



Spezialisierungsbericht:

**Literatur, Grundlagen und Studienkonzept zur Untersuchung  
menschlicher Stimmlippen mittels Farbdopplersonographie**

angefertigt von

**Maximilian Sauer, Matrikelnummer 2591562**

im

**Selbstständigen Funktionsbereich für Phoniatrie und Pädaudiologie  
des Universitätsklinikums Düsseldorf**

Betreuer: **Univ.-Prof. Dr. med. Wolfgang Angerstein**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Literatur zur Kehlkopfsonographie . . . . .	2
<b>2 Grundlagen der Stimmerzeugung</b>	<b>4</b>
2.1 Anatomie des Kehlkopfes . . . . .	6
2.2 Anatomie der Stimmlippen . . . . .	10
2.3 Schwingungsverhalten der Stimmlippen . . . . .	12
2.4 Drei-Massen-Modell der Stimmlippen . . . . .	16
2.5 Stimmgebungstechniken . . . . .	19
2.5.1 Weicher Stimmeinsatz und Coup de Glotte . . . . .	19
2.5.2 Taschenfaltenpressen und Pianissimo . . . . .	20
<b>3 Studienkonzept</b>	<b>21</b>
3.1 Aufnahme des Mikrofon-Stimmsignals . . . . .	22
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>



# **Kapitel 1**

## **Einleitung**

Ein wichtiger Teil der Phoniatrie ist die Untersuchung der Stimmlippen mit dem Ziel eines besseren Verständnisses der Physiologie der Stimmerzeugung, sowie des Erkennens und Behandelns von Pathologien. Hierbei stellt die direkte und indirekte Laryngoskopie das Standardverfahren zur Betrachtung der Stimmlippen in der Klinik dar [1]. Die dazu verwendeten Geräte reichen von simplen Kehlkopfspiegeln, über starre Lupenendoskope, bis hin zu Laryngoskopen mit flexiblen Faseroptiken [2, 3].

Da das Untersuchungsgerät transoral bzw. transnasal in den Körper eingeführt werden muss, setzt die Untersuchung eine gewisse Kooperationsbereitschaft des Patienten voraus, welche vor allem bei Kindern nicht immer gegeben ist. Probleme können außerdem bei starkem Würgereiz auftreten. [4–7]

Eine zur Laryngoskopie alternative Diagnosetechnik, die durch Weiterentwicklung und Verbesserung von Auswertungs- und Gerätetechnologie aktuell in den Fokus der Aufmerksamkeit rückt, ist die Kehlkopfsonographie, also die Untersuchung des Larynx mit Hilfe von diagnostischem Ultraschall. Eine Untersuchung mit Ultraschall ist nicht invasiv, schmerzfrei, gut verträglich und einfach durchzuführen. [8, 9]

Die Ergebnisse können gespeichert und zum Vergleich mit späteren Untersuchungen herangezogen werden, um eventuelle Therapieerfolge zu beurteilen. Zusätzlich ist die benötigte Kooperationsbereitschaft des Patienten bei einer Ultraschalluntersuchung bedeutend geringer als bei einer Laryngoskopie, wobei die Genauigkeit der Diagnose zumindest bei Kindern vergleichbar ist. [7, 10]

Mit Ultraschall ist es möglich, sowohl die Anatomie des Larynx, als auch dynamische Prozesse wie die Bewegungen der Stimmlippen darzustellen [11, 12].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Stimmlippenschwingungen mit Ultraschall. Dabei werden mit der Dopplersonographie Dopplerspektren der schwingenden

Stimmlippen aufgenommen, sowie die farbkodierte Duplexsonographie genutzt, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schleimhautwellen und das Elastizitätsmodul der Stimmlippen zu bestimmen. Diese Analysen finden bei Phonation verschiedener Vokale und mit unterschiedlichen Stimmgebungstechniken statt.

Im folgenden Abschnitt wird diesbezüglich die historische Entwicklung der Kehlkopfsonographie zusammengefasst und erläutert.

## 1.1 Literatur zur Kehlkopfsonographie

Die Verwendung von Ultraschall zur Untersuchung von Stimmlippenschwingungen wird bereits Mitte der 1960er Jahre beschrieben. [13, 14]

Eine Erweiterung der sonographischen Untersuchung besteht darin, die Schwingungen der Stimmlippen mit Hilfe des Doppler-Effekts zu analysieren. Dabei wird die Frequenzverschiebung des Ultraschallsignals ausgenutzt, um auf die Geschwindigkeit der Stimmlippenschwingungen zu schließen. [15]

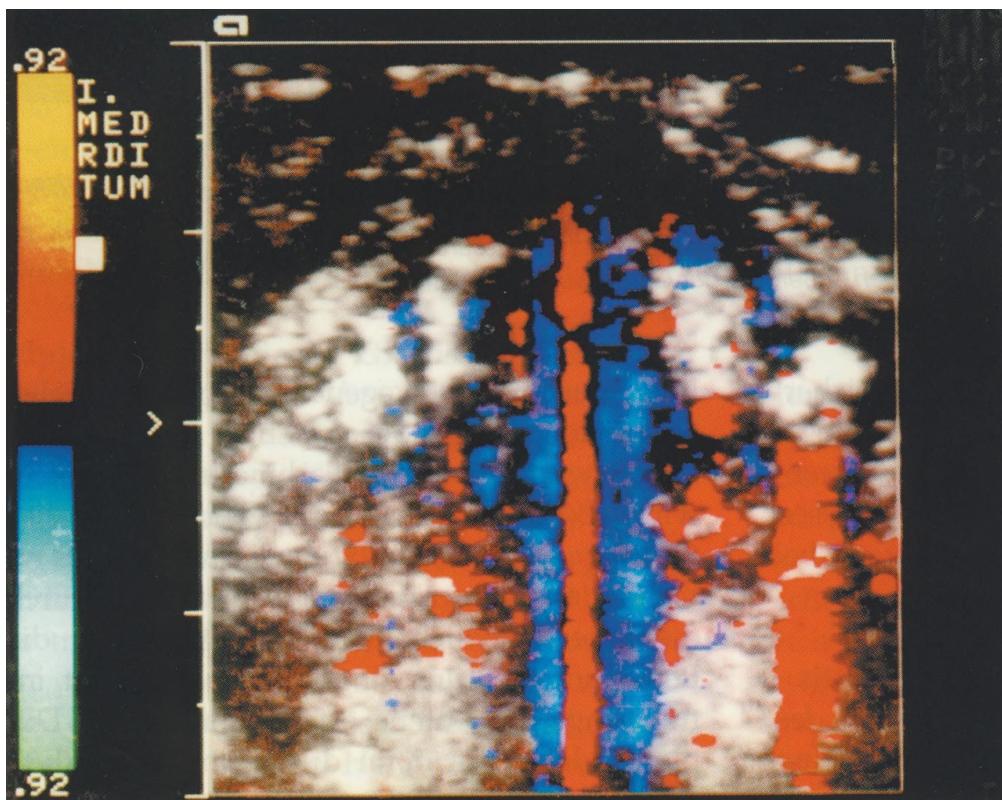
Die dabei aufgezeichneten Doppler-Spektren können Informationen liefern über Physiologie und funktionelle Pathologien der Phonation [16].

Wird die Aufnahme eines Ultraschall-Doppler-Spektrums mit einem B-Mode-Ultraschallbild kombiniert, erhält man die sogenannte Duplexsonographie. Diese hat den Vorteil, dass das Doppler-Spektrum genutzt werden kann, um die „Sensitivität der Bewertung“ [17] der Stimmlippen im B-Bild zu verbessern: Die intralaryngealen beweglichen Strukturen sind nämlich aufgrund ihrer anatomischen Lage im B-Mode nur eingeschränkt darstellbar. Erhält man dabei ein Doppler-Spektrum, so ist dies ein Anzeichen dafür, dass sich das Messvolumen an der richtigen Stelle befindet, obwohl im B-Mode die Stimmlippen nicht direkt zu erkennen sind. [17, 18]

Die Duplexsonographie kann zusätzlich farbkodiert durchgeführt werden. Dabei werden die gemessenen Geschwindigkeiten rot oder blau dargestellt und dem B-Mode-Bild überlagert. Rot entspricht der Bewegung auf die Ultraschallsonde zu und blau der Bewegung von der Sonde weg. [19–21]

Bei einer unauffälligen Phonation stimmgesunder Probanden entsteht ein charakteristisches Streifenmuster. Ein Beispiel eines solchen Musters ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Abweichungen können genutzt werden, um Pathologien der Stimmlippen zu erkennen. [18–20]

Das während der farbkodierten Duplexsonographie entstehende Streifenmuster kann somit zur Untersuchung der Stimmlippenfunktion bei physiologischer und pathologischer Phonation verwendet werden. [22]



**Abbildung 1.1:** Streifenmuster bei der farbkodierten Duplexsonographie des Larynx,  
Abbildung entnommen aus [19].

Die resultierenden Farbmuster sind Artefakte im Bereich der Stimmlippen, die dadurch entstehen, dass die Bildrate in dynamischem Ultraschall geringer ist als die Frequenz der Stimmlippenschwingungen. Dennoch lassen sich daraus physikalische Größen bestimmen wie die Geschwindigkeit der horizontalen Auslenkung der Stimmlippen [23], die Geschwindigkeit der über die Stimmlippen laufenden Schleimhautwelle [24] und das Elastizitätsmodul des Stimmlippengewebes [25].

Außerdem können, ähnlich wie bei der Stimmlippenstroboskopie, durch gezieltes Einstellen der Phonationsfrequenz die Schwingungen der Stimmlippen in dynamischem B-Mode-Ultraschall dargestellt und die entsprechenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Schleimhautwellen bestimmt werden [22, 26, 27].

## **Kapitel 2**

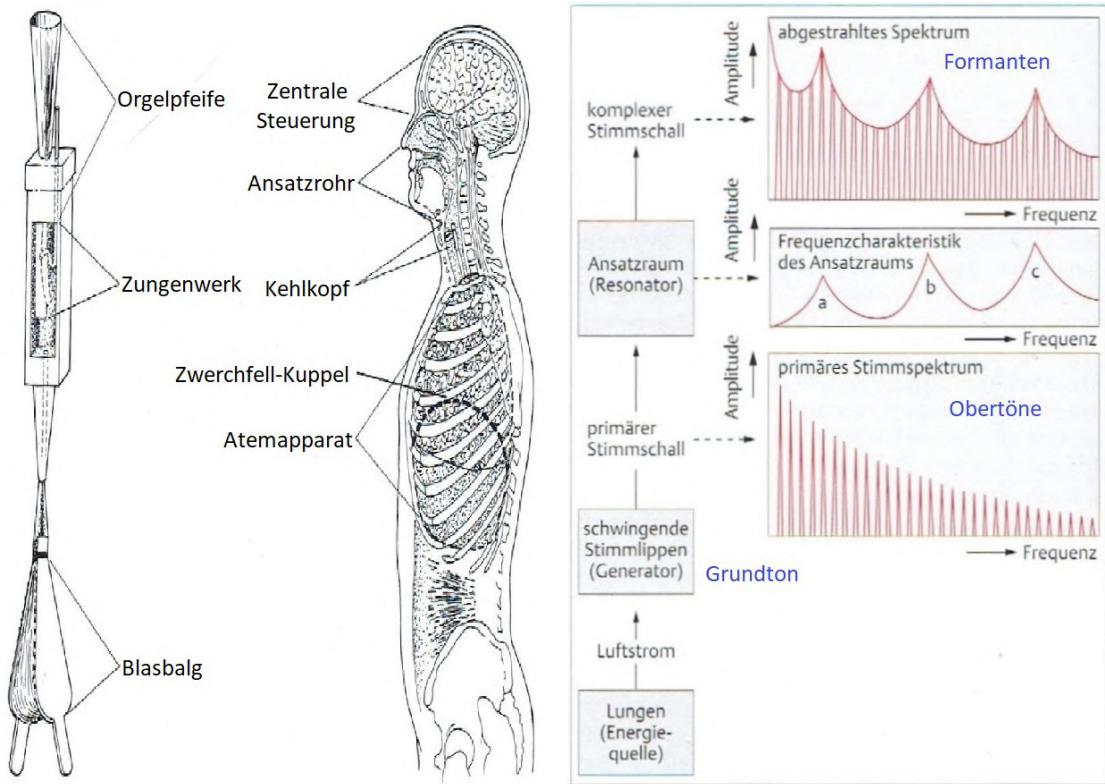
# **Grundlagen der Stimmerzeugung**

Obwohl die menschliche Stimme allen Musikinstrumenten in vielerlei Hinsicht weit überlegen ist, wird das Prinzip der Stimmerzeugung (Phonation) häufig mit der entsprechenden Funktion in Blasinstrumenten verglichen [28].

Ein solcher Vergleich mit einer Orgel ist schematisch zu sehen in Abbildung 2.1 links. Sowohl bei der Orgel, als auch beim Menschen gibt es drei Teile, die funktionell und anatomisch getrennt sind: Der Blasebalg bzw. Atemapparat sorgt für einen konstanten Nachschub an Luft, die im Zungenwerk bzw. Kehlkopf zu Schwingungen angeregt wird, welche anschließend in der Orgelpfeife bzw. dem Ansatzrohr verändert und frequenzverstärkt werden. [28, 29]

Dieses Prinzip der Stimmerzeugung und Klangbildung ist in Abbildung 2.1 rechts in detaillierter Form dargestellt. Die Lunge dient als Luftreservoir und ist in der Lage, einen intrapulmonalen Überdruck zu erzeugen und diesen aufrecht zu erhalten. Sie stellt damit die Energiequelle der Stimmerzeugung dar. Der Luftstrom wird beim Ausatmen durch die Luftröhre weitergeleitet bis in den Kehlkopf, in dem sich zwei Stimmlippen befinden. Diese werden durch den Ausatemstrom zu Schwingungen angeregt und erzeugen das primäre Stimmsignal, dessen Spektrum aus einer Grundfrequenz, welche die Tonhöhe bestimmt, und Vielfachen davon, den Obertönen, besteht. Die Amplituden der Obertöne nehmen gleichmäßig mit der Frequenz ab. [28, 29]

Oberhalb des Kehlkopfes schließt sich der lufthaltige Vokaltrakt an, welcher sich zusammensetzt aus Rachenraum (Pharynx), Mundhöhle, Nasenhaupthöhle und Nasennebenhöhlen. Der Vokaltrakt stellt den Ansatzraum dar, in dem bestimmte Frequenzanteile des durch die Stimmlippen erzeugten Primärschalls resonanzverstärkt und andere gedämpft werden. Durch Überlagerung der Frequenzcharakteristik des Ansatzraumes mit dem primären Stimmsignal der Stimmlippen entsteht der komplexe Stimmschall mit entsprechenden Teiltonmaxima und Teiltonminima. [28, 29]

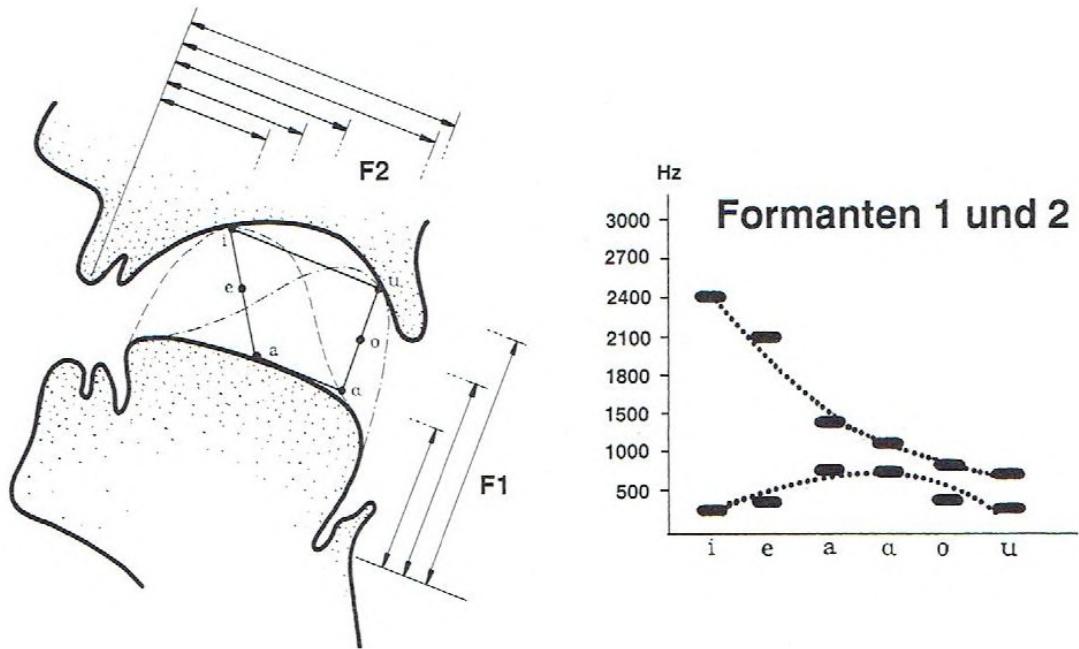


**Abbildung 2.1:** Darstellung der Analogie der menschlichen Stimmerzeugung im Vergleich zur Tonerzeugung einer Orgel (links). Abbildung entnommen aus [29]. Detailliertes Schema der Stimmerzeugung (rechts). Abbildung adaptiert aus [30].

Akustisch betrachtet ist der Ansatzraum ein schwingungsfähiger Hohlkörper mit mehreren Eigenfrequenzen. Alle Frequenzen, die im Bereich um eine solche Eigenfrequenz liegen, werden resonanzverstärkt. Ein solcher verstärkter Frequenzbereich wird als Formant bezeichnet. Formanten werden mit steigender Frequenz nummeriert ( $F1, F2, F3$  usw.). Die Frequenzcharakteristik des Ansatzraumes und damit die spektrale Position der Formanten ist abhängig von dessen geometrischer Konfiguration. Diese kann durch Artikulationsbewegungen wie Änderung der Zungen-, Lippen- und Kieferstellung verändert werden, wodurch sich die Eigenfrequenzen und damit die Formanten verschieben. [28, 29]

Dabei ist die Lage des ersten und zweiten Formanten  $F1$  und  $F2$  charakteristisch für die verschiedenen Vokale. Der erste Formant wird dabei bestimmt durch den Abstand von Kehlkopf zu Rachenenge (Isthmus faucicu) und der zweite Formant durch den Abstand von

Rachenenge zu Mundöffnung. Je größer der entsprechende Abstand ist, umso tiefer ist die Formantfrequenz. Dieser Zusammenhang zwischen Zungenstellung und Frequenzen der Formanten ist in Abbildung 2.2 in Form des Vokalvierecks dargestellt. Man sieht die jeweilige Zungenstellung, welche die Längenverhältnisse für die ersten beiden Formanten  $F_1$  und  $F_2$  und damit den Vokal vorgibt, sowie die entsprechenden Frequenzen des ersten und zweiten Formanten. [28, 29]



**Abbildung 2.2:** Darstellung des Vokalvierecks mit den Zungenpositionen für die einzelnen Vokale und daraus resultierenden Resonanzfrequenzen in Form des ersten und zweiten Formanten. Abbildung entnommen aus [29].

## 2.1 Anatomie des Kehlkopfes

Der Kehlkopf, **Larynx**, sitzt am Beginn der Luftröhre und hat die Aufgabe, mit Hilfe des Kehldeckels (Epiglottis) beim Schlucken von Nahrung die unteren Atemwege vor Fremdkörpern zu verschließen. Außerdem enthält er die Glottis, die das stimmbildende Organ darstellt. [29]

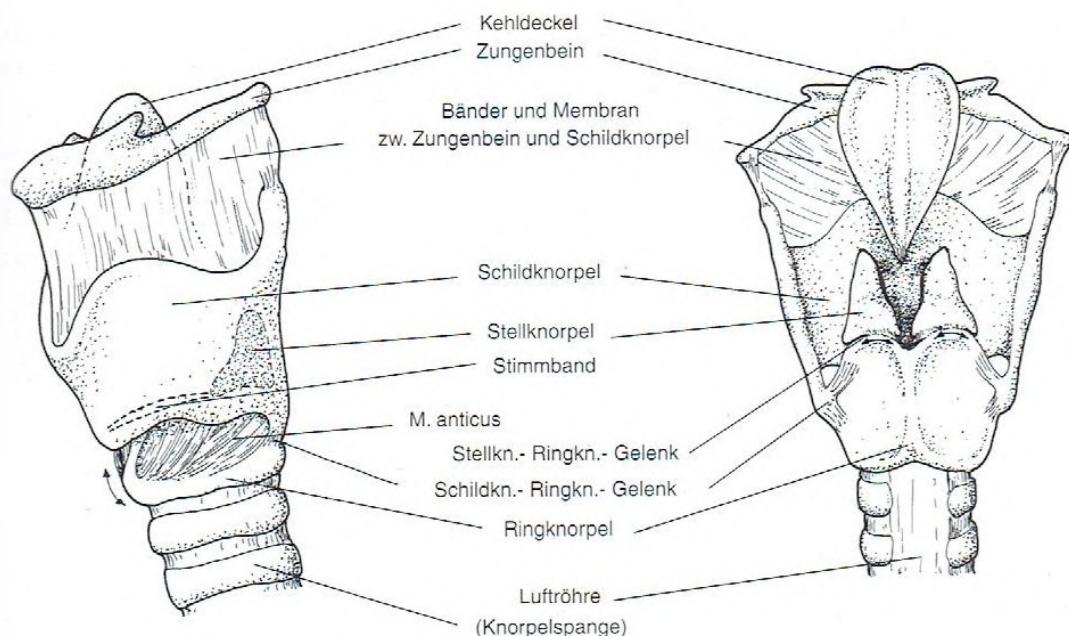
Das Kehlkopfskelett setzt sich aus insgesamt 11 Knorpeln zusammen. Für die Funktion der Stimmbildung sind davon hauptsächlich die folgenden Knorpel relevant:

Der **Schildknorpel**, *Cartilago thyroidea*, bildet zwei viereckige Platten, die vorne wie ein V

zusammenlaufen. Unterhalb des Schildknorpels liegt der **Ringknorpel**, *Cartilago cricoidea*, dessen Form siegelringähnlich ist, wobei die Siegelplatte nach dorsal zeigt. Der Ringknorpel ist seitlich der Siegelplatte durch Gelenke mit dem Schildknorpel verbunden, über welche die beiden Knorpel gegeneinander verkippt werden können. [31]

Oberhalb der Siegelplatte des Ringknorpels befinden sich durch Gelenke verbunden die paaren **Stellknorpel**, *Cartilagines arytaenoideae*. Diese werden häufig abgekürzt als **Ary-Knorpel** bezeichnet. Die Ary-Knorpel sind pyramidenförmig und haben jeweils einen Fortsatz nach vorne, lateral und nach oben. Der vordere Fortsatz ist der Stimmfortsatz, an dem jeweils eines der Stimmbänder befestigt ist. Der laterale Fortsatz ist der Muskelfortsatz, an dem die Stellmusken ansetzen. [31]

Ein weiterer Knorpel ist die **Epiglottis**, die, wie bereits erwähnt, durch Umklappen den Kehlkopfeingang beim Schluckakt verschließt. Die beschriebenen Knorpel sind in Abbildung 2.3 zu sehen. Dargestellt ist der Kehlkopf in einer Ansicht von der Seite (links) und von hinten (rechts). [31]

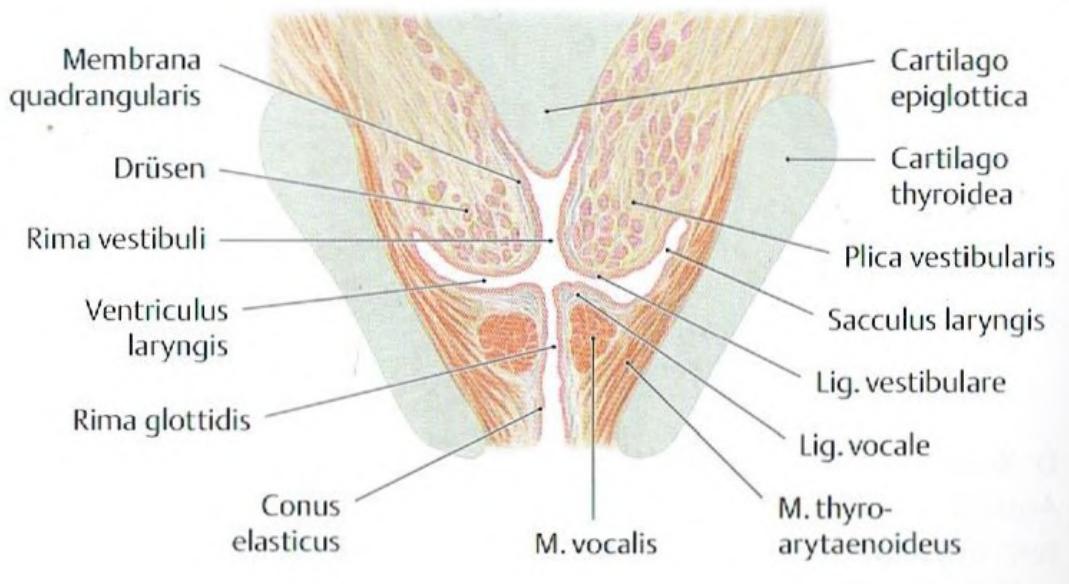


**Abbildung 2.3:** Darstellung des Kehlkopfskeletts mit Knorpeln, Bändern und Gelenken in der Ansicht von der Seite (links) und von hinten (rechts). Zu sehen sind der Schildknorpel, Ringknorpel, die Epiglottis, sowie die paarigen Stellknorpel. Abbildung entnommen aus [29].

Im Inneren des Kehlkopfes können räumlich drei Abschnitte unterschieden werden. Der Bereich der Stimmlippen wird als Glottis bezeichnet und enthält die Stimmritze<sup>1</sup>. Die Glottis stellt den stimmbildenden Apparat dar. [29]

Oberhalb der Glottis liegt die Supraglottis. In dieser befinden sich direkt oberhalb der Stimmlippen Kehlkopfventrikel (Ventriculus/Sacculus laryngis) in der Form von lufthaltigen seitlichen Ausbuchtungen. Darüber sind die Taschenfalten (Plicae vestibulares), die parallel zu den Stimmlippen angeordnet sind. Auch die Stellknorpel liegen supraglottisch. Nach oben abgeschlossen wird die Supraglottis durch die Epiglottis. [29]

Der Bereich der Glottis und Supraglottis ist dargestellt in Abbildung 2.4. Diese zeigt einen Frontalschnitt, in dem die Stimmlippen, Kehlkopfventrikel und Taschenfalten gut zu erkennen sind. Der Raum unterhalb der Glottis bis zur Luftröhre wird als Subglottis bezeichnet. Sie enthält den Ringknorpel, sowie den subglottischen Abhang der Stimmlippen, der als Conus elasticus bezeichnet wird. [29]



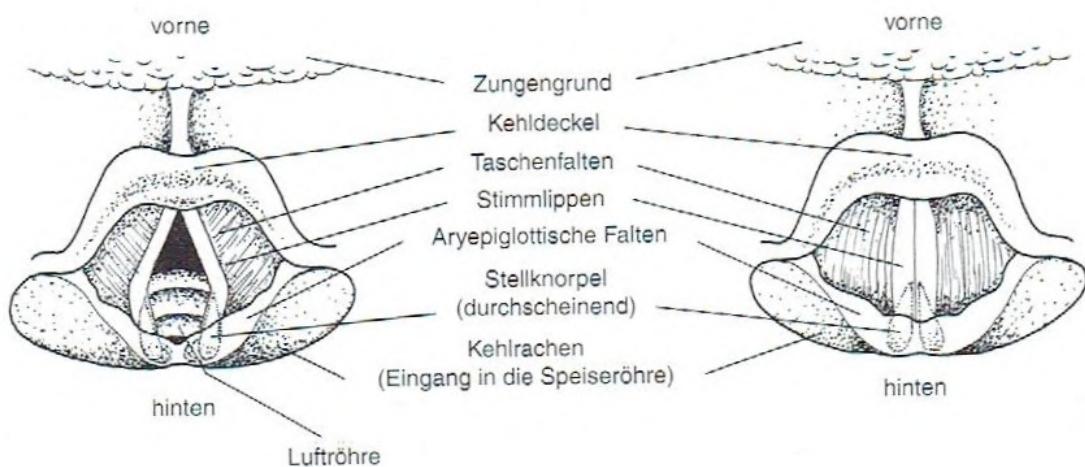
**Abbildung 2.4:** Frontalschnitt des Kehlkopfes mit Glottis- und Supraglottisbereich.

Zu sehen sind die Stimmlippen mit der Stimmritze sowie die Taschenfalten. Abbildung entnommen aus [32].

<sup>1</sup>Anmerkung: Obwohl die anatomische Bezeichnung der Stimmritze Rima glottidis ist, wird diese häufig als Glottis bezeichnet. Um Verwechslungen vorzubeugen, ist in der vorliegenden Arbeit mit Glottis immer der gesamte stimmbildende Apparat gemeint.

Die Muskulatur des Kehlkopfes kann in eine äußere und innere Kehlkopfmuskulatur eingeteilt werden. Durch die äußere Kehlkopfmuskulatur kann der Kehlkopf angehoben, gesenkt und fixiert werden, was z.B. beim Schluckakt wichtig ist. [29]

Die innere Kehlkopfmuskulatur besteht aus einer Vielzahl von Muskeln, die bezüglich der Stimmlippen in Abduktoren, Adduktoren und Spanner eingeteilt werden können. Der einzige Abduktor ist der Musculus cricoarytaenoideus posterior, kurz Posticus, der durch Kontraktion die Stimmritze öffnet. Die Antagonisten des Posticus sind die Adduktoren, die die Stimmritze schließen. Dazu gehören der Musculus cricoarytaenoideus lateralis, der die vorderen Stimmritzenanteile zusammenführt, und der Musculus arytaenoideus transversus, der durch Annäherung der Ary-Knorpel den hinteren Anteil der Stimmritze verschließt. Die offene Stellung der Stimmlippen bei der Einatmung stellt die Respirationsstellung und die geschlossene Stellung bei der Stimmgebung die Phonationsstellung dar. Diese sind in Abbildung 2.5 zu sehen. Es handelt sich um einen Transversalschnitt des Kehlkopfes, wie man ihn bei einer Laryngoskopie sieht. In der Respirationsstellung (links) ist die Stimmritze geöffnet. Sie hat eine rautenähnliche Form, da die Ary-Knorpel auseinander geschoben und ihre Stimmbandfortsätze nach außen gedreht sind. In der Phonationsstellung (rechts) ist die Stimmritze geschlossen und stellt einen Widerstand für die Atemluft dar. [29–31]



**Abbildung 2.5:** Aufsicht auf den Kehlkopf mit Stimmlippen in Respirationsstellung (links) und Phonationsstellung (rechts). Abbildung entnommen aus [29].

Die Stimmlippenspanner sind der Musculus vocalis und der Musculus cricothyroideus, der auch als Anticus bezeichnet wird. Der Anticus verkippt den Ringknorpel gegen den Schildknorpel und nähert den Ringknorpel an den Schildknorpel an (sog. crico-thyreoideale Approximation), wodurch eine grobe Vorspannung der Stimmlippen erreicht wird. Der Musculus

vocalis ist ein Bestandteil der Stimmlippen selbst und kann durch feinstufige Kontraktion eine Feineinstellung der Stimmlippenspannung vornehmen. Durch den Grad der Anspannung der Stimmlippen werden deren Schwingungseigenschaften verändert und so eine modulationsfähige Stimmgebung ermöglicht. [29, 30]

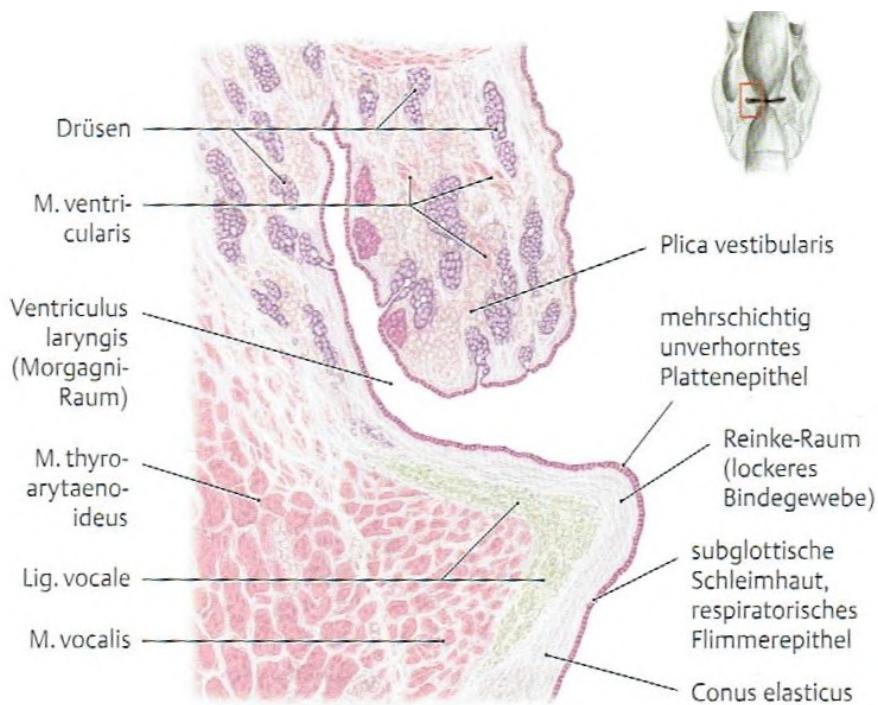
## 2.2 Anatomie der Stimmlippen

Bei den Stimmlippen (Plicae vocales) handelt es sich um mit Schleimhaut bedeckte Gewebealten, die horizontal innerhalb des Kehlkopfes verlaufen. Sie sind ungefähr in der Mitte des Schildknorpels in der vorderen Kommissur (Commissura anterior laryngis) mit dem Schildknorpel und miteinander verbunden. Von dort ziehen sie horizontal bis zum Stimmfortsatz des jeweiligen Stellknorpels (vgl. Abbildung 2.5). Zwischen den Stimmlippen liegt die Stimmritze (Rima glottidis). Da die Stellknorpel mit ihren Stimmfortsätzen an der Bildung der Stimmritze beteiligt sind, kann diese in einen membranösen und einen knorpeligen Bereich eingeteilt werden. Der membranöse Bereich entspricht dabei ungefähr zwei Dritteln der Länge der Stimmritze. [29, 31]

Ein histologischer Frontalschnitt der linken Stimmlippe (Ansicht von dorsal) ist schematisch dargestellt in Abbildung 2.6. Man erkennt einen mehrschichtigen Aufbau. Die oberste Schicht, die **Mucosa** (Schleimhaut), besteht aus der Epithelschicht sowie der **Lamina propria**. Die Stimmlippe ist, aufgrund ihrer starken mechanischen Belastung, von mehrschichtigem unverhorntem Plattenepithel überzogen, welches im subglottischen Raum in respiratorisches Flimmerepithel übergeht. [32, 33]

Die Lamina propria liegt unterhalb der Epithelschicht und enthält elastische Fasern und Kollagenfasern. Je nach Dichte der Fasern wird die Lamina propria in eine oberflächliche, mittlere und tiefe Schicht unterteilt. In der oberen Schicht sind die Faseranteile locker und schwammartig. Diese wird als **Reinke-Raum** bezeichnet. Die mittlere Schicht besteht hauptsächlich aus elastischen Fasern, die sich wie weiche Gummibänder verhalten. Die tiefe Schicht enthält hauptsächlich Kollagenfasern, deren Eigenschaften mit Baumwollfasern vergleichbar sind. Die mittlere und tiefe Schicht zusammengefasst bezeichnet man als **Stimmband** (Ligamentum vocale). Das Stimmband ist der verdickte Anteil des Conus elasticus, eines Faserbandes, das von den Stimmlippen bis zur Innenseite des Ringknorpels zieht und mit den Stimmlippen mitschwingt. [31, 33]

Das Stimmband liegt dem Musculus vocalis auf, der den größten Anteil der Stimmlippe ausmacht. Aus der unteren Schicht der Lamina propria ziehen an vielen Stellen Fasern in den



**Abbildung 2.6:** Schematische Darstellung eines histologischen Frontalschnittes der Stimmlippe mit Ansicht von dorsal. Man erkennt den mehrschichtigen Aufbau der Stimmlippe aus Musculus vocalis, Stimmband und Schleimhaut. Abbildung entnommen aus [32].

Musculus vocalis hinein, wodurch diese eng mit dem Stimmlippenmuskel verbunden ist. Im Gegensatz dazu ist die Mucosa nur sehr locker mit dem Stimmband verbunden. Mechanisch betrachtet kann die Stimmlippe daher durch das **Body-Cover-Modell** [33, 34] beschrieben werden. In diesem werden die fünf Schichten (Mucosa, oberflächliche, mittlere und tiefe Schicht der Lamina propria und Musculus vocalis) in drei Bereiche eingeteilt, die unterschiedliche mechanische und elastische Eigenschaften haben. Der Musculus vocalis bildet den **Body**, und die Epithelschicht sowie die oberste Schicht der Lamina propria bilden das **Cover**. Zwischen Body und Cover liegt eine Übergangs-Schicht (**Transition**) bestehend aus der mittleren und tiefen Schicht der Lamina propria, also dem Stimmband. Die grundlegende Überlegung des Modells ist, dass Body und Cover in unterschiedlicher Weise schwingen können. Die Schwingungen der Stimmlippen werden dabei beschrieben durch die Kombination der jeweiligen elastischen Eigenschaften von Body und Cover, die durch entsprechende Kontraktion der Stimmlippenspanner-Muskeln eingestellt werden kann. [33, 34]

## 2.3 Schwingungsverhalten der Stimmlippen

Die Schwingung der Stimmlippen stellt die Grundlage der Stimmerzeugung dar. Das Prinzip, wie diese Schwingungen entstehen, wird durch die myoelastisch-aerodynamische Theorie der Phonation [35, 36] beschrieben. Zu Beginn der Phonation werden die Stimmlippen durch Muskelkontraktion in Phonationsstellung gebracht und die Stimmritze verschlossen. Durch die Lunge wird bei Ausatmung (Exspiration) ein subglottischer Druck aufgebaut. Ist dieser groß genug, werden die Stimmlippen gesprengt, und Luft strömt durch die Stimmritze. [29] Aufgrund der geometrischen Dimensionen des Kehlkopfes, die klein sind verglichen mit den Wellenlängen, die bei physiologischer Phonation auftreten, kann der Luftfluß durch die Stimmritze als quasi-stationär angenommen werden. Zusätzlich wird in erster Näherung ein laminarer, verlustfreier Fluß angenommen. Unter diesen Annahmen kann der Zusammenhang zwischen statischem Druck  $P$  und dynamischem Druck  $\rho v^2/2$  durch die Bernoulli-Gleichung

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const} \quad (2.1)$$

beschrieben werden. Sie enthält die Geschwindigkeit  $v$  und die Dichte  $\rho$  der Luft. [37] Die Bernoulli-Gleichung zeigt, dass durch die ansteigende Geschwindigkeit  $v$  der Luft in der Engstelle zwischen den Stimmlippen der Druck dort abnimmt. Das führt zu einer aerodynamischen Kraft, die rechtwinklig an der Wand der Engstelle ansetzt und die Stimmlippen zueinander zieht. Diese wirkt zusätzlich zu myoelastischen Rückstellkräften, die durch die elastischen Eigenschaften der Stimmlippen und die Kontraktion der Stimmlippenschließer bedingt sind. Die myoelastischen und aerodynamischen Kräfte wirken den öffnenden Kräften durch den subglottischen Druck entgegen und verschließen die Stimmlippen. Anschließend folgt ein erneuter Anstieg des subglottischen Drucks, und der Vorgang beginnt erneut. Dieses Öffnen und Schließen der Stimmlippen führt zu periodischen Verdichtungen der durchströmenden Luft, was physikalisch einer Schallwelle entspricht. [29, 38]

Zusammengefasst lässt sich die Schwingung der Stimmlippen beschreiben als selbsterregter Austausch von potentieller und kinetischer Energie, der durch ein Gleichgewicht verschiedener Kräfte auf das Stimmlippengewebe hervorgerufen wird. Dabei stellt die Lunge durch den subglottischen Luftdruck die Energiequelle der Oszillation dar. Ohne diesen konstanten Luftstrom würden die Stimmlippen lediglich eine gedämpfte Schwingung ausführen. [30, 37]

Die Stimmlippen selbst führen während der Phonation eine komplexe dreidimensionale Schwingung aus. In Abbildung 2.7 ist der Schwingungsablauf der Stimmlippen innerhalb eines

Schwingungszyklus dargestellt. Man sieht die Schwingung als Frontalschnitt (links), Aufsicht (mitte) und zeitlich skizziert innerhalb einer Periode (rechts). Der Stimmlippen-Body führt hauptsächlich eine Schwingung in der Horizontalebene aus, schwingt aber zu einem geringen Ausmaß auch vertikal. Unabhängig davon weist das Cover eine komplizierte Eigenschwingung auf. Es rollt in Form einer Schleimhautwelle mit ellipsenförmiger Trajektorie über dem Body ab. Diese Eigenschwingung wird nach Schönhärl [39] am freien Stimmlippenrand als Randkantenverschiebung bezeichnet. [29, 38]

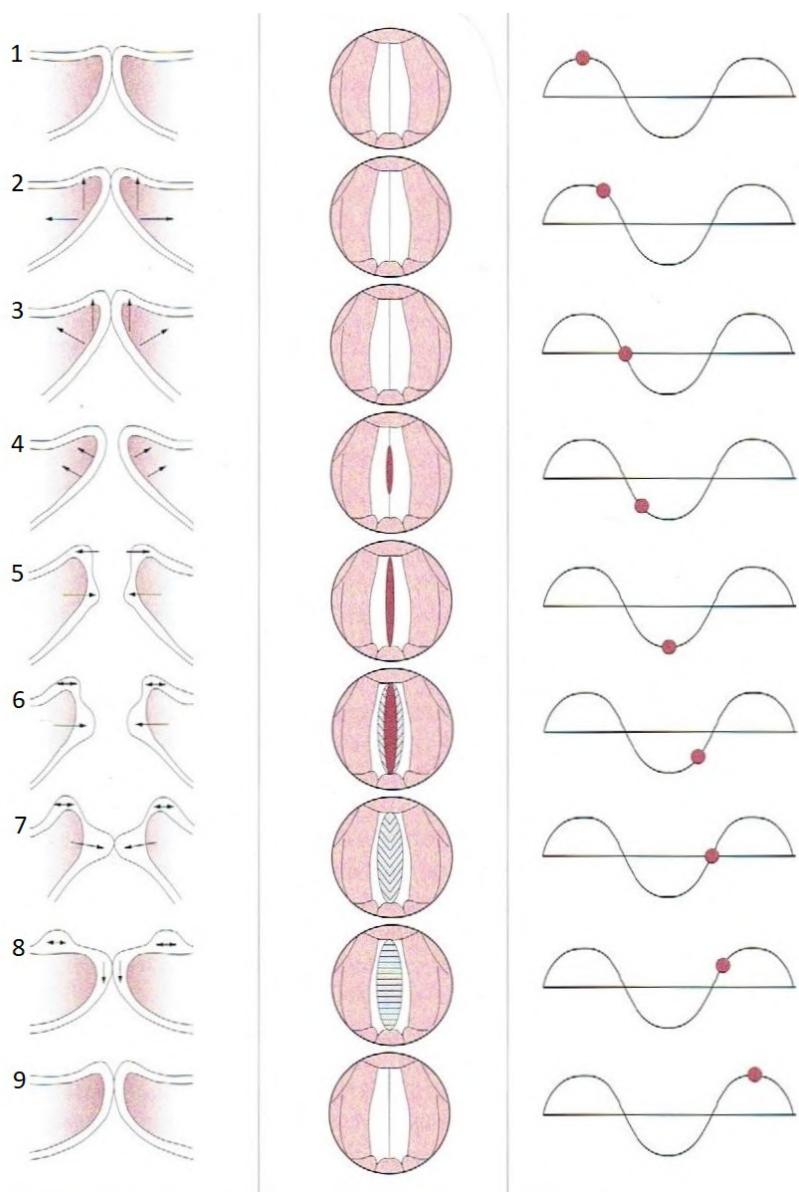
Die Randkantenverschiebung hat ihren Namen daher, dass bei Betrachtung der Stimmlippen von oben der Eindruck entsteht, dass deren Oberfläche wellenförmig von der Mitte der geschlossenen Stimmritze nach außen mitschwingt. Die Randkante der Stimmlippe scheint sich daher von der Mitte nach außen zu verschieben. Eine kurze und prägnante Erklärung der Randkantenverschiebung ist zu finden in [40].

Das Öffnen der Stimmlippen beginnt am subglottischen Ende und setzt sich von vertikal nach kranial fort (vgl. Abbildung 2.7). Man erkennt, dass die Schwingung des Covers vor allem gegen Ende des Zyklus auch gegenläufige Anteile aufweist. Während an der kranialen Kante die Schleimhautwelle noch horizontal nach lateral läuft, schließen sich die Stimmlippen am subglottischen Ende bereits wieder. Diese Phasenverschiebung zwischen oberer und unterer Kante der Stimmlippen ist alleine durch elastische Rückstellkräfte nicht erklärbar und zeigt die Bedeutung des Bernoulli-Effekts bei der Phonation. [29, 30, 38]

Der genaue Ablauf der Stimmlippenschwingung wird bestimmt von den mechanischen Eigenschaften der Stimmlippen, wie Position, Form, Masse, Spannung und Elastizitätsmodul. Diese werden durch den Kontraktionszustand der Kehlkopfmuskeln festgelegt, welcher wesentlich durch Musculus vocalis und Anticus bestimmt wird (vgl. Abschnitt 2.1). Bei weicher Phonation in niedriger Tonhöhe ist sowohl der Musculus vocalis, als auch der Anticus nur wenig kontrahiert. Durch die niedrige Spannung der Stimmlippen ist das Elastizitätsmodul von Body und Cover klein, und beide sind in gleichem Maße an der Schwingung beteiligt. [34]

Steigt die Kontraktion des Musculus vocalis, so wird der Body steifer, wodurch sich dessen Elastizitätsmodul erhöht. Dies ist der Fall bei Phonation mit härterer lauter Stimme in mittlerer Tonhöhe. Die Verformung der Stimmlippen findet hauptsächlich im Cover statt, welches weiterhin flexibel ist und unabhängig vom Body eine wellenartige Schwingung ausführen kann. [34]

Bei sehr hoher Tonhöhe kontrahiert sich der Anticus stark, verkippt den Ringknorpel gegen den Schildknorpel, nähert den Ringknorpel dem Schildknorpel an und spannt dadurch die gesamten Stimmlippen deutlich an. In diesem Zustand haben Body und Cover ein hohes Elastizitätsmodul, und ihre Schwingungen sind bezüglich Amplitude und Randkantenverschiebung

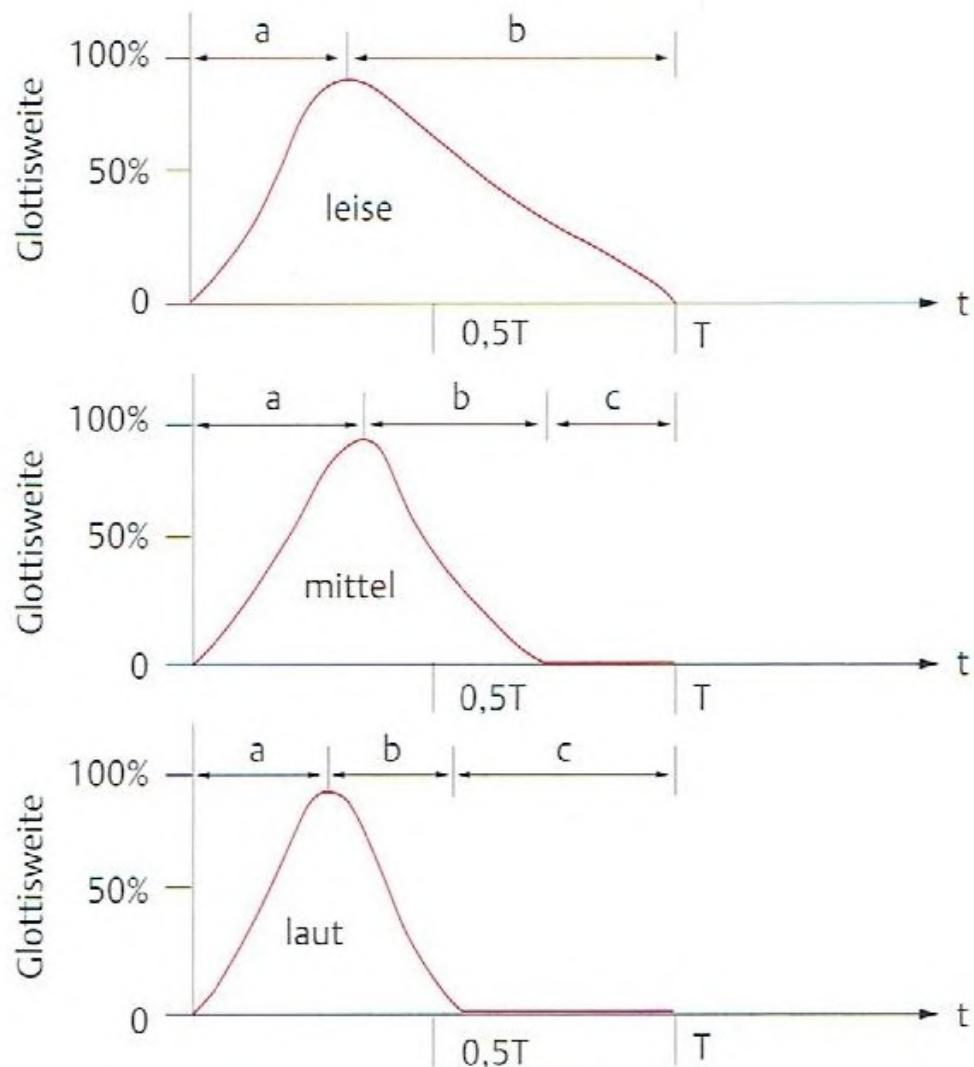


**Abbildung 2.7:** Darstellung des Schwingungsablaufes der Stimmlippen während der Phonation im Frontalschnitt (links) und in Aufsicht (mitte). Der Zeitpunkt innerhalb der Periode ist rechts skizziert. Abbildung entnommen aus [30].

erheblich eingeschränkt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch Kontraktion der Kehlkopfmuskeln die elastischen Eigenschaften der Stimmlippen verändert werden, sodass bei steigender Tonhöhe die Amplituden und Randkantenverschiebungen der Stimmlippen- schwingungen abnehmen. [30, 34]

In Abbildung 2.8 sind die Schwingungsphasen der Stimmlippen dargestellt. Betrachtet man die Glottisweite über der Zeit, dann lässt sich ein Schwingungszyklus in eine Öffnungsphase (a), Schließungsphase (b) und Schlußphase (c) unterteilen. Dabei ergeben die Öffnungsphase und Schließungsphase die sogenannte Offenphase, in der Luft durch die Stimmritze strömen kann. Offenphase und Schlußphase bilden in Summe genau eine Schwingungsperiode. [22] Die relative Dauer der einzelnen Phasen wird hauptsächlich von der Lautstärke der Phonation und somit vom subglottischen Anblasendruck beeinflusst. Bei leiser Phonation wechseln sich Öffnungs- und Schließungsphase ab, und es gibt praktisch keine Schlußphase (vgl. Abbildung 2.8 oben). Mit ansteigender Lautstärke schließen sich die Stimmlippen schneller und bleiben länger geschlossen. Dies äußert sich in einer verkürzten Schließungsphase und einer verlängerten Schlußphase. Die Öffnungsphase bleibt dabei nahezu unverändert (vgl. Abbildung 2.8). Dadurch ergibt sich ein verringelter Offenquotient, der die zeitliche Relation von geöffnetem zu geschlossenem Anteil eines Schwingungszyklus beschreibt. Diese Änderungen der Phasenverhältnisse sind bedingt durch einen Anstieg der Geschwindigkeit der Lateralauslenkung und Amplitude der Stimmlippenschwingungen, welche ihrerseits abhängen vom Druck des anblasenden Luftstroms. [30]

Zu erkennen ist, dass die Variation von Tonhöhe und Lautstärke der menschlichen Stimme zurückzuführen ist auf entsprechende Änderungen im Schwingungsverhalten der Stimmlippen. Dabei bestimmt der Kontraktionsgrad der Kehlkopfmuskulatur die Spannung der Stimmlippen und damit die Tonhöhe. Je stärker die Stimmlippen gespannt sind, desto höher ist der produzierte Ton, wobei die Schwingungsamplituden und Randkantenverschiebungen vermindert sind. Die Lautstärke der Stimme ist gegeben durch den Druck des von der Lunge gelieferten Luftstroms, welcher die Schwingungsamplitude der Stimmlippen bestimmt. Bei lauter (leiser) Stimmezeugung schwingen die Stimmlippen mit großer (kleiner) Amplitude, und die Randkantenverschiebung ist stark (gering) ausgeprägt. [29, 30, 34]



**Abbildung 2.8:** Schwingungsphasen der Stimmlippen mit Öffnungsphase (a), Schließungsphase (b) und Schlußphase (c). Aufgetragen ist die Glottisweite über der Zeit. Mit ansteigender Lautstärke nimmt die relative Dauer der Schlußphase zu, wobei sich die Schließungsphase verkürzt. Abbildung entnommen aus [30].

## 2.4 Drei-Massen-Modell der Stimmlippen

Um das Verhalten der Stimmlippen bei der Phonation beschreiben, berechnen und simulieren zu können, ist ein Modell erforderlich. Dabei muss korrekt dargestellt werden, dass die Stimme durch eine Selbstoszillation der Stimmlippen erzeugt wird (vgl. Abschnitt 2.3).

Ein entsprechendes und weit verbreitetes Modell ist das vereinfachte Zwei-Massen-Modell der Stimmlippen [41]. Dessen Grundprinzip ist die während der Schwingung beobachtete Phasendifferenz zwischen oberer und unterer Kante der Stimmlippen. Jede Stimmlippe wird dabei durch zwei gekoppelte Oszillatoren repräsentiert. Dies ist dargestellt im unteren Bereich in Abbildung 2.9. Die anisotrope Struktur des Stimmlippengewebes wird vereinfacht dargestellt durch die Massen  $m_{1,r}$ ,  $m_{2,r}$ ,  $m_{1,l}$  und  $m_{2,l}$ . Bei allen Größen steht der Index r für die rechte Stimmlippe und l für die linke Stimmlippe. Die Massen sind auf jeder Seite mit dem angrenzenden Knorpel über Federn und ein Dämpfungselement gekoppelt. Dies wird beschrieben durch die Federkonstanten  $k_{1,r}$ ,  $k_{2,r}$ ,  $k_{1,l}$  und  $k_{2,l}$ , sowie die Dämpfungskonstanten  $r_{1,r}$ ,  $r_{2,r}$ ,  $r_{1,l}$  und  $r_{2,l}$ . Außerdem sind auf jeder Seite die Massen miteinander ohne Dämpfung gekoppelt über die Federkonstante  $k_{c,r}$  bzw.  $k_{c,l}$ . [41]

Die Schwingung der Stimmlippen wird durch ein System von Differentialgleichungen gekoppelter Oszillatoren beschrieben. Diese haben die Form

$$m_{i,\alpha} \ddot{x}_{i,\alpha} + r_{i,\alpha} \dot{x}_{i,\alpha} + k_{i,\alpha} x_{i,\alpha} + k_{c,\alpha} (x_{i,\alpha} - x_{j,\alpha}) + \Theta(-a_i) c_{i,\alpha} (a_i/2l) = F_i(x_{1,l}, x_{1,r}, x_{2,l}, x_{2,r}), \quad (2.2)$$

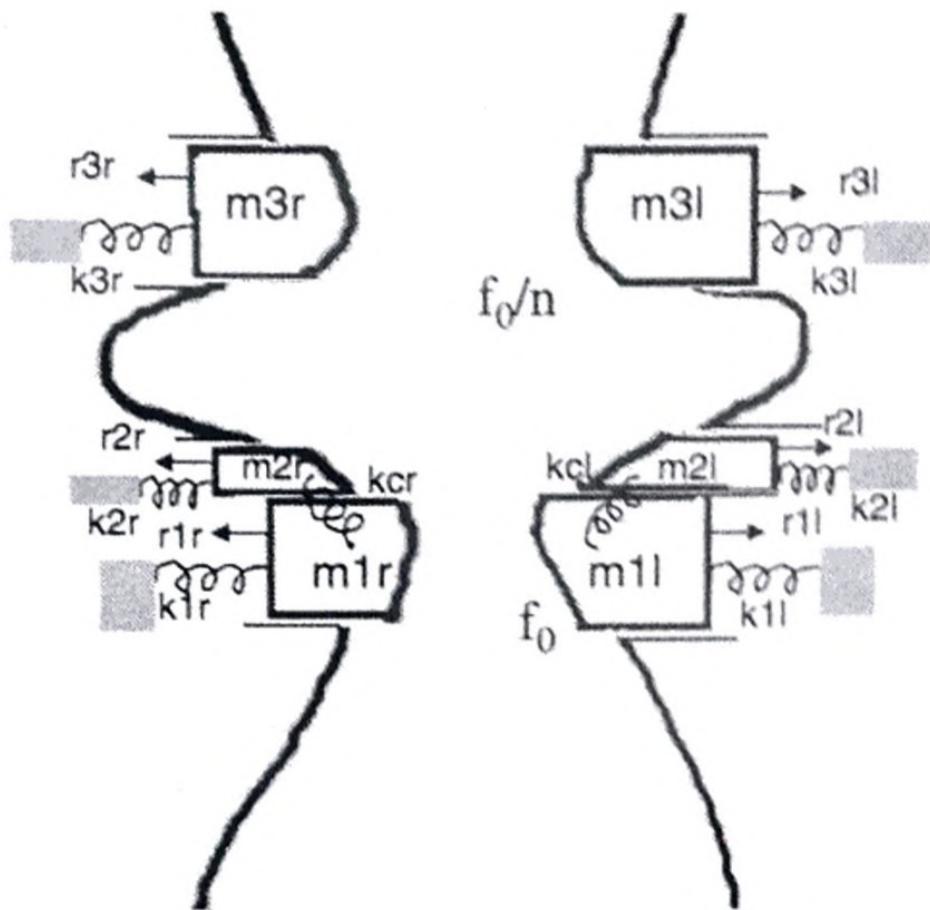
mit den Auslenkungen  $x_{i,\alpha}$  der jeweiligen Massen und der Kraft  $F_i$ , die die Auswirkungen des Druckes in der Glottis beschreibt. [41]

Die Indizes können folgende Werte annehmen

$$i, j = \begin{cases} 1 - \text{oben}, \\ 2 - \text{unten}, \end{cases} \quad \alpha = \begin{cases} l - \text{links}, \\ r - \text{rechts}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Der Term, der die Heaviside Funktion  $\Theta$  beinhaltet und der neben den typischen Termen für die Oszillatoren auftritt, beschreibt eine zusätzliche Rückstellkraft, die nur wirkt, wenn die beiden Seiten beim Schluß der Stimmlippen kollidieren. Er enthält die Länge der Glottis  $l$ , die Summe  $a_i = a_{i,l} + a_{i,r}$  aus den „lower and upper glottal areas“ [41] und eine zusätzliche Federkonstante  $c_{i,\alpha}$  für die Wirkung während der Kollision.

Erweitert man das Modell um die Taschenfalten, dann erhält man das Drei-Massen-Modell der Stimmlippen [42]. Dieses beschreibt zusätzlich zu den Stimmlippen (vgl. Abbildung 2.9 unten) die Taschenfalten durch die Massenelemente  $m_{3,r/l}$ , die ebenfalls jeweils über eine Feder  $k_{3,r/l}$  und eine Dämpfung  $r_{3,r/l}$  mit dem umliegenden Knorpel verbunden sind (vgl. Abbildung 2.9 oben). Das System der Taschenfalten ist dabei nicht mechanisch, sondern aerodynamisch mit dem Stimmlippensystem gekoppelt. [42]



**Abbildung 2.9:** Skizze des Drei-Massen-Modells der Stimmlippen. Beide Stimmlippen werden jeweils durch zwei gekoppelte Massen  $m_1$  und  $m_2$  dargestellt. Diese sind miteinander über eine Feder  $k_c$  gekoppelt und mit dem angrenzenden Knorpel verbunden über eine Feder  $k_1$  bzw.  $k_2$ , sowie über eine Dämpfung  $r_1$  bzw.  $r_2$ . Die Taschenfalten werden jeweils durch eine einzelne Masse  $m_3$  repräsentiert, die entsprechend über  $k_3$  und  $r_3$  mit dem angrenzenden Knorpel verbunden ist. Abbildung entnommen aus [42].

Für kleine Auslenkungen kann die Eigenfrequenz  $f_0$  eines Massenelementes durch

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4)$$

angenähert werden. Die Taschenfalten tendieren bei einer Schwingung aufgrund ihrer höheren

Massen dazu, mit der Eigenfrequenz der Stimmlippen  $f_0$  eine harmonische Beziehung der Form einer ganzzahlig geteilten Frequenz  $f_0/n$  einzugehen (vgl. Abbildung 2.9). [42]

## 2.5 Stimmgebungstechniken

In diesem Abschnitt werden die untersuchten Stimmgebungstechniken vorgestellt und erläutert, mit welchen Anweisungen an die Probanden sie verbunden sind.

In Unterabschnitt 2.5.1 wird erklärt, was in der vorliegenden Arbeit unter einem weichen Stimmeinsatz und dem Coup de Glotte verstanden wird. Im darauf folgenden Unterabschnitt 2.5.2 werden das Taschenfaltenpressen und die Pianissimo-Stimmgebung erläutert.

### 2.5.1 Weicher Stimmeinsatz und Coup de Glotte

Im klinischen Alltag der Phoniatrie werden Stimmen auditiv untersucht. Dabei wird der Patient üblicherweise gebeten, einen Vokal spontan in einer für ihn komfortablen Lautstärke und Tonhöhe zu phonieren. [43]

Diese Anweisungen führen optimalerweise zu einer Phonation mit einem weichen Stimmeinsatz. Dieser stellt die natürliche, physiologische und effizienteste Form der Stimmerzeugung dar. Die Stimmlippen liegen während der Offenphase bis auf einen schmalen, elliptischen Spalt locker aneinander, und der Beginn der Schwingung ist frei von hörbaren Geräuschphänomenen. Die Ausatmung und der Glottisschluss finden exakt koordiniert statt. [29, 30]

Eine weitere Stimmgebungstechnik ist das Coup de Glotte, auch bezeichnet als Glottisschlag oder „Attack on the Glottis“. Coup de Glotte wurde zuerst beschrieben im 19ten Jahrhundert von dem Gesangslehrer Manuel Garcia [44]. Dabei wird zunächst langsam und tief eingearmet und sodann durch Luftanhalten die Glottis geschlossen. Durch die darunter angestaute Luft werden die Stimmlippen bei Phonation plötzlich und explosionsartig auseinander getrieben. Der so erzeugte Ton beginnt rein, präzise, hell und klar mit einem sogenannten Glottisschlag. Für ein besseres Verständnis dieser Technik bringt Garcia einen Vergleich mit dem Vorgang des leichten Hustens, wobei beim Coup de Glotte jedoch nicht ein impulsartiger Luftstrom aus dem Brustkorb genutzt wird, sondern ausschließlich die plötzliche Sprengung der Stimmritze. Die einzige Aufgabe des Brustkorbes ist es, für einen konstanten Nachschub an Luft zu sorgen. [44, 45]

Da in der vorliegenden Arbeit keine ausgebildeten Sänger untersucht werden, wird die Anweisung an die Probanden für das Coup de Glotte folgendermaßen vereinfacht zusammengefasst:

Zunächst soll tief eingeadmet und anschließend die Luft angehalten werden. Danach soll ein Vokal laut und klar hervorgebracht werden. Um dieses Vorgehen zu vereinfachen und ein besseres Verständnis für diese Stimmtechnik zu entwickeln, kann zu Beginn der Vokal mit einem Konsonant, der von Natur aus explosionsartig in der Glottis gebildet wird, kombiniert werden [44]. Ein Beispiel dafür wäre die Kombination k/a/.

## **2.5.2 Taschenfaltenpressen und Pianissimo**

Die sich oberhalb der Stimmlippen befindenden Taschenfalten sind unter physiologischen Bedingungen nicht an der Stimmgebung beteiligt. Sie sind ein Teil des Verschlussmechanismus des Kehlkopfes. [29]

Durch gezielte Anspannung der Kehlkopfmuskulatur können die Taschenfalten in Kontakt miteinander gebracht und im Ausatmungsluftstrom zu Schwingungen angeregt werden. Die dabei entstehende Taschenfaltenstimme bzw. das Taschenfaltenpressen (TF-Pressen) klingt, bedingt durch die höhere Masse der Taschenfalten, tief, rau, gepresst und knarrend. Das Taschenfaltenpressen ist kaum modulationsfähig. [29]

Taschenfaltenpressen ist eine pathologische, häufig unerwünschte und daher therapiebedürftige Form der Stimmerzeugung. Eine Ausnahme stellt die Situation dar, in der die Stimmlippen aufgrund einer Erkrankung oder Operation schwingungsunfähig sind oder gar (partiell) entfernt werden mussten. In diesen Fällen kann das Taschenfaltenpressen als Ersatztongenerator genutzt werden, um Stimmgebung zu ermöglichen. [29]

Als Kontrast zum Taschenfaltenpressen wird die Pianissimo-Stimme (im Folgenden als Pianissimo bezeichnet) untersucht. Pianissimo ist die Steigerung des italienischen „piano“ und bedeutet „sehr leise“ [28].

Mit Pianissimo ist daher eine sehr leise Stimmgebung gemeint. Diese ist bezogen auf die Lautstärke angelehnt an das Flüstern. Dabei soll allerdings die für das Flüstern typische Aphonie, das Fehlen des Stimmklangs, vermieden werden. Die Pianissimo-Phonation ist somit eine sehr leise, aber stimmhafte Stimmgebungstechnik. [29]

Charakteristisch für eine sehr leise Stimme ist, dass es während der Phonation keine Schlußphase der Glottis gibt. Vielmehr wechseln sich Öffnungs- und Schließungsphase kontinuierlich ab. [30]

# **Kapitel 3**

## **Studienkonzept**

Bei der Masterarbeit soll es darum gehen, Doppler-Ultraschallspektren der Stimmlippen während der Phonation aufzunehmen und sie mit einem Stimmsignal, welches durch ein Mikrofon aufgenommen wird, zu vergleichen. Zu diesem Zweck wird zunächst der beste Zugangsweg zur Glottis bestimmt, denn in der Literatur werden verschiedene Ansatzpositionen des Ultraschallkopfes beschrieben [18, 46]. Die Schwierigkeit besteht darin, mit Ultraschall die Stimmlippen hinter dem Schildknorpel, der sich wie ein Reflektor für den Ultraschall verhält, abzubilden [47]. Durch Ausprobieren und Verschieben des Schallkopfes wird zunächst die Position bestimmt, bei der sich die Ultraschallspektren sowohl in der Horizontal- bzw. Transversalebene als auch in der Vertikal- bzw. Koronarebene am besten ableiten lassen.

In dieser Position werden Ultraschallmessungen bei neun Personen (sechs Frauen und drei Männer) durchgeführt und deren Farbdoppler-Ultraschallspektren aufgezeichnet. Die Probanden werden gebeten, drei verschiedene Vokale jeweils für mindestens drei Sekunden zu phonieren, nämlich den vorderen Vokal /i/, den mittleren Vokal /a/ und den hinteren Vokal /u/. Jeder Vokal soll mit unterschiedlichen Stimmgebungstechniken gesprochen werden: zunächst entspannt mit weichem Stimmeinsatz und anschließend mit hartem Stimmeinsatz (Coup de Glotte). Als weitere Stimmgebungstechniken werden das Taschenfaltenpressen (TF-Pressen) und Pianissimo untersucht. Dadurch ergeben sich für jeden Probanden und für jede Probandin insgesamt 12 Kombinationen von Vokalen und Stimmgebungstechniken. Diese sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Bei jeder Ultraschallmessung wird das Stimmsignal zusätzlich mit einem 30 cm vom Mund entfernten Luftschallmikrofon aufgezeichnet und mit spektralanalytischen Methoden hinsichtlich Frequenzspektrum und Lautstärke untersucht. Die beiden Signale (Ultraschall-Doppler-Spektrum und Mikrofonsignal) werden miteinander verglichen.

Bei guter Darstellbarkeit der Farbmuster in der farbkodierten Duplexsonographie [19, 20, 23]

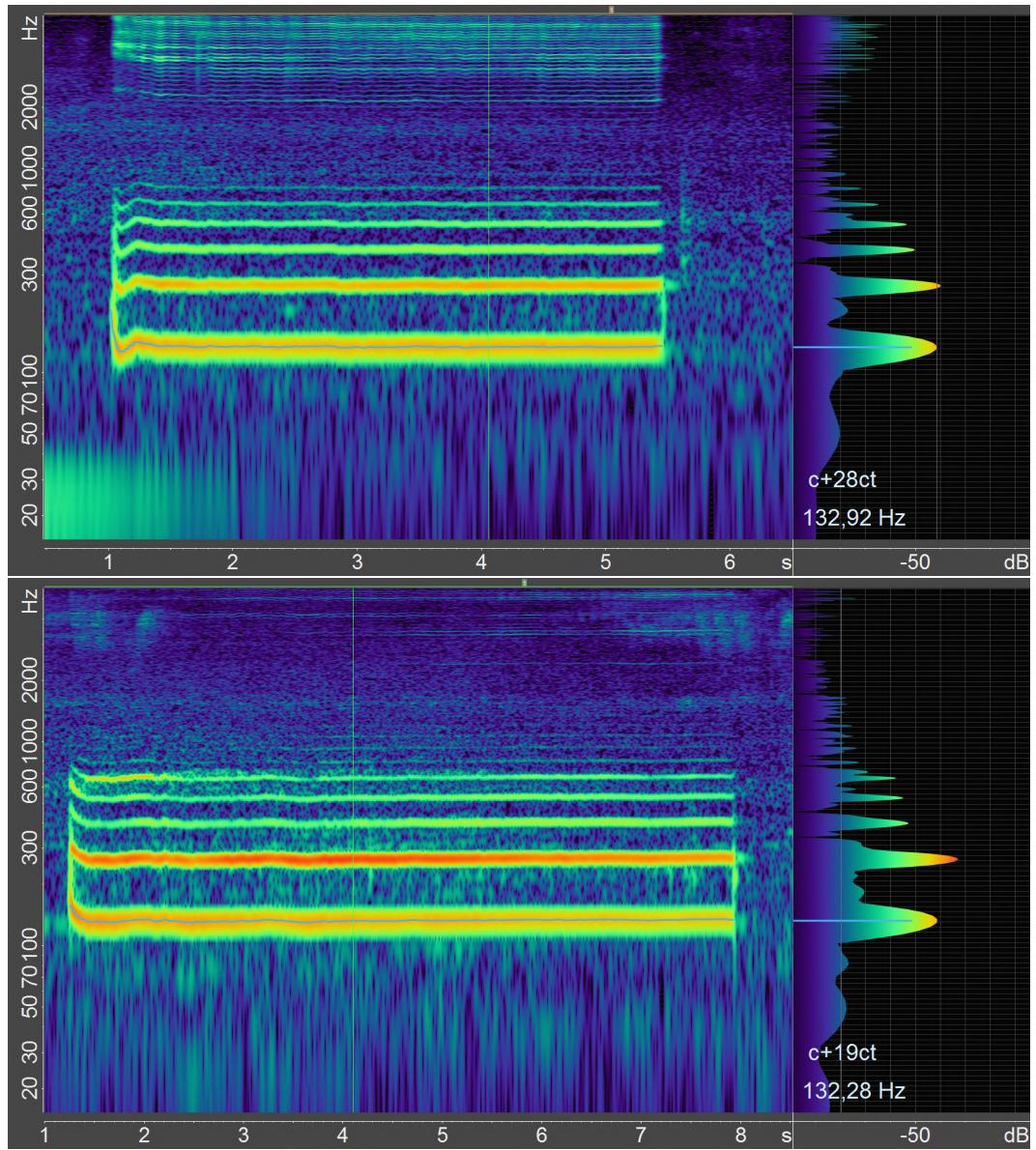
	weich	hart	TF-Pressen	Pianissimo
/i/				
/a/				
/u/				

**Tabelle 3.1:** Kombinationen von gesprochenen Vokalen und Stimmgebungstechniken der Probanden.

werden aus den Dopplerspektren in Kombination mit den Mikrofonsignalen die Ausbreitungs-  
geschwindigkeiten der Schleimhautwellen auf den Stimmlippen [24] sowie die Elastizitätsmo-  
dule der Stimmlippen [25] ermittelt.

### 3.1 Aufnahme des Mikrofon-Stimmsignals

Zur Aufnahme des Stimmsignals steht neben dem Ultraschallgerät ein Luftschallmikrofon (Logitech® USB Desktop Microphone, Logitech Europe S.A., Lausanne, Schweiz) zur Ver-  
fügung, welches über USB-Verbindung an einen Computer angeschlossen wird. Die Aufnahme ist über die Software „Overtone Analyzer“ von Sygyt Software [48] möglich. Dabei kann direkt auf das Spektrum des Stimmsignals zugegriffen werden. Beispiespektren des gehaltenen vorderen Vokals /i/ und des hinteren Vokals /u/, phonierte von einem stimmgesunden 27 Jahre alten männlichen Proband, sind in Abbildung 3.1 zu sehen.



**Abbildung 3.1:** Mit Overtone Analyzer aufgenommenes Spektrum des gehaltenen vorderen Vokals /i/ (oben) und hinteren Vokals /u/ (unten).

# Literaturverzeichnis

- [1] S. Parangi. Editorial: Translaryngeal vocal cord ultrasound: Ready for prime time. *Surgery*, 159(2016):67–69.
- [2] S. S. Chandrasekhar, G. W. Randolph, M. D. Seidman, R. Rosenfeld, P. Angelos, J. Barkmeier-Kraemer, M. S. Benninger, J. H. Blumin, G. Dennis, J. Hanks, M. R. Haymart, R. T. Kloos, B. Seals, J. M. Schreibstein, M. A. Thomas, C. Waddington, B. Warren, P. J. Robertson. Clinical practice guideline: improving voice outcomes after thyroid surgery. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 148(2013):S1–S37.
- [3] Leonard M. Pott, W. Bosseau Murray. Review of video laryngoscopy and rigid fiberoptic laryngoscopy. *Current opinion in Anesthesiology*, 21(2008):750–758.
- [4] H. A. A. Shalaby, M. A. Maaly, T. F. Abdella. Ultrasonography diagnostic validity in structural and functional laryngeal disorders. *Menoufia Medical Journal*, 26(2013):170–176.
- [5] R. F. Yellon, L. M. Borland, D. J. Kay. Flexible fiberoptic laryngoscopy in children: Effect of sitting versus supine position. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 71(2007):1293–1297.
- [6] M. Wolf, A. Primov-Fever, O. Amir, D. Jedwab. The feasibility of rigid stroboscopy in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 69(2005):1077–1079.
- [7] E. M. Friedman. Role of ultrasound in the assessment of vocal cord function in infants and children. *Annals of Otology, Rhinology & Laryngology*, 106(1997):199–209.
- [8] H.-D. Rott. Zur Frage der Schädigungsmöglichkeit durch diagnostischen Ultraschall. *Ultraschall in der Medizin*, 2(1981):56–64.
- [9] S. Sidhu, R. Stanton, S. Shahidi, J. Chu, S. Chew, P. Campbell. Initial experience of vocal cord evaluation using grey-scale, real-time, B-mode ultrasound. *ANZ Journal of Survey*, 71(2001):737–739.

- [10] A. Vats, G. A. Worley, R. de Bruyn, H. Porter, D. M. Albert, C. Bailey. Laryngeal ultrasound to assess vocal fold paralysis in children. *The Journal of Laryngology & Otology*, 118(2004):429–431.
- [11] B. N. Raghavendra, S. C. Horii, D. L. Reede, W. M. Rumancik, M. Persky, T. Bergeron. Sonographic anatomy of the larynx, with particular reference to the vocal cords. *Journal of ultrasound in medicine*, 6(1987):225–230.
- [12] K. A. Miles. Ultrasound demonstration of vocal cord movements. *The British journal of radiology*, 62(1989):871–872.
- [13] B. Mensch. Analyse par exploration ultrasonique du mouvement des cordes vocales isolées. *Comptes Rendus Des Seances De La Societe De Biologie Et De Ses Filiales*, 158(1964):2295–2296.
- [14] C. Bordone-Sacerdote, G. Sacerdote. Investigations on the movement of the glottis by ultrasounds. In *Proceedings of 5th International Congress on Acoustics, Liège, Paper A 42*, 1965.
- [15] F. D. Minifie, C. A. Kelsey, T. J. Hixon. Measurment of vocal fold motion using an ultrasonic Doppler velocity monitor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43(1968):1165–1169.
- [16] O. Schindler, M. L. Gonella, R. Pisani. Doppler ultrasound examination of the vibration speed of vocal folds. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 42(1990):265–272.
- [17] G. Böhme. Duplexsonographie des Kehlkopfes: 1. Bewegungsanalyse intralaryngealer Strukturen. *Oto-Rhino-Laryngologia Nova*, 1(1991):338–442.
- [18] G. Böhme. *Sprach-, Sprech-, Stimm- und Schluckstörungen: Band 1: Klinik*. 4. Auflage. Urban & Fischer Verlag, München 2003.
- [19] G. Böhme. Duplexsonographie des Kehlkopfes: 2. Farbkodierte Bewegungsanalyse intralaryngealer Strukturen. *Oto-Rhino-Laryngologia Nova*, 2(1992):43–45.
- [20] L. L. P. J. Ooi, H. S. Chan, K. C. Soo. Color Doppler imaging for vocal cord palsy. *Head & Neck*, 17(1995):20–23.
- [21] H. Iro, V. Uttenweiler, J. Zenk. *Kopf-Hals-Sonographie: eine Anleitung zur praxisbezogenen Ultraschalluntersuchung*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 2000.

- [22] G. Böhme, M. Gross. *Stroboskopie und andere Verfahren zur Analyse von Stimmlippen-schwingungen*. Median-Verlag von Killisch-Horn GmbH, Heidelberg 2001.
- [23] T. Y. Hsiao, C. L. Wang, C. N. Chen, F. J. Hsieh, Y. W. Shau. Noninvasive assessment of laryngeal phonation function using color Doppler ultrasound imaging. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 27(2001):1035–1040.
- [24] Y. W. Shau, C. L. Wang, F. J. Hsieh, T. Y. Hsiao. Noninvasive assessment of vocal fold mucosal wave velocity using color Doppler imaging. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 27(2001):1451–1460.
- [25] T. Y. Hsiao, C. L. Wang, C. N. Chen, F. J. Hsieh, Y. W. Shau. Elasticity of human vocal folds measured in vivo using color Doppler imaging. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 28(2002):1145–1152.
- [26] C. G. Tsai, J. H. Chen, Y. W. Shau, T. Y. Hsiao. Dynamic B-mode ultrasound imaging of vocal fold vibration during phonation. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 35(2009):1812–1818.
- [27] C. G. Tsai, T. Y. Hsiao, Y. W. Shau. Vocal fold wave velocity in the cover and body layers measured in vivo using dynamic sonography. In *7th International Conference on Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research*, 2006. <http://ntur.lib.ntu.edu.tw/handle/246246/258123>, als PDF: <https://pdfs.semanticscholar.org/b2e6/f30dece8679e5380798b60ad787b79eee380.pdf> [Online; zuletzt besucht am 12.04.2019].
- [28] D. E. Hall. *Musikalische Akustik - Ein Handbuch*. Schott Music GmbH & Co. KG, Mainz 2008.
- [29] G. Friedrich, W. Bigenzahn, P. Zorowka. *Phoniatrie und Pädaudiologie - Einführung in die medizinischen, psychologischen und linguistischen Grundlagen von Stimme, Sprache und Gehör*. 4. korrigierte Auflage. Verlag Hans Huber, Hogrefe AG, Bern 2008.
- [30] J. Wendler, W. Seidner, U. Eysholdt. *Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie*. 4. Auflage. Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart 2005.
- [31] P. M. Deckert. *Anatomie der Sprache, Stimme und Atmung*. 4. Auflage. Lehmanns Media, 2007.

- [32] M. Schünke, E. Schulte, U. Schumacher. *Prometheus Lernatlas der Anatomie: Kopf, Hals und Neuroanatomie*. 3. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2012.
- [33] M. Hirano, Y. Kakita, K. Ohmaru, S. Kurita. Structure and mechanical properties of the vocal fold. *Speech and Language*, 7(1982):271–297.
- [34] M. Hirano. Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 26(1974):89–94.
- [35] J. van den Berg. Myoelastic-Aerodynamic theory of voice production. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 1(1958):227–244.
- [36] I. R. Titze. Tutorial: Comments on the myoelastic-aerodynamic theory of phonation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 23(1980):495–510.
- [37] M. Kob. *Physical Modeling of the Singing Voice*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2002.
- [38] N. Isshiki. *Phonosurgery: theory and practice*. Springer-Verlag Tokyo, 1989.
- [39] E. Schönhärl. *Die Stroboskopie in der praktischen Laryngologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1960.
- [40] M. Echternach, B. Richter. Was versteht man unter Randkantenverschiebung? *Sprache Stimme Gehör*, 32(2008):141.
- [41] I. Steinecke, H. Herzel. Bifurcations in an asymmetrical vocal-fold model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1995):1874–1884.
- [42] L. Fuks, B. Hammarberg, J. Sundberg. A self-sustained vocal-ventricular phonation mode: acoustical, aerodynamic and glottographic evidences. *KTH TMH-QPSR*, 39(1998):49–59.
- [43] P. H. Dejonckere, P. Bradley, P. Clemente, G. Cornut, L. Crevier-Buchman, G. Friedreich, P. Van De Heyning, M. Remacle, V. Woisard. A basic protocol for functional assessment of voice pathology, especially for investigating the efficacy of (phonosurgical) treatments and evaluating new assessment techniques. Guideline elaborated by the Committee on Phoniatrics of the European Laryngological Society (ELS). *European Archives of Otorhinolaryngology*, 258(2001):77–82.
- [44] M. Garcia. Garcia's new treatise on the art of singing. A compendious method of instruction, with examples and exercises for the cultivation of the voice. Revised edition published by Oliver Ditson Company, Boston, o. J.

- [45] M. Garcia. *Hints on singing*. Published by Joseph Patelson Music House Ltd., New York 1982, originally published 1894.
- [46] G. Böhme. Sonographie des Larynx und klinische Anwendungen (unter Ausschluß onkologischer Erkrankungen). In: R. Sader, B. Norer, H.-H. Horch (Hrsg.). *Lehrbuch der Ultraschalldiagnostik im Kopf-Hals-Bereich*. Einhorn-Presse Verlag, Reinbek 2001.
- [47] A. Bozzato, J. Zenk, F. Gottwald, H. Iro. Der Einfluss der Schildknorpelossifikation bei der Larynxsonographie. *Laryngo-Rhino-Otologie*, 86(2007):276–281.
- [48] B. Maass: Sygyt-Software. <https://www.sygyt.com/en/>. [Online; zuletzt besucht am 12.04.2019].