

Aus der Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Experimentelle Studie zur automatischen kutanen
elektrischen Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur zur
Kehlkopfhebung beim Schlucken**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Jehoschua Bieler
aus Berlin

Datum der Promotion: 04. Juni 2021

Zusammenfassung

Einleitung: Schluckstörungen sind ein häufiges und kostenintensives medizinisches Problem. Die Behandlung ist schwierig, bisherige Therapieoptionen sind nur eingeschränkt in der Lage, einen effektiven und sicheren Schluckvorgang ohne Aspiration zu gewährleisten. Durch Entwicklung eines neuen EMG-Bioimpedanzmesssystems, das in der Lage ist, einen Schluck zu erkennen, die Kehlkopfbewegung zu bewerten und zu Beginn des Schlucks zeitgerecht einen elektrischen Stimulus auszulösen, eröffnen sich neue therapeutische Möglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Randbedingungen für eine kutane funktionelle Elektrostimulation untersucht werden.

Methodik: Es wurden 49 gesunde Probanden (Alter 30 ± 7 Jahre, 25 männlich, 24 weiblich) im Rahmen einer Studie untersucht (Ethikvotum EA1/019/10). Das geprüfte Messsystem ist in der Lage, stimulationsstabil die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Kehlkopfhebung als Kontrollparameter zu erfassen. Es erfolgte eine transkutane Stimulation. Untersucht wurden mögliche Stimulationsorte, der Effekt der Stimulationsintensität auf einen Schluck und die ruhende Muskulatur, sowie die Ermüdung der Muskulatur durch eine Stimulation.

Ergebnisse: Es war mit dem Messsystem möglich, zeitgerecht zu Beginn der Schlucke zu stimulieren. Die betrachteten Schluckparameter (Geschwindigkeit und Ausmaß der Kehlkopfhebung) konnten durch die unterstützende Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur bei 69,4% der Probanden signifikant verändert werden. Gab es keine muskuläre Eigenaktion der Probanden, hatte die Kehlkopfbewegung nur 17% der normalen Bewegung. Es kam zu keiner Ermüdung der suprahyoidalen Muskulatur durch die Stimulation.

Diskussion: Mit dem entwickelten Verfahren ist es möglich, die Kehlkopfbewegung zeitgerecht durch eine elektrische Stimulation zu unterstützen. Dies kann beliebig wiederholt werden, da es zu keiner Ermüdung der Muskulatur kommt. Voraussetzung ist eine muskuläre Eigentätigkeit. Weitere Studien müssen den Stellenwert dieses Verfahrens in der Therapie von Schluckstörungen überprüfen.

Schlüsselwörter: automatische funktionelle Elektrostimulation, Bioimpedanz, Dysphagie, Neuroprothese, Schluckstörungen, suprahyoidale Muskulatur

Abstract

Introduction: Swallowing disorders are a common and costly medical problem. Treatment is difficult, previous therapy options are only able to guarantee an effective and safe swallowing process without aspiration to a limited extent. The development of a new EMG bioimpedance measuring system capable of detecting a swallow, evaluating the laryngeal movement and triggering an electrical stimulus at the beginning of the swallow in a timely manner opens up new therapeutic possibilities. In this thesis the boundary conditions for cutaneous functional electrostimulation shall be investigated.

Methods: 49 healthy volunteers (age 30 ± 7 years, 25 males, 24 female) were examined in a study (ethics vote EA1/019/10). The tested measuring system is capable of recording the speed and extent of laryngeal elevation as control parameters with stable stimulation. Transcutaneous stimulation was performed. Possible stimulation sites, the effect of the stimulation intensity on a swallow and the resting musculature as well as the fatigue of the musculature by stimulation were examined.

Results: The measuring system makes it possible to stimulate timely at the beginning of swallowing. The considered swallowing parameters (speed and extent of laryngeal elevation) could be significantly changed by the supportive stimulation of the suprahyoidal muscles in 69.4% of the subjects. If there was no muscular action of the subjects, the laryngeal movement had only 17% of the normal movement. There was no fatigue of the suprahyoidal muscles due to stimulation.

Discussion: With the developed method it is possible to support the laryngeal movement in time by electrical stimulation. This can be repeated at will, as there is no fatigue of the muscles. A prerequisite for this is muscular self-activity. Further studies must examine the significance of this procedure in the therapy of swallowing disorders.

Key words: automatic functional electrostimulation, bioimpedance, dysphagia, neuroprosthesis, swallowing disorders, suprahyoidal muscles

Inhalt

Liste der Abbildungen.....	III
Liste der Tabellen.....	IV
Anmerkungen zu Begriffen und Schluckparametern.....	VI
1 Einleitung	1
1.1 Dysphagien.....	1
1.2 Anatomische Einordnung und Neurophysiologie des Schluckvorgangs.....	2
1.3 Konventionelle Therapiestrategien bei Dysphagien.....	5
1.4 Prinzip der funktionellen Elektrostimulation	7
2 Methodik	11
2.1 Rekrutierung des Probandenkollektivs	11
2.2 Physikalische Grundlage des Versuchs – Messverfahren	11
2.3 Versuchsaufbau	12
2.4 Stimulationsalgorithmen.....	13
2.5 Versuchsprotokoll und -durchführung.....	15
2.6 Ermittlung der Messparameter	18
2.7 Statistische Auswertung.....	19
3 Ergebnisse	21
3.1 Probanden	21
3.2 Veränderungen der Bioimpedanz durch eine Stimulation.....	23
3.2.1 Vergleich der Schlucke ohne versus mit FES.....	23
3.2.2 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Schlucke bei Verbesserung beider Schluckparameter	25
3.2.3 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Schlucke bei Verringerung beider oder einer der Schluckparameter	28
3.2.4 Vergleich der Schluckrepetition ohne und mit FES.....	31
3.3 Veränderungen der Bioimpedanz durch Stimulation der Nicht-Schlucke..	31
3.3.1 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Nicht-Schlucke bei Verbesserung beider Schluckparameter.....	34
3.3.2 Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	36
3.3.3 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Nicht-Schlucke bei Verringerung beider oder einer der Schluckparameter	37
3.4 Gesamtübersicht genutzte Stimulationsintensitäten in [mA].....	40

3.5	Bewertung der Verträglichkeit und spürbaren Wirkung der Stimulation	42
4	Diskussion.....	43
5	Zusammenfassung.....	49
6	Literaturverzeichnis.....	51
	<i>Anhang: Studienprotokoll</i>	55
	Eidesstattliche Versicherung.....	58
	Lebenslauf.....	59
	Danksagung.....	60

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Der Schluckvorgang beim Menschen	2
Abbildung 2: Die Suprahyoidale Muskulatur	4
Abbildung 3: Verlauf des Bioimpedanz-Messsignals	12
Abbildung 4: Elektrodenposition der EMG-Bioimpedanzmessung	13
Abbildung 5: Position der Mess- und Stimulationselektroden	14
Abbildung 6: Auswertung der Bioimpedanz und EMG-Kurven.....	19
Abbildung 7: Änderung der Schluckparameter unter Stimulation	44

Liste der Tabellen

Tabelle 1: Functional Dysphagia Index.....	9
Tabelle 2: Signifikanzniveaus.....	20
Tabelle 3: durchschnittliche Charakteristika der Probanden	21
Tabelle 4: genaue Aufschlüsselung des Probandenkollektivs.....	21
Tabelle 5: Vergleich der Schlucke ohne und mit FES.....	23
Tabelle 6: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten).....	24
Tabelle 7: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)	24
Tabelle 8: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)	25
Tabelle 9: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	25
Tabelle 10: Vergleich der Schlucke ohne und mit FES	26
Tabelle 11: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten).....	26
Tabelle 12: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)	27
Tabelle 13: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)	27
Tabelle 14: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	28
Tabelle 15: Vergleich der Schlucke ohne und mit FES	29
Tabelle 16: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten).....	29
Tabelle 17: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)	30
Tabelle 18: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)	30
Tabelle 19: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	31
Tabelle 20: Vergleich der Schluckrepetition ohne und mit FES	31
Tabelle 21: Vergleich der Nicht-Schlucke ohne und mit FES.....	32
Tabelle 22: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten).....	33
Tabelle 23: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)	33
Tabelle 24: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)	34
Tabelle 25: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	34
Tabelle 26: Vergleich der Nicht-Schlucke ohne und mit FES.....	35
Tabelle 27: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten).....	35

Tabelle 28: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)	36
Tabelle 29: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten (100%)	36
Tabelle 30: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	37
Tabelle 31: Vergleich der Nicht-Schlucke ohne und mit FES.....	38
Tabelle 32: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten).....	38
Tabelle 33: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)	39
Tabelle 34: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)	39
Tabelle 35: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten.....	40
Tabelle 36: Gesamtübersicht genutzte Stimulationsintensitäten in [mA].....	40

Anmerkungen zu Begriffen und Schluckparametern

Die **funktionelle Elektrostimulation** wird nachfolgend als „**FES**“ abgekürzt.

Jede Stimulation des Probanden durch den Untersucher, ohne dass der Proband dabei schluckt, wird im Folgenden als „**Nicht-Schluck**“ bezeichnet.

Mit dem Begriff **Intensität** sind die Stimulationsintensitäten in [mA] der Probanden während eines Versuches gemeint.

Das Protokoll der vorliegenden Versuchsreihe sah zunächst eine Stimulation der Probanden mit den individuell in den ersten Versuchen („Test 1“ bis „Test 4“) erfassten Intensitäten (nachfolgend als „**75%-Intensität**“ bezeichnet) vor.

Anschließend erfolgte eine Stimulation der Probanden mit den erhöhten, maximal tolerierten Intensitäten (nachfolgend als „**100 %-Intensität**“ bezeichnet) in den Versuchen „Test 5“ bis „Test 10“.

Die Ratio hinter dieser Herangehensweise war die Annahme, dass die Probanden zu Beginn der Untersuchung noch nicht mit den, durch die Stimulation hervorgerufenen, Sensationen vertraut waren und aufgrund dieser ungewohnten Situation nur eine, das mögliche Maximum weit unterschreitende, Stimulationsintensität tolerieren würden.

Schluckparameter

Parameter	Einheit
Maximale Kehlkopfhebung*	Ohm [Ω]
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung**	Ohm/Sekunde [Ω/sec]
Ausmaß des Rachenverschlusses	Ohm*Sekunde [Ω*sec]

* *Entspricht der maximalen Änderung der Amplitude der Bioimpedanz.*

** *Entspricht der Geschwindigkeit der Änderung der Amplitude der Bioimpedanz.*

1 Einleitung

1.1 Dysphagien

Die Fähigkeit, schlucken zu können, ist ein essenzieller und selbstverständlicher Bestandteil der Lebensqualität eines jeden Menschen, welcher keines evidenzbasierten Nachweises bedarf.

Umgekehrt ist der Verlust oder die Störung der Fähigkeit zu schlucken (Dysphagie) mit einem Verlust an Lebensqualität verbunden. Zudem sind Patienten mit Dysphagien einem hohen Risiko ausgesetzt, eine Aspirationspneumonie zu entwickeln. Johnson et al. berichteten 1993, dass 48 % aller Patienten mit einer akuten zerebrovaskulären Erkrankung binnen eines Jahres eine Aspirationspneumonie entwickelten [15].

Die Inzidenz von Dysphagien ist hoch, sie liegt in den USA in Akutkrankenhäusern bei ca. 14 %, in Pflegeheimen bei bis zu 50 % [18].

Die häufigste Ursache aller Schluckstörungen stellt mit ca. 25 % der Schlaganfall dar, gleichgültig, ob blutender oder ischämischer Genese. In Deutschland liegt die Inzidenz aktuell bei ca. 260.000 Neuerkrankungen pro Jahr [14]. Zum Vergleich: Die Inzidenz durch Kopf-Hals-Tumoren bedingter Dysphagien liegt in Deutschland aktuell bei ca. 16.500 [32].

Etwa 16% dieser Patienten entwickeln auch nach längerer Zeit persistierende Symptome einer Schluckstörung [11].

Die zweithäufigste Ursache einer Dysphagie ist das Schädel-Hirn-Trauma. Bei diesen Patienten persistieren ein Jahr nach stattgefundenem Ereignis in 10 – 14 % aller Fälle Dysphagien [31].

Insgesamt leiden derzeit mehr als 5 Millionen Menschen in Deutschland an einer Dysphagie, mit steigender Tendenz aufgrund des ansteigenden Durchschnittsalters und zunehmender Multimorbidität*. Die diversen Komorbiditäten einer Dysphagie sorgen für eine hohe finanzielle Belastung der Gesundheitssysteme. So belaufen sich beispielsweise in den USA die Kosten bei Auftreten einer Aspirationspneumonie auf

* Dr. med. Christiane Hey auf dem 38. Interdisziplinären Forum „Fortschritt und Fortbildung in der Medizin“ der Bundesärztekammer in Berlin.

So zitiert gefunden auf www.bundesaerztekammer.de/presse/pressemittelungen/news-detail/mehr-als-fuenf-millionen-menschen-in-deutschland-haben-schluckstoerungen/.

ca. 17.000 US-Dollar pro Patient, mit deutlichem Spielraum nach oben beim Auftreten weiterer Komorbiditäten (v.a. Malnutrition) [1] [9].

1.2 Anatomische Einordnung und Neurophysiologie des Schluckvorgangs

Der im täglichen Durchschnitt bis zu 2000 Mal ausgeführte Schluckvorgang dient dem Transport von Speichel und Nahrung aus der Mundhöhle durch den Pharynx in den Ösophagus (*siehe* Abbildung 1, *unten*). Dabei werden sowohl der Nasenrachenraum als auch der Kehlkopfeneingang verschlossen, um zu verhindern, dass Nahrungsbestandteile in die Luftwege geraten [2].

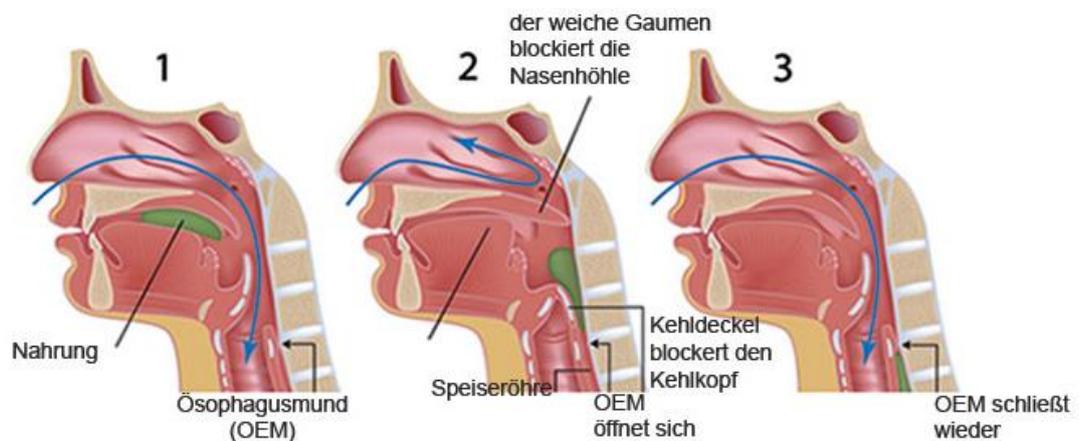


Abbildung 1¹: Der Schluckvorgang beim Menschen

Erläuterungen siehe im Text unten

Der Schluckvorgang läuft in drei Phasen ab, die ohne Unterbrechung direkt aufeinander folgen.

- 1) In der oralen, willkürlich steuerbaren Phase wird feste oder halbfeste Nahrung zunächst zerkleinert, mit Speichel vermischt und zu einem Bolus geformt, welcher anschließend in Richtung Rachen transportiert wird. Das durchschnittliche Bolusvolumen variiert zwischen 5 – 20 ml.
- 2) Es folgt die nicht willkürlich steuerbare, komplexe pharyngale Phase.
 - Zunächst wird das Zungenbein durch Anspannen der Mundbodenmuskulatur angehoben und nach vorne bewegt, wodurch die Zunge gegen

¹ Übernommen von www.DER-QUERSCHNITT.de.

den knöchernen Gaumen gedrückt wird, was den Bolus in Richtung Rachen drückt.

- Das Gaumensegel wird durch die Musculus levator veli palatini et tensor veli palatini angehoben und horizontal eingestellt. Gleichzeitig wölbt der Musculus constrictor pharyngis superior den sogenannten Passavant*-Ringwulst der Rachenwand dem Gaumensegel entgegen, was einen Verschluss des Nasenrachenraumes bewirkt (frei zitiert nach Lippert [17]).
- Die Zunge wird durch die Musculus hypoglossus et styloglossus kolbenartig nach hinten gezogen, was den Bolus durch die Schlundenge in den Rachen befördert. Dies wird durch peristaltische Bewegungen der Rachenhinterwand unterstützt.
- Die suprahyoidale Muskulatur bewirkt eine Aufwärtsbewegung von Larynx und Os hyoideum. Der Musculus thyrohyoideus zieht den Larynx in Richtung Os hyoideum, was das Corpus adiposum preepiglotticum hinter der Membrana thyrohyoidea zusammenstaucht und nach hinten drückt, wodurch die Epiglottis über den Larynxeingang klappt. Der Bolusdruck von oben und der Zug der aryepiglottischen Muskeln von unten unterstützen den Epiglottisverschluss. Es kommt zu einer Annäherung der Plicae vocales.
- Der Aspirationsschutz im Bereich des Larynx wird auf drei Etagen gewährleistet: Durch den Verschluss der Stimmritze, einer vertikalen Annäherung der adduzierten Aryhöcker an die Basis der Epiglottis, und einer Kippung der Epiglottis zum Verschluss des Larynx [2].

Insgesamt kommt es durch die Verlagerung der anatomischen Strukturen zu einer Raumerweiterung im Bereich des Pharynx und des Hypopharynx.

- 3) Die oben beschriebene anterior-superiore Bewegung von Larynx und Os hyoideum sorgt für eine Öffnung des oberen Ösophagusphinkters, was den Übergang von der pharyngalen in die ösophageale Phase des Schluckvorganges kennzeichnet. Im Ösophagus wird der Bolus durch Peristaltik in Richtung Magen transportiert, welches einerseits durch den Schluckreflex, andererseits durch lokale Dehnungsreize induziert wird.

* durch Phillip Gustav Passavant in Frankfurt am Main 1869 beschrieben.

Dünnflüssige Nahrung wird allerdings quasi in einem Schwung vom oberen Ösophagussphinkter bis zum Mageneingang befördert [2].

Der Schluckvorgang wird über Schluckzentren im Hirnstamm gesteuert, welche durch olfaktorische, gustatorische und visuelle Reize, sowie durch das Hungergefühl stimuliert und zusätzlich durch suprabulbäre Zentren moduliert werden [21]. Es konnte gezeigt werden, dass für den Schluckvorgang eine zentrale Repräsentation existiert, die über Bahnen mit dem Hirnstamm verbunden ist, und dass für den Schluckvorgang eine dominante Seite im Großhirn existiert, die nicht von der Händigkeit des Individuums abhängig ist [12] [13].

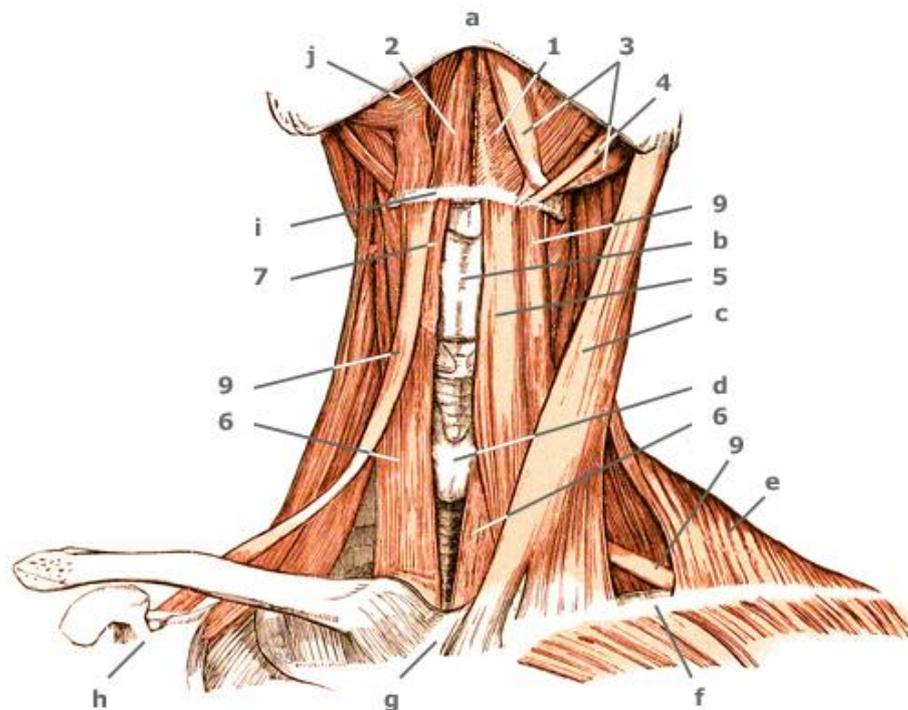


Abbildung 2²: Die Suprahyoidale Muskulatur

1 - 4 suprahyoidale Muskulatur (1 = M. mylohyoideus, 2 = M. geniohyoideus, 3 = M. digastricus, 4 = M. stylohyoideus), 5 - 8 infrahyoidale Muskulatur (5 = M. sternohyoideus, 6 = M. sternothyroideus, 7 = M. thyrohyoideus, 8 = M. omohyoideus), a = Kinn, b = Schildknorpel des Kehlkopfes, c = M. sternocleidomastoideus, d = Schild-, e = M. trapezius, f = Clavicula, g = Sternum, h = Schulterblatt-Anteil, i = Os hyoideum, j = M. styloglossus

Die genaue Lokalisation der Schluckzentren ist aktuell noch nicht vollständig geklärt. Grundsätzlich werden Schluckzentren im Bereich der Pons und im pontino-medullären Bereich, sowie zwei bulbäre Schluckzentren im Bereich der Formatio

² Übernommen von <http://yuveo.de/muskeln/zungenbeinmuskulatur.html> (Rechte bei Dr. med. Rene Schumann), dort zitiert aus: Atlas der Anatomie des Menschen - Sobotta - Urban und Fischer - 2 Bände - München, Jena 2000, S. 136 - 142.

reticularis postuliert [2]. Ein weiteres Zentrum für die ösophageale Phase des Schluckvorganges wird im Bereich zwischen dem Nucleus tractus solitarii und dem Nucleus dorsalis nervus vagus vermutet.

Als afferente Bahn des Schluckreflexes dienen der Nervus glossopharyngeus (IX) und der Nervus vagus (X).

An der efferenten Bahn sind neben den beiden soeben genannten Nerven zusätzlich der Nervus trigeminus (V) (für die Mundbodenmuskulatur), der Nervus accessorius (XI) (für die Gaumen- und Rachenmuskulatur), der Nervus hypoglossus (XII) (für die Zungenmuskulatur) und der Plexus cervicales (für die Unterzungenbeinmuskulatur) beteiligt [17].

Für einen intakten Schluckvorgang sind die Funktionalität und die ungestörte Interaktion aller dieser beteiligten Strukturen eine unabdingbare Voraussetzung [Bass NH].

1.3 Konventionelle Therapiestrategien bei Dysphagien

Zur Verhinderung von Aspirationen kann bei schweren, persistierenden Dysphagien die Anlage eines Tracheostomas indiziert sein. Gleichermaßen wird in diesen Fällen ggf. für die Sicherung der Ernährung eine PEG-Sonde angelegt werden müssen.

Die konventionellen Therapieregime zur Behandlung einer Dysphagie umfassen Maßnahmen zur Restitution, Adaptation und Kompensation des gestörten Schluckvorganges.

Maßnahmen zur Restitution umfassen unter anderem

- die Anbahnung eines physiologischen Schluckmusters (Therapie des facio-oralen Traktes (F.O.T.T.) [26]),
- therapeutische Mundpflege,
- den Abbau pathologischer Reflexe,
- Logopädie/Kautraining, Mobilisation durch motorische Widerstandsübungen, Artikulationsübungen und Atmung,
- Verbesserung der Sensibilität und Koordination des Schluckvorganges durch thermal-taktile Stimulation oder Vibration im äußeren und / oder inneren Mundbereich.

Maßnahmen zur Adaptation umfassen unter anderem

- eine Anpassung der Ernährung (insbesondere unter Beachtung der Nahrungskonsistenzen),
- eine Anpassung der Essgewohnheiten,
- ggf. ergänzende Sondenkost zur Vermeidung einer Malnutrition (im Extremfall via PEG-Sonde).

Maßnahmen zur Kompensation umfassen unter anderem

- Veränderungen der Körperhaltung,
- Reinigungsstrategien für die Rachen-Ösophagus-Passage und die Trachea (z.B. Übungen zum Räuspern, Husten und Nachschlucken),
- Übungen zur Kräftigung der Zungenmuskulatur,
- das Trainieren von Schlucktechniken (z.B. Mendelsohn-Manöver) und schluckunterstützenden Bewegungen (z.B. Kopfwendemanöver) [2].

Grundsätzliche Probleme all dieser therapeutischen Maßnahmen (abgesehen von Tracheotomie und PEG-Sonde) sind, dass sie erstens zwar teilweise eine Besserung des Schluckvorganges bewirken, die jedoch nicht immer ausreichend ist, um einen sicheren Schluckvorgang sicherzustellen, und dass sie zweitens grundsätzlich von den individuellen Restitutions- und Reorganisationsfähigkeiten des Hirnes abhängen.*

Zudem existieren bis zum heutigen Tag nur vereinzelte Studien zum Effekt der konventionellen Maßnahmen, vor allem was die Bewertung der Therapieoptionen hinsichtlich ihrer langfristigen Effekte betrifft (z.B. McCullough et al. über das Mendelsohn-Manöver [20]). Dies führt zu einer Stagnation in der Weiterentwicklung und Wirksamkeitsbewertung dieser Maßnahmen [28].

* Persönliche Kommunikation mit Dr. med. R. Seidl (Leitender Oberarzt der Klinik für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde des *Unfallkrankenhauses Berlin (UKB)*).

1.4 Prinzip der funktionellen Elektrostimulation

Die Applikation elektrischen Stromes zu therapeutischen Zwecken ist ein allgemein bekanntes Prinzip. Grundsätzlich geht es dabei immer um die gezielte Stimulation eines Muskels oder Hautareals durch definierte Stromimpulse.

Ist das Ziel eine Manipulation im sensorischen Regelkreis zur Modifikation oder Provokation einer motorischen Reaktion, so spricht man von einer sensorischen Stimulation oder Neuromodulation. Insbesondere im schmerztherapeutischen Bereich ist dieses Verfahren (bekannt als TENS – Transkutane Elektrische Nervenstimulation) wohletabliert [25].

Ist das Ziel die Auslösung einer Muskelkontraktion, so wird von einer motorischen Stimulation gesprochen; soll dabei eine funktionelle Bewegung generiert werden, so handelt es sich um eine funktionelle Elektrostimulation (FES). Muskeln können dabei auf direkte oder indirekte Weise stimuliert werden.

Die direkte Stimulation, sprich die direkte Reizung der Muskelfasern, kommt üblicherweise beim denervierten Muskel zum Einsatz.

Bei der indirekten Stimulation erfolgt die Auslösung der Muskelkontraktion durch Anlegen eines ausreichenden Gradienten einer elektrischen Feldstärke am efferenten Nerven des betreffenden Muskels, was ein Aktionspotential auslöst, welches zur motorischen Endplatte weitergeleitet wird und dort letztlich eine Kontraktion des Muskels verursacht. Diese Art der Stimulation kann nur bei innervierten Muskeln (mit intaktem unteren Motoneuron) genutzt werden.

Auch die funktionelle Elektrostimulation ist in der Medizin wohletabliert; die bekanntesten Anwendungen sind Herz- und Zwerchfellschrittmacher.

Man kann die Wirkungsweise der funktionellen Elektrostimulation als eine prothetische Funktion auffassen, da letztlich eine gestörte oder verlorengegangene motorische Funktion des menschlichen Körpers ersetzt, respektive wiederhergestellt wird.

Eine Neuroprothese zum Einsatz bei Dysphagien muss daher den Schluckvorgang unterstützen, was bedeutet, dass sie auch suffizienten Schutz vor Aspiration bieten muss. Hierbei ist der Larynx von entscheidender Bedeutung, da seine anterior-superiore Bewegung während des Schluckes sowohl für einen Verschluss des Kehlkopfeinganges sorgt als auch für eine Öffnung des oberen Ösophagusphinkters (*siehe auch* 1.2 Anatomische Einordnung und Neurophysiologie des Schluckvorgangs, Seite 2).

Die Idee einer Neuroprothese bei Dysphagien wurde erstmals 1993 durch Broniatowski in einem theoretischen Modell beschrieben [4]. In den folgenden Jahren führten er und seine Arbeitsgruppe mehrere Versuche an Hunden durch, in denen der Verschluss der Glottis durch elektrische Stimulation untersucht wurde [5, 6]. Die Versuche erfolgten durch direkte Stimulation der Nerven, was regelhaft zu Narbenbildungen führte.

Eine Arbeitsgruppe um Burnett et al. arbeitete an einer funktionellen Elektrostimulation zur Verbesserung der Kehlkopfhebung während des Schluckens [7]. Die Stimulation der Probanden erfolgte dabei durch Nadelelektroden im Bereich sowohl der supra- als auch der infrahyoidalen Muskulatur. Zur Erforschung des – für die Entwicklung einer Prothese essenziellen – Triggerzeitpunktes des Schluckvorganges untersuchte diese Arbeitsgruppe außerdem das Potential und die Limitationen einer manuellen Stimulationsauslösung durch gesunde Probanden [8].

Verschiedene weitere Studien konnten seitdem Verbesserungen der laryngealen Hebung [16, 24] und eine verbesserte Bewegung und Geschwindigkeit des Os hyoideum nach anterior [24] durch Stimulation entweder der suprahyoidalen, infrahyoidalen, submentalen oder laryngealen Muskelgruppen nachweisen.

Eine Forschungsgruppe um Freed führte Versuche mit einer transkutanen Stimulation der Musculus digastricus et thyroideus durch [10]. Bei diesen Stimulationen wurde die Intensität der Stromimpulse individuell an die Toleranz der Patienten angepasst und die Stimulation für sechzig Minuten durchgeführt. Die Resultate der Versuche hinsichtlich der Verbesserung des Schluckvorganges verglich die Forschungsgruppe anschließend mit den Resultaten konventioneller (thermo-taktile) Stimulationen. Die Validität dieser Studie wurde aber seitdem mehrfach aufgrund ihres mangelhaften Designs kritisiert [28].

Blumenfeld et al. [3] prüften das von Freed vorgestellte Stimulationsverfahren und konnten signifikante Verbesserungen anhand einer videofluoroskopischen Schweregradskala für das Schlucken (FDS = Functional Dysphagia Scale) nachweisen (*siehe* Tabelle 1, Seite 9).

	Score
Lip closure	
Intact	0
Inadequate	5
None	15
Bolus formation	
Intact	0
Inadequate	3
None	6
Residue in the oral cavity (%)	
None	0
≤10	2
10-50	4
>50	6
Oral transit time (sec)	
≤1.5	0
>1.5	6
Triggering of pharyngeal swallowing	
Normal	0
Delayed	10
Laryngeal elevation and epiglottic closure	
Normal	0
Reduced	12
Nasal penetration (%)	
None	0
≤10	4
10-50	8
≥50	12
Residue in the valleculae	
None	0
≤10	4
10-50	8
≥50	12
Residue in the pyriform sinuses	
None	0
≤10	4
10-50	8
≥50	12
Coating of pharyngeal wall after swallowing	
No	0
Yes	10
Pharyngeal transit time (sec)	
≤1.0	0
>1.0	4
Total score	100

Tabelle 1: Functional Dysphagia Index

In der obenan erwähnten Studie von Leelamanit et al. [16] erfolgte die Stimulation von Teilen der suprahyoidalen Muskulatur gleichfalls transkutan durch am vorderen Mundboden platzierte Elektroden. Dies führte zu einer statistisch signifikanten Verbesserung der anterior-superioren Bewegung des Kehlkopfes. Bei 20 von 23 Probanden kam es so zu einer videofluoroskopisch verifizierbaren Verbesserung des Schluckvorganges.

Die Entwicklung einer – automatisch funktionierenden – Neuroprothese für eine funktionelle Elektrostimulation der am Schluckvorgang beteiligten Muskulatur ist durch komplexe Anforderungen geprägt, bedingt durch den insgesamt sehr komplexen Schluckvorgang.

Zum einen ist die notwendige automatisierte Bestimmung des korrekten Triggerzeitpunktes zur Aktivierung der funktionellen Elektrostimulation eine technische Herausforderung.

Zum anderen bleibt die Frage nach dem besten Stimulationsschema einer solchen Neuroprothese. Das Modell der Verbesserung der anterior-superioren Kehlkopfbewegung (statt einer Verbesserung des Glottisschlusses durch Stimulation der Stimmbänder), um eine effektive Unterstützung durch einen potenziellen „Schluckschrittmacher“ zu gewährleisten, scheint dabei der vielversprechendere Ansatz zu sein [28].

Die zu prüfende **Hypothese** dieser Dissertation lautet, dass eine kutane elektrische Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur zu einer signifikanten Verbesserung der Kehlkopfhebung führt. Diese Methode kann damit geeignet sein, den Schluckvorgang eines Menschen zu unterstützen.

Aufgrund des in der Methodik beschriebenen Verfahrens zur Messung der Bioimpedanz ist es möglich, zu bestimmen, welches Stimulationsmuster der suprahyoidalen Muskulatur die Schluckparameter (die maximale Kehlkopfhebung, die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung und das Ausmaß des Rachenverschlusses) am stärksten im positiven Sinne beeinflusst, was der effektivsten Unterstützung der beabsichtigten Kehlkopfbewegung entspricht.

2 Methodik

2.1 Rekrutierung des Probandenkollektivs

Einschlusskriterien

Der Versuch wurde an freiwilligen Probanden beiderlei Geschlechts vorgenommen, bei denen keine Schluckstörungen in der Anamnese bekannt waren. Das Mindestalter betrug 18 Jahre, die Altersobergrenze wurde bei 70 Jahren festgelegt.

Ausschlusskriterien waren

- Schluckstörungen,
- andere neurologische Erkrankungen,
- Schwangerschaft,
- das Vorhandensein von Herzschrittmachern, Defibrillatoren, koronaren Stents, Hirnstimulatoren oder zentral-venösen Venenkathetern.

Die Probanden wurden während der Rekrutierung über den Ablauf der Versuche informiert und vorbereitend darüber in Kenntnis gesetzt, dass sie im Bereich der stimulierten Muskulatur wie elektrisierend wirkende Sensationen erfahren würden, sowie das Gefühl, über diesen Teil ihrer Muskulatur kurzfristig keine Kontrolle zu haben.

Der Stimulationsversuch wurde durch die Ethikkommission der Charité – Universitätsmedizin Berlin genehmigt (EA1/019/10).

2.2 Physikalische Grundlage des Versuchs – Messverfahren

Der Begriff Impedanz beschreibt die Maßangabe eines Wellenwiderstandes. Sie ist das Produkt aus der Dichte eines Mediums und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit darin. Im Bereich der Elektronik kann sie als ein Verhältnis von Spannung zu Strom an einem elektrischen Leiter ausgedrückt werden. Die Maßeinheit ist Ohm [Ω].

Die Bioimpedanz ist demnach abhängig vom Widerstand des Gewebes, über welches ein Strom fließt. Während der Atmung ist der Pharynx ein luftgefüllter Raum, im Moment des Schluckens jedoch wird dieser Bereich durch eine Hebung des Larynx (und damit einer Annäherung des Zungengrundes an die Wirbelsäule) verengt. Dies wird durch einen deutlichen Abfall der Bioimpedanz im Messsignal angezeigt (*siehe* Abbildung 3: Verlauf des Bioimpedanz-Messsignals, *Seite 12*).

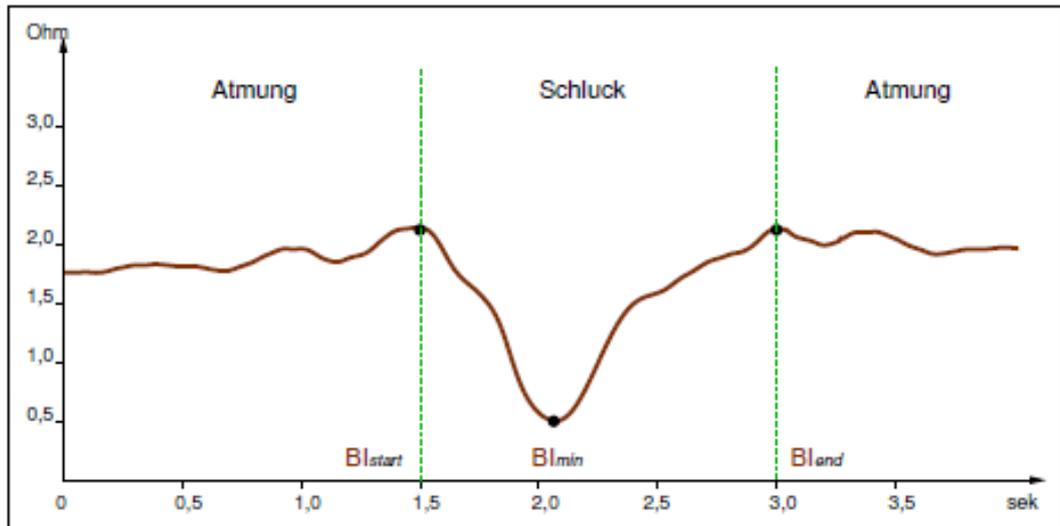


Abbildung 3³: Verlauf des Bioimpedanz-Messsignals

Das Messsignal zeigt den typischen Kurvenverlauf eines Speichelschluckes eines gesunden Probanden. Während des Schluckes verringert sich die Bioimpedanz (BI) und steigt nach dessen Ende wieder an.

Zeitliche BI-Merkmale: BI_{start} kennzeichnet den Beginn der Kehlkopfhebung, BI_{min} ist die maximale Kehlkopfhebung, BI_{end} kennzeichnet das Ende des Schluckvorganges.

2.3 Versuchsaufbau

Das *PhysioSense*-Messgerät (siehe 1.4 Prinzip der funktionellen Elektrostimulation, Seite 7) wurde mit einem Laptop verbunden, auf welchem sich das Programm „*PhysioSense-Logger*“ befand, einer für diese Untersuchungen erstellten Software.

Die Stimulation erfolgte durch einen für den Schluckvorgang modifizierten Stimulator *RehaStim 1* der Firma *Hasomed*®.

Die benutzten Stimulationselektroden stammten von der Firma *KRAUTH+TIMMERMANN*® und werden bezeichnet als „*Flextrode Plus Art. Nr. 371*“. Diese runden Elektroden sind selbstklebend und messen 32 mm im Durchmesser.

Die benutzten Mess-, Strom- und Referenzelektroden waren „*Ambu*® *Blue Sensor N (single patient use ECG electrodes) REF: N-00-S/25*“.

Diese selbstklebenden Elektroden sind mit einem sehr leitfähigen Gel beschichtet und haben hervorragende Haftungseigenschaften. Die Kontaktfläche ist 30 x 30 mm groß, das Sensormaterial besteht aus Silber / Silberchlorid.

Für die Messungen durch das *PhysioSense*-Gerät wurden insgesamt fünf Elektroden benötigt (siehe Abbildung 4: Elektrodenposition der EMG-Bioimpedanzmessung,

³ Übernommen aus [27], S. 21.

unten). Eine Referenzelektrode R wurde dem Probanden auf die rechte Wange geklebt.

Zwei Messelektroden M wurden jeweils links und rechts zwischen dem Os hyoidium und dem Larynx platziert (etwa im Bereich des Trigonums submandibulare und des Trigonums caroticum).

Zwei Stromelektroden S wurden jeweils links und rechts auf den Ansatz des Musculus sternocleidomastoideus geklebt.

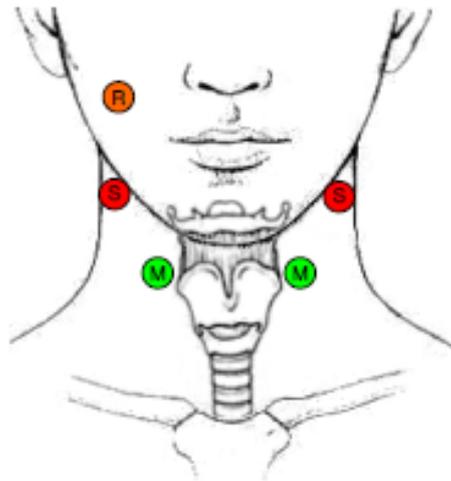


Abbildung 4⁴: Elektrodenposition der EMG-Bioimpedanzmessung

R – Referenzelektrode, S – Stimulationselektrode, M – Messelektrode.

Die vier Stimulationselektroden für die suprahyoidale Muskulatur (*siehe* Abbildung 5: Position der Mess- und Stimulationselektroden, *Seite 14*) wurden jeweils links und rechts der Mittellinie des Mundbodens, etwa im Bereich der Ansätze des M. mylohyoideus, des M. geniohyoideus und des vorderen Anteils des M. digastricus (**S1**), sowie jeweils im rechten (**S2**) und linken (**S3**) Kieferwinkel, etwa im Bereich des Ansatzes des Musculus stylohyoideus und des hinteren Anteils des Musculus digastricus, platziert.

2.4 Stimulationsalgorithmen

Nahrstaedt et al. entwickelten im Rahmen des *bigdyspro*-Projektes an der Technischen Universität zu Berlin ein Messgerät namens *PhysioSense*, durch welches myoelektrische Signale und Bioimpedanzänderungen gemessen werden können [22]. Basierend auf entsprechenden Messungen entwickelten sie einen

⁴ Übernommen aus [27], S. 16.

Algorithmus, welcher geeignet ist, Schlucke auf der Grundlage der Verarbeitung von Bioimpedanz- und Elektromyographiesignalen zu detektieren [23].

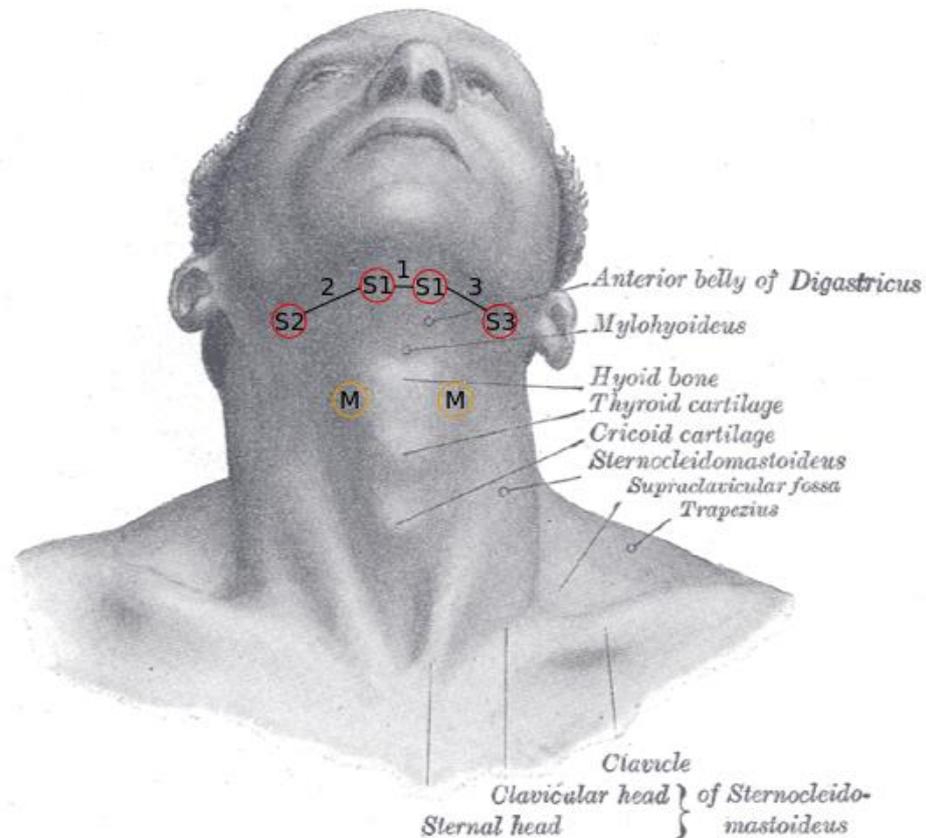


Abbildung 5⁵: Position der Mess- und Stimulationselektroden

M – Messelektroden, S1, S2, S3 – Stimulationselektroden, 1 – Kanal 1, 2 – Kanal 2, 3 – Kanal 3.

Die Stimulation der Mundbodenmuskulatur wurde in verschiedenen Kombinationen, nachfolgend als Kanäle (*siehe* Abbildung 5: Position der Mess- und Stimulationselektroden, *oben*) bezeichnet, durchgeführt.

Kanal 1 bezeichnete dabei die Stimulation der beiden S1-Elektroden und entsprach einer Stimulation der vorderen suprahyoidalen Muskulatur.

Kanal 2 bezeichnete die Stimulation des hinteren Anteils der suprahyoidalen Muskulatur auf der rechten Seite.

Kanal 3 bezeichnete die Stimulation des hinteren Anteils der suprahyoidalen Muskulatur auf der linken Seite.

⁵ (Figure 1195, Frontview of neck, in: Henry Gray, *Anatomy of the Human Body*. 1918) übernommen aus <http://www.bartleby.com/107/illus1195.html>. Kanalbeschriftungen aus [28].

Diese Kanäle wurden im Rahmen der Durchführung der Versuche (*siehe* 2.5 Versuchsprotokoll und -durchführung, *Seite* 15) auf drei verschiedene Weisen kombiniert:

1. Eine ausschließliche Stimulation des Kanals 1, dem vorderen Anteil der suprahyoidalen Muskulatur entsprechend (in „Test 3“, „Test 4“, „Test 6“ und „Test 7“ enthalten).
2. Eine Stimulation der Kanäle 2 und 3; dies entsprach einer Stimulation der hinteren Anteile der suprahyoidalen Muskulatur (gleichfalls in „Test 3“, „Test 4“, „Test 6“ und „Test 7“ enthalten).
3. Eine Stimulation der Kanäle 1, 2 und 3; dies entsprach einer Stimulation der gesamten suprahyoidalen Muskulatur (in den unter 1. und 2. aufgeführten Tests enthalten, sowie für „Test 8 – 10“).

2.5 Versuchsprotokoll und -durchführung

Alle Versuche wurden durch den gleichen Untersucher durchgeführt.

Für jeden Probanden wurde ein separates Versuchsprotokoll in Ergänzung zu den Messaufzeichnungen angefertigt (*siehe Anhang: Studienprotokoll, Seite* 55). Das Protokoll enthielt neben den Kerndaten des Probanden (Untersuchungsdatum, Geschlecht, Alter, Gewicht und Körpergröße) den genauen Ablauf des Versuches und war gegebenenfalls mit Anmerkungen für den Untersucher versehen. Das Ziel war, die Durchführung der Untersuchungen möglichst gleichartig nach einem standardisierten Ablauf zu gewährleisten. Auf dem Laptop wurden während der Untersuchungen die einzelnen Teilversuche gleichfalls im Aufzeichnungsprogramm annotiert.

Männliche Probanden wurden gebeten, sich am Untersuchungstag vor dem Versuch zu rasieren, um ein optimales Anheften der Elektroden zu gewährleisten.

Die Untersuchungen wurden in den Räumlichkeiten der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde des *Unfallkrankenhauses Berlin (UKB)* durchgeführt.

Zunächst wurden der Laptop, das Messsystem und der Stimulator gestartet. Die Kerndaten des Probanden wurden sowohl auf dem Protokollzettel als auch in einer Tabelle des Aufzeichnungsprogramms erfasst.

Anschließend wurden die Elektroden aufgeklebt (*siehe* 2.3 Versuchsaufbau, *Seite* 12) und der Proband an das Messgerät sowie den Stimulator angeschlossen. Um die

Haftung der Stimulationselektroden am Probanden zu gewährleisten, wurden diese zusätzlich mit Pflasterstreifen an der Haut des Probanden fixiert.

Die Probanden wurden gebeten, für die Dauer des Versuches eine möglichst entspannte, aufrecht sitzende Haltung einzunehmen, um das Auftreten von durch Bewegungen verursachten Artefakten auf ein Minimum zu reduzieren. Der Kopf sollte in möglichst neutraler Position gehalten werden. In diesem Sinne wurden die Probanden auch gebeten, während der Versuche jegliche verbale Kommunikation auf ein notwendiges Minimum zu beschränken.

Zum Trinken erhielten alle Probanden Berliner Leitungswasser und wurden aufgefordert, für jeden Schluck eine für sie normale Menge Wasser in den Mund zu nehmen und sich während des Trinkens möglichst nicht auf die Ausführung des Schluckvorganges zu fokussieren. Für jeden Schluck sollten sie aus einem Becher jeweils erneut Wasser aufnehmen und dieses dann komplett hinunterschlucken.

Vor Beginn der Stimulation wurden die Probanden erneut auf die bevorstehenden möglichen Sensationen hingewiesen. Außerdem wurden sie aufgefordert, eine sofortige Rückmeldung zu geben, falls bei einem Test die zu erwartende Stimulation nicht spürbar oder nicht gut verträglich sei.

Test 1 – Festlegung der Simulationsintensitäten

Als Erstes wurden die Simulationsintensitäten durch die Stromstärke in Milliampere [mA] für die drei Kanäle festgelegt. Die Steigerung erfolgte jeweils graduell in kleinen Schritten. Den Probanden wurde gesagt, dass die Stimulation soweit gesteigert werden würde, bis eine kräftige, für den Probanden noch angenehme Stimulation vorläge. Am Ende des „Test 1“ wurden alle drei Kanäle kurz gemeinsam aktiviert, um dem Probanden einen Eindruck dessen zu vermitteln, was ihn maximal an Stimulation erwarten würde, und um gegebenenfalls die Intensitäten wieder zu reduzieren. Die so bestimmten Intensitäten wurden dann für die Versuche „Test 3“ und „Test 4“ benutzt.

Test 2 – Schlucken ohne Stimulation

Die Probanden wurden aufgefordert, drei Schlucke ohne Stimulation zu machen.

Test 3 – externe Stimulation der suprahyoidalen Schluckmuskulatur

In diesem Test sollten die Probanden nicht selbständig schlucken. Stattdessen wurde ihre Schluckmuskulatur durch den Untersucher manuell gemäß folgendem Schema stimuliert: Jeweils drei „Nicht-Schlucke“, erst für Kanal 1, dann Kanal 2 und 3

zusammen, und dann für alle drei Kanäle zusammen.

Anschließend wurde erfasst, ob der Proband alle Stimulationen gespürt (stark, deutlich, wenig etc.) und wie er sie empfunden habe (gut verträglich, schmerzhaft, störend etc.).

Test 4 – Schlucken unter gleichzeitiger Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur

Nunmehr sollten die Probanden Wasser schlucken und dabei stimuliert werden.

Vor Beginn des Versuchs erhielten sie jeweils die gleiche, genaue Anweisung, wie der Versuch durchzuführen sei. Zunächst wurde der Trigger für die Stimulation durch den Untersucher aktiviert. Die Probanden erhielten anschließend einen mit dem *PhysioSense*-Gerät verbundenen Druckknopf. Sie wurden angehalten, jeweils einen Schluck in den Mund zu nehmen, kurz vor Beginn des Schluckens den Knopf zu drücken und solange gedrückt zu halten, bis der Schluck vorbei sei. Durch Drücken des Knopfes wurde die automatische Schlucktriggerung der *PhysioSense*-Software freigeschaltet, die auf dem oben genannten Algorithmus für eine automatische Schluckererkennung beruht.

Anschließend wurde der Versuch gemäß folgendem Schema durchgeführt: Jeweils drei Schlucke, erst für Kanal 1, dann Kanal 2 und 3 zusammen, und dann für alle drei Kanäle zusammen.

Nach Ende dieses Teilversuchs wurden die Probanden wiederum nach den unter „Test 3“ aufgeführten Wahrnehmungen befragt.

Test 5 – Erneute Festlegung der Stimulationsintensitäten

In der Annahme, dass sich die Akzeptanz der Probanden für die Stimulationsintensität nach den ersten Teilversuchen erhöht, wurde nun geprüft, ob eine Steigerung der Intensitäten für die drei Kanäle möglich ist. Dem jeweiligen Probanden wurde dabei gesagt, dass diejenige Stimulationsintensität bestimmt werden solle, die für ihn „maximal akzeptabel“ sei, ohne, dass er das Gefühl habe, Schmerzen zu erleiden.

Test 6 – externe Stimulation der suprahyoidalen Schluckmuskulatur

Der anschließende „Test 6“ entsprach dem vorab beschriebenen „Test 3“ mit den neuen, im „Test 5“ festgelegten Stimulationsintensitäten.

Die Probanden wurden wiederum nach den unter „Test 3“ aufgeführten Wahrnehmungen befragt.

Test 7 – Schlucken unter gleichzeitiger Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur

Der siebente Test war das Pendant zu „Test 4“ mit den neuen, im „Test 5“ festgelegten Stimulationsintensitäten.

Auch hier wurden die Probanden nach den unter „Test 3“ aufgeführten Wahrnehmungen befragt.

Test 8 – Schlucken unter gleichzeitiger, verlängerter Stimulation

In diesem Test sollten die Probanden erneut drei Schlucke mit Stimulation durch alle drei Kanäle (mit den im „Test 5“ festgelegten Intensitäten) machen, wobei nach dem Loslassen des Knopfes (*siehe* „Test 4“, *Seite 17*) die Stimulation noch für 0,5 Sekunden fortgeführt wurde.

In diesem Versuch wurde geprüft, ob eine Verlängerung der Stimulationsdauer eine Veränderung in der Bioimpedanz bewirkt; auch in diesen Teilversuch wurden die Probanden nach den unter „Test 3“ aufgeführten Wahrnehmungen befragt.

Test 9 und 10 – Muskelermüdungsversuch ohne und dann mit gleichzeitiger Stimulation

In den abschließenden Versuchen „Test 9“ und „Test 10“ wurde die Ermüdung der suprahyoidalen Muskulatur während des Schluckens untersucht.

Die Probanden sollten jeweils 15 Schlucke trinken; im „Test 9“ ohne sich zu stimulieren, im „Test 10“ mit gleichzeitiger Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur über alle drei Kanäle (mit den im „Test 5“ festgelegten Intensitäten).

Auch am Ende dieser beiden Teilversuche wurden die Probanden gefragt, ob sie alle Stimulationen gespürt, respektive bei allen Schlucken eine Stimulation registriert hatten.

Nach Beendigung der Versuchsreihe wurden die Elektroden vom Probanden entfernt und die aufgezeichneten Daten abgespeichert.

2.6 Ermittlung der Messparameter

Zur Auswertung der Schlucktätigkeit wurden die, durch das Messsystem automatisiert ermittelten, Messparameter Ausdehnung und Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung herangezogen. Diese können aus der Änderung der Bioimpedanzkurve ermittelt werden. Das Verfahren wurde durch vergleichende Untersuchungen mit Videofluoroskopien evaluiert [27].

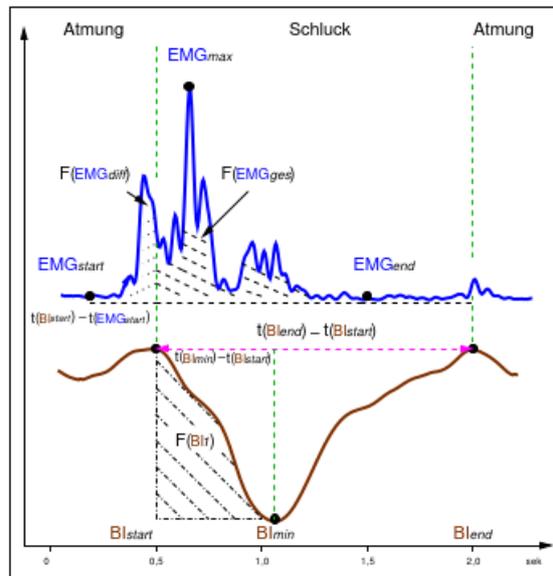


Abbildung 6: Auswertung der Bioimpedanz und EMG-Kurven

Die Messsignale zeigen einen typischen Speichelschluck eines gesunden Probanden mit den schluckspezifischen Merkmalen, die für die BI und das EMG berechnet werden konnten. Die obere Kurve bildet das EMG ab und die untere Kurve die BI.

Blstart = Beginn der Kehlkopfhhebung;

Blend = Ende des Schluckes;

$t(\text{Blmin}) - t(\text{Blstart})$ = Dauer der Kehlkopfhhebung;

$t(\text{Blend}) - t(\text{Blstart})$ = Dauer des Schluckes;

$F(\text{BI1})$ = Ausmaß des Kehlkopfvverschlusses;

Blmin = maximale Kehlkopfhhebung;

EMGstart = Beginn der EMG-Aktivität;

EMGend = Ende der EMG-Aktivität;

$t(\text{Blstart}) - t(\text{EMGstart})$ = Dauer der Schluckvorbereitung und Bolusformung;

EMGmax = maximale EMG-Aktivität während des Schluckes;

$F(\text{EMGges})$ = Ausmaß der EMG-Aktivität über den gesamten Schluck;

$F(\text{EMGdiff})$ = Ausmaß der Schluckvorbereitung und Bolusformung.

2.7 Statistische Auswertung

Bei den durch das *PhysioSense*-Messgerät erfassten Daten erfolgte die Bestimmung der Mittelwerte und Standardabweichungen.

Zur statistischen Analyse bei fehlender Normalverteilung wurden die Ergebnisse einem Wilcoxon-Test für abhängige Gruppen unterzogen. Mit Hilfe dieses Tests kann überprüft werden, ob sich die zentrale Tendenz zweier miteinander verbundener Stichproben signifikant unterscheidet.

Die statistische Aufarbeitung der Daten erfolgte mit der Programmiersprache „R“ für statistisches Rechnen*.

* Siehe <http://www.r-statistik.de/>.

Folgende Signifikanzniveaus und Irrtumswahrscheinlichkeiten wurden der Auswertung zu Grunde gelegt:

Signifikanzniveau α			Irrtumswahrscheinlichkeit p	
<i>Wert</i>	<i>Interpretation</i>	<i>Kennzeichnung</i>	<i>Wert</i>	<i>Interpretation</i>
$\alpha > 0,05$	nicht signifikant			
$\alpha = 0,01 - 0,05$	signifikant	*	$p \leq 0,05$	kleiner als 5 %
$\alpha = 0,001 - 0,01$	hoch signifikant	**	$p \leq 0,01$	kleiner als 1 %
$\alpha = 0,001$	höchst signifikant	***	$p \leq 0,001$	kleiner als 1 ‰

Tabelle 2 Signifikanzniveaus

3 Ergebnisse

3.1 Probanden

Die Versuche wurden zwischen dem Sommer 2014 und dem Frühjahr 2016 durchgeführt. Pro Proband dauerte die gesamte Untersuchungsreihe inklusive Vorbereitung ca. eine halbe Stunde. Die vorab definierten Ein- und Ausschlusskriterien waren bei allen Probanden eingehalten worden.

Es wurden insgesamt 49 Probanden untersucht, davon waren 25 männlich und 24 weiblich (siehe Tabelle 3, Seite 21, für die durchschnittlichen Charakteristika, sowie Tabelle 4, Seite 21 & 22, für die genaue Aufschlüsselung des Kollektivs).

Parameter	Mindestwert	Maximalwert	Mittelwert	Standardabweichung
Alter [a]	18	55	30	7,61
Körpergröße [cm]	160	196	176	7,99
Körpergewicht [kg]	54	105	73	12,18

Tabelle 3: durchschnittliche Charakteristika der Probanden

Proband	Geschlecht	Alter [a]	Körpergröße [cm]	Körpergewicht [kg]
1	m	30	178	86
2	w	38	170	55
3	w	30	170	69
4	m	20	186	60
5	m	52	192	85
6	m	25	180	90
7	m	25	180	80
8	m	31	185	80
9	w	33	174	58
10	w	30	175	63
11	m	27	182	65
12	w	23	178	61
13	w	35	165	55
14	w	24	164	54
15	m	18	173	60
16	w	31	173	65
17	m	35	175	81
18	m	24	174	71

Tabelle 4: genaue Aufschlüsselung des Probandenkollektivs

Proband	Geschlecht	Alter [a]	Körpergröße [cm]	Körpergewicht [kg]
19	w	32	178	105
20	m	27	181	82
21	m	30	183	80
22	w	24	175	75
23	m	31	185	74
24	m	30	180	82
25	w	29	171	68
26	m	18	196	80
27	w	28	165	75
28	w	35	173	78
29	w	27	165	60
30	w	28	160	65
31	m	30	183	82
32	m	18	176	75
33	m	45	170	67
34	w	29	175	59
35	m	36	192	98
36	m	34	180	83
37	m	36	185	89
38	m	18	173	62
39	w	27	164	78
40	w	28	170	68
41	m	18	176	75
42	w	30	172	55
43	m	55	188	98
44	w	29	173	60
45	w	29	167	78
46	w	32	170	80
47	w	36	164	65
48	m	39	178	78
49	w	29	180	65

Fortsetzung Tabelle 4: genaue Aufschlüsselung des Probandenkollektivs

3.2 Veränderungen der Bioimpedanz durch eine Stimulation

Es werden die Datensätze aller 49 Probanden mit insgesamt 2747 Schlucken (davon 896 Schlucke ohne Stimulation und 1851 Schlucke mit Stimulation) dargestellt.

3.2.1 Vergleich der Schlucke ohne versus mit FES

Im Vergleich der Schlucke mit Stimulation und der Schlucke ohne Stimulation zeigten sich signifikante Zunahmen der maximalen Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$) und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$). Ebenso zeigte sich eine signifikante Zunahme des Ausmaßes des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Schlucke mit Stimulation
	n = 896	n = 1851
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,661 (0,29)	-0,788 (0,37)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,790 (1,28)	-3,338 (1,62)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,843 (0,19)	-0,894 (0,21)

Tabelle 5: Vergleich der Schlucke ohne und mit FES

Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Es zeigte sich, dass sich die maximale Kehlkopfhebung von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3 verringerte ($p = ,004^{**}$), und dann zu Kanal 1, 2 & 3 wieder anstieg ($p = ,041^*$).

Die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$ (Kanal 1 bis 3), $p = ,007^{**}$ (Kanal 2 & 3)) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,001^{**}$ (Kanal 1 & 2), $p = ,000^{***}$ (Kanal 1 – 3), $p = ,006^{**}$ (Kanal 2 & 3)) zeigten eine Steigerung von Kanal 1 über 2 & 3 bis 1 – 3.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 896	n = 298	n = 307	n = 1246
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,661 (0,29)	-0,761 (0,35)	-0,739 (0,36)	-0,807 (0,37)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,790 (1,28)	-2,903 (1,17)	-3,172 (1,43)	-3,483 (1,73)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,843 (0,19)	0,826 (0,23)	-0,882 (0,17)	-0,913 (0,22)

Tabelle 6: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 75 %-Intensität zeigte sich eine signifikante Steigerung für die maximale Kehlkopfhebung ($p = ,034^*$ (Kanäle 1 – 3)) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,016^*$ (Kanäle 1 & 2), $p = ,046^*$ (Kanäle 1 – 3)).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 896	n = 146	n = 153	n = 148
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,661 (0,29)	-0,691 (0,30)	-0,747 (0,34)	-0,767 (0,36)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,790 (1,28)	-2,840 (1,07)	-3,115 (1,29)	-3,119 (1,82)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,843 (0,19)	-0,812 (0,23)	-0,873 (0,18)	-0,863 (0,28)

Tabelle 7: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 100 %-Intensität zeigten sich signifikante Steigerungen für die maximale Kehlkopfhebung ($p = ,025^*$ (Kanäle 1 – 3), $p = ,007^{**}$ (Kanäle 2 & 3)), das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,026^*$ (Kanäle 1 & 2), $p = ,000^{***}$ (Kanäle 1 – 3)) und die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$ (Kanäle 1 – 3)).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation n = 896	Kanal 1 n = 152	Kanal 2, 3 n = 154	Kanal 1,2,3 n = 1098
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,661 (0,29)	-0,828 (0,38)	-0,731 (0,38)	-0,812 (0,38)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,790 (1,28)	-2,963 (1,25)	-3,228 (1,56)	-3,532 (1,72)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,843 (0,19)	-0,840 (0,23)	-0,892 (0,17)	-0,920 (0,21)

Tabelle 8: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

Im Vergleich zeigten die Schlucke mit der 75 %-Intensität und der 100 %-Intensität eine signifikante Steigerung für die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$) und die maximale Kehlkopfhebung ($p = ,003^{**}$).

Das Ausmaß des Rachenverschlusses zeigte lediglich eine signifikante Steigerung bei den Werten der 100 %-Intensität.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation n = 896	Stimulation mit 75 % n = 447	Stimulation mit 100 % n = 1404
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,661 (0,29)	-0,735 (0,33)	-0,805 (0,38)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,790 (1,28)	-3,027 (1,43)	-3,437 (1,67)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,843 (0,19)	-0,850 (0,23)	-0,908 (0,21)

Tabelle 9: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

3.2.2 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Schlucke bei Verbesserung beider Schluckparameter

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf jene Probanden, bei denen es zu einer Verbesserung der maximalen Kehlkopfhebung und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung kam.

Es werden die Datensätze von 34 Probanden mit insgesamt 1850 Schlucken (davon 594 Schlucke ohne Stimulation und 1256 Schlucke mit Stimulation) dargestellt.

Vergleich der Schlucke ohne versus mit FES

Im Vergleich der Schlucke mit Stimulation und der Schlucke ohne Stimulation zeigten sich signifikante Zunahmen der maximalen Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$) und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$). Ebenso zeigte sich eine signifikante Zunahme des Ausmaßes des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Schlucke mit Stimulation
	n = 594	n = 1256
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,658 (0,28)	-0,885 (0,37)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,877 (1,32)	-3,667 (1,60)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,804 (0,20)	-0,873 (0,19)

Tabelle 10: Vergleich der Schlucke ohne und mit FES

Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Es zeigte sich, dass die maximale Kehlkopfhebung sich von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3 verringerte ($p = ,017^{**}$), und dann zu Kanal 1, 2 & 3 wieder anstieg ($p = ,039^*$).

Die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,011^*$ (Kanäle 1 & 2), $p = ,000^{***}$ (Kanal 1 bis 3), $p = ,007^{**}$ (Kanal 2 & 3)) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,02^*$ (Kanal 1 & 2), $p = ,000^{***}$ (Kanal 1 – 3), $p = ,001^{***}$ (Kanal 2 & 3)) zeigten eine Steigerung von Kanal 1 über 2 & 3 bis 1 – 3.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 594	n = 207	n = 202	n = 847
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,658 (0,28)	-0,842 (0,36)	-0,832 (0,37)	-0,909 (0,37)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,877 (1,32)	-3,062 (1,15)	-3,449 (1,48)	-3,867 (1,67)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,804 (0,20)	-0,804 (0,21)	-0,850 (0,17)	-0,896 (0,19)

Tabelle 11: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 75 %-Intensität zeigte sich eine signifikante Steigerung für die maximale Kehlkopfhebung ($p = ,03^*$ (Kanäle 1 – 3)) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,043^*$ (Kanäle 1 – 3)).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation n = 594	Kanal 1 n = 104	Kanal 2, 3 n = 103	Kanal 1,2,3 n = 101
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,658 (0,28)	-0,741 (0,31)	-0,842 (0,34)	-0,859 (0,35)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,877 (1,32)	-2,950 (1,10)	-3,275 (1,26)	-3,384 (1,32)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,804 (0,20)	-0,781 (0,24)	-0,841 (0,17)	-0,838 (0,17)

Tabelle 12: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 100 %-Intensität zeigten sich signifikante Steigerungen für die maximale Kehlkopfhebung ($p = ,01^{**}$ (Kanäle 1 & 2), $p = ,013^*$ (Kanäle 2 & 3)), das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,018^*$ (Kanäle 2 & 3), $p = ,000^{***}$ (Kanäle 1 – 3)) und die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$ (Kanäle 1 – 3), $p = ,038^*$ (Kanäle 1 & 2)).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation n = 594	Kanal 1 n = 103	Kanal 2, 3 n = 99	Kanal 1,2,3 n = 746
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,658 (0,28)	-0,944 (0,38)	-0,821 (0,40)	-0,916 (0,37)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,877 (1,32)	-3,175 (1,19)	-3,630 (1,67)	-3,932 (1,70)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,804 (0,20)	-0,827 (0,16)	-0,859 (0,17)	-0,903 (0,19)

Tabelle 13: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

Im Vergleich zeigten die Schlucke mit der 75 %-Intensität und der 100 %-Intensität eine signifikante Steigerung für die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$) und die maximale Kehlkopfhebung ($p = ,002^{**}$).

Das Ausmaß des Rachenverschlusses zeigte lediglich eine signifikante Steigerung bei den Werten der 100 %-Intensität.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation n = 594	Stimulation 75 % n = 308	Stimulation 100 % n = 948
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,658 (0,28)	-0,813 (0,34)	-0,909 (0,37)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω /sec]	-2,877 (1,32)	-3,201 (1,24)	-3,818 (1,67)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,804 (0,20)	-0,820 (0,20)	-0,891 (0,18)

Tabelle 14: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

3.2.3 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Schlucke bei Verringerung beider oder einer der Schluckparameter

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf jene Probanden, bei denen es zu einer Verringerung der maximalen Kehlkopfhebung und / oder der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung kam.

Es werden die Datensätze von 15 Probanden mit insgesamt 850 Schlucken (davon 282 Schlucke ohne Stimulation und 568 Schlucke mit Stimulation) dargestellt.

Vergleich der Schlucke ohne versus mit FES

Im Vergleich der Schlucke mit Stimulation und der Schlucke ohne Stimulation zeigten sich signifikante Verringerungen der maximalen Kehlkopfhebung ($p = ,001^{***}$) und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung ($p = ,000^{***}$). Es zeigte sich jedoch eine signifikante Zunahme des Ausmaßes des Rachenverschlusses ($p = ,026^*$).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Schlucke mit Stimulation
	n = 282	n = 568
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,685 (0,31)	-0,614 (0,27)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,826 (1,32)	-2,705 (1,29)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,918 (0,17)	-0,939 (0,21)

Tabelle 15: Vergleich der Schlucke ohne und mit FES

Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Die maximale Kehlkopfhebung und die Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung verringerten sich von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3 und stiegen zu Kanal 1 – 3 wieder an.

Das Ausmaß des Rachenverschlusses zeigte jedoch eine Steigerung über die drei Stimulationsvarianten ($p = ,031^*$ (Kanäle 1 & 2), $p = ,002^{**}$ (Kanäle 1 – 3)).

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 282	n = 88	n = 100	n = 380
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,685 (0,31)	-0,595 (0,23)	-0,586 (0,26)	-0,626 (0,29)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,826 (1,32)	-2,734 (1,12)	-2,687 (1,11)	-2,704 (1,37)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,918 (0,17)	-0,887 (0,17)	-0,941 (0,17)	-0,950 (0,22)

Tabelle 16: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Im Vergleich der drei Stimulationsvarianten zeigten sich für die 75 %-Intensität keine signifikanten Unterschiede.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 282	n = 48	n = 48	n = 44
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,685 (0,31)	-0,572 (0,22)	-0,577 (0,23)	-0,564 (0,27)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,826 (1,32)	-2,702 (0,94)	-2,849 (1,24)	-2,447 (2,47)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,918 (0,17)	-0,882 (0,17)	-0,928 (0,17)	-0,900 (0,35)

Tabelle 17: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Für die 100 %-Intensität konnten signifikante Unterschiede für das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,039^*$ (Kanäle 1 & 2), $p = ,013^*$ (Kanäle 1 – 3)) nachgewiesen werden.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 282	n = 48	n = 52	n = 336
Maximale Kehlkopfhebung [Ω]	-0,685 (9,31)	-0,614 (0,24)	-0,595 (0,29)	-0,633 (0,29)
Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung [Ω/sec]	-2,826 (1,32)	-2,761 (1,26)	-2,538 (0,96)	-2,737 (1,15)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,918 (0,17)	-0,890 (0,17)	-0,953 (0,16)	-0,957 (0,20)

Tabelle 18: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Im Vergleich zeigten die Schlucke mit der 75%-Intensität und der 100 %-Intensität eine Zunahme des Rachenverschlusses, jedoch eine Verringerung der maximalen Kehlkopfhebung und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung.

Parameter	Schlucke ohne Stimulation	Stimulation 75 %	Stimulation 100 %
	n = 282	n = 132	n = 436
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,685 (0,31)	-0,571 (0,24)	-0,627 (0,28)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-2,826 (1,32)	-2,670 (1,69)	-2,716 (1,14)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,918 (0,17)	-0,905 (0,24)	-0,949 (0,19)

Tabelle 19: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

3.2.4 Vergleich der Schluckrepetition ohne und mit FES

Es wurden die Datensätze aller 49 Probanden ausgewertet. Da die Zahlen der jeweils erfassten Schlucke in den Versuchen „Test 9“ und „Test 10“ unterschiedlich waren, wurden lediglich die ersten fünf Schlucke jedes Probanden ausgewertet. Dabei zeigten sich keine signifikanten Veränderungen der maximalen Kehlkopfhebung und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung sowohl ohne als auch mit Stimulation. Eine Ermüdung der suprahyoidalen Muskulatur war damit bis zu diesem Punkt nicht nachweisbar.

Schluck	Maximale Kehlkopfhebung [Ω]		Geschwindigkeit Kehlkopfhebung [Ω /sec]	
	ohne Stimulation	mit Stimulation	ohne Stimulation	mit Stimulation
1	-0,662 (0,29)	-0,826 (0,35)	-2,830 (1,18)	-3,558 (1,70)
2	-0,631 (0,25)	-0,738 (0,37)	-2,936 (1,38)	-3,457 (2,02)
3	-0,614 (0,26)	-0,796 (0,38)	-2,804 (1,30)	-3,696 (1,88)
4	-0,597 (0,28)	-0,826 (0,35)	-2,575 (1,25)	-3,959 (2,06)
5	-0,665 (0,28)	-0,832 (0,41)	-2,866 (1,40)	-3,733 (1,99)

Tabelle 20: Vergleich der Schluckrepetition ohne und mit FES

3.3 Veränderungen der Bioimpedanz durch Stimulation der Nicht-Schlucke

Es werden die Datensätze aller 49 Probanden mit insgesamt 755 Nicht-Schlucken dargestellt.

Per definitionem liegt die Bioimpedanz ohne funktionelle Elektrostimulation bei null.

Es wurden für jeden Probanden 3 Nicht-Schlucke ohne Stimulation (n = 147) mit dem Wert Null für die Schluckparameter in die Datenauswertung aufgenommen.

Vergleich der Nicht-Schlucke ohne versus mit FES

Im Vergleich der Nicht-Schlucke mit Stimulation und der Nicht-Schlucke ohne Stimulation zeigten sich signifikante Zunahmen der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$) und der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,000^{***}$). Ebenso zeigte sich eine signifikante Zunahme des Ausmaßes des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Nicht-Schlucke ohne Stimulation n = 147	Nicht-Schlucke mit Stimulation n = 755
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	0	-0,246 (0,20)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	0	-1,321 (1,17)
Ausmaß des Rachenverschlusses [$\Omega \cdot \text{sec}$]	0	-0,796 (0,28)

Tabelle 21: Vergleich der Nicht-Schlucke ohne und mit FES

Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Es zeigte sich eine Zunahme der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung von Kanal 1 und Kanal 2 & 3 zu Kanal 1, 2 & 3 ($p = ,004^{**}$).

Die maximale Änderung der BI-Amplitude ($p = ,012^*$ (Kanal 1 & 2), $P = ,021^*$ (Kanal 2 & 3)) und auch das Ausmaß des Rachenverschlusses zeigten eine Verringerung zwischen der Stimulation von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3, und dann eine Zunahme zu Kanal 1, 2 & 3 ($p = ,009^{**}$).

Parameter	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 225	n = 270	n = 260
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,253 (0,18)	-0,224 (0,19)	-0,262 (0,22)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	-1,069 (0,80)	-1,392 (1,26)	-1,466 (1,30)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,756 (0,21)	-0,823 (0,32)	-0,802 (0,29)

Tabelle 22: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 75 %-Intensität zeigte sich eine signifikante Steigerung für die Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,008^{**}$ (Kanal 1 & 2), $p = ,002^{**}$ (Kanal 1, 2 & 3)).

Parameter	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 94	n = 132	n = 118
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,177 (0,14)	-0,195 (0,17)	-0,222 (0,18)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	-0,747 (0,63)	-1,214 (1,11)	-1,141 (1,01)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,823 (0,23)	-0,887 (0,35)	-0,808 (0,28)

Tabelle 23: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 100 %-Intensität zeigten sich signifikante Unterschiede für die maximale Änderung der BI-Amplitude ($p = ,001^{**}$ (Kanal 1 & 2)) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,023^*$ (Kanäle 1, 2 & 3)).

Parameter	Kanal 1 n = 131	Kanal 2, 3 n = 138	Kanal 1,2,3 n = 142
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,307 (0,18)	-0,252 (0,20)	-0,296 (0,24)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	-1,299 (0,84)	1,562 (1,36)	-1,737 (1,45)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,709 (0,19)	-0,762 (0,28)	-0,796 (0,29)

Tabelle 24: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Im Vergleich zeigten die Nicht-Schlucke mit der 75 %-Intensität und der 100%-Intensität signifikante Unterschiede für die maximale Änderung der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$), die Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,000^{***}$) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Stimulation mit 75 % n = 344	Stimulation mit 100 % n = 411
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,199 (0,16)	-0,285 (0,21)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	-1,061 (0,98)	-1,539 (1,26)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,843 (0,30)	-0,757 (0,26)

Tabelle 25: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

3.3.1 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Nicht-Schlucke bei Verbesserung beider Schluckparameter

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf die 34 unter 3.3.1 analysierten Probanden.

Es werden die Datensätze mit insgesamt 755 Nicht-Schlucken dargestellt.

Per definitionem liegt die Bioimpedanz ohne funktionelle Elektrostimulation bei null.

Es wurden für jeden Probanden 3 Nicht-Schlucke ohne Stimulation ($n = 147$) mit dem Wert Null für die Schluckparameter in die Datenauswertung aufgenommen.

Vergleich der Nicht-Schlucke ohne versus mit FES

Im Vergleich der Nicht-Schlucke mit Stimulation und der Nicht-Schlucke ohne Stimulation zeigten sich signifikante Zunahmen der maximalen Änderung der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$) und der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,000^{***}$). Gleichfalls zeigte sich eine signifikante Zunahme des Ausmaßes des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Nicht-Schlucke ohne Stimulation	Nicht-Schlucke mit Stimulation
	n = 102	n = 518
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	0	-0,277 (0,21)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	0	-1,470 (1,21)
Ausmaß des Rachenverschlusses [$\Omega \cdot \text{sec}$]	0	-0,758 (0,26)

Tabelle 26: Vergleich der Nicht-Schlucke ohne und mit FES

Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Es zeigte sich eine nicht signifikante Zunahme der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3 und zu Kanal 1, 2 & 3.

Die maximale Änderung der BI-Amplitude ($p = ,002^{**}$ (Kanal 1 & 2)) und das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,024^*$ (Kanal 1 & 2), $p = ,030^*$ (Kanal 1, 2 & 3)) zeigten eine Verringerung der Stimulation von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3, und eine Zunahme zu Kanal 1, 2 & 3 ($p = ,009^{**}$ (Kanal 2 & 3)).

Parameter	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 153	n = 184	n = 181
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,296 (0,19)	-0,246 (0,20)	-0,292 (0,24)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	-1,256 (0,86)	-1,522 (1,31)	-1,597 (1,32)
Ausmaß des Rachenverschlusses [$\Omega \cdot \text{sec}$]	-0,704 (0,18)	-0,804 (0,33)	-0,757 (0,23)

Tabelle 27: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 75 %-Intensität zeigte sich eine signifikante Steigerung bei der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,037^*$ (Kanal 1, 2 & 3)).

Parameter	Kanal 1 n = 61	Kanal 2, 3 n = 87	Kanal 1,2,3 n = 85
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,214 (0,16)	0,217 (0,18)	-0,250 (0,19)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-0,900 (0,70)	-1,262 (1,04)	-1,269 (1,06)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,779 (0,20)	-0,856 (0,36)	-0,762 (0,21)

Tabelle 28: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 100 %-Intensität zeigten sich signifikante Unterschiede in der maximalen Änderung der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$ (Kanal 1 & 2), $p = ,047^*$ (Kanal 1, 2 & 3)) und beim Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,003^{**}$ (Kanal 1, 2 & 3)).

Parameter	Kanal 1 n = 92	Kanal 2, 3 n = 97	Kanal 1,2,3 n = 96
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,349 (0,87)	-0,273 (0,21)	-0,330 (0,26)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-1,493 (0,87)	-1,756 (1,49)	-1,887 (1,46)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,655 (0,14)	-0,757 (0,30)	-0,752 (0,24)

Tabelle 29: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten (100%)

3.3.2 Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

Im Vergleich zeigten die Nicht-Schlucke mit der 75 %-Intensität und der 100 %-Intensität signifikante Unterschiede sowohl für die maximale Änderung der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$) und die Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,000^{***}$) als auch das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Stimulation mit 75 %	Stimulation mit 100 %
	n = 233	n = 282
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,228 (0,18)	-0,317 (0,22)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω/sec]	-1,170 (0,98)	-1,715 (1,31)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω*sec]	-0,802 (0,28)	-0,722 (0,24)

Tabelle 30: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

3.3.3 Veränderung der Bioimpedanz durch Stimulation der Nicht-Schlucke bei Verringerung beider oder einer der Schluckparameter

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf die 15 unter 3.3.3 aufgeführten Probanden.

Es werden die Datensätze mit insgesamt 190 Nicht-Schlucken dargestellt.

Per definitionem liegt die Bioimpedanz ohne funktionelle Elektrostimulation bei null.

Es wurden für jeden Probanden 3 Nicht-Schlucke ohne Stimulation (n = 147) mit dem Wert Null für die Schluckparameter in die Datenauswertung aufgenommen.

Vergleich der Nicht-Schlucke ohne versus mit FES

Im Vergleich der Nicht-Schlucke mit Stimulation und der Nicht-Schlucke ohne Stimulation zeigten sich signifikante Zunahmen der maximalen Änderung der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$) und der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,000^{***}$). Gleichfalls zeigte sich eine signifikante Zunahme des Ausmaßes des Rachenverschlusses ($p = ,000^{***}$).

Parameter	Nicht-Schlucke ohne Stimulation	Nicht-Schlucke mit Stimulation
	n = 42	n = 190
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	0	-0,164 (0,13)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	0	-0,828 (0,76)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	0	-0,827 (0,27)

Tabelle 31: Vergleich der Nicht-Schlucke ohne und mit FES

Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Es zeigte sich eine signifikante Zunahme der Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung von Kanal 1 zu Kanal 2 & 3 und zu Kanal 1, 2 & 3 ($p = ,010^*$ (Kanal 1, 2 & 3)).

Die Änderungen der maximalen Änderung der BI-Amplitude und des Ausmaßes des Rachenverschlusses waren nicht signifikant.

Parameter	Kanal 1	Kanal 2, 3	Kanal 1,2,3
	n = 54	n = 72	n = 64
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,145 (0,10)	-0,154 (0,12)	-0,190 (0,16)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-0,590 (0,40)	-0,849 (0,75)	-1,007 (0,93)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,847 (0,23)	-0,821 (0,27)	-0,817 (0,30)

Tabelle 32: Vergleich der Stimulationskanäle (beide Stimulationsintensitäten)

Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 75 %-Intensität zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kanälen.

Parameter	Kanal 1 n = 24	Kanal 2, 3 n = 37	Kanal 1,2,3 n = 27
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,109 (0,04)	-0,119 (0,08)	-0,128 (0,08)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-0,471 (0,33)	-0,718 (0,74)	-0,632 (0,54)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,885 (0,23)	-0,903 (0,29)	-0,872 (0,36)

Tabelle 33: Vergleich der Stimulationskanäle (75 % Stimulationsintensität)

Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Bei Stimulation mit der 100 %-Intensität zeigten sich signifikante Unterschiede für die Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,011^*$ (Kanal 1, 2 & 3)).

Parameter	Kanal 1 n = 30	Kanal 2, 3 n = 35	Kanal 1,2,3 n = 37
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,174 (0,12)	-0,191 (0,14)	-0,236 (0,19)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-0,685 (0,44)	-0,987 (0,75)	-1,281 (1,06)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,816 (0,23)	-0,734 (0,22)	-0,778 (0,24)

Tabelle 34: Vergleich der Stimulationskanäle (100 % Stimulationsintensität)

Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

Im Vergleich zeigten die Nicht-Schlucke mit der 75 %-Intensität und der 100 %-Intensität signifikante Unterschiede sowohl für die maximale Änderung der BI-Amplitude ($p = ,000^{***}$) und die Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung ($p = ,000^{***}$) als auch das Ausmaß des Rachenverschlusses ($p = ,003^{**}$).

Parameter	Stimulation mit 75 %	Stimulation mit 100 %
	n = 88	n = 102
Maximale Änderung der BI-Amplitude [Ω]	-0,119 (0,07)	-0,202 (0,15)
Geschwindigkeit der BI-Amplitudenänderung [Ω /sec]	-0,624 (0,59)	-1,005 (0,84)
Ausmaß des Rachenverschlusses [Ω *sec]	-0,889 (0,30)	-0,774 (0,23)

Tabelle 35: Vergleich der beiden Stimulationsintensitäten

3.4 Gesamtübersicht genutzte Stimulationsintensitäten in [mA]

Proband	Stimulation 75 %			Stimulation 100 %		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	5,75	4,0	4,25	6,0	4,25	4,5
2	10,0	7,0	8,5	13,0	10,0	11,0
3	5,5	5,5	4,5	6,0	6,0	5,0
4	7,5	8,0	9,0	10,0	10,0	12,0
5	14,0	13,0	12,0	22,0	17,0	18,0
6	4,0	6,0	5,5	9,0	7,5	6,5
7	7,5	6,5	6,0	10,0	8,0	7,8
8	4,0	4,0	4,0	6,8	6,5	4,8
9	7,0	5,5	5,5	9,2	7,0	7,5
10	7,0	6,0	6,0	8,5	7,5	7,0
11	2,5	2,0	2,0	4,5	4,5	4,5
12	4,5	5,0	5,0	5,0	6,5	6,0
13	9,5	7,0	8,0	12,0	9,5	12,0
14	9,0	9,8	12,0	14,0	13,0	14,0
15	8,0	8,5	10,0	14,0	16,0	14,0
16	9,5	7,5	8,0	12,0	11,0	12,0
17	10,0	8,0	7,5	12,0	11,0	9,5
18	9,0	8,5	8,5	11,0	10,0	10,0
19	7,0	6,0	7,5	9,5	8,0	9,8
20	9,5	5,5	6,5	12,0	7,5	9,0
21	12,0	8,5	8,5	15,0	10,0	10,0
22	6,5	5,0	6,5	8,5	7,0	8,5
23	8,5	7,5	8,0	12,0	10,0	12,0
24	9,5	7,5	8,0	13,0	10,0	10,0
25	8,5	8,0	7,5	14,0	11,0	12,0
26	13,0	10,0	10,0	20,0	14,0	16,0
27	10,0	6,5	6,5	12,0	8,0	10,0
28	6,0	5,5	5,0	8,0	10,0	8,8
29	5,0	5,5	5,5	7,5	7,0	7,0
30	8,0	7,5	8,5	9,0	8,5	10,0

Tabelle 36: Gesamtübersicht genutzte Stimulationsintensitäten in [mA]

Proband	Stimulation 75 %			Stimulation 100 %		
31	9,5	8,0	8,5	14,0	11,0	12,0
32	6,0	6,0	6,5	8,0	7,0	8,5
33	8,5	7,0	8,5	10,0	8,5	9,5
34	8,5	6,0	6,5	12,0	9,5	10,0
35	9,5	7,0	8,5	12,0	9,5	12,0
36	12,0	10,0	8,0	14,0	12,0	9,5
37	7,5	6,5	6,5	10,0	10,0	9,5
38	10,0	9,0	10,0	14,0	14,0	12,0
39	8,5	7,5	8,5	12,0	12,0	11,0
40	9,0	8,0	8,5	14,0	11,0	12,0
41	5,5	5,5	5,0	7,0	6,0	6,0
42	12,0	9,0	9,5	17,0	12,0	14,0
43	12,0	9,5	9,5	18,0	18,20	18,0
44	14,0	13,0	16,0	21,0	16,0	22,0
45	7,0	8,0	7,0	11,0	11,0	9,0
46	5,5	5,5	5,0	7,5	7,0	7,0
47	7,0	6,0	6,0	11,0	8,0	8,5
48	6,0	3,5	4,0	7,0	5,0	5,0
49	10,0	6,5	5,5	14,0	8,5	7,0

Fortsetzung: Tabelle 36: Gesamtübersicht genutzte Stimulationsintensitäten in [mA]

3.5 Bewertung der Verträglichkeit und spürbaren Wirkung der Stimulation

Die Probanden wurden jeweils nach den beendeten Teilversuchen „Test 3, 4, 6, 7 und 8“ gefragt, ob und wie sie die Stimulation (egal, ob durch den Untersucher durchgeführt oder selbst getriggert) wahrgenommen hatten.

Außerdem wurden die Probanden gebeten, die Wirkung auf ihre Muskulatur in diesen Teilversuchen als gut oder schlecht verträglich (also unangenehm) zu beurteilen.

Alle 49 untersuchten Probanden gaben an, die Stimulation ihrer Muskulatur bei jedem der Teilversuche gespürt zu haben. Das subjektive Ausmaß der Wirkung wurde von 22 Probanden als stark, kräftig oder deutlich spürbar beschrieben, von den anderen 27 als wenig, aber stets spürbar beschrieben.

48 Probanden beschrieben die Stimulationen in den Versuchen „Test 3“ und „Test 4“ als gut verträglich und nicht störend. Von diesen Probanden beschrieben 37 die Stimulationen in den Versuchen mit Erhöhung der Stimulationsintensität („Test 6, 7 und 8“) als weiterhin gut verträglich, wenn auch wesentlich kräftiger spürbar. Die anderen 11 beschrieben die Stimulationen in den Versuchen „Test 6, 7 und 8“ als teilweise unangenehm, jedoch grundsätzlich ertragbar.

Lediglich eine Probandin empfand die Versuche „Test 3“ und „Test 4“ als generell unangenehm; allerdings war auch sie bereit, die weiteren folgenden Teilversuche durchzuführen, welche von ihr dann gleichfalls als unangenehm, interessanterweise jedoch nicht in gesteigertem Maße im Vergleich zum ersten Versuchsabschnitt, beschrieben wurden.

4 Diskussion

Sowohl die ursächliche Therapie von Schluckstörungen als auch die Behandlung und Verhinderung von mit diesen Störungen assoziierten Folgen (v.a. Aspirationspneumonien) bleiben im klinischen Alltag auch weiterhin eine vielseitige und kostenintensive Herausforderung.

Konventionelle therapeutische Ansätze beinhalten in der Logopädie die Anbahnung physiologischer Schluckmuster, den Abbau pathologischer Reflexe, die Anpassung von Ernährung und Essgewohnheiten und das Einüben von Schlucktechniken und Reinigungsstrategien für den Pharynx-Ösophagus-Trakt.

Ein weiterer Ansatz der aktuellen Forschung zur Therapie von Schluckstörungen ist die funktionelle Elektrostimulation. Die entsprechenden Forschungsvorhaben unterscheiden sich dabei hauptsächlich hinsichtlich der stimulierten Muskeln (einteilbar in laryngeale, infra- und suprahyoidale sowie submentale Muskelgruppen), der Auslösung der Stimulation (EMG-getriggert, einen Handschalter) und hinsichtlich der Beurteilungsverfahren zur Bewertung des Stimulationserfolgs (z.B. Elektromyographie, zervikale Auskultation oder Videofluoroskopie), inklusive der Frage nach einem geeigneten Algorithmus zur standardisierten Auswertung der erfassten Daten.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Hypothese zu überprüfen, dass eine automatische kutane Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur eine Möglichkeit ist, den Schluckablauf zu verändern. Dabei sollten vor allem die Randbedingungen für eine solche Stimulation geprüft werden.

Die Schluckdetektion und –bewertung erfolgte dabei durch die Messung von EMG- und Bioimpedanzänderungen im Zungengrund-Pharynxbereich.

Es wurden die Daten von 49 Probanden ausgewertet. Insgesamt gingen 2747 Schlucke in die Analyse ein; davon 896 Schlucke ohne Stimulation, und 1851 Schlucke mit Stimulation.

Bei 34 der 49 Probanden (69,4%) ließ sich eine Verbesserung der Kehlkopfhebung sowohl im Sinne der maximalen Kehlkopfhebung als auch der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung während eines willkürlich ausgelösten Schlucks nachweisen.

Drei Probanden (6,1 %) zeigten eine Verbesserung der maximalen Kehlkopfhebung und eine Verschlechterung der Geschwindigkeit.

Bei vier Probanden (8,2 %) ergaben sich eine Verbesserung der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung und eine Verschlechterung der maximalen Kehlkopfhebung.

Eine Verschlechterung der Kehlkopfhebung, sowohl im Maximum der Hebung als auch in der Geschwindigkeit, ergab sich bei acht Probanden (16,3 %).

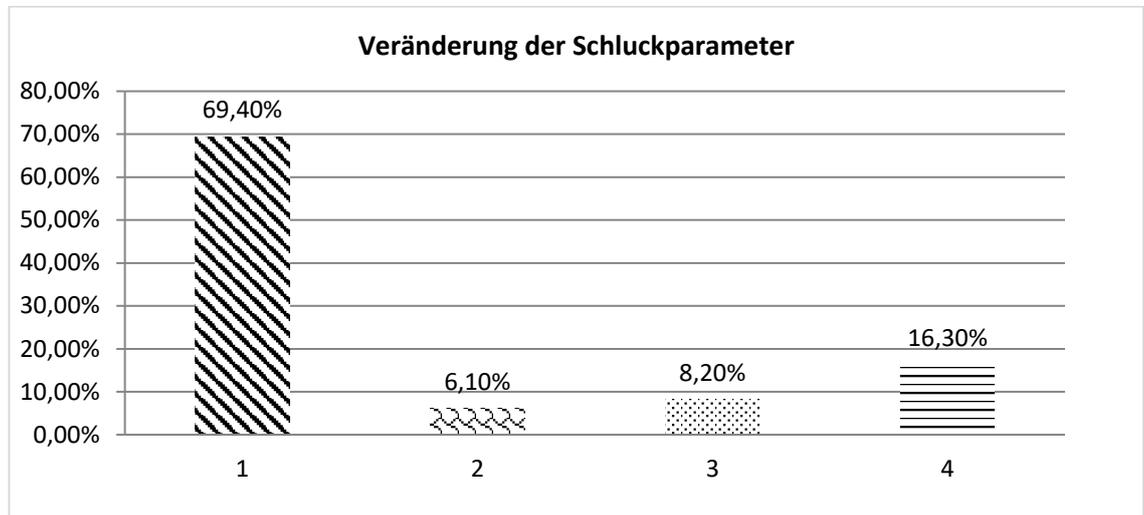


Abbildung 7: Änderung der Schluckparameter unter Stimulation

- 1 – Verbesserung der maximalen Kehlkopfhebung und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung.
- 2 – Verbesserung der maximalen Kehlkopfhebung und Verschlechterung der Geschwindigkeit.
- 3 – Verbesserung der Geschwindigkeit und Verschlechterung der maximalen Kehlkopfhebung.
- 4 – Verschlechterung der maximalen Kehlkopfhebung und der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung.

Sejdić et al. führen in einer aktuellen Arbeit [29] an, dass die zurzeit noch häufig praktizierte manuelle Auswertung von Videofluoroskopie- und Endoskopieaufnahmen sehr zeitaufwendig und anfällig für Fehlerquellen, wie beispielsweise die Ermüdung oder mangelnde klinische Erfahrung des Untersuchers, sind.

Sie berichten von eigenen Versuchen in den letzten Jahren, die Schluckfunktion durch die Analyse funktioneller magnetresonanztomographischer Aufnahmen zu erfassen und zu bewerten. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist einerseits, dass die Probanden, respektive Patienten, bei dieser Messmethode in liegender Position schlucken müssen, da es nur wenige MRT-Geräte mit einem aufrechtstehenden Magneten gibt. Andererseits berichten Sejdić et al. auch von magnetischen Suszeptibilitätsunterschieden im Grenzbereich von Luft und Weichgewebe, welche sich gerade im Bereich des Oropharynx mannigfaltig ergeben. Kritisch ist auch anzumerken, dass die Analyse funktioneller MRT-Bilder ein hohes Maß an Training und klinischer Expertise erfordert, wie sie aktuell in der klinischen Routine nur schwer

gewährleistet werden kann. Ein weiterer Nachteil seien laut den Autoren die hohen Kosten, welche einen Einsatz der Methode in der klinischen Praxis aktuell nicht zulassen.

Für die hier präsentierte Studie wurde das von Nahrstaedt et al. entwickelte *PhysioSense*-Messgerät mit seinen implementierten Algorithmen zur Schluckdetektion genutzt [23]. Die Erfassung der relevanten Parameter ausschließlich durch auf dem Probanden aufgeklebte Elektroden, sowie die Nichtabhängigkeit der Messungen von einer spezifischen Lagerung der Studienteilnehmer, sind entscheidende Vorteile für die Erfassung der Daten. Die informationstechnisch automatisierte Verarbeitung der erfassten Messparameter, im Gegensatz zur subjektiven Bewertung durch den Untersucher, bedeutet einen erheblichen Vorteil.

Es konnte gezeigt werden, dass diese Messmethode für die in dieser Studie stimulierten Muskelgruppen in der Lage ist, die Schlucke, sowie den Beginn und das Ende des jeweiligen Schluckes, sicher zu erkennen. Eine aussagekräftige Analyse der definierten qualitativen Merkmale der Schlucke (maximale Kehlkopfhebung, Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung und das Ausmaß des Rachenverschlusses) ist ebenfalls möglich.

Eine Forschungsgruppe um Ludlow et al. [19] untersuchte an einer kleinen Gruppe von elf Probanden mit Dysphagie die Effekte einer Stimulation der infrahyoidalen Muskulatur. Die Evaluation des Schluckerfolges erfolgte dabei anhand einer Bewegungsanalyse des Larynx' durch mehrere Logopäden, welche videofluoroskopische Aufnahmen des Schluckvorgangs anhand einer Skala (NIH Swallowing Safety Scale) bewerteten.

Die Forscher selbst merken in ihrer Publikation an, dass die Messverlässlichkeit dieser Bewertungsmethode teilweise eingeschränkt war, und dass es zusätzlich aufgrund der sehr geringen Kehlkopfbewegung bei erkrankten Probanden (angegeben zwischen 2 und 3 mm) zu einer ausgeprägten Messvariabilität mit entsprechender Streuung der Ergebnisse kam.

In der Auswertung der Versuchsreihe ergab sich letztlich, dass die Stimulation der infrahyoidalen Muskulatur in einer nach vorne und unten gerichteten Kehlkopfbewegung resultiert, welche verstärkt zu Aspirationen führt [19].

Suiter et al. untersuchten an einer Gruppe von acht Probanden die möglichen Auswirkungen einer neuroelektrischen Stimulationstherapie über zwei Wochen auf den physiologischen Schluckakt im Bereich der submentalen Muskulatur.

Zur Evaluation ihres Stimulationserfolgs erfassten die Forscher als Surrogatparameter oberflächlich abgeleitete elektromyographische Signale während der Schlucke der Probanden und werteten die gemessenen Amplituden aus.

Die Auswertung dieser Versuchsreihe konnte auch für diese Muskelgruppe keinen Effekt auf die biomechanischen Aspekte des Schluckens nachweisen [30].

In der hier vorgestellten Studie konnte dagegen erstmalig demonstriert werden, dass durch elektrische Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur während eines Schlucks die drei erfassten Schluckparameter Geschwindigkeit und Ausmaß der Kehlkopfhebung und das Ausmaß des Rachenverschlusses durch die unterstützende elektrische Stimulation des Schluckes signifikant erhöht werden können.

Es konnte demonstriert werden, dass die Steigerung der Stimulationsintensität eine Erhöhung der Werte der Schluckparameter zur Folge hat. Begrenzt wird die Erhöhung allerdings durch die Auslösung eines Schmerzreizes während der Stimulation. Dies kann dann zu einer Anspannung der Muskulatur führen, welche den Effekt der Stimulation aufhebt. Das zeigt sich in einer Verschlechterung der Kehlkopfhebung unter der Stimulation.

Die Stimulation bewirkte in allen drei getesteten Lokalisationsvarianten – vorderer, mittlerer und hinterer Mundboden (entweder nur Kanal 1, oder Kanal 2 und 3 zusammen, oder alle drei Kanäle, *siehe* Abbildung 5: Position der Mess- und Stimulationselektroden, *Seite 14*) – eine Veränderung der Schluckparameter. Es zeigte sich, dass eine Stimulation über alle drei Kanäle, also der vorderen und der seitlichen Anteile der suprahyoidalen Muskulatur gemeinsam, die stärksten Veränderungen der Schluckparameter zur Folge hatte. Sie ist daher die zu bevorzugende Stimulationsvariante.

Für 34 der 49 Probanden ließ sich auf diese Weise eine Verbesserung der Kehlkopfhebung sowohl im Sinne der maximalen Kehlkopfhebung als auch der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung demonstrieren.

Bei drei Probanden resultierten durch die Stimulation eine Verbesserung der maximalen Kehlkopfhebung und eine Verschlechterung der Geschwindigkeit, und bei weiteren vier Probanden eine Verbesserung der Geschwindigkeit der Kehlkopfhebung und eine Verschlechterung der maximalen Kehlkopfhebung.

Möglicherweise können Patienten, bei denen sich nur ein Teil der Schluckparameter verbessern lässt, nicht oder nur eingeschränkt von einer automatischen elektrischen Stimulation ihrer Schluckmuskulatur profitieren.

Eine Verschlechterung der Kehlkopfhebung, sowohl im Maximum der Hebung als auch in der Geschwindigkeit, ergab sich bei acht Probanden. Ursache dieses Effekts dürfte die Vorspannung der Muskulatur sein, die durch den Schmerz oder die Angst vor dem Schmerz bei den gesunden Probanden ausgelöst werden kann. Hier wäre zu Beginn einer möglichen Therapie eine vorsichtiger Anpassung der Stimulationsparameter notwendig. Es ist zu vermuten, dass im Rahmen einer tatsächlichen Therapie dieser Effekt dann abgebaut werden kann.

Unter der Stimulation kam es auch beim repetitiven Schlucken zu keiner signifikanten Änderung der Schluckparameter. Dies ist ein Hinweis, dass das Verfahren auch im Rahmen einer Therapie oder Nahrungsaufnahme eingesetzt werden kann.

Zusätzlich wurden 755 Nicht-Schlucke (also die Simulation eines Probanden durch den Untersucher, ohne dass der Proband dabei schluckt) analysiert. Dabei konnte ebenfalls eine Beeinflussung der Schluckparameter im Sinne einer Veränderung für die Nicht-Schlucke durch unterschiedliche Stimulationsintensitäten und -kanäle gezeigt werden. Ein vollständiger Schluck war aber durch die alleinige kutane Stimulation der Muskulatur nicht möglich.

Alle 49 Probanden spürten jede Stimulation ihrer Muskulatur; 48 von ihnen empfanden alle Versuche als gut oder grundsätzlich erträglich; eine Probandin empfand die Stimulationen als unangenehm. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die meisten potenziellen Nutzer eine auf dieser Funktionsweise basierende Neuroprothese problemlos tolerieren werden. Gegebenenfalls wird auch für diesen Aspekt durch weitere Versuche zu prüfen sein, ob ein Herantitrieren der notwendigen Stromstärke (und der daraus resultierenden Kontraktion der Muskulatur) für eine effektive Stimulation individuell für jeden Nutzer eine mögliche Option wäre, die Neuroprothese auch unter diesem Aspekt maximal anwenderfreundlich zu gestalten.

Es kann postuliert werden, dass die Patienten, um von solch einem Assistenzsystem maximal profitieren zu können, mit diesem einige Zeit trainieren müssen, ehe das volle Potential individuell ausgeschöpft werden kann.

Zur Versuchsdurchführung ist kritisch anzumerken, dass das ausgewählte Probandenkollektiv mit seinen Charakteristika sicherlich nur in wenigen Fällen den potenziellen Nutznießern eines „Schluckschrittmachers“ entspricht.

Mit einem Durchschnittsalter von 30 (± 7) Jahren waren die Probanden sehr jung. Des Weiteren bestanden bei keinem der Probanden weitere Nebenerkrankungen, die mit einer funktionalen Einschränkung im Leben einhergehen. Es wird daher in weiteren Studien zu untersuchen sein, ob sich die Ergebnisse auch bei älteren Menschen mit Schluckstörungen, sowie allgemein bei an Dysphagie leidenden Patienten jeden Alters, welche gegebenenfalls multiple Nebenerkrankungen aufweisen, reproduzieren lassen.

Ein mögliches methodisches Problem in der Versuchsdurchführung war, dass die Probanden sich der experimentellen Situation bewusst waren. Sie wurden zwar angehalten, während des Schluckens nicht aktiv darauf zu fokussieren und somit gegebenenfalls den Schluckakt unterstützend zu forcieren. Diese individuelle Interferenz konnte jedoch durch den genutzten Versuchsaufbau weder beeinflusst noch erfasst werden.

Darüber hinaus wurden die Versuche jedoch streng standardisiert und ausschließlich durch den gleichen Untersucher durchgeführt, um methodische Fehlerquellen möglichst zu vermeiden.

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Randbedingungen für eine kutane elektrische Stimulation des Mundbodens zu prüfen. Bisherigen Verfahren waren nicht in der Lage, das Schlucken mit ausreichender Sicherheit automatisch zu erkennen und den Stimulationstrigger auszulösen.

Das neu entwickelte Verfahren ist dazu in der Lage. Die Grundlage ist dabei die Erkennung der Kehlkopfbewegung. Gemessen wird ein kombiniertes EMG-Bioimpedanzsignal, welches gleichzeitig den Erfolg der Stimulation dokumentiert. Durch diese Verfahren wird es möglich, die Stimulation zu regeln. Die Intensität der Stimulation kann dann auf der Grundlage der Ergebnisse der vorangegangenen Stimulation angepasst werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Effekt einer kutanen Stimulation geprüft. Die alleinige Stimulation der Mundbodenmuskulatur ist nicht in der Lage eine Kehlkopfbewegung auszulösen, die einem Schluck entspricht. Notwendig ist immer eine Eigenaktivität der Probanden. Erst dadurch kann auch die Stimulation richtig gesetzt werden. Es hat sich in der Arbeit gezeigt, dass die größte Auslenkung der Kehlkopfbewegung bei einer Stimulation des seitlichen Mundbodens durch zwei Elektroden auf beiden Seiten erreicht wird. Für eine mögliche Therapie mit einer elektrischen Stimulation ist zu wissen, dass es bei einer repetitiven Stimulation zu keiner Ermüdung der Muskulatur kommt.

Eingeschränkt wurde das Stimulationsergebnis durch einige Probanden, die keine Besserung oder sogar eine Verschlechterung der Kehlkopfbewegung unter der Stimulation hatten. Dies ist am ehesten auf die Vorspannung der Muskulatur zurückzuführen. Im Rahmen einer Therapie kann durch eine langsame Anpassung der Stimulationsintensität und durch eine Wiederholung der Stimulationen dieses Phänomen unterdrückt werden.

Es muss nun geprüft werden, inwiefern das vorgestellte Verfahren in der Lage ist, das Schlucken bei Patienten mit einer Schluckstörung zu beeinflussen. Dabei ist zu klären, ob die Erkennungsalgorithmen für das Schlucken, die bei gesunden Schluckern entwickelt wurden, auch bei Patienten mit einer Schluckstörung, und damit mit einer eingeschränkten Kehlkopfhebung, in ausreichendem Maße funktionieren.

Im Weiteren muss dann geprüft werden, ob die beobachtete Änderung der Kehlkopfbewegung bei Patienten tatsächlich einen Effekt hat, welcher zu einem verbesserten Schluckvermögen führt.

Sollte dies der Fall sein, dann stünde erstmals in der Schlucktherapie ein Gerät zur Verfügung, welches sowohl für die Therapie als auch die Überprüfung der Therapieergebnisse genutzt werden kann.

6 Literaturverzeichnis

1. Altman KW, Yu G-P, Schaefer SD (2010) Consequence of dysphagia in the hospitalized patient: impact on prognosis and hospital resources. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 136:784–789. doi: 10.1001/archoto.2010.129
2. Bartolome DG, Schröter-Morasch DH, Buchholz D, Feussner H, Hannig C, Neumann S, Pehl C, Prosiegel M, Wuttge-Hannig A (2018) *Schluckstörungen: Diagnostik und Rehabilitation*, 3. Aufl. Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH
3. Blumenfeld L, Hahn Y, Lepage A, Leonard R, Belafsky PC (2006) Transcutaneous electrical stimulation versus traditional dysphagia therapy: a nonconcurrent cohort study. *Otolaryngol Head Neck Surg* 135:754–757. doi: 10.1016/j.otohns.2006.04.016
4. Broniatowski M (1993) Dynamic control of the larynx and future perspectives in the management of deglutitive aspiration. *Dysphagia* 8:334–336.
5. Broniatowski M, Sohn J, Kayali H, Bold EL, Miller FR, Jacobs GB, Tucker HM (1994) Artificial reflex arc: A potential solution for chronic aspiration. III: Stimulation of implanted cervical skin as a functional graft triggering glottic closure in the canine. *Laryngoscope* 104:1259–1263.
6. Broniatowski M, Vito KJ, Shah B, Shields R, Strome M (1997) Artificial control of glottic adduction for aspiration by orderly recruitment in the canine. *Dysphagia* 12:93–97.
7. Burnett TA, Mann EA, Cornell SA, Ludlow CL (2003) Laryngeal elevation achieved by neuromuscular stimulation at rest. *J Appl Physiol* 94:128–134. doi: 10.1152/jappphysiol.00406.2002
8. Burnett TA, Mann EA, Stoklosa JB, Ludlow CL (2005) Self-triggered functional electrical stimulation during swallowing. *J Neurophysiol* 94:4011–4018.
9. Cichero JAY, Altman KW (2012) Definition, prevalence and burden of oropharyngeal dysphagia: a serious problem among older adults worldwide and the impact on prognosis and hospital resources. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser* 72:1–11. doi: 10.1159/000339974

10. Freed ML, Freed L, Chatburn RL, Christian M (2001) Electrical stimulation for swallowing disorders caused by stroke. *Respir Care* 46:466–474.
11. Groher ME, Bukatman R (1986) The prevalence of swallowing disorders in two teaching hospitals. *Dysphagia* 1:3–6.
12. Hamdy S, Aziz Q, Rothwell JC, Singh KD, Barlow J, Hughes DG, Tallis RC, Thompson DG (1996) The cortical topography of human swallowing musculature in health and disease. *Nature Medicine* 2:1217–1224.
13. Hamdy S, Aziz Q, Rothwell JC, Crone R, Hughes D, Tallis RC, Thompson DG (1997) Explaining oropharyngeal dysphagia after unilateral hemispheric stroke. *The Lancet* 350:686–692.
14. Heuschmann PU, Busse O, Wagner M, Endres M, Villringer A, Röther J, Kolominsky-Rabas PL, Berger K (2010) Schlaganfallhäufigkeit und Versorgung von Schlaganfallpatienten in Deutschland. *Aktuelle Neurologie* 37:333–340. doi: 10.1055/s-0030-1248611
15. Johnson ER, McKenzie SW, Sievers A (1993) Aspiration pneumonia in stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 74:973–976.
16. Leelamanit V, Limsakul C, Geater A (2002) Synchronized electrical stimulation in treating pharyngeal dysphagia. *Laryngoscope* 112:2204–2210. doi: 10.1097/00005537-200212000-00015
17. Lippert H (1994) *Anatomie kompakt*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
18. Logemann JA (1995) *Dysphagia: Evaluation and Treatment*. *Folia Phoniatr Logop* 47:140–164.
19. Ludlow CL, Humbert I, Saxon K, Poletto C, Sonies B, Crujido L (2007) Effects of surface electrical stimulation both at rest and during swallowing in chronic pharyngeal Dysphagia. *Dysphagia* 22:1–10. doi: 10.1007/s00455-006-9029-4
20. McCullough GH, Kamarunas E, Mann GC, Schmidley JW, Robbins JA, Crary MA (2012) Effects of Mendelsohn Maneuver on Measures of Swallowing Duration Post Stroke. *Topics in Stroke Rehabilitation* 19:234–243. doi: 10.1310/tsr1903-234

21. Miller AJ (2008) The neurobiology of swallowing and dysphagia. *Developmental Disabilities Research Reviews* 14:77–86. doi: 10.1002/ddrr.12
22. Nahrstaedt H, Schauer T, Seidl RO (2010) Bioimpedance based measurement system for a controlled swallowing neuro-prosthesis. In: Proc. of 15th Annual International FES Society Conference and 10th Vienna Int. Workshop on FES. S 49–51
23. Nahrstaedt H, Schultheiss C, Seidl RO, Schauer T (2012) Swallow Detection Algorithm Based on Bioimpedance and EMG Measurements. In: Balazs B (Hrsg) *Biological and Medical Systems*. Elsevier, Budapest, S 91–96
24. Nam HS, Beom J, Oh B-M, Han TR (2013) Kinematic effects of hyolaryngeal electrical stimulation therapy on hyoid excursion and laryngeal elevation. *Dysphagia* 28:548–556. doi: 10.1007/s00455-013-9465-x
25. Nnoaham KE, Kumbang J (2008) Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) for chronic pain. *Cochrane Database Syst Rev* CD003222. doi: 10.1002/14651858.CD003222.pub2
26. Nusser-Müller-Busch R (2010) *Die Therapie des Facio-Oralen Trakts*. Springer, Berlin
27. Schultheiss C (2013) *Die Bewertung der pharyngalen Schluckphase mittels Bioimpedanz Evaluation eines Mess- und Diagnostikverfahrens*. Universitätsverlag Potsdam
28. Seidl RO, Nahrstaedt H, Schauer T (2009) Electric stimulation in dysphagia therapy--a review. *Laryngorhinootologie* 88:768–774. doi: 10.1055/s-0029-1237350
29. Sejdic E, Malandraki GA, Coyle JL (2019) Computational Deglutition: Using Signal- and Image-Processing Methods to Understand Swallowing and Associated Disorders [Life Sciences]. *IEEE Signal Processing Magazine* 36:138–146. doi: 10.1109/MSP.2018.2875863
30. Suiter DM, Leder SB, Ruark JL (2006) Effects of neuromuscular electrical stimulation on submental muscle activity. *Dysphagia* 21:56–60. doi: 10.1007/s00455-005-9010-7

31. Winstein CJ (1983) Neurogenic dysphagia. Frequency, progression, and outcome in adults following head injury. *Phys Ther* 63:1992–1997.
32. RKI - Beiträge zur Gesundheitsberichterstattung des Bundes (GBE) - Krebs in Deutschland 2009/2010.
<https://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsB/KID2013.html>. Zugegriffen: 22. Juli 2019

Anhang: Studienprotokoll

Proband: _____ U-Datum: _____ Geschlecht: _____

Körpergröße: _____ cm Gewicht: _____ kg Alter: _____

Definitionen:

Verträglichkeit: 1 = sehr gut erträglich, 2 = gut erträglich, 3 = akzeptabel, 4 = gar nicht erträglich

Wirkung: -2 = sehr negative Wirkung, -1 = negative Wirkung, 0 = keine Wirkung, 1 = geringe Wirkung, 2 = zeitgerecht

„Test1“ – Festlegung der Intensitäten in mA („75%“ – „angenehme, gute Stimulation“)

K1 _____ mA K2 _____ mA K3 _____ mA

„Test 2“ – Schlucken ohne Stimulation

Schluck im Mund kurz halten. Direkt vor Schluck Knopf drücken und gedrückt halten bis Schluck fast beendet.

Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
-----------	-----------	-----------

„Test 3“ – Stimulation ohne Schluck „75%“

	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung
Kanal 1						
Kanal 2,3						
Kanal 1-3						

„Test 4“ – Stimulation mit Schluck „75%“

	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung
Kanal 1						
Kanal 2,3						
Kanal 1-3						

„Test 5“ – Festlegung der Intensitäten in mA („maximal akzeptable Stimulation“)

K1 _____ mA K2 _____ mA K3 _____ mA

„Test 6“ – Stimulation ohne Schluck „100%“

	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung
Kanal 1						
Kanal 2,3						
Kanal 1-3						

„Test 7“ – Stimulation mit Schluck „100%“

	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung	Verträglichkeit	Wirkung
Kanal 1						
Kanal 2,3						
Kanal 1-3						

**„Test 8“ – verlängerte Stimulationsdauer (+ 0,5 Sek), alle 3 Kanäle.
Verlängerung danach wieder ausschalten!**

	Verträglichkeit	Wirkung
Schluck 1		
Schluck 2		
Schluck 3		

„Test 9“ – Ermüdung: 15 Mal hintereinander Schlucken, keine Stimulation, dann 5 min warten!

Zum Abhaken

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Verträglichkeit	Wirkung

„Test 10“ – Ermüdung: 15 Mal hintereinander Schlucken, maximale Stimulation

Zum Abhaken

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Verträglichkeit	Wirkung

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Jehoschua Bieler, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Experimentelle Studie zur automatischen kutanen elektrischen Stimulation der suprahyoidalen Muskulatur zur Kehlkopfhebung beim Schlucken“ – „Experimental study on automatic cutaneous electrical stimulation of suprahyoidal muscles for laryngeal elevation during swallowing“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

„Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.“

Danksagung

An erster Stelle dieser Danksagung muss definitiv meine Mutter stehen, welche mir viele Jahre lang und mit großer Selbstlosigkeit stets alles gab, was ich brauchte, und noch viele weitere Dinge. Riesige Unterstützung auf dem langen Weg des Doktorierens habe ich in jeder Hinsicht immer erfahren durch meine Familie, die biologische wie spirituelle. Ich weiß, was sie ertragen haben, sei's Launen oder Abwesenheiten, oder Probleme beim Messen oder Recherchieren oder mit meinem Mac. Ich möchte mich natürlich bei meinem Doktorvater, PD Dr. Seidl, bedanken, der mich mit großer Müh' und Ruh' zum Weitermachen motivierte, und bei der lieben Corinna Schultheiss von der TU ebenso. Schließlich ist dieses Opus demjenigen gewidmet, der die Ehre hat, am Anfang und Ende zu stehen.