben. Als Funktionswörter werden allgemein Artikel, Pronomen, Präpositionen und Hilfsverben gezählt (Hartmann und Stork 1973; Quirk et al. 1985).

Bezüglich der grammatikalischen Komplexität berichtete Brown, dass komplexere Inhaltswörter bei erwachsenen Stotternden häufiger gestottert werden als Funktionswörter (Brown 1938; Howell et al. 1999). In einer Reihe von Studien mit englischsprachigen Stotternden bestätigten sich diese Annahmen (Wingate 1988; Howell et al. 1999; Howell et al. 2000; Bloodstein und Bernstein Ratner 2007). Auch für deutschsprachige Erwachsene ließen sich diese Ergebnisse bestätigen. Dworzynski und Howell (2004) fanden in einer Studie mit deutschsprachigen Teilnehmern eine positive Korrelation zwischen dem Lesen von Inhaltswörter und der Stotterrate.

Die Ergebnisse unserer Studie hinsichtlich des Stotterns von Inhaltswörtern bestätigen die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Korrelation zwischen Wortart und Stotterrate.

#### **4.1.4 Pseudowörter werden nicht signifikant häufiger gestottert als Inhaltswörter**

Dieses Ergebnis überrascht, da wir vermuteten, dass die nicht existenten Wörter häufiger gestottert würden. Diese Vermutung begründete sich auf der unbekanntem, komplexeren Silbenanordnung und der fehlenden emotionalen oder linguistischen Bedeutung der Wörter. Ein Grund dafür, dass die Pseudowörter insgesamt nicht signifikant häufiger gestottert wurden, könnte paradoxerweise gerade in der Bedeutungslosigkeit und der komplexen Silbenanordnung dieser Wörter liegen. Diese unbekanntem Silbenanordnung und fehlende emotionale Bedeutung könnte dementsprechend beim ersten Lesen des Wortes zwar initial durchaus zu einer Unflüssigkeit während des Vorlesens geführt haben. Diese Unflüssigkeit könnte aber bei Stotternden und Flüssigprechern gleichermaßen auftreten, weil es sich bei der Unflüssigkeit um ein simples „Verlesen“ handeln könnte, als um ein manifestes Stottersymptom.

Die von uns genutzten Pseudowörter basieren auf einer Studie von Smith et al. (2010). Diese Studie untersuchte Lippen- und Kieferbewegungszyklen beim Lesen von diesen Pseudowörtern mittels eines optometrischen Systems. In der kinematischen Analyse zeigten sich für Stotternde beim Lesen von mehrsilbigen komplexen Pseudowörtern weniger konsistente Lippenöffnungszyklen und –koordination. Die Autoren schlossen daraus, dass das sprechmotorische System der Stotternden bei erhöhter linguistischer und phonologischer Komplexität mehr Variabilität, also eine größere Instabilität aufweist, als die Sprache flüssigprechender Probanden und dass diese bei steigender linguistischer Komplexität vermehrt stotterten. Allerdings ließ sich im Verlauf der mehrfachen Wiederholungen der Pseudowörter über die Zeit eine Reduktion der Stottersymptomatik beobachten.

Bezüglich der Tendenz, gerade bei Pseudowörtern zu stottern, beobachteten Dayalu et al. (2005) in einer Studie mit Pseudowörtern und echten Wörtern einen signifikanten Anstieg von Stottersymptomen bei den Pseudowörtern im Verhältnis zu den echten Wörtern. In einer weiteren Studie mit stotternden Kindern und Erwachsenen fand sich ein signifikanter Unterschied bei der stotternden Kohorte. So zeigten diese signifikant mehr Fehler beim Vorlesen in Form von segmentalen Fehler, Auslassungen und Deletionen innerhalb der Pseudowörter (Hakim und Ratner 2004).

Da in unserer hier vorliegenden Studie vorerst lediglich eine rein semi-quantitative Erfassung der Stottersymptomatik nach Wortart erfolgte, ist noch keine detailliertere Untersuchung der Pseudowörter-Bewegungszyklen in Anlehnung an Smith et al. (2010) durchgeführt worden.

Interessant wäre an dieser Stelle, ob sich auch in den Messungen in der Echtzeit-MRT instabilere Bewegungszyklen und eine weniger konsistente Lippenkoordination in der

stotternden Kohorte zeigen würde oder ob auch die Bewegungszyklen anderer Bereiche des oralen Sprachapparats instabilere Bewegungszyklen bei komplexeren Pseudowörtern zeigten. Dies ist aktuell noch Gegenstand detaillierter Untersuchungen und wird in einer separaten Arbeit vertiefend untersucht.

#### **4.1.5 Die erste Silbe eines Wortes wird häufiger gestottert als nachfolgende Silben**

Die Position der Silbe innerhalb eines Wortes hat einen Einfluss darauf, ob die Silbe gestottert wird oder nicht.

Die Ergebnisse unserer Studie decken sich diesbezüglich mit multiplen Studien seit den dreißiger Jahren, in denen die Hypothese postuliert wurde, dass die Position der Silbe innerhalb eines Wortes einen Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit von Stotterereignissen habe. In diesen Studien zeigte sich, dass über 90% aller unflüssigen Silben an der ersten Silbe eines Wortes auftraten. Diesen Effekt bezeichneten Forscher als *word-initial-effect*, nach dem Stotterereignisse überproportional oft bei der ersten Silbe oder Laut eines Wortes auftreten, aber nahezu niemals an der letzten Silbe (vgl. z.B. Brown 1938; Bloodstein und Bernstein Ratner, N. 2007). In einer Studie mit deutschsprachigen stotternden Kindern beobachteten Natke et al. (2004) 97,8% aller gestotterten Silben bei der ersten Silbe oder dem ersten Laut.

#### **4.1.6 Bilabiale und alveolare Konsonanten werden am häufigsten gestottert**

Bezüglich der am häufigsten gestotterten Lautart postulierten Dworzynski und Howell (2004) für Konsonanten, dass vor allem dorsale Konsonanten Stotterereignisse provozierten. Zu den dorsalen Konsonanten zählen palatale, velare, alveolo- palatale und uvulare Konsonanten. Anders als bei Dworzynski und Howell (2004) überwogen in unserer Studie bilabiale und alveolare Konsonanten hinsichtlich der Stotterereignisse.

Ein Grund dafür, warum dies in unserer Studie nicht der Fall war, ist der Umstand, dass dorsale Laute eher seltener in den Lesetexten unserer Studie vorkamen. Bilabiale Laute sind Laute, die mittels Aufeinanderpressens von Ober- und Unterlippen gebildet werden. Zu denen in der deutschen Sprache vorkommenden bilabialen Lauten zählen die Buchstaben B, P und M (Brünjes et al. 2012). Als alveolare Laute bezeichnet man jene Laute, die mit der Zunge am Wulst hinter den oberen Schneidezähnen gebildet werden. Dazu zählen die Konsonanten N, T, D, S, Z in der deutschen Sprache (Brünjes et al. 2012). Bezüglich der Häufigkeitsverteilung dieser Laute in der deutschen Sprache sind die alveolär gebildeten Konsonanten N (Vorkommen in Wörtern der deutschen Sprache: 9,78%), S (7,27%), T (6,51%) und D (5,08%) besonders häufig zu finden (Best, 2005). So wäre denkbar, dass das gehäufte Vorkommen dieser Laute in der deutschen Sprache gleichzeitig auch zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit führt, dass diese Laute gestottert werden.

#### 4.1.7 Plosive und Frikative werden häufig gestottert

Beim Vergleich der gestotterten Lautarten ließ sich feststellen, dass gerade Plosive und Frikative in der vorliegenden Studie gehäuft gestottert wurden. Plosive sind Verschlusslaute, die durch eine völlige Blockierung des Luftstroms im Mund und der darauffolgenden Öffnung des Mundes entstehen, wie die Buchstaben P und B. Frikative hingegen sind Reibelaute, bei der der Mund-Rachenraum enggestellt wird und der Luftstrom durch die Engstelle hindurch gepresst wird wie bei den Buchstaben F und V (Brünjes et al. 2012).

Für das gehäufte Auftreten von Frikativen innerhalb der gestotterten Silben findet sich Bestätigung in der Arbeit von Dworzynski und Howell (2004). In dieser Studie war neben dem gehäuften Auftreten von Frikativen eine Häufung von Stottersymptomen bei Wörtern mit Affrikaten zu beobachten. Dieses Ergebnis konnten wir in der vorliegenden Studie nicht bestätigen. Die Affrikate ist ein Verschlusslaut, bei dem ein Plosiv direkt in einen Frikativ übergeht. Dies ist eine Lautkonstellation mit seltenerem Auftreten innerhalb der deutschen Sprache und somit auch im von uns verwendeten Lesematerial, sodass sich hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit von Stottersymptomatik bei dieser Lautart nur eine eingeschränkte Aussage tätigen lässt.

#### 4.1.8 Existieren kombinierte Symptome?

Bei der Analyse der gestotterten Ereignisse ließen sich einige Ereignisse nicht eindeutig einer einzelnen Symptomklasse zuordnen. Aus diesem Grund wurde die Analysetabelle um den Punkt „kombinierte Symptome“ erweitert. Bei der Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich hierbei, dass Prolongationen/Repetitionen in Verbindung mit Blockierungen aufgetreten waren.

Die Literatur ist hinsichtlich Symptomkombinationen uneins. Für das mögliche Auftreten von Repetitionen innerhalb von Blockaden finden sich einige Beispiele. So nennen Sandrieser und Schneider (2015, S. 25) als diesbezügliches Beispiel des Auftretens von hörbaren Abschnitten innerhalb von Blockaden als derartige Variante. Bei Blockierungen auf Höhe der Glottis kommt es dabei zu Aktivierungen gegensätzlicher Muskelgruppen auf und es folgt ein Schluss der Stimm Lippen. Daraus folgt ein Einfrieren der Muskulatur mit mehrfach kurzzeitiger Unterbrechung des Luftstroms. Der daraus entstehende Ton erklingt staccatohaft und könnte als Repetition innerhalb einer eigentlich Blockierung gedeutet werden. Dieser Prozess des entstehenden Tons wird auch *vocal fry* genannt und kann als Beispiel für Repetitionen innerhalb von Blockaden angeführt werden (Sandrieser und Schneider 2015, S. 25).

Ähnlich argumentieren auch Natke et al. (2006) und postulieren, dass sich Blockaden bei Plosivlauten in Form von Repetitionen des ersten Lautes äußern können und somit als kombiniertes Symptom auftreten können. Auch Guitar (2014, S. 126-127) erwähnt, dass

Blockaden einerseits Teilwortwiederholungen beinhalten können und andererseits auch Prolongationen enthalten können

Andererseits beschreibt Guitar (2014, S. 126–127) zusätzlich, dass diese Symptome aufgrund ihrer artikulatorischen Entstehung aus seiner Sicht im Kern jedoch eher als Block zu werten sind statt als Prolongation. Dies widerspricht wiederum der vermuteten Existenz von kombinierten Symptomen.

Auch Sandrieser und Schneider (2015, S. 25) gehen an anderer Stelle davon aus, dass Blockierungen nicht hörbar sind und an Stellen auftreten, an denen normalerweise keine Redepause zu erwarten wäre.

Einige Autoren tätigen außerdem keine Unterscheidung zwischen Prolongationen und Blockaden und ziehen in Betracht, dass Blockaden einfach stille, mit großer Spannung entstehende Prolongationen seien (Sandrieser und Schneider 2015, S. 25). Bei Yairi und Ambrose (1999) werden Blockaden, Prolongationen und Redeflussunterbrechungen innerhalb eines Wortes mit dem Überbegriff der „*dysrhythmic phonation*“ zusammengefasst.

Wie aus den gegensätzlichen Literaturangaben ersichtlich, lässt sich die Frage, ob es kombinierte Symptome gibt, nicht eindeutig klären. Guitar (2014, S. 25) vermutet, dass wiederholte Abschnitte von Blockaden zeitweise aufgrund von mangelnder Erfahrung fälschlicherweise als Repetition gewertet werden könnten. Dies erscheint als nicht zu vernachlässigender Punkt und sollte bei weitergehender Analyse bedacht werden.

#### **4.1.9 Die relevanten Stotterereignisse sind bei Schwerstotternden häufiger als bei Leichtstotternden**

Die Modellrechnung ergab eine positive Korrelation zwischen Stotterschweregrad und der Anzahl der aufgetretenen Stottersymptome. Damit ergibt sich für die Gruppe der schwerstotternden Probanden eine erhöhte Anzahl an Stotterereignissen im Vergleich zu den leicht stotternden Probanden. Dies bestätigt unsere dritte Hypothese, in der wir vermuteten, dass alle relevanten Stotterereignisse bei Schwerstotternden häufiger auftreten würden als bei Leichtstotternden.

Die Aussage, dass Schwerstotternde mehr stottern, als Leichtstotternde scheint auf der Hand zu liegen.

Die Korrelation zwischen aufsteigendem Stotterschweregrad und quantitativer Häufung von Stottersymptomen ist plausibel und findet sich auch in der Literatur. Robb et al. (2009) konnten in einer Studie mit stotternden Erwachsenen einen Zusammenhang zwischen dem Stotterschweregrad und dem gehäuften Auftreten von Stotterereignissen innerhalb aufeinanderfolgender Worte feststellen. In der von ihnen durchgeführten Studie zeigte sich eine positive Korrelation zwischen dem Gesamtprozentsatz an Sprechunflüssigkeiten und der Auftretenswahrscheinlichkeit von mehreren aufeinander folgenden Stottersymptomen.

Auch Meyers (1986) beobachtete in einer Studie mit stotternden und nicht-stotternden Vorschulkindern Differenzen in der quantitativen Erfassung der Stottersymptomatik. Dabei zeigten schwerstotternde Vorschulkinder höhere Stotterraten, die beiden Gruppen unterschieden sich jedoch nicht in der Art der Symptomatik.

In der vorliegenden Studie lag der Fokus auf dem rein-quantitativen Vergleich der Häufigkeit der Stottersymptome zwischen Leicht- und Schwerstotternden. Andere Studien untersuchten die Korrelation zwischen Schweregrad des Stotterns und des gehäuften Auftretens mehrerer Stottersymptome innerhalb eines Worts oder aufeinanderfolgender Worte. LaSalle und Conture (1995) beobachteten in einer Studie mit stotternden Kindern eine signifikante Korrelation zwischen dem Stotterschweregrad und dem Auftreten von mehreren Stottereignissen innerhalb kurz nacheinander folgender Worte.

Hubbard und Yairi (1988) wie auch LaSalle und Conture (1995) schlugen dahingehend vor, dieses gehäufte Auftreten von Stottersymptomen als Messinstrument zur Identifikation von frühkindlichem Stottern und zur Einschätzung des Schweregrads zu nutzen.

Zu bedenken bleibt, dass es sich bei der Einschätzung des Stotterschweregrades um eine Momentaufnahme des Stotterstatus der betroffenen Personen handelt. Stottern stellt weniger einen fixen Status als vielmehr ein Kontinuum dar, welches von multiplen Situationsvariablen beeinflusst wird und eine starke intraindividuelle Schwankung der Art und Anzahl der Symptomatik aufweist (Fox et al. 1996; Ward 2008). Somit lässt sich auch mit dem *stuttering severity index* nur temporär eine Einschätzung des Schweregrads des Stotterns festlegen. Van Lieshout (2004) sieht sprechmotorische Fähigkeiten generell als fließenden Prozess, bei welchem eine Verteilung der Sprecher anhand ihrer Fähigkeiten besteht. Demnach lassen sich schlechtsprechende Individuen einfach von guten Sprechern unterscheiden, es gibt aber einen Graubereich, in dem sich Leichtstotternde von Nichtstotternden kaum unterscheiden ließen.

#### **4.1.10 Es besteht ein qualitativer Unterschied in der Stottersymptomatik von Schwer- und Leichtstotternden**

Für den Stotterschweregrad und die Art der Stottersymptomatik ergab sich in dem Modell ein signifikanter Interaktionseffekt hinsichtlich qualitativer Unterschiede in der Symptomatik von Leicht- und Schwerstotternden. Repetitionen traten in beiden Gruppen etwa gleich häufig auf, diesbezüglich bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen. Dahingegen traten Prolongationen und die kombinierten Symptome (Repetition und Block; Repetition und Prolongation) bei Schwerstotternden häufiger auf als bei Leichtstotternden und unterschieden die beiden Gruppen somit signifikant.

Dieses Ergebnis war unerwartet und widerlegt unsere fünfte Teilhypothese, in der wir vermuteten, dass sich kein qualitativer Unterschied in der Symptomatik bei leicht- und schwerstotternden Probanden finden ließe.

In der Literatur finden sich wenige Hinweise auf qualitative Unterschiede in der Symptomatik bei Leicht- und Schwerstotternden.

In der oben erwähnten Studie mit stotternden und nicht-stotternden Vorschulkindern von Meyers (1986) ließen sich keine Unterschiede hinsichtlich der Qualität der Stottersymptome feststellen. Nur in der quantitativen Erfassung der Stottersymptome zeigten sich Gruppenunterschiede: So zeigten schwerstotternde Vorschulkinder höhere Stotterraten, die beiden Gruppen unterschieden sich jedoch nicht in der Art der Symptomatik.

In einer ähnlichen Studie verglichen Ambrose und Yairi (1999) Sprechunflüssigkeiten bei stotternden und nicht-stotternden Kindern. Die Einteilung der stotternden Kinder erfolgte in drei Schweregrade von leicht- bis schwerstotternd. Mit ansteigendem Stotterschweregrad traten alle Arten der Stottersymptome auch häufiger auf. Es zeigte sich jedoch auch ein qualitativer Unterschied bezüglich der prozentualen Verteilung der Symptomatik. In der Gruppe der Schwerstotternden zeigte sich ein erheblich höherer Anteil an Teilwortrepetitionen unter allen Stottersymptomen als in der Gruppe der Leichtstotternden. Dieser stieg von der leichtstotternden Kohorte (45%) bis zur schwerstotternden Kohorte (55%). Bei den Prolongationen war hingegen eine Abnahme der Häufigkeit von den Leicht- zu den Schwerstotternden zu beobachten (41% vs. 27 % aller Stottersymptome). Die Verteilung von Blocks und dysrhythmische Phonationen blieb über alle Schweregrade hinweg nahezu konstant. Somit spiegelt die Studie von Yairi und Ambrose in Bezug auf Prolongationen und Repetitionen gegensätzliche Ergebnisse zu der vorliegenden Studie wider. In unserer Studie bestätigen sich diese Ergebnisse nicht.

Offen bleibt bei den Ergebnissen unserer Studie, ob Repetitionen im Symptomkreis des Stotterns eine Sonderrolle einnehmen. Dieser Punkt wird in der Literatur divers diskutiert, insbesondere die Frage, ob die Wiederholung einzelner ganzer, einsilbiger Wörter als Repetition gewertet werden soll oder nicht. Onslow und Kollegen (2011) beispielsweise werten die Wiederholung vollständiger Wörter als Repetition im Sinne eines Stottersymptoms, wohingegen Howell (2011) der Ansicht ist, dass die Wiederholung einzelner, insbesondere einsilbiger Wörter nicht als Stottersymptom zu werten sei.

Eine endgültige Aussage dieser diskrepanten Ansichten lässt sich auf der Basis unserer Auswertung nicht tätigen, hierbei unterschieden wir nicht speziell zwischen Repetitionen einzelner Silben und Repetitionen einsilbiger Wörter. Anknüpfend hieran ließen sich möglicherweise weitere Studien durchführen, um diesbezüglich Klarheit zu schaffen.

#### **4.1.11 Untersuchung auf individuelle Symptommhäufung**

In der hypothesenfreien Analyse auf individuelle Symptommhäufung zeigte sich für die Eigenschaften der Vokale eine homogene Verteilung der Stotterereignisse in der Matrix. Nach Ausschluss palataler und uvulärer Ereignisse ergab sich auch für die Kategorie der Konsonanten eine weitgehend homogene Verteilung der Ereignisse. Eine besondere

Häufung in Form eines Clusterings ähnlicher Ereignisse war ohne Berücksichtigung palataler und uvularer Ereignisse somit nicht auszumachen. Unklar ist, warum diese Verteilung erst nach Ausschluß uvulärer und palataler Ereignisse auftrat. Offenbar nehmen diese Ereignisse eine Sonderstellung ein. Die Ursache hierfür lässt sich im Rahmen der vorliegenden Analyse nur hypothetisch beantworten. In der deutschen Sprache sind uvulare und palatale Konsonanten selten auftretende Konsonanten. Aus diesem Grund ist es wahrscheinlich, dass diese Laute in unseren Textaufgaben auch nur zu einem geringen Anteil vertreten waren und ebenso nur wenige Stotterereignisse an den entsprechenden Lauten auftraten. Eine weitere mögliche Ursache könnte die anatomische Nähe von Uvula und Gaumen darstellen, welche eine Unterscheidung in der Analyse der Filme erschwert haben könnte. Möglicherweise lässt sich mittels einer multiplen Korrespondenzanalyse auch keine hinreichenden Aussagen zu seltener auftretenden Stotterereignissen tätigen, sodass diese Art der Analyse nur für regelhaft häufiger auftretende Konsonanten eine gewisse Aussagekraft bezüglich möglicher Clusterbildungen bietet.

#### **4.1.12 Clusteranalyse auf Basis des Profils der Stottersymptomatik**

In der hypothesenfreien Analyse zur Clusterbildung auf Basis des Stotterprofils wurde analysiert, ob sich bestimmte charakteristische Symptomgruppierungen innerhalb des stotternden Kollektivs abgrenzen lassen würden, die sich anhand ihrer Eigenschaften ähneln.

In der ersten Gruppe zeigte sich die Stottersymptomatik vor allem bei Konsonanten am Wortanfang oder nach Beginn des Wortes. Diese Gruppe zeigte häufiger Prolongationen. Bei den gestotterten Konsonanten handelte es sich eher um stimmlose Konsonanten, bei den am häufigsten gestotterten Konsonanten handelte es sich am ehesten um Frikative.

In der zweiten Gruppe trat die Stottersymptomatik eher bei stimmhaften Konsonanten auf. Die Stottersymptomatik trat vor allem zu Beginn des Wortes auf. In dieser Gruppe traten stille Blocks etwas häufiger auf.

Die dritte Gruppe sticht etwas heraus, hierbei wurden Vokale etwas häufiger gestottert als Konsonanten, am häufigsten traten stille Blocks auf. Ansonsten zeigt sich eine heterogene Verteilung der Kategorien innerhalb dieser Gruppe.

Die von uns definierten Charakteristiken der ersten Gruppe (Prolongationen, stimmlose Konsonanten am Wortanfang oder in der Wortmitte, Frikative) lassen sich durch die Literatur nicht eindeutig bestätigen. Wingate (2011) beobachtete in einer Studie eine Häufung von Prolongationen und Teil-Wortwiederholungen am Wortanfang. Hinsichtlich prolongierter Laute berichten Sandrieser und Schneider (2015, S. 25), dass aufgrund ihrer phonetischen Struktur vor allem Vokale, Frikative und Nasale verlängert werden können. In Anknüpfung daran lässt bei der von uns vorgenommenen Charakterisierung „stimmlose Konsonanten“ in der zweiten Gruppe keine nähere Aussage zu, bei welchem Typ von

Konsonanten in der vorliegenden Studie am ehesten Prolongationen hervorgerufen werden.

Die Charakteristik der zweiten Gruppe (stimmhafte Konsonanten, stille Blocks, Symptomatik am Wortbeginn, eher Plosive) findet in gewissen Zügen Bestätigung in der Literatur. So schreiben Natke et al (2006) und Natke und Kohmäscher (2020, S. 30) für das Auftreten von Blockaden, dass diese schon bei Vorschulkindern vorwiegend bei Plosiven zu beobachten sind. Außerdem berichten Bloodstein und Bernstein Ratner (2007), dass sich gerade Stottersymptome in Form von Blocks am häufigsten an der ersten Silbe eines Wortes zeigen.

Auch die Entstehung von Plosiven während der Artikulation macht einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Blocks und Plosiven denkbar. Plosive sind Verschlusslaute. Aufgrund ihrer phonetischen Struktur wird der Atemluftstrom während der Artikulation je nach gebildetem Laut auf unterschiedlichen Ebenen des Sprechapparats gestoppt, damit der Laut entstehen kann. Bei der Entstehung von Blockaden wird der Sprechfluss unfreiwillig unterbrochen. Die unfreiwillige Unterbrechung des Sprechflusses entsteht durch übermäßig stark aktivierte antagonistische Muskelgruppen auf Ebene der Artikulatoren, auf glottaler Ebene oder auf Ebene der Atemmuskeln (Sandrieser und Schneider 2015, S. 25). Aufgrund der physiologischen Entstehung und der phonetischen Struktur von Plosiven bei der Artikulation und der muskulären Abläufe bei der Entstehung von Blocks erscheint es durchaus denkbar, dass Plosivlaute das Entstehen von Blockaden begünstigen und es damit zu einer Häufung von Blockaden bei Plosiven kommen kann.

Die heterogen verteilten Charakteristiken der dritten Gruppe finden weder Bestätigung noch Widerlegung in der Literatur und können als Ausreißer gewertet werden.

Auch in früheren Studien wurde die Existenz verschiedener Untergruppen innerhalb des Symptomkomplexes Stottern untersucht. Dies geschah unter verschiedenen Gesichtspunkten. Beispielsweise erfolgte die Einteilung in Subgruppen unter ätiologischen Gesichtspunkten, oder auf Basis visueller oder hörbarer Unterschiede (Prins und Lohr 1972).

Schwartz und Conture (1988) untersuchten in einer Studie die gestotterte Sprache von 43 Jugendlichen auf Clusterbildung. In der Studie analysierten sie die gestotterte Sprache unter den Gesichtspunkten Art der Sprechunflüssigkeit, sowie Anzahl und Variabilität von Begleitsymptomatik während des Stotterns. Aus diesen 3 Faktoren erstellten sie drei Indices, anhand welcher 5 Subgruppierungen innerhalb des Stotterns definieren ließen. In dieser Studie stand jedoch die Art der Stottersymptomatik und die Begleiterscheinungen im Vordergrund, eine nähere Unterscheidung auf linguistisch-phonetischer Basis wurde nicht vorgenommen. Zu Untersuchungen auf Subgruppierungen auf Basis von rein linguistischen bzw. phonetischen Gesichtspunkten wie in unserer Studie finden sich hingegen in der Literatur nur wenige Ansätze. Meist beziehen sich diese Beschreibungen linguistischer Subgruppierungen auf Stottern, welches im Rahmen bestimmter genetischer

Syndrome auftritt. Bei Patienten mit bestimmten Störungsbildern (z.B. Prader-Willi-Syndrom oder Tourettesyndrom), die häufig mit Stottern einhergehen, zeigen sich erkrankungstypische Stottermuster, wie Sprechunflüssigkeiten am Ende eines Wortes beim Prader-Willi-Syndrom, oder gehäuftes Auftreten der Stottersymptomatik in der Wortmitte oder am Wortende und das zwanghafte Wiederholen von Silben, Sätzen und Wörter beim Tourettesyndrom (Neumann et al. 2017).

Die linguistische Beschreibung von Subgruppen legte hierbei der Fokus eher auf den Zusammenhang zwischen der phonetischen Struktur bestimmter Laute und des damit verbundenen begünstigten Auftretens bestimmter Stottersymptome: Es liegt nahe, dass manche Laute aufgrund ihrer phonetischen Struktur bestimmte Stottersymptomatiken häufiger auslösen als andere und dies zu einer Häufung innerhalb dieser Symptomkategorie führen könnte. Allerdings bleibt weiterhin offen, ob sich die Charakteristiken aus der vorgenommenen Clusteranalyse wirklich aussagekräftig auf ein größeres Probandenkollektiv übertragen lassen, oder ob es sich dabei um eine zufällige Gruppenbildung handelt. Wie bereits oben erwähnt, stellt Stottern ein multifaktorielles Geschehen dar und zeigt eine hohe intraindividuelle Variabilität hinsichtlich der Symptomatik (Fox et al. 1996; Ward 2008). Vor diesem Hintergrund bedarf es weiterer eingehender Untersuchungen, ob sich tatsächlich bestimmte Subgruppen von Stotternden anhand ihres Stotterprofils bilden lassen. Zur Klärung dieser Frage empfehlen sich weitere Untersuchungen hinsichtlich der Erfassung und Analyse der individuellen Stottersymptomatik und ein eingehender Vergleich der gestotterten Muster, gegebenenfalls auch mit einem größeren Probandenkollektiv und mittels automatisierter Parameter, um eine detaillierte Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

## 4.2 Limitationen der Studie

Unsere Studie umfasste mit 18 Teilnehmern eine geringe Gruppenstärke. Zur Analyse von allgemein gültigen Bewegungsmustern von Stotternden wäre eine größere Kohorte notwendig gewesen.

Bei einigen der Teilnehmer zeigte sich nur gering ausgeprägte Symptomatik mit wenigen Stottereignissen, die wir analysieren konnten.

Bei der Auswahl der Gruppenteilnehmer haben wir versucht, auf ein ausgeglichenes Gruppenprofil (in Hinblick auf Alter, Bildungsgrad und Händigkeit) zu achten. Aufgrund nachträglicher Ausschlüsse von drei flüssigprechenden Probanden aufgrund unerwartet hoher SSI-Werte verschob sich besonders der Lateralisierungsquotient der Händigkeit innerhalb der Gruppe der flüssigprechenden Probanden und wich deshalb etwas von dem der stotternden Teilnehmer ab. Der Ausschluss von drei flüssigprechenden Probanden erfolgte, weil diese in der Auswertung des SSI-Scores unter die Kategorie „Leichtes Stottern“ fielen und somit nicht zweifelsfrei als flüssigprechende Probanden gerechnet

werden konnten. Da sich auch nach Ausschluss der drei Probanden in beiden Gruppen ein überwiegend rechtshändiger Lateralisierungsquotient zeigt und Stottern im Gegensatz zu anderen Sprachstörungen nicht von hirnhemisphärischer Dominanz abhängt, sind die Unterschiede in der Händigkeit lateralität akzeptabel.

Die Analyse der Stotterereignisse führte primär ich durch, fachlich wurde ich dabei von der ausgebildeten Logopädin Frau Primaßin beraten, trotzdem könnte meine Analyse fehlerhaft sein, da ich selbst keine logopädische Vorausbildung habe.

In den aufgezeichneten Videoaufnahmen zur Erfassung des Stottereschweregrads könnte sich für einige Probanden möglicherweise eine veränderte Stotterrate ergeben haben. Wir zeichneten die Sprechproben in einem geschützten Raum auf, sodass sich dabei nur eine Momentaufnahme der Stottereschwere ergeben haben könnte. Da der Stottereschweregrad jedoch keine statische Komponente, sondern ein fließender Prozess ist, könnten sich dadurch bei einigen Probanden veränderte SSI-Scores ergeben haben. Trotzdem zeigten sich bei einigen stotternden Probanden auch hohe SSI-Werte, was wiederum für ein stark ausgeprägtes Stottern spricht.

Eine weitere Limitation stellt die Untersuchung im MRT-Scanner da. Insgesamt umfasst die Zeit im Scanner ca. 45 Minuten. Die Teilnehmer verbrachten die Zeit in liegender Position und lasen die Texte von einem Monitor ab. Die Länge der Untersuchung und das stille Liegen stellte für die Teilnehmer eine Herausforderung dar. Trotz des Gehörschutzes war die Geräuschkulisse für einige Probanden ermüdend.

### 4.3 Ausblick

Bei der vorliegenden Studie handelte es sich um die Grundlagenarbeit einer Pilotstudie, die erstmalig die Bewertung der Bewegungsmuster der meisten inneren und äußeren Artikulatoren ermöglichte. Entsprechend herausfordernd gestaltete sich die Entscheidung, auf welche Art und Weise das Filmmaterial ausgewertet und analysiert werden sollte. In der vorliegenden Arbeit erfolgten zunächst eine quantitativ orientierte Sichtung und Auswertung des Materials, diese Art der Auswertung bietet gleichzeitig eine Grundlage und Raum für weitere Analysen des umfangreichen Filmmaterials, welche teilweise auch schon angelaufen bzw. im Prozess der Veröffentlichung sind.

Eine interessante Frage, die in der vorliegenden Auswertung offenbleibt, ist die nach Überschneidungen in den Bewegungsmustern der unterschiedlichen Probanden. Hier bleibt offen, ob es allgemeingültige Bewegungsmuster gibt, oder ob jeder Proband seine völlig eigene Stottersymptomatik zeigt. Um derartige allgemeingültige Bewegungsmuster zu charakterisieren, ist eine tiefgehende, automatisierte Analyse des Sprechmaterials notwendig. Sollte es derartige Bewegungsmuster geben, wäre es interessant, ob sich diese physiologisch interpretieren und erklären ließen.

Eine weitere Frage, die bisher ebenfalls nicht geklärt werden konnte, ist die, ob die flüssige Sprache von stotternden Probanden im Vergleich zu flüssigsprechenden Probanden verändert ist. Auch diesbezüglich bedarf es automatisierter Analysen, die die flüssigen Sprechabschnitte der stotternden Kohorte untersucht. Beide Fragestellungen sind derzeit Gegenstand weiterer Dissertationen.

#### 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der vorliegenden Studie wurden zum ersten Mal Artikulationsbewegungen bei Erwachsenen mit chronisch idiopathischen Stottern in der neuartigen Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie durchgeführt. Das Ziel der Studie sollte eine nähere Untersuchung des Sprechvorgangs bei Stotternden sein.

Dafür haben wir 18 stotternde Probanden in der Hochgeschwindigkeits-Magnetresonanztomographie untersucht. Die Aufgaben im Scanner bestanden im Wesentlichen aus Leseaufgaben und einigen Spontanspracheaufgaben. Für die hier erwähnten Analysen wurden zur besseren Vergleichbarkeit die Lesetexte als Grundlage genommen.

Es erfolgte zunächst eine quantitative Kategorisierung der Stottersymptomatik nach verschiedenen Gesichtspunkten:

Die quantitative Erfassung der Kernsymptome des Stotterns zeigte eine Häufung stiller Blocks und Prolongationen.

Bei den von uns untersuchten Probanden zeigte sich eine Beeinflussung des Stotterns durch verschiedene linguistische Faktoren:

Es zeigte sich eine Häufung der Stotterereignisse bei Inhalts- und Pseudowörtern. Außerdem wurden Konsonanten häufiger gestottert als Vokale. Die Silben am Wortanfang riefen bei den Probanden mehr Stotterereignisse hervor als die nachfolgenden Silben.

In einer weiteren Analyse untersuchten wir die Artikulationsorte der Stottersymptome. Hierbei zeigte sich eine Häufung in bilabialer und alveolarer Position.

Im Vergleich war eine Reduktion der individuellen Stottersymptomatik außerhalb und innerhalb des Scanners auffällig. Im Vergleich der Auftretenswahrscheinlichkeit von Stotterereignissen innerhalb und außerhalb des MRT-Scanners traten bei nahezu allen Probanden mehr Stotterereignissen außerhalb des Scanners als im Inneren des Scanners auf.

Im Vergleich des Stotterschweregrads mit der Anzahl der Stottersymptome zeigte sich eine positive Korrelation. Auch die Art der Stotterereignisse korrelierte positiv mit dem Stotterschweregrad.

Wir erweiterten die hypothesennahe Analyse um zwei hypothesenfreie Analysen:

In einer hypothesenfreien Mehrfachkorrespondenzanalyse in Bezug auf individuelle Clusterbildung der Stottersymptome ergab sich für Vokale eine weitgehend homogene Verteilung im Diagramm. Nach Ausschluß palataler und uvularer Stottereignisse zeigte sich auch für Konsonanten eine homogene Verteilung ohne Clusterbildung. Uvulare und palatale Ereignisse schienen diesbezüglich eine Sonderrolle einzunehmen.

In einer Korrelationsanalyse zur Clusterbildung basierend auf dem Stotterprofil ließen sich drei Subgruppen anhand der Verteilung der Stottersymptomatik unterscheiden.

## 5 Anhang

### 5.1 Leseprobe: Der kleinste Schneesturm

Der kleinste Schneesturm, der je registriert wurde, hat vor einer Stunde hier in meinem Hinterhof stattgefunden. Er bestand aus etwa zwei Flocken. Ich wartete darauf, dass noch mehr Schneeflocken fielen, aber das war's schon gewesen. Der ganze Sturm bestand bloß aus zwei Flocken. Die Art, wie sie vom Himmel fielen, erinnerte an die Art, auf die Dick und Doof immer auf den Hintern knallten, und wenn ich's mir recht überlege, hatten sie Ähnlichkeit mit den beiden.

Es war, als wären Dick und Doof in Schneeflocken verwandelt worden und träten jetzt im kleinsten Schneesturm der Welt auf. Es kam mir so vor, als ließen sich die beiden Flocken sehr lange Zeit damit, mit tortenverschmierten Gesichtern vom Himmel zu fallen – es war ein quälender Versuch, Würde zu bewahren, in einer Welt, die sie dieser Würde berauben wollte, in einer Welt, die größere Schneestürme gewöhnt war, Stürme, die Schneedecken von einem halben Meter und mehr hinterließen – und die sich leicht über einen Zweiflockensturm mokieren konnten.

Als sie eine ulkige Landung auf dem Schnee bauten, der von einem Dutzend Stürmen übriggeblieben war, die wir diesen Winter schon gehabt haben, entstand eine Pause, in der ich zum Himmel hinaufschaute und darauf wartete, dass noch mehr Schneeflocken herunterkämen, und dann begriff ich, dass die beiden Flocken wie Dick und Doof schon ein ganzer Sturm für sich waren.

Ich ging nach draußen und suchte sie. Mir imponierte der Mut, mit dem sie in dieser Welt ganz sie selbst waren. Als ich mich nach ihnen umschaute, überlegte ich mir, wie ich sie in die Tiefkühltruhe schaffen könnte, in der sie sich wohlfühlen konnten und in der ihnen die Aufmerksamkeit, die Bewunderung und die Anerkennung zuteilwurde, die sie sich so großartig verdient hatten. Haben Sie schon einmal versucht, in einer Landschaft, die seit Monaten mit Schnee bedeckt ist, zwei Schneeflocken zu finden? Ich ging zu der Stelle, an der sie ungefähr gelandet sein mussten.

Ich suchte zwei Schneeflocken in einer Welt, in der es Milliarden von ihnen gab. Und es konnte ja auch passieren, dass ich sie zertrat, was keine sehr angenehme Vorstellung war. Es dauerte nicht lange, bis ich aufgab, weil ich begriff, wie hoffnungslos mein Vorhaben war. Der kleinste Schneesturm der Welt war für immer verloren. Man konnte ihn nicht mehr von seiner Umgebung unterscheiden. Ich stelle mir gerne vor, dass der außergewöhnliche Mut dieses Zweiflockensturms irgendwie in einer Welt existiert, in der solche Dinge nicht immer gewürdigt werden. Ich ging wieder ins Haus zurück und ließ Dick und Doof draußen im Schnee, in dem sie untergegangen waren (Brautigam, R. 1980).

## 5.2 Übersichtstabelle Epidemiologie der Probanden

### Stotternde Probanden

Pseudonym	Alter	Geschlecht	Händigkeit	Bildungsgrad	Prozent STU (Lesen)	SSI-Score (Lesen)	Prozent STU Spontansprache	SSI-Score Spontansprache	Ereignisdauer SSI-Score	Mitbewegungen SSI-Score	SSI-Score Gesamtwert	Stotterschwerggrad	Perzentile
S01	25	M	100	4	0,4	0	3,4	4	12	3	19	leichtes Stottern	12 bis 23
S03	28	M	91,66	2	8,2	7	11,8	7	10	10	34	schweres Stottern	78 bis 88
S04	30	M	100	6	5,8	6	7,2	6	8	6	26	mittelschweres Stottern	41 bis 60
S05	26	M	100	4	0,8	0	4	5	6	2	13	sehr leichtes Stottern	5 bis 11
S06	28	M	91,66	5	5,4	6	8,2	7	6	1	20	leichtes Stottern	12 bis 23
S07	42	M	91,66	1	20	8	25,1	9	10	2	29	mittelschweres Stottern	61 bis 77
S08	46	M	16,66	5	2,8	4	4,6	5	6	0	15	sehr leichtes Stottern	5 bis 11
S09	37	M	91,6	5	1,6	2	2	2	6	4	18	leichtes Stottern	12 bis 23
S10	18	M	75	2	2	4	13	8	12	3	27	mittelschweres Stottern	41 bis 60
S11	20	W	83,33	3	17	8	14,4	8	10	1	27	mittelschweres Stottern	41 bis 60
S12	24	M	66,66	3	1,6	2	4	5	8	0	15	sehr leichtes Stottern	5 bis 11
S13	23	W	-83,33	4	22,2	9	12,2	8	10	4	31	mittelschweres Stottern	61 bis 77
S14	30	M	95,83	5	1	2	9	7	6	2	17	sehr leichtes Stottern	5 bis 11
S15	43	M	83,33	2	1,6	2	3,4	4	6	0	12	sehr leichtes Stottern	1 bis 4
S16	29	M	91,66	5	10,6	7	8,4	7	10	1	25	mittelschweres Stottern	41 bis 60
S19	23	M	91,66	1	12,6	7	13,9	8	14	8	37	schweres Stottern	89 bis 95
S20	30	M	75	5	14,8	8	12,6	8	10	8	34	schweres Stottern	89 bis 95
S21	19	W	66	2	2,4	4	3,2	4	6	0	14	sehr leichtes Stottern	5 bis 11

### Flüssigsprechende Probanden

Pseudonym	Alter	Geschlecht	Händigkeit	Bildungsgrad	Prozent STU (Lesen)	SSI-Score (Lesen)	Prozent STU Spontansprache	SSI-Score Spontansprache	Ereignisdauer SSI-Score	Mitbewegungen SSI-Score	SSI-Score Gesamtwert	Stotterschwerggrad	Perzentile
F01	29	M	58,3	4	0,6	0	0,6	0	4	3	7	Kein Stottern	Keine
F02	23	M	58,3	4	0	0	0,4	0	4	3	7	Kein Stottern	Keine
F03	29	M	75	4	20	0	0	0	0	0	0	Kein Stottern	Keine
F04	26	M	95,8	3	0	0	0,1	0,6	2	1	3	Kein Stottern	Keine
F05	25	M	91,6	4	1	2	0,6	0	4	0	6	Kein Stottern	Keine
F06	225	M	-50	4	0,6	0	1,8	2	6	0	8	Kein Stottern	Keine
F07	27	W	66,6	4	1	2	1,2	2	4	0	8	Kein Stottern	Keine
F08	37	M	75	4	1,2	2	1,2	2	4	0	8	Kein Stottern	Keine
F10	26	M	83,3	5	0	0	1,2	2	4	8	6	Kein Stottern	Keine
F11	31	W	-100	4	0,2	0	0	0	4	0	4	Kein Stottern	Keine
F12	27	M	-66,6	4	0,4	0	0	0	2	0	2	Kein Stottern	Keine
F13	25	M	41,6	4	1	0	0,8	0	4	0	6	Kein Stottern	Keine
F14	26	W	58,3	4	1	2	0,6	0	4	0	6	Kein Stottern	Keine
F16	24	M	100	5	0,8	0	0,4	0	4	2	6	Kein Stottern	Keine
F17	28	W	-66	5	0	0	0,2	0	4	0	4	Kein Stottern	Keine
F18	22	M	75	4	1,2	2	1,6	2	4	0	8	Kein Stottern	Keine

## 5.3 Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield 1971)

Bitte kreuzen Sie an, mit welcher Hand Sie vorzugsweise die unten genannten Tätigkeiten ausführen. Falls der Vorzug so stark ist, dass Sie niemals die andere Hand benutzen würden, wenn Sie nicht dazu gezwungen wären, machen Sie bitte zwei Kreuze in dem entsprechenden Feld.

Falls Sie sich nicht für eine Hand entscheiden können, kreuzen Sie bitte beide Möglichkeiten an. Einige der Tätigkeiten erfordern beide Hände. In diesem Fall ist der Teil der Tätigkeit bzw. des Objekts, dessen Händigkeit gefragt ist, in Klammern angegeben.

Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten. Falls Sie keine Erfahrung mit der genannten Tätigkeit haben, lassen Sie die entsprechende Zeile frei.

<b>Tätigkeit</b>	<b>Rechts</b>	<b>Links</b>
Schreiben		
Zeichnen		
Werfen		
Schere		
Zahnbürste		
Messer (ohne Gabel)		
Besen (obere Hand)		
Streichholz anzünden		
Schachtel öffnen (Deckel)		

Maximal 20 Kreuze können gesetzt werden. Jedes dieser Kreuze erhält einen Punktwert von 5. Folglich können maximal 100 Punkte vergeben werden. Der Lateralitätsquotient wird wie folgt berechnet:

$$(LQ) = (\sum \text{rechts} - \sum \text{links}) / (\sum \text{rechts} + \sum \text{links}) * 100$$

beträgt eine, höchstens zwei Seiten.

## 6 Literaturverzeichnis

- Almudhi A, Zafar H, Anwer S, Alghadir A (2019): Effect of Different Body Postures on the Severity of Stuttering in Young Adults with Developmental Stuttering. *BioMed Res Int* 2019, 1817906
- Ambrose NG, Yairi E (1999): Normative Disfluency Data for Early Childhood Stuttering. *J Speech Lang Hear Res* 42, 895–909
- Ambrose NG, Cox NJ, Yairi E (1997): The genetic basis of persistence and recovery in stuttering. *J Speech Lang Hear Res* 40, 567–580
- APA: American Psychiatric Association (2013): Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-5 (R).
- Andrews JG, Harris MM: The syndrome of stuttering, by Gavin Andrews and Mary Harris with Roger Garside and David Kay. The Spastics Society Medical Education and Information Unit in association with Heinemann Medical Books, London 1964
- Backhaus K, Erichson B, Weiber R, Plinke W: Korrespondenzanalyse. In: Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (Hrsg.): *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer, Berlin, Heidelberg 2016, 619–627
- Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *J Stat Softw* 67, 1–48
- Belyk M, Kraft SJ, Brown S (2015): Stuttering as a trait or state - an ALE meta-analysis of neuroimaging studies. *Eur J Neurosci* 41, 275–284
- Bernstein NE (1981): Are there constraints on childhood disfluency? *J Fluency Disord* 6, 341–350
- Best KH (2005): Zur Häufigkeit von Buchstaben, Leerzeichen und anderen Zeichen in deutschen Texten. *Glottometrics* 9–31
- Bloodstein O, Bernstein Ratner N (Hrsg.): *A handbook on stuttering*. Thomson Delmar Learning, Clifton Park, NY 2007
- Brady JP (1969): Studies on the metronome effect on stuttering. *Behav Res Ther.* 7, 197–204
- Brautigam R (1980): Der kleinste Schneesturm, der je registriert wurde.
- Brünjes L, Lotze N, Smirnova E. <https://www.mediensprache.net/de/basix/phon-/phonetik/konsonanten/>; Zugriff am 20.01.2021
- Brooks ME, Kristensen K, Benthem KJ van, Magnusson A, Berg CW, Nielsen A, Skaug HJ, Mächler M, Bolker BM (2017): glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *R J* 2, 378–400
- Brown SF (1938): The theoretical importance of certain factors influencing the incidence of stuttering. *J Speech Hear Disord* 3, 223–230
- Buhr AP, Zebrowski PM (2009): Sentence Position and Syntactic Complexity of Stuttering in Early Childhood: A Longitudinal Study. *J Fluency Disord* 34, 155–172

- Cherry EC, Sayers BMcA, Marland PM (1955): Experiments on the Complete Suppression of Stammering. *Nature* 176, 874–875
- Cosentyx-Beipackzettel, Novartis Pharma
- Craig A, Tran Y (2005): The epidemiology of stuttering: The need for reliable estimates of prevalence and anxiety levels over the lifespan. *Advances in Speech Language Pathology* 7, 41–46
- Craig A, Tran Y (2014): Trait and social anxiety in adults with chronic stuttering: conclusions following meta-analysis. *J Fluency Disord* 40, 35–43
- Craig A, Hancock K, Tran Y, Craig M, Peters K (2002): Epidemiology of Stuttering in the Community Across the Entire Life Span. *J Speech Lang Hear Res* 45, 1097–1105
- Davidow JH (2014): Systematic Studies of Modified Vocalization: The Effect of Speech Rate on Speech Production Measures During Metronome-Paced Speech in Persons who Stutter. *Int J Lang Commun Disord* 49, 100–112
- Dayalu VN, Kalinowski J, Stuart A (2005): Stuttering Frequency on Meaningful and Nonmeaningful Words in Adults Who Stutter. *Folia Phoniatri Logop* 57, 193–201
- DIMDI 2020: Deutsches Institut für medizinische Dokumentation - ICD-10-GM Version 2020. <https://www.dimdi.de/static/de/klassifikationen/icd/icd-10-gm/kode-suche/htmlgm2020/>; Zugriff am 03.04.2020
- Dworzynski K, Howell P (2004): Predicting stuttering from phonetic complexity in German. *J Fluency Disord* 29, 149–173
- Dworzynski K, Remington A, Rijdsdijk F, Howell P, Plomin R (2007): Genetic etiology in cases of recovered and persistent stuttering in an unselected, longitudinal sample of young twins. *Am J Speech Lang Pathol* 16, 169–178
- Felsenfeld S, Kirk KM, Zhu G, Statham DJ, Neale MC, Martin NG (2000): A Study of the Genetic and Environmental Etiology of Stuttering in a Selected Twin Sample. *Behav Genet* 30, 359–366
- Fox PT, Ingham RJ, Ingham JC, Hirsch TB, Downs JH, Martin C, Jerabek P, Glass T, Lancaster JL (1996): A PET study of the neural systems of stuttering. *Nature* 382, 158–161
- Galili T (2015): dendextend: an R package for visualizing, adjusting and comparing trees of hierarchical clustering. *Bioinformatics* 31, 3718–3720
- Glover H, Kalinowski J, Rastatter M, Stuart A (1996): Effect of instruction to sing on stuttering frequency at normal and fast rates. *Percept Mot Skills* 83, 511–522
- Godai U, Tatarelli R, Bonanni G (1976): Stuttering and tics in twins. *Acta Genet Med Gemellol (Roma)* 25, 369–375
- Gu Z, Eils R, Schlesner M (2016): Complex heatmaps reveal patterns and correlations in multidimensional genomic data. *Bioinformatics* 32, 2847–2849
- Guitar B: Stuttering - An Integrated Approach to Its Nature and Treatment. 4. Auflage; Wolter Kluwer Health, Lippincott Williams and Wilkins 2014
- Haase A, Frahm J, Matthaei D, Hanicke W, Merboldt KD (1986): FLASH imaging. Rapid NMR imaging using low flip-angle pulses. *J Magn Reson* (1969) 67, 258–266

- Hakim HB, Ratner NB (2004): Nonword repetition abilities of children who stutter: an exploratory study. *J Fluency Disord* 29, 179–199
- Hartmann R, Stork F: Dictionary of language and linguistics. Applied Science Publishers, London 1973
- Healey EC, Mallard AR, Adams MR (1976): Factors contributing to the reduction of stuttering during singing. *J Speech Hear Res* 19, 475–480
- Heyde CJ, Scobbie JM, Lickley R, Drake EKE (2016): How fluent is the fluent speech of people who stutter? A new approach to measuring kinematics with ultrasound. *Clin Linguist Phon* 30, 292–312
- Howell P (2011): Stuttering studies support treatment. *Nature* 470, 7
- Howell P, Au-Yeung J, Sackin S (1999): Exchange of Stuttering From Function Words to Content Words With Age. *J Speech Lang Hear Res* 42, 345–354
- Howell P, Au-Yeung J, Sackin S (2000): Internal structure of content words leading to lifespan differences in phonological difficulty in stuttering. *J Fluency Disord* 25, 1–20
- Howie PM (1981): Concordance for stuttering in monozygotic and dizygotic twin pairs. *J Speech Hear Res* 24, 317–321
- Hubbard CP, Yairi E (1988): Clustering of disfluencies in the speech of stuttering and nonstuttering preschool children. *J Speech Hear Res* 31, 228–233
- Iltis PW, Frahm J, Voit D, Joseph AA, Schoonderwaldt E, Altenmüller E (2015): High-speed real-time magnetic resonance imaging of fast tongue movements in elite horn players. *Quant Imaging Med Surg* 5, 374–381
- Iltis PW, Frahm J, Voit D, Joseph A, Schoonderwaldt E, Altenmüller E (2016): Divergent oral cavity motor strategies between healthy elite and dystonic horn players. *J Clin Mov Disord* 2, 1
- IPA - Internationales phonetisches Alphabet. [http://www.coli.uni-saarland.de/elaut/ipaMain\\_klick\\_and\\_hear.htm](http://www.coli.uni-saarland.de/elaut/ipaMain_klick_and_hear.htm); Zugriff am 14.04.2020
- Iverach L, Rapee RM (2014): Social anxiety disorder and stuttering: current status and future directions. *J Fluency Disord* 40, 69–82
- Iverach L, O'Brian S, Jones M, Block S, Lincoln M, Harrison E, Hewat S, Menzies RG, Packman A, Onslow M (2009): Prevalence of anxiety disorders among adults seeking speech therapy for stuttering. *J Anxiety Disord* 23, 928–934
- Johannsen HS (2001): Der Einfluss von Alter, Geschlecht, Symptomatologie, Heredität und Händigkeit auf den Verlauf des Stotterns im Kindesalter. *Sprache · Stimme · Gehör* 25, 14–19
- Kafka F: Die Verwandlung (Die Weißen Blätter. Eine Monatsschrift). 1. Auflage; Verlag der Weißen Bücher, Leipzig 1915
- Kang C, Riazuddin S, Mundorff J, Krasnewich D, Friedman P, Mullikin JC, Drayna D (2010): Mutations in the lysosomal enzyme-targeting pathway and persistent stuttering. *N Engl J Med* 362, 677–685
- Kraft SJ, Yairi E (2012): Genetic Bases of Stuttering: The State of the Art, 2011. *Folia Phoniatri Logop* 64, 33–46

- LaSalle LR, Conture EG (1995): Disfluency Clusters of Children Who Stutter: Relation of Stutterings to Self-Repairs. *J Speech Lang Hear Res* 38, 965–977
- Lauterbur PC (1973): Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature* 242, 190–191
- Lê S, Josse J, Husson F (2008): FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *J Stat Softw* 25, 1–18
- Logan KJ, Conture EG (1995): Length, grammatical complexity, and rate differences in stuttered and fluent conversational utterances of children who stutter. *J Fluency Disord* 20, 35–61
- Mann-Whitney-U-Test • Statologie. <https://statologie.de/mann-whitney-u-test/>; Zugriff am 15.11.2020
- Matthaei D, Frahm J, Haase A, Hanicke W (1985): Regional physiological functions depicted by sequences of rapid magnetic resonance images. *Lancet* 326, 893
- McClellan M, Goldsmith H, Cerf A (1984): Lower-lip EMG and displacement during bilabial disfluencies in adult stutterers. *J Speech Hear Res* 27, 342–349
- Meyers SC (1986): Qualitative and quantitative differences and patterns of variability in disfluencies emitted by preschool stutterers and nonstutterers during dyadic conversations. *J Fluency Disord* 11, 293–306
- Natke U, Sandrieser P, Pietrowsky R, Kalveram KT (2006): Disfluency data of German preschool children who stutter and comparison children. *J Fluency Disord* 31, 165–176
- Natke U, Kohmäscher A: Stottern: Wissenschaftliche Erkenntnisse und evidenzbasierte Therapie. Springer-Verlag 2020
- Natke U, Sandrieser P, van Ark M, Pietrowsky R, Kalveram KT (2004): Linguistic stress, within-word position, and grammatical class in relation to early childhood stuttering. *J Fluency Disord* 29, 109–122
- Neumann K: Redeflussstörungen. In: Nicolai T, Götte K (Hrsg.): Pädiatrische HNO-Heilkunde. Elsevier, Urban & Fischer, München 2010, 590–603
- Neumann K, Euler HA, Bosshardt HG, Cook S, Sandrieser P, Schneider P, Sommer M, Thum G.\* (Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie) (2017): Pathogenese, Diagnostik und Behandlung von Redeflussstörungen. Evidenz- und konsensbasierte S3-Leitlinie.
- Niebergall A, Zhang S, Kunay E, Keydana G, Job M, Uecker M, Frahm J (2013): Real-time MRI of speaking at a resolution of 33 ms: undersampled radial FLASH with nonlinear inverse reconstruction. *Magn Reson Med* 69, 477–485
- Nitz WR, Runge VM, Schmeets SH, Faulkner WH, Desai NK: Praxiskurs MRT: Anleitung zur MRT Physik über klinische Bildbeispiele. Thieme Georg Verlag, Stuttgart 2007
- Oldfield RC (1971): The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 97–113
- Onslow M, Packman A (2011): Stuttering studies support treatment. *Nature* 470, 465
- Patil I, Powell C, Beasley W, Heck D, Hvitfeldt E: IndrajeePatil/ggstatsplot: Compatibility with pairwiseComparisons package. Zenodo 2020

- Picoloto LA, Cardoso ACV, Cerqueira AV, Oliveira CMC de (2017): Effect of delayed auditory feedback on stuttering with and without central auditory processing disorders. *CoDAS* 29
- Platt LJ, Basili A (1973): Jaw tremor during stuttering block: an electromyographic study. *J Commun Disord* 6, 102–109
- Prins D, Lohr F (1972): Behavioral Dimensions of Stuttered Speech. *J Speech Hear Res* 15, 61–71
- Quirk R, Greenbaum S, Leech G, Svartvik J: A comprehensive grammar of the English language. Longman, London 1985
- R Core Team (2018): R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Reilly S, Onslow M, Packman A, Cini E, Conway L, Ukoumunne OC, Bavin EL, Prior M, Eadie P, Block S, Wake M (2013): Natural History of Stuttering to 4 Years of Age: A Prospective Community-Based Study. *Pediatrics* 132, 460–467
- Riley, GD (2009): Stuttering severity instrument for children and adults (SSI-4) 4th ed.
- Rinck PA: Magnetic Resonance in Medicine: A Critical Introduction. BoD – Books on Demand 2019
- Robb MP, Sargent A, O’Beirne GA (2009): Characteristics of disfluency clusters in adults who stutter. *Logoped Phoniatr Vocol* 34, 36–42
- Sandrieser P, Schneider P: Stottern im Kindesalter. 4. Auflage; Thieme Stuttgart 2015
- Schwartz HD, Conture EG (1988): Subgrouping Young Stutterers: Preliminary Behavioral Observations. *J Speech Lang Hear Res* 31, 62–71
- Smith A, Sadagopan N, Walsh B, Weber-Fox C (2010): Increasing phonological complexity reveals heightened instability in inter-articulatory coordination in adults who stutter. *J Fluency Disord* 35, 1–18
- Smith A, Goffman L, Sasisekaran J, Weber-Fox C (2012): Language and motor abilities of preschool children who stutter: Evidence from behavioral and kinematic indices of nonword repetition performance. *J Fluency Disord* 37, 344–358
- Suresh R, Ambrose N, Roe C, Pluzhnikov A, Wittke-Thompson JK, Ng MC-Y, Wu X, Cook EH, Lundstrom C, Garsten M, et al. (2006): New Complexities in the Genetics of Stuttering: Significant Sex-Specific Linkage Signals. *Am J Hum Genet* 78, 554–563
- Uecker M, Zhang S, Frahm J (2010a): Nonlinear inverse reconstruction for real-time MRI of the human heart using undersampled radial FLASH. *Magn Reson Med* 63, 1456–1462
- Uecker M, Zhang S, Voit D, Karaus A, Merboldt KD, Frahm J (2010b): Real-time MRI at a resolution of 20 ms. *NMR Biomed* 23, 986–994
- Van Borsel J, Tetnowski JA (2007): Fluency disorders in genetic syndromes. *J Fluency Disord* 32, 279–296
- Van Lieshout P: Dynamical Systems Theory and its application in Speech. In: *Speech Motor Control in Normal and Disordered Speech*. Oxford Univ Pr, Oxford 2004, 51–82
- Ward D: Stuttering and Cluttering: Frameworks for Understanding and Treatment. Psychology Press 2008

- Weishaupt D, Köchli V, Marinček B: *Wie funktioniert MRT? - Eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanztomographie*. 7. Auflage; Springer 2014
- Wiese R: *The Phonology of German*. Oxford University Press 2000
- Wingate ME (1964): A Standard definition of Stuttering. *J Speech Hear Disord* 29, 484–489
- Wingate ME: *The structure of stuttering*. Springer-Verlag, New York 1988
- Wingate ME: *Multilingual Aspects of Fluency Disorders*. Channel View Publications. Channel View Publications 2011
- Wittke-Thompson JK, Ambrose N, Yairi E, Roe C, Cook EH, Ober C, Cox NJ (2007): Genetic studies of stuttering in a founder population. *J Fluency Disord* 32, 33–50
- Yairi E, Ambrose N (1992): Onset of Stuttering in Preschool Children: Selected Factors. *J Speech Lang Hear Res* 35, 782–788
- Yaruss JS, Quesal RW (2004): Stuttering and the International Classification of Functioning, Disability, and Health: an update. *J Commun Disord* 37, 35–52
- Zhang S, Uecker M, Voit D, Merboldt KD, Frahm J (2010): Real-time cardiovascular magnetic resonance at high temporal resolution: radial FLASH with nonlinear inverse reconstruction. *J Cardiovasc Magn Reson* 12, 1

## **Danksagung**

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Walter Paulus für die Möglichkeit danken, an seinem Institut über das spannende Thema Stottern zu promovieren.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. med. Martin Sommer herzlich für die Überlassung des Themas und die Betreuung meiner Dissertation, für die konstruktiven Diskussionen und Gedankenanstöße. Herrn Prof. Dr. Jens Frahm möchte ich für die stets gute Zusammenarbeit und konstruktiven Ratschläge danken und für die Möglichkeit, dass wir die Messungen an seinem Institut durchführen durften.

Besonders danken möchte ich Frau Dr. rer. nat. Annika Primaßin für ihr stets offenes Ohr und ihren Ideenreichtum. Mit ihren Analyseansätze und ihrer Bereitschaft, mir stets alle offenen Fragen zu beantworten, hat sie meine Promotion weit voran gebracht.

Ein weiterer Dank gilt auch Herrn Dr. Arun Joseph und Herrn Dr. Klaus-Dietmar Merboldt für die stets unkomplizierte Zusammenarbeit und ihre Unterstützung bei den Messungen. Sie haben es mir ermöglicht, auch zu ungünstigen Zeitpunkten die MRT-Termine durchzuführen.

Frau Bettina Helten danke ich herzlich für die Auswertung der SSI-Fragebögen und ihre wertvollen Tipps zum Thema Stottern.

Außerdem gilt ein weiterer Dank Herrn Dr. Albert Leha für die umfassende statistische Betreuung der Arbeit.