

3.2. Studie: Strömungsglottogramm- und EGG-Parameter in den Stimmregistern: Modal, Falsett und *voce faringea*

Alexander Mayr

Abstract

Der im Kehlaparat erzeugte Primärschall entspricht dem pulsierenden transglottischen Luftstrom und kann in einer Wellenform (Strömungsglottogramm) dargestellt werden, an der sich wichtige Aspekte der Phonation ablesen lassen. Da die beiden Hauptstimmregister, Modal- und Falsettregister, in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Primärschall stehen, kann angenommen werden, dass Klänge dieser Register-Mechanismen verschiedenartige Wellenformen im Strömungsglottogramm ergeben. Für diese Studie wurden von einer Testperson, einem professionellen Tenor und Countertenor, gesungene und invers gefilterte Klangbeispiele in den Stimmregistern: Modal, Falsett und *voce faringea* aufgenommen und verschiedene Primärschall-Parameter gemessen. Außer dem Strömungsglottogramm wurde auch ein Elektrogloggogramm und ein Langzeit-Mittelwert-Spektrum erstellt sowie eine Formanten-Analyse durchgeführt. Untersucht wurden der, durch eine intraorale Messung abgeleitete subglottische Atemdruck (P_{sub}), die Verschlussphasenlänge der Stimmlippen (Q_{closed}), die Pulsamplitude, die *maximum flow declination rate* (MFDR), der *normalized amplitude quotient* (NAQ) sowie die Lautstärke-differenz der beiden tiefsten Partialtöne (H1-H2). Es zeigten sich im Modalregister gegenüber dem Falsett höhere Werte bei Q_{closed} , MDR und P_{sub} und niedrigere bei NAQ und H1-H2. Im Vergleich zum Falsett wurden in der *voce faringea* höhere Werte bei Q_{closed} und MFDR und niedrigere bei NAQ, H1-H2, Pulsamplitude sowie P_{sub} ermittelt. Die gemessenen Glottogramm-Parameter-Werte der Klangbeispiele im Falsett und Modalregister zeigten die erwarteten Unterschiede und stellten sich als konsistent mit jenen früherer Studien heraus. Die Werte der in *voce faringea* produzierten Töne lassen jedoch darauf schließen, dass es sich um im Falsettregister erzeugte Töne mit deutlich modalem Klangcharakter handelt.

3.2.1. Einleitung

Zentraler Aspekt des künstlerisch wissenschaftlichen Forschungsprojekts, in dessen Rahmen vorliegende Studie durchgeführt wurde, ist die künstlerische und wissenschaftliche Rekonstruktion eines bestimmten Register-Mechanismus, den insbesondere die *Tenori di grazia* bis ins 19. Jahrhundert für hohe Stimmlagen einsetzten. Dieser reflektiert in besonderer Weise ein vorromantisches vokales

im Bereich von etwa 3000 Hz besonderen Nachdruck. Eine tiefe Positionierung des Kehlkopfes, sowie eine Dehnung im Rachen und Nasenrachenraum begünstigen die Entstehung des Sängersformant-Clusters. (Sundberg, Die Wissenschaft von der Singstimme, 1997, S.165.)

Klangideal, welches sich wahrscheinlich deutlich von unserem heutigen unterscheidet. Historische Quellen wie Gesangslehrwerke und physiologische Abhandlungen sowie Rezensionen und Artikel in Musikzeitschriften aus dem 18. und 19. Jahrhundert belegen die außergewöhnlichen ästhetischen Qualitäten dieser Phonationsart der berühmten Tenöre jener Epoche.

Edgar Herbert-Caesari bezeichnete diesen Mechanismus 1951 in seinem Buch *The Voice of the Mind* als *voce faringea (pharyngeal voice)*.²⁷⁴ Weitere im 18. und 19. Jahrhundert für diese Stimmfunktion gebräuchliche Begriffe waren *voix pharyngienne*, *voix sur-laryngienne*, *faucet*, *voix mixte*, *voce mezzo falso* oder auch *feigned voice*. Die *voce faringea* wurde zu jener Zeit als eine Art Vermittlerin zwischen dem Modalregister und dem Falsett beziehungsweise als eine Mischform der beiden Stimmfunktionen betrachtet. Es handelt sich dabei vermutlich um einen falsettdominanten Register-Mechanismus mit deutlich gesteigerter Stimmlippen-Adduktion und Vokalis-Aktivität.

Titze beschreibt Stimmregister als bestimmte wahrnehmbare Bereiche, in denen die Klangqualität über einen gewissen Tonumfang konstant bleibe²⁷⁵ und laut Sundberg sei ein Register ein Phonationsfrequenzbereich, in dem alle Töne so wahrgenommen werden, als seien sie auf ähnliche Weise entstanden und hätten ein ähnliches Timbre.²⁷⁶

Zwar gibt es bezüglich der Registerterminologie unter Stimmforschern, Gesangspädagogen und Sängern oftmals divergierende Ansichten²⁷⁷, doch können nach heutigem Forschungsstand die Zusammenhänge zwischen den Stimmregistern Modal und Falsett und ganz bestimmten Vibrationscharakteristika der Stimmlippen als gegeben angesehen werden. Die physiologischen und funktionalen Unterschiede zwischen dem Modal- und dem Falsettregister standen dabei über Jahrzehnte im Fokus stimmwissenschaftlicher Forschung. Nach van den Berg²⁷⁸ sei das Brustregister (Modalregister) vom Falsett durch eine verstärkte

²⁷⁴ Herbert-Caesari, *The Voice of the Mind*, 1951, S. 333-354.

²⁷⁵ „...perceptually distinct regions of vocal quality that can be maintained over some ranges of pitch and loudness“ Titze, 2000, S.282.

²⁷⁶ Sundberg, *Die Wissenschaft von der Singstimme*, 1997, S. 74.

²⁷⁷ Marianne Mörner et al. dokumentierten 1963 107 Begriffe für unterschiedliche Stimmregister. (Mörner, Fransson, & Fant, 1963)

²⁷⁸ Van den Berg 1963.

Spannung des *M. vocalis* (*M. thyroarytaenoideus*, TA) zu unterscheiden, während das Falsett eine stärkere longitudinale Spannung des Ligaments mit einer relativen Dominanz des *M. cricothyroideus* (CT) aufweise. Der Stimmlippenkörper bleibe durch die gesteigerte Aktivität des TA im Modalregister dicker, was eine größere Schwungmasse bei der Phonation bewirke. Charakteristisch für einen Stimmklang im Modalregister seien stärker ausgeprägte Teiltöne in hohen Frequenzbereichen, während das Falsett eine Grundfrequenz mit größerer Amplitude aufweise.

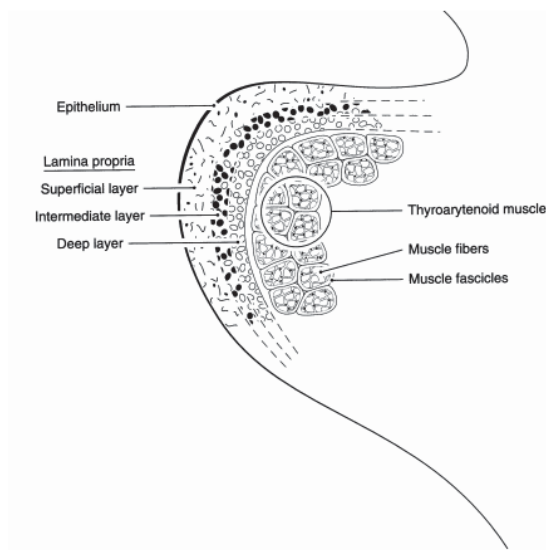


Abbildung 18 Die unterschiedlichen Schichten der Stimmlippen: Epithel, Lamina propria und *M. vocalis* (TA). Nach Hirano: Titze, 1994.

Hirano²⁷⁹ beschreibt in seinem body-cover Modell unterschiedliche Kontraktionszustände in den verschiedenen Schichten der Stimmlippen. Im Modalregister sei der Stimmlippenkörper durch die Spannung im Vokalis-Muskel gegenüber den Stimmlippenrändern versteift, was zu einer mukosalen Welle mit einer deutlichen vertikalen Phasenverschiebung führt. Durch die Streckung der äußeren Schichten der Stimmlippen und verringerte Vokalis-Aktivität komme es

im Falsett zu einer erheblichen Reduzierung der mukosalen Welle und damit zu einer kürzeren Verschlussphase der Glottis. Ergebnisse, die mittels Elektroglogtographie (EGG) gewonnen wurden²⁸⁰, bestätigen Hiranos Body-Cover-Modell. Es ist bekannt, dass es bei einem Registerwechsel von Modal zu Falsett zu einer Veränderung der EGG-Signalförmigkeit kommt, deren Amplitude genau der Kontaktfläche der Stimmlippen entspricht. Die EGG-Kurve zeigt im Modalregister eine längere Kontaktzeit der Stimmlippen und damit auch eine verlängerte Verschlussphase der Glottis gegenüber dem Falsett.

²⁷⁹ Hirano, 1974.

²⁸⁰ Colton 1972, Askenfelt et al. 1980, Roubeau 1987.

Auf Basis dieser Erkenntnisse können Falsett und Modalregister durch differierende Schwingungsmuster der Stimmlippen identifiziert werden. Schwingungszyklen mit unterschiedlich langen Offen- und Verschlussphasen der Glottis sind auch anhand der Wellenform des transglottischen Luftstroms zu erkennen. Ein für das Falsettregister typischer längerer Offen-Quotient der Glottis (Zeit in der während eines Schwingungszyklus kein Stimmlippenkontakt besteht) ist an einer höheren Pulsamplitude und einer abgerundeten Form der Welle zu erkennen, während das Modalregister durch eine kleinere und spitz zulaufende Amplitude zu identifizieren ist.

Die Wellenform des Strömungsglottogramms kann mittels Inversfilterung dargestellt werden. Durch einen Filterprozess wird dabei der resonatorische Einfluss des Vokaltrakts auf den Primärschall umgekehrt. Diese Filter könnte man auch als Anti-Resonanzen bezeichnen, durch welche die Resonanzen des Ansatzrohres eliminiert werden. Das Resultat der Inversfilterung ist das Strömungsglottogramm, das die Wellenform des Primärschalls darstellt. Dieses Signal entspricht dem physiologischen Schwingungszyklus der Stimmlippen und repräsentiert damit die Offen- und Verschlussphase der Glottis. Anhand der Kurvenform lassen sich diverse wichtige Parameter der Phonation ableiten. So geht eine große Pulsamplitude üblicherweise mit einem kürzeren oder gar unvollständigen Stimmlippenschluss einher, was für eine hypofunktionale (behauchte) Phonation spricht. Eine hyperfunktionale (gepresste) Phonation ist an einer kleineren Pulsamplitude und einem deutlichen und relativ längeren Verschluss der Glottis zu erkennen.

Auch die Charakteristik des Stimmspektrums steht in direktem Zusammenhang mit der Form und der Amplitude des pulsierenden transglottischen Luftstroms. So zeigt das Spektrum bei behauchter Phonation eine deutlich größere Amplitude der Grundfrequenz (erster Partialton: H_1 , F_0) gegenüber dem zweiten Partialton (H_2) und bei gepresster Phonation eine relativ stärkere Ausprägung des zweiten Partialtons.²⁸¹

²⁸¹ Brickley, 1982, Stevens et al. 1995.

Die Ergebnisse früherer Studien²⁸² zu den Unterschieden bei Strömungsglottogrammen und subglottischen Luftdruck-Verhältnissen im Modal- und Falsettregister belegten höhere Werte des subglottischen Atemdrucks im Modalregister gegenüber dem Falsett. Weiter wurden bei Klangbeispielen mit etwa gleicher Tonhöhe und Lautstärke höhere Pulsamplituden und eine kürzere Verschlussphase der Glottis im Falsett sowie eine erhöhte Adduktion der Stimmlippen und ein geringerer relativer Luftverbrauch im Modalregister beobachtet.

Zweck vorliegender Studie ist es, physiologische und akustische Charakteristika der Phonation in der Stimmfunktion *voce faringea* zu ermitteln und die Ergebnisse mit jenen zu vergleichen, die im Modalregister und im Falsett gemessen werden. Dazu wurden jeweils ein Strömungsglottogramm, ein Elektroglottogramm sowie ein LTAS für die zu untersuchenden Stimmfunktionen erstellt. Ergänzend wurde der subglottische Druck bestimmt und eine Analyse der Formantenstruktur durchgeführt. Es soll so festgestellt werden, ob sich insbesondere die wahrgenommenen Unterschiede im Stimmtimbre zwischen dem Falsett und der *voce faringea* durch die messbaren Daten belegen lassen.

Als Falsett wird fortan eine im Kunstgesang verwendbare Art des Falsettregisters bezeichnet. Herbst beschrieb diese Art der Falsettfunktion in Abgrenzung zum abduzierten oder „naiven“ Falsett auch als Countertenor Falsett oder als adduziertes Falsett. Den Unterschied zwischen letzterem und dem kollabierten Falsett²⁸³ erklärt Herbst durch die Adduktion des posterioren knorpeligen und des medialen membranösen Anteils (membranöse Medialisation) der Stimmlippen im adduzierten Falsett. Durch diese adduktorischen Kräfte komme es zum sogenannten *surface bulging*, dem Verdicken der Stimmlippenränder und damit zu einer stärker ausgeprägten mukosalen Welle und einer längeren Kontaktzeit der Stimmlippen als im abduzierten Falsett.²⁸⁴

Bei der Testperson handelt es sich um einen professionellen Opersänger und Gesangspädagogen mit sechzehnzehnjähriger Berufserfahrung als Tenor und Countertenor (der Autor vorliegender Studie). Im experimentellen Umgang mit

²⁸² Södersten, 1994, Högset 2001.

²⁸³ Vgl. Husler und Rodd-Marling 1965, S. 88.

²⁸⁴ Herbst, 2009.

der eigenen Stimme hat der Verfasser eine Gesangstechnik entwickelt, die es ihm ermöglicht, das Timbre seines Countertenor-Falsetts so zu verändern, dass es einen modalen Charakter annimmt. Diese Technik basiert auf physiologischen und funktionalen Modifikationen des von den Stimmlippen erzeugten Primärschalls sowie des Resonanzgefüges im Vokaltrakt. Das Timbre der so erzeugten Stimmfunktion, die in weiterer Folge *voce faringea* genannt wird, scheint durch diese Modifikationen mehr der Tenorstimme des Verfassers zu ähneln als dem Falsett, welches er als Countertenor einsetzt. Es kann durch diese Art der Phonation ein Angleichen von Timbre und Stärke des Modal- und Falsettregisters erreicht werden, wie es auch von den Autoren diverser Gesangstraktate aus dem 18. und 19. Jahrhundert verlangt wurde.

Bezüglich der Phonation in der *voce faringea* beschreibt der Verfasser eine intendierte und subjektiv wahrgenommene Steigerung der glottischen Adduktion, insbesondere im posterioren Bereich der Glottis sowie eine verstärkte mediale Spannung im membranösen Teil der Stimmlippen. Gegenüber dem Falsett gibt er auch eine subjektiv wahrnehmbare Verdickung der vertikalen Kontaktfläche der Stimmlippen an, die eine erhöhte TA-Aktivität vermuten lässt. Die Entwicklung vom Falsett zur *voce faringea* werde laut Angaben des Autors vorliegender Studie durch eine Verstärkung der adduktorischen Kräfte initiiert, deren Einsatz Herbst bereits als wichtigen Faktor zur Unterscheidung von „naivem“ Falsett und Countertenor Falsett dokumentierte. Entscheidend für die Veränderung des Falsetts zur *voce faringea* sei jedoch der Adduktions-Grad sowie das geringfügig veränderte Verhältnis zwischen CT- und TA-Aktivität. Bezüglich der Atemführung gibt der Verfasser an, die Einatmungstendenz bei Phonation in der *voce faringea* zu verstärken. Die resonatorischen Unterschiede zum Countertenor Falsett sind, gemäß seiner Angaben, die Bildung eines aryepiglottischen Sphinkters durch Annäherung der Epiglottis und der Stellknorpel im oberen Bereich des *Vestibulum laryngis* sowie eine Verengung in bestimmten Abschnitten des Vokaltrakts. So etwa durch laterale Kontraktionen des Kehlarapparats und des oberen Rachenbereichs und durch eine Annäherung von Zunge und gesenktem Gaumensegel.

3.2.2. Methode

Klangbeispiele, vom Autor vorliegender Studie in den Registern Modal, Falsett und *voce faringea* erzeugt, wurden in einem Studio des *Department of Speech, Music and Hearing der Königlich Technischen Hochschule* in Stockholm zusammen mit Prof. Dr. Johan Sundberg aufgenommen. Es wurden dabei jeweils 28 Takte der Arie *Verdi Prati* aus Händels Oper *Alcina* in mittlerer Lage²⁸⁵ und vergleichbarer Lautstärke auf der Silbe [Pae] und in einer Version mit dem Originaltext eingesungen.

Während der Verschlussphase der Lippen bei Artikulation des Konsonanten [P] entspricht der subglottische Druck typischerweise dem intraoralen Druck. So bietet die Messung des intraoralen Luftdrucks während der Phonation der Silbe [Pae] eine nicht-invasive Möglichkeit, den subglottischen Druck zu ermitteln. Die gemessenen Werte des intraoralen Drucks werden fortan als subglottischer Druck (P_{sub}) bezeichnet. Für die Messung wurde während der Gesangsaufnahme ein dünnes Kunststoff-Röhrchen im rechten Mundwinkel gehalten, welches über einen Druck-Umwandler mit einem Manometer verbunden war. Die Daten aus der Messung des subglottischen Drucks wurden gemeinsam mit den via Mikrofon und mittels Elektroglossographie aufgezeichneten Signalen in einer Mehrkanal Audiodatei digitalisiert auf einem Computer im wav Format gespeichert.

Zur Analyse des Strömungsglottogramms wurden pro Stimmregister jeweils 10 Klang-Samples der gleichen Stellen der Arien-Melodie zur Invers-Filterung mittels der SoundSwell™ Signal Workstation ausgesucht. Vor dem Filterprozess wurden Frequenz und Bandbreite der Formanten bis 8 KHz gemessen und das Signal so angepasst, dass eine wellenfreie Verschlussphase der Glottis dargestellt werden konnte.

Die folgenden Parameter wurden mittels Strömungsglottogramm und dem Derivat sowie dem EGG-Signal ermittelt: der subglottische Atemdruck (P_{sub}), die Verschlussphasenlänge der Stimmlippen relativ zur Schwingungsperiode (Q_{closed}), die Pulsamplitude, die *maximum flow declination rate* (MFDR) sowie der *normalized amplitude quotient* (NAQ, Pulsamplitude/MFDR* Grundfrequenz). Die

²⁸⁵ Falsett und *voce faringea*: C Dur, Modal: G Dur.

Lautstärkedifferenz der beiden tiefsten Partialtöne (H1-H2) wurde anhand eines Spektrums der jeweiligen Wellenform, welches durch eine Subroutine der SoundSwell™ Signal Workstation erstellt wurde, berechnet.

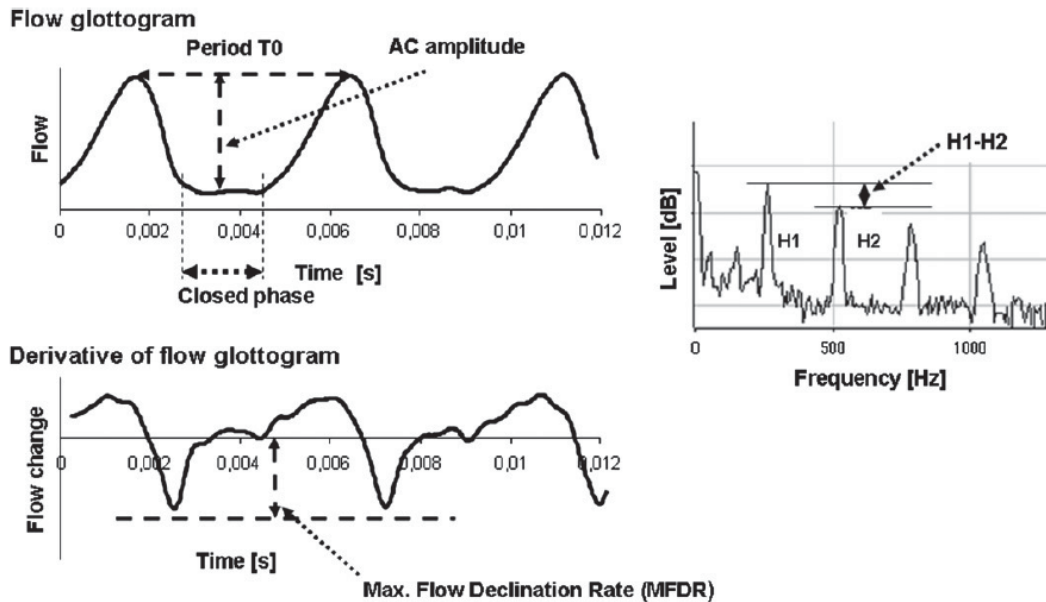


Abbildung 19 Darstellung der Primärschallmessung anhand eines Strömungsglottogramms, dessen Derivats und eines Spektrums, ermittelt mit der SoundSwell™ Signal Workstation. Thalèn 2010.

Zusätzlich wurde ein Langzeit-Spektrum (LTAS: Long term average Spectrum) erstellt, welches ein effizientes Werkzeug zur Stimmanalyse darstellt. Es kann mittels LTAS die über einen längeren Zeitraum ermittelte durchschnittliche Stärke diverser Frequenzbereiche des Stimmklangs dargestellt werden. Diese reflektieren sowohl die Charakteristika der Glottisfunktion als auch jene des Vokaltrakts also der Formanten-Struktur des Klangs.

3.2.3. Resultate

Die Kurvenform des Strömungsglottogramms ist im Falsett, vergleichbar einem romanischen Bogen, abgerundet (Abb. 20), während sie im Modalregister eine deutliche Spitze aufweist (Abb. 22). Eine Tendenz in Richtung eines spitzen Verlaufs, in der Art eines angedeuteten gotischen Bogens ist auch in der Wellenform der *voce faringea* zu erkennen (Abb. 21).

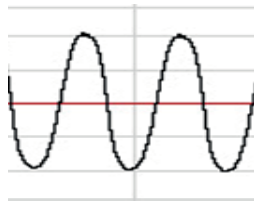


Abbildung 20 Eine runde Pulsform im Falsett.

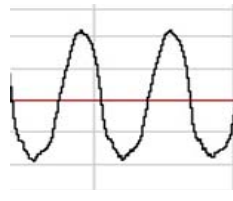


Abbildung 21 Pulsform mit Tendenz in Richtung eines spitzen Verlaufs in der *voce faringea*.

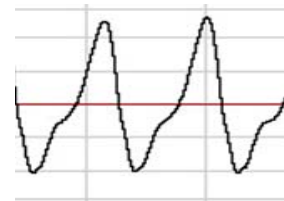


Abbildung 22 Deutlich spitzer Verlauf der Pulsform im Modalregister.

Eine runde Pulsform zeigt sich üblicherweise bei höherem Luftstrom während der Verschlussphase der Stimmlippen. Eine abgerundete Wellenform des Strömungsglottogramms ist typisch für das Falsett, eine nach oben spitz verlaufende Kurve für das Modalregister. Dickere Stimmlippen im Modalregister (Abb. 23 oben) lassen eine deutliche Phasenverschiebung zwischen den unteren und oberen Schichten der Stimmlippen erkennen, sodass die Schließbewegung der unteren Schicht die Öffnung der oberen unterbricht. Dies resultiert in einer nach oben hin spitz verlaufenden Wellenform. Dünne Stimmlippen (Abb. 23 unten) schwingen ohne beziehungsweise mit nur sehr geringer Phasenverschiebung. Die sich daraus ergebende Kurve hat daher eine runde Form. Laut Högset und Sundberg generiert eine dreieckige Wellenform eine weniger dominante

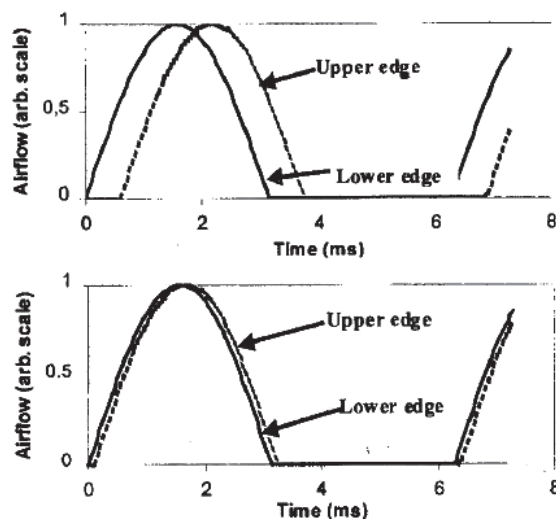


Abbildung 23 Schematische Darstellung des Effekts der Stimmlippen-Dicke auf die Kurvenform des Glottogramms. (Högset & Sundberg, 2001)

Grundfrequenz F_0 als eine abgerundete.²⁸⁶

Die Ergebnisse aus der Auswertung der Strömungsglottogramme zeigen bezüglich der Pulsamplitude durchschnittlich höhere Werte im Falsett als in der *voce faringea* (Abb. 24). Verbunden mit einer hohen Pulsamplitude ist typischerweise eine kürzere Verschlussphase der Glottis und damit ein kleinerer Wert des Q_{closed} .

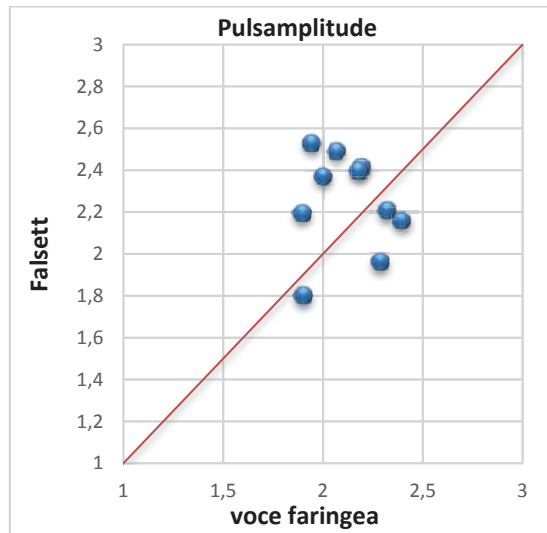


Abbildung 24 Pulsamplitude in *voce faringea* und Falsett.

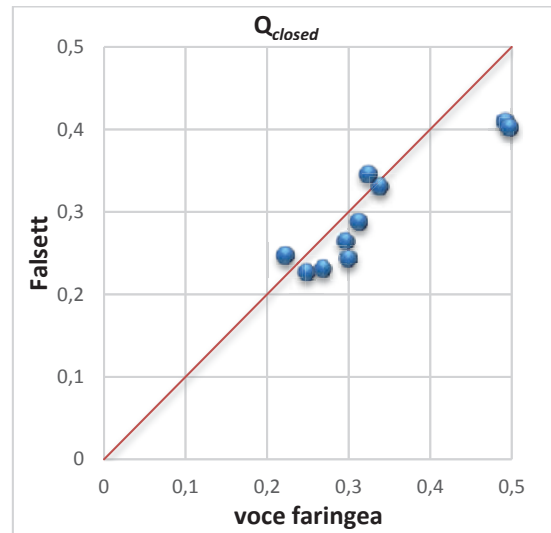


Abbildung 25 Stimmlippen-Verschlussquotient *voce faringea* und Falsett.

Die gemessenen Q_{closed} -Werte der Klangbeispiele im Modalregister reichten von 0,28 bis 0,52. Die untersuchte Gesangsphrase wurde dabei in mittlerer Tenorlage, relativ weicher Tongebung und mittlerer Lautstärke gesungen. Die Werte des Q_{closed} steigen üblicherweise mit der Grundfrequenz und dem Anheben des subglottischen Drucks. Gemessen wurden im Falsett Werte zwischen 0,22 und 0,41 und in der *voce faringea* zwischen 0,22 und 0,49. Im Durchschnitt zeigen sich höhere Werte des Q_{closed} in der *voce faringea* gegenüber dem Falsett (Abb. 25).

Die *maximum flow declination rate* (MFDR) wird bestimmt durch die Verschlussgeschwindigkeit der Stimmlippen und ist ein aussagekräftiger Parameter für die Stimmstärke. Ein hoher MFDR-Wert reflektiert starke stimmliche Intensität und ist an einer steil abfallenden Kurve des Strömungsglottogramm-Signals zu erken-

²⁸⁶ Högset & Sundberg, 2001.

nen, ein niedriger Wert durch einen flacheren Kurvenverlauf der Verschlussphase. Die Messungen zeigten die höchsten Werte im Modalregister (zwischen 1128,83 und 2307,09), moderate in der *voce faringea* (zwischen 994,74 und 2192,93) und geringere im Falsett (zwischen 928,56 und 2033,40). *Abbildung 26* zeigt die durchschnittlich höheren MFDR-Werte in der *voce faringea* im Vergleich zu jenen im Falsett.

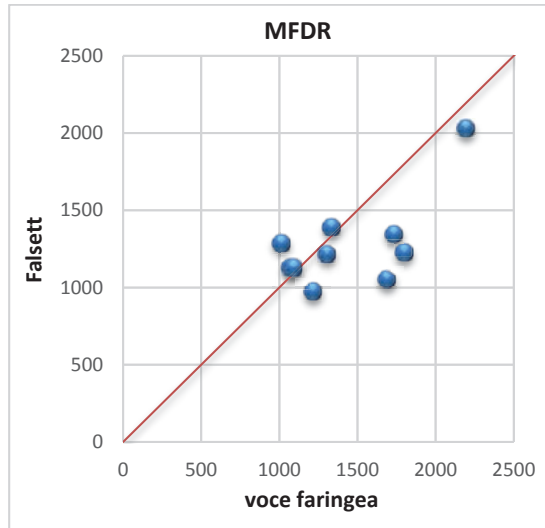


Abbildung 26 MFDR (maximum flow declination rate) in *voce faringea* und Falsett.

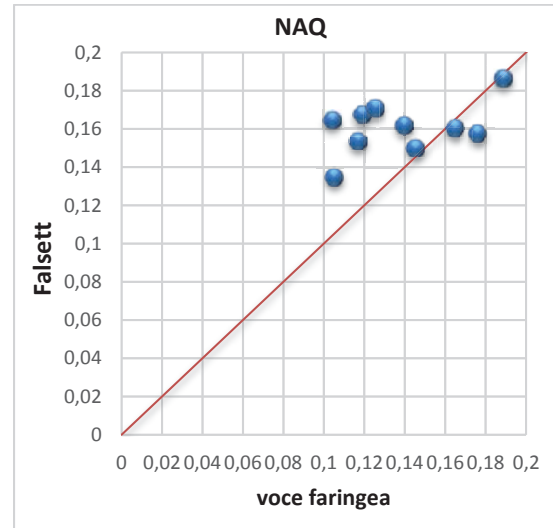


Abbildung 27 NAQ (normalized amplitude quotient: Pulsamplitude/MFDR* Grundfrequenz) in *voce faringea* und Falsett.

Ein weiterer wichtiger Parameter der Glottisfunktion ist die Adduktionsstärke der Stimmlippen, der durch den *normalized amplitude quotient* (NAQ: Pulsamplitude/MFDR* Grundfrequenz) dargestellt werden kann. Ein niedriger NAQ, also eine stärkere Adduktion der Stimmlippen wird typischerweise bei Phonation im Modalregister und ein hoher NAQ im Falsett ermittelt. Zu erwarten ist eine Abnahme der NAQ-Werte und eine Zunahme der Adduktionsenergie bei steigender Tonhöhe. Im Modalregister wurden Werte zwischen 0,104 und 0,082, in der *voce faringea* zwischen 0,189 und 0,104 und im Falsett zwischen 0,187 und 0,135 gemessen. *Abbildung 27* belegt die durchschnittlich höheren NAQ-Werte im Falsett gegenüber jenen, die bei der Phonation in der *voce faringea* gemessen wurden.

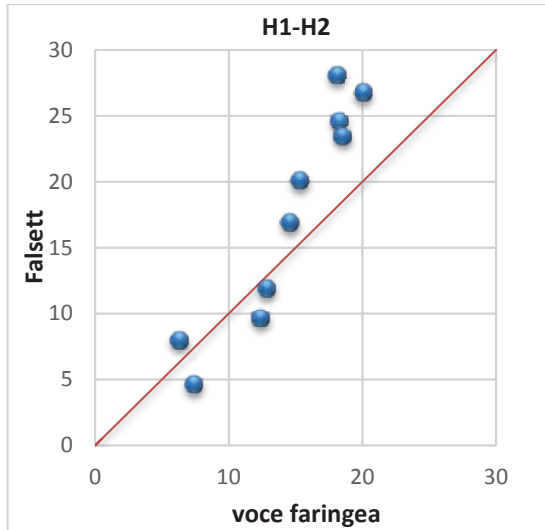


Abbildung 28 H1-H2 (Differenz der beiden tiefsten Teiltöne des Primärschalls) in *voce faringea* und Falsett.

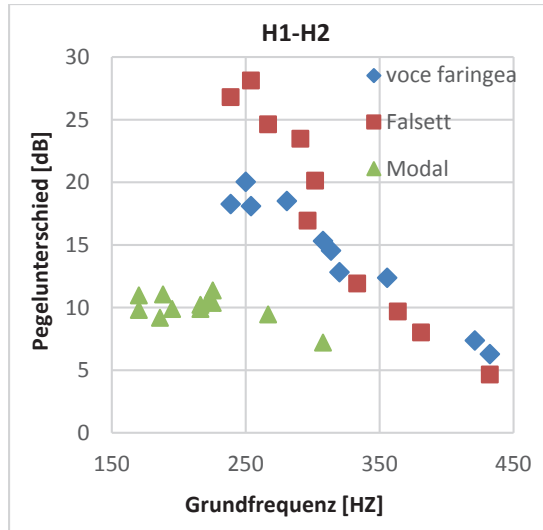


Abbildung 29 Pegelunterschied in dB von H1-H2 in *voce faringea*, Falsett und Modalregister.

Högset und Sundberg²⁸⁷ konnten bereits 2001 im Rahmen einer Studie höhere H1-H2 Werte (Differenz der beiden tiefsten Frequenzen des Primärschallspektrums) im Falsett gegenüber niedrigeren im Modalregister ausmachen. Im Falsett gesungene Töne weisen erfahrungsgemäß eine größere Amplitude des Grundtons (H1) auf als modale Stimmklänge. Sundberg stellte zuvor auch schon eine lineare Korrelation zwischen Q_{closed} und H1-H2 Werten in Falsett und Modalregister fest. Im Rahmen vorliegender Studie wurden im Modalregister Werte zwischen 7,2 und 11,37, in der *voce faringea* zwischen 6,2 und 20,0 und im Falsett zwischen 4,6 und 28,1 gemessen. *Abbildung 28* zeigt die durchschnittlich höheren H1-H2 Werte im Falsett als in der *voce faringea* und *Abbildung 29* die Schalldruckpegelunterschiede der H1-H2 Messung in *voce faringea*, Falsett und Modalregister in Dezibel. Die durchschnittlich geringsten Unterschiede wurden im Modalregister ermittelt, die höchsten im Falsett. Jene der *voce faringea* liegen - insbesondere bei niedriger Grundfrequenz - dazwischen.

Studien²⁸⁸ belegen Auswirkungen von Veränderungen des subglottische Drucks auf den Q_{closed} . So fand Sundberg im Modalregister subglottische Druckverhältnisse, die etwa doppelt so hoch waren wie jene im Falsett, wobei bei etwa gleichbleibend hohem Druck der Q_{closed} bei Phonation hoher Töne größer war als in tieferen Lagen. Högset und Sundberg²⁸⁹ konnten bei Countertenören, Tenören

²⁸⁷ Högset 2001.

²⁸⁸ Sundberg 1999, Högset 2001.

²⁸⁹ Högset 2001.

und Baritonen jeweils linear ansteigende subglottische Druckverhältnisse bei zunehmender Tonhöhe (bis 55 cm H₂O) messen. Countertenöre verwendeten laut dieser Studie in beiden Registern geringere Drücke (bis 24 cm H₂O im Modalregister und 15 cm H₂O im Falsett) und die Messwerte bewegten sich insgesamt innerhalb einer deutlich schmäleren Bandbreite.

Die Daten aus der Messung der subglottischen Druckverhältnisse vorliegender Studie zeigen Werte zwischen 9,9 cm und 34,7 cm H₂O im Modalregister, zwischen 10,1 cm und 23,7 cm H₂O im Falsett und zwischen 5,3 cm und 22,0 cm H₂O in der *voce faringea* (Abb. 30). Im direkten Vergleich sind die Druck-Werte im Falsett durchschnittlich um 3,4 cm H₂O höher als in der *voce faringea*. *Abbildung 31* zeigt das berechnete Verhältnis von 0,7667 zwischen Falsett und *voce faringea*.

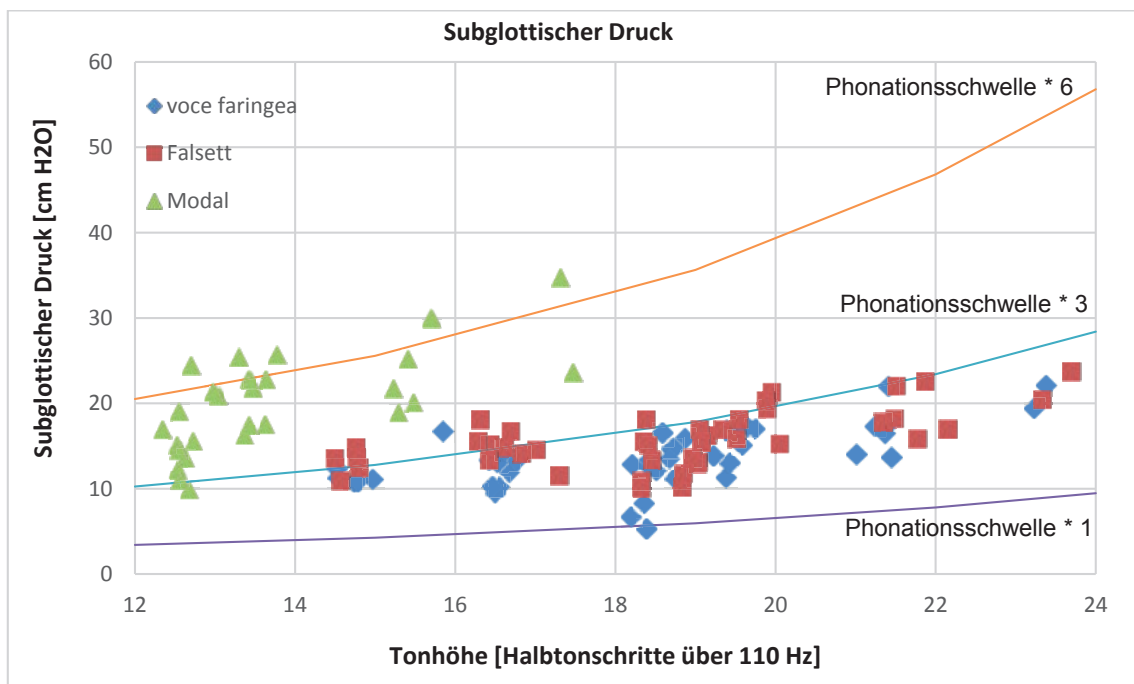


Abbildung 30 Subglottischer Druck in Modalregister, *voce faringea* und Falsett.

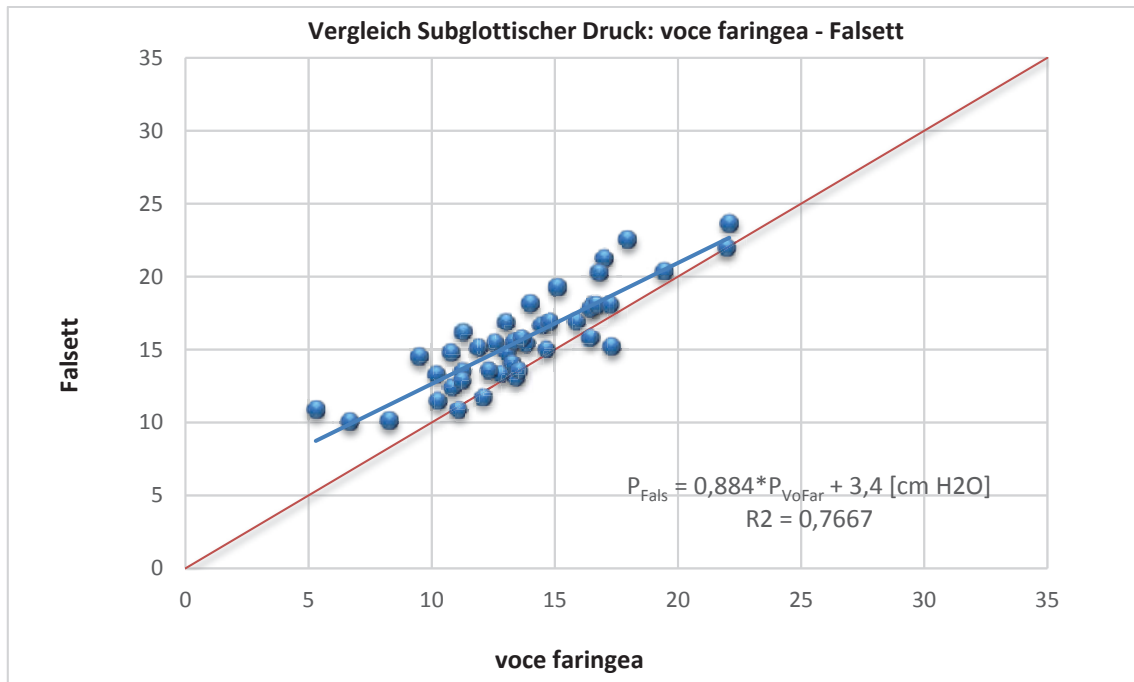


Abbildung 31 Subglottischer Druck in *voce faringea* und Falsett.

Das LTAS (long term average spectrum) zeigt den Durchschnitt von über einen längeren Zeitraum gemessenen Werten in einer Kurven-Form. Diese Daten resultieren aus der akustischen Kopplung der Partialtöne und der Formanten und spiegeln damit Aspekte der Klangproduktion im Kehlkopf wie auch der Klangformung im Vokaltrakt wieder. Für vorliegende Studie wurden zwei Langzeit-Mittelwert-Analysen gemacht. Einmal wurde jeweils eine Textfassung der Arienpassage in Modalregister, Falsett und *voce faringea* untersucht. Das zweite LTAS (Abb. 32) stellt die Werte der auf der Silbe [Pae] gesungenen Arien-Phrasen in der *voce faringea* und im Falsett dar.

Sowohl im Falsett als auch in der *voce faringea* weist das *Long term average spectrum* einen dominanten Grundton aus. Deutliche Unterschiede belegt das LTAS jedoch hinsichtlich des Schalldruckpegels der beiden tiefsten Formanten. Während sich im Falsett ein relativ starker erster Formant gegenüber einem schwächer ausgeprägten F1 in der *voce faringea* zeigt, ist in der *voce faringea* wiederum ein deutlich stärkerer zweiter Formant zu erkennen als im Falsett. Bedeutend stärker als im Falsett fällt in der *voce faringea* auch der Sängerformant-Cluster zwischen circa 2500 HZ und 3300 HZ aus.

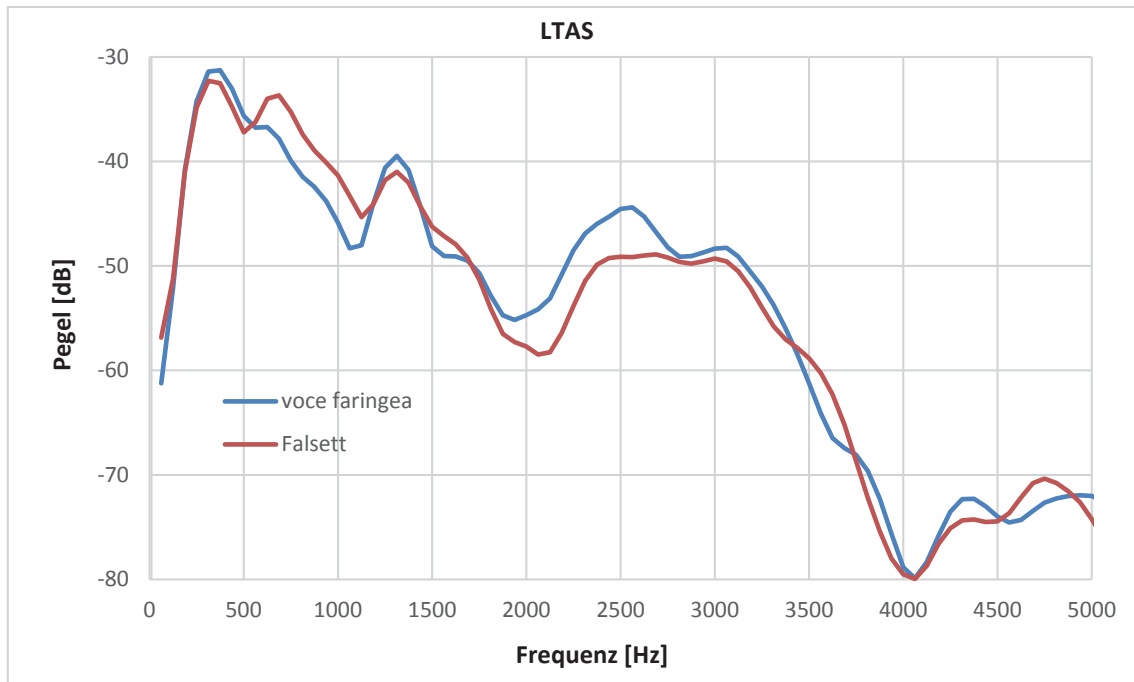


Abbildung 32 LTAS (Long term average spectrum) von *voce faringea* und Falsett.

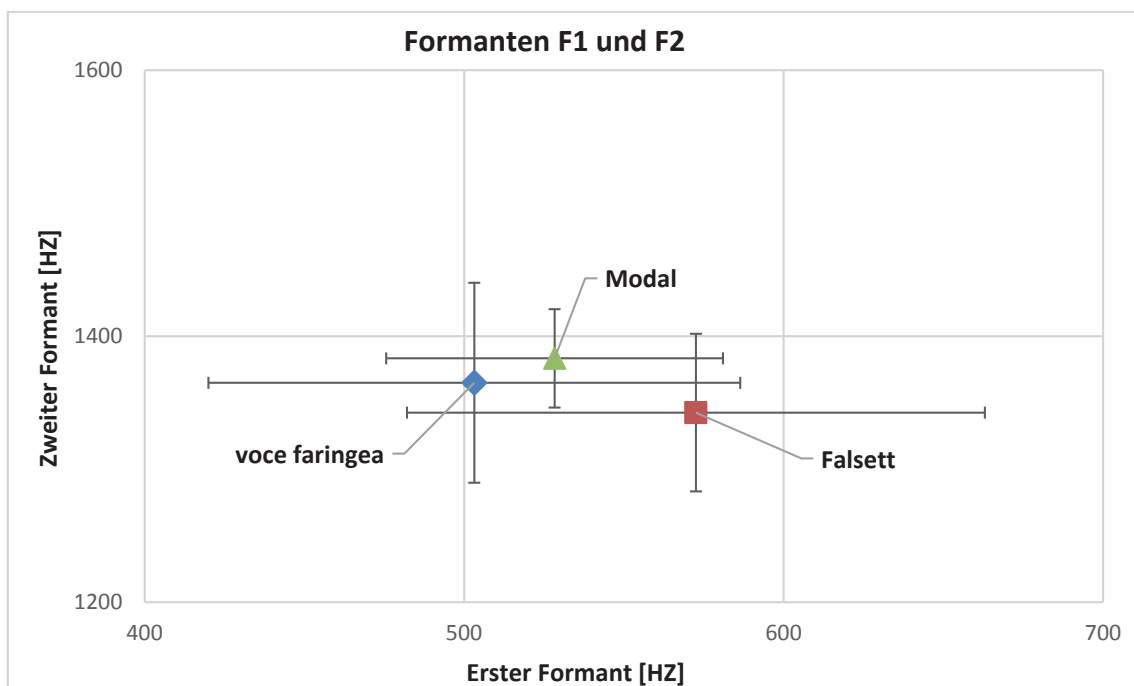


Abbildung 33 Die durchschnittliche Lage der beiden ersten Formanten F1 und F2, ermittelt aus den Daten der, auf der Silbe [Pae] gesungen Klangbeispiele in Modalregister, *voce faringea* und Falsett.

Eine Untersuchung der durchschnittlichen Formanten-Frequenzen der Klangbeispiele, gesungen auf der Silbe [Pae] ergab höhere Werte des ersten Formanten F1 im Falsett als in der *voce faringea* und im Modalregister sowie höhere Werte des zweiten Formanten F2 im Modalregister als in der *voce faringea* und im Falsett (Abb. 33).

3.2.4. Diskussion

Die Strömungsglottogramm-Kurve des Falsetts belegt durch ihre abgerundete Form eine verminderte Massenschwingung ohne beziehungsweise mit nur sehr dezenter Randkantenverschiebung. Die gotische Wellenform der *voce faringea* hingegen deutet auf eine dickere Stimmlippen-Konfiguration und eine Phasenverschiebung zwischen dem Stimmlippen-Körper und dem Cover hin, wie es typischerweise im Modalregister nachzuweisen ist.

Die Messung diverser Parameter der Klangerzeugung, die mittels Strömungsglottogramm, Elektrogloggogramm, Analyse des subglottischen Atemdrucks und der Formantenstruktur sowie durch ein Langzeit-Mittelwert-Spektrum ermittelt wurden, ergab deutlich unterschiedliche Werte für das Falsett und das Modalregister. Diese Unterschiede zwischen der Phonation im Falsett und im Modalregister sind dabei konsistent mit den Ergebnissen früherer Studien.²⁹⁰

Folgende Tendenzen (gering oder hoch) konnten bei den Parameter-Werten im Modalregister und im Falsett errechnet werden und werden als charakteristisch für die beiden Register angenommen.

	<i>Modalregister</i>	<i>Falsett</i>
<i>Pulsamplitude</i>	gering	hoch
<i>Q_{closed}</i>	hoch	gering
<i>MFDR</i>	hoch	gering
<i>NAQ</i>	gering	hoch
<i>H1-H2</i>	gering	hoch
<i>Subglottischer Druck</i>	hoch	gering

Tabelle 1 Tendenzen von Parameterwerten der Glottisfunktion im Modalregister und im Falsett, die sich als konsistent mit Ergebnissen früheren Studien (Högset & Sundberg, 2001), (Sundberg, M., & C., Effects of subglottal pressure variation on professional baritone singers' voice sources, 1999) und (Salomao & Sundberg, 2008) erwiesen.

²⁹⁰ Sundberg 1999, Högset 2001, Salomão 2008.

Festzustellen ist allerdings auch, dass die gemessenen Parameter-Werte der *voce faringea*, einer Stimmfunktion, die auf einer falsettdominanten Registereinstellung basiert, einen signifikanten Trend in Richtung jener Werte des Modalregisters aufweisen.

Werte von gering bis hoch

Pulsamplitude	<i>voce faringea</i>	Modal	Falsett
Q_{closed}	Falsett	<i>voce faringea</i>	Modal
MFDR	Falsett	<i>voce faringea</i>	Modal
NAQ	Modal	<i>voce faringea</i>	Falsett
H1-H2	Modal	<i>voce faringea</i>	Falsett
Subglottischer Druck	<i>voce faringea</i>	Falsett	Modal

Tabelle 2 Die gemessenen Parameterwerte von gering bis hoch in den Stimmregistern Modal, Falsett und *voce faringea*.

Es wurden in der *voce faringea* durchschnittlich niedrigere Werte bei Messung der Pulsamplitude, von H1-H2 und des NAQ bestimmt als im Falsett, was für einen weniger behauchten Ton mit mehr Stimmlippen-Adduktion spricht. Ein geringerer H1-H2 Wert steht typischerweise auch mit einer relativ schwächeren Grundfrequenz F_0 und einer vergrößerten Massenschwingung der Stimmlippen in Zusammenhang. Höhere Werte wurden bei der Evaluierung des Q_{closed} und der *maximum flow declination rate* nachgewiesen. Die schneller und steiler abfallende Kurve des Strömungsglottogramm-Signals bei einem hohen MFDR Wert ist charakteristisch für einen kräftigen Stimmklang mit besonders ausgeprägter hochfrequenter Energie und ein höherer Verschluss-Quotient der Glottis lässt auf eine größere Kontaktfläche der Stimmlippen und mehr Schwungmasse in der *voce faringea* als im Falsett schließen.

Die Werte aus der Messung des subglottischen Drucks in Falsett und Modalregister decken sich mit jenen anderer Studien.²⁹¹ Subglottische Luftdrücke sind im Modalregister typischerweise etwa doppelt so hoch wie im Falsett. Dokumentiert ist auch eine Korrelation zwischen steigenden Q_{closed} -Werten und subglottischen

²⁹¹ Högset 2001, Södersten et al. 1994.

Luftdruckverhältnissen.²⁹² Überraschenderweise wurden in der *voce faringea* trotz höherem Q_{closed} durchschnittlich noch niedrigere Luftdruckverhältnisse ermittelt als im Falsett. Eine Erklärung hierfür könnte eine Verstärkung der inhalatorischen Kräfte der Atmungsmuskulatur (*Appoggio in petto, la forza naturale del petto*) bei gleichzeitig erhöhter Adduktion der Stimmlippen sein. Högset und Sundberg dokumentierten bei Countertenören im Falsettregister signifikant niedrigere subglottische Drücke²⁹³ und stellten die Vermutung auf, dass dies auf die spezielle Technik von Countertenören zurückzuführen sei. Um trotz niedrigerem Atemdruck die Kontaktzeit der Stimmlippen, ähnlich wie im Modalregister zu verlängern, scheint es für die Produktion der *voce faringea* erforderlich zu sein, die Adduktion der Stimmlippen zu verstärken.

Das Langzeit-Mittelwert-Spektrum belegt einen, gegenüber dem Falsett, relativ stärkeren zweiten Formanten in der *voce faringea*. Schwächer fällt in diesem Registermechanismus jedoch der Schalldruckpegel des ersten Formanten F1 aus als im Falsett. Deutlich ausgeprägter ist in der *voce faringea* auch der Sängerformant-Cluster im Bereich zwischen etwa 2,5 und 3,3 KHz. Im Gegensatz zu den männlichen Stimmfächern ist der Sängerformant-Cluster für Frauenstimmen weniger von Bedeutung. Die dominierende Resonanzstrategie für mittlere und hohe Lagen von Sopranistinnen und Mezzosopranistinnen ist das Einstellen des ersten Formanten F1 auf die Grundfrequenz H1. Es entsteht dabei das sogenannte *whoop*²⁹⁴ oder *hoot*²⁹⁵ *timbre*. Diese Strategie wird auch von Countertenören für die Spitzentöne im Falsettregister eingesetzt.

Titze²⁹⁶ berichtete 2013, dass die Wellenform des EGG²⁹⁷ in einem Verhältnis zum Querschnitt der Stimmlippen stehe. So soll die Form der EGG-Welle annähernd dem Stimmlippen-Querschnitt entsprechen. Die *Abbildungen 34, 35 und 36* zeigen Stimmlippen-Modelle der Phonationsarten Modal, Falsett und *voce faringea*, die auf Basis der Wellenform des jeweiligen EGG-Signals erstellt

²⁹² Sundberg 1999, Högset 2001.

²⁹³ Högset 2001.

²⁹⁴ Bozeman, 2013, S. 23.

²⁹⁵ Miller D. G., *Resonance in Singing, Voice Building through Acoustic Feedback*, 2008, S. 52.

²⁹⁶ Titze, 2013.

²⁹⁷ Im Gegensatz zur Wellenform des Strömungsglottogramms stellt der Wellenkurve die Verschlussphase und das Wellental die Offenphase der Glottis dar.

wurden. Die dickere Form des für das Modalregister angenommenen Stimmlippen-Querschnitts (Abb. 37) deutet auf eine erhöhte Aktivität des *M. vocalis* (*M. thyroarytaenoideus*, TA) und eine Phonation mit größerer Schwungmasse im Modalregister als im Falsett (Abb. 38) hin. Charakteristisch für das Modalregister ist das in der Wellenform des EGG zu erkennende Knie (Abb. 34), welches den Beginn der Öffnungsbewegung des oberen Randbereichs der Stimmlippen-Mukosa darstellt.²⁹⁸ Im Unterschied zur EGG-Form des Falsetts zeigt Abbildung 36 für die *voce faringea* eine deutlich verlängerte Verschlussphase der Stimmlippen und belegt dazu eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den Wellenformen der *voce faringea* und des Modalregisters. Laut Titze²⁹⁹ entstehe ein solches charakteristisches Knie in der Wellenform typischerweise bei ausgeprägter posteriorer glottischer Adduktion und durch das Verdicken der Stimmlippenränder (*surface bulging*) im Modalregister. Das Schwingungsmuster der Stimmlippen zeige sodann eine deutliche Phasenverschiebung zwischen dem Stimmlippen-Körper und dem Stimmlippen-Cover und es komme dadurch zu einer Vergrößerung der vertikalen glottischen Kontaktfläche.

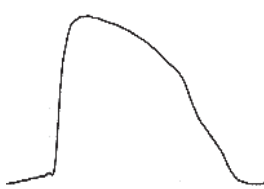


Abbildung 34 EGG Wellenform Modal.

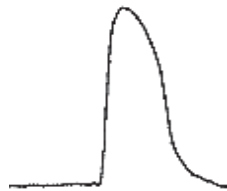


Abbildung 35 EGG Wellenform Falsett.

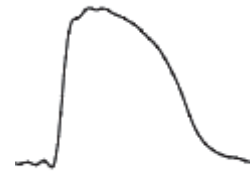


Abbildung 36 EGG Wellenform voce faringea.

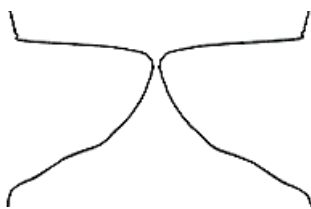


Abbildung 37 Querschnitt-Modell der Stimmlippen im Modalregister, ermittelt anhand der EGG Wellenform.



Abbildung 38 Querschnitt-Modell der Stimmlippen im Falsett, ermittelt anhand der EGG Wellenform.



Abbildung 39 Querschnitt-Modell der Stimmlippen in der voce faringea, ermittelt anhand der EGG Wellenform.

²⁹⁸ Die Wellenbewegung der mukosalen Welle startet zunächst im untersten Bereich der Schleimhautschicht und setzt sich dann nach oben fort.

²⁹⁹ Titze I. R., 1989. Titze, 1990.

Die Form des EGG-Signals der *voce faringea* (Abb. 36) weist auf eine erhöhte posteriore glottische Adduktion (Adduktion des knorpeligen und Medialisation des membranösen Bereichs der Stimmlippen) sowie eine relativ große Schwungmasse durch verstärkte Vokalis-Aktivität bei der Phonation hin. Das Knie, welches die EGG-Signale des Modalregisters und der *voce faringea* zeigen, fehlt erwartungsgemäß in der Kurvenform des Falsett-EGGs.

Die im Rahmen vorliegender Studie aus der Analyse von Klang-Samples der Stimmregister Modal, Falsett und *voce faringea* ermittelten Daten bestätigen die Annahme, dass die Parameter-Werte der *voce faringea* eine signifikante Tendenz in Richtung jener des Modalregisters zeigen würden. Fraglich ist, ob aufgrund vorliegender Daten auch Aussagen bezüglich der Perzeption der *voce faringea* gemacht werden können - ob angenommen werden kann, dass sich der Stimmklang der *voce faringea* merklich vom Klang der Falsettstimme unterscheidet und als Stimmklang mit modalerem Charakter wahrgenommen wird.

Salomão³⁰⁰ belegte in einer Studie von 2008 diesbezüglich deutliche Übereinstimmungen zwischen bestimmten Parameter-Werten der Glottisfunktion im Falsett und im Modalregister und dem Urteil einer Experten-Jury, die 52 Klangbeispiele von 13 Chorsängern als modal oder im Falsett gesungen unterscheiden sollten. Sie fand dabei die größte Korrelation zwischen Parameter-Werten und Stimmen für das Modalregister bei hohen Q_{closed} und MFDR sowie geringen H1-H2 Werten und einer kleinen Pulsamplitude.

Die im Rahmen vorliegender Studie ermittelten Werte jener für die perzeptive Unterscheidung von Modalregister und Falsett besonders aussagekräftigen Parameter (hoher Q_{closed} und MFDR, geringer H1-H2) untermauern die Annahme, dass das Stimmtimbre der *voce faringea* gegenüber dem Falsett einen deutlich modaleren Charakter aufweist.

³⁰⁰ Salomão, 2008.

3.2.5. Zusammenfassung

Klangbeispiele, von einer Testperson (dem Autor), einem professionellen Tenor und Countertenor in den Registern Modal und Falsett und *voce faringea* eingenommen, wurden für diese Studie analysiert. Folgende Methoden kamen dabei zur Anwendung:

1. Ein Strömungsglottogramm zur Untersuchung des transglottischen Luftstroms (entspricht dem von den Stimmlippen erzeugten Primärschall).
2. Ein Elektroglottogramm zur Messung der elektrischen Impedanz-Veränderungen im Kehlkopf, die im Zusammenhang mit der Kontakt- und Offenphase der Glottis stehen.
3. Die Messung des subglottischen Atemdrucks mit Hilfe eines Manometers.
4. Ein Langzeit-Mittelwert-Spektrum (LTAS) zur Bestimmung der durchschnittlichen Konzentrationen akustischer Energie im Spektrum während eines bestimmten Zeitraums.
5. Eine Analyse der Formantenstruktur der Klang-Samples.

Durch Auswertung des Strömungsglottogramms, des Elektroglottogramms und der Messung des subglottischen Luftdrucks, konnten die Werte diverser wichtiger Parameter der Glottisfunktion wie etwa der Q_{closed} , die Pulsamplitude, der NAQ, der MFDR- und H1-H2 Wert sowie der P_{sub} ermittelt werden. Die Analyse der gemessenen Daten brachten die erwarteten Ergebnisse für das Modalregister und das Falsett. Diese stellten sich als konsistent mit jenen früherer Studien heraus. Die Parameter-Werte der *voce faringea* lassen insgesamt einen deutlichen Trend in Richtung des Modalregisters erkennen. So wurden gegenüber dem Falsett in der *voce faringea* eine geringere Pulsamplitude, ein niedrigerer H1-H2 und NAQ-Wert sowie ein höherer Q_{closed} und MFDR-Wert festgestellt. Der subglottische Druck hatte in der *voce faringea* die durchschnittlich niedrigsten Werte aller drei Phonationsarten.

Die Kurvenform des Strömungsglottogramms der *voce faringea* weist eine nach oben hin spitz verlaufende Form auf. Dies lässt eine deutliche Phasenverschiebung zwischen den oberen und unteren Schichten der Stimmlippen vermuten.

Eine solche Randkantenverschiebung ist typisch für eine erhöhte Massenschwingung im Modalregister.

Langzeit-Mittelwert-Spektren der verschiedenen Stimmregister belegen auch Ähnlichkeiten in der Formantenstruktur der *voce faringea* und des Modalregisters. So etwa einen höheren und stärkeren Formanten F2 und niedrigeren und schwächeren Formanten F1. Nicht zuletzt weisen auch die Wellenformen des Strömungsglottogramms und des Elektroglottogramms der *voce faringea* und des Modalregisters signifikante Ähnlichkeiten auf.

Gemäß Salomäos Erkenntnissen bezüglich der Korrelationen zwischen Parameter-Werten des Strömungsglottogramms und EGGs und der Perzeption von modalen und im Falsett gesungenen Klängen, kann anhand der gemessenen Werte auf einen eher modalen Klangcharakter der *voce faringea* geschlossen werden.

3.2.6. Anmerkung und Danksagung

Die Untersuchungsdaten für vorliegende Studie wurden während eines Forschungsaufenthalts des Verfassers an der Königlich Technischen Hochschule in Stockholm im April 2012 erhoben. Besonderer Dank soll an dieser Stelle Prof. Dr. Johan Sundberg für die Aufnahmeleitung und die Auswertung der Messdaten sowie seine kompetente Anleitung und großzügige Hilfe bei der Interpretation der Messergebnisse ausgedrückt werden. Mein herzlicher Dank geht auch an die Leitung der künstlerischen Doktoratsschule der Kunstuniversität Graz für die Unterstützung dieser Studie.