

Akustische Signale in der Diagnostik der pharyngealen Dysphagie

Von der Medizinischen Fakultät
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigte
Dissertation

vorgelegt von

Jörg Janne Vehreschild

aus Siegburg

Berichter: Herr Professor
Dr. med. Rolf Biniek

Frau Universitätsprofessorin
Dr. med. Christiane Neuschaefer-Rube

Tag der mündlichen Prüfung: 2. September 2008

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

"Dass die wichtigsten Dinge durch Röhren getan werden - Beweise erstlich die Zeugungsglieder, die Schreibfeder und unser Schießgewehr, ja, was ist der Mensch selbst anders als ein verworrenes Bündel Röhren?"

Georg Christoph Lichtenberg, 1769

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	4
ZUSAMMENFASSUNG	6
<i>Einleitung</i>	6
<i>Methode</i>	6
<i>Ergebnis</i>	7
<i>Diskussion</i>	7
1 - EINLEITUNG	8
1.1 - DER SCHLUCKVORGANG.....	8
1.1.1 - <i>Funktion</i>	8
1.1.2 - <i>Einteilung</i>	8
1.1.3 - <i>Steuerung</i>	9
1.2 - DIE DYSPHAGIE.....	9
1.2.1 - <i>Beschreibung</i>	9
1.2.2 - <i>Definition und Einteilung</i>	9
1.2.3 - <i>Therapie</i>	10
1.2.4 - <i>Diagnostik und Screeningverfahren</i>	11
1.2.5 - <i>Die Zervikale Auskultation</i>	12
1.2.6 - <i>Das Schluckgeräusch</i>	14
1.3 - ZUSAMMENFASSUNG UND ZIELSETZUNG.....	23
2 – MENSCHEN, MATERIAL UND METHODEN	26
2.1 – VERSUCHSGRUPPEN.....	26
2.1.1 – <i>Gruppe 1: Bestätigte Dysphagie</i>	26
2.1.2 – <i>Gruppe 2: Unbestätigte Verdachtsfälle</i>	27
2.1.3 – <i>Gruppe 3: Kontrollgruppe</i>	27
2.2 – VERSUCHSAUFBAU.....	27
2.2.1 - <i>Signalmessung</i>	27
2.2.2 – <i>Durchführung</i>	28
2.2.2 – <i>Signalverarbeitung</i>	29
2.3 – ANALYSE.....	29
2.3.1 – <i>Die Akustische Analyse</i>	30
2.3.2 – <i>Die Videounterstützte Analyse</i>	31
2.3.3 – <i>Frequenz- und Lautstärkeanalyse</i>	31

2.4 – AUSWERTUNG.....	32
2.4.1 – Auswertung der Akustischen Analyse.....	34
2.4.2 – Auswertung der Videounterstützten Analyse.....	34
2.4.3 – Auswertung der Frequenz- und Lautstärkeanalyse.....	34
3 – ERGEBNISSE	36
3.1 – GRUPPENANALYSE.....	36
3.2 – ERGEBNISSE DER AKUSTISCHEN ANALYSE.....	37
3.2.1 – Deskriptive Statistik	38
3.2.2 – Detailstatistik Vorbereitungsphase.....	40
3.2.3 – Detailstatistik Transitphase	42
3.2.4 – Detailstatistik Repositionsphase	44
3.2.5 – Detailstatistik Gesamtdauer.....	46
3.2.6 – Testdefinition.....	48
3.3 – ERGEBNISSE DER VIDEOUNTERSTÜTZTEN ANALYSE	50
3.3.1 – Deskriptive Statistik und Vergleich.....	51
3.3.2 – Korrelationen.....	55
3.4 – ERGEBNISSE DER FREQUENZ- UND LAUTSTÄRKEANALYSE.....	57
3.4.1 – Diagramme der Frequenz- und Lautstärkeanalyse.....	57
3.4.2 – Testergebnisse der Frequenz- und Lautstärkeanalyse	63
3.4.3 – Diskriminantenanalyse der Frequenz- und Lautstärkeanalyse.....	64
4 – DISKUSSION	68
4.1 – DIE AKUSTISCHE ANALYSE	68
4.1.1 – Vergleich zu früheren Studien.....	70
4.1.2 – Fazit der akustischen Analyse.....	78
4.2 – DIE VIDEOUNTERSTÜTZTE ANALYSE	79
4.2.1 – Ursachen der Geräuschenstehung.....	79
4.2.2 – Vergleich der videogestützten Auswertung mit der akustischen Auswertung	81
4.2.3 – Fazit der videounterstützten Analyse	84
4.3 – DIE FREQUENZ- UND LAUTSTÄRKEANALYSE	85
4.4 – ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	91
LITERATURVERZEICHNIS	94
DANKSAGUNG	96

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> , statistischer Test auf Varianzunterschiede zwischen Messreihen
AVI	<i>Audio Video Interleaved</i> , von Microsoft definiertes Containerformat für Videos
AWMF	<i>Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Fachgesellschaften</i>
CMA	<i>Cortical mastory area</i>
df	<i>Degrees of freedom</i> , Freiheitsgrad in der Statistik
EUSI	<i>European Stroke Initiative</i>
F_{PEAK1}	Messwert, Frequenzbande maximaler Intensität in Hertz
F_{PEAK2}	Messwert, Frequenzbande zweithöchster Intensität in Hertz
FFT	<i>Fast-Fourier-Transformation</i> , erlaubt die Extraktion der Frequenzanteile eines designierten Anteils eines akustischen Signals
Hz	<i>Hertz</i> , SI-Einheit der Frequenz
K-S-Test	<i>Kolmogorov-Smirnov-Test</i> , statistischer Test der Normalität einer Variablenverteilung
MP3	<i>MPEG-1 Audio Layer 3</i> , psychoakustisches Kompressionsverfahren für Audiodateien
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i> , legt Standards für die Video- und Audiokompression fest
ms	<i>Millisekunde</i> , 1/1000 der SI-Einheit Sekunde
NN	<i>Nomen nescio</i> - Name des Autors unbekannt (bei autorlosen Publikationen von Fachgesellschaften)
OÖS	<i>Oberer Ösophagussphinkter</i>
P	<i>Power</i> , Signalpegel der Aufzeichnung (ohne Einheit, relativer Wert zwischen 0 und 32768)

P_{AVG}	Messwert, über die Zeit gemittelte durchschnittliche Signalpegel für alle Frequenzbereiche
P_{AVG}(F_{x-y})	Messwert, über die Zeit gemittelte durchschnittliche Signalpegel für den Frequenzbereich F _{x-y} (ohne Einheit)
PEG	<i>Perkutane Endoskopische Gastrotomie</i>
SI	<i>Le Système international d'unités</i> , International Einheitensystem
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> : Signal-Rausch-Abstand, beschreibt die Qualität der Aufzeichnung eines akustischen Signals
t(Phase)	<i>Time</i> , Dauer der in Klammern angegeben Schluckphase in Millisekunden
Time-FFT	Auftragung eines FFT-Spektogramms gegen die Zeit
ZA	<i>Zervikale Auskultation</i>
ZNS	<i>Zentrales Nervensystem</i>

Zusammenfassung

Einleitung

Der Schluckvorgang ist ein ohne medizinische Hilfe lebensnotwendiges Instrument zum sicheren Nahrungstransport aus der Mundhöhle in den Magen. Es handelt sich um ein komplexes Zusammenspiel von zahlreichen Muskel- und Nervensystemen. Während der Nahrungstransport durch medizinische Interventionen effektiv überbrückt werden kann, droht bei Störungen des Schluckablaufs durch die anatomische Nähe der Luft- und Speisewege im menschlichen Pharynx die Aspiration des Geschluckten. Zu den häufigsten Ursachen von erworbenen pharyngealen Schluckstörungen gehört der Schlaganfall. Aspirationspneumonien in der Folge einer postapoplektischen pharyngealen Schluckstörung sind eine häufige und potentiell letale Komplikation nach Schlaganfall. Zur Diagnostik von Schluckstörungen stehen mit der Videoendoskopie und der Videofluoroskopie derzeit zwei etablierte diagnostische Methoden zur Verfügung. Beide eignen sich aber nur eingeschränkt als zumutbare und rasch verfügbare Screeningmethode bei Risikopatienten oder zur zuverlässigen regelmäßigen Verlaufskontrolle. Die zervikale Auskultation und andere Untersuchungen des Schluckgeräusches könnten diese Anforderungen erfüllen. Allerdings ist die Wertigkeit dieser Methoden seit fast 40 Jahren Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion und kann bis heute als umstritten gelten. Durch aktuelle Erkenntnisse konnte ein gewisser Konsens bei der Methode der Geräuschdetektion erreicht werden. Uneinigkeit besteht aber über die optimale Methode der Signalverwertung und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Es wurde daher mit dieser Arbeit der Versuch unternommen, Unterschiede in den akustischen Signaturen der Schluckgeräusche von Dysphagie-Patienten zu einer Kontrollgruppe herauszuarbeiten.

Methode

Es sollten drei Gruppen miteinander verglichen werden: Patienten mit Schlaganfall und videoendoskopisch bestätigter Dysphagie, Patienten mit Schlaganfall und videoendoskopisch ausgeschlossener Dysphagie und eine Kontrollgruppe. Bei allen Teilnehmern wurden Schlucksignale mittels eines Kehlkopfmikrofons aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgte über die Klangdimensionen Frequenz, Länge und Lautstärke, die gruppenweise miteinander verglichen wurden. Außerdem wurde die Beurteilung der rein akustischen Auswertung mit der Beurteilung unter Zuhilfenahme der Videoendoskopie korreliert.

Ergebnis

Insgesamt 66 Testpersonen konnten für die Studie rekrutiert werden (24 Patienten mit Apoplex und Dysphagie, 18 Patienten mit Apoplex und ohne Dysphagie und 24 Probanden der Kontrollgruppe). Probanden mit Dysphagie zeigten bei der Signaldauer aller Geräuschanteile eine signifikante Verlängerung gegenüber der Kontrollgruppe. Die mittlere Schluckdauer für Schluckgesunde lag bei 616,6 ms gegenüber 978,0 ms bei Schluckgestörten. Im Vergleich der beiden Apoplex-Gruppen (mit und ohne Dysphagie) wurde keine Signifikanz erreicht. Ein retrospektiv festgelegter Cutoff bei 675 ms erlaubte die korrekte Gruppenzuordnung in 88% der Fälle (Sensitivität 95%, Spezifität 81,25%). Signaldauern von mehr als einer Sekunde waren im Testfeld beweisend für schwere Schluckstörungen mit Aspiration. Analysen der Frequenzmuster und der Lautstärke zeigten zwar signifikante Unterschiede bezüglich der dominierenden Frequenzanteile, des Frequenzablaufes und der Signalpegel, erlaubten aber keine weiterführende Diskriminierung der Gruppenzugehörigkeit gegenüber der Signaldauer alleine. Ferner zeigte sich eine überwiegende Korrelation der Ergebnisse aus der Beurteilung der Tonsignale gegenüber der Beurteilung der Videoendoskopie. Eine Einteilung der akustischen Signatur in die Phasen der Schluckvorbereitung, des Bolustransits und der Kehlkopfreposition gelang in etwa 75% der Fälle.

Diskussion

Analog zur bestehenden Literatur gelang überwiegend die Nachvollziehung des typischen dreiphasigen Signalablaufes. Es konnten signifikante Unterschiede insbesondere in der Signallänge zwischen schluckgesunden Probanden und solchen mit postapoplektischer Dysphagie gezeigt werden. Obwohl ein Trend zu entsprechenden Unterschieden zwischen Apoplexpatienten mit und ohne Dysphagie gezeigt werden konnte, verfehlte dieser bei mangelnder Gruppenstärke die Signifikanz. Es wird spekuliert, dass der weniger deutliche Unterschied zwischen den apoplektischen Patientengruppen einer subklinischen Störung des Schluckablaufs auch bei den als schluckgesund diagnostizierten Probanden geschuldet ist. Prospektive Studien werden daher die Wertigkeit des Verfahrens als Screeningmethode zeigen müssen. Insgesamt wurde mit dieser Studie demonstriert, dass eine pharyngeale Schluckstörung in Folge eines Schlaganfalls zu einer deutlichen Alteration des Schluckgeräuschs gegenüber dem Schluckgesunden führt und als diagnostisches Mittel potentiell einsetzbar ist.

1 - Einleitung

1.1 - Der Schluckvorgang

1.1.1 - Funktion

Der Schluckvorgang dient uns dazu, einen Bolus (idealerweise Nahrung oder Flüssigkeit) aus dem Mund in den Magen zu verbringen und ihn somit den Verwertungssystemen der menschlichen Verdauung zuzuführen. Neben der willentlichen Bolusaufnahme wird im Gesunden durch regelmäßiges spontanes Schlucken etwa einmal pro Minute Speichel aus der Mundhöhle entfernt, der in einem steten Fluss von den Speicheldrüsen nachgebildet wird (Dodds 1989; Dodds et al. 1990). Durch den steten Austausch des Speichels werden Mundhöhle und Zähne vor Keimen und ungünstigen pH-Verhältnissen geschützt. Zudem hält der Speichel die Mundschleimhäute feucht, erleichtert das Sprechen, dient der oralen Vorverdauung von Nahrung und nimmt eine wichtige Rolle in der Immunabwehr ein. Die Ziele des Schluckens werden durch ein komplexes Zusammenspiel zahlreicher Organsysteme erreicht: Die ungestörte Funktion und Koordination von Lippen, Zähnen, Speicheldrüsen, Zunge, über 50 paarigen Muskeln der Kiefer-, Mund- und Schlundmuskulatur, Ösophagusperistaltik, Atmung sowie zahlreicher sensorischer und sensibler Afferenzen aus Mund und Oropharynx sind einige der Voraussetzungen für den erfolgreichen und sicheren Bolustransport (Prosiegel et al. 1997). Schlucken ist ein halbautomatischer Vorgang. Obwohl weite Teile des Ablaufes reflektorisch erfolgen, werden andere Teile entsprechend der sensiblen und sensorischen Afferenzen aus dem Oropharynx moduliert. Die orale Phase ist willkürlich steuerbar. Auch ließ sich zeigen, dass der Schluckvorgang mit gezieltem Training beeinflussbar ist, um bei bestimmten Störungen der beteiligten Mechanismen die Schluckleistung zu verbessern (Miller und Langmore 1994; 1999). Wie die Atmung lässt sich der Schluckimpuls vorübergehend willkürlich unterdrücken oder kann umgekehrt auch willentlich ausgelöst werden.

1.1.2 - Einteilung

Der eigentliche Schluckvorgang wird üblicherweise nach dem Physiologen François Magendie in drei Phasen unterteilt: Orale Phase, pharyngeale Phase und ösophageale Phase (Magendie 1816). Nach der oralen Vorbereitung der Nahrung durch Kauen sowie Einweichen und Vorverdauung

der Nahrung mit dem Speichel wird der Bolus in der oralen Phase über die Zunge in den Schlundeingang verbracht. Hierdurch wird der eigentliche Schluckreflex ausgelöst, es beginnt die pharyngeale Phase, der Bolus tritt in den Schlund ein und wird zu dem sich nun öffnenden oberen Ösophagussphinkter transportiert. Nach Übertritt in die Speiseröhre wird der Bolus letztlich in der ösophagealen Phase mittels peristaltischer Kontraktionen in den Magen weitertransportiert.

1.1.3 - Steuerung

Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft werden diese Abläufe unter anderem in den unteren Bereichen des Gyrus post- und praecentralis, der darunter gelegene „cortical masticatory area“ (CMA), der „deep CMA“ des frontalen Operculums und Teilen der vorderen Insel, die auf die am Schluckvorgang beteiligten Hirnnervenkerne projizieren, koordiniert. So genannte „pattern generators“ der oberen Medulla oblongata und der Nucleus tractus solitarii bestimmen den räumlichen und zeitlichen Ablauf beim Schluckakt (Prosiegel et al. 1997).

1.2 - Die Dysphagie

1.2.1 - Beschreibung

Eine Störung des Schluckvorganges stellt eine erhebliche Gefahr für den gesamten Organismus dar: Ohne Anwendung spezieller medizinische Maßnahmen ist der Schluckakt die einzige Möglichkeit unseres Körpers, die zur Selbsterhaltung notwendigen Mengen von Nahrung und Flüssigkeit aufzunehmen. Zudem droht bei bestimmten Störungen der pharyngealen Phase ein Übertritt des Geschluckten in die Trachea (Aspiration). Bei intakter Innervation führt dies zu reflektorischen Hustenattacken, die in ausgeprägten Fällen eine effektive Nahrungsaufnahme unmöglich machen können. Sind die sensiblen Afferenzen im Bereich von Glottis und Trachea ebenfalls beeinträchtigt, droht eine „stille Aspiration“, d.h. der Betroffene verschluckt sich und aspiriert, ohne es selbst zu bemerken und ohne äußere Erkennbarkeit (Husten). Es droht die Gefahr bronchialer Irritationen bis hin zur Aspirationspneumonie (Prosiegel et al. 1997).

1.2.2 – Definition und Einteilung

„Dysphagie“ als Begriff bezeichnet die Gesamtheit aller Störungen des Schluckaktes zwischen Mundhöhle und Magen, und wird wegen der meist sehr unterschiedlichen Ätiologien in die oropharyngeale und ösophageale Dysphagie unterteilt. Bei der ösophagealen Dysphagie stehen ursächlich Erkrankungen der unmittelbar beteiligten Organsysteme (Ösophagus, Magen) im

Vordergrund. Divertikel, Varizen, Stenosen, Strikturen, Atresien, Karzinome, Aganglionosen oder auch die Refluxkrankheit verursachen durch lokale Störungen von Motilität, Kaliber und Druckverhältnissen eine Behinderung der Boluspassage. Während eine oropharyngeale Dysphagie ebenfalls organische Ursachen haben kann (Entzündungen, Neoplasien, Zenker-Divertikel oder auch blockierende Fremdkörper), spielen hier Erkrankungen übergeordneter Zentren eine größere Rolle: Über 50% aller Schlaganfallpatienten leiden in der Akutphase unter einer klinisch messbaren Schluckstörung (Horner et al. 1988; Mann et al. 1999). Auch zahlreiche andere neurologische Erkrankungen können im Verlauf zu Schluckstörungen beim Erkrankten führen, unter ihnen neurodegenerative Erkrankungen (Morbus Parkinson, Morbus Alzheimer), demyelinisierende Erkrankungen (Multiple Sklerose), Infektionen (Neuro-Lues, Neuro-Borreliose, Poliomyelitis), Erkrankungen des neuromuskulären Überganges (Myasthenia gravis, Eaton-Lambert-Syndrom) oder auch Neoplasien des ZNS.

1.2.3 – Therapie

Die Diagnose einer Dysphagie muss in Abhängigkeit vom Schweregrad zu spezifischen Maßnahmen veranlassen. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die suffiziente Ernährung und Wässerung des Erkrankten sicherzustellen und zugleich eine Aspiration zu vermeiden. In schwerwiegenden Fällen können diese Ziele oft nur über invasive Maßnahmen erreicht werden. Die effektivste und häufigste Therapie einer hochgradigen Schluckstörung mit Aspirationsgefahr ist die Tracheotomie mit Anlage einer Tracheostomas, wodurch die Penetration geschluckten Materials in die Trachea verhindert wird. Gleichzeitig muss die Ernährung des Patienten sichergestellt werden, zum Beispiel durch Anlage einer nasogastralen Sonde, oder bei Absehbarkeit eines längeren Verlaufes mittels einer perkutanen endoskopischen Gastrotomie (PEG). In speziellen Fällen können auch andere invasive Verfahren wie die Myotomie des oberen Ösophagusphinkters (OÖS) oder ein operativer (und reversibler) Glottisverschluss geeignete Maßnahmen sein.

Pharmakologische Maßnahmen spielen in der Therapie der oropharyngealen Dysphagie noch eine untergeordnete Rolle. Ausnahmen sind therapierbare Grunderkrankungen, wie die Myasthenia gravis. Neben der Myotomie des OÖS kommt auch eine Relaxation des Muskels mittels Injektion von Botulinumtoxin in Betracht.

Die größte Bedeutung im Hinblick auf eine Rehabilitation des Schluckgestörten kommt der funktionellen Schlucktherapie zu. Um die verlorene Schluckfunktion zu kompensieren, können bestimmte günstige Verhaltensweisen (Platzierung der Nahrung, Kopfhaltung beim Schlucken, bestimmte Schlucktechniken) trainiert werden. Außerdem wird die Kost angepasst: Konsistenz, Menge, Temperatur und sogar Geschmack können die Schluckbarkeit eines Bolus deutlich beeinflussen.

1.2.4 – Diagnostik und Screeningverfahren

Trotz des häufigen Auftretens von Schluckstörungen und trotz der daraus entstehenden Gefahren und der etablierten Therapiemöglichkeiten ist in Deutschland ein Dysphagiescreening nach Schlaganfall nicht vollständig etabliert: Die aktuellen Empfehlungen der *European Stroke Initiative* (EUSI) von 2003/2004, die auch in älterer Ausgabe von der deutschen *Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Fachgesellschaften* (AWMF) übernommen wurden, geben keine klare Empfehlung über entsprechende Untersuchungen bei der Behandlung zerebraler Ischämien in ihren Richtlinien aus. International hat die Dysphagiediagnostik im Management des Schlaganfallpatienten allerdings bereits einen festen Platz eingenommen: So empfehlen beispielsweise die *National Stroke Foundation* aus Australien (2003) und die *American Heart Association* der USA (2003) in ihren Leitlinien, bei jedem Schlaganfall die Schluckfunktion der Betroffenen zu prüfen.

Wie kann ein solches Screening durchgeführt werden? Als sicherstes Diagnoseverfahren einer Dysphagie mit fraglicher Aspiration gilt die Videofluoroskopie bzw. Cinematographie des Schluckaktes, ein Verfahren der Röntgendurchleuchtung mit Kontrastmittelschluck, bei dem ein kurzer Film angefertigt und anschließend ausgewertet wird. Der Kontrastmittelbolus lässt sich hierbei anschaulich auf seinem Weg von der Mundhöhle bis in den Ösophagus verfolgen und gibt so Aufschlüsse über Passagestörungen, ungeschluckte Bolusreste oder auch eine Penetration des Bolus durch die Glottis. Zwar hat dieses Verfahren eine hohe Sensitivität für das Vorliegen einer oropharyngealen Dysphagie, jedoch ist es auch das Aufwendigste der heute gängigen Verfahren. Da die für die Videofluoroskopie notwendigen technischen Anlagen üblicherweise immobil sind, müssen die Patienten mobilisiert und zu der Untersuchungskammer verbracht werden – die in vielen Kliniken gar nicht vorhanden ist. Die Videofluoroskopie erfordert eine gute

Kooperationsfähigkeit des Patienten, denn er muss mobilisierbar sein, in der Untersuchungskammer auf Sprachkommandos reagieren können und über eine gewisse Rumpfkontrolle verfügen. Gerade nach einer akuten zerebralen Ischämie ist die Möglichkeit des Erkrankten zu dieser Mitarbeit nicht selbstverständlich; der Transport in die fremde Umgebung kann ihm die Orientierung noch weiter erschweren. Wegen der Strahlenbelastung und des Aufwandes eignet sich die Videofluoroskopie kaum für eine engmaschige Verlaufsbeurteilung.

Ergänzend zur Videofluoroskopie wurde von Langmore et al. die fiberoptische Endoskopie als Mittel der Dysphagie- und Aspirationsdiagnostik beschrieben. Hierbei wird ein fiberoptisches Instrument nasal eingeführt. Dies erlaubt dem Untersucher eine direkte Beurteilung der anatomischen Verhältnisse, Reflexfunktion sowie Stimmlippenstellung und -funktion. Ergänzend werden dem Patienten während der Untersuchung gefärbte Flüssigkeiten bzw. Speisen unterschiedlicher Konsistenz zum Schlucken gegeben, was Aufschlüsse über die Schluckfunktion und eine mögliche Stimmlippenpenetration durch den Bolus gibt. Aktuelle Studien zeigen, dass die Videoendoskopie in Sensitivität und Spezifität der Videofluoroskopie nicht unterlegen ist. Ein Vorteil der fiberoptischen Methode ist sicher, dass das Gerät mobil ist und am Krankenbett eingesetzt werden kann. Der Untersucher ist während der Prozedur zugegen und kann den Patienten direkt unterstützen. Zudem entsteht keine Strahlenbelastung. Allerdings wird das Einbringen eines Fremdkörpers durch die Nase nicht von allen Patienten gleichermaßen toleriert und die Notwendigkeit der gründlichen Reinigung und Desinfektion des Endoskops nach jeder Untersuchung machen auch dieses Verfahren nur eingeschränkt tauglich für engmaschige Verlaufsuntersuchungen.

1.2.5 – Die Zervikale Auskultation

Für den Klinikalltag wäre eine schnelle, gut tolerable und zuverlässige Verlaufskontrolle wünschenswert. Damit ließen sich neben den diagnostischen Ergebnissen auch die Therapieerfolge der Schlucktherapie laufend beurteilen und daraus Konsequenzen für das Prozedere ableiten. Ein ideales Verfahren, das einfach durchführbar ist und zugleich sichere Aussagen zum Verlauf machen kann, wäre auch als Ansatz einer Biofeedbacktherapie denkbar, bei der der Patient gezielt trainieren kann, suffizient und sicher zu schlucken.

Die Möglichkeiten solcher klinischen Untersuchungsmethoden sind seit langem Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. Im Vordergrund stehen dabei auf der einen Seite die zervikale Auskultation (ZA), bei der mit einem Stethoskop am Kehlkopftrand der Schluckvorgang auskultiert wird, auf der anderen Seite stehen neurologische Testschemata, die meist in einem Scoring-System Nervenfunktion (Hirnnervenstatus, Würgereflex) und Klinik (Husten nach Bolusaufnahme, Regurgitation, Gesamtzustand) bewerten, um das Risiko einer Schluckstörung abzubilden. Bisher sind diese Verfahren jedoch insbesondere in ihrer Spezifität und Sensitivität zu ungenau, um dem Therapeuten verlässliche Angaben über eine Schluckstörung oder eine eventuelle Aspiration zu geben.

Während die neurologischen Tests allenfalls eine Grundwahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer Dysphagie beziffern können, da der Schluckvorgang selbst durch sie nicht erfasst wird, versucht die ZA eine direkte Beobachtung der Schluckfunktion. Studien haben gezeigt, dass eine Aspiration hierbei zwar insgesamt gut erkannt wird, aber zahlreiche Patienten von den Bewertern im Vergleich zur Videofluoroskopie fälschlich als dysphag eingestuft wurden. Außerdem zeigte sich eine sehr ausgeprägte Inter-Bewerter- und auch Intra-Bewerter-Variabilität, das heißt, verschiedene Untersucher kamen beim gleichen Patienten häufig zu unterschiedlichen Ergebnissen und auch bei einer späteren Zweitbeurteilung wurde das gleiche (aufgezeichnete) Schluckgeräusch durch den gleichen Untersucher nicht selten im zweiten Durchgang anders bewertet. Feststellen ließ sich aber, dass die ZA mit signifikanter Häufigkeit in der Lage war, eine Schluckstörung oder auch eine Aspiration zu identifizieren und dass einzelne Untersucher mit Regelmäßigkeit zu einem besseren Ergebnis kamen als andere. Es liegt nahe, hieraus zu folgern, dass das beim Schlucken entstehende Geräusch durchaus Rückschlüsse auf eine eventuelle Pathologie geben kann. So fordern auch Zenner et al. als Resümee einer Studie über die zervikale Auskultation, künftige Studien sollten klare, objektive und erlernbare Kriterien schaffen, woran sich das Schluckgeräusch des Dysphagiekranken von dem eines Gesunden unterscheiden lässt (Zenner et al. 1995).

1.2.6 – Das Schluckgeräusch

1.2.6.1 – Grundsätze akustischer Signale

Ein Geräusch, wie es in der zervikalen Auskultation wahrgenommen werden kann, ist ein dreidimensionales Signal. Physikalisch betrachtet besteht es aus den Komponenten Frequenz (Hertz), Amplitude (Dezibel) und Dauer (Sekunden).

Die Frequenz bestimmt, als was und in welcher Tonlage wir das Geräusch wahrnehmen. Je höher die Frequenz des Signals, desto höher klingt es für uns. Durch Überlagerung verschiedener Schwingungen kann ein Audiosignal aus mehreren Frequenzkomponenten bestehen. Enthält ein Audiosignal nur eine Frequenzkomponente, nehmen wir die Schwingung als einzelnen Ton wahr. Mischen sich mehrere Töne einer Harmonie in einem Audiosignal, wie zum Beispiel bei einem Gitarrenakkord, so erhalten wir einen Klang. Enthält ein Audiosignal dagegen sehr viele unterschiedliche und über die Zeit wechselnde Frequenzkomponenten, so spricht man von einem Geräusch. Die meisten Audiosignale, die der menschliche Körper erzeugt und gemessen werden können, wie Herzschlag, Stimme, Atmung, Darmperistaltik und auch das Schluckgeräusch, fallen in die letztere Klasse.

Meist wird zur Darstellung eines Audiosignals auf einem Computerbildschirm die Waveform (Wellenform) herangezogen, bei der die Schalldruckpegel gegen die Zeit aufgetragen wird. In dieser einfachen Darstellung lässt sich auf einen Blick feststellen, zu welchen Zeitpunkten eine akustische Aktion stattfindet. Sie gibt allerdings nur sehr bedingt Rückschlüsse auf die Frequenz, in der das abgebildete Signal lag. Die Frequenzkomponenten eines Signals werden auch als Frequenzspektrum bezeichnet und lassen sich über die Fast-Fourier-Transformation (FFT) aus einem Signal extrahieren. Für ein gewähltes Zeitfenster werden dann die Frequenzen gegen die Schalldruckpegel zweidimensional aufgetragen. Um alle drei Dimensionen gleichzeitig visualisieren zu können wird meist das Spektrogramm verwendet, bei dem die Frequenz gegen die Zeit aufgetragen und der jeweilige Schalldruckpegel farbkodiert dargestellt wird. Noch anschaulicher ist das Time-FFT, eine Auftragung von gemittelten FFT-Spektra gegen die Zeit.

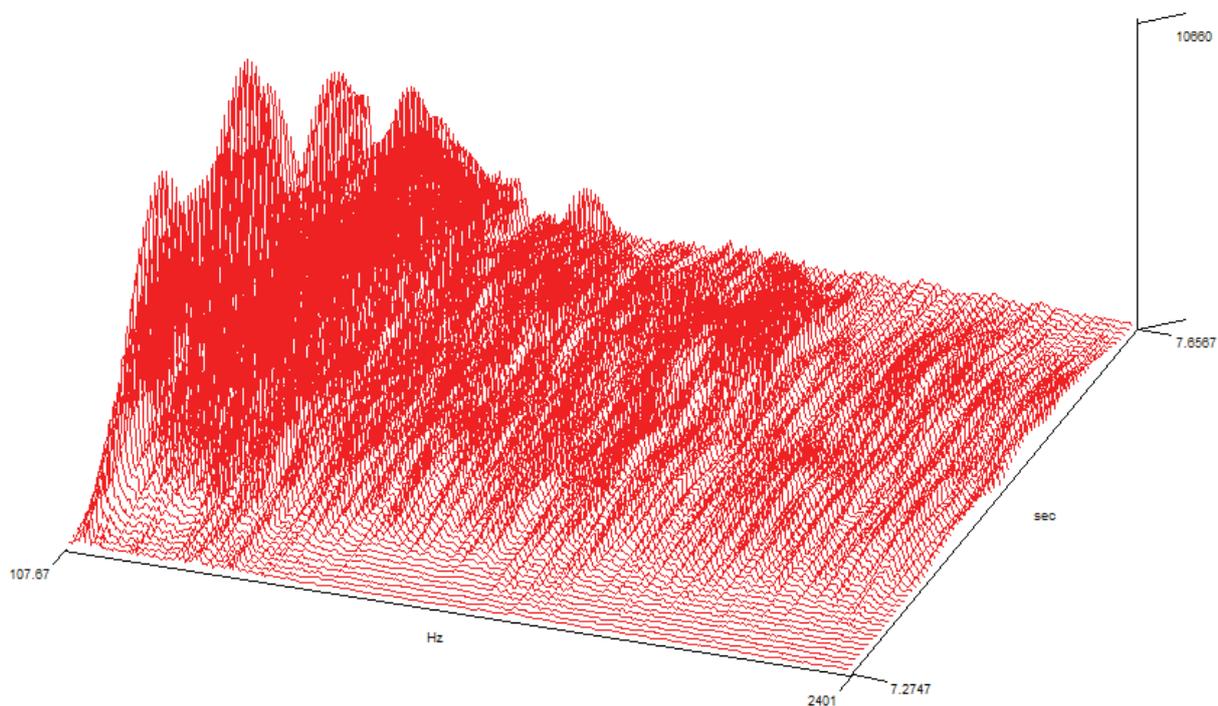


Abb. 1.2.6.1: Drei-dimensionales Time-FFT einer Transitphase. Aufgetragen ist die Zeit in Sekunden gegen Frequenz in Hertz und Amplitude (ohne Einheit).

Aufnahmegeräte wie Mikrofone und Schwingungsmesser reagieren nicht immer gleich gut auf alle eingehenden Schallfrequenzen. Manche Frequenzen werden dann bei gleichem Eingangspegel schwächer abgebildet als andere. Als ideale Eigenschaft gilt die flat frequency response (flache Frequenzantwort), bei der alle Frequenzanteile unverändert aufgenommen werden.

Obwohl dank moderner Computersoftware die Messung der Frequenzkomponenten eines Audiosignals recht einfach geworden ist, sind derartige Messungen bei Geräuschen häufig schwer reproduzierbar. Anders als die oft sehr gut vergleichbaren Aufzeichnungen aus einem EKG stellt sich das Schluckgeräusch (wie weiter unten ausgeführt) sehr heterogen dar. Möchte man also den Frequenzgang einer bestimmten Signalkomponente identifizieren, fällt es im Schlucksignal schwer einen Punkt zu wählen, der sich zu einem späteren Zeitpunkt im gleichen Signal exakt wieder finden lässt und für den es in anderen Signalen eine genaue Entsprechung gibt. Daher bietet es sich an, die Frequenzanteile eines Geräusches über die Zeit zu mitteln. Hierdurch

entstehen wiederum neue Probleme. Aufgrund elektrischer Felder, die alleine schon durch die Messgeräte verursacht werden und auch durch die unterschiedlichen Kabel- und Steckerwiderstände, entsteht bei jeder Geräuschaufzeichnung unvermeidlich ein gewisses Grundrauschen, welches sich bestenfalls teilweise durch Eliminierung starker Rauschfrequenzen beheben lässt. Dieses Rauschen stört die subjektive menschliche Beurteilung des Signals wenig, da wir automatisch die leisen Geräuschanteile ausblenden und uns auf das vordergründige Geräuschemuster konzentrieren.

Bei einer computergestützten Auswertung über die Zeit stellt dieses Rauschen allerdings ein großes Problem dar: Das Rauschen belegt über die gesamte Signaldauer die gleichen Frequenzen mit konstantem Schalldruckpegel. Dem entgegen wechseln alle anderen Geräuschanteile über die Zeit ihre Frequenz gelegentlich. Daraus ergibt sich, dass bei einer Betrachtung eines größeren Zeitfensters im Durchschnitt das sehr leise, aber konstante Rauschen ein höheres Gewicht bekommt als ein sehr kurzes Signal mit einem wesentlich höheren Schalldruckpegel. Zudem kann die Bestimmung dieses Frequenzmittelwertes über die Zeit nur sehr bedingt Auskunft über den tatsächlichen Signalverlauf geben. Besteht das Signal zum Beispiel ausschließlich aus gleichstarken Anteilen mit den Frequenzen 100 Hz und 10000 Hz, käme als Mittel 5500 Hz heraus, obwohl dieser Frequenzbereich gar nicht im Signal vorhanden war. Günstiger ist die Einteilung des Signals in Frequenzfenster, in denen dann die Summe der Pegel eines Frequenzbereiches über die Zeit gemittelt wird. Dieses Vorgehen schließt zwar nicht den beschriebenen Rauscheffekt aus, gibt aber guten Aufschluss darüber, welche Frequenzkomponenten tatsächlich in dem Signal vorkamen.

Die nächste Signalkomponente ist die Amplitude. Durch Amplitude und Frequenz eines Signals ergibt sich ein Schalldruckpegel in Dezibel. Dieser bestimmt, wie laut wir das Signal wahrnehmen, was Lautheit (Sone) genannt wird. Da an der Mikrofonmembran durch den Schall nur eine schwache Schwingung verursacht wird, muss das Signal üblicherweise anschließend verstärkt werden, um es wieder hörbar zu machen. Andererseits darf die Amplitude je nach Aufzeichnungsgerät bestimmte Größen nicht überschreiten, sonst gehen Signalanteile verloren, das Signal „reißt“, und kann nur noch verzerrt und entstellt wiedergegeben werden. Wird die Amplitude zu niedrig, reduziert sich der Signal-Rausch-Abstand (signal-to-noise ratio, SNR) und das Rauschen gewinnt relativ zum Signal an Bedeutung. Daher ist es notwendig, den

Aufnahmepegel des Gerätes auf die eingehende Signalintensität zu eichen. Für eine ideale Qualität der Aufnahme müsste dieser Pegel bei jeder einzelnen Aufnahme neu kalibriert werden. Andererseits macht dieses Vorgehen es unmöglich, die Signalpegel verschiedener Signale in Relation zueinander zu setzen, da ja zuvor alle auf den gleichen Schalldruckpegel geeicht wurden.

Zuletzt gibt es noch die Signaldauer, in der die anderen beiden Dimensionen eine zeitliche Ausdehnung erfahren. Im Gegensatz zu den anderen beiden Komponenten ist die Signaldauer recht einfach und gut reproduzierbar zu bestimmen: Man misst den zeitlichen Abstand von der ersten Amplitude, die sich über das Grundrauschen erhebt, bis zum Ende der letzten Amplitude. Diese Messung ist weniger abhängig von den Rahmenbedingungen, solange der Aufnahmepegel nicht so gering ist, dass ganz Signalanteile komplett verschwinden und keine störenden Nebengeräusche mit aufgenommen werden, die eine Identifikation des gesuchten Geräuschanteils erschweren. Auch wenn alle Signalkomponenten des Schluckgeräusches in die Auswertungen dieser Arbeit eingeflossen sind, gehört der Zeitkomponente wegen der ungleich günstigeren Messbedingungen die größte Aufmerksamkeit. Zur Vermessung der Dauer bestimmter Signalanteile eignet sich bei Verwendung eines Vorverstärkers grundsätzlich jede Form von Aufnahmegerät: Diktiergeräte, bestimmte Mobiltelefone, tragbare MP3-Spieler mit Aufnahmefunktion, Kassetten- und Minidiskrekorder oder auch Phono(kardio)graphen, um einige zu nennen. Da die exakte Vermessung der Signaldauer nur durch die Betrachtung einer graphischen Auftragung des Schalldruckpegel gegen die Zeit gelingen kann, sind digitale Geräte analogen (außer dem Phonographen, der das Signal direkt zu Papier bringt) vorzuziehen, um die nachträgliche Digitalisierung zu sparen. Zudem können Bandgeräte mitunter in ihrer Abspiel- und Aufnahmegeschwindigkeit variieren und dadurch eine Verzerrung der tatsächlichen Dauer bewirken.

1.2.6.2 – Geräuschestehung beim Schlucken

Neben einigen auf Teilaspekte des Geräusches beschränkten Theorien (Lear et al. 1965; Mackowiak et al. 1967; Vice et al. 1990; Hamlet et al. 1992) dauerte es bis 1998, dass Cichero und Murdoch in Anlehnung an Hypothesen zur Herztonentstehung die erste umfassende Hypothese über die Ursachen der Entstehung aller Anteile des Schluckgeräuschs veröffentlichten (Cichero und Murdoch 1998). Aus der genauen Kenntnis des gesunden Schluckgeräuschs und

seiner Ursachen hofften Cichero und Murdoch, genaue Anhaltspunkte für die Verwendung der Geräusche in der Dysphagiediagnostik zu erhalten. In einer umfassenden Beschreibung stellen sie die Theorie auf, das Schluckgeräusch entstehe durch eine Vibration des Pharynx infolge eines Bewegungsimpulses. Je nach Stellung der zahlreichen Klappensysteme (Velum, Stimmlippen, Epiglottis, oberer Ösophagusmund, Zungengrund) biete die verbleibende pharyngeale Kavität einen anderen Resonanzkörper und würde dann durch den Bewegungsimpuls aus Bolusbewegung und Pharynxaktivität Schwingungen einer dazu passenden Frequenz generieren. Da also der Frequenzgang des Schluckgeräusches in der Hypothese von Cichero und Murdoch primär von der Größe des Resonanzkörpers abhängig ist, hätte dann jeder Mensch beim Schlucken ein seiner individuellen Pharynxkonfiguration entsprechendes Frequenzmuster. Weiterhin folgern die Autoren, dass bei Vorliegen einer Schluckstörung je nach Ursache eine Frequenzverschiebung zu höheren Tönen (durch pharyngeale Flüssigkeitsansammlung und Verringerung des Resonanzkörpers) oder auch zu tieferen Tönen (durch Ausfall von Klappenfunktionen und Vergrößerung des Resonanzkörpers) entstehen könnte.

Grundsätzlich ist das Schluckgeräusch, anders als Herztöne oder Atemgeräusche, sowohl inter- als auch intraindividuell sehr variabel und zahlreichen willkürlichen Einflüssen ausgesetzt. Durch die Wahl von Bolusgröße, Boluskonsistenz, Bolusposition, Kopfhaltung oder auch durch die Menge zusammen mit dem Bolus verschluckter Luft kann jeder mühelos eine objektiv nachvollziehbare Änderung seines Schluckgeräusches verursachen. Möchte man also Schluckgeräusche verschiedener Menschen miteinander vergleichen, ist es wichtig sicherzustellen, dass die Bedingungen der Bolusaufnahme zwischen den Probanden vereinheitlicht werden und möglichst mehrere Geräusche nacheinander aufgezeichnet werden, bis sich eines als das für den untersuchten Menschen typische, wiederkehrende Geräusch identifizieren lässt.

1.2.6.3 – Historie der Erforschung der Schluckgeräusche

Bereits in der Vergangenheit haben sich zahlreiche Autoren der Messung und Beschreibung von Schluckgeräuschen gewidmet. Die älteste bekannte Veröffentlichung zu Schluckgeräuschen stammt aus dem Jahre 1967 von Mackowiak et al., die bei gesunden Probanden mit einem an den Hals gesetzten Mikrophon die beim Schlucken von Flüssigkeit und Speichel entstehenden Geräusche aufzeichneten und auswerteten (Mackowiak et al. 1967). Aus ihren Beobachtungen

gelang Mackowiak et al. die Identifizierung eines wiederkehrenden Geräuschemuster, das sich in drei gut trennbaren Geräuschanteilen (Alpha, Beta und Delta) mit jeweils dazwischen liegenden silenten Intervallen ($\alpha\beta$ -Intervall und $\beta\delta$ -Intervall) darstellte. Sie betrachteten in ihrer Arbeit auch den Frequenzgang des Schlucksignals und beobachteten dabei, dass das Signal beim Wasserschluck im Verlauf von 600 Hz auf etwa 1100 Hz anstieg, während es beim Schlucken von Speichel konstant um 1100 Hz lag.

Trotz der Pionierleistung von Mackowiak et al. sollte es über 20 Jahre dauern, bis die nächsten Arbeiten zu dem Thema der Schluckgeräusche veröffentlicht wurden. In dieser Zeitspanne erschienen zwar zahlreiche Arbeiten über den Schluckvorgang und seine Störungen, die sich unter vielem anderem mit den Kontraktionsabläufen der Schlundmuskulatur (Perry 1972), der Rolle des Speichels für den Schluckreflex (Mansson und Sandberg 1975), der Koordination von Atmung und Schluckvorgang (Wilson et al. 1981), dem Zusammenhang von Eisenmangel und Schluckstörungen (Dijkstra 1984), den Veränderungen des Schluckvorgangs in Folge einer Laryngektomie (McConnel et al. 1986) oder gar dem Phänomen der Schwertschluckerei (Devgan et al. 1978) beschäftigten, die von Mackowiak et al. beschriebenen Geräuschemuster fanden dabei jedoch wenig Beachtung. Erst später, vielleicht als Folge neuer Arbeiten zu der Kausalkette Schlaganfall → Dysphagie → Aspiration → Pneumonie (Gordon et al. 1987; Delgado 1988; Horner et al. 1988; Barer 1989), wurden das Schluckgeräusch und die zervikale Auskultation wieder Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. In diesen zeitlichen Rahmen fiel auch die Veröffentlichung von Langmore et al., in der die Videoendoskopie als diagnostische Methode zur Detektion von Schluckstörungen erstmalig vorgeschlagen wurde (Langmore et al. 1988). Ebenso die genaue Dokumentation der wechselnden pharyngealen Druckverhältnisse durch McConnel et al. (McConnel et al. 1988), die später eine große Rolle in der Hypothese zur Schluckschallentstehung von Cichero und Murdoch spielte (Cichero und Murdoch 1998).

1990 erschien dann von Hamlet et al. eine Studie, in der im Frequenzspektrum eines Schlucksignals nach einem plötzlichen Frequenzsprung gesucht wurde (Hamlet et al. 1990). Die Art dieses plötzlichen Frequenzwechsels wurde dann notiert und mit Daten einer parallel aufgezeichneten Videofluoroskopie vermessen. Tatsächlich konnte von Hamlet et al. ein solcher Frequenzsprung von durchschnittlich 556 Hz auf 1384 Hz gefunden werden. Zeitlich fiel dieses Ereignis wohl häufig mit dem Boluseintritt in den Hypopharynx zusammen.

Aus dem Jahre 1994 stammt der Band 9 der internationalen Zeitschrift *Dysphagia*, in dem zahlreiche Studien über die Abläufe des Schluckens und der die dabei entstehenden Schluckgeräusche veröffentlicht wurden. Darin veröffentlichten Takahashi et al. gleich zwei Studien, von denen eine sich mit der korrekten Methode der Signalaufzeichnung (Takahashi et al. 1994) und die andere sich mit der Symmetrie und Reproduzierbarkeit von Schluckgeräuschen beschäftigte (Takahashi et al. 1994). In der ersten der beiden Studien (Takahashi et al. 1994) versuchten Takahashi et al. durch Vergleich der Signalqualität von Schluckaufnahmen im gesamten Halsbereich mit verschiedenen Messinstrumenten und Befestigungsmechanismen eine optimale Methode der Signalgewinnung zu finden. Sie resümierten dann, ein Schwingungssensor mit doppelseitigem Papierklebeband am Seitenrand der Trachea direkt unterhalb des Schildknorpels sei die beste Voraussetzung für ein intensives Signal mit einem unverfälschten Frequenzspektrum. Die andere Studie von Takahashi et al. aus dem gleichen Jahr (Takahashi et al. 1994) untersuchte die Ergebnisse häufiger Schluckwiederholungen und Geräuschaufzeichnungen auf beiden Seiten der Trachea. Hier bestätigten Takahashi et al. eine wichtige Feststellung für die Methode: Die Dauer des Schluckgeräuschs liegt konstant um einen Mittelwert herum, der auf beiden Seiten auf durchschnittlich 2 ms genau gleich bestimmt werden konnte. Zudem wurde festgestellt, dass sich kein geschlechtsspezifischer Unterschied zwischen den Probanden ergab.

Ebenfalls in diesem Band der *Dysphagia* erschien auch eine Studie von Selley et al., die sich das zeitliche Gefüge von Schluckgeräusch, Videofluoroskopie und Atmung zum Thema machte (Selley et al. 1994). Aus den Textangaben von Selley et al. muss angenommen werden, dass sie in ihrer Studie nicht mit der Einteilung nach Mackowiak et al. gearbeitet haben. Selley et al. sprechen von zwei Geräuschanteilen, die nach der Textbeschreibung zu urteilen (das eine Geräusch unmittelbar vor Ösophaguseintritt, das andere kurz vor vollständiger Entleerung des Pharynxinhaltes in den Ösophagus), weder das Alpha- noch das Delta-Signal in der Nomenklatur nach Mackowiak et al. meinen können. Weitere Angaben zum Schluckgeräusch finden sich bei Selley et al. nicht, weder Dauer noch Frequenzgang wurden in die Untersuchung miteinbezogen.

Zuletzt in dem wiederum gleichen Band der *Dysphagia* beschäftigten sich Hamlet et al. mit dem Frequenzspektrum des Schluckgeräusches im Hinblick auf die Auswahl des günstigsten

Stethoskops für die zervikale Auskultation (Hamlet et al. 1994). Hamlet et al. stellten im Widerspruch zu Mackowiak et al. und auch zu ihrer eigenen Studie von 1990 einen Frequenzgang mit dem intensivsten Bereich zwischen 200 und 400 Hz fest. Jenseits von 2400 Hz verlor das Signal schnell an Intensität und näherte sich Rauschniveau an.

Als nächstes legten 1997 Boiron et al. eine Studie vor, die den Einfluss von Bolusart und -volumen auf das Schluckgeräusch analysierte (Boiron et al. 1997). Außerdem wurde mit der akustischen Methode der Trinkrhythmus von Probanden beobachtet, die den Auftrag erhielten, eine gewisse Menge Flüssigkeit oder Joghurt in einer bestimmten Zeitspanne zu trinken. Die Menge und Größe der Boli blieb dabei den Probanden überlassen. Boiron et al. stellten in ihrer Untersuchung einen schwachen, unsignifikanten Effekt durch Bolusart und Geschlecht des Probanden und einen starken, signifikanten Effekt durch das Bolusvolumen auf die Schluckdauer fest. Zusätzlich konnten Boiron et al. charakteristische Rhythmen, mit denen ein großer Bolus in mehreren Schlucken aufgenommen wird, beschreiben. Erforderte ein Bolus mehr als einen Schluck zur Aufnahme, zeigte sich ein deutlicher Effekt von Geschlecht und Bolusart. Frauen schluckten deutlich langsamer, und die Probanden benötigten 22 Sekunden statt 6,5 Sekunden bzw. 10 statt 4 Schluckaktionen für einen 100 ml-Bolus, wenn Joghurt statt Wasser verwendet wurde.

Auch Perlman et al. suchten im Jahre 2000 nach Erkenntnissen über den normalen Ablauf des Schluckgeräuschs und den Einfluss von Bolusgröße und -art auf den Schluckvorgang (Perlman et al. 2000). Für die Beobachtung des Schluckvorgangs verwendeten sie neben einem Mikrofon am Hals ein in der Nase befestigtes Manometer zur Bestimmung der Respiration und eine submental abgenommene Oberflächenmyographie. In ihrer Studie kommen Perlman et al. zu dem Schluss, dass die Art des Bolus keinen signifikanten Unterschied für den Schluckvorgang macht, wohl aber das Volumen. Es wird eine durchschnittliche Apnoephase während des Schluckvorgangs von 600 ± 200 ms angegeben, die Dauer des eigentlichen Schluckgeräusches wurde allerdings nicht beziffert. Wie in einer früheren Studie mit Beteiligung von Perlman (Klahn und Perlman 1999) kommen die Autoren zu der Erkenntnis, dass einem Schluckvorgang immer eine Expiration folgte. In ihrem Fazit erwähnen Perlman et al., man dürfe bei der zervikalen Auskultation nicht annehmen, den Bolustransit durch den Pharynx hören zu können. Leider bleiben sie dem Leser aber einen Grund für diese Feststellung und eine alternative Lesart des

Geräusches schuldig. Ihrer eigenen Zeittafel lässt sich entnehmen, dass sich der Bolus zum Zeitpunkt des Geräuschbeginns meist im Pharynxbereich befindet. Ungeklärt bleibt auch, wie bei Perlman et al. die Daten der Videofluoroskopie überhaupt mit dem Tonsignal synchronisiert wurden.

Cichero und Murdoch, die 1998 die Entstehungshypothese der Schluckgeräusche in Analogie zu der Herztonentstehung aufgestellt hatten, veröffentlichten 2002 eine weitere Studie über die günstigste Art der Schalldetektion zur Aufzeichnung pharyngealer Schluckgeräusche (Cichero und Murdoch 2002). Die Studie von Cichero und Murdoch widmet sich im Wesentlichen einer ausführlichen Kritik an der letzten Studie mit dem gleichen Thema von Takahashi et al. (Takahashi et al. 1994). Am Ende resümieren sie, dass zwar der von Takahashi et al. vorgeschlagene Ort der Tonaufzeichnung gut geeignet, aber ein Kontaktmikrofon einem Schwingungssensor vorzuziehen sei. In einer weiteren Studie, ebenfalls aus 2002, nehmen Cichero und Murdoch abermals das Schlucksignal von gesunden Probanden unter die Lupe (Cichero und Murdoch 2002). Bei ihrer Untersuchung mit verschiedenen Bolusgrößen an einer großen Kontrollgruppe aus drei Altersklassen stellen sie eine durchschnittliche Schluckdauer von 400ms und eine durchschnittliche Frequenz von 550,96 Hz fest. Cichero und Murdoch konnten eine teilweise statistisch signifikante Korrelation von Alter und Schluckdauer feststellen. Ein höheres Alter brachte in ihrer Studie ein verlängertes Schluckgeräusch mit sich. Der Effekt der Bolusgröße auf das Schluckgeräusch ist in den Ergebnissen von Cichero und Murdoch der Aussage von Boiron et al. (Boiron et al. 1997) diametral entgegengesetzt: Während Boiron et al. eine klare Zunahme der Geräuschkdauer mit zunehmender Bolusgröße beobachten konnten, stellten Cichero und Murdoch eine Abnahme der Geräuschkdauer fest.

Die erste veröffentlichte Studie, die als Konsequenz der wachsenden Verfügbarkeit von Daten über das normale Schluckgeräusch versucht, anhand der akustischen Signatur das Vorliegen einer Dysphagie zu erkennen, erschien Ende 2004 von Lazareck und Moussavi (Lazareck und Moussavi 2004). In einer umfassenden Untersuchung aller Dimensionen der akustischen Schlucksignatur verglichen sie eine gesunde Kontrollgruppe mit juvenilen Patienten, die an einer Beeinträchtigung der Schluckfunktion ohne Aspiration litten. In Abhängigkeit von der Bolusart waren sie in der Lage, signifikante Unterschiede zwischen den Schluckgeräuschen gesunder und schluckgestörter Probanden in Frequenz, Amplitude und Dauer festzustellen. Eine mehrschrittige

Diskriminantenanalyse führte in der Studie von Lazareck und Moussavi letztlich zu einer korrekten Klassifizierung von 94% aller Probanden.

2005 erschien in der Zeitschrift „Der Nervenarzt“ ein Artikel von Kley und Biniek, der sich ebenfalls der Unterscheidung von schluckgesunden und schluckgestörten Probanden widmet (Kley und Biniek 2005). In ihrer Studie verwendeten Kley und Biniek ein an der lateralen Trachea befestigtes Mikrofon sowie Bilddaten aus Videoendoskopien und Kinematographien (Videofluoroskopien). Die Auswertung stützt sich auf die klassische Nomenklatur von Mackowiak et al., was einen Vergleich zu anderer Literatur erleichtert. Aus der Betrachtung ihrer Daten konnten die Autoren das Beta-Signal nach Mackowiak et al. weiter in ein Beta- und ein Gamma-Signal unterscheiden. Kley und Biniek kommen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass sich schluckgesunde und schluckgestörte Probanden im Schluckgeräusch erheblich voneinander unterscheiden. Sie konnten sowohl eine Verlängerung als auch eine Verkürzung der Schluckdauer beim Schluckgestörten feststellen, ebenso eine Aufhebung der normalen Schlucksignatur. Aus den kinematographischen Beobachtungen folgern Kley und Biniek, dass das abschließende kurze Schlucksignal (Delta) durch die Rückkehr der Epiglottis in vertikale Ausrichtung entsteht, womit der Schluckvorgang abgeschlossen ist.

Zuletzt erschien eine Studie von Morinière et al., die die Schluckgeräusche von 20 gesunden Männern mit denen 10 gesunder Frauen verglich (Moriniere et al. 2006). Ziel war, geschlechtsspezifische Unterschiede im Schlucksignal zu definieren. Den Autoren gelang es, in dem meisten Fällen eine Abfolge von drei verschiedenen Komponenten des Schluckgeräusches darzustellen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Signalen wurde nicht gefunden.

1.3 – Zusammenfassung und Zielsetzung

Es wurde in der Einleitung gezeigt, dass die Dysphagie und ihre Diagnostik klinisch hoch relevante Themen sind. Bis heute sind die exakten Ursachen und Folgen und die optimale Diagnostik und Therapie ein Thema intensiver und durchaus kontroverser Diskussion. Mit der Videofluoroskopie und der fiberoptischen Videoendoskopie stehen zwei effektive und sichere Methoden zur Diagnostik einer Dysphagie zur Verfügung. Allerdings sind diese Methoden aufwendig und erfordern eine gute Mitarbeit des Patienten. Die Videofluoroskopie ist obendrein

kostspielig, oft nicht vor Ort verfügbar und verursacht eine Strahlenbelastung. Dafür ist die fiberoptische Videoendoskopie die invasivere Untersuchung.

Insbesondere für Patienten mit einem hohen Risiko für das Vorliegen einer Dysphagie wäre ein nicht invasives, schnelles und zuverlässiges Screeningverfahren äußerst nützlich. Es könnte den Arzt bei seiner Überlegung, welcher Patient den etablierten Diagnoseverfahren der Videofluoroskopie oder Videoendoskopie zugeführt werden muss und welcher nicht, wichtige Hilfestellung geben. Ein solches Verfahren könnte außerdem bei der Verlaufskontrolle von Schluckstörungen mit Selbstheilungs- oder Verschlimmerungstendenz oder zur Erfolgskontrolle therapeutischer Maßnahmen verwendet werden. Patienten mit einer zerebralen Ischämie oder Massenblutung fallen gut in diese Kategorien, da nach Schlaganfall häufig eine akute Dysphagie entsteht, die sich dann meist innerhalb der ersten zwei Monate deutlich zurückbildet oder verschwindet.

Sowohl die zervikale Auskultation als auch neurologische Scoringsysteme konnten zwar gewisse Erfolge als Screeningverfahren erzielen, erreichen aber selten eine zufrieden stellende Sensitivität und Spezifität und sind stark von der individuellen Fertigkeit des Untersuchers abhängig. Es gibt inzwischen eine recht breite Datenlage zu der Physiologie des Schluckvorgangs und auch zu der Entstehung von Schluckgeräuschen. Diverse Autoren haben das gesunde, „normale“ Schlucksignal auf unterschiedliche Art und Weise analysiert und beschrieben. Von einem wissenschaftlichen Konsens über die optimale Art der Datenermittlung und –auswertung kann dennoch keineswegs die Rede sein.

Gerade im Hinblick auf die mitunter beachtlichen Erfolge der zervikalen Auskultation scheint es trotz der weiter bestehenden Kontroverse über das gesunde Schluckgeräusch nach knapp 40 Jahren vielseitiger Analyse und Diskussion gerechtfertigt, den nächsten Schritt zu gehen und nach möglichen Unterschieden im Schluckgeräusch zwischen Dysphagiekranken und Gesunden zu suchen.

Zielsetzung dieser experimentellen Studie ist es also, nach objektiv messbaren Unterschieden im Schluckgeräusch zwischen gesunden Probanden und solchen mit einer pharyngealen Dysphagie zu suchen, diese Unterschiede – so sie gefunden werden – zu

quantifizieren und mit den Ergebnissen eine neue Methode der Schluckdiagnostik vorzuschlagen.

Da unterschiedliche Ursachen einer Dysphagie auch unterschiedliche Auswirkungen auf das Schluckgeräusch haben könnten, wurde eine einzelne Patientengruppe mit höchstmöglicher klinischer Relevanz für diese Studie ausgewählt: Patienten mit akuter Dysphagie infolge eines Schlaganfalls. Der Schlaganfall ist eine der häufigsten Ursachen für eine akute pharyngeale Dysphagie mit Aspirationsgefahr. Umgekehrt hat die Dysphagie eine sehr hohe Inzidenz bei Patienten mit einem frischen Schlaganfall.

Um der laufenden wissenschaftlichen Diskussion über das normale Schluckgeräusch Rechnung zu tragen, sollen die Ergebnisse der vorgeschlagenen Methode zudem mit einer etablierten Methode, der fiberoptischen Videoendoskopie, verglichen und so validiert werden. Da für die zeitliche Ausdehnung des gesunden Schluckgeräusches in den Vorarbeiten der breiteste Konsens besteht und es die am einfachsten reproduzierbar zu bestimmende Komponente eines Geräusches ist, soll der Vermessung der Dauer der Geräuschanteile in dieser Arbeit die größte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Insgesamt soll die Methode eng an den Stand der Forschung angelehnt und zugleich möglichst einfach in der Anwendung und Auswertung sein.

Ergänzend wurden die gewonnenen Daten im Hinblick auf neuere Studienergebnisse, die der Frequenzkomponente eine herausragende Bedeutung in der Klassifizierung des Schluckgeräusches zuordneten, retrospektiv einer umfassenden spektrometrischen Untersuchung unterzogen.

2 – Menschen, Material und Methoden

2.1 – Versuchsgruppen

Es wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren Patienten mit klinischem Verdacht auf eine Dysphagie endoskopisch auf Schluckstörungen untersucht. Während dieser Untersuchung wurden neben den Bilddaten gleichzeitig entsprechend dem Versuchsaufbau (s. u.) Tonsignale aufgezeichnet. Im Anschluss an die Untersuchung wurde das gewonnene Bildmaterial von erfahrenen Neurologen und Logopäden bewertet und eine Diagnose gestellt.

2.1.1 – Gruppe 1: Bestätigte Dysphagie

Aus dem oben geschilderten Gesamtkollektiv wurden alle Patienten in diese Gruppe aufgenommen, die die folgenden Kriterien erfüllten:

- Der Patient war ausreichend wach und orientiert, um den Sinn der Studie und die Art der Untersuchung zu erfassen und seine Einwilligung zu geben.
- In der endoskopischen oder videofluoroskopischen Schluckuntersuchung kam es zu einer Boluspenetration in den Larynxeingang oder zu einer Aspiration.
- Der klinische Verdacht einer Schluckstörung war akut nach einem zerebralen ischämischen Insult oder einer Hirnmassenblutung aufgetreten, und vor diesem Ereignis bestanden keine Schluckbeschwerden.
- Außer dem Schlaganfall-Ereignis gab es keine bekannten Vorerkrankungen, Grunderkrankungen, Operationen oder Arzneimitteleinflüsse, von denen ein Einfluss auf den Schluckakt zu erwarten wäre.
- Der Patient war grundsätzlich in der Lage, einen Wasserbolus zu schlucken.
- Es war mindestens ein Schluckgeräusch von einem Wasserbolus störungsarm, also ohne untersuchungsfremde Hintergrundgeräusche wie Stimmen, Tippen auf Tastaturen, Türaktivitäten etc. aufgezeichnet worden.

Insgesamt konnten so 24 Personen (12 weiblich, 12 männlich) für diese Gruppe rekrutiert werden, das Durchschnittsalter betrug 70,5 Jahre.

2.1.2 – Gruppe 2: Unbestätigte Verdachtsfälle

Diese Gruppe ergab sich aus den unbestätigten Verdachtsfällen des Gesamtkollektivs. Es galten die genau gleichen Einschlussbedingungen wie bei Gruppe 1, nur dass es hier endoskopisch keinen Hinweis auf eine klinisch bedeutsame Schluckstörung gab. Am Ende maß diese Gruppe 18 Personen, davon 6 weiblich und 12 männlich, das Durchschnittsalter lag bei 67,7 Jahren.

2.1.3 – Gruppe 3: Kontrollgruppe

Da auch bei Gruppe 2 immerhin der klinische Verdacht auf das Vorliegen einer Dysphagie bestanden hatte und es sich ebenfalls um Patienten nach Schlaganfall handelte, bei denen eine Beeinträchtigung des Schlucksaktes nahe liegt, wurde zusätzlich eine schluckgesunde Kontrollgruppe rekrutiert. Um eine ähnliche Altersstreuung zu erzielen, wurden hierfür Patienten der gerontopsychiatrischen Abteilung um ihre Mitarbeit gebeten. Die Einschlusskriterien waren hier wie folgt definiert:

- Der Patient war ausreichend wach und orientiert, um den Sinn der Studie und die Art der Untersuchung zu erfassen und seine Einwilligung zu geben
- Es gab keine bekannten Vorerkrankungen, Grunderkrankungen, Operationen oder Arzneimitteleinflüsse, von denen ein Einfluss auf die Schluckfähigkeit des Patienten zu erwarten wäre
- Der Patient war grundsätzlich in der Lage, einen Wasserbolus zu schlucken
- Es war mindestens ein Schluckgeräusch von einem Wasserbolus störungsarm, also ohne untersuchungsfremde Hintergrundgeräusche wie Stimmen, Tippen auf Tastaturen, Türaktivitäten etc. aufgezeichnet worden

Insgesamt 24 Patienten (13 weiblich, 11 männlich) konnten für die Kontrollgruppe gewonnen werden, das Durchschnittsalter war 67,5 Jahre.

2.2 – Versuchsaufbau

2.2.1 - Signalmessung

Zur Messung der akustischen Signale wurde das Kontaktmikrofon X-18 der Firma Albrecht Electronic (Lütjensee, Deutschland) verwendet, welches sich mit einem Nackenbügel am Hals festklemmen lässt. Es wurde rechts und unterhalb des Schildknorpels angebracht, da eine frühere

Studie (Takahashi et al. 1994) die besten Ergebnisse für diese Lokation ermittelt hatte. Über ein Kabel wurden die Signale an einen gewöhnlichen Kassettenrekorder vom Typ 686D der Firma Technics (Hamburg, Deutschland) weitergeleitet. Dieser diente alleine der Signalverstärkung, bevor das Signal letztlich in den Soundkarteneingang eines handelsüblichen PCs geführt wurde. Hier wurden die Tondaten (bei den Gruppen 1 und 2 im Kontext mit den Bilddaten) in CD-Qualität (44100 Hz, 16 bit, stereo) aufgezeichnet und standen dann zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung. Für die eventuelle Endoskopie wurde das flexible fiberoptische Bronchoskop BF-P30 (Firma Olympus, 4,9mm Außendurchmesser) verwendet. Videoaufnahmen wurden als Motion JPEG (eine bewegte Abfolge hochkomprimierter Einzelbilder) mit einer Auflösung von 768x576 Pixeln bei 25 Bildern pro Sekunde (also alle 40ms ein Bild) gespeichert. Vor der Aufnahme wurde unter Sicht des Endoskops mit einem Stift auf das Mikrophon getippt. Dadurch konnten Bild- und Tonsignale nachträglich synchronisiert werden. Probedurchläufe mit Musterung des auf dem PC gespeicherten Signals sollten zur Eichung der Signalpegel auf 90% erfolgen.

2.2.2 – Durchführung

Jeder Proband erhielt einen 5 ml Bolus Wasser auf einem Esslöffel zum Schlucken. Um eine Vorauswahl eines der Erwartungshaltung entsprechenden Signals durch den Untersucher zu verhindern, wurden maximal drei Signale aufgezeichnet. Das aufgezeichnete Signal war während der Untersuchung durch den Untersucher nicht sichtbar. Kam es zu einer deutlichen Bolusaspiration, wurden keine weiteren Schluckversuche vorgenommen.

Bei den Gruppen der Dysphagiekranken und der Verdachtsfälle wurde zusätzlich eine Videoendoskopie durchgeführt. Nach einer Oberflächenanästhesie mit Xylocain-Gel wurde das Bronchoskop durch einen der unteren Nasengänge eingeführt und bis zur Herstellung einer guten Sicht auf die Stimmritze vorgeschoben. In die Bewertung der Schluckfähigkeit wurden Stellung, Anatomie und Beweglichkeit von Velum, Zungenbasis, Epiglottis, Kehlkopf, Stimmbändern und Glottis beobachtet und dokumentiert. Valleculae und Sinus piriformes wurden auf Speisereste untersucht. Bei dem eigentlichen Schluckakt richtete sich das Augenmerk auf ein prädeglutives Übertreten von Bolusanteilen und Aspirationszeichen.

Alle Signale wurden während der gesamten Untersuchung fortlaufend aufgezeichnet.

2.2.2 – Signalverarbeitung

Zur detaillierten Signalanalyse wurden mit der Software VirtualDub 1.6.3 (build 22945), welches unter öffentlicher Lizenz von Avery Lee (USA) erhältlich ist, zunächst die AVI-Containerdateien aus der Aufnahmesoftware (bestehend aus Bild und Ton) auf verwendbare Signale durchsucht, welche dann herausgeschnitten und der Übersicht halber getrennt gespeichert wurden. Hierbei wurden alle Signale verwendet, bei denen ein Wasserbolus geschluckt wurde und keine versuchsfremden Störgeräusche auftraten. Um eine Weiterverwertung der Daten mit Audio-Analyseprogrammen zu ermöglichen, wurden diese einzelnen Schluckdateien nun mit der gleichen Software aufgetrennt in eine Videodatei und eine Tondatei. Die Auftrennung erfolgte digital, das Timing oder die Signalqualität wurden hierbei nicht verändert. Voruntersuchungen (Hamlet et al. 1990; Hamlet et al. 1994) hatten gezeigt, dass die meisten Geräuschanteile des Schluckgeräusches unterhalb von 2000 Hz liegen. Auch im Hinblick auf eine zervikale Auskultation wurde dort gezeigt, dass Stethoskope jenseits von 2000 Hz Geräusche nur eingeschränkt an das Ohr des Untersuchers weitergeben. Um Rauschen und andere Störungen gering zu halten, wurde daher mit Hilfe der Tonsoftware Goldwave 5.04 (aus dem Hause Goldwave Inc., St. John's, Kanada) ein Bandpassfilter von 100-2400 Hz auf alle Signale angewendet. Dieser Filter eliminiert alle Frequenzanteile, die nicht innerhalb des beschriebenen Bandes liegen, aus dem Signal.

2.3 – Analyse

Die gewonnenen und aufbereiteten Signale wurden in drei Durchgängen ausgewertet. Der erste Durchgang entspricht der zu untersuchenden Methode, bei der ein einzelner Untersucher ohne Kenntnis von Patient oder Untersuchungsgruppe ein Schluckgeräusch analysiert und gemäß der erweiterten Nomenklatur nach Kley und Biniek (Kley und Biniek 2005) in ein Alpha-, Beta-, Gamma- und Deltageräusch aufteilt. Ein zweiter Durchgang zur Validierung der ersten Messwerte folgte nach, bei dem die Videoaufnahmen zur Einteilung der Schluckphasen hinzugenommen wurden, um zu sehen, wie weit die rein akustische Wahrnehmung mit den sichtbaren Abläufen korreliert.

Im Laufe dieser Forschungsarbeit erschien im Dezember 2004 eine Arbeit Lazareck und Moussavi, die mit einem ähnlichen Versuchsaufbau bei Kindern mit Dysphagie ohne Aspiration in Folge zerebraler Tumore ausgezeichnete Ergebnisse erzielt hatte. Dabei waren neben der Länge der verschiedenen Schluckphasen auch andere Toneigenschaften wie z.B. die Lautstärke

und die Frequenzmuster in die Auswertung eingeschlossen worden. Daher wurde mit den bestehenden Daten eine dritte Auswertung vorgenommen.

2.3.1 – Die Akustische Analyse

Entsprechend den Beobachtung von Mackowiak, Brenman et al. (1967) und danach Kley und Biniek (Kley und Biniek 2005) wurden die aufbereiteten Audiodateien mit Hilfe der Goldwave-Audiosoftware (s. o.) betrachtet und analysiert. Dem Untersucher blieb dabei verborgen, von welchem Patienten oder auch von welcher Untersuchungsgruppe die Datei stammte. Nach der klassischen Einteilung von Mackowiak et al. beginnt das Schlucksignal mit einem etwa 50ms langem Einleitungssignal (Alpha). Diesem folgt eine Pause von 100-150ms ($\alpha\beta$ -Intervall), woraufhin sich der lauteste Geräuschanteil (Beta), mit einer Dauer von 150-200ms, anschließt. Nach einer abermals 300-400ms langen Pause ($\beta\delta$ -Intervall) schließt ein drittes, schwaches Signal (Delta) den Schluckvorgang ab. Kley und Biniek unterteilten den Beta-Komplex weiter in einen Beta- und einen Gamma-Komplex. Zur Prüfung der Hypothese, dass Störungen des Schluckablaufes denselbigen verlangsamen würden, wurde in den Audiodateien nach diesem bestimmten Muster gefahndet. Dabei galt das Hauptaugenmerk dem prominenten Betakomplex, von wo aus dann in den zeitlich umliegenden Geräuschereignissen nach einem Alpha- bzw. Deltakomplex gesucht wurde.

Es wurde dann die Länge der einzelnen Komponenten und der dazwischen liegenden Intervalle bestimmt und in einer eigens entwickelten Microsoft Access 2003-Datenbank gespeichert. Während der Betakomplex sich mit großer Zuverlässigkeit wegen seiner langen Dauer und hohen Amplitude erkennen lässt, war dies bei Alpha und Delta nicht immer der Fall. Wo diese nicht klar abgrenzbar waren, wurde ein Vermerk gemacht und die entsprechenden Fälle in der späteren Statistik nicht berücksichtigt.

Aus früheren Studien und der eigenen Beobachtung gilt es als wahrscheinlich, dass das Alphageräusch durch eine Hebung des Kehlkopfes oder den Boluseintritt in den Oropharynx verursacht wird, während das Deltageräusch vermutlich beim Zurückspringen der Epiglottis in vertikale Position entsteht. Entsprechend dieser Beobachtung wurden zur Veranschaulichung der Ergebnisse die Dauer von Alpha und $\alpha\beta$ -Intervall gemeinsam als Vorbereitungsphase, die Dauer

von Beta und Gamma als Transitphase und die Dauer von $\gamma\delta$ -Intervall und Delta als Repositionsphase bezeichnet.

Bei Geräuschen, bei denen alle drei Komponenten ermittelt werden konnten, wurde dann letztlich eine Summe gebildet und als Gesamtdauer gespeichert.

2.3.2 – Die Videounterstützte Analyse

Während viele Schluckgeräusche das oben genannte Muster leicht erkennen lassen, gibt es Fälle, bei denen eine klare Unterscheidung von Alpha- oder Deltakomplex wegen diversen Nebengeräuschen wie z.B. reißenden Speichelfäden, Grimassieren des Patienten oder gurgelnde Abgangsgeräusche des Bolus aus dem Ösophagus allein aus der Tonaufnahme recht diffizil ist. Andererseits wäre denkbar, dass bei einem sehr stark verlangsamten Schluckvorgang ein akustisch sehr früh entstehendes Alpha oder sehr spätes Delta von dem Untersucher gar nicht mehr zu dem Schluckvorgang gezählt wird, da es ihm zeitlich zu weit entfernt erscheint. Um also die Validität der unter 2.3.1 gemachten Beobachtungen zu überprüfen, wurde ein zweiter Untersuchungsgang mit den gleichen Daten, diesmal in Zusammenschau mit den Bilddaten aus der Endoskopie gemacht. Dabei wurde im Film nach bestimmten Ereignissen gefahndet, aus denen sich Rückschlüsse auf die Phase des Schluckvorgangs ziehen lassen.

Der Beginn der Vorbereitungsphase wurde hier als Beginn der Larynxelation definiert, die Transitphase mit Beginn des Epiglottis- und Velumschlusses und das Ende der Reposition mit der Rückkehr der Epiglottis in die Ausgangsposition. Da die Videoaufzeichnung technisch bedingt nur auf 40ms genau ist und sich das Ende der Transitphase im Videobild nicht erkennen lässt, wurde parallel nach akustischen Korrelaten der Beobachtungen in der entsprechenden Tondatei gefahndet. Entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse wurde dann wie unter 2.3.1 die Dauer von Vorbereitungsphase, Transitphase und Repositionsphase in der Datenbank notiert, welche schließlich noch zur Gesamtdauer zusammenaddiert wurden.

2.3.3 – Frequenz- und Lautstärkeanalyse

Interessanten neuen Erkenntnissen in der akustischen Diagnostik der Dysphagie (Lazarek und Moussavi 2004) folgend wurde ein dritter Auswertungsdurchgang vorgenommen. Bei diesem Durchgang wurden mit der speziellen Analysesoftware SigView 1.95 von Goran Obradovic

(Firma SignalLab) zahlreiche zusätzliche Messwerte aus der Transitphase erhoben, um sich ein Bild über Frequenzgang und Signalpegel machen zu können.

Zunächst wurden die gesamte Signalpegel der Transitphase mittels einer Time-FFT-Analyse (FFT=Fast Fourier Transformation) über die Zeit gemittelt. Bei dieser Methode werden 8192 Momentaufnahmen des Geräusches pro Sekunde gefertigt, von welchen dann ein Lautstärkewert P (Power) bestimmt, fortlaufend zusammenaddiert und letztlich durch die Zahl der Messungen geteilt wird. Das Ergebnis ist ein guter Schätzwert des durchschnittlichen Schalldruckpegels des Signals.

Anschließend wurde das Signal in einzelne Frequenzbereiche gefenstert und für jeden Frequenzbereich das Verfahren wiederholt. Als Ergebnis erhält man die durchschnittlichen Signalpegel innerhalb des gegebenen Frequenzbandes. Wegen der engen Beziehung des Schalldruckpegels einzelner Signalanteile und des Schalldruckpegels des Gesamtsignals wurden die Bereichspegel dann durch die Gesamtpegel geteilt, woraus sich die relative Signalstärke für einen Frequenzbereich ergibt. Insgesamt zehn solcher Fenster wurden betrachtet: 101-200 Hz, 201-300 Hz, 301-400 Hz, 401-500 Hz, 501-600 Hz, 601-900 Hz, 901-1200 Hz, 1201-1500 Hz, 1501-1800 Hz und 1801-2100 Hz.

Frequenzbanden über einen langen Zeitraum zusammen zu addieren, führt leicht zu einer Dominanz von Rauschkomponenten (s. 1.2.6.1). Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein repräsentativer Teilbereich von etwa 5 ms in der Transitphase aufgesucht und im Spektogramm (einer zweidimensionalen graphischen Darstellung der Frequenzkomponenten des gewählten Bereiches) die beiden intensivsten Einzelfrequenzen notiert. Um den Ort dieser Messung ansatzweise zu normieren, wurde rechts (also zeitlich hinten) beginnend der erste Bereich mit einer auf das Gesamtsignal bezogenen maximalen Amplitude ausgewählt.

2.4 – Auswertung

Um Inkonsistenzen in der Zusammenstellung der Vergleichsgruppen erkennbar zu machen, wurden zunächst deskriptive Statistiken über den Gruppenaufbau respektive Alter und Geschlecht angefertigt.

Bei jeder numerischen Variable wurde zunächst eine deskriptive Statistik erstellt, um einen ersten Überblick über die Messdaten zu erhalten: Mittelwert, 95% Konfidenzintervall des Mittelwerts, 5% getrimmtes Mittel, Median, Varianz, Standardabweichung, Standardfehler, Minimum, Maximum und Spannweite. Der Anschauung halber wurden dann gruppenweise ein Histogramm mit Normalkurve und ein so genannter Box-and-Whiskers Plot angefertigt. Letzterer zeigt den Median als Querlinie in einer Box, die Box umreißt die 25. bis 75. Perzentile und die dünnen Linien (Schnurrhaare, „Whiskers“) zeigen den gesamten Wertebereich an. Ausreißer und Extremwerte wurden einzeln notiert.

Den Kern der Auswertungen bildet die ANOVA (=analysis of variance). Sie bietet ausgezeichnete Möglichkeiten, den Effekt einer unabhängigen Variable (in diesem Fall: Gruppenzugehörigkeit) auf eine abhängige Variable (z.B. Schluckdauer) zu beschreiben. Im Gegensatz zum t-Test erlaubt sie den Vergleich von beliebig vielen Gruppen gleichzeitig und ist weniger empfindlich gegen Abweichungen von der Normalverteilung. Dennoch ist die ANOVA ein parametrischer Test und geht von einer Normalverteilung und einer Homogenität der Varianz zwischen den Gruppen aus. Werden diese Kriterien nicht erfüllt, neigt sie zu einem Typ 1-Fehler (sie sieht einen Unterschied, wo keiner ist).

Daher wurde vor jeder ANOVA-Statistik gruppenweise eine Analyse der Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov (K-S Test) mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors durchgeführt. Dieser Test prüft die Nullhypothese, dass die gelieferten Daten normalverteilt sind. Eine Signifikanz $p \leq 0,05$ führt zur Ablehnung der Nullhypothese. Die Homogenität der Varianzen, die zweite Voraussetzung für die ANOVA, lässt sich mit der Levene-Statistik voraussagen. Auch diese arbeitet mit der Nullhypothese, dass die Varianzen im Datensatz homogen sind, wiederum führt ein $p \leq 0,05$ zur Ablehnung der Hypothese.

Da die ANOVA als relativ robust gegen Abweichungen von den Anforderungen gilt, wurde sie trotzdem bei allen entsprechenden Fragestellungen angewendet. Lediglich wenn eine Signifikanz bei nicht normalverteilten, nicht homogenen Datensätzen gefunden wurde, ist das Testschema um einen U-Test nach Mann-Whitney erweitert worden, ein nichtparametrischer, konservativer Test, der zur Aufdeckung eines Typ 1-Fehlers gut geeignet scheint.

2.4.1 – Auswertung der Akustischen Analyse

Die akustische Analyse umfasst vier Messdaten: Die Dauer der Vorbereitungsphase, Transitphase, Repositionsphase und die Gesamtdauer, im Folgenden auch als $t(\text{Vorbereitung})$, $t(\text{Transit})$, $t(\text{Reposition})$ und $t(\text{Gesamt})$ bezeichnet. Alle vier beschreiben ein Zeitintervall in Millisekunden. Das oben beschriebene Schema wurde für alle drei Gruppen genau befolgt. Konnten einzelne der vier Werte nicht ermittelt werden, wurden diese Fälle aus der Statistik ausgeschlossen.

2.4.2 – Auswertung der Videounterstützten Analyse

Ebenso wie die akustische Analyse wurde auch hier die Zeitdauer für Vorbereitungs-, Transit- und Repositionsphase sowie die Gesamtdauer des Schluckvorgangs ermittelt. Dank der Videobilder ließen sich die Phasen hier stets sicher unterscheiden, weswegen keine Fälle ausgeschlossen werden mussten.

Anschließend wurde nach Korrelationen mit den äquivalenten Variablen der akustischen Analyse gefahndet. Hierfür wurde zum einen der Korrelationswert nach Pearson berechnet, womit sich der Grad der Korrelation zweier normalverteilter Datensätze erkennen lässt, zum anderen der Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho, der bei nicht normalverteilten Daten gute Ergebnisse liefert. Zur Feststellung der Normalverteilung wurde wiederum der K-S-Test herangezogen.

2.4.3 – Auswertung der Frequenz- und Lautstärkeanalyse

Hier wurden insgesamt 13 Messwerte aus der Transitphase erfasst: Die durchschnittliche Lautstärke P_{AVG} (in Diagrammen auch als „Power (Transit)“, die beiden Maximalfrequenzen F_{PEAK1} und F_{PEAK2} , sowie die 10 relativen Pegelwerte aller Signale innerhalb der unterschiedlichen Frequenzbanden: $P_{\text{AVG}}(F_{101-200})$, $P_{\text{AVG}}(F_{201-300})$, $P_{\text{AVG}}(F_{301-400})$, $P_{\text{AVG}}(F_{401-500})$, $P_{\text{AVG}}(F_{501-600})$, $P_{\text{AVG}}(F_{601-900})$, $P_{\text{AVG}}(F_{901-1200})$, $P_{\text{AVG}}(F_{1201-1500})$, $P_{\text{AVG}}(F_{1501-1800})$ sowie $P_{\text{AVG}}(F_{1801-2100})$.

Alle erhaltenen Werte wurden nach dem definierten Auswertungsschema bearbeitet, aber eine vollständige Abbildung der Ergebnisse in dieser Arbeit scheint wegen der eingeschränkten Aussagefähigkeit in Folge der Versuchsbedingungen (s. 1.3) nicht zu rechtfertigen. Daher wird in diesem Teil auf die Darstellung der Histogramme und der einzelnen Rechenschritte verzichtet. Die Kernergebnisse werden in Tabellen und kurzen Textabschnitten zusammengefasst.

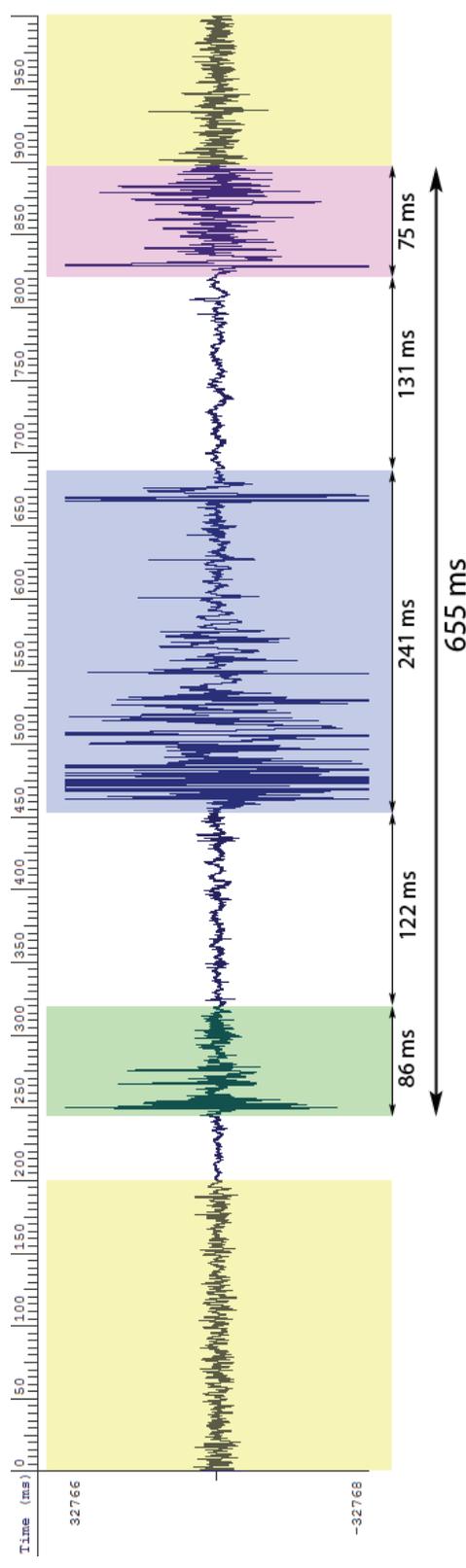


Abbildung 2.1: Normales Schlucksignal als Waveform (Auftragung Zeit gegen Pegel). Die Atmung (**gelb**) wird während des Schluckvorgangs ausgesetzt. Nach dem α -Geräusch (**grün**) folgt eine kurze Pause, gefolgt von dem Transitgeräusch (**blau**). Gut abzugrenzen sind hier die beiden Geräuschkomponenten der Transitphase, β und γ .

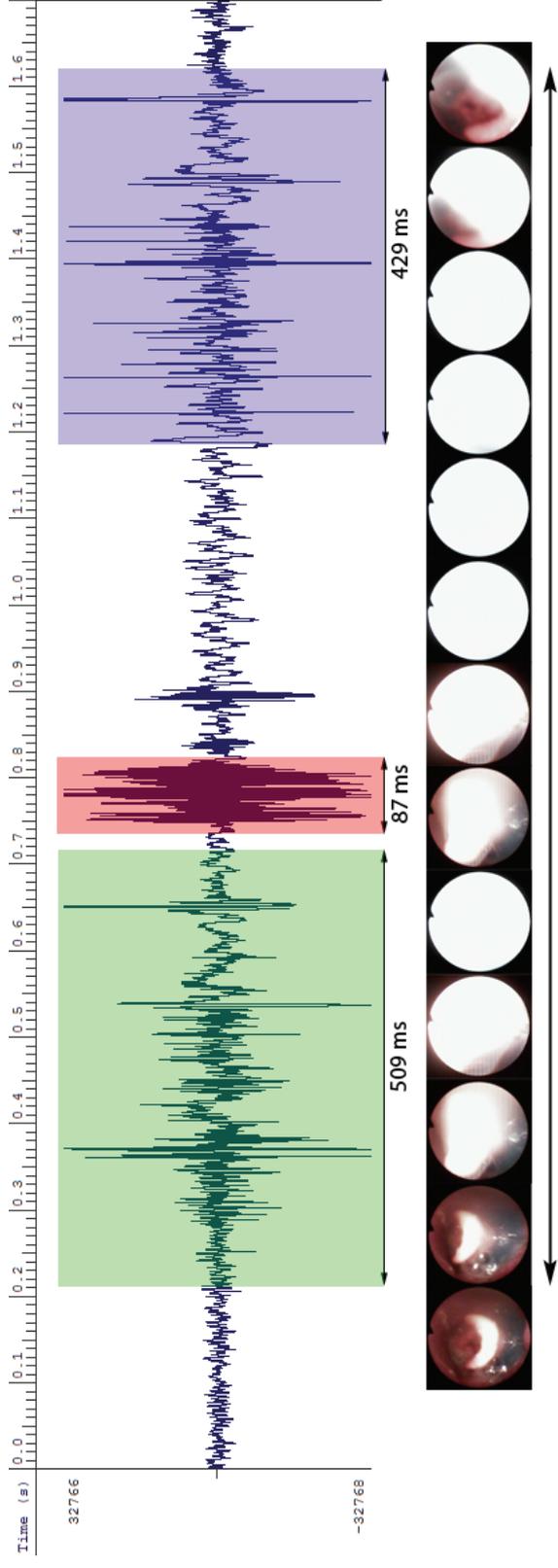


Abbildung 2.2: Pathologisches Schlucksignal als Waveform, darunter Standbilder der Videoendoskopie (ein Slide = 120 ms). Es treten zwei deformierte Geräuschkomplexe auf (**grün** und **blau**), eine Vorbereitungsphase ist nicht erkennbar. Während des Schluckvorgangs kommt es zu einem pfeifenden Geräusch (**rot**), vereinbar mit einer kurzfristigen intradeglutiven Öffnung der Stimmritze.

3 – Ergebnisse

3.1 – Gruppenanalyse

In diesem Teil wird die Alters- und Geschlechterverteilung innerhalb der Gruppen untersucht, um Fehler durch strukturelle Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen auszuschließen.

Tabelle 3.1.1: Deskriptive Statistik der Gruppenzusammensetzung nach Alter in Jahren

Gruppe	Geschlecht	N	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standard- abweichung	Varianz
Dysphagie	männlich	12	71,12	70,9	44,1	88,3	11,782	138,82
	weiblich	12	69,89	76,2	38,6	90,3	16,186	262,00
	Insgesamt	24	70,50	74,1	38,6	90,3	13,859	192,09
Verdachtsfall	männlich	12	65,80	68,6	45,0	82,3	10,127	102,55
	weiblich	6	71,30	70,1	48,6	88,3	14,550	211,69
	Insgesamt	18	67,63	68,6	45,0	88,3	11,651	135,74
Kontrollgruppe	männlich	11	68,35	67,3	49,7	84,8	11,831	139,98
	weiblich	13	66,82	69,8	44,6	94,0	13,402	179,62
	Insgesamt	24	67,53	68,6	44,6	94,0	12,457	155,18
Insgesamt	männlich	35	68,43	68,8	44,1	88,3	11,147	124,25
	weiblich	31	68,88	70,2	38,6	94,0	14,374	206,61
	Insgesamt	66	68,64	69,6	38,6	94,0	12,665	160,40

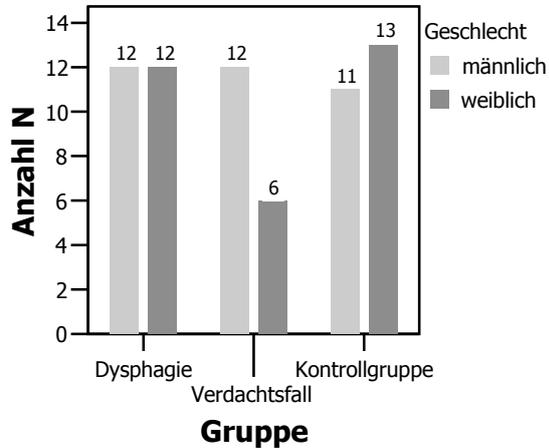


Abb. 3.1.1.1: Balkendiagramm
Teilnehmerzahl nach Gruppe und Geschlecht

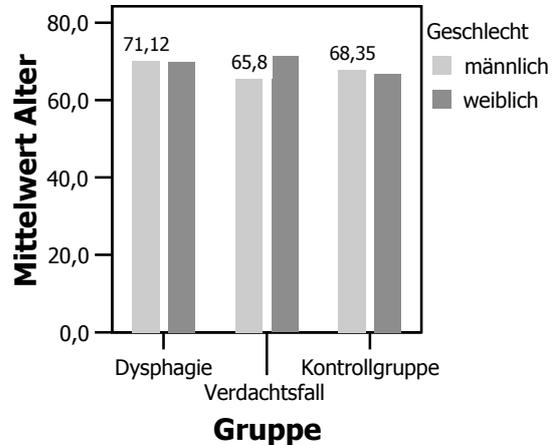


Abb. 3.1.1.2: Balkendiagramm
Durchschnittsalter nach Gruppe und Geschlecht

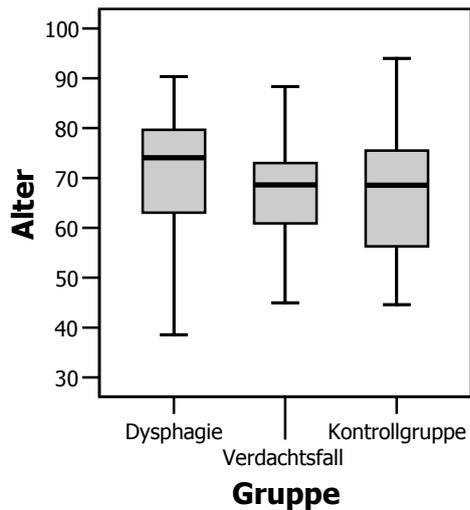


Abb. 3.1.1.3: Box-and-Whiskers Plot der Altersverteilung nach Gruppe

Wie sich an der Tabelle und den Diagrammen erkennen lässt, lassen sich die Gruppen also insgesamt als recht homogen bezeichnen. Die größte Spanne des Mittelwertes liegt mit 5,5 Jahren zwischen den männlichen und weiblichen Teilnehmer der Verdachtsgruppe. Zwischen den Gruppen insgesamt beträgt der Unterschied des Mittelwertes maximal 3 Jahre. Auch bei Minimum, Maximum und Standardabweichung sind keine klaren Ausreißer zu erkennen. Da sich die Gruppen strukturell hinreichend ähneln, kann auf eine Suche nach Einflüssen dieser Strukturparameter auf die Untersuchungsergebnisse verzichtet werden.

3.2 – Ergebnisse der akustischen Analyse

Wie im Versuchsaufbau beschrieben, wurden Schluckgeräusche der verschiedenen Gruppen aufgezeichnet und anschließend analysiert. Anhand der zuvor definierten Kriterien wurde eine Einteilung aller gespeicherten Schluckgeräusche in eine Vorbereitungs-, eine Transit- und eine Repositionsphase vorgenommen. Bei Geräuschdateien, die eine zuverlässige Trennung aller drei Phasen erlaubten, wurde zusätzlich als Summe der drei Phasen eine Gesamtschluckdauer notiert. Anschließend folgte die statistische Aufbereitung der gewonnenen Daten gemäß 2.4.1.

3.2.1 – Deskriptive Statistik

Tabelle 3.2.1.1: Deskription der Messdaten in der akustischen Analyse von Dysphagiegruppe (N=24), Verdachtsfällen (N=18) und Kontrollgruppe (N=24).

Gruppe		Vorbereitung (ms)	Transit (ms)	Reposition (ms)	Gesamt (ms)	
Dysphagie	Mittelwert	209,3	385,2	411,4	978,0	
	Standardfehler des Mittelwertes	10,71	46,13	54,39	98,26	
	95% Konfidenzintervall des Mittelwertes	Untergrenze	187,0	289,2	297,9	772,3
		Obergrenze	231,7	481,1	524,8	1183,7
	5% getrimmtes Mittel	206,6	371,8	372,3	907,8	
	Median	201,3	330,7	345,0	850,6	
	Varianz	2408,9	46816,5	62115,5	193101,1	
	Standardabweichung	49,1	216,4	249,2	439,4	
	Minimum	147,5	54,0	215,5	592,5	
	Maximum	321,0	969,5	1336,0	2626,5	
	Spannweite	173,5	915,5	1120,5	2034,0	
	Aspirationsgeräusche				5	
	Nicht verwertbare Fälle	3	2	3	4	
	Verdachtsfall	Mittelwert	189,2	382,7	298,3	827,4
Standardfehler des Mittelwertes		10,35	31,38	20,56	35,30	
95% Konfidenzintervall des Mittelwertes		Untergrenze	166,9	316,5	254,4	750,5
		Obergrenze	211,6	448,9	342,1	904,4
5% getrimmtes Mittel		188,8	376,2	296,7	832,3	
Median		191,0	365,2	307,4	816,0	
Varianz		1500,1	17728,6	6765,4	16203,5	
Standardabweichung		38,7	133,1	82,3	127,3	
Minimum		132,6	189,0	164,0	568,0	
Maximum		254,3	693,0	461,0	999,0	
Spannweite		121,7	504,0	297,0	431,0	
Aspirationsgeräusche					0	
Nicht verwertbare Fälle		4	0	2	5	
Kontrollgruppe		Mittelwert	146,5	223,7	271,4	616,6
	Standardfehler des Mittelwertes	10,49	17,46	14,07	26,50	
	95% Konfidenzintervall des Mittelwertes	Untergrenze	124,1	187,0	241,8	560,1
		Obergrenze	168,9	260,4	300,9	673,1
	5% getrimmtes Mittel	146,8	223,8	270,4	614,9	
	Median	146,5	223,0	255,0	634,5	
	Varianz	1762,1	5790,3	3762,1	11232,8	
	Standardabweichung	42,0	76,1	61,3	106,0	
	Minimum	78,0	92,0	186,0	430,0	
	Maximum	210,0	353,0	374,0	834,0	
	Spannweite	132,0	261,0	188,0	404,0	
	Aspirationsgeräusche				0	
	Nicht verwertbare Fälle	8	5	5	8	

Für alle vier Messwerte zeigt sich im Mittelwert die erwartete Staffelung Dysphagie > Verdachtsfälle > Kontrollgruppe. Allerdings liegen die Dysphagiegruppe und die Gruppe der Verdachtsfälle in der Vorbereitungsphase (10,1 ms Unterschied) und in der Transitphase (2,5 ms)

sehr dicht beieinander, so dass hier bei den folgenden Tests kaum ein signifikanter Unterschied erwartet werden kann.

Auffällig ist die hohe Standardabweichung in der Dysphagiegruppe: In der Transit- und Repositionsphase überschreitet sie 50% des Mittelwertes. Im Gegensatz zur Kontrollgruppe, bei der die Standardabweichungen für diese Phasen unter einem Drittel des Mittelwertes liegen, sind die Werte hier also deutlich weiter gestreut. Diese Beobachtung wird auch gestützt durch die Tatsache, dass sich für die Transitphase in der Dysphagiegruppe sowohl die höchsten (969,5 ms) als auch die niedrigsten (54,0 ms) finden: Die Spannweite ist etwa 3,5-mal so hoch, wie bei der Kontrollgruppe.

Betrachtet man das 95% Konfidenzintervall des Mittelwertes, werden die Unterschiede zwischen den Gruppen deutlich geringer. Ein sicherer Unterschied findet sich dann lediglich in der Vorbereitungsphase zwischen Dysphagie- und Kontrollgruppe (18,1 ms), in der Transitphase zwischen den gleichen Gruppen (28,8 ms) und wiederum in den gleichen Gruppen bei der Gesamtdauer (99,2 ms).

Bei 5 der Probanden in der Dysphagiegruppe kam es zu einer eindeutig akustisch identifizierbaren Aspiration mit Hustenanfällen oder einer Fortsetzung der Respiration während des Schluckvorgangs. Bei den schluckgesunden Probanden wurde dieses Phänomen nicht beobachtet.

Wenn einzelne Phasen des Schluckvorganges sich akustisch nicht identifizieren ließen, wurden die Daten für diesen Auswertungsschritt aus der Wertung genommen. Wegen mangelnder Aufnahmequalität, falscher Schlucktechnik (einige Testpersonen schluckten mehrfach in dichter Folge, was die Trennung der Phasen unmöglich machte) oder zu intensiver Störgeräusche mussten 7 Fälle ganz aus der Wertung genommen werden.

3.2.2 – Detailstatistik Vorbereitungsphase

3.2.2.1 – Diagramme Vorbereitungsphase

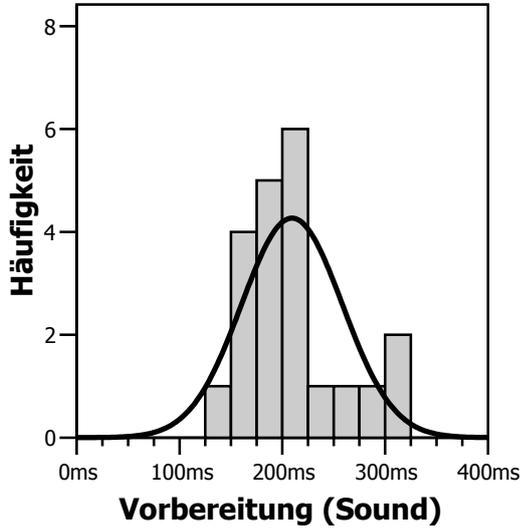


Abb. 3.2.2.2.1: Histogramm Gruppe 1 (Dysphagie)

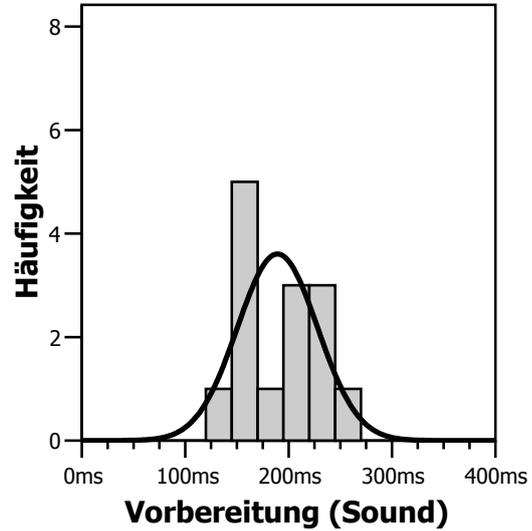


Abb. 3.2.2.2.2: Histogramm Gruppe 2 (Unbestätigte Verdachtsfälle)

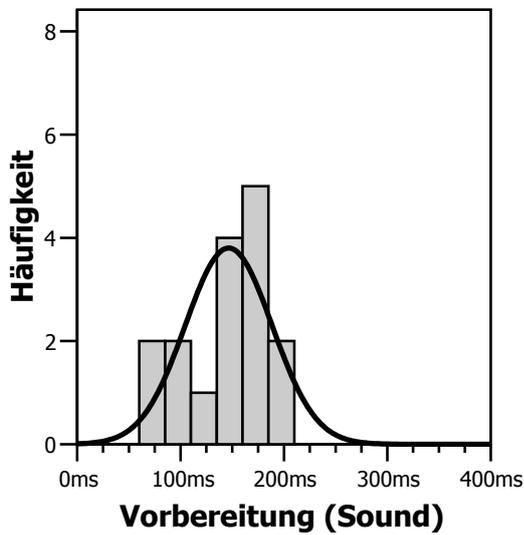


Abb. 3.2.2.2.3: Histogramm Gruppe 3 (Kontrollgruppe)

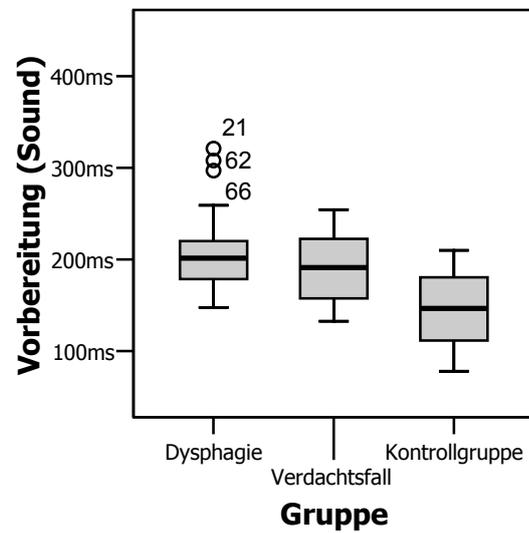


Abb. 3.2.2.2.4: Box-and-Whiskers Plot über alle Gruppen.

3.2.2.2 – Statistische Tests Vorbereitungsphase

Tabelle 3.2.2.2.1: Kolomogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors für die Vorbereitungsphase

Gruppe	Statistik	df	Signifikanz
Dysphagie	,209	21	,017
Verdachtsfall	,180	14	,200
Kontrollgruppe	,126	16	,200

Der K-S-Test ergibt für die Gruppe 1 eine Signifikanz $p < 0,05$, die Nullhypothese muss abgelehnt werden: Die Daten scheinen in dieser Gruppe nicht normalverteilt zu sein. Es folgt eine Levene-Statistik zur Prüfung der Homogenität der Varianzen, eine weitere Voraussetzung für die Anwendung der bevorzugten ANOVA.

Tabelle 3.2.2.2.2: Levene-Statistik zur Ermittlung der Homogenität der Varianzen in der Vorbereitungsphase

	Levene	df1	df2	Signifikanz
Basiert auf dem Mittelwert	,042	2	48	,959
Basiert auf dem getrimmten Mittel	,029	2	48	,972

Die Levene-Statistik zeigt sowohl für den Mittelwert als auch für das getrimmte Mittel (hier werden 5% der Extremwerte auf beiden Seiten entfernt) eine sehr gute Homogenität der Varianzen zwischen den Gruppen an, die ANOVA-Voraussetzungen scheinen also gegeben.

Tabelle 3.2.2.2.3: ANOVA-Statistik zur Prüfung eines signifikanten Gruppenunterschiedes in der Dauer der Vorbereitungsphase

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	36370,340	2	18185,170	9,275	,0004
Innerhalb der Gruppen	94110,989	48	1960,646		

Die ANOVA sieht bei $p \leq 0,05$ einen hochsignifikanten Unterschied zwischen den Gruppen, der nun in einem Kontrast-Test aufgeschlüsselt wird.

Tabelle 3.2.2.2.4: Kontrast-Test der drei Gruppen über die Dauer der Vorbereitungsphase

Kontrast	Kontrastwert	Standardfehler	T	df	Signifikanz
Dysphagie vs. Kontrolle	62,8413	14,69369	4,277	48	,0001
Dysphagie vs. Verdachtsfälle	20,0960	15,27777	1,315	48	,1946
Verdachtsfälle vs. Kontrolle	42,7452	16,20452	2,638	48	,0112

Für ein $p \leq 0,05$ existiert also sowohl für die Dysphagiegruppe als auch für die Gruppe der Verdachtsfälle ein signifikanter Unterschied mit der Kontrollgruppe.

3.2.3 – Detailstatistik Transitphase

3.2.3.1 – Diagramme Transitphase

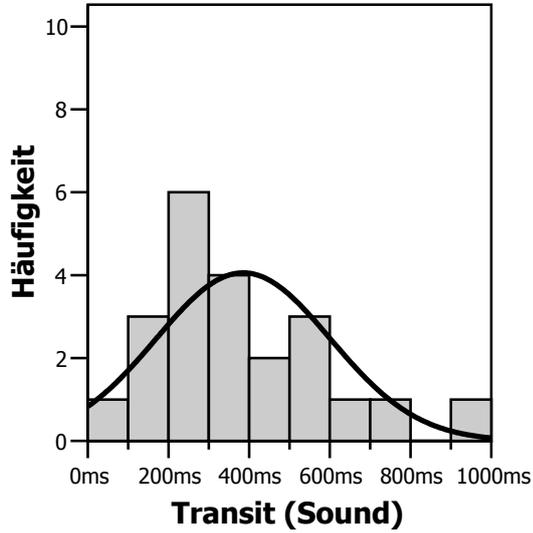


Abb. 3.2.3.1.1: Histogramm Gruppe 1 (Dysphagie)

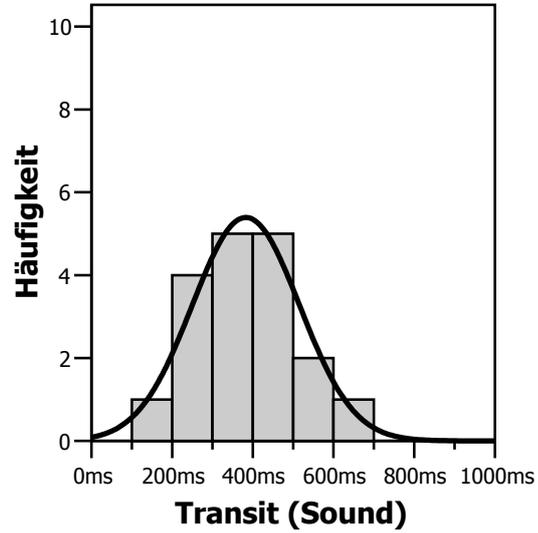


Abb. 3.2.3.1.2: Histogramm Gruppe 2 (Unbestätigte Verdachtsfälle)

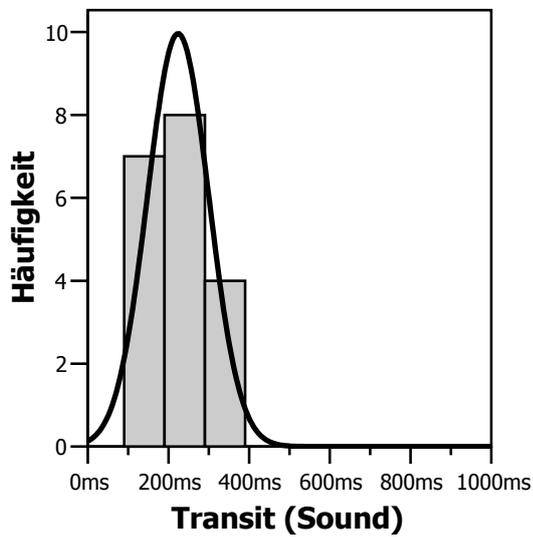


Abb. 3.2.3.1.3: Histogramm Gruppe 3 (Kontrollgruppe)

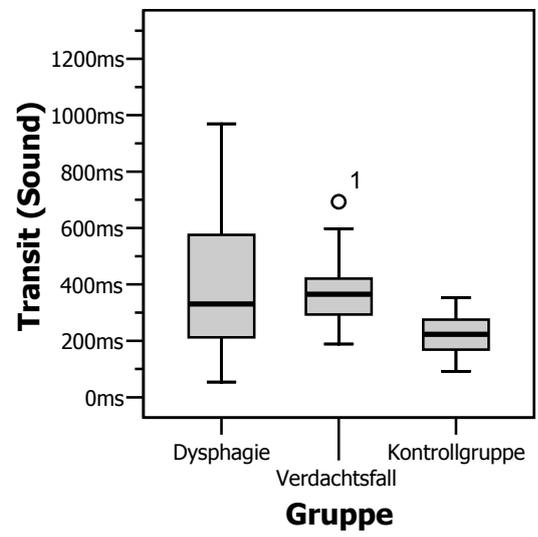


Abb. 3.2.3.1.4: Box-and-Whiskers Plot über alle Gruppen.

3.2.3.2 – Statistische Tests Transitphase

Tabelle 3.2.3.2.1: Kolomogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors für die Transitphase

Gruppe	Statistik	df	Signifikanz
Dysphagie	,146	22	,200
Verdachtsfall	,165	18	,200
Kontrollgruppe	,112	19	,200

Der K-S-Test zeigt eine gute Normalverteilung der Werte in allen drei Gruppen an, die ANOVA-Statistik scheint gültig.

Tabelle 3.2.3.2.2: ANOVA-Statistik zur Prüfung eines signifikanten Gruppenunterschiedes in der Dauer der Transitphase

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	331310,875	2	165655,437	6,680	,003
Innerhalb der Gruppen	1388757,846	56	24799,247		

Die ANOVA sieht einen hochsignifikanten Unterschied zwischen den Gruppen, der nun in einem Kontrast-Test aufgeschlüsselt wird.

Tabelle 3.2.3.2.3: Kontrast-Test der drei Gruppen über die Dauer der Transitphase

Kontrast	Kontrastwert	Standardfehler	T	df	Signifikanz
Dysphagie vs. Kontrolle	161,4673	49,32000	3,274	56	,002
Dysphagie vs. Verdachtsfälle	2,4592	50,04972	,049	56	,961
Verdachtsfälle vs. Kontrolle	159,0081	51,79729	3,070	56	,003

Für ein $p < 0,05$ existiert also sowohl für die Dysphagiegruppe als auch für die Gruppe der Verdachtsfälle ein signifikanter Unterschied mit der Kontrollgruppe, allerdings zeigt sich wiederum kein signifikanter Unterschied zwischen der Dysphagiegruppe und den Verdachtsfällen.

3.2.4 – Detailstatistik Repositionsphase

3.2.4.1 – Diagramme Repositionsphase

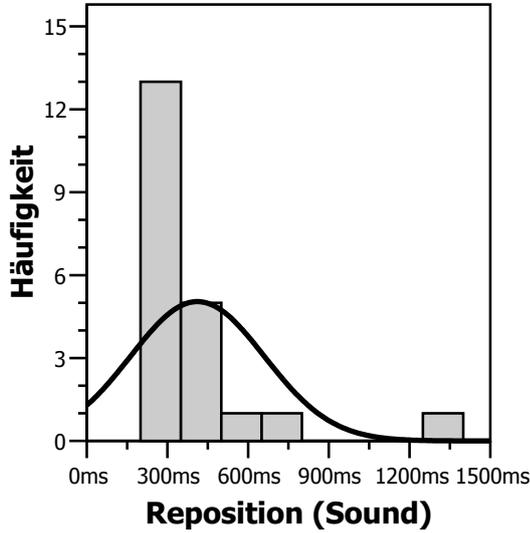


Abb. 3.2.4.1.1: Histogramm Gruppe 1 (Dysphagie)

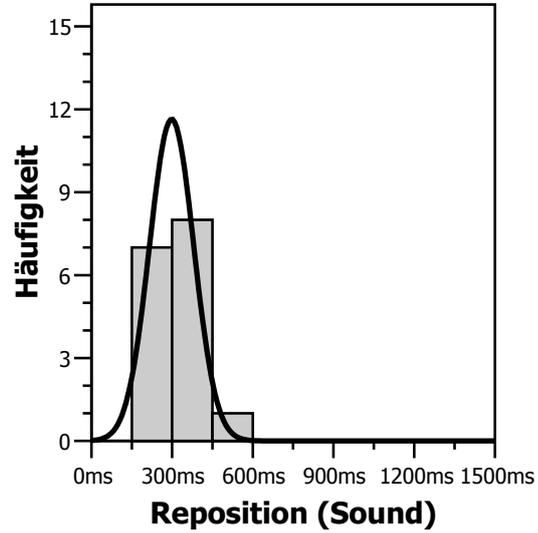


Abb. 3.2.4.1.2: Histogramm Gruppe 2 (Unbestätigte Verdachtsfälle)

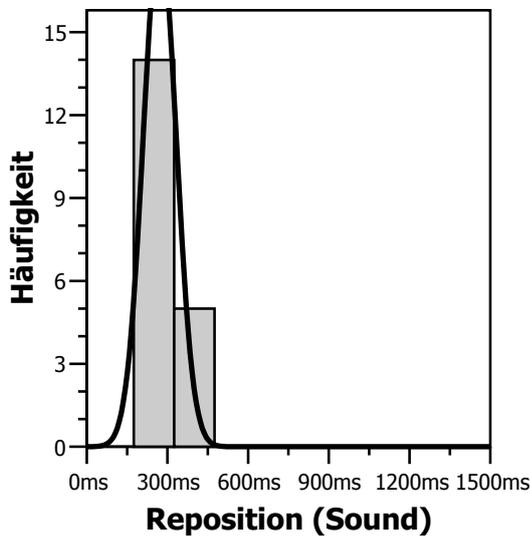


Abb. 3.2.4.1.3: Histogramm Gruppe 3 (Kontrollgruppe)

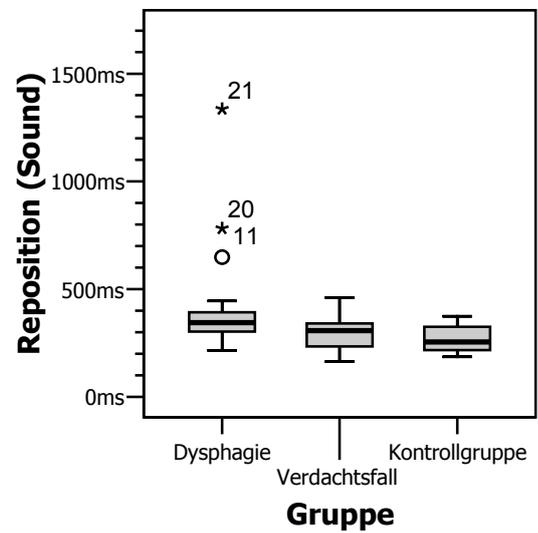


Abb. 3.2.4.1.4: Box-and-Whiskers Plot über alle Gruppen.

3.2.4.2 – Statistische Tests Repositionsphase

Tabelle 3.2.4.2.1: Kolomogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors für die Repositionsphase

Gruppe	Statistik	df	Signifikanz
Dysphagie	,304	21	,000
Verdachtsfall	,116	16	,200
Kontrollgruppe	,140	19	,200

Der K-S-Test ergibt für die Gruppe 1 eine Signifikanz $p < 0,05$, die Nullhypothese muss abgelehnt werden: Die Daten scheinen in dieser Gruppe nicht normalverteilt zu sein. Es folgt eine Levene-Statistik zur Prüfung der Homogenität der Varianzen, eine weitere Voraussetzung für die Anwendung der bevorzugten ANOVA.

Tabelle 3.2.4.2.2: Levene-Statistik zur Ermittlung der Homogenität der Varianzen in der Repositionsphase

	Levene	df1	df2	Signifikanz
Basiert auf dem Mittelwert	3,652	2	53	,033
Basiert auf dem getrimmten Mittel	1,999	2	53	,146

Die Levene-Statistik lehnt für den Mittelwert bei einer Signifikanz $< 0,05$ die Nullhypothese der Homogenität der Varianzen ab, während sie für die getrimmten Mittelwerte akzeptiert wird. Einzelne Extremwerte stören die Gruppenhomogenität. Um einen Typ 1-Fehler zu vermeiden, sollten eventuelle signifikante Gruppenunterschiede aus der ANOVA also mit konservativen unparametrischen Tests überprüft werden.

Tabelle 3.2.4.2.3: ANOVA-Statistik zur Prüfung eines signifikanten Gruppenunterschiedes in der Dauer der Repositionsphase

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	220394,488	2	110197,244	4,138	,021
Innerhalb der Gruppen	1411508,829	53	26632,242		

Die ANOVA sieht wiederum einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen, der nun in einem Kontrast-Test aufgeschlüsselt wird. Aufgrund der Levene-Statistik wird dieser mit der Annahme inhomogener Varianzen durchgeführt.

Tabelle 3.2.4.2.4: Kontrast-Test der drei Gruppen über die Dauer der Repositionsphase

Kontrast	Kontrastwert	Standardfehler	T	df	Signifikanz
Dysphagie vs. Kontrolle	140,0187	56,17728	2,492	22,655	,020
Dysphagie vs. Verdachtsfälle	113,1225	58,14393	1,946	25,434	,063
Verdachtsfälle vs. Kontrolle	26,8962	24,91675	1,079	27,341	,290

Bei $p < 0,05$ wird hier nur ein signifikanter Unterschied zwischen Dysphagie- und Kontrollgruppe gesehen. Beim Vergleich der dysphagen Gruppe mit den Verdachtsfällen wird die Signifikanz hingegen knapp verfehlt.

Wegen der ungenügenden Erfüllung der Voraussetzungen für die ANOVA werden diese beiden Ergebnisse in dem nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Test überprüft.

Tabelle 3.2.4.2.5: Mann-Whitney-U-Test über die Dauer der Repositionsphase

Kontrast	Mann-Whitney-U	Wilcoxon-W	Z	Signifikanz
Dysphagie vs. Kontrolle	93,500	283,500	-2,871	,004
Dysphagie vs. Verdachtsfälle	113,500	249,500	-1,671	,095

Der U-Test bestätigt hiermit die Aussage der ANOVA. Während zwischen der Dysphagiegruppe und der Kontrolle ein tatsächlicher Unterschied zu bestehen scheint, kann im Vergleich mit den Verdachtsfällen keine Signifikanz erreicht werden.

3.2.5 – Detailstatistik Gesamtdauer

3.2.5.1 – Diagramme Gesamtdauer

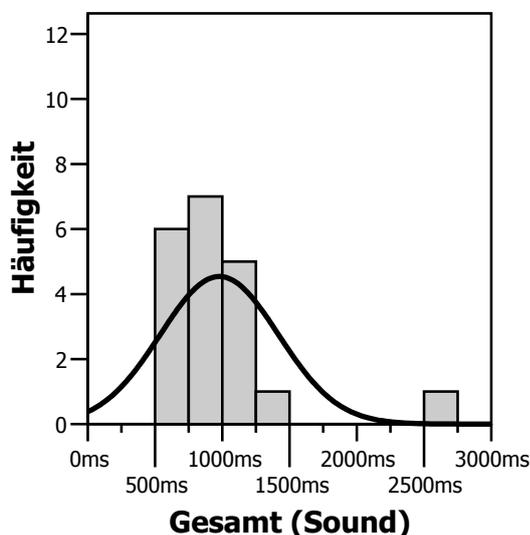


Abb. 3.2.5.1.1: Histogramm Gruppe 1 (Dysphagie)

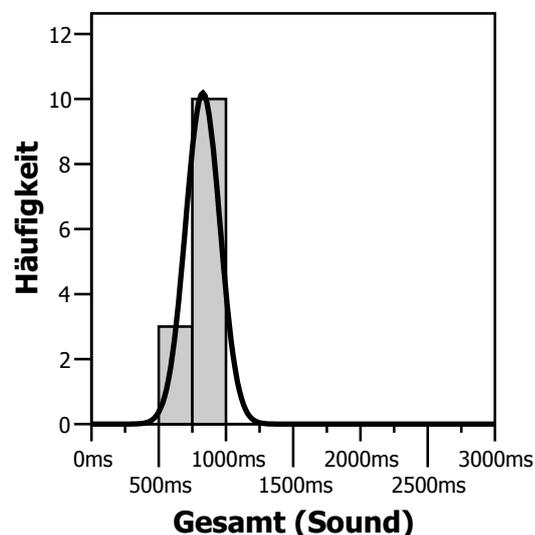


Abb. 3.2.5.1.2: Histogramm Gruppe 2 (Unbestätigte Verdachtsfälle)

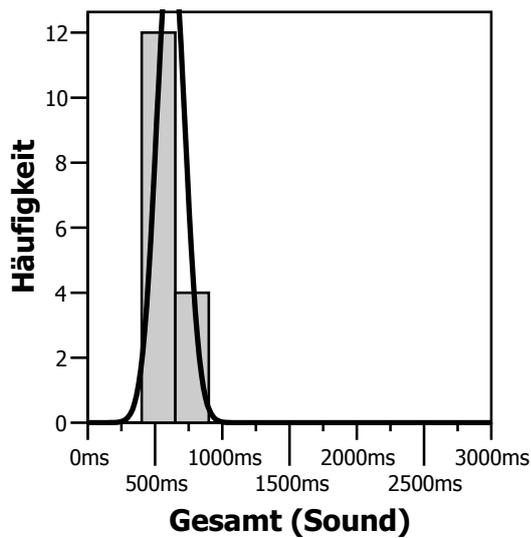


Abb. 3.2.5.1.3: Histogramm Gruppe 3 (Kontrollgruppe)

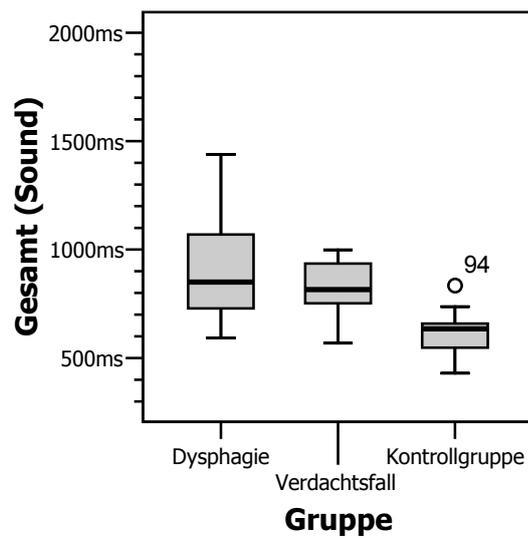


Abb. 3.2.5.1.4: Box-and-Whiskers Plot über alle Gruppen. In der Dysphagiegruppe wird ein Extremwert von 2625ms der Übersicht halber nicht angezeigt.

3.2.5.2 – Statistische Tests Gesamtdauer

Tabelle 3.2.5.2.1: Kolomogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors für die Gesamtdauer

Gruppe	Statistik	df	Signifikanz
Dysphagie	,225	20	,009
Verdachtsfall	,161	13	,200
Kontrollgruppe	,171	16	,200

Da die Gesamtdauer lediglich die Summe der drei zuletzt untersuchten Variablen darstellt (für alle Fälle, in denen alle drei Variablen beziffert werden konnten), überrascht nicht, dass der K-S-Test auch hier für die Gruppe 1 bei einer Signifikanz $p < 0,05$ die Nullhypothese ablehnt. Entsprechend folgt wieder die Levene-Statistik zur Prüfung der Homogenität der Varianzen.

Tabelle 3.2.5.2.2: Levene-Statistik zur Ermittlung der Homogenität der Varianzen in der Gesamtdauer

	Levene	df1	df2	Signifikanz
Basiert auf dem Mittelwert	3,622	2	46	,035
Basiert auf dem getrimmten Mittel	2,476	2	46	,095

Wie schon bei der Repositionsphase lehnt die Levene-Statistik für den Mittelwert bei einer Signifikanz $< 0,05$ die Nullhypothese der Homogenität der Varianzen ab, während sie für die

getrimmten Mittelwerte akzeptiert wird. Auch hier stören einzelne Extremwerte die Gruppenhomogenität. Um einen Typ 1-Fehler zu vermeiden, werden auch hier eventuelle signifikante Gruppenunterschiede aus der ANOVA mit konservativen unparametrischen Tests überprüft.

Tabelle 3.2.5.2.3: ANOVA-Statistik zur Prüfung eines signifikanten Gruppenunterschiedes in der Dauer der Gesamtdauer

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	1161821,018	2	580910,509	6,628	,003
Innerhalb der Gruppen	4031854,714	46	87649,016		

Die ANOVA sieht auch in der Gesamtdauer einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen, der nun in einem Kontrast-Test aufgeschlüsselt wird. Aufgrund der Levene-Statistik wird dieser mit der Annahme inhomogener Varianzen durchgeführt.

Tabelle 3.2.5.2.4: Kontrast-Test der drei Gruppen über die Dauer der Gesamtdauer

Kontrast	Kontrastwert	Standardfehler	T	df	Signifikanz
Dysphagie vs. Kontrolle	361,3814	101,76986	3,551	21,718	,002
Dysphagie vs. Verdachtsfälle	150,5735	104,41014	1,442	23,600	,162
Verdachtsfälle vs. Kontrolle	210,8079	44,14150	4,776	23,389	,000

Die Summierung der gültigen Fälle hat das Gesamtbild nicht verändert: Wie schon bei den Einzelmerkmalen kann kein signifikanter Unterschied zwischen der Gruppe der Verdachtsfälle und der Kontrollgruppe erreicht werden.

Wegen der ungenügenden Erfüllung der Voraussetzungen für die ANOVA werden die beiden signifikanten Ergebnisse im Mann-Whitney-U-Test überprüft.

Tabelle 3.2.5.2.5: Mann-Whitney-U-Test über die Dauer der Gesamtdauer

Kontrast	Mann-Whitney-U	Wilcoxon-W	Z	Signifikanz
Dysphagie vs. Kontrolle	26,000	162,000	-4,266	,00002
Verdachtsfälle vs. Kontrolle	19,000	155,000	-3,728	,0002

Auch hier bestätigt der U-Test die Aussage der ANOVA, es scheint einen tatsächlichen Unterschied zwischen den hier verglichenen Gruppen zu geben.

3.2.6 – Testdefinition

Nach genauer Betrachtung der Daten und der jeweiligen Gruppenunterschiede wurde versucht, Kriterien zu definieren, nach denen sich zwischen Dysphagiekranken und Gesunden

unterscheiden lassen würde. In diesem Auswertungsgang wurde die Verdachtsfallgruppe nicht berücksichtigt, da mangels signifikanter Unterschiede zwischen der Verdachtsfall- und der Dysphagiegruppe hier keine verwertbaren Ergebnisse zu erwarten wären. Zunächst wurden die vier Messparameter in einer Diskriminantenanalyse auf ihre Verwertbarkeit geprüft. Dabei wurde die Gesamtdauer wegen der hohen Korrelation mit den anderen Parametern eliminiert. Zudem wurden alle Fälle eliminiert, in denen eine der Diskriminanten fehlte (insgesamt 12). Nach Prüfung der drei anderen Messwerte entstand eine Klassifizierungsfunktion mit folgendem Ergebnis:

Tabelle 3.2.6.1: Ergebnis der Klassifizierungsfunktion aus der Diskriminantenanalyse über Vorbereitungs-, Transit- und Repositionsdauer in ms.

		Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit		
		Dysphagie	Kontrollgruppe	Gesamt
Echte Gruppen- Zugehörigkeit	Dysphagie	15	5	20
	Kontrollgruppe	2	14	16
	Gesamt	17	19	

Die Sensitivität dieser Funktion betrug 75%, die Spezifität 87,5%, der positive prädiktive Wert 88,24% und der negative prädiktive Wert 73,68%.

Ergänzend wurden die Daten auf die Bereiche maximaler Differenz durchsucht. Für jeden denkbaren Wert im gemessenen Feld wurde mit Hilfe einer selbst entwickelten Software geprüft, wie viel Prozent der Fälle (relativ zur Gruppengröße) aus welcher Gruppe jeweils unterhalb und oberhalb dieser Zahl liegen. Der Bereich der maximalen Differenz wurde dann zusammen mit dem ermittelten Unterscheidungsfaktor d als prozentualer Anteil der richtig klassifizierten Fälle für diesen Bereich notiert. Da die Dysphagiegruppe im Mittel stets größere Zeitabstände zu verzeichnen hatte als die Kontrollgruppe, wurden in allen Tests Werte oberhalb des definierten Unterscheidungsbereiches als schluckgestört angenommen, und alle Werte kleiner oder gleich der Zahlen in dem Bereich als schluckgesund. Anhand der Echtdaten wurden dann Sensitivität, Spezifität, positiver prädiktiver Wert und negative prädiktiver Wert errechnet.

Tabelle 3.2.6.2: Manuelle Statistik zur Testdefinition. d = richtig klassifizierte Fälle, Sens = Sensitivität, Spez = Spezifität, ppW = positiver prädiktiver Wert, npW = negativer prädiktiver Wert.

Messwert	Bereich	d	Sens	Spez	ppW	npW
Vorbereitung	164-168 ms	76,49%	90,48%	62,50%	76,00%	83,33%
Transit	353-356 ms	75,00%	50,00%	100,00%	100,00%	63,33%
Reposition	255-258 ms	71,56%	90,48%	52,63%	67,86%	83,33%
Gesamt	674-687 ms	88,13%	95,00%	81,25%	86,36%	92,86%

Es fällt auf, dass die Gesamtdauer in den Testdaten eine recht gute Unterscheidung zwischen Dyspagie- und Kontrollgruppe zulässt. Weiterhin zeigt sich, dass die Daten der einzelnen Phasen ungeeignet sind, das Testergebnis in Kombination mit der Gesamtdauer weiter zu verbessern: Bei einer UND-Verknüpfung mehrerer Tests erhält man ein Ergebnis mit der höchsten Spezifität der verknüpften Tests, aber auch mit der niedrigsten Sensitivität. Andererseits bedeutet eine ODER-Verknüpfung ein Ergebnis mit der höchsten beteiligten Sensitivität, aber der kleinsten Spezifität. Da die Gesamtdauer schon der Test mit der höchsten Sensitivität ist, ließe sich lediglich die Spezifität verbessern. Diese liegt aber nur bei dem Test der Transitphase über der Spezifität der Gesamtdauer, geht aber mit einer viel schlechteren Sensitivität einher, die durch eine UND-Verknüpfung zwangsweise auf den Gesamttest überginge.

3.3 – Ergebnisse der videounterstützten Analyse

Wie im Versuchsaufbau beschrieben, wurden die in den Untersuchungen gewonnenen Videoaufzeichnungen untersucht. Insgesamt 125 Videoclips mit Schluckvorgängen von 42 Patienten wurden untersucht. Dabei wurden zunächst wichtige Ereignisse aus dem Videobild (Beginn der Larynxrevelation, Bolustransit, Öffnung der Epiglottis) aufgesucht und anschließend akustische Korrelate in der passenden Audiodatei gesucht. In allen Fällen, in denen diese Ereignisse eintraten, ließ sich in der Audiodatei an der entsprechenden Stelle ein umschriebenes Geräusch feststellen.

Aus der Videobetrachtung konnte eine regelmäßige Abfolge der pharyngealen Vorgänge erkannt werden: Die erste sichtbare Aktion ist die Aufwärts-Vorne-Bewegung des Pharynx. Nach einer variablen Zeitspanne wird anschließend der Bolus im Oropharynx sichtbar und wird auf die noch aufrecht stehende Epiglottis aufgelegt. Während des sich anschließenden Bolustransits durch den Pharynx ist die Sicht in der Endoskopie dann in allen Fällen unterbrochen. Der einströmende Bolus, das sich schließende Gaumensegel und der nach hinten tretende Zungengrund mögen hierfür ursächlich sein. Meist entsteht wieder ein Bild noch vor Öffnung der Epiglottis, der Bolus hat nun den Pharynx bereits verlassen. Zuletzt lässt sich beobachten, wie die Epiglottis wieder in aufrechte Position schnellt und der Pharynx in seine Ausgangsposition nach unten zurückkehrt, meistens kombiniert mit einer Öffnung der Stimmritze zur postdeglutiven Expiration.

In Einzelfällen aus der Dysphagiegruppe lag offensichtlich ein vollständiger Ausfall des Epiglottisschlusses vor, so dass hier der Öffnungston nicht nachweisbar war. Hier wurde dann die Rückkehr des Pharynx in die Ausgangsposition als Ende der Repositionsphase gewertet. Es fiel zudem auf, dass die Öffnung der Epiglottis gelegentlich mit dem Geräusch des Bolustransit zusammenfiel und dadurch akustisch nicht aus dem Gesamtgeräusch zu trennen war. Das Epiglottisöffnungsgeräusch zeigte sich in seiner Art sehr heterogen. Neben einem häufig auftretenden Ploppgeräusch, etwa der Öffnung einer verkorkten Flasche entsprechend, kam es auch zu höherfrequenten Glicks- und Klicklauten, die rein akustisch schwierig von den Geräuschen zu unterscheiden waren, die durch das Reißen von Speichelfäden oder die Trennung der während des Schluckvorgangs zusammengelegten Schleimhäute des Pharynx entstehen. Das erste Geräusch der Vorbereitungsphase entstand konstant etwa 80ms nach dem Beginn der Larynxelation im Videobild.

3.3.1 – Deskriptive Statistik und Vergleich

Gruppenübergreifend wurde eine deskriptive Statistik über die Daten der akustischen und auch der videogestützten Analyse der Schluckphasen angefertigt, um einen direkten Vergleich ermöglichen zu können. Die Kontrollgruppe wurde mangels Videodaten hierbei nicht verwendet. Für alle Fälle, in denen bei beiden Methoden ein Ergebnis gefunden werden konnte, wurde die Differenz aus Video- und Audioanalyse gebildet und dieser neue Wert ebenfalls der Statistik zugeführt. Nur Datensätze, bei denen alle drei Phasen in der akustischen Methode erkannt werden konnten, wurden in die Statistik miteinbezogen.

3.3.1.1 – Vorbereitungsphase

Tabelle 3.3.1.2: Dauer der Vorbereitungsphase und Differenzwert in ms der verschiedenen Untersuchungsgänge. N=33

	Video (ms)	Audio (ms)	Differenz (ms)
Mittelwert	328,6	203,7	124,9
Standardfehler des Mittelwertes	16,49	7,98	17,96
95% Konfidenzintervall des Mittelwertes	Untergrenze	295,0	187,5
	Obergrenze	362,2	219,9
5% getrimmtes Mittel	324,4	201,1	121,3
Median	318,0	201,3	109,5
Varianz	8973,9	2099,7	10649,3
Standardabweichung	94,7	45,8	103,2
Minimum	185,0	132,6	-43,6
Maximum	581,0	321,0	371,0
Spannweite	396,0	188,4	414,6

Zwischen den Messverfahren zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Beurteilung der Phasenlänge. Bei der Videomessung wurde die Phase im Durchschnitt 61% länger eingeschätzt als bei der akustischen Messung. Auch Maximum und Spannweite weisen nennenswerte Unterschiede auf. Da sich die Differenz auch im getrimmten Mittel bestätigt, lässt sich folgern, dass die anderen Differenzen eher nicht durch einzelne Extremwerte verursacht sind. An Spannweite und Maximum der Differenzspalte lässt sich ablesen, dass in Einzelfällen eine große Divergenz in der Beurteilung der Dauer der Vorbereitungsphase vorlag. Da in der Videobetrachtung jeweils die längsten möglichen Dauern notiert worden sind, war dieses Ergebnis zu erwarten: Schließlich wurde beobachtet, dass das erste Geräusch im Schnitt erst 80 ms nach Beginn der Larynxelavation einsetzt, was geradezu zwingend zu einer Unterschätzung dieser Phase durch die rein akustische Methode führen musste. Entsprechend wundert es nicht, dass nur 2 der 35 hier eingeflossenen Fälle mit dem Ergebnis der akustischen Vermessung innerhalb einer 90%-Marge der videogestützten Vermessung lagen. Dazu kam es 11 Fällen zu einer groben Fehleinschätzung von mehr als 50%.

3.3.1.2 – Transitphase

Tabelle 3.3.1.2.1: Dauer der Transitphase und Differenzwert in ms der verschiedenen Untersuchungsgänge.

N=33

	Video (ms)	Audio (ms)	Differenz (ms)	
Mittelwert	356,3	363,3	-7,0	
Standardfehler des Mittelwertes	23,26	30,18	28,23	
95% Konfidenzintervall des Mittelwertes	Untergrenze	308,9	301,8	-64,5
	Obergrenze	403,7	424,8	50,5
5% getrimmtes Mittel	354,3	351,5	-9,4	
Median	334,0	356,0	3,0	
Varianz	17860,6	30064,6	26292,8	
Standardabweichung	133,6	173,4	162,2	
Minimum	117,0	54,0	-366,5	
Maximum	617,3	969,5	422,7	
Spannweite	500,3	915,5	789,2	

Während beide Messmethoden bezüglich Mittelwert und Median zunächst sehr homogen aussehen, zeigen sich große Unterschiede in der Spannweite und im Maximalwert der Beurteilungen. Wo bei der Vorbereitungsphase die Audiomessung konservativer war, schießt sie hier bezüglich Minimum und Maximum deutlich über die Erkenntnisse aus der Videobetrachtung hinaus. Die Differenzspalte zeigt, dass in Einzelfällen bei der Audiomessung die Dauer der Transitphase um ca. 400 ms kürzer oder auch länger eingeschätzt wurde als in der Videoanalyse.

Mitunter kam es in der späten Transitphase noch zu gurgelnden Abgangsgeräuschen des Bolus aus dem Ösophagus, obwohl der Pharynx bereits geleert und die Epiglottis aufgerichtet war. In einigen Fällen verursachte die Trennung der beim Schlucken zusammengelegten Schleimhautfalten so intensive Geräusche, dass auch diese noch der Transitphase zugeordnet wurden. In 11 der hier untersuchten 40 Fälle lag das Ergebnis der rein akustischen Analyse innerhalb einer 90%-Marge des Ergebnisses der Videoanalyse. In 12 Fällen kam es zu einer schweren Fehleinschätzung von mehr als 50%.

3.3.1.3 – Repositionsphase

Tabelle 3.3.1.3.1: Dauer der Repositionsphase und Differenzwert in ms der verschiedenen Untersuchungsgänge. N=33

	Video (ms)	Audio (ms)	Differenz (ms)	
Mittelwert	402,4	351,7	50,7	
Standardfehler des Mittelwertes	65,97	34,13	41,15	
95% Konfidenzintervall des Mittelwertes	Untergrenze	268,1	282,2	-33,1
	Obergrenze	536,8	421,2	134,5
5% getrimmtes Mittel	344,6	321,5	32,4	
Median	277,0	318,0	12,5	
Varianz	143597,5	38431,6	55887,7	
Standardabweichung	378,9	196,0	236,4	
Minimum	130,0	172,5	-429,5	
Maximum	2331,0	1336,0	995,0	
Spannweite	2201,0	1163,5	1424,5	

Wiederum liegen die beiden Messverfahren in Mittelwert, Median und insbesondere im getrimmten Mittel dicht beieinander, aber die großen Unterschiede in Varianz, Spannweite und Maximalwerten lassen eine inhomogene Einschätzung zwischen den beiden Gruppen vermuten. Extremwerte, wie sie in der Videomessung gefunden wurden, konnten in der akustischen Beurteilung nicht erkannt werden. Mitunter wurden, wenn die Kehldeckelöffnung dicht an oder in der Transitphase lag, spät reißende Speichelfäden oder Nebengeräusche fälschlich als Öffnungsgeräusch identifiziert (was zu einer zu langen Einschätzung der Phasendauer von bis zu 430ms führte) oder es wurden umgekehrt früh auftretende Störgeräusche als Öffnungston identifiziert, obwohl die Epiglottis noch geschlossen war (wodurch um bis zu eine Sekunde zu kurze Zeiten gemessen wurden). 17 der 37 hier untersuchten Fälle lagen bei der Audiovermessung im 90%-Intervall der Videomessung, allerdings wurden bei 9 Fällen starke Fehleinschätzungen von über 50% des endoskopischen Messwertes festgestellt.

3.3.1.4 – Gesamtdauer

Tabelle 3.3.1.4.1: Gesamtdauer des Schluckvorganges und Differenzwert in ms der verschiedenen Untersuchungsgänge. N=33

	Video (ms)	Audio (ms)	Differenz (ms)
Mittelwert	1087,3	918,7	168,6
Standardfehler des Mittelwertes	79,95	61,87	41,97
95% Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	924,4	792,7
	Obergrenze	1250,1	1044,7
5% getrimmtes Mittel	1022,2	868,8	166,2
Median	1004,0	839,5	129,2
Varianz	210959,3	126312,3	58136,4
Standardabweichung	459,3	355,4	241,1
Minimum	718,0	568,0	-403,0
Maximum	3422,0	2626,5	795,5
Spannweite	2704,0	2058,5	1198,5

In der Summe der vermessenen Phasen rücken die Ergebnisse der Messverfahren nun näher zusammen. Während sich konsolidiert, dass die Audiomessung den Schluckvorgang im Schnitt kürzer einschätzt als die videounterstützte Messung, fällt der Unterschied in der Spannweite bei der Gesamtdauer mit 1198,5 ms geringer aus, als die Ergebnisse der drei Einzelphasen vermuten lassen könnten. Es ist anzunehmen, dass zum einen Geräuschanteile „nur“ den falschen Phasen zugeordnet wurden, während zum anderen in Einzelfällen Nebengeräusche dazu führten, die gesamte Signaldauer gänzlich anders zu bewerten. Lediglich 13 der Fälle lagen innerhalb eines 90%-Intervalls der Videomessung. Andererseits gab es in der akustischen Beurteilung nur der Gesamtdauer nur eine völlige Fehlschätzung mit über 50% Abweichung vom endoskopischen Ergebnis.

3.3.1.5 – Gruppenvergleich

Um auszuschließen, dass die oben erkannten Differenzen zwischen den beiden Messmethoden gruppenspezifisch sind, wurden die für diese Betrachtung aussagekräftigsten Parameter der Differenzspalte Mittelwert, Median, Minimum, Maximum und Spannweite noch einmal in Gruppen aufgeteilt und verglichen.

Tabelle 3.3.1.5.1: Mittelwert, Median, Minimum, Maximum und Spannweite der Differenzspalte in den vier Messwerten nach Gruppen. Abgesehen von N sind alle Spaltenangaben in Millisekunden (ms).

		Dysphagie	Verdachtsfälle
Vorbereitung	Mittelwert	134,3	110,3
	Median	123,8	99,7
	Minimum	-43,6	-1,3
	Maximum	371,0	199,0
	Spannweite	414,6	200,3
Transit	Mittelwert	-1,6	-15,2
	Median	3,3	-24,0
	Minimum	-366,5	-177,0
	Maximum	422,7	203,7
	Spannweite	789,2	380,7
Reposition	Mittelwert	69,4	22,0
	Median	11,9	36,5
	Minimum	-429,5	-142,0
	Maximum	995,0	232,3
	Spannweite	1424,5	374,3
Gesamt	Mittelwert	202,1	117,1
	Median	127,9	161,2
	Minimum	-403,0	-281,0
	Maximum	795,5	289,0
	Spannweite	1198,5	570,0

Aus der Vergleichstabelle lässt sich ablesen, dass die Phasendauer in der Dysphagiegruppe stärker unterschätzt (bzw. bei der Transitphase weniger überschätzt) wurde als in der Gruppe der Verdachtsfälle. Sehr deutlich wird auch die viel größere Spannweite der Differenz in der Dysphagiegruppe: Für alle Phasen hat die Differenz zwischen den Messmethoden bei der Dysphagiegruppe mindestens die doppelte, bei der Repositionsphase sogar fast die vierfache Spannweite, wie die Verdachtsfallgruppe.

3.3.2 - Korrelationen

Es soll nach dem Grad der Korrelation zwischen der videounterstützten und der rein akustischen Analyse gesucht werden. Der Idealfall wäre eine lineare Korrelation von 1,0, was die Richtigkeit der dem Verfahren zugrunde liegenden Annahmen sehr wahrscheinlich machen würde. Zunächst wurden die vier Werte der videounterstützten Analyse und die vier Vergleichswerte aus der Audioanalyse einem One-Sample-K-S-Test auf die Normalverteilung unterzogen.

Tabelle 3.3.2.1: 1-Sample-Kolmogorov-Smirnov Test zur Prüfung der Normalverteilung der verschiedenen Zeitmessungen.

	Statistik	df	Signifikanz
Vorbereitung (Video)	,097	49	,200
Vorbereitung (Sound)	,111	49	,179
Transit (Video)	,101	49	,200
Transit (Sound)	,114	49	,141
Reposition (Video)	,262	49	,000
Reposition (Sound)	,281	49	,000
Gesamt (Video)	,195	49	,000
Gesamt (Sound)	,176	49	,001

Es zeigt sich, dass in beiden Analysen jeweils die Dauer der Repositionsphase und die Gesamtdauer nicht normalverteilt sind (die Nullhypothese der Normalverteilung wird für $p \leq 0,05$ abgelehnt). Somit muss für diese beiden Phasen bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten der Spearman-Rho-Analyse als nichtparametrischem Test größere Bedeutung beigemessen werden.

Tabelle 3.3.2.2: Korrelationskoeffizienten nach Spearman-Rho und Pearson für die Zeitdauer der Schluckphasen in den beiden Messgruppen

	Korrelation (Pearson)	Signifikanz (Pearson)	Korrelation (Spearman-Rho)	Signifikanz (Spearman-Rho)
Vorbereitung (ms)	,327 (*)	,019	,274	,052
Transit (ms)	,414 (**)	,001	,253	,053
Reposition (ms)	,799 (**)	,000	,444 (**)	,001
Gesamtdauer (ms)	,859 (**)	,000	,547 (**)	,000

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 signifikant.

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 signifikant.

Mit Blick auf den vorangestellten Kolmogorov-Smirnov-Test sollte für Vorbereitungs- und Transitphase die Pearson-Statistik besonders gewichtet werden, für die Repositions- und Gesamtdauer aber die Spearman-Rho-Statistik. Für $p \leq 0,05$ erreichen dann die Korrelationen zwischen Video- und Audioauswertung aller vier Phasen Signifikanz. Allerdings bleibt der Grad der Korrelation insbesondere bei Vorbereitung und Transit deutlich hinter den Erwartungen zurück.

3.4 – Ergebnisse der Frequenz- und Lautstärkeanalyse

Wegen der zahlreichen Messwerte in diesem Analyseteil und der fraglichen Aussagekraft der Daten (s. 1.3 und 2.4.3) wird hier auf eine detaillierte Deskription der Messdaten verzichtet. Zur schnellen Übersicht werden daher alle Daten gruppenweise in Box-and-Whiskers Plots verglichen und die anschließenden Vergleichstests in einer Tabelle zusammengefasst.

3.4.1 – Diagramme der Frequenz- und Lautstärkeanalyse

3.4.1.1 – Durchschnittliche Signalpegel P_{AVG}

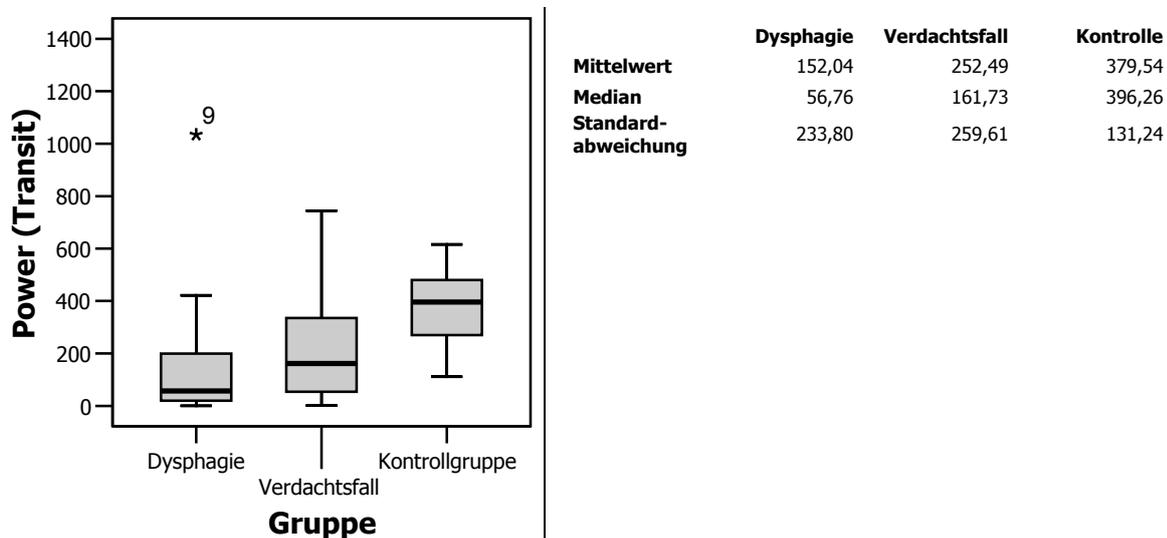


Abb. 3.4.1.1.1: Durchschnittliche Signalpegel P_{AVG} der Transitphase nach Gruppen.

Im Box-and-Whiskers Plot sieht man für Dysphagie- und die Verdachtsfallgruppe eine deutliche Linksverschiebung der Verteilungsmuster, der Median liegt bei beiden weit unter dem Mittelwert. Während sich hier an eine logarithmische Verteilung denken lassen könnte, zeigen sich die Werte der Kontrollgruppe gut normalverteilt, so dass eine Transformation der Werte nicht aussichtsreich scheint. Im Mittel wie im Median sieht man eine klare Tendenz zu leiseren, weniger intensiven Schluckgeräuschen bei den schluckgestörten Patienten. Allerdings wird die hohe Standardabweichung die Definition klarer Beurteilungskriterien schwierig machen.

3.4.1.2 – Maximalbanden $F_{\text{PEAK}1}$ und $F_{\text{PEAK}2}$ des Frequenz-Spektogramms der späten Transitphase

Tabelle 3.4.1.2.1: Werte zu Abb. 3.4.1.2.1 in Hertz (Hz)

	Dysphagie	Verdacht	Kontrolle
Mittelwert	762,22	571,10	375,89
Median	374,14	460,27	287,11
Standard-abweichung	730,20	501,99	272,61

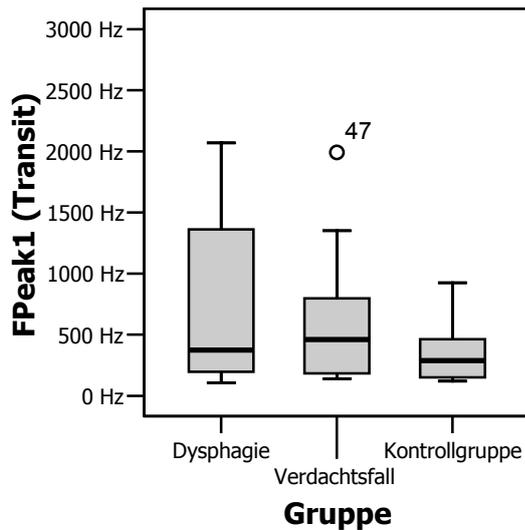


Abb. 3.4.1.2.1: Frequenzkomponente 1 der späten Transitphase in Hertz nach Gruppen.

Tabelle 3.4.1.2.2: Werte zu Abb. 3.4.1.2.2 in Hertz (Hz)

	Dysphagie	Verdacht	Kontrolle
Mittelwert	1067,98	813,39	786,20
Median	725,55	581,40	789,54
Standard-abweichung	821,17	595,96	386,13

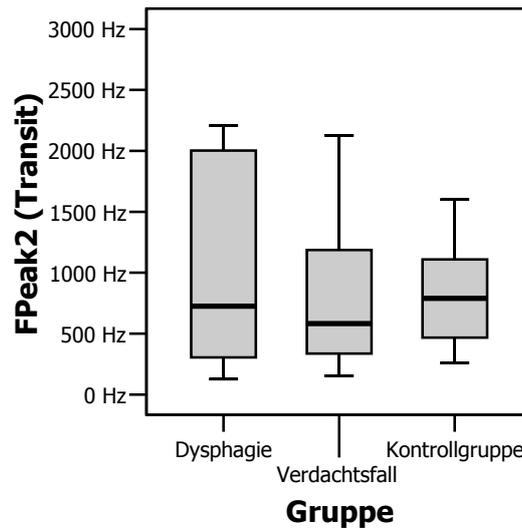


Abb. 3.4.1.2.2: Frequenzkomponente 2 der späten Transitphase in Hertz nach Gruppen.

Bei der Bestimmung der maximalen Frequenzbanden fand sich ein breites Spektrum unterschiedlicher Resultate. Während die (höhere) Frequenzbande $F_{\text{PEAK}2}$ beinahe ein als zufällig zu bezeichnendes Verteilungsmuster aufweist, sieht man bei der (tieferen) Komponente $F_{\text{PEAK}1}$ für die Kontrollgruppe eine Bevorzugung tieferer Frequenzbereiche gegenüber den anderen Gruppen. Die Hoffnung der Identifikation einzelner charakteristischer Frequenzbereiche für die Gruppen hat sich nicht erfüllt. Eine hier zu vermutende tendenzielle Bevorzugung höherer Frequenzbereiche ist hingegen in der nachfolgenden Bandenanalyse besser zu beurteilen. Auch wenn der Mittelwert von $F_{\text{PEAK}1}$ das erhoffte Gruppengefälle Dysphagie (762,22 Hz) > Verdachtsfall (571,10 Hz) > Kontrollgruppe (375,89 Hz) aufweist, ist diese Reihenfolge beim Median nicht vorhanden. In dem definierten Testschema konnte zwischen keiner der Gruppen für einen der beiden Messwerte für $p \leq 0,05$ ein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

3.4.1.3 – Frequenzbanden-Analyse

Tabelle 3.4.1.3.1: Werte zu den Diagrammen 3.4.1.3.1 - 3.4.1.3.10. G1 = Dysphagiegruppe, G2 = Verdachtsfälle, G3 = Kontrollgruppe.

Messwert	Mittelwert			Median			Standard-abweichung		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
$P_{AVG}(F_{101-200})$	1,75	1,88	3,22	1,39	1,61	2,95	1,44	1,50	0,91
$P_{AVG}(F_{201-300})$	1,64	1,47	2,31	1,49	1,57	2,20	1,07	0,80	0,73
$P_{AVG}(F_{301-400})$	1,08	1,15	1,75	1,00	1,38	1,70	0,76	0,56	0,51
$P_{AVG}(F_{401-500})$	0,96	1,13	1,75	0,80	1,06	1,71	0,57	0,62	0,40
$P_{AVG}(F_{501-600})$	0,98	1,01	1,70	0,95	0,98	1,63	0,45	0,46	0,44
$P_{AVG}(F_{601-900})$	0,90	0,96	1,07	0,81	0,96	1,05	0,34	0,33	0,19
$P_{AVG}(F_{901-1200})$	0,85	0,94	0,79	0,86	0,86	0,78	0,23	0,25	0,13
$P_{AVG}(F_{1201-1500})$	0,85	0,95	0,76	0,84	0,77	0,72	0,26	0,38	0,19
$P_{AVG}(F_{1501-1800})$	0,95	0,89	0,63	0,95	0,81	0,64	1,31	0,91	0,94
$P_{AVG}(F_{1801-2100})$	1,21	1,00	0,48	1,08	0,97	0,44	0,65	0,48	0,20

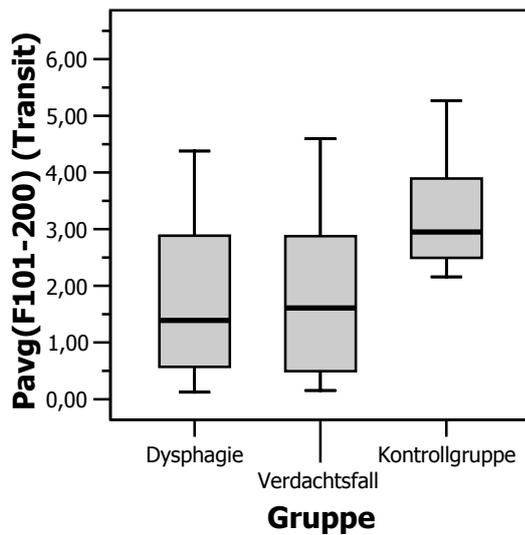


Abb. 3.4.1.3.1: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 101-200 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

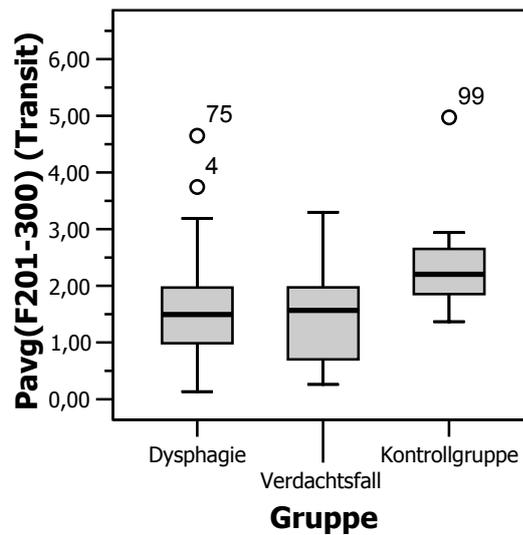


Abb. 3.4.1.3.2: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 201-300 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

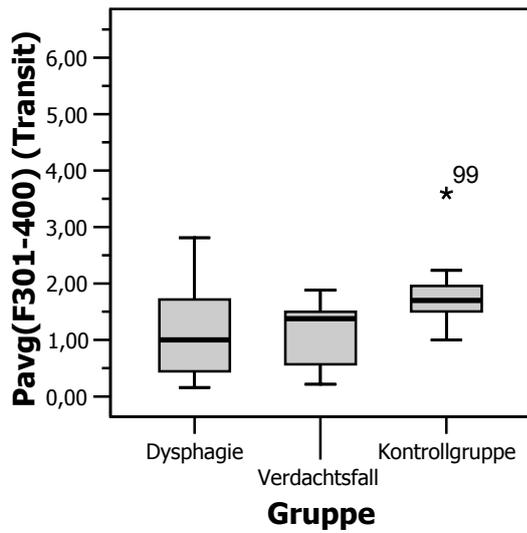


Abb. 3.4.1.3.3: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 301-400 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

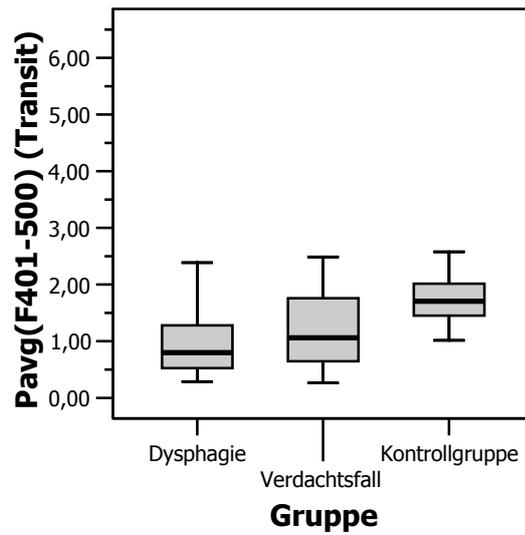


Abb. 3.4.1.3.4: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 401-500 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

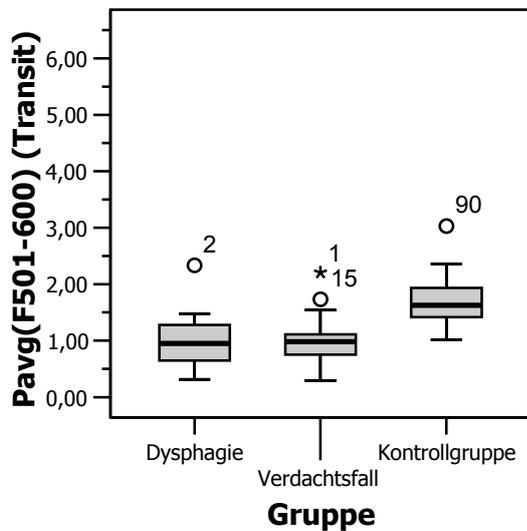


Abb. 3.4.1.3.5: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 501-600 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

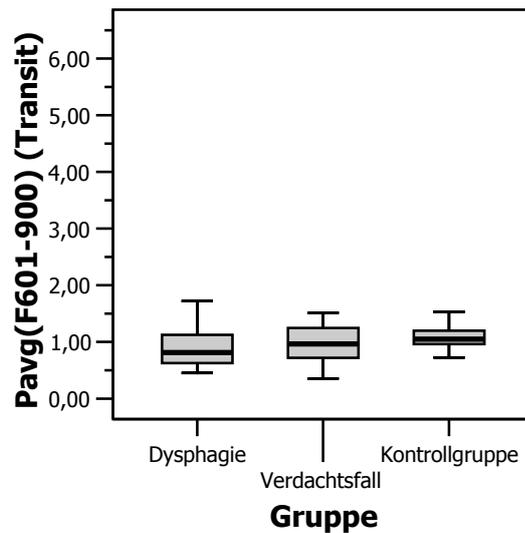


Abb. 3.4.1.3.6: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 601-900 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

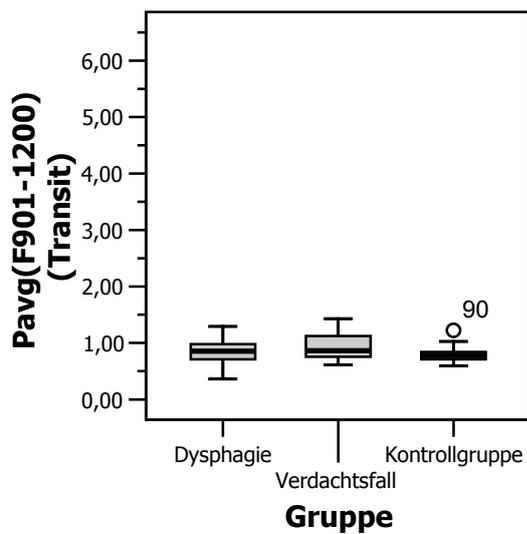


Abb. 3.4.1.3.7: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 901-1200 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

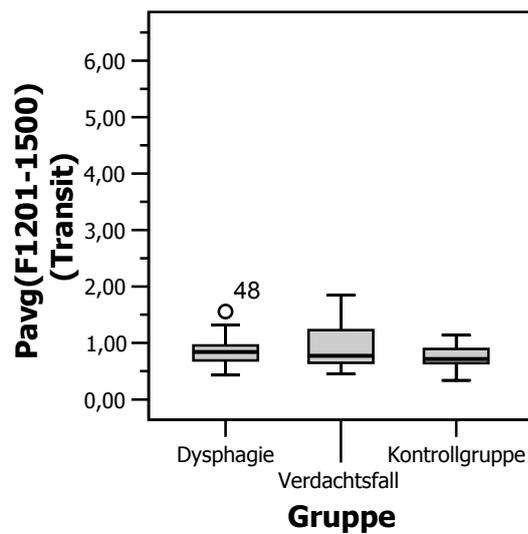


Abb. 3.4.1.3.8: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 1201-1500 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

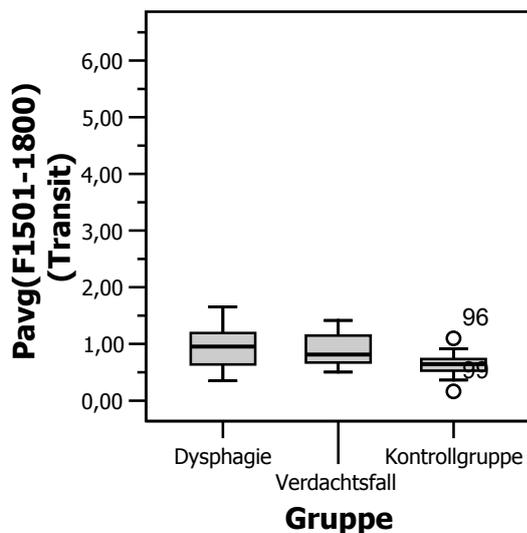


Abb. 3.4.1.3.9: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 1501-1800 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

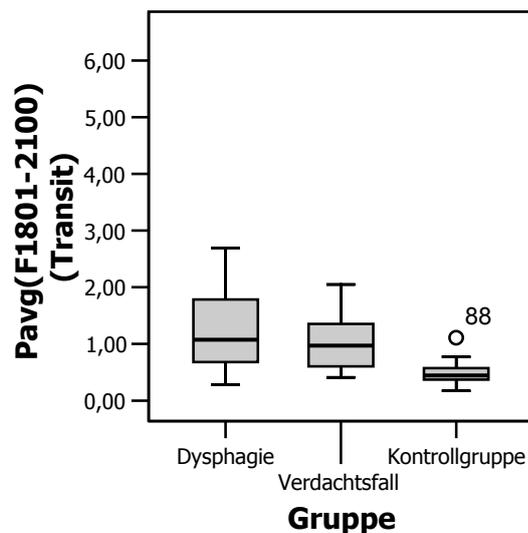


Abb. 3.4.1.3.10: Durchschnittliche Lautstärke für den Frequenzbereich 1801-2100 Hz während der Transitphase, Werte relativ zum durchschnittlichen Signalpegel .

Alle drei Gruppen zeigen ihre stärksten Frequenzanteile im Bereich zwischen 100 und 300 Hz. Während die Dysphagie- und die Verdachtsfallgruppe in ihren Pegeln nun zunächst rasch abfallen, hält die Kontrollgruppe bis 600 Hz ein hohes Pegelniveau. Ab 600 Hz fällt die

Signalstärke der Kontrollgruppe stark ab und erreicht im Bereich 1800-2100 Hz ihren tiefsten Punkt. Im Gegensatz dazu findet sich in den Dysphagiegruppen in den Frequenzbereichen ab 1500 Hz wieder ein dezenter Anstieg der Schalldruckpegel.

In der Zusammenschau der verschiedenen Diagramme fällt auf, dass sich die Werte der Dysphagie- und der Verdachtsgruppe insgesamt sehr gleichförmig bewegen. Beide zeigen stärkere Frequenzanteile als die Kontrollgruppe in den höheren Frequenzbereichen zwischen 1501 und 2100 Hz, während die Kontrollgruppe in den tieferen Bereichen zwischen 101 und 900 Hz vor den anderen Gruppen liegt. Alle Gruppen erreichen ihre höchsten Pegel im Frequenzbereich bis 300 Hz, woraufhin sich im Bereich zwischen 601 und 1500 Hz ein Bereich geringer Schalldruckpegel anschließt, der für die Kontrollgruppe auch im Rest des gemessenen Bereiches anhält. Zwischen der Dysphagie- und der Kontrollgruppe ließ sich in keiner der Messungen ein signifikanter Unterschied feststellen. Den maximalen Unterschied im Mittelwert von 0,21 erreichten diese beiden Gruppen im höchsten gemessenen Frequenzbereich zwischen 1801 und 2100 Hz, im Median fand sich der größte Unterschied in Höhe von 0,38 zwischen 301 und 400 Hz.

Abgesehen von den drei Messwerten $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$ und $P_{AVG}(F_{1201-1500})$ zeigen die sieben anderen Parameter im Mittelwert das erwartete und gewünschte Gefälle, in dem die Verdachtsgruppe sich zwischen Dysphagie- und Kontrollgruppe einordnet. Dies kann darauf hindeuten, dass die Tendenz zu einer Aussage durchaus vorhanden ist und bei einem den Anforderungen dieser Analyse entsprechenden Versuchsaufbau und einer höheren Fallzahl eine Signifikanz zu erreichen wäre.

Bei allen Messwerten außer $P_{AVG}(F_{1501-1800})$ liegt die Standardabweichung der Kontrollgruppe stets unter den Werten der anderen Gruppen, die Werte zeigten hier also eine geringere Streuung.

3.4.2 – Testergebnisse der Frequenz- und Lautstärkeanalyse

Tabelle 3.4.2.1: Endergebnisse der statistischen Analyse aller Messparameter der Frequenz- und Lautstärkeanalyse. K-S = One-Sample-Kolmogorov-Smirnov Test auf Normalverteilung, LS = Levene-Test der Homogenität der Varianzen, GA = ONEWAY-ANOVA über alle Gruppen, KA_x = Kontrast-ANOVA, U_x = Man-Whitney-U-Test, x = Kontrastgruppe (1: Dysphagie- vs. Kontrollgruppe, 2: Dysphagie- vs. Verdachtsfallgruppe, 3: Verdachtsfall- vs. Kontrollgruppe). Alle Angaben als Signifikanz, beim Kolmogorov-Smirnov-Test wird lediglich das signifikanteste Gruppenergebnis dargestellt. Mit (*) markierte Messwerte sind im Sinne des Wertungsschemas (s. 2.4) für $p \leq 0,05$ signifikant (eigentlich signifikante Ergebnisse der ANOVA wurden daher bei nicht normalverteilten Messergebnissen nicht markiert)

Messwert	K-S	LS	GA	KA ₁	KA ₂	KA ₃	U ₁	U ₂	U ₃
P _{AVG}	0,000 (*)	0,041 (*)	0,002	0,000	0,204	0,069	0,000 (*)	-	-
F _{PEAK1}	0,002 (*)	0,000 (*)	0,052	0,022	0,321	0,148	0,259	-	-
F _{PEAK2}	0,018 (*)	0,000 (*)	0,251	0,126	0,199	0,890	-	-	-
P _{AVG} (F ₁₀₁₋₂₀₀)	0,048 (*)	0,029 (*)	0,000	0,000	0,782	0,002	0,001 (*)	-	0,002 (*)
P _{AVG} (F ₂₀₁₋₃₀₀)	0,053	-	0,006 (*)	0,011 (*)	0,543	0,004 (*)	-	-	-
P _{AVG} (F ₃₀₁₋₄₀₀)	0,027 (*)	0,027 (*)	0,001	0,001	0,756	0,001	0,002 (*)	-	0,002 (*)
P _{AVG} (F ₄₀₁₋₅₀₀)	0,113	-	0,000 (*)	0,000 (*)	0,298	0,000 (*)	-	-	-
P _{AVG} (F ₅₀₁₋₆₀₀)	0,042 (*)	0,964	0,000 (*)	0,000 (*)	0,828	0,000 (*)	-	-	-
P _{AVG} (F ₆₀₁₋₉₀₀)	0,200	-	0,130	0,047 (*)	0,512	0,227	-	-	-
P _{AVG} (F ₉₀₁₋₁₂₀₀)	0,133	-	0,081	0,342	0,168	0,026 (*)	-	-	-
P _{AVG} (F ₁₂₀₁₋₁₅₀₀)	0,042 (*)	0,002 (*)	0,100	0,195	0,333	0,067	-	-	-
P _{AVG} (F ₁₅₀₁₋₁₈₀₀)	0,091	-	0,000 (*)	0,000 (*)	0,545	0,003 (*)	-	-	-
P _{AVG} (F ₁₈₀₁₋₂₁₀₀)	0,200	-	0,000 (*)	0,000 (*)	0,158	0,001 (*)	-	-	-

Sechs der Messwerte (P_{AVG}, F_{PEAK1}, F_{PEAK2}, P_{AVG}(F₁₀₁₋₂₀₀), P_{AVG}(F₃₀₁₋₄₀₀), P_{AVG}(F₅₀₁₋₆₀₀), P_{AVG}(F₁₂₀₁₋₁₅₀₀)) erreichten für $p \leq 0,05$ sowohl in der Levene-Statistik als auch im K-S-Test Signifikanz, womit die Nullhypothesen der Homogenität der Varianzen bzw. der Normalverteilung abgelehnt werden mussten. Diese Ergebnisse wurden daher als unparametrisch angesehen und signifikante Gruppenunterschiede der ANOVA anschließend im Mann-Whitney-U-Test überprüft. In der Kontrastierung der Kontrollgruppe gegen die Dysphagiegruppe wurde bei $p \leq 0,05$ insgesamt für neun der Parameter Signifikanz erreicht: P_{AVG}, P_{AVG}(F₁₀₁₋₂₀₀), P_{AVG}(F₂₀₁₋₃₀₀), P_{AVG}(F₃₀₁₋₄₀₀), P_{AVG}(F₄₀₁₋₅₀₀), P_{AVG}(F₅₀₁₋₆₀₀), P_{AVG}(F₆₀₁₋₉₀₀), P_{AVG}(F₁₅₀₁₋₁₈₀₀) und P_{AVG}(F₁₈₀₁₋₂₁₀₀). Bei sieben dieser Parameter fanden sich allerdings für $p \leq 0,05$ auch signifikante Unterschiede zwischen Kontrollgruppe und Verdachtsfallgruppe: P_{AVG}(F₁₀₁₋₂₀₀), P_{AVG}(F₂₀₁₋₃₀₀), P_{AVG}(F₃₀₁₋₄₀₀), P_{AVG}(F₄₀₁₋₅₀₀), P_{AVG}(F₅₀₁₋₆₀₀), P_{AVG}(F₁₅₀₁₋₁₈₀₀) und P_{AVG}(F₁₈₀₁₋₂₁₀₀). Das Frequenzband P_{AVG}(F₉₀₁₋₁₂₀₀) erreichte sogar nur in diesem Kontrast Signifikanz.

Auch wenn einige Male Signifikanz für den Unterschied zwischen Kontrollgruppe und Dysphagiegruppe erreicht werden konnte, ist das Ergebnis dieses Versuchsteils sehr viel

heterogener als im ersten Versuch mit der alleinigen Messung der Schluckdauer. Das klare Gefälle zwischen den drei Gruppen, das in den anderen Versuchen noch zu finden war, fehlt hier. Dabei wäre wegen fraglicher methodischer Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und den beiden anderen Gruppen insbesondere eine Signifikanz zwischen Dysphagie- und Verdachtsfallgruppe wünschenswert gewesen. Ein solcher Unterschied hätte große Relevanz für die Bedeutung der untersuchten Methode und könnte unter den Versuchsbedingungen am ehesten eine valide Aussage treffen. Mit Blick auf die Spalte KA₂ lässt sich schnell erkennen, dass keiner der dreizehn Parameter einen solchen signifikanten Unterschied zwischen der Dysphagie- und der Verdachtsfallgruppe aufweisen kann. In der deskriptiven Statistik, in den Verteilungsdiagrammen und auch in den statistischen Tests sind diese beiden Gruppen also de facto nicht voneinander zu trennen.

3.4.3 – Diskriminantenanalyse der Frequenz- und Lautstärkeanalyse

Durch eine Diskriminantenanalyse sollte herausgefunden werden, welche Parameter für eine Unterscheidung zwischen den Gruppen geeignet sind und welche nicht. Es wurden hierbei jeweils vier Versuche in zwei Durchgängen durchgeführt. Im ersten Durchgang wurde versucht, alle drei Gruppen zu klassifizieren, der zweite Durchgang beschränkte sich auf die einfachere Differenzierung zwischen Kontroll- und Dysphagiegruppe. In jedem Durchgang wurde zunächst eine schrittweise Diskriminantenanalyse mit den Parametern nur aus diesem Versuchsteil durchgeführt. Es folgte eine vollständige Diskriminantenanalyse, wiederum mit den gleichen Parametern. Anschließend wurden nacheinander eine schrittweise und eine vollständige Diskriminantenanalyse unter Einbeziehung der Daten aus der akustischen Analyse durchgeführt. Wegen des kleinen Datenbestandes war es nicht möglich, das Ergebnis an ungetesteten Daten zu validieren, weswegen eine Kreuzvalidierung durchgeführt wurde, bei der jeder einzelne Fall mit einer aus allen anderen Fällen generierten Funktion bestimmt wird. Einschlussbedingung für die schrittweise Methode war eine Signifikanz des F-Wertes für den Ausschluss aus der Wilks-Lambda-Analyse von $\leq 0,1$.

Tabelle 3.4.3.1: Diskriminantenanalyse zur Klassifizierung aller Gruppen. Die Spalte Analyse bezeichnet die Art der Analyse, Verwendete Parameter sind die Parameter, die bei der Auswertung verwendet wurden, Ausgeschlossene Parameter sind Werte, die der Diskriminantenanalyse zwar angeboten, aber von ihr nicht verwendet wurden und die beiden Erfolgsspalten geben die Anzahl der richtigen Klassifizierungen in der normalen und in der Kreuzvalidierten Auswertung in Prozent an. Bei alleiniger Verwendung der Frequenz- und Lautstärkedaten, die in allen Fällen ermittelt werden konnten, betrug N=66, bei Verwendung aller Daten mussten Fälle, bei denen einzelne Phasen nicht vermessen werden konnte, eliminiert werden, dort ist N=49.

Analyse	Verwendete Parameter	Ausgeschlossene Parameter	Erfolg	Erfolg Kreuzvalidierung
Schrittweise, nur Frequenz- und Lautstärkedaten	F_{PEAK2} , $P_{AVG}(F_{101-201})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$	P_{AVG} , F_{PEAK1} , $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$	66,7%	59,1%
Vollständig, nur Frequenz- und Lautstärkedaten	P_{AVG} , F_{PEAK1} , F_{PEAK2} , $P_{AVG}(F_{101-200})$, $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$	-	77,3%	50,0%
Schrittweise, alle Daten	$P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $t(\text{Gesamt})$	P_{AVG} , F_{PEAK1} , F_{PEAK2} , $P_{AVG}(F_{101-200})$, $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$, $t(\text{Vorbereitung})$, $t(\text{Transit})$, $t(\text{Reposition})$	67,3%	63,3%
Vollständig, alle Daten	P_{AVG} , F_{PEAK1} , F_{PEAK2} , $P_{AVG}(F_{101-200})$, $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$, $t(\text{Vorbereitung})$, $t(\text{Transit})$, $t(\text{Reposition})$	$t(\text{Gesamt})^*$	83,7%	55,1%

*) $t(\text{Gesamt})$ wurde wegen starker Korrelation mit der Dauer der einzelnen Phasen eliminiert.

Mit Blick auf die Ergebnistabelle muss gesagt werden, dass die Klassifizierung der Daten eher schlecht gelungen ist. Dies verwundert nicht, da hier auch die Differenzierung zwischen Verdachtsfällen und dysphagiekranken Patienten versucht wurde, obwohl zuvor keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen gefunden werden konnte. Die aus den Messwerten in der Diskriminantenanalyse generierte Funktion hält einer Kreuzvalidierung nicht stand, insbesondere wenn die Verwendung aller Daten forciert wurde: Der zunächst gute Erfolg von 77,3% fällt auf 50,0% ab, bzw. von 83,7% auf 55,1% bei Hinzuziehen der Dauer der einzelnen Phasen. Geht man nach der Kreuzvalidierung, hat das Testset $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$ und $t(\text{Gesamt})$ den besten Erfolg 63,3% erzielt. Die anderen Parameter waren

zu einer weiteren Differenzierung der Daten nicht geeignet. Eine Erfolgsrate von 63,3% ist zwar besser als nach 3.4.2 zu erwarten war, aber für eine tatsächliche Verwendung der Methode in der Praxis viel zu niedrig. In einem zweiten Durchgang wurde daher unter Auslassung der Gruppe der Verdachtsfälle die Diskriminierung zwischen Kontroll- und Dysphagiegruppe versucht.

Tabelle 3.4.3.2: Diskriminantenanalyse zur Klassifizierung zwischen Kontroll- und Dysphagiegruppe. Die Spalte Analyse bezeichnet die Art der Analyse, Verwendete Parameter sind die Parameter, die bei der Auswertung verwendet wurden, Ausgeschlossene Parameter sind Werte, die der Diskriminantenanalyse zwar angeboten, aber von ihr nicht verwendet wurden und die beiden Erfolgsspalten geben die Anzahl der richtigen Klassifizierungen in der normalen und in der kreuzvalidierten Auswertung in Prozent an. Bei alleiniger Verwendung der Frequenz- und Lautstärkedaten, die in allen Fällen ermittelt werden konnten, betrug N=48, bei Verwendung aller Daten mussten Fälle, bei denen einzelne Phasen nicht vermessen werden konnte, eliminiert werden, dort ist N=37.

Analyse	Verwendete Parameter	Ausgeschlossene Parameter	Erfolg	Erfolg Kreuzvalidierung
Schrittweise, nur Frequenz- und Lautstärkedaten	F_{PEAK2f} , $P_{AVG}(F_{101-201})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$	P_{AVG} , F_{PEAK1f} , $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$	85,4%	83,3%
Vollständig, nur Frequenz- und Lautstärkedaten	P_{AVG} , F_{PEAK1f} , F_{PEAK2f} , $P_{AVG}(F_{101-200})$, $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$	-	89,6%	81,3%
Schrittweise, alle Daten	$P_{AVG}(F_{401-500})$, t(Vorbereitung)	P_{AVG} , F_{PEAK1f} , F_{PEAK2f} , $P_{AVG}(F_{101-200})$, $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$, t(Transit), t(Reposition), t(Gesamt)	89,2%	83,8%
Vollständig, alle Daten	P_{AVG} , F_{PEAK1f} , F_{PEAK2f} , $P_{AVG}(F_{101-200})$, $P_{AVG}(F_{201-300})$, $P_{AVG}(F_{301-400})$, $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{501-600})$, $P_{AVG}(F_{601-900})$, $P_{AVG}(F_{901-1200})$, $P_{AVG}(F_{1201-1500})$, $P_{AVG}(F_{1501-1800})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$, t(Vorbereitung), t(Transit), t(Reposition)	t(Gesamt)*	94,4%	80,6%

*) t(Gesamt) wurde wegen starker Korrelation mit der Dauer der einzelnen Phasen eliminiert.

Wird die schwer von der Dysphagiegruppe zu trennende Gruppe der Verdachtsfälle ausgelassen, verbessert sich das Ergebnis deutlich: In einer Kreuzvalidierung konnten alleine durch Verwendung von $P_{AVG}(F_{401-500})$ und t(Vorbereitung) immerhin 83,8% der Fälle korrekt

klassifiziert werden. Alleine aus den Frequenzdaten F_{PEAK2} , $P_{\text{AVG}}(F_{101-201})$, $P_{\text{AVG}}(F_{501-600})$ konnte bereits eine Erfolgsquote von 83,3% generiert werden. Forciert man die Verwendung aller verfügbaren Parameter, so erhält man zwar ein besseres Ergebnis, aber nur scheinbar: In der Kreuzvalidierung gelingt die zuverlässige des nicht in der Funktion enthaltenen Wertes dann seltener. Da die Kreuzvalidierung einen gewissen Ausblick auf die Leistungsfähigkeit der Funktion bei Anwendung an nicht in die Funktion eingeflossene Daten gibt, sollte dieses Ergebnis stärker gewichtet werden als der mitunter sehr artifizielle allgemeine Erfolgswert. Bemerkenswert ist, dass in drei der schrittweise durchgeführten Diskriminantenanalysen die relativen Pegel des Frequenzbereiches 501-600 Hz als nützlicher Parameter zur Klassifizierung eines Datensatzes erkannt wurde.

Die automatische Auswahl der Diskriminanten oder auch die pauschale Verwendung aller denkbaren Diskriminanten ergeben nicht zwingend das beste mögliche Ergebnis. In Anbetracht der Tatsache, dass 17 in Frage kommende Parameter insgesamt 131.071 verschiedene Möglichkeiten der Kombination eröffnen, die hier darzustellen den Rahmen der Arbeit sprengen würde, dürfen die obigen Ergebnisse als beste Annäherung betrachtet werden.

4 – Diskussion

Im Versuch, klare Kriterien für eine rein akustische Analyse des Schluckgeräusches auf eine eventuelle Störung des Schluckvorganges hin zu finden, wurde ein aus verschiedenen Gruppen gewonnener Datensatz von Schluckgeräuschen und endoskopischen Videoclips in drei Untersuchungsgängen aufbereitet und bewertet. Im ersten Schritt sollten Unterschiede in der Dauer verschiedener Phasen des Schluckvorgangs dokumentiert werden. Der zweite Schritt diente der Prüfung dieser Vermessungsmethode und insbesondere der gemachten Einteilung anhand „objektiver“ Daten aus der Endoskopie. Zuletzt wurden zusätzliche Kriterien definiert, um die Geräuschdateien genauer in Hinsicht auf Frequenzgang und Signalpegel zu beschreiben. Da diese letzte Auswertung nicht Bestandteil der Versuchsplanung und somit auch nicht des Aufbaus war, müssen die gewonnen Ergebnisse in eigenen Kapiteln beschrieben werden. Im Folgenden sollen zunächst die Erkenntnisse aus den verschiedenen Versuchsteilen einzeln diskutiert werden, um dann zuletzt eine umfassende Betrachtung der Möglichkeiten dieser Methode zu ermöglichen.

4.1 – Die Akustische Analyse

In der akustischen Analyse wurden die von den Testpersonen beim Schlucken gewonnenen Geräuschaufzeichnungen in drei Phasen aufgetrennt und anschließend phasenweise und in der Summe miteinander verglichen. Das größte Augenmerk muss hierbei dem Vergleich der Dysphagiegruppe mit der Kontrollgruppe gelten. Zwar wäre ein signifikanter Unterschied zwischen der Dysphagie- und der Verdachtsgruppe sicherlich wünschenswert, allerdings lassen sich diese Fälle auch mit aufwendiger Diagnostik wie der Videofluoroskopie oder Videoendoskopie mitunter nur schwer voneinander trennen. Immerhin haben die Patienten einen Schlaganfall erlitten und es war klinisch der Verdacht auf eine Schluckstörung vorhanden. Für diese Patienten besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine Beeinträchtigung der Schluckfunktion, wenn auch ohne subglottische Boluspenetration. So gelten sie im Sinne dieser Arbeit zwar als schluckgesund, können dennoch eine gleichartige, aber nur geringer ausgeprägte Störung des natürlichen Schluckvorganges aufweisen. Alleine aus der Beurteilung des Schluckgeräusches bei diesen diffizilen Fällen eine klare Trennung vornehmen zu können, wäre ein unerwartet großer Erfolg.

In dem Hauptvergleich zwischen Kontrollgruppe und Dysphagiegruppe zeigte sich, dass die Kontrollgruppe im Schnitt alle drei einzelnen Phasen und auch den Gesamtvorgang schneller abschließen konnte als die Dysphagiegruppe. Bei allen vier Messwerten war dieser Unterschied für $p \leq 0,05$ signifikant, in der Vorbereitungsphase und in der Gesamtdauer mit $p \leq 0,001$ sogar hochsignifikant. Bei Betrachtung der einzelnen Werte fiel auf, dass insbesondere die Transitphase beim Schluckgestörten mit 54 ms aber auch deutlich kürzer ausfallen konnte als bei der Kontrollgruppe mit 92 ms. In allen Messparametern zeigten die Daten der Schluckgestörten eine weitaus höhere Spannweite und Varianz als die der Kontrollgruppe. Dieses heterogene Ergebnis könnte ein Hinweis auf unterschiedliche Arten von Schluckstörungen sein, oder auf interindividuell unterschiedliche Folgen einer definierten Schluckstörung. Gleichzeitig erschwert die breite Streuung der Ergebnisse die Definition klarer Grenzen zwischen Schluckgesunden und -kranken.

Zwischen diesen Gruppen erlaubte eine Diskriminantenanalyse eine korrekte Identifizierung von 80,6% der Fälle, ein Cut-Off der Gesamtdauer bei 674 ms (Fälle mit höherer Dauer wurden als dysphag eingestuft) konnte sogar 88,13% der Fälle korrekt identifizieren.

Die Gruppe der Verdachtsfälle ordnete sich in allen Messbereichen zwischen der Kontrollgruppe und der Dysphagiegruppe ein, wenn auch für keinen der vier Messparameter im statistischen Test ein signifikanter Unterschied zwischen der Dysphagiegruppe und der Verdachtsfallgruppe gefunden werden konnte. Da hier die Tendenz sowohl im Mittelwert als auch im Maximalwert in allen Fällen in die erwartete Richtung weist, schluckgestörte Patienten also insgesamt einen langsamer ablaufenden Schluckvorgang aufweisen mit mehr und extremeren Ausreißern nach oben als die Verdachtsgruppe, darf die tatsächliche Signifikanz höher eingeschätzt werden als es bei der gegebenen Gruppengröße statistisch belegbar ist. Die klare Rangordnung zwischen den drei Gruppen unterstreicht hier die These, dass die Schluckdauer mit dem Grad der Schluckstörung korreliert.

Zudem kamen in dieser Testreihe in der Vorbereitungsphase Werte über 255 ms, in der Transitphase Werte über 700 ms, in der Repositionsphase Werte über 460 ms und insbesondere in der Gesamtdauer Werte über 1000 ms ausschließlich in der Gruppe der Schluckgestörten vor. Nimmt man diese Erkenntnis zusammen mit den Fällen, bei denen es während des Schluckens

entweder zur Aspiration mit Hustenreiz oder zur Fortsetzung der Respiration während des Schluckaktes kam, lässt sich für die Messdaten ein Testschema auf das Vorliegen einer Dysphagie mit 100% Spezifität und 50% Sensitivität (positiver prädiktiver Wert: 100%, negativer prädiktiver Wert: 72,5%) konstruieren. Im Testfeld waren Werte oberhalb dieser Grenzen also beweisend für eine tatsächlich vorhandene Dysphagie. Auch ohne Erreichen einer statistischen Signifikanz lässt dies einen tatsächlichen Unterschied zwischen den Schluckgeräuschen der Dysphagie- und der Verdachtsfallgruppe vermuten. Eine Diskriminantenanalyse war in der Lage, in 69,7% der Fälle die Verdachtsfall- von der Dysphagiegruppe zu trennen.

Im Vergleich zwischen der Verdachtsfall- und der Kontrollgruppe wurde ebenfalls für alle Parameter außer der Repositionsphase für $p \leq 0,05$ ein signifikanter Unterschied festgestellt. Dies kann als Bestätigung der These verstanden werden, dass es sich auch bei der Gruppe der Verdachtsfälle zumindest teilweise um Probanden mit eingeschränkter Schluckfunktion handelt. Alternativ muss hier aber auch an andere strukturelle Unterschiede zwischen den Gruppen gedacht werden: Während Alter und Geschlecht in allen Gruppen sehr ähnlich verteilt waren, wurde bei den Probanden der Dysphagie- und der Verdachtsfallgruppe während der Untersuchung eine Bildgebung mittels fiberoptischem Endoskop im Nasopharynx durchgeführt. Auch wenn dies im Selbstversuch keine Änderung der Schluckdauer zur Folge hatte, lässt sich ein Effekt auf das Schluckverhalten hierdurch nicht gänzlich ausschließen.

4.1.1 – Vergleich zu früheren Studien

Der Vergleich dieser Ergebnisse mit der zu dem Thema der Schluckgeräusche vorhandenen Literatur ist schwierig und mit Vorsicht zu bewerten. Wenige Autoren machen explizite Angaben, welche Bereiche der Geräusche vermessen worden sind. So wird das Geräusch der Vorbereitungsphase, ausgelöst durch die Kehlkopfelevation, mitunter auch als zu eliminierendes Störgeräusch interpretiert, während es in dieser Arbeit in die Bewertung eingeflossen ist. Es scheint daher notwendig, die Vergleichbarkeit dieser Studie mit anderen im Einzelnen zu diskutieren.

In einer Studie von Perlman et al. aus dem Jahr 2000 wurde der Schluckvorgang von verschiedenen Bolusarten und -mengen durch die Überwachung von Muskelaktivität, Atmung und Schluckgeräuschen überwacht. Während hier einerseits die durchschnittliche

Gesamtschluckdauer für einen vergleichbaren Bolus (5ml Flüssigkeit) mit 765ms angegeben ist, was deutlich über den 616,6 ms unserer Kontrollgruppe liegt, wird die Dauer des eigentlichen Geräusches nicht eindeutig dokumentiert. Es finden sich allerdings Angaben über ein spätes Geräuschmaximum nach einer Tondauer von 350 ms und über die Wiederaufnahme der Atmung 510ms nach dem ersten Geräusch. Da das Ende der Apnoephase den Schluckvorgang definitiv abschließt, ist diese letztere Angabe wohl als beste Annäherung an die Geräuschlänge zu betrachten. Die Differenz zu den Ergebnissen dieser Studie kann sich aus dem Strukturunterschied der eigentlich ähnlich dimensionierten Kontrollgruppe (die Probanden von Perlman et al. waren zwischen 20 und 29 Jahre alt und somit weitaus jünger als in dieser Studie) erklären, da mit zunehmendem Alter einige am Schluckvorgang beteiligte Abläufe signifikant langsamer geschehen (Logemann 1990), was auch zu einem verlängerten Schluckgeräusch führt (Cichero und Murdoch 2002). Zudem ist nicht eindeutig beschrieben, ob die Geräuschmessung durch Perlman et al. bereits mit dem diskreten Geräusch der Kehlkopfelevation zu Beginn der Vorbereitungsphase begonnen wurde, oder erst zu Beginn der akustisch intensiveren Transitphase, was nach den Ergebnissen dieser Studie einen Unterschied von 146,5ms verursachen würde. Das untere 95%-Konfidenzintervall der Schluckdauer lag in unserer Studie bei 560,1ms, bei Perlman et al. finden sich hierzu keine Angaben. So ist letztlich nicht auszuschließen, dass überhaupt kein gesicherter Unterschied zwischen den Ergebnissen besteht. Neben der Vermessung der Dauer und Korrelation einzelner Ereignisse machten Perlman et al. auch die allgemeine Beobachtung, dass auf einen Schluck immer eine Expiration folge. Tatsächlich scheinen viele Menschen instinktiv zu einer postdeglutiven Expiration zu neigen. Andererseits kann jeder leicht ausprobieren, dass es ebenso gut möglich ist, nach dem Schluckvorgang eine Weile nicht zu atmen oder auch sofort eine Inspiration durchzuführen. Auch wenn die Respiration nicht Gegenstand der vorliegenden Studie war, konnten grundsätzlich in allen Gruppen alle drei denkbaren Verhaltensweisen (Inspiration, Expiration und Atempause) nach einem Schluckvorgang mit einer gewissen Regelmäßigkeit beobachtet werden (Perlman et al. 2000).

Eine ältere Studie von Takahashi et al. aus dem Jahre 1994 beschäftigte sich ebenfalls mit Schluckgeräuschen am gesunden Probanden. Während die Bolusmenge mit 5ml Flüssigkeit etwa mit unserer Studie vergleichbar war, ist auch hier die Untersuchungsgruppe mit einem Durchschnittsalter von 32,4 Jahren deutlich jünger als in der vorliegenden Studie. Wenn auch

klare Aussagen zur Interpretation der Dauer der aufgezeichneten Schluckgeräusche bei Takahashi et al. fehlen, lässt sich von der dort dargestellten Abbildung 2 folgern, dass ein ähnliches Auswertungsschema wie in dieser Studie verwendet wurde. Takahashi et al. kommen zu einer durchschnittlichen Schluckdauer von 520 ms, was deutlich unter dem Ergebnis unserer Kontrollgruppe liegt. Auch hier kann das Alter ursächlich für den Unterschied zwischen den Studien sein. Das obere 95%-Konfidenzintervall bei Takahashi et al. liegt bei 590ms und somit im 95%-Konfidenzintervall der Kontrollgruppe der vorliegenden Studie. Gut denkbar ist also auch, dass ein tatsächlicher Unterschied zwischen den Ergebnissen gar nicht besteht (Takahashi et al. 1994).

1997 führten Boiron et al. eine umfassende Studie mit dem Ziel durch, den Einfluss von Bolusvolumen und –konsistenz auf das Schluckgeräusch zu quantifizieren und rhythmische Charakteristiken bei mehreren Schluckvorgängen in direkter Folge zu identifizieren (Boiron et al. 1997). Die Kontrollgruppe war dabei mit durchschnittlich 21,5 Jahren deutlich jünger als in dieser Studie. Auch Boiron et al. nutzten ein handelsübliches Kontaktmikrofon, mit einem Bügel lateral unterhalb des Schildknorpels befestigt, zur Signalaufnahme. Deutliche Diagramme oder Texterläuterungen, welche Signalanteile in die Auswertung miteinbezogen wurden, finden sich bei Boiron et al. allerdings nicht. Für einen 5ml Wasserschluck stellten Boiron et al. eine durchschnittliche Schluckdauer von 650 ± 80 ms fest, was gut im Bereich der 616,6 ms aus dieser Studie liegt.

Auch Cichero und Murdoch suchten in einer groß angelegten Studie aus dem Jahre 2002 mit insgesamt 59 Probanden unterschiedlicher Altersgruppen nach typischen Eigenschaften des menschlichen Schluckgeräusches (Cichero und Murdoch 2002). Zwar beschreiben Cichero und Murdoch im Text ihre Auswertungsmethode, allerdings ist in Ermangelung eines Diagrammbeispiels ein akkurater Vergleich des gemessenen Intervalls mit den Ergebnissen aus dieser Studie kaum möglich. An einer Stelle findet sich die Angabe, man habe das Schlucksignal kürzer interpretiert als in der weiter oben zitierten Studie von Takahashi et al., was möglicherweise ein Hinweis darauf sein könnte, dass bei Cichero und Murdoch lediglich das Signal der Transitphase vermessen wurde. Wenn von einem Probanden mehrere verwertbare Schlucksignale vorlagen, so wählten Cichero und Murdoch für ihre Auswertung das beste Signal aus. Es scheint nahe liegend, dass bei einer solchen subjektiven Auswahl dem anschaulichsten,

also dem breitesten und intensivsten Signal der Vorzug gegeben wird, der effektive Durchschnitt der Dauer gegenüber dem tatsächlichen nach oben verschoben wird. Für die mit dieser Studie vergleichbare Altersgruppe über 60 Jahren stellen Cichero und Murdoch bezüglich der Dauer des Schluckgeräusches einen nur in einem Diagramm abgebildeten und nicht näher bezifferten Wert zwischen 500 und 600 ms fest. Während dieses Ergebnis ganz gut der in der vorliegenden Studie festgestellten durchschnittlichen Gesamtschluckdauer von 616,6 ms entspricht, wäre es allein für die Transitphase ein extrem hohes Ergebnis, welches nur aus der von Cichero und Murdoch vorgenommenen Selektion kaum zu erklären wäre.

Die älteste für diese Arbeit recherchierte und wohl auch meistzitierte Studie zu den Geräuschen beim menschlichen Schluckvorgang stammt von Mackowiak et al. aus dem Jahre 1967. Mackowiak et al. zeichneten dabei Schluckgeräusche mit Hilfe eines Kontaktmikrofons lateral der Mittellinie auf und unterzogen die gewonnenen Daten einer detaillierten Analyse. Leider fehlen in der kurzen Veröffentlichung genaue Angaben über die Kontrollgruppe (es wird lediglich angegeben, dass es sich um gesunde Erwachsene gemischten Geschlechtes handelte). Die Bolusgröße war in der Studie von Mackowiak et al. nicht normiert. Als Bolus dienten Speichel („trockenes Schlucken“) oder Tee, die Ergebnisse wurden aber nicht nach der Bolusart aufgeschlüsselt. Die von Mackowiak et al. identifizierten Geräuschanteile alpha, beta und delta mit den jeweils dazwischen liegenden stillen Intervallen finden auch heute noch Anwendung bei der Interpretation der Schluckgeräusche. Da wir heute eine bessere Vorstellung von den Ursachen für die verschiedenen Geräuschanteile haben, wurde für die vorliegende Studie allerdings eine stärker an der Physiologie orientierte und zugänglichere Nomenklatur verwendet. Die Vorbereitungsphase unserer Studie entspricht dabei dem Alpha-Geräusch zusammen mit dem $\alpha\beta$ -Intervall aus der Studie von Mackowiak et al., die Transitphase dem Beta-Geräusch und die Repositionsphase dem $\beta\delta$ -Intervall zusammen mit dem Delta-Geräusch. Es lässt sich spekulieren, ob Mackowiak et al. wie in jüngsten Ergebnissen gezeigt (Kley und Biniek 2005) ebenfalls ein Gamma vermuteten, aber nicht publiziert haben; dies würde jedenfalls den Sprung von Beta nach Delta in ihrer Nomenklatur erklären. So ergibt sich bei Mackowiak et al. für die Vorbereitungsphase eine durchschnittliche Dauer von 150-200 ms, für die Transitphase 150-200 ms, für die Repositionsphase 300-400 ms und entsprechend für die Gesamtdauer 600-800 ms. Diese Ergebnisse liegen somit sämtlich innerhalb des 95%-Konfidenzintervalls der entsprechenden Ergebnisse der vorliegenden Studie. Die deutlichste Abweichung lässt sich bei

der Repositionsphase verzeichnen, die bei uns einen Mittelwert von 271,4 ms mit einem oberen 95%-Konfidenzintervall von 300,9 ms erreichte und damit die 300-400 ms aus der Veröffentlichung von Mackowiak et al. nur knapp erreicht. Dieser eventuelle Unterschied kann der unterschiedlichen Bolusart und dem bei Mackowiak et al. nicht normierten Bolusvolumen geschuldet sein, denn beide Parameter verursachen signifikante Unterschiede bei der Geräuschkdauer beim Schlucken (Boiron et al. 1997). Da in der Studie von Mackowiak et al. Angaben über das Alter der Probanden fehlen, kann auch hierin wiederum ein Grund für abweichende Ergebnisse liegen.

Kürzlich erschien die aktuellste vergleichbare Studie von Kley und Biniek (Kley und Biniek 2005). In dieser Studie wurden ebenfalls gesunde und schluckgestörte Probanden mit der gleichen Methode auf Unterschiede im Schluckgeräusch untersucht, zur Identifizierung der Ursachen für die verschiedenen Geräuschmomente wurden dort Bilder aus einer videofluoroskopischen Untersuchung herangezogen. Die hauptsächlich männliche Kontrollgruppe mit gesunden Probanden zwischen 32 und 54 Jahren ist strukturell allerdings deutlich unterschiedlich von der Kontrollgruppe dieser Arbeit. Insbesondere das unterschiedliche Bolusvolumen von 10 ml lässt signifikante Unterschiede im Ergebnis erwarten (Boiron et al. 1997). In die Gruppe der Dysphagiepatienten wurden bei Kley und Biniek auch Patienten mit rein motorischer Schluckstörung wie Amyotropher Lateralsklerose (ALS) und Myasthenia Gravis aufgenommen. Da es zum jetzigen Zeitpunkt lediglich eine weitere veröffentlichte Studie über Schluckgeräusche von dysphagischen Patienten gibt (Lazareck und Moussavi 2004), muss es als unsicher gelten, inwieweit sich die Veränderungen bei rein motorischen Störungen mit denen kombinierter sensomotorischer Störungen, wie sie nach Schlaganfall zu erwarten sind, vergleichen lassen. Kley und Biniek verwenden in ihrer Arbeit eine erweiterte Nomenklatur nach Mackowiak et al., wobei sie bei dem Beta-Geräusch eine genauere Einteilung in einen Beta- und einen Gamma-Komplex vorgenommen haben. Somit kann hier angenommen werden, dass Alpha-Komplex mit $\alpha\beta$ -Intervall von Kley und Biniek der Vorbereitungsphase dieser Studie gleichzusetzen sind, der Beta-Gamma-Komplex entsprechend der Transitphase und das $\gamma\delta$ -Intervall mit Delta-Signal entsprechend der Repositionsphase.

Für ihre Kontrollgruppe fanden Kley und Biniek eine mittlere Gesamtschluckdauer von 691 ms, was etwa 75 ms mehr sind als in dieser Studie verzeichnet wurde. Da die gleiche Methode

verwendet wurde, das niedrigere Alter der Kontrollgruppe von Kley und Biniek eher eine kürzere Schluckdauer hätte erwarten lassen und die Art des Bolus gleich ist, kann hier, einen tatsächlichen signifikanten Unterschied vorausgesetzt, allenfalls das Bolusvolumen in Betracht gezogen werden. In einer anderen Studie verursachte ein Bolusunterschied von 5 ml bereits einen Unterschied von 200 ms in der Gesamtschluckdauer (Boiron et al. 1997). Diese 200 ms entsprechen auch im Ansatz dem Unterschied zwischen den Studien bei der Vermessung der Transitphase: Während Kley und Biniek hier im Durchschnitt auf 391 ms kommen, sind es in der vorliegenden Studie lediglich 223,7 ms. Hierbei muss insbesondere bei der Transitphase ein Unterschied in der Auswertungstechnik als unwahrscheinlich erachtet werden, da es sich um den Bereich maximaler Intensität handelt, der entsprechend auch am einfachsten und zuverlässigsten zu identifizieren ist.

In Anbetracht der geschilderten Unterschiede zwischen den Kontrollgruppen der beiden Studien sind die Ergebnisse in der Beurteilung von schluckgestörten Patienten überraschend ähnlich. Die Vorbereitungsphase erreicht bei Kley und Biniek 187 ms und liegt dicht bei den 209,3 ms aus dieser Studie. Mit 424 ms liegt die Dauer der Transitphase bei Kley und Biniek zwar weiterhin über den Ergebnissen aus dieser Studie, jedoch beträgt der Unterschied nunmehr unter 40 ms. Während Kley und Biniek allerdings keinen signifikanten Unterschied in der Transitphase zwischen der Kontroll- und der Dysphagiegruppe fanden, wurde in dieser Studie für $p \leq 0,05$ Signifikanz erreicht. In Ermangelung eindeutig verwertbarer Daten wurde bei Kley und Biniek auf eine Aussage zum $\gamma\delta$ -Intervall und zur Gesamtdauer verzichtet, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse für die Repositionsphase und die Gesamtdauer nicht möglich ist. Kley und Biniek kommen in ihrer Studie zu der gleichen Aussage bezüglich der stark variierenden Ergebnisse und der hohen Spannweite bei der Gruppe der Schluckgestörten.

Die erste uns bekannte Veröffentlichung zu einer Studie mit dem Versuch, schluckgesunde und schluckgestörte Probanden alleine anhand der akustischen Schlucksignatur zu klassifizieren, stammt von Lazareck und Moussavi aus dem Jahre 2004 (Lazareck und Moussavi 2004). Bei Lazareck und Moussavi wurde bei jungen Erwachsenen zwischen 16 und 24 Jahren mit Schluckstörungen ohne Aspiration in Folge einer Tetraparese oder eines Hirntumors nach Unterschieden zu einer juvenilen Kontrollgruppe von 3-16 Jahren (mit drei Erwachsenen) im akustischen Schlucksignal gefahndet. Die Probanden von Lazareck und Moussavi erhielten drei

verschiedene Bolusarten von jeweils 5ml mit unterschiedlicher Konsistenz (Flüssigkeit, verdünnter Pudding und Pudding) zum Schlucken, die Schluckgeräusche wurden mit einem suprasternal über der Trachea befestigten Akzelerometer aufgezeichnet. Anschließend führten Lazareck und Moussavi eine umfassende Analyse der erhaltenen Tondaten durch, wobei unter anderem die jeweilige Schluckdauer, geteilt in eine Öffnungs- und eine Transmissionsphase, vermessen wurde. Die Ergebnisse der Kontrollgruppe zeigen große Unterschiede nicht nur zu dieser, sondern auch zu allen anderen für diese Arbeit gesichteten Studien: Die Dauer der Öffnungsphase, die nach den Textangaben und Diagrammen mit der Vorbereitungsphase aus dieser Studie bzw. mit dem Alpha-Geräusch zusammen mit $\alpha\beta$ -Intervall in der Nomenklatur von Mackowiak et al. gleichzusetzen ist, für schluckgesunde Probanden wurde von Lazareck und Moussavi mit 400 ± 200 ms festgestellt. Dem gegenüber stehen andere Ergebnisse mit 150-200 ms (Mackowiak et al. 1967), 108 ms (Kley und Biniek 2005) und 146,5 ms aus dieser Studie. Für die Gesamtdauer geben Lazareck und Moussavi einen Zeitraum von 900 ± 400 ms, in anderen Studien zu dem Thema liegen die Ergebnisse mit 510 ms (Perlman et al. 2000), 520 ms (Takahashi et al. 1994), 600-800 ms (Mackowiak et al. 1967), 690 ms (Kley und Biniek 2005) und 616,6 ms in dieser Studie deutlich darunter. Dabei deuten die Angaben von Lazareck und Moussavi zu Methode und Auswertung darauf hin, dass die Repositionsphase gar nicht in die gesamte Schluckdauer mit einberechnet wurde. Zudem stellten Lazareck und Moussavi in ihrer Studie nur bei den Bolusarten verdünnter Pudding und Pudding einen signifikanten Unterschied zwischen gesunden und schluckgestörten Probanden fest, nicht aber für Flüssigkeiten, wie es in dieser Studie der Fall war. Die Ursachen für dieses abweichende Ergebnis müssen diskutiert werden. Andere Verfahren wie die Elektromyographie kommen durch invasive und nicht-invasive Verfahren zur Bestimmung der Muskelaktivitäten ebenfalls auf eine variable Schluckdauer von vergleichbarer Länge: 1035 ms (Crary et al. 2006), 651 – 782 ms (Perlman et al. 1999) und 794 ± 477 ms (Wheeler et al. 2007).

Da die oben genannten Studien weitestgehend darin übereinstimmen, dass die Gesamtdauer des Schluckgeräusches von der Entstehung des ersten bis zum Ende des letzten Audiosignals gemessen wird, kann nahezu ausgeschlossen werden, dass bei Lazareck und Moussavi Anteile des Schluckgeräusches in die Auswertung eingeflossen sind, die in anderen Studien ignoriert wurden. Nimmt man hinzu, dass auch Bolusart und –volumen denen der anderen Studien entsprachen, bleibt im Wesentlichen nur die Betrachtung der Messmethode und der Prüfgruppen.

Von allen in dieser Arbeit zitierten Studien ist die von Lazareck und Moussavi mit Probanden zwischen 6 und 24 Jahren die mit den mit Abstand jüngsten Studienteilnehmern. Für diese Altersgruppe gibt es in der verfügbaren Literatur im Hinblick auf die Dauer des Schluckgeräusches keinerlei Vergleichsdaten. Eine mögliche Erklärung wäre also, dass Kinder und Jugendliche generell ein längeres Schluckgeräusch haben als gesunde Erwachsene.

Entscheidender für das andere Ergebnis von Lazareck und Moussavi scheint aber der Ort der Schallmessung zu sein. Im Gegensatz zu den meisten Studien wurde der Geräuschdetektor nicht am oder neben dem Schildknorpel und somit pharynxnah platziert, sondern suprasternal auf der Trachea. Somit rückt bei der Tonabnahme die Passage des Bolus durch den oberen und auch mittleren Ösophagus in den Vordergrund. Andererseits ist der signalintensive Bolustransit durch den Pharynx an dieser Stelle noch detektierbar (Takahashi et al. 1994). Außerdem ist das durch die Larynxelation verursachte Geräusch an dieser Stelle intensiver als lateral des Schildknorpels (Takahashi et al. 1994). Es lässt sich die Hypothese ableiten, dass bei der Messung von Lazareck und Moussavi neben der Pharynxpassage zusätzlich die Ösophaguspassage des Bolus in die Messung mit eingeflossen ist. Das intensivere Signal der Larynxelation kann durch Detektion sonst wegfallender Geräuschanteile zu einer Verbreiterung des Geräusches geführt haben, was zumindest teilweise die abweichenden Ergebnisse in der Beurteilung der Vorbereitungsphase erklären könnte.

Lazareck und Moussavi fanden aber nicht nur andere Normalwerte für ihre Kontrollgruppe, sondern sie stellten zudem auch keinen signifikanten Unterschied in der Schluckdauer bei Verwendung von Flüssigkeit als Bolus zwischen den Gruppen fest. Für höhere Boluskonsistenzen konnte hingegen eine Signifikanz gefunden werden. Auch diese Aussage steht zunächst im Widerspruch zu der vorliegenden Arbeit. Es muss allerdings bedacht werden, dass sich auch hier der andere Detektionslokalus aus der Arbeit von Lazareck und Moussavi bemerkbar machen kann. Möglicherweise überlagert das Signal der Ösophaguspassage bei Lazareck und Moussavi das Ende der in dieser Studie im Vordergrund stehenden Pharynxpassage. Dies könnte dazu führen, dass die pharyngeale Phase akustisch nicht mehr von der ösophagealen Phase zu trennen wäre. Nach dieser Hypothese hätten Lazareck und Moussavi letztlich eine spätere Phase des Schluckaktes vermessen, was einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie

unzulässig machen würde. Dies ist allerdings zum jetzigen Zeitpunkt eine Spekulation und müsste in weiterführenden Experimenten genauer geklärt werden.

Ein weiterer Unterschied zwischen der Studie von Lazareck und Moussavi und dieser Studie ist die Auswahl der Patienten. Neben den bereits oben erwähnten Unterschieden bezüglich der untersuchten Altersgruppen wurden bei Lazareck und Moussavi auch Patienten mit anderen Formen der Schluckstörung untersucht. Schädigungen unterschiedlicher Mechanismen des Schluckaktes können dann unter Umständen auch zu unterschiedlichen Resultaten führen.

4.1.2 – Fazit der akustischen Analyse

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass zwischen schluckgesunden und dysphagiekranken Patienten ein deutlicher Unterschied in der durch den Schluckakt erzeugten akustischen Signatur liegt.

Insgesamt verursachte eine Störung der Schluckvorganges eine deutliche Verlängerung der Schluckdauer, wobei alle vermessenen Komponenten (Vorbereitungsphase, Transitphase und Repositionsphase) bei der Gruppe der Erkrankten protrahiert waren. Diese Unterschiede waren erwartungsgemäß zwischen der Kontrollgruppe und der Dysphagiegruppe am stärksten ausgeprägt; die Gruppe der Verdachtsfälle scheint diesen Trend zu bestätigen, allerdings ohne dabei Signifikanz zu erreichen. Da die Methode in diesem Auswertungsteil einfach durchzuführen und insgesamt leicht erlernbar ist, stellt sie sich nach den Ergebnissen dieser Studie als nützliches diagnostisches Werkzeug am Krankenbett dar und scheint dank der guten Sensitivität perspektivisch auch als Screeningtool geeignet. Auch wenn dies die an Gruppenstärke bisher größte Studie mit dem Versuch ist, Schluckgeräusche zur Dysphagiediagnostik in der Praxis einzusetzen, erfolgte die Festlegung der Testkriterien retrospektiv, wodurch das Ergebnis in Teilen artifiziell sein kann. Größere klinische Studien mit in der Praxis relevanteren Kontrollgruppen (klinisch und diagnostisch im Hinblick auf Schluckstörungen unauffällige Patienten nach Schlaganfall) wären nun der notwendige nächste Schritt, bevor eine tatsächliche Empfehlung ausgesprochen werden kann.

Der Vergleich mit der vorhandenen Literatur gestaltete sich wegen der allgemeinen Uneinigkeit darüber, welche im Laufe eines Schluckvorganges entstehenden Geräusche noch zum

eigentlichen Schluckgeräusch gehören und welche nicht, und auch wegen der oftmals unpräzisen Angaben, welche Anteile des Schluckgeräusches letztlich vermessen worden sind, recht schwierig. Insgesamt konnte in der Diskussion gezeigt werden, dass die Ergebnisse der Kontrollgruppe dieser Studie mit den Ergebnissen früherer Studien über das gesunde Schluckgeräusch vergleichbar sind. Zwei andere Studien haben sich mit dem Vergleich des Schluckgeräusches von gesunden und dysphagischen Probanden beschäftigt (Kley und Biniek 2005) (Lazareck und Moussavi 2004), die ebenfalls erhebliche Unterschiede zwischen der akustischen Signatur ihrer jeweiligen Prüfgruppen feststellen konnten. Insbesondere im Hinblick auf die Studie von Lazareck und Moussavi muss allerdings angemerkt werden, dass eine gewisse Uneinigkeit über die Art dieses Unterschiedes besteht.

4.2 – Die videounterstützte Analyse

Das Ziel der videounterstützten Analyse war es, die Validität der „blinden“ Einteilung des Schluckgeräusches in seine unterschiedlichen Phasen zu prüfen und weitere Aufschlüsse über die für die verschiedenen Geräuschanteile verantwortlichen Ereignisse zu erhalten. Dabei wurden die Tonaufzeichnungen mit den Videodaten synchronisiert und anschließend Bild für Bild durchgegangen. Anhand der kombinierten Audio- und Videodaten wurden die einzelnen Schluckphasen ein weiteres Mal vermessen und diese Einteilung mit den Ergebnissen aus der rein akustischen Analyse verglichen.

4.2.1 – Ursachen der Geräuschestehung

Aus der eingehenden Betrachtung der Videodaten aller Probanden der drei Gruppen ließen sich zwei Ereignisse identifizieren, die mit größter Regelmäßigkeit ein akustisches Korrelat erzeugten: In der frühen Vorbereitungsphase war ein Geräusch zeitlich mit der Larynxelation korreliert, am Ende des Schluckvorganges fiel ein Geräusch stets mit der Aufrichtung der Epiglottis zusammen. Die eigentliche Transitphase lässt sich in der fiberoptischen transnasalen Laryngopharyngoskopie kurzzeitig nicht einsehen, da das Velum durch Verschluss des Nasopharynx die Optik überdeckt.

Etwa 80 ms nach dem Beginn der Larynxelation kam es zu einem spindelförmigen, dumpfen, meist trockenen Geräusch, welches in der Form dem in der rein akustischen Phase gesuchten alpha-Signal als Beginn der Vorbereitungsphase entsprach. Da zu diesem Zeitpunkt die Epiglottis

noch geöffnet ist und der Bolus noch in der Mundhöhle oder auch im Oropharynx verweilt, konnte aus der endoskopischen Betrachtung kein konkreter Auslöser für dieses Geräusch identifiziert werden. Mögliche Ursachen wären eine Öffnung des oberen Ösophagusmundes oder die mit der Schluckbewegung einhergehende Verschiebung äußerer Strukturen wie Haut, Schildknorpel, Muskulatur und Schilddrüse gegen das Mikrophon. Auch die in der Laryngoskopie nicht beobachtbare Bewegung des Bolus durch die Mundhöhle zum Oropharynx und der entstehende Anpressdruck kommen als Auslöser in Betracht. Diese Beobachtung wurde in ähnlicher Form auch in anderen Studien gemacht. So berichten Cichero und Murdoch in einer Studie aus dem Jahre 1998, dass es etwa 100ms nach der Vorwärtsbewegung der Zungenbasis etwa zeitgleich mit Eintritt des Bolus in den Oropharynx zum Auftreten des ersten Schluckgeräusches kam (Cichero und Murdoch 1998). In ihrem Resümee mutmaßen die Autoren, das Geräusch sei durch den Eintritt des Bolus in den Oropharynx verursacht worden. In einer früheren Studie aus dem Jahre 1994 ordnen Selley et al. das frühe Schluckgeräusch bereits dem Abgang der Bolusspitze durch den oberen Ösophagusmund zu (Selley et al. 1994). Zu diesem Zeitpunkt ist die Epiglottis jedoch bereits gesenkt und die Stimmritze verschlossen. In unserer Untersuchung war dies eindeutig nicht der Fall. Beim Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien (Cichero und Murdoch 1998; Kley und Biniek 2005) und auch mit unseren eigenen Beobachtungen darf angenommen werden, dass Selley et al. mit ihrer Aussage die frühe Geräuschkomponente der Transitphase meinen, die sich in der Endoskopie nicht darstellen ließ. In der ebenfalls 2005 erschienenen Studie von Kley und Biniek wird die Aussage von Cichero und Murdoch bestätigt, dass das frühe Schluckgeräusch mit der Aufwärts-Vorne-Bewegung des Pharynx und gleichzeitig mit dem Boluseintritt in den Oropharynx zusammenfällt (Kley und Biniek 2005).

Nach Abschluss der Boluspassage kam es dann zeitgleich mit der Wiederaufrichtung der Epiglottis zu einem letzten charakteristischen Geräusch, welches das Ende der Repositionsphase markierte. Meist entsprach dieses Geräusch einem markanten pneumatischen Ploppen, ähnlich dem Geräusch des Entkorkens einer Flasche, teilweise entstanden aber auch eher glicksende oder schmatzende Geräusche. In keinem der untersuchten Fälle verlief die Öffnung stumm. Für die unterschiedliche Natur des Geräusches mag es vielfältige Gründe geben, wie zum Beispiel die Geschwindigkeit der Epiglottisaufrichtung oder die Beschaffenheit und Festigkeit der Epiglottis. Kommt es gleich nach Abschluss des Schluckvorganges zur Expiration, so wird die Epiglottis

durch den Luftstrom aus der Horizontalen geschoben und es resultiert eine schnellere Reposition mit einem intensiveren Tonsignal. Bei Probanden, die den Atem nach der Deglutation noch anhalten, kehrt sie deutlich langsamer in ihre Ausgangslage zurück, das Signal ist weniger intensiv und heller. In diesen Fällen gleicht es mehr dem Geräusch sich trennender Schleimhäute wie dem Heben der Zungenspitze vom Mundboden oder dem Öffnen des Mundes mit feuchten Lippen. Auch diese Beobachtung teilen andere Untersuchungen. Cichero und Murdoch stellten in ihrer Studie aus dem Jahre 1998 fest, dass es etwa 10 ms nach dem Beginn der Epiglottisaufrichtung in der Videofluoroskopie zu dem abschließenden Schluckgeräusch kam (Cichero und Murdoch 1998). In ihren Ausführungen schließen sich Cichero und Murdoch ebenfalls der Hypothese an, die Aufrichtung der Epiglottis sei ursächlich für das finale Schluckgeräusch. In einer anderen Studie aus dem Jahre 1994 untersuchten Selley et al. ebenfalls die bei der Deglutation entstehenden Geräusche und verglichen sie mit Bildern einer Videofluoroskopie (Selley et al. 1994). In ihrer Studie findet ein spätes Geräusch im Rahmen der epiglottalen Reposition keine Erwähnung, wie auch schon das frühe Geräusch der Vorbereitungsphase. Es ist zu vermuten, dass Selley et al. sich in ihrer Untersuchung an den Geräuschen der Transitphase orientiert haben. Eine aktuelle Studie aus unserem Hause von Kley und Biniek hat beim Vergleich von synchronisierten Audio- und Bilddaten aus einer Videofluoroskopie identische Schlussfolgerungen gezogen (Kley und Biniek 2005): Auch in ihrer Studie bestand ein reproduzierbarer Zusammenhang zwischen Epiglottisöffnung und delta-Geräusch nach Mackowiak et al., welches in der vorliegenden Studie die Repositionsphase abschließt. Nicht auszuschließen als Geräuschursache sind letztlich auch hier Artefakte, die bei der Bewegung äußerer Strukturen wie Haut und Schildknorpel gegen das Mikrofon entstehen.

4.2.2 – Vergleich der videogestützten Auswertung mit der akustischen Auswertung

Mit einem Kontaktmikrofon am Hals aufgenommene Geräusche sind bei weitem keine idealen Daten wie man sie zum Beispiel ansatzweise bei einem EKG erhält. Das Mikrofon zeichnet neben den gewünschten Geräuschen des Schluckvorgangs auch sämtliche Umgebungsgeräusche wie Stimmen und Tätigkeiten der umstehenden Personen, den Lüfter und die Tastatur des Aufnahme-PCs und vor allen Dingen alle durch Zungen-, Hals- und Kehlkopfbewegungen verursachten Nebengeräusche mit auf. Je nach gewählter Verstärkung und je nach Qualität der Aufzeichnungsanlage und der verwendeten Verbindungskabel entsteht zudem ein nicht gänzlich vermeidbares Grundrauschen in jeder Aufnahme. Obwohl das Schluckgeräusch zwar ein gut

reproduzierbares und in dieser Arbeit ausführlich beschriebenes Schema aufweist, stellt sich die Frage, ob sich ohne optische Hilfe die einzelnen Phasen des Schluckvorgangs tatsächlich in der akustischen Analyse sauber trennen lassen.

Um einen zu starken Wiedererkennungseffekt zu vermeiden, wurden alle Daten daher zunächst „blind“ ausgewertet, die Ergebnisse dieser ersten Analyse wurden in den entsprechenden Abschnitten dieser Arbeit bereits beschrieben und diskutiert. In einem zweiten Durchgang wurden dann wiederum alle Geräusche, diesmal unter Zuhilfenahme der Bilder aus der Endoskopie, neu bewertet. Der Vergleich mit den Daten aus der reinen Audioanalyse sollte nun zeigen, wie sicher die in früheren Studien (Mackowiak et al. 1967; Selley et al. 1994; Cichero und Murdoch 1998) identifizierten Merkmale des Schluckgeräusches mit ihren jeweiligen Ursachen allein aus der Betrachtung des Audiosignals erkannt werden können. In der derzeit verfügbaren Literatur gibt es bisher keine ähnlich angelegten Untersuchungen, wodurch Vergleiche mit den Ergebnissen anderer Autoren hier nicht möglich sind.

Bei der Auswertung zeigte sich, dass alle Phasen unterschiedlich ausgeprägt bei der alleinigen Betrachtung des Audiosignals kürzer eingeschätzt wurden als in der Videobetrachtung. Abgesehen von der Transitphase wies die Videoanalyse auch eine höhere Spannweite der Ergebnisse und höhere Maximalwerte auf. Es konnte zwar für alle vier Phasen des Schluckvorgangs eine Korrelation zwischen den beiden Vermessungsmethoden nachgewiesen werden, das Ergebnis blieb allerdings mit einem Korrelationskoeffizienten von $< 0,6$ für alle Messwerte hinter den Erwartungen zurück. Der wahrscheinlichste Grund hierfür liegt in Untersucherfehlern, ausgelöst durch die Erwartungshaltung aus früheren Messungen. Ausgehend von der „traditionellen“ Einteilung des Schluckgeräusches von Mackowiak et al. wurde für die Vorbereitungsphase eine Dauer von 150-200 ms, für die Transitphase ebenfalls eine Dauer von 150-200 ms und für die Repositionsphase eine Dauer von 300-400 ms erwartet (Mackowiak et al. 1967). Die Ergebnisse aus der videogestützten Vermessung liegen jedoch im Mittelwert und insbesondere bei einigen Ausreißern mit Phasendauern über eine Sekunde deutlich über diesen Werten. Hierdurch wurden in den Erwartungszeitraum fallende Nebengeräusche fälschlich als das phasenbestimmende Signal gewertet. Durch eine zu kurze Beurteilung einer Phase ergibt sich dann teilweise automatisch eine Verlängerung der folgenden Phase, umgekehrt führt eine zu lange Beurteilung einer Phase leicht zu einer Verkürzung in der Einschätzung der folgenden

Phasen. Diese These wird dadurch gestützt, dass die Abweichungen bei der Vermessung der einzelnen Phasen sich nicht addieren (was für die Gesamtdauer eine zu erwartende Spannweite der Differenz von 2,63 s bedeuten würde), sondern in der Summe sogar ein wenig ausgleichen: Die Spannweite der Differenz lag für die Gesamtdauer unter der Spannweite bei der Repositionsphase allein.

Bei der Transitphase wurde in Einzelfällen auch nach abgeschlossenem Bolustransit im Rahmen der Reposition des Pharynx und des Bolusabgangs durch den Ösophagus noch eine starke akustische Aktivität nachgewiesen, die zu einer zu langen Einschätzung der Transitphase führte. In einem Fall blieb die Epiglottis über 2 Sekunden geschlossen. Gegenüber derartigen Extremwerten erwies sich die rein akustische Methode als unsensitiv. Nach der unter 4.2.1 geschilderten Beobachtung, dass der Beginn der Schluckbewegung nur etwa 80 ms verzögert zu einem akustischen Korrelat führt, lässt sich die Abweichung in der Beurteilung der Vorbereitungsphase zwischen den beiden Methoden von 124,9 ms teilweise gut erklären.

Insgesamt waren die Schwierigkeiten bei der Beurteilung der Signale aus der Gruppe der schluckgestörten Patienten ausgeprägter. Wie schon in der Arbeit von Kley und Biniek festgestellt, ist das klassische Muster des Schluckgeräusches hier oftmals so gestört, dass eine Zuordnung zu den einzelnen Phasen mitunter sehr schwer fällt (Kley und Biniek 2005). Diese subjektive Beobachtung bestätigt sich in der Betrachtung des Gruppenvergleiches der Messdifferenz zwischen den beiden Methoden. Abgesehen von der Transitphase war die Abweichung vom Ergebnis der Videoanalyse bei der akustischen Vermessung in der Gruppe der Dysphagiekranken stets größer. Noch deutlicher war dieser Effekt bei der Betrachtung der Spannweite dieser Differenz: Für alle Phasen erreichte die Gruppe der Dysphagiekranken mindestens die doppelte Spannweite der Differenz.

Die Gesamtdauer des Schluckvorganges wurde in 5 von 42 in diese Untersuchung miteinbezogenen Datensätzen überschätzt, was zu falsch positiven Ergebnissen führen kann. Von diesen fünf Fällen gehörten zwei zur Gruppe der Dysphagieerkrankten und drei zur Gruppe der Verdachtsfälle. Alle anderen Einschätzungen der Audioanalyse lagen mehr oder weniger stark unter der Videoanalyse, wodurch falsch negative Ergebnisse verursacht werden können. Nur in einem Fall kam es zu einer schweren Fehleinschätzung des Ergebnisses von mehr als 50%. Eine

Verbesserung in der akustischen Beurteilungsleistung könnte die Spezifität und insbesondere die Sensitivität des akustischen Verfahrens möglicherweise weiter verbessern. Bei einer dann zu erwartenden allgemein höheren Durchschnittsdauer müssten allerdings gegebenenfalls auch die Grenzwerte der Phasendauern für normale Geräusche nach oben angepasst werden, so dass der tatsächliche Effekt einer verbesserten Beurteilung unsicher ist.

4.2.3 – Fazit der videounterstützten Analyse

Nach eingehender Betrachtung von insgesamt 125 Videoclips einzelner Schluckvorgänge und der parallel aufgezeichneten Tonspuren konnte ein wiederkehrendes Muster des Schluckaktes in Bild und Ton identifiziert werden. Am regelmäßigsten fand sich stets als Abschlussignal der Repositionsphase ein mit der Öffnung der Epiglottis assoziiertes Geräusch, welches sich meistens als signalintensives und charakteristisches Ploppgeräusch präsentierte, aber auch die Form dezenterer Schmatz- oder Glickslaute annehmen konnte. Für das frühe Tonsignal der Vorbereitungsphase konnte festgestellt werden, dass es meist etwa 80 ms nach dem Beginn der Pharynxelation vor Eintritt des Bolus in den Oropharynx entstand und häufig von dumpfer, spindelförmiger Natur war. Diese beiden Beobachtungen entsprechen im Wesentlichen früheren Erkenntnissen aus der synchronisierten Betrachtung von Bildern aus einer Videofluoroskopie mit entsprechenden Geräuschaufzeichnungen (Cichero und Murdoch 1998; Kley und Biniek 2005). Die Kenntnis der physiologischen Ursachen für die Schluckgeräusche und die typischen, häufig angetroffenen Merkmale einzelner Komponenten des Schluckgeräusches ist ungemein wichtig für eine positive Identifikation der verschiedenen Phasen des Schluckaktes in einer akustischen Analyse. Die korrekte Bestimmung des frühen und des späten Geräusches alleine gibt sehr guten und zuverlässigen Aufschluss über die Dauer der gesamten pharyngealen Schluckphase. Aktuelle Studien (Lazareck und Moussavi 2004; Kley und Biniek 2005) und auch diese Studie weisen darauf hin, dass die Kenntnis dieser Zeitspanne Hinweise auf eine eventuelle Störung des Schluckvorganges in der pharyngealen Phase liefern kann.

Der Vergleich der videounterstützten Vermessung der Schluckphasen mit der rein akustischen Vermessung zeigte deutlich die Schwächen der alleinigen Geräuschanalyse auf: In Einzelfällen ergaben sich erhebliche Diskrepanzen in der Einschätzung zwischen den beiden Methoden. Seltener als erwartet kamen beide Untersuchungsmethoden zu dem gleichen Ergebnis. Es zeigte sich eine Tendenz der akustischen Methode, die tatsächliche Phasendauer zu unterschätzen. Es

wird vermutet, dass dies an silent ablaufenden Bewegungsphasen, an Nebengeräuschen in aktionsfreien Intervallen und an der Erwartungshaltung des Untersuchers bezüglich der Phasenlänge gelegen hat. Insbesondere Extremwerte mit Phasendauern über einer Sekunde konnten mit der akustischen Methode kaum erkannt werden. Insgesamt waren beide Methoden aber positiv miteinander korreliert, und es konnte nur ein schwerwiegender Fehler der Einschätzung der Gesamtdauer mit über 50% Abweichung vom videoendoskopischen Messwert verzeichnet werden. Im Gruppenvergleich zeigte sich, dass die Dysphagiegruppe in höherem Maße zu kurz eingeschätzt wurde als die Gruppe der Verdachtsfälle. Da im Sinne dieser Studie primär zu lange Geräusche als pathologisch interpretiert werden und somit die zu kurze Einschätzung insbesondere der Signale des Schluckgestörten ein Fehler zu Ungunsten des Erfolges der akustischen Methode ist, bleibt die Validität der Ergebnisse aus diesem Teil der Auswertung (s. 3.2 und 4.1) erhalten.

Weitere Untersuchungen werden zeigen müssen, ob sich dieses Ergebnis durch Schulung, Erfahrung und durch die Erkenntnisse über die gelegentlichen Extremwerte aus dieser Untersuchung verbessern lässt. Auf einen dritten Untersuchungsgang an den gleichen Daten wurde indes wegen der Gefahr der Wiedererkennung der Datensätze und damit der Verzerrung des Ergebnisses verzichtet.

4.3 – Die Frequenz- und Lautstärkeanalyse

Ende des Jahres 2004 erschien eine bereits unter 4.1.1 erwähnte Studie von Lazareck und Moussavi, die bei Kindern und jungen Erwachsenen mit Tetraparese oder Hirntumor mit latenten Schluckstörungen ohne Aspiration nach Unterschieden im Schluckgeräusch zu einer ebenfalls juvenilen Kontrollgruppe suchte (Lazareck und Moussavi 2004). Neben der Dauer der Schluckphasen führten Lazareck und Moussavi eine umfassende Analyse von Signalintensität, Frequenzgang und Signalkomplexität durch. Nach Elimination weniger aussagekräftiger Parameter konnten sie durch eine retrospektiv durchgeführte Diskriminantenanalyse 94% der Probanden korrekt ihrer Gruppe zuordnen. Auch wenn die Methode mit heute verfügbarer Software für eine Bedside-Diagnostik wenig geeignet scheint, da sie relativ komplexe Berechnungen und gute technische Vorkenntnisse voraussetzt, rückt ein derart gutes Ergebnis, so es sich bestätigen lässt, in seiner Aussagekraft nahe an den Goldstandard der Videofluoroskopie heran. Daher wurde eine retrospektive Neuauswertung der für diese Arbeit gewonnen

Schluckgeräusche durchgeführt und nach ähnlichem Schema wie bei Lazareck und Moussavi eine Vielzahl neuer Messwerte zur Beschreibung der Signalintensität und des Frequenzgangs erhoben und anschließend gruppenweise miteinander verglichen. Es muss bei diesem Vorgehen beachtet werden, dass die Datengewinnung zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen war und der unter 2.2.1 beschriebene Versuchsaufbau auf eine ausschließliche Vermessung der Signaldauer ausgelegt war, was das Ergebnis dieses zusätzlichen Studienteils fehleranfällig macht (siehe auch 1.2.6.1 und 2.4.3).

Das Ergebnis ist ambivalent. Wie im ersten Analyseteil konnte für keinen der dreizehn ermittelten Parameter ein signifikanter Unterschied zwischen der Verdachtsfall- und der Dysphagiegruppe gefunden werden. Bei einigen der Parameter (P_{AVG} , F_{PEAK1} , F_{PEAK2} , $P_{AVG}(F_{401-500})$, $P_{AVG}(F_{1801-2100})$) konnte das erwartete Gefälle, in dem sich die Verdachtsgruppe zwischen den beiden anderen Gruppen einsortiert, erkannt werden. Allerdings gelang es für keinen der Parameter, Bereiche zu identifizieren, die die anderen Gruppen nicht erreichten; dies war in der Untersuchung der Geräuschkdauer für sämtliche der Messwerte gelungen. Im Vergleich der Dysphagiegruppe mit der Kontrollgruppe erreichten die Unterschiede von neun der dreizehn Parameter für $p \leq 0,05$ Signifikanz, jedoch wurde auch bei sieben dieser Messwerte ein ähnlich signifikanter Unterschied zwischen Kontrollgruppe und Verdachtsfällen festgestellt.

Im Testfeld waren die Signalpegel in der Dysphagiegruppe mit einem durchschnittlichen Signalpegel P_{AVG} von 152,04 gegenüber 252,49 bei den Verdachtsfällen und 379,54 bei der Kontrollgruppe deutlich gemindert. Die schlecht normalverteilten Daten erreichten im Mann-Whitney-U-Test zwischen Kontroll- und Dysphagiegruppe für $p \leq 0,001$ einen signifikanten Unterschied. Zwischen der Dysphagie- und der Verdachtsfallgruppe wurde Signifikanz indes knapp verfehlt. Da ein konstanter Aufnahmepegel nicht zum Versuchsaufbau gehörte, ist die Signalintensität von allen Messwerten dieser Studie der für strukturelle Fehler anfälligste Wert. Lazareck und Moussavi kommen interessanterweise in ihrer Studie zu dem gegenteiligen Schluss: Dort zeigten schluckgestörte Probanden ein intensiveres Schluckgeräusch (Lazareck und Moussavi 2004). Ein festgeschriebener Aufnahmepegel gehörte bei Lazareck und Moussavi zur Versuchsanleitung, so dass sich der Unterschied aus der unterlegenen Methode unserer Studie erklären könnte. Denkbar wäre auch, dass das jüngere Alter und die andere Ursache der

Dysphagie in der Studie von Lazareck und Moussavi gegenüber unserer Studie für diesen Unterschied verantwortlich sind.

Um Folgefehler aus der fraglichen Pegelmessung zu reduzieren, wurden die anschließend vermessenen Frequenzbanden in Relation zum Gesamtsignal gesetzt. Hier zeigte sich in allen Gruppen ein maximaler Signalanteil im Bereich zwischen 100 und 300 Hz. Während sich bei der Kontrollgruppe ein Bereich hoher Pegel von hier aus noch weiter bis 600 Hz erstreckte, fielen die anderen beiden Gruppen hier zunächst ab und zeigten einen zweiten Bereich hoher Pegel zwischen 1500 und 2100 Hz. Nach der 600 Hz-Senkung fanden sich bei der Kontrollgruppe keine Bereiche überdurchschnittlicher Schalldruckpegel mehr. Bei der Bestimmung der beiden Maximalfrequenzen im Bereich maximaler Schalldruckpegel der späten Transitphase konnte für abnorme Schluckgeräusche ebenfalls eine Bevorzugung hoher Frequenzen festgestellt werden. Für Kontrollgruppe, Verdachtsfälle und Dysphagiegruppe zeigte sich bei der tieferen Frequenz F_{PEAK1} ein Mittelwert von 376 Hz, 571 Hz und 762 Hz und bei der höheren Frequenz F_{PEAK2} 786 Hz, 813 Hz und 1068 Hz. Diese einzelnen Frequenzspitzen zeigten eine extreme Streuung mit Standardabweichungen, die nahezu den Mittelwert erreichten. Auch wenn der Mittelwert klare Unterschiede zwischen den Gruppen zeigen mag, darf die praktische Relevanz dieser Bestimmung für Methode bei einer solchen Variabilität angezweifelt werden.

Der Vergleich der Ergebnisse der Frequenzanalyse mit den Ergebnissen anderer Studien ist schwer durchzuführen. Eine Frequenz, die gerade noch einen Signalbereich dominierte, kann nur Millisekunden später verschwinden. Kurze, intensive Frequenzbereiche haben nahezu keinen Einfluss auf eine über die Zeit gemittelte Durchschnittsfrequenz. Eine Summierung der Einzelfrequenzen über die Zeit führt zur Überinterpretation von Störwellen und Hintergrundrauschen, die in einem Frequenzbereich einen konstanten Pegel verursachen und in der Summe sehr intensiv wirken, obwohl sie eigentlich kaum hörbar waren. Aus der Erfahrung dieser Untersuchung halten wir die Frequenzbandenanalyse über die gesamte Transitphase, wie sie schon von Lazareck und Moussavi durchgeführt wurde für beste Näherungsweise an das Problem. Sie ist zwar blind für einzelne Geräuschspitzen und anfällig für Störfrequenzen, kann das Signal aber insgesamt gut und vor allen Dingen reproduzierbar beschreiben.

Schon die Erstbeschreiber des Schluckgeräusches Mackowiak et al. maßen nicht nur die Dauer des Schluckgeräusches und nahmen eine Einteilung in verschiedene, reproduzierbare Geräuschemuster vor, sondern interessierten sich auch für den Frequenzgang der akustischen Signatur (Mackowiak et al. 1967). Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass beim Schlucken von Wasser ein Signal mit einem Schwerpunkt zwischen 400 und 600 Hz entsteht, welches sich nach knapp 300 ms auf ein Niveau oberhalb von 1000 Hz anhebt. Da in der vorliegenden Arbeit alle Werte über die Zeit gemittelt wurden, ist ein direkter Vergleich nur sehr bedingt möglich. Während die durchschnittlichen Frequenzkomponenten F_{PEAK1} und F_{PEAK2} aus unserer Untersuchung sich grob in den von Mackowiak et al. beschriebenen Frequenzgang einordnen lassen, steht die Frequenzbandenanalyse mit ihrem Maximum zwischen 100 und 300 Hz in klarem Widerspruch zu dieser Beobachtung. Unterschiedliche Messtechnik, abweichende Struktur der Prüfgruppen, verschiedene Auswertungsverfahren und Störfrequenzen sind einige der möglichen Gründe hierfür.

In einer Studie aus dem Jahre 1994 verfolgten Takahashi et al. den Ansatz, in einem kleinen Zeitfenster von 100 ms eines intensiven Signalbereichs zwei Frequenzspitzen aufzusuchen, also ähnlich, wie auch in dieser Studie zur Ermittlung von F_{PEAK1} und F_{PEAK2} vorgegangen wurde (Takahashi et al. 1994). Auch hier ist effektiv keine Vergleichbarkeit gegeben, da das Prüffenster mit 100 ms zwanzigfach größer war als in unserer Studie, eine andere FFT-Auflösung verwendet wurde und die erste Frequenzkomponente unterhalb von 110 Hz gesucht wurde; diese Frequenzen lagen in der vorliegenden Studie im Rauschbereich und waren deswegen herausgefiltert worden. Die so von Takahashi et al. ermittelten Durchschnittsfrequenzen 46,7 Hz und 622,4 Hz finden entsprechend kein Korrelat in den in dieser Studie ermittelten Ergebnissen.

Eine andere Studie aus dem gleichen Jahr von Hamlet et al. stützt sich auf eine Technik, die der Bandenanalyse in dieser Arbeit ähnlicher ist (Hamlet et al. 1994). In ihrer Studie suchten Hamlet et al. 100 ms lange Zeitfenster charakteristischer Stellen des Schlucksignals auf und bestimmten im Spektrogramm zwischen 200 und 4000 Hz alle 200 Hz den jeweiligen Pegel. Diese Bandenanalyse bietet eine deutlich bessere Vergleichbarkeit als gemittelte Einzelfrequenzen. Mit einem 100 ms-Fenster auf der Transitphase haben Hamlet et al. knapp die Hälfte der Transitphase vermessen, während in dieser Studie die gesamte Dauer in die Auswertung mit eingeflossen ist. Hamlet et al. kommen zu dem Schluss, dass nach einem Maximum im tiefen Frequenzbereich

unterhalb von 600 Hz die Frequenzintensität kontinuierlich abnimmt und spätestens bei 3000 Hz ansatzweise Rauschniveau erreicht. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen dieser Studie überein.

Wie schon bei der Auswertung von P_{AVG} kommen Lazareck und Moussavi auch in der Frequenzanalyse in ihrer Auswertung zu einem dieser Studie diametral entgegengesetzten Ergebnis (Lazareck und Moussavi 2004). Sowohl bei der Bestimmung einzelner Maximalfrequenzen wie auch in der Frequenzbandenanalyse erkennen sie bei schluckgestörten Probanden eine deutliche Verschiebung zu Gunsten tieferer Frequenzen. Die möglichen Gründe hierfür entsprechen im Wesentlichen den weiter oben diskutierten Gründen für die unterschiedlichen Ergebnisse in der Lautstärkemessung.

Zuletzt wurde die Wertigkeit der neuen Messwerte bei der Unterscheidung zwischen normalen und abnormen Schluckgeräuschen untersucht. Verschiedene Versuche einer Diskriminantenanalyse zwischen Kontroll- und Dysphagiegruppe ergaben bei Verwendung der Parameter F_{PEAK2} , $P_{AVG}(F_{101-201})$ und $P_{AVG}(F_{501-600})$ mit 83,3% korrekter Klassifizierungen in der Kreuzvalidierung das aus den Daten dieses Versuchsteils bestmögliche Ergebnis. Wurden der Diskriminantenanalyse zusätzlich die Messdaten aus der akustischen Einteilung des Schlucksignals zur Verfügung gestellt, die auch bei Lazareck und Moussavi zur verwendet worden sind, so konnte mit den Parametern Vorbereitungsdauer und $P_{AVG}(F_{401-500})$ das Ergebnis noch ein wenig auf 83,8% korrekter Klassifizierungen verbessert werden. Dieses Ergebnis liegt deutlich unter den 94% von Lazareck und Moussavi. Ein direkter Vergleich dieses Ergebnisses mit unserem ist mit Vorsicht zu genießen, da Lazareck und Moussavi in ihrer Arbeit keine Angaben über die Art der Diskriminantenfunktion machen und das von ihnen verwendete Testverfahren daher von dem in dieser Arbeit verwendeten Test differieren könnte. Lazareck und Moussavi wendeten die berechnete Diskriminantenfunktion zunächst auf die einzelnen Schluckgeräusche an und bestimmten die Gruppenzugehörigkeit des Probanden aus der häufigsten Klassifizierung der zugehörigen Schluckgeräusche. In dieser Studie wurden hingegen die Daten der Schluckgeräusche im Voraus gemittelt, so dass sich diese Analyse über zwei Ebenen nicht nachbilden ließ.

Alleine die Betrachtung der Gesamtdauer konnte in der vorliegenden Studie bereits 88,1% aller Daten korrekt klassifizieren, so dass letztlich die Vielzahl neuer Messwerte keine Verbesserung des Gesamtergebnisses brachte. Ohne eine solche Verbesserung ist allerdings der ungleich höhere Aufwand dieser Auswertungsmethode schwer zu rechtfertigen.

Vor einer Beurteilung dieser Methode und ihrer Ergebnisse muss allerdings noch einmal darauf hingewiesen werden, dass diese Form der Auswertung retrospektiv durchgeführt wurde und im ursprünglichen Versuchsaufbau nicht vorgesehen war. Das für die Aufzeichnung verwendete Mikrofon wurde nicht auf möglichst günstige, flache Frequenzeigenschaften hin ausgewählt. Eine fixe Einstellung der Verstärkerleistung war nicht Bestandteil des Protokolls und einzelne Untersucher könnten diese von Fall zu Fall geändert haben, um eine bessere Aussteuerung und Messbarkeit des Schlucksignals zu erreichen. Solch ein Vorgehen würde insbesondere P_{AVG} stark entwerten, könnte aber auch durch eventuelle unterschiedliche Resonanzeigenschaften des Mikrofons in den verschiedenen Frequenzbereichen eine Verzerrung des gesamten Frequenzspektrums mit sich bringen und damit die Verwertbarkeit aller dreizehn in diesem Versuchsteil erhobenen Parameter verringern. Ein Hintergrundrauschen, das zum Erkennen und Vermessen einer Schluckphase noch akzeptabel ist, kann gewaltigen Einfluss auf eine Frequenzbandenanalyse haben. Zudem konnte einer der Messwerte, das wave dimension trajectory (WDT) aus der Studie von Lazareck und Moussavi, in der verwendeten Software nicht nachgebildet werden. Dieser Parameter zeigte bei Lazareck und Moussavi signifikante Unterschiede zwischen gesunden und kranken Probanden in der Öffnungsphase bei Flüssigkeiten und im Gesamtsignal unter Verwendung angedickter Flüssigkeit. Ihre besten Ergebnisse erhielten Lazareck und Moussavi bei Verwendung von dicker Flüssigkeit (verdünnter Pudding), während in unserer Studie Wasser verwendet wurde.

Insgesamt kann die Feststellung von Lazareck und Moussavi, dass eine Schluckstörung regelmäßig eine messbare Veränderung des Schluckgeräusches in allen drei Dimensionen (Dauer, Frequenz, Schalldruckpegel) mit sich bringt, bestätigt werden. In unserer Studie erlaubte die Betrachtung der zeitlichen Ausdehnung die beste Klassifizierung zwischen normalen und abnormen Schluckvorgängen. Ein direkter Ergebnisvergleich dieser Studie mit der Studie von Lazareck und Moussavi war aufgrund einiger Unterschiede in der Auswertungs- und Erfassungsmethode allerdings nicht möglich.

4.4 – Zusammenfassung und Ausblick

Mit insgesamt 66 Probanden ist die vorliegende Arbeit eine der derzeit größten Studien über die Verwendung von aufgezeichneten und nach objektivierbaren Kriterien ausgewerteten Schluckgeräuschen zur Erkennung von Schluckstörungen. In drei Versuchsteilen wurden die Dauer, der Schalldruckpegel und der Frequenzgang der Schluckgeräusche kritisch auf ihren Wert für diese Methode geprüft und mit den Ergebnissen aus anderen Studien und anderen Untersuchungsformen verglichen. Mit Hilfe der hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurde dann versucht, charakteristische Eigenschaften des Schlucksignals für die drei verschiedenen Testgruppen (Personen ohne Schluckstörungen, Personen mit klinischen Auffälligkeiten ohne Aspiration oder Penetration nach Schlaganfall, Personen mit Aspiration oder Penetration nach Schlaganfall) zu identifizieren.

Bei knapp 75% aller Probanden konnte die klassische Abfolge von drei Geräuschanteilen, aus denen sich das Gesamtsignal zusammensetzt, nachvollzogen werden. Daraus gelang regelmäßig eine Einteilung des Schluckgeräusches in die Phasen der Schluckvorbereitung, des Bolustransits und der Pharynxreposition. Der Vergleich dieser akustischen Einteilung mit den Ergebnissen der parallel durchgeführten fiberoptischen Videoendoskopie zeigte eine zufrieden stellende Übereinstimmung der Beobachtungen, allerdings tendierte die akustische Einteilung zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Schluckdauer. Durch die Gefahr der Verknennung von Nebengeräuschen als das erwartete, phasendefinierende Signal zeigte die akustische Methode sich unsensitiv für die Erkennung extrem verlangsamter pharyngealer Abläufe. In Einzelfällen verursachten atypische Signalmuster eine völlige Fehleinschätzung der in Videoendoskopie beobachteten Abläufe.

Aus den Daten der akustischen Vermessung der Schluckphasen konnte eine direkte Korrelation der Schluckdauer mit dem Grad der Schluckstörung nachgewiesen werden. Alle Phasen des Schluckvorgangs sowie die gesamte Schluckdauer fielen bei der Kontrollgruppe für $p \leq 0,05$ signifikant kürzer aus als in der Dysphagiegruppe. Die Gruppe der Verdachtsfälle mit klinischen Auffälligkeiten ohne Nachweis einer Aspiration ordnete sich zeitlich zwischen den beiden anderen Gruppen ein. Als sensitivster Messwert für die Beurteilung der Schluckfähigkeit wurde

die Gesamtdauer erkannt, die im Mittel bei Schluckgesunden bei 616,6 ms, bei den Verdachtsfällen bei 827,4 ms und bei den Schluckgestörten bei 978,0 ms lag. Im Testfeld war eine Signaldauer über 675 ms hochverdächtig für das Vorliegen einer Schluckstörung, alleine eine Einteilung der Testdaten über diesen Grenzwert erlaubte in 88% der Fälle eine korrekte Gruppenzuordnung zwischen Kontroll- und Dysphagiegruppe. Im Testfeld hatte dieser Test eine Sensitivität von 95% und eine Spezifität von 81,25%. Eine Gesamtdauer des Schlucksignals über eine Sekunde war in allen Gruppen beweisend für das Vorliegen einer schweren Schluckstörung mit Aspiration. Die Zeiten der drei einzelnen Phasen waren zwar ebenfalls signifikant verlängert: Für die Kontrollgruppe, Verdachtsfallgruppe und Dysphagiegruppe wurde eine mittlere Vorbereitungsdauer von 146,5 ms, 189,2 ms und 209,3 ms, eine mittlere Bolustransitdauer von 223,7 ms, 382,7 ms und 385,2 ms und eine mittlere Repositionsdauer von 271,4 ms, 298,3 ms und 411,4 ms ermittelt. Diese Messwerte flossen aber sämtlich in die Gesamtzeit mit ein und konnten für sich genommen das Ergebnis nicht weiter verbessern.

Die Betrachtung der anderen Dimensionen des Schluckgeräusches, Signalpegel und Frequenzgang, ließ ein wiederkehrendes Frequenzmuster mit einem Schwerpunkt im Bereich zwischen 100 und 600Hz in der Transitphase erkennen. Es zeigten sich ebenfalls erhebliche Unterschiede zwischen schluckgesunden und beeinträchtigten Probanden, die in neun der dreizehn erhobenen Messwerte mit $p \leq 0,05$ Signifikanz erreichte. In unserer Studie zeigte sich für Schluckgestörte eine Verschiebung des Signalanteils zwischen 300 und 600 Hz in höhere Frequenzbereiche zwischen 1500 und 2100 Hz. Der allgemeine Schalldruckpegel war beim Schluckgestörten deutlich reduziert. Bei der Beurteilung dieser Messungen und Aussagen muss berücksichtigt werden, dass die Frequenz- und Lautstärkeanalyse im ursprünglichen Versuchsaufbau nicht geplant waren und die Analyse retrospektiv durchgeführt wurde. Für eine möglichst ideale Untersuchung dieser Klangdimensionen spielt die in dieser Studie fehlende Wahl eines Spezialmikrofons und insbesondere die Normierung des Aufnahmepegels eine nicht unbedeutende Rolle. Unabhängig davon ermöglichten Signalpegel und Frequenzgang zusammengenommen in einer Diskriminantenanalyse die korrekte Klassifizierung von 83% aller Testdaten. Eine Verbesserung des Ergebnisses aus der vorhergehenden Analyse der Phasendauer war mit den zusätzlichen Werten nicht möglich.

Verschiedene Studien der Vergangenheit wie auch die vorliegende Studie kommen mit Regelmäßigkeit zu stets neuen Ergebnissen bezüglich der Frequenzeigenschaften des Schluckgeräusches. Falls der Ansatz der Frequenzanalyse in der Zukunft weiter verfolgt werden soll, ist unbedingt eine einheitliche Datenerhebung und –interpretation zu fordern.

Frequenzmessungen sind komplexe und fehleranfällige Vorgänge und eine kleine Änderung der Methode kann einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis haben. In der vorliegenden und in der Studie von Lazareck und Moussavi wurden signifikante Unterschiede der Frequenzeigenschaften in Abhängigkeit von Bolusart und Schluckfähigkeit festgestellt. Von diesem Ergebnis kann die Methode allerdings erst dann profitieren, wenn ein für jeden Prüfer nachvollziehbares Schema, das regelmäßige und reproduzierbare Ergebnisse liefert, erstellt und akzeptiert wurde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Untersuchung des Schluckgeräusches wertvolle Rückschlüsse auf den Zustand der Schluckfunktion zulässt und als sensitives diagnostisches Werkzeug zur Erkennung von Schluckstörungen verwendet werden kann. Eine sichere Unterscheidung zwischen ungefährlichen Beeinträchtigungen der Schluckfunktion und einer stillen Aspiration gelingt dabei allerdings nicht immer. Die vorgeschlagene Methode benötigt keine 5 Minuten zur Durchführung, ist nicht invasiv oder für den Patienten unangenehm und relativ einfach zu erlernen. Da die Vermessung der Geräuschkdauer keine besonderen Ansprüche an die Aufnahmequalität erfordert, scheinen auch einfache, handliche Aufnahmegeräte wie PDA (*personal digital assistant*, Taschencomputer), mobile MP3-Spieler mit Aufnahmefunktion oder auch ein Phonokardiograph zur Datengewinnung geeignet. Zur Etablierung der Methode und zur Festlegung genauerer Grenzwerte müssten nun größer angelegte klinische Studien folgen, bei denen zusätzlich eine Kontrollgruppe von Schlaganfall-Patienten ohne klinische und diagnostische Hinweise auf eine Schluckstörung rekrutiert werden sollte.

Literaturverzeichnis

- NN (1999). "Diagnosis and treatment of swallowing disorders (dysphagia) in acute-care stroke patients." Evid Rep Technol Assess (Summ)(8): 1-6.
- Barer, D. H. (1989). "The natural history and functional consequences of dysphagia after hemispheric stroke." J Neurol Neurosurg Psychiatry **52**(2): 236-41.
- Boiron, M., P. Rouleau, et al. (1997). "Exploration of pharyngeal swallowing by audiosignal recording." Dysphagia **12**(2): 86-92.
- Cichero, J. A. und B. E. Murdoch (1998). "The physiologic cause of swallowing sounds: answers from heart sounds and vocal tract acoustics." Dysphagia **13**(1): 39-52.
- Cichero, J. A. und B. E. Murdoch (2002). "Acoustic signature of the normal swallow: characterization by age, gender, and bolus volume." Ann Otol Rhinol Laryngol **111**(7 Pt 1): 623-32.
- Cichero, J. A. und B. E. Murdoch (2002). "Detection of swallowing sounds: methodology revisited." Dysphagia **17**(1): 40-9.
- Crary, M. A., G. D. Carnaby Mann, et al. (2006). "Biomechanical correlates of surface electromyography signals obtained during swallowing by healthy adults." J Speech Lang Hear Res **49**(1): 186-93.
- Delgado, J. M. (1988). "Paralysis, dysphagia and balance problems associated with stroke." J Neurosci Nurs **20**(4): 260.
- Devgan, B. K., C. W. Gross, et al. (1978). "Anatomic and physiologic aspects of sword swallowing." Ear Nose Throat J **57**(10): 445-50.
- Dijkstra, B. K. (1984). "Swallowing difficulties and iron deficiency." J R Soc Med **77**(12): 1064.
- Dodds, W. J. (1989). "Physiology of swallowing." Dysphagia **3**(4): 171-8.
- Dodds, W. J., E. T. Stewart, et al. (1990). "Physiology and radiology of the normal oral and pharyngeal phases of swallowing." AJR Am J Roentgenol **154**(5): 953-63.
- Gordon, C., R. L. Hewer, et al. (1987). "Dysphagia in acute stroke." Br Med J (Clin Res Ed) **295**(6595): 411-4.
- Hamlet, S., D. G. Penney, et al. (1994). "Stethoscope acoustics and cervical auscultation of swallowing." Dysphagia **9**(1): 63-8.
- Hamlet, S. L., R. J. Nelson, et al. (1990). "Interpreting the sounds of swallowing: fluid flow through the cricopharynx." Ann Otol Rhinol Laryngol **99**(9 Pt 1): 749-52.
- Hamlet, S. L., R. L. Patterson, et al. (1992). "Sounds of swallowing following total laryngectomy." Dysphagia **7**(3): 160-5.
- Horner, J., E. Massey, et al. (1988). "Aspiration following stroke: clinical correlates and outcome." Neurology **38**(9): 1359-1362.
- Klahn, M. S. und A. L. Perlman (1999). "Temporal and durational patterns associating respiration and swallowing." Dysphagia **14**(3): 131-8.
- Kley, C. und R. Biniek (2005). "[Diagnostic use of swallowing sounds in dysphagia.]" Nervenarzt.
- Langmore, S. E., K. Schatz, et al. (1988). "Fiberoptic endoscopic examination of swallowing safety: a new procedure." Dysphagia **2**(4): 216-9.
- Lazarek, L. J. und Z. M. Moussavi (2004). "Classification of normal and dysphagic swallows by acoustical means." IEEE Trans Biomed Eng **51**(12): 2103-12.
- Lear, C. S., J. B. Flanagan, Jr., et al. (1965). "The Frequency of Deglutition in Man." Arch Oral Biol **10**: 83-100.

- Logemann, J. A. (1990). "Effects of aging on the swallowing mechanism." Otolaryngol Clin North Am **23**(6): 1045-56.
- Mackowiak, R. C., H. S. Brenman, et al. (1967). "Acoustic profile of deglutition." Proc Soc Exp Biol Med **125**(4): 1149-52.
- Magendie, F. (1816). Précis Élémentaire de Physiologie. Paris.
- Mann, G., G. J. Hankey, et al. (1999). "Swallowing Function After Stroke : Prognosis and Prognostic Factors at 6 Months." Stroke **30**(4): 744-748.
- Mansson, I. und N. Sandberg (1975). "Salivary stimulus and swallowing reflex in man." Acta Otolaryngol **79**(5-6): 445-50.
- McConnel, F. M., D. Cerenko, et al. (1988). "Timing of major events of pharyngeal swallowing." Arch Otolaryngol Head Neck Surg **114**(12): 1413-8.
- McConnel, F. M., M. S. Mendelsohn, et al. (1986). "Examination of swallowing after total laryngectomy using manofluorography." Head Neck Surg **9**(1): 3-12.
- Miller, R. M. und S. E. Langmore (1994). "Treatment efficacy for adults with oropharyngeal dysphagia." Arch Phys Med Rehabil **75**(11): 1256-62.
- Moriniere, S., P. Beutter, et al. (2006). "Sound component duration of healthy human pharyngoesophageal swallowing: a gender comparison study." Dysphagia **21**(3): 175-82.
- Perlman, A. L., S. L. Ettema, et al. (2000). "Respiratory and acoustic signals associated with bolus passage during swallowing." Dysphagia **15**(2): 89-94.
- Perlman, A. L., P. M. Palmer, et al. (1999). "Electromyographic activity from human laryngeal, pharyngeal, and submental muscles during swallowing." J Appl Physiol **86**(5): 1663-9.
- Perry, H. T., Jr. (1972). "Muscle contraction patterns in swallowing." Angle Orthod **42**(1): 66-80.
- Prosiegel, M., E. Wagner-Sonntag, et al. (1997). "Neurogene Schluckstörungen." Akt. Neurologie **24**: 194-203.
- Selley, W. G., R. E. Ellis, et al. (1994). "The synchronization of respiration and swallow sounds with videofluoroscopy during swallowing." Dysphagia **9**(3): 162-7.
- Takahashi, K., M. E. Groher, et al. (1994). "Methodology for detecting swallowing sounds." Dysphagia **9**(1): 54-62.
- Takahashi, K., M. E. Groher, et al. (1994). "Symmetry and reproducibility of swallowing sounds." Dysphagia **9**(3): 168-73.
- Vice, F. L., J. M. Heinz, et al. (1990). "Cervical auscultation of suckle feeding in newborn infants." Dev Med Child Neurol **32**(9): 760-8.
- Wheeler, K. M., T. Chiara, et al. (2007). "Surface electromyographic activity of the submental muscles during swallow and expiratory pressure threshold training tasks." Dysphagia **22**(2): 108-16.
- Wilson, S. L., B. T. Thach, et al. (1981). "Coordination of breathing and swallowing in human infants." J Appl Physiol **50**(4): 851-8.
- Zenner, P. M., D. S. Losinski, et al. (1995, Winter). "Using cervical auscultation in the clinical dysphagia examination in long-term care." Dysphagia Retrieved 1, 10, from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=7859529

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Rolf Biniek für seine geradezu unerschöpfliche Geduld in der Betreuung dieser Arbeit und die ungeachtet meiner undulierenden Aktivität stets freundliche, rasche und hilfreiche Unterstützung auf dem langen Weg hinter uns.

Herrn Dr. med. Christoph Kley für die herausragende und intensive fachliche, inhaltliche und menschliche Unterstützung, sowie für manchen guten Rotwein und schöne Abende in Vinxeler Gemütlichkeit. Ohne Dich wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Meinen Eltern Hansjörg & Heidi Vehreschild für das stete Schieben, Drängen und Mahnen, ohne die dieses Werk noch länger gebraucht hätte, für die sprachliche Qualitätssicherung dieser Lektüre, für die Schaffung und Finanzierung meiner Person und vor allem für die stets liebevolle und manchmal auch geduldige Zuwendung in allen großen und kleinen Dingen. Hab Euch lieb.

Meinen Vorgesetzten und Kollegen Herrn Prof. Oliver Cornely und Herrn Prof. Gerd Fätkenheuer für die stetigen Hilfsangebote und die verständnisvollen Freistellungen für die Weiterentwicklung dieser Arbeit.

Herrn Priv. Doz. Ph. D. Dr. med. Dr. rer. nat. Michael Sandy von Bergwelt-Baildon („Michael of the Mountainworld“) für einsame Wachstunden auf unserer Station 13 C während Janne an seiner Doktorarbeit bastelt.

Frau Dr. med. Maria J. G. T. Rüping (nicht nur) für die Entfaltung des fehlenden Quäntchen Ehrgeiz, diese Arbeit endlich einmal zur Post zu bringen.

Meinem Freund und Kollegen Dennis für das gute Gefühl, dass andere noch länger für ihre Doktorarbeit brauchen können (und das als Anästhesist!).

Meinem Freund und Kollegen Ty für das schlechte Gewissen, dass man es auch sehr viel schneller hätte schaffen können.

Angela und Rüdiger für die Haare des Grauens. Man kann es nicht oft genug sagen.

Meinem Bruder Pelle, Felix, Fedja, Fares, Tim, den Daniels und allen anderen guten und lieben Freunden die mich durch die Jahre begleitet haben und mir trotzdem stets verständnisvoll Platz ließen, wenn ich ihn brauchte. Ihr seid die Besten!

Erklärung § 5 Abs. 1 zur Datenaufbewahrung

Hiermit erkläre ich, dass die dieser Dissertation zu Grunde liegenden Originaldaten

- bei mir, **Jörg Janne Vehreschild, Balduinstr. 11, 50676 Köln,**

und

- in der **Rheinischen Klinik Bonn, Abteilung Neurologie**

hinterlegt sind.

Lebenslauf

Zur Person

Name: Jörg Janne Vehreschild

Geburtsdatum/-ort: 09.05.1978 in Siegburg

Privat

Anschrift: Laudahnstr. 7
50937 Köln
Telefon: 0221 / 29869473
0171 / 6211 442
Email: jvehreschild@gmx.net

Beruflich

Anschrift: Klinikum der Universität zu Köln
Klinik I für Innere Medizin
Klinisches Studienzentrum
Schwerpunkt Infektiologie 2
Bachemer Str. 86
50931 Köln
Telefon: 0221 / 478 6494
Fax: 0221 / 478 3611
Email: janne.vehreschild@uni-koeln.de

Schule und Studium

1984 – 1997 Grundschule und Gymnasium in Siegburg, Abiturnote: 2,1
04/1999 – 05/2005 Medizinstudium an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
05/2005 3. Staatsexamen, Gesamtnote „gut“ (2,16)

Weitere Tätigkeiten

10/1998 – 12/1999 Ständiger freier Mitarbeiter der Abteilung für Softwareentwicklung bei der Kuttig Computeranwendungen GmbH, Troisdorf
09/2000 – 07/2004 Ständiger freier Mitarbeiter der Abteilung für Software- und Datenbankentwicklung bei der System AG für IT-Lösungen, Lohmar

Laufbahn

Seit 11/2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Klinikums der Universität zu Köln, Klinik I für Innere Medizin, Studienzentrum Infektiologie II