

Methodenvergleich zur Bestimmung der glottalen Mittelachse bei
endoskopischen Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen von organisch
basierten pathologischen Stimmgebungsprozessen

*Aus der Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde,
Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie*

Der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr. med

vorgelegt von

Miguel Henrique de Jesus Goncalves

aus Coimbra

**Als Dissertation genehmigt
von der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg**

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. med. Dr. h.c. J. Schüttler

Gutachter: Prof. Dr. C. Bohr

Prof. Dr. Dr. M Döllinger

Tag der mündlichen Prüfung: **03. September 2015**

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abstract.....	3
1. Einleitung.....	5
2. Zielsetzung.....	18
3. Material und Methoden.....	19
4. Ergebnisse.....	35
5. Diskussion.....	56
6. Fazit.....	65
7. Literaturverzeichnis.....	66
8. Anhang.....	68
9. Danksagung.....	70
10. Lebenslauf.....	71
11. Erklärung der Eigenständigen Arbeit.....	73

Zusammenfassung

Eine gesunde Stimme ist unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass die Stimmlippenschwingungen regelmäßig (periodisch) als auch symmetrisch zueinander sind. Diverse Faktoren können diese Regelmäßigkeit beeinträchtigen mit dem daraus resultierenden Leitsymptom „Heiserkeit“. Entsprechend den Empfehlungen der European Laryngological Society (ELS) werden Stimmstörungen nach mehreren Kriterien untersucht. Eine der Säule dieser Auswertung ist die Schwingungsanalyse mittels Videoendoskopie in Kombination mit der Stroboskopie. Hierbei entstehen jedoch Darstellungsfehler der laryngealen Schleimhautbewegung. Dies reduziert die diagnostische Wertigkeit und somit die klinische Anwendbarkeit der subjektiv erhobenen Ergebnisse erheblich. Eine exakte Darstellung der Schwingungsvorgänge der Stimmlippen (80-240 Hz) kann bisher nur mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahme erreicht werden.

In der Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie wurde ein Bildverarbeitungsprogramm (GAT v15.2.1) entwickelt, das die schwingenden Strukturen in den Bildserien semi-automatisch identifiziert und objektive Parameter für die zeitlich veränderlichen Struktur (d.h. Glottis) berechnet. Die Bestimmung der glottalen Mittelachse ist hierbei besonders wichtig, da über diese dynamische links-rechts Asymmetrien bestimmt und berechnet werden.

Ziel dieser Arbeit war die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Glottismittelachse bei der Phonation bei Patienten mit organisch basierten Pathologien (Reinke-Ödem, Polypen, Kontaktgranulome, Stimmlippenzysten) zu vergleichen. Die zwölf unterschiedlichen Methoden unterlagen zunächst einer subjektiven Bewertung und anhand dessen, wurden bei den besten Methoden objektive Parameter berechnet.

Die Hochgeschwindigkeitsvideos wurden mit der Wolf Highspeed Endocam 5542 angefertigt. Diese Kamera ermöglicht die Aufnahme von 4000 Bilder/s bei einer räumlichen Auflösung von 256x256 Pixeln. Die hier verwendete Version der Kamera erzeugt digitale „Schwarzweißbilder“, genauer 8-bit-Graustufenbilder, also 256 Helligkeitsstufen für jeden Bildpunkt.

Von den zwölf Methoden, die das Programm Glottis Analysis Tools (GAT) imstande zu generieren ist, waren die Methoden B1, B2 und B3 die geeignetsten Methoden. Die Berechnung der Parameter bestätigte die visuelle subjektive Beurteilung der Methoden. Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic

Range Symmetry Index und WaveformSymmetry Index nähern sich dem Wert 1 (eins) in alle Gruppen an. Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry und Spatial Symmetry Index nähern sich dem Wert 0 (null) an. Diese sind die erwarteten Werte bei einer symmetrischen Bewegung der Stimmlippen.

Es wurden neue Erkenntnisse im Bereich der objektiven (semi-)automatisch Beurteilung der pathologisch veränderten Stimmlippen und der Stimme gesammelt. Diese Erkenntnisse bringen uns einen Schritt weiter an das langfristige Ziel, die Stroboskopie im ELS-Protokoll durch die Hochgeschwindigkeitsbildgebung zu ersetzen.

Abstract

A healthy voice is among other aspects characterized by regular (periodic) symmetrical vibrations of the vocal cords. Various factors may affect this regularity with the resulting symptom "hoarseness". As recommended by the European Society Laryngological (ELS), disorders of the voice are analyzed according to several criteria. A pillar of this evaluation is the analysis of the vocal cord vibration by video endoscopy in combination with stroboscopy. However, the movement of the laryngeal mucosa may cause some diagnostic difficulties by virtue of an incomplete characterization of the vibrations. This reduces considerably the diagnostic value and therefore the clinical applicability of the results subjectively acquired. An exact representation of the oscillation processes of the vocal folds (80-240 Hz) can only be achieved by means of high-speed recording. In the department of Phoniatics and Pediatric Audiology an image processing program (GAT v15.2.1) was developed that semi-automatically identifies the vibrating structures in the image series and calculates objective parameters for the time-varying structure (i.e. glottis). The determination of the glottal central axis is particularly important as it has a decisive influence on the computation of the left-right asymmetry. The aim of this study was to compare the different methods for determining the central glottis axis during Phonation in patients with organically based pathological disorders of the vocal cords (Reinke's edema, polyps, contact granuloma, vocal cord cysts). The twelve different methods were subject first to a subjective evaluation by which, in the best methods, posteriorly the objective parameters were calculated. The high-speed videos were made with the Wolf Highspeed Endocam 5542. This camera allows to record 4000 frames / s with a spatial resolution of 256x256 pixels. The version of the camera generates digital "black and white images", more precisely 8-bit grayscale images, so that 256 levels of brightness for each pixel are possible. Among the twelve methods, that the software program Glottis Analysis Tools (GAT) is able to generate, were methods B1, B2 and B3 identified as being the most suitable to calculate the middle axis of the glottis. The calculation of the parameters confirmed the visual assessment of the methods. Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic Range Symmetry Index and WaveformSymmetry Index approached the value of 1 (one) in all groups. Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry and Spatial Symmetry Index to sew at a value of 0 (zero). These values correspond to a symmetrical movement of the vocal cords during phonation. New insights in the field of objective (semi-)automatically analysis of pathologically altered

vocal cords and the voice were collected. These findings bring us one step closer to the long-term goal to replace stroboscopy in ELS protocol by the imaging based on High Speed Camera.

1. Einleitung

Die Stimmerzeugung ist ein hochkomplexer Vorgang, der das koordinierte Zusammenwirken von verschiedenen Strukturen im Körper benötigt. Der Atemtrakt unterhalb des Kehlkopfes erzeugt einen kontrollierten Luftstrom, der die einander angenäherten Stimmlippen in Schwingungen versetzt. Die subglottischen und glottischen Räume können wie ein sich nach oben verengendes Rohr betrachtet werden, das die Fließgeschwindigkeit von der austretenden Luft erhöht. Der Atemtrakt unterhalb der Stimmlippen funktioniert somit wie eine Düse. Eigenschaften von dieser biologische Düse sind: der Querschnitt der Öffnung (Stimmritze) ist zeitvariabler und deren Wand (Stimmlippen, Conus elasticus) ist elastisch und verformbar. Nur wenn der Strömungsdruck und Wandelastizität ein gewisses dynamisches Gleichgewicht erreichen, kann die Schallentstehung erfolgen (myoelastische Schwingung) (Van den Berg, 1958 zitiert nach Eysholdt, 2014). Das dynamische Gleichgewicht wird durch den subglottischen Druck und die anisotrope Viskoelastizität der verschiedenen Schichten, die die Stimmlippen zusammensetzen, bestimmt. Diese beiden Faktoren müssen ungefähr gleich sein (Van den Berg 1958, zitiert nach Eysholdt, 2014).

Die an der Ebene der Glottis zusammengedrückte Luftströmung versetzt die elastischen Stimmlippen in Schwingungen. Durch deren Vibrieren wird die Luftströmung unterbrochen und in supraglottische Luftpulse zerlegt (Eysholdt, 2014). Die Pulse werden 80-240 mal pro Sekunde infolge dieses Wechseldruckspieles generiert und verursachen den so genannten volumengepulsten Schall – der wichtigste physische Mechanismus für die Schallentstehung. Für das primäre Stimmsignal tragen auch dazu bei, wenn auch in weniger markanter Weise und ohne signifikante klinische Relevanz, der vibrationsinduzierte Schall und der wirbelinduzierte Schall. Der vibrationsinduzierte Schall nimmt Bezug auf den Schall, den durch die schwingenden Stimmlippen selbst verursacht wird. Der wirbelinduzierte Schall, auch als Rauschkomponente bezeichnet, entsteht am Schleimhautrand.

Somit entsteht ein Grundton, auch primäres Stimmsignal genannt. Die Stimmlippenschwingung ist eine komplizierte dreidimensionale Bewegung, bestehend aus der sogenannten Grundbewegung und der Randkantenverschiebung. Die Grundbewegung entsteht durch die mediolaterale Schwingung von Musculus vocalis und Ligamentum vocale. In gehaltener Phonation entsteht, zusätzlich zu der Grundbewegung, eine

Oberflächenwelle der Schleimhaut, die auch Randkantenverschiebung genannt wird. Die Randkantenverschiebung beruht auf der Verschieblichkeit der oberflächlichen Schleimhaut (Epithel und Reinke-Raum), die die Stimmlippen auskleidet. Nachdem das primäre Stimmsignal in den Resonanzräumen von Rachenraum, Mundhöhle, Nase und Nasennebenhöhlen verformt und unter Mitwirkung von Zunge und Gaumen modifiziert wurde, wird es als komplexer Stimmschall von der Mundöffnung abgestrahlt. Die menschliche Stimme erhält so oberhalb der Glottis ihren Klangfarbe und Timbre.

Eine gesunde Stimme ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stimmlippenschwingungen sowohl regelmäßig (periodisch) als auch symmetrisch zueinander sind (Hoppe, 2001). Faktoren wie unterschiedliche Massen der Stimmlippen, Muskelspannungen oder Veränderungen des Gewebes können diese Regelmäßigkeit des Vibrierens beeinträchtigen. Das daraus resultierende Leitsymptom wird allgemein als „Heiserkeit“ bezeichnet. Entsprechend den in 2001 publizierten Empfehlungen der European Laryngological Society (ELS), werden in der Untersuchung von Stimmstörungen mehreren Faktoren berücksichtigt. Die Selbstbewertung der Stimme, die Fremdbewertung durch den Arzt (entsprechend der RBH-Kategorisierung (Nawka et al., 1994 zitiert nach Eysholdt, 2014), die Akustik oder Stimmanalyse, die Aerodynamik und die Schwingungsanalyse sind die mitbeurteilten Parametern (Eysholdt, 2014).

Die Beurteilung der in gehaltener Phonation schwingenden Stimmlippen erfordert spezielle Methoden, weil die zeitliche Auflösung des menschlichen Auges zu träge ist, bei einer Frequenz der Stimmlippenschwingung von 80-240 Hz (Lohscheller et al., 2008) kleinste Unregelmäßigkeiten der Bewegungen präzise zu erkennen und mit diagnostischem Wert beurteilen zu können. Das menschliche Auge kann Bewegungen schneller als 16/s nicht auflösen. Die heutzutage am häufigsten benutzte Methode zur Beurteilung der Stimmlippenschwingung ist die Stroboskopie. Dies entspricht dem ELS-Protokoll. Obwohl diese Methode wahrscheinlich in den nächsten 10-20 Jahren der Gold Standard bleiben wird (Gloger et al., 2014), ist deren klinischen Wert durch mehreren Faktoren stark begrenzt. Die Daten, die mit dem Stroboskop erhoben werden, sind stark von der Erfahrung des Untersuchers abhängig und die Interpretation enttäuscht bei irregulären, aperiodischen Schwingungen der Stimmlippen, da die schnellen Oszillationen nicht korrekt erfasst werden können. Um diese Aussage, mit zentraler Bedeutung zu verstehen, muss das Prinzip der Laryngo-Stroboskopie erläutert werden (Schüssler und Bonkowsky, 2009).

Bei der Stroboskopie wird der Grundton des Kehlkopfes, der normalerweise zwischen 80 und 240 Hz variiert, mittels eines Mikrofons in Kehlkopfnähe ermittelt. Durch einen Xenonlichtgenerator werden Lichtblitze erzeugt, die die Stimmlippen beleuchten und schwingungssynchron mit dem zuvor ermittelten Grundton sein sollten. Wenn die Frequenz der Lichtblitze und die Schwingungsfrequenz der Stimmlippen identisch ausfallen, entsteht für das Auge den Eindruck eines stehenden Bildes. Das beruht auf der Tatsache, dass die Lichtblitze den Schwingungsvorgang immer in der gleichen Phase treffen. Voraussetzung hierfür sind regulär schwingenden Stimmlippen, das heißt, mit gleicher Periode in aufeinander folgenden Zyklen. Wenn die Schwingungen regulär sind und die Frequenz der Lichtblitze sich nur geringfügig von der Frequenz des Grundtons unterscheidet, entsteht für das menschliche Auge den Eindruck eines Zeitlupenbildes. Dabei handelt es um eine optische Täuschung, weil jedes unterschiedliche Bild einem anderen Schwingungsvorgang angehört (Schüssler und Bonkowsky, 2009). Der erfahrene Untersucher ist dann in der Lage, aus einer stroboskopischen Untersuchung den Muskulären Tonus und die Symmetrie der Stimmlippen abzuschätzen. Er kann sogar den Verdacht auf irreguläre Schwingungen der Stimmlippen äußern aber eine genaue Beobachtung, Messung oder gar eine Klassifizierung dieser Unregelmäßigkeiten ist mittels Stroboskopie nicht möglich. Um diese diagnostische Lücke zu schließen wurden Hochgeschwindigkeitskameras entwickelt, die mit sehr hoher Bildfolge rate (bis zu 10 000/s) die Beobachtung der Stimmlippenschwingungen in Echtzeit ermöglichen. Mittels digitale Hochgeschwindigkeits (HG)-Videokameras lassen sich irreguläre Schwingungen einer visuellen Bewertung unterziehen, aber auch hier unterliegen die Ergebnisse aufgrund der subjektiven Natur der Bewertung einer großen interindividuellen Variabilität (Olthoff et al., 2007). Die technologischen Vorteile, welche die HG-Laryngoskopie gegenüber der Stroboskopie besitzt, werden bei dieser Form der Datenauswertung nicht hinreichend genutzt und gehen in einigen Fällen sogar ganz verloren (Dejonckere et al., 2001, Friedrich und Dejonckere, 2005)

Die größten Nachteile von den Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen sind der Zeitaufwand, der mit der Auswertung von den Videos verbunden ist (ungefähr 3 Minuten Betrachtungsdauer bei einer zwei sekundigen Aufnahme), und die schwierige perzeptive Klassifikation von Bewegungen (Eysholdt und Loscheller, 2008). Aufgrund dessen und der relativ hohen Anschaffungskosten wird in ihrer jetzigen Form die Auswertung von HG-Aufnahmen derzeit nur in spezialisierten Zentren eingesetzt (Schade und Müller, 2005). Dort wird sie zur ergänzenden Darstellung von Pathologien der Stimme oder im Rahmen

von speziellen Fragestellungen zur Untersuchung von Stimmlippenbewegungen bei professionellen Sängern herangezogen (Havla et al., 2009, Richter et al., 2005).

Bei der Auswertung von den als Ursache der Heiserkeit anzusehenden irregulären Schwingungen der Stimmlippen hat sich als zweckmäßig und nützlich erwiesen, die gesamte Summe von Schwingungsvorgängen der Aufnahme, in ein einzelnes Bild (z.B. Phonovibrogramm) zu konvertieren (Neubauer et al., 2001).

Der Phonovibrogramm soll die Stimmlippendynamik in einem Bild darstellen und somit das Problem der schwierigen perceptiven Klassifikation von Bewegung, die mit den HG-Aufnahmen verbunden ist, vorbeugen. Bei diesem Verfahren wird die Datenmenge einer HG-Aufnahme vereinfacht und nur auf die Bewegungsinformation reduziert. Farbe, Kontrast, Textur des Gewebes und Form gehen dabei selbstverständlich verloren. Dies kann nicht als Nachteil gesehen werden, da diese Informationen der konventionellen Videoendoskopie oder einem einzigen stehenden Bild einer HG-Aufnahme leicht zu entnehmen sind (Eysholdt, 2014). Der Begriff Phonovibrogramm ist Grundvoraussetzung, um diese Arbeit verstehen zu können. Aus diesem Grund, wird in den nächsten Abschnitten ausführlich dargelegt wie ein Phonovibrogramm definiert und wie es aus einem HG-Film extrahiert, verarbeitet und interpretiert wird. Lohscheller et al haben diesen Prozess in früheren Arbeiten detailliert und umfänglich beschrieben (Eysholdt und Lohscheller, 2008, Lohscheller et al., 2008, Lohscheller et al., 2007).

Ein HG-Video ist eine Folge von zweidimensionalen Bildern, von denen ein Einzelnes in (Abb. 1) gezeigt wird.

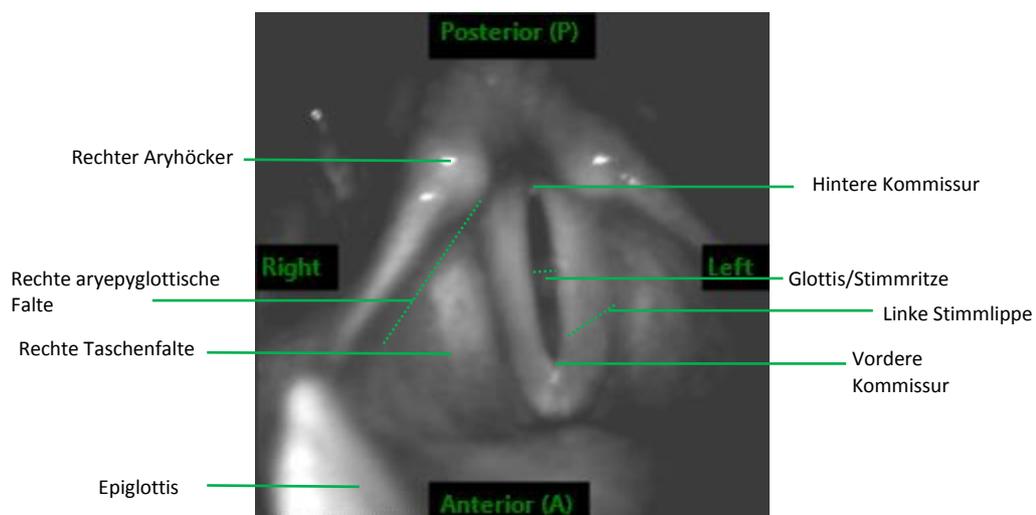


Abb. 1 – Einzelner Frame einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme

Die Glottis wird vom erfahrenen Untersucher als schwarzes/graues Schlitz sofort identifiziert. Die Begrenzung machen lateral die Stimmlippen, posterior die Aryhöcker. Der Begriff Segmentierung, der fortan regelmäßig benutzt wird, nimmt Bezug auf der Unterscheidung von Gebieten mit unterschiedlichen Eigenschaften – in diesem Fall Graustufen. Diese Arbeit berührt auf dem Software Programm, Glottis Analysis Tools (GAT), das nach mehreren Entwicklungsstadien fast klinikreife erlangt hat und in der Lage ist die Segmentierung der Glottis zu ermöglichen. Die Segmentierung der Glottis benutzt die Methode der wachsenden Fläche (region growing procedure) und erlaubt Rückschlüsse über die Stimmlippenschwingungen (Abb. 2).

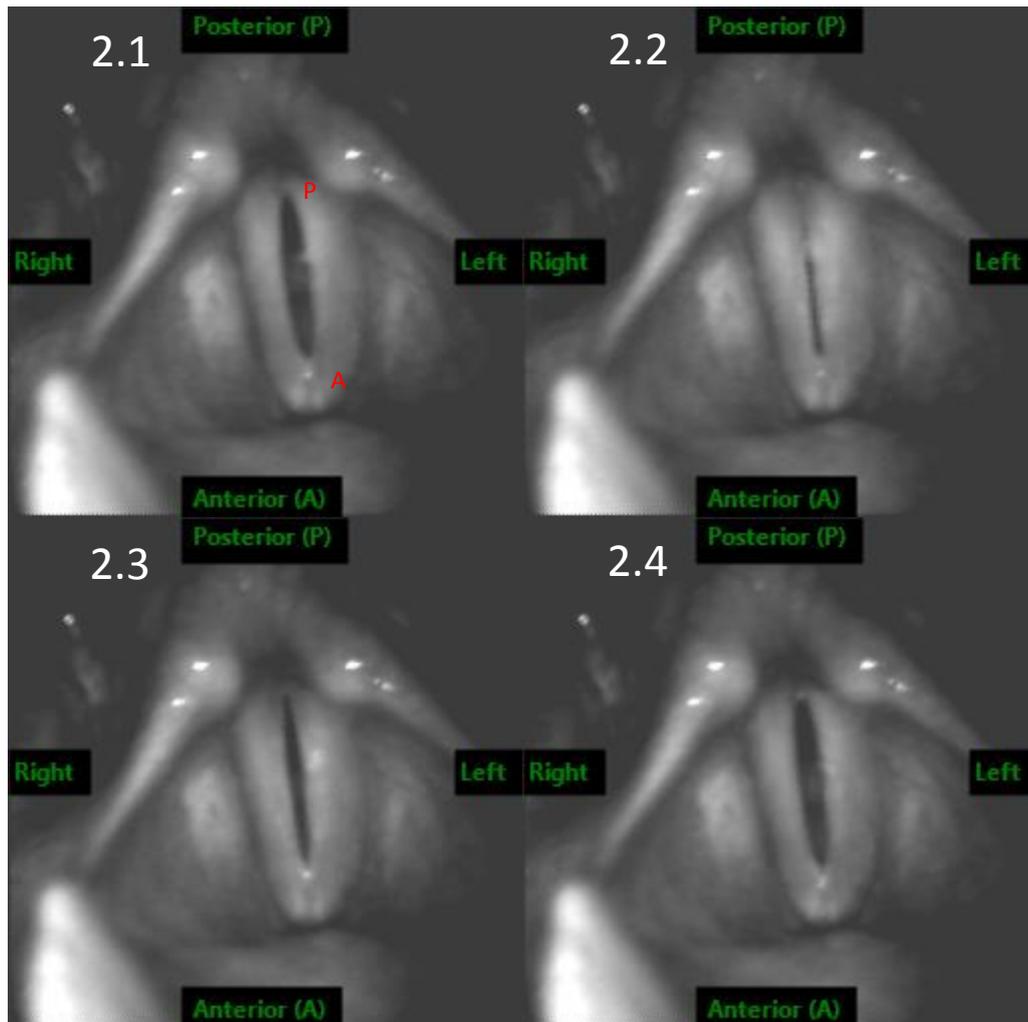


Abb. 2 – Bild eines Stimmlippenzyklus. Die Stimmlippen stehen in allen vier Bildern in Phonationsstellung. Bei der Phonation werden die Stimmlippen in Schwingungen versetzt. Die Grundbewegung (mediolaterale Schwingung) der Stimmlippen ist hier gut zu beurteilen. Die schwarzen Schlitz, deren Areal sich verändert, ist die Glottis Spalte. Diese wird vom Computerprogramm GAT erkannt (Segmentiert). Diese Oberfläche wächst vom Bild zu Bild (1.2.-1.4). Das Bild 1.1 entspricht dem maximalen Areal bevor sich diese Oberfläche verkleinert. Dieser Vorgang wiederholt sich 80-240 mal pro Sekunde. „A“ Entspricht der vorderen Kommissur, „P“ der hinteren Kommissur.

Die Verbindungslinie zwischen vorderen und hinteren Kommissur ist die Glottishauptachse (Mittelachse). Der mediale Rand der rechten und der linken Stimmlippe begrenzt die Glottis (Abb. 3).

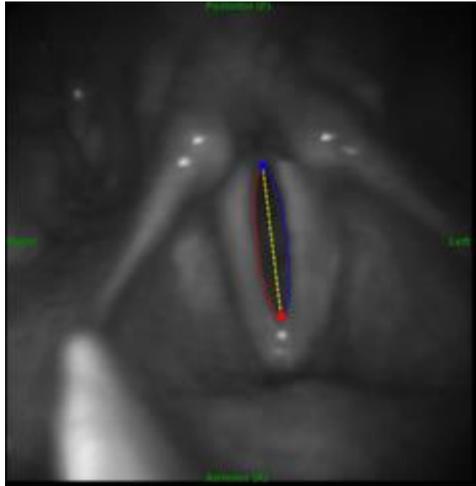


Abb. 3 – Im Bild A sieht man die Mittelachse als Verbindungslinie (gelb gestrichen) zwischen vorderer und hinterer Kommissur. Der mediale Rand der linken Stimmlippe ist als blaue Linie dargestellt. Der mediale Rand der rechten Stimmlippe als rote Linie dargestellt. Später wird die mediolaterale Position beider Stimmlippen relativ zu der Mittelachse berechnet.

Nachdem die Bildfolge, aus der die HG-Aufnahme besteht, segmentiert wurde (das heißt, nachdem die wandelnde schwarze Fläche, die die Stimmritze definiert, markiert und deutlich von den anderen Gebiete unterschieden wurde), wird der Abstand des freien Stimmlippenrandes aus jedem Einzelbild relativ zur Mittelachse berechnet und dieser Information in ein einziges Bild konvertiert – das Phonovibrogramm (Abb. 4).

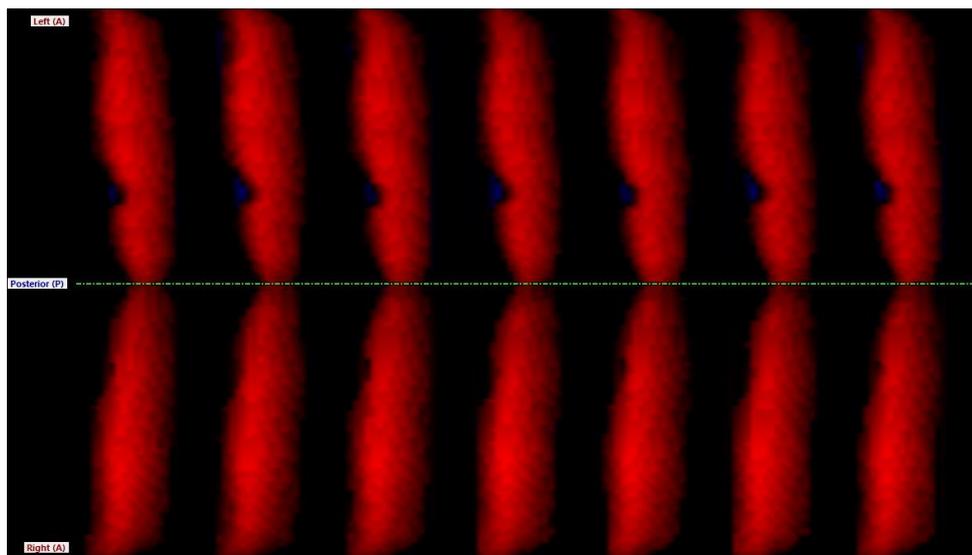


Abb. 4 – Phonovibrogramm von sieben Schwingungszyklen. Auf die Herstellung eines solches Bildes wird ausführlich in den nächsten Abschnitten eingegangen.

Durch diese Methode werden nur die Stimmlippenbewegungen berücksichtigt und alle anderen Bildinformationen ausgeblendet. In Abbildung 5 wird in Form von kleinen Pfeilen eingezeichnet, wie weit jeder Punkt des medialen Stimmlippenrandes von der Glottismittelachse entfernt ist.

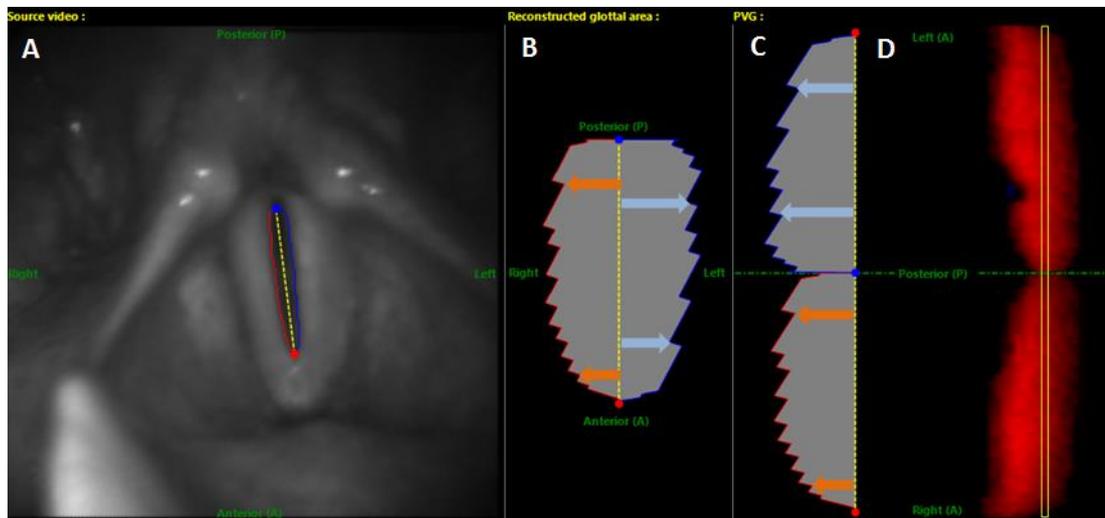


Abb. 5 – A: Die Glottis nimmt die Form eines Schlitzes an. Diese Spalte ist enger in der Nähe sowohl der vorderen als auch der hinteren Kommissur und hat ihre breiteste Stelle ungefähr in der Mitte. Der Bereich zwischen den beiden Stimmlippen wird durch das GAT Programm rekonstruiert, wobei die Abstände von beiden Stimmlippen zur Mittelachse beibehalten werden und vom Bild A ins Bild B übertragen werden. Die Abstände von einigen Punkten der Stimmlippenränder werden exemplarisch in Form von Pfeilen dargestellt. (Orange für die Abständen zwischen Mittelachse und medialen rechten Stimmlippenrand und himmelblau für die Abstände zwischen Mittelachse und medialen linken Stimmlippenrand). Im Bild C wird die Kontur der Glottis entlang der Mittelachse um 180 Grad aufgeklappt. Die hintere Kommissur liegt jetzt in der Mitte, oben und unten die vorderen Kommissur. Die zuvor berechneten Abstände bleiben weiterhin als Pfeile dargestellt. Der Computer berechnet für jeden Pixel diesen Abstand. Im Bild D wurden die Abstände zur Mittelachse in Farbpunkte konvertiert und zwar in der Farbe Rot (Abstand zur Mittelachse Positive) und Blau (seltener Fall, bei der Stimmlippen über die Mittellinie hinaus schwingen). Der Frame in A, B und C dargestellt entspricht ausschließlich den roten Punkten innerhalb des gelben durchgezogenen Rahmens (von oben bis unten). Die vertikalen Ansammlungen von Punkten vor und hinter dem gelben Rahmen entsprechen den nächsten bzw. vorausgegangenen Frames der Bildfolge, die die Hochgeschwindigkeitsaufnahme zusammenfasst. Zur Verdeutlichung wird in der nächsten Abbildung (Abb. 6) ein vorausgegangener Frame gezeigt.

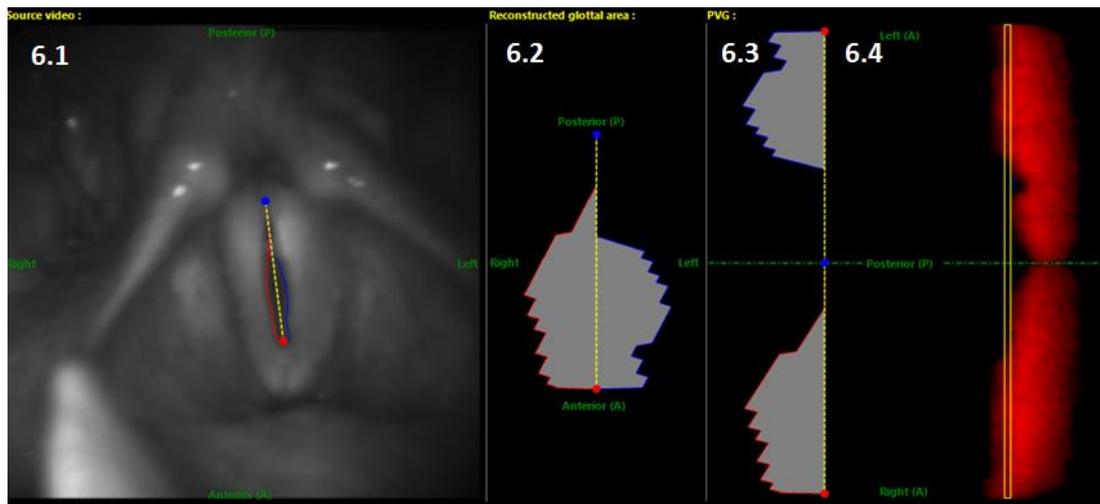


Abb. 6 – Vorhergehender Frame. Neben der hinteren Kommissur ist die Glottis noch sehr eng. Dies wird im Bild B und C noch deutlicher dargestellt. Im gelben Rahmen auf dem Bild D wird dieser Bereich schwarz dargestellt.

Im gezeigten Beispiel nimmt die Glottis die Form eines Schlitzes an. Die Öffnung verjüngt sich Richtung Kommissura posterior mit dem größten Durchmesser im mittleren Bereich. Die Öffnungsweite der Glottis wird an jeder Stelle gemessen. Die Kontur der Stimmritze (Blau links, rot rechts) wird entlang der Mittelachse um 180 Grad „aufgeklappt“ (Abb. 6.3), sodass jetzt das Glottisbild doppelt so lang ist und in der Mitte der hintere Kommissur (posterior Point) steht. Die zuvor berechneten Abstände zu der Mittelachse werden weiterhin als Pfeile eingezeichnet und bleiben numerisch die Gleiche. Diese Abstände werden dann von der Pfeillänge in Farbpunkte konvertiert. In roter Farbe, je heller desto größer der Abstand der infrage kommenden Randpunkt zur Mittelachse. Schwarz bedeutet, dass der Randpunkt die Mittelachse berührt und blau bedeutet, dass der mediale Rand der Stimmlippe über die Mittellinie hinausgeht. Diese Berechnung reduziert ein einzelnes endoskopisches Bild auf eine Spalte von Farbpunkten (Abb. 6.4). In Abbildung 4 wird ein Beispiel eines PVG mit sieben Zyklen gezeigt. Eine Spalte von Farbfeldern wird bei einer Framerate von 4000 Bilder/s alle $25\mu\text{s}$ generiert. Zeichnet man jede neue Farbspalte rechts neben die Vorhergehende, so entsteht ein zweidimensionales Bild mit bis zu 4000 aufeinander folgenden Farbspalten pro Sekunde – das PVG. Die horizontale Achse des Bildes entspricht dem Zeitverlauf und dem Bild ist einfach zu entnehmen, wie sich der Abstand jeder Stimmlippe von der Mittelachse der Glottis über die Zeit ändert. Die

Bewegungssymmetrie lässt sich durch Gegenüberstellung der linken und rechten Seite beurteilen.

Symmetrie und Regularität (Periodizität) sind wichtige Kriterien bei der Beurteilung von funktionellen Dysphonien. Diese sind auch die Eigenschaften, die bei der Stroboskopie mituntersucht sind. Der Vorteil dieser Methode (PVG) gegenüber der Stroboskopie ist, dass beim PVG alle Bewegungen in einem einzigen Bild dargestellt werden und bei der Stroboskopie diese Bewegungen zum einen nicht als Ganzes erfasst sind (es handelt sich um eine optische Täuschung einer Bewegung in Zeitluppe) und zum anderen bleiben diese Bewegungen des Stimmlippenrandes als Videoaufnahme gespeichert und somit entziehen sich einem **praktikablem** Objektivierungsprozess.

Der nächste Schritt wäre diese komplexen Bilder (PVG) mithilfe von Computern analysieren und klassifizieren zu lassen. Im Labor, unter experimentelle Bedingungen werden an die 300 Eigenschaften aus einem einzelnen PVG extrahiert und bewertet. Rechnergestützt werden Muster erkannt und die Grundlagen für eine automatische Klassifizierung von funktionellen Dysphonien gelegt. Diese Methoden haben jedoch noch nicht die klinische Reife erlangt. Somit bleibt, wie schon oben geschrieben wurde, die Stroboskopie für die nächsten Jahre der Goldstandard.

Von zentraler Bedeutung bei der Beurteilung der segmentierten Region ist zu wissen, wo die Mittelachse liegt. Die Mittelachse ist eine Verbindungslinie zwischen vordere und hintere Kommissur. Bisher wurde die vordere Kommissur mit dem niedrigsten Punkt des schwarzen Dreiecks (oder der schwarze Schlitze) auf dem Bild gleichgestellt und die hintere Kommissur als der höchste Punkte. Dies bringt unbefriedigende Resultate hervor, wenn zum Beispiel die Glottis schräg im Bild steht oder wenn ein Teil der Glottis nicht erfasst wurde.

Ein Verbesserungspotenzial bei der Analyse der Stimmlippenbewegung mittels Hochgeschwindigkeitskamera besteht darin, die Erfassung der Glottismittelachse unabhängig von der räumlichen Orientierung der Glottis in dem Bild zu machen. Dies kann mittels Multivariate Statistik Methoden, nämlich die Hauptkomponentenanalyse (- HKA - auch als Hauptachsentransformation oder Singulärwertzerlegung) erreicht werden (Abb. 7).

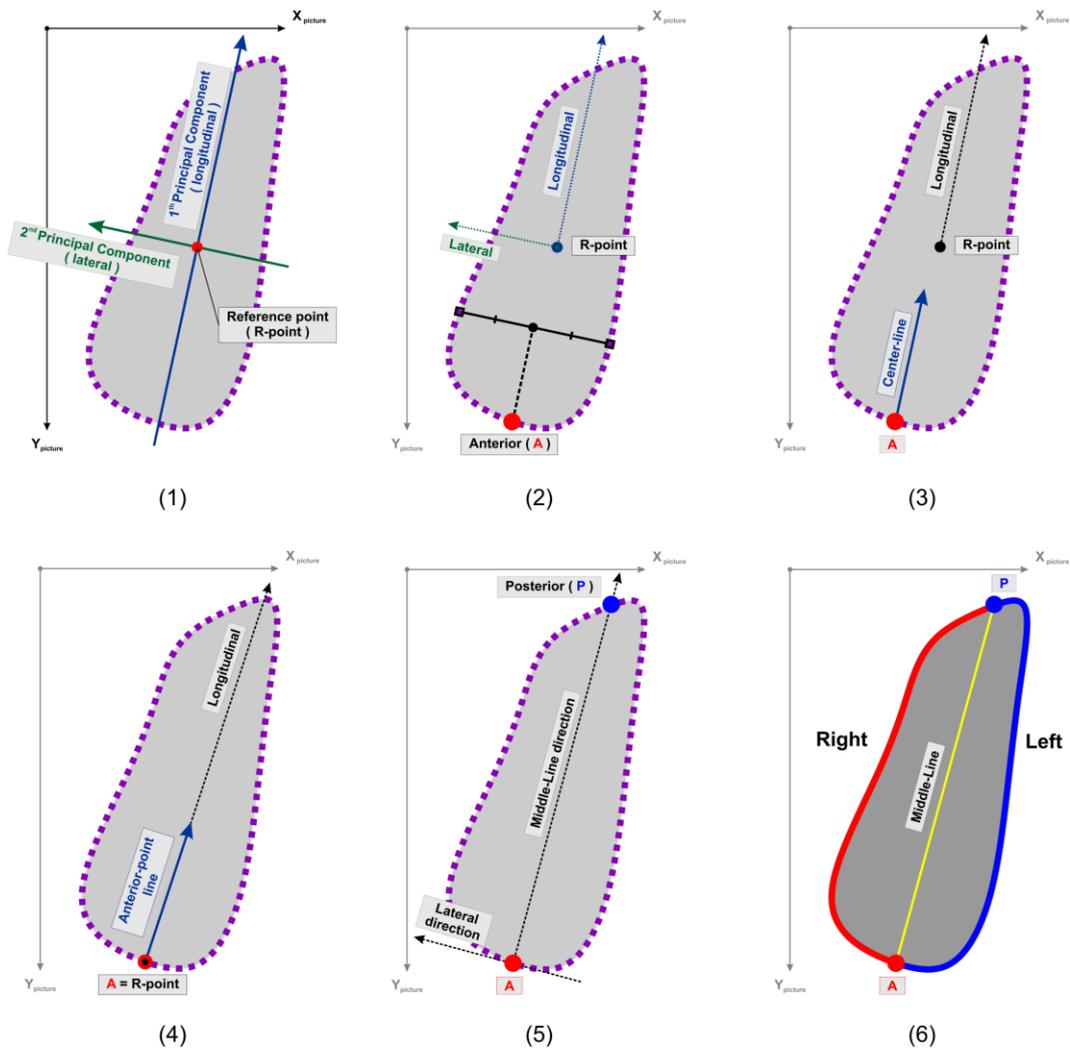


Abb. 7 – 1: Erste Hauptkomponente längsgerichtet (First Principal Component), Zweite Hauptkomponente quergerichtet (Second Principal Component). 2 – Berechnung des Anteriorpunktes nach dem Prinzip von „2nd Principal Component“ im Text erläutert (Abbildung vom Glottis Analysis Tools – User Guide).

Die Punkte, die die Kontur der segmentierten Glottis ausmachen, bilden ein zwei-dimensionales Bild, das durch zwei Hauptrichtungen beschrieben werden kann. Die größte Komponente oder Achse entspricht der Längsrichtung und die kürzeste Komponente entspricht der Querrichtung der Stimmritze. Die zwei vorherbeschriebenen Geraden sind rechtwinklig zueinander.

Dieses Verfahren ist eine Koordinatentransformationsmethode und der Ursprung der beiden Hauptkomponenten kann als Bezugspunkt verwendet werden.

Diese Tatsachen werden für die dynamische Berechnung der Mittellinie und der vorderen (anterior) Punkte in segmentierten Stimmritzen benutzt. Zur Mittelachsenbestimmung muss sowohl der Anteriorpunkt als auch die dazu passende Mittellinie berechnet werden. Verfügbar im Software Programm Glottis Analysis Tools (GAT) sind drei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung des anterioren Punktes sowie vier unabhängig unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Mittellinie. Insgesamt ergeben sich zwölf (drei mal vier) Methoden zur Mittelachsenbestimmung der Glottis. Im nächsten Abschnitt wird kurz darauf eingegangen, wie die unterschiedlichen anterioren Punkte und Mittellinienbestimmungsmethoden berechnet werden.

Anteriorpunkt

- **Lowest point:** der anteriore Punkt entspricht dem niedrigsten Punkt in der segmentierten Glottiskontur.
- **2nd Principal component:** Die Mitte der größten zweiten Hauptkomponente, d.h. die Mitte dessen Querschnitt am breitesten ist, wird bestimmt – Punkt P. Entlang der Längsrichtung wird dieser Punkt P auf den anterioren Bereich der Kontur projiziert (Abb. 7.2) Die Hauptkomponenten (erste und zweite) werden wie vorher beschrieben berechnet.
- **„Lower – Region „10 pixel“** – Hier wird zuerst die zweite Komponente genommen, die genau 10 Pixel über dem niedrigsten Punkt (Lowest Point) liegt – Punkt L. Entlang der Längsrichtung wird dieser Punkt L auf den anterioren Bereich der Kontur projiziert.

Mittellinie

- **Centroid-based (C):** Die Richtung der Mittellinie ist bestimmt als die erste Hauptkomponente (Längskomponente) mit Bezug auf den Medianpunkt der segmentierten Glottis als Referenzpunkt (Bild 3)
- **Anterior-based (A):** Die Richtung der Mittellinie ist bestimmt als die erste Hauptkomponente (Längskomponente) mit Bezug auf den ausgewählten anterioren Punkt als Referenzpunkt (Bild 4)
- **Average of (A) und (C):** Die Richtung der Mittellinie ist bestimmt als der Mittelwert zwischen der Richtung der Centroid-Based (C) und Anterior-based(A) wie oben beschrieben.

- **Anterior-Posterior Line (A-P):** Die Mittellinie entspricht einer Verbindungslinie zwischen vorderen und hinteren Kommissur (anterior und posteriorer Punkt)

Posteriorpunkt

Der Posteriorpunkt ist der Schnittpunkt zwischen der ausgewählten Mittellinie, deren Ursprung der Anteriorpunkt einnimmt, und die hintere Kontur der segmentierten Glottis/Region. Falls es keine Schnittpunkte zwischen hinterer Kontur und Mittellinie gibt, dann wird die Mittellinie entlang der lateralen Richtung projiziert.

In den letzten Jahren wurden in der Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie des Universitätsklinikum Erlangen hunderte HG-Aufnahmen erstellt. Diese beinhalten gesunde und pathologische Stimmgebungsprozesse (organisch basiert, Paresen, funktionelle Dysphonien).

2. Zielsetzung

Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit den Aufnahmen von Patienten, bei denen die Diagnose eines organisch basierten Stimmgebungsprozess gestellt wurde, nämlich bei **Stimmlippenpolypen, Zysten, Kontaktgranulomen** und **Reinke-Ödem**. Diese sind Diagnosen, die ohne Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gestellt werden können. Es geht darum, die Robustheit des Algorithmus der Mittelachsenbestimmungsmethode trotz grober Veränderungen in der Kontur der Glottis zu erforschen. Bei Vorhandensein der obengenannten Raumforderungen, die sich in die Stimmritze vorwölben, kann die Glottis nicht mehr die Form eines perfekten Dreiecks einnehmen. Eine Methode die konstant subjektiv als „gut“ Bewertet wird, unabhängig ob Stimmpolypen rechts, Reinke-Ödem beidseits oder Stimmlippenzyste links vorhanden sind, würde als ein besonders stabile Methode gelten und ein wichtiger Schritt Richtung Automatisierung des sehr zeitaufwendigen Prozesses der Segmentierung und Erstellung von PVGs sein. In dieser Arbeit wird untersucht, ob solche Methode unter den zwölf verschiedenen Möglichkeiten, die das Programm GAT zu bieten hat, ist oder sich diesen Voraussetzungen annähert. Jede unterschiedliche Methode wird für jede HG-Aufnahme berechnet und subjektiv bewertet, d.h., sie unterliegen der klinischen Beurteilung und werden dann Benotet. In wie fern die Mittelachse zuverlässig und reproduzierbar berechnet wird, wird hier analysiert. Verschiedene Schwingungsparametern werden auch berechnet und verglichen, nämlich **Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic Range Symmetry Index, Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry, Spatial Symmetry Index** und **Waveform Symmetry Index**. Diese sind die Methoden, bei denen die Position der Mittelachse eine wichtige Bedeutung hat.

Die vielversprechendsten Methoden werden in künftigen Arbeiten weiterentwickelt werden. Das Ziel ist mittelfristig einen automatisierten Prozess zu haben, fähig die Segmentierung durchzuführen sowie die Mittelachse der Glottis realitätstreu zu berechnen ohne Intervention der Kliniker/Techniker. Die so in großen Zahlen generierten PVGs könnten rechnergestützt analysiert und anhand Eigenschaften und Mustern, die noch Objekt der Forschung sind, bewertet und klassifiziert werden. Dies würde objektive(re) Diagnose und Verlaufskontrolle von Dysphonien ermöglichen und die Stroboskopie zukünftig ersetzen.

3. Material und Methoden

Hochgeschwindigkeits-Kamera:

Die HG Videos, die in dieser Arbeit benutzt wurden, wurden mit der Wolf Highspeed Endocam 5542 angefertigt. Diese Kamera ermöglicht die Aufnahme von 4000 Bilder/s bei einer räumlichen Auflösung von 256x256 Pixeln. Die hier verwendete Version der Kamera erzeugt digitale „Schwarzweißbilder“, genauer 8-bit-Graustufenbilder, also 256 Helligkeitsstufen für jeden Bildpunkt. Seit 2005 ist ein neues Kameramodell erhältlich (HS Endocam 5562), das bei gleicher hoher Zeitauflösung farbige Bilder liefert, aber für die Erkennung der Bewegung ist die Farbeinformation weder vor noch nachteilig. Von jedem Patient wurde während einer gehaltenen Phonation des Vokals /a/ in der mittleren Sprechstimmlage bei mittlerer Intensität im Sinne eines „mezzoforte“ eine HG-Laryngoskopie durchgeführt, die ungefähr 2 Sekunden dauerte.

Glottis Analysis Tools v15.2.1 – Segmentation Tools

Bei Platzierung der Seed-Points innerhalb der Stimmritze und Manipulieren der verschiedenen Graustufen wird die entsprechende Aufnahme segmentiert (Abb. 8 und 9).

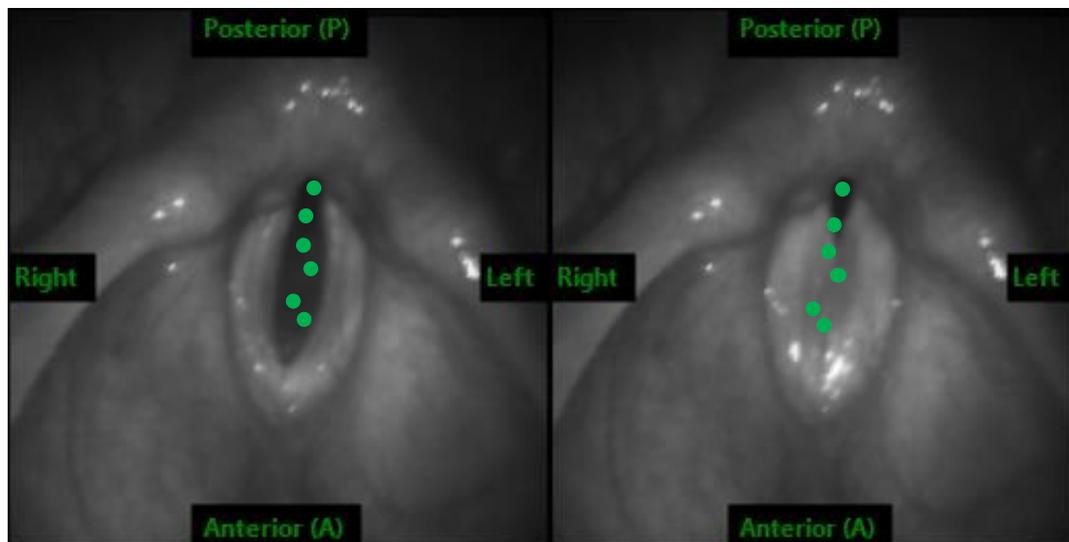


Abb. 8 – Platzierung der Seedpoints in Typischer Art und Weise. Die Manipulation der Grauenstufen ermöglicht die Erkennung seitens des Programms von der Glottis (Prinzip der wachsenden Fläche – region growing procedure)

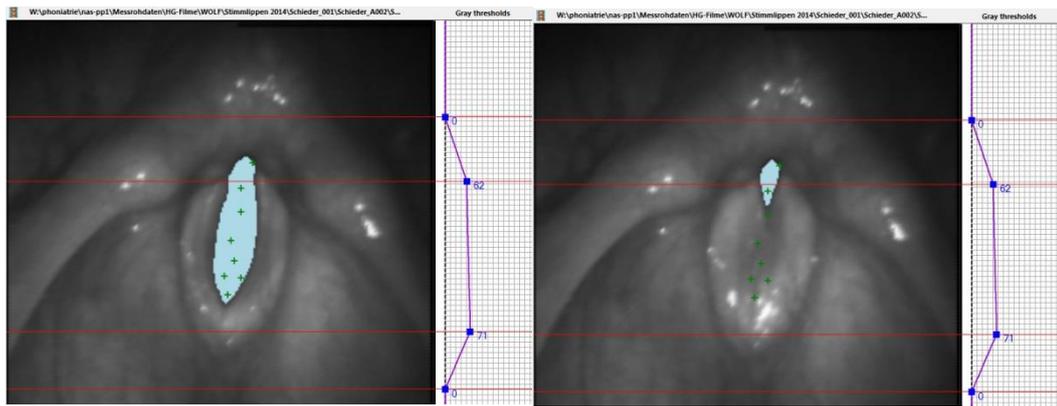


Abb. 9 – Die Selbe Frames wie in der Abbildung 8 nach Manipulation der Graustufen zur Erkennung der Stimmritze.

Teilnehmer:

Insgesamt 38 Patienten, 24 Frauen und 14 Männer, zwischen 21 und 77 Jahre alt wurden retrospektive analysiert. Die Patienten wurden mittels der Hochgeschwindigkeits-Kamera zwischen 2012 und 2014 untersucht und hatten anatomisch basierte Veränderungen des Kehlkopfs. Insgesamt waren es 11 Patienten ausschließlich mit Polypen, 4 ausschließlich mit Kontaktgranulomen, 4 ausschließlich mit Stimmlippenzysten und 10 ausschließlich mit Reinke-Ödem. Die übrigen 9 Patienten hatten eine zusätzliche zweite Diagnose (Tabelle 1, grün markiert).

Probanden	Geschlecht	Geburtsdatum	Diagnose
P1	W	1971	Stimmlippenpolyp (+Stimmlippenhämatom)
P2	M	1974	Stimmlippenpolyp
P3	M	1958	Stimmlippenpolyp (+akute Laryngitis)
P4	M	1939	Stimmlippenpolyp
P5	W	1954	Stimmlippenpolyp
P6	M	1971	Stimmlippenpolyp
P7	M	1982	Stimmlippenpolyp
P8	M	1957	Stimmlippenpolyp
P9	W	1938	Stimmlippenpolyp
P10	M	1952	Stimmlippenpolyp (+rekurrensparese)
P11	W	1953	Stimmlippenpolyp
P12	W	1993	Stimmlippenpolyp
P13	W	1961	Stimmlippenpolyp (+chronische Laryngitis)
P14	W	1943	Stimmlippenpolyp

P15	W	1951	Stimmlippenpolyp (+ Reinke- Ödem beidseits)
P16	M	1948	Stimmlippenpolyp
P17	M	1937	Stimmlippenpolyp (+ chronische Laryngitis)
K1	M	1970	Kontaktgranulom
K2	M	1967	Kontaktgranulom
K2´	M	1967	Kontaktgranulom
K3	M	1969	Kontaktgranulom
K4	W	1943	Kontaktgranulom
Z1	M	1990	Zyste
Z2	W	1956	Zyste
Z3	M	1951	Zyste
Z4	W	1987	Zyste
Z5	W	1976	Zyste (+chronische Laryngitis)
R1	W	1979	Reinke-Ödem
R2	W	1954	Reinke-Ödem
R3	W	1971	Reinke-Ödem
R4	W	1943	Reinke-Ödem (Z.n. MLE)
R5	W	1939	Reinke-Ödem
R6	W	1967	Reinke-Ödem
R7	W	1979	Reinke-Ödem
R8	W	1950	Reinke-Ödem
R9	W	1989	Reinke-Ödem
R9´	W	1989	Reinke-Ödem
R11	W	1957	Reinke-Ödem
R12	W	1953	Reinke-Ödem (+ Zyste links + Taschenfalte Zyste)
R13	W	1960	Reinke-Ödem

Tabelle 1 – Probanden. **Rx** steht für Patienten mit Reinke-Ödemen, **Px** für Patienten mit Polypen, **Zx** für Patienten mit Zysten und **Kx** für Patienten mit Kontaktgranulomen. **K2** und **K2´** sind derselben Proband, der aber in unterschiedlichen Zeitpunkten untersucht wurde. Dasselbe trifft für **R9** und **R9´** zu.

5 Patienten (grau markiert auf der Tabelle 1) wurden von der Auswertung und Segmentierung ausgeschlossen. Dies erfolgte entweder weil die Glottisspalte zu eng war

um eine Segmentierung zu ermöglichen (Seedpoints nicht platzierbar) (Abb. 10) oder weil die Aufnahme nicht in gehaltener Phonation durchgeführt wurde.

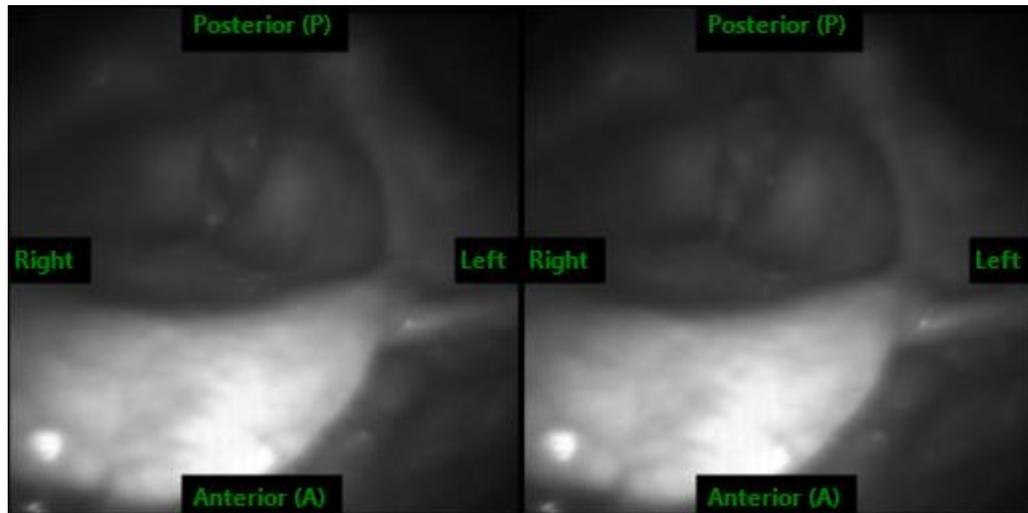


Abb.10 – Nicht segmentierbare Glottisspalte aufgrund der Unmöglichkeit die Seed-Points zu platzieren.

Da zwei Patienten zwei Mal in unterschiedlichen Zeitpunkten mit Erfolg untersucht wurden, hat sich hierdurch die Nummer von auswertungstauglichen Aufnahmen um zwei erhöht (blau markiert auf der Tabelle 1). **Zusammenfassend** ergaben sich 34 Aufnahme die ausgewertet werden konnten und deren Mittelachse bestimmt werden konnte (Tabelle 2).

N (Altersdurchschnitt ± Standardabweichung)	Männer	Frauen
Polyphen	8 (56,3 ±16,2)	7 (62,0 ±10,9)
Kontaktgranulome	3 (47 ± 1,4)	1 (72,0 ± 0,0)
Zysten	2 (44,5 ± 27,6)	3 (42,0 ± 15,7)
Reinke-Ödeme	0	10 (49,1 ± 17,4)
Summe	13 (52,4 ± 15,6)	21 (53,5 ± 17,1)
	34 (53,1 ± 15,9)	

Tabelle 2 – Verteilung der Probanden nach Pathologie und Geschlecht. Angabe des Durchschnittsalters und Standardabweichung.

Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen:

Die Segmentierung der 34 verwertbaren Aufnahmen erfolgte nach den in der Einleitung erläuterten Prinzipien im größtmöglichen Bereich gehaltener Phonation (stabile Frequenz).

Die Aufnahmen hatten eine Framezahl zwischen 524 und 6477 (3102 ± 1491). Dies entspricht einer Variation von Zyklen zwischen 33 und 450 (179 ± 100).

Zur Mittelachsenbestimmung müssen der Anterior-Punkt und die entsprechende Mittellinie bestimmt werden:

- Bestimmung des Anterior-Punktes:
 - A = 2nd Principal component
 - B = Lower-Region“ (10 pixel)
 - C = Lowest point

- Bestimmung der Mittellinie
 - 1 = Anterior-based
 - 2 = Average
 - 3 = Centroid-based
 - 4 = Anterior-Posterior Line

Die verwendete Mittelachsen-Methode wird mit zwei Zahlen kodiert (A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, C4). Somit ergeben sich 12 unterschiedliche Methoden zur Mittelachsenbestimmung. Für jede einzelne Methode werden folgende visuelle Parameter festgehalten und subjektiv bewertet.

1. Benotung der Qualität der Mittelachsenbestimmung von 1 bis 5. Die Note 1 entspricht einer nahezu perfekten Berechnungsmethode für die jeweilige Aufnahme. Unten werden die äquivalenten sprachlichen Gestalten zu der numerischen Benotung aufgeführt. Dieses ist der wichtigste zu analysierende Parameter.

1. Nahezu Perfekt
2. Gut
3. Mittelmäßig
4. Befriedigend
5. Falsch

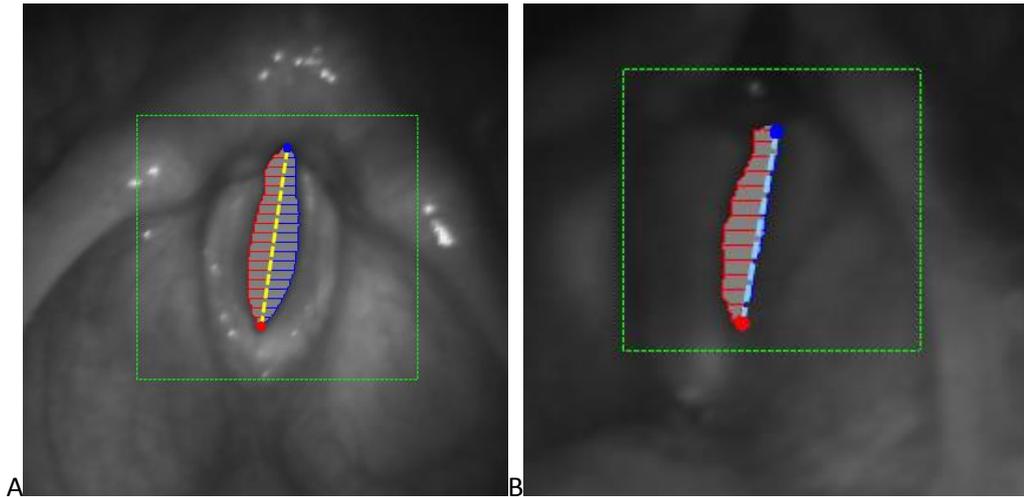


Abb. 11 – Zwölf verschiedenen Methoden zur Mittelachsenbestimmung werden benotet. Hier exemplarisch dargestellt: eine, die mit einem „1“ bewertet wurde (A) und eine die mit einem „5“ bewertet wurde (B).

2. Benotung der Aufnahme. Hier wird festgelegt wie viel von der Glottis in der Aufnahme zu sehen ist.

1. 100%
2. 75-99%
3. 50-74%
4. 25-50%
5. 0-25%

3. Benotung der Aufnahmequalität. Die Schärfe der Aufnahme wird hier beurteilt.

1. Perfekt
2. Sehr gut
3. Gut
4. Befriedigend
5. Schlecht

4. Benotung der Aufnahmequalität. Die Helligkeit und Kontrast der Aufnahme wird hier beurteilt.

1. Perfekt
2. Sehr gut
3. Gut

4. Befriedigen
5. Schlecht

5. Schwingung der Stimmlippen

1. Symmetrisch
2. Fast symmetrisch
3. Deutlich asymmetrisch
4. Komplet asymmetrisch (gegenläufig)

6. Glottisschlussinsuffizienz. Die Aufnahmen wurden einer visuellen Beurteilung unterzogen und in 6 unterschiedliche Kategorien unterteilt (Inwald et al., 2010).

1. Kompletter Glottisschluss
2. Inkompletter Glottisschluss im knorpeligen Teil der Glottis (zwischen den anterioren Fortsätzen der Aryhöcker). Weniger als ein Drittel der gesamten Länge der Glottis
3. Dreieckiger inkompletter Glottisschluss des hinteren Drittels
4. Dreieckiger inkompletter Glottisschluss des hinteren zwei Drittels
5. Inkompletter Glottisschluss entlang der gesamten Länge mit geringem Abstand zwischen Stimmlippen
6. Inkompletter Glottisschluss entlang der gesamten Länge mit großem Abstand zwischen den freien Ränder der Stimmlippen.

7. Die Randkantenverschiebung wird beurteilt. Der Parameter „5 = nicht beurteilbar“ besteht weil bei einem Bild mit schlechter Aufnahmequalität aufgrund starker Beschlag oder niedrigerem Kontrast unter Umständen keine Aussage gemacht werden kann bezüglich der feinen Randkantenverschiebungen.

1. Übermäßig
2. Normal

3. Reduziert
4. Nicht vorhanden
5. Nicht beurteilbar

8. Schleimablagerung

1. Übermäßig
2. Normal
3. Reduziert
4. Trocken
5. Nicht beurteilbar

Verschiedene Schwingungsparameter werden für die 3 Methoden, die für den jeweiligen Patient die beste Benotung der Qualität der Mittelachsenbestimmung erzielt haben, mittels der Software Glottis Analysis Tools berechnet.

Die Berechnung der Parameter erfolgt über oben genannte Software. Die Berechnung erfolgte für die besten drei Methoden für den jeweiligen Probanden.

Mit dem Programm Glottis Analysis Tools v15.2.1 – Analysis Tools (PVG) werden die segmentierten Aufnahmen geöffnet. Für die Erkennung der Zyklen durch das Programm wurden die folgenden Einstellungen ausgewählt:

- Video sampling rate: 4000 Hz
- Fundamental frequency
 - Tolerance range: 10-650 Hz
 - Magnitude tolerance limit: 35% of max magnitude
 - Harmonics (magnitude tolerance limit): 5% of F0 magnitude
- Cycles
 - Detection method: SignalBased
 - Correlation method: Cosine Similarity

- Beginning type: MinBased
- Fourier transformation
 - Window type: Rectangular
 - Window overlap: 0%
 - Frequency resolution (wanted): 10 Hz
- Signal derivatives
 - Difference quotient type: Central
 - Type of units: Dimensionless
 - Maximum Grad: 1

Für die Analyse der Zyklen wurden folgenden Einstellungen ausgewählt:

- Parameters
 - Fundamental frequency measures
 - Symmetry measures (=Symmetrieparameter)
- Analysis mode (Entire signal)
 - Number for analysis: 60 cycles
 - Position: middle

Wichtig für die Beurteilung der Mittelachse sind unter den Schwingungsparametern, die Untergruppe der **Symmetrieparameter** (Glottis Analysis Tools – User Guide, Punkt 2.6).

1. **Amplitude Symmetry**
2. **Amplitude Symmetry Index**
3. **Dynamic Range Symmetry**
4. **Dynamic Range Symmetry Index**
5. **Phase Asymmetry**
6. **Phase Asymmetry Index**
7. **Spatial Symmetry**
8. **Spatial Symmetry Index**
9. **Waveform Symmetry Index**

T_i – Dauer des Zyklus i in ms,

GA_i – Funktion der glottalen Fläche (Glottal area waveform – GAW) für den Zyklus i ,

A_i – dynamische Breite der glottalen Fläche (Glottal area dynamic range) [$\max(GA_i) - \min(GA_i)$] für den Zyklus i ,

L – linke Seite, **R** – rechte Seite

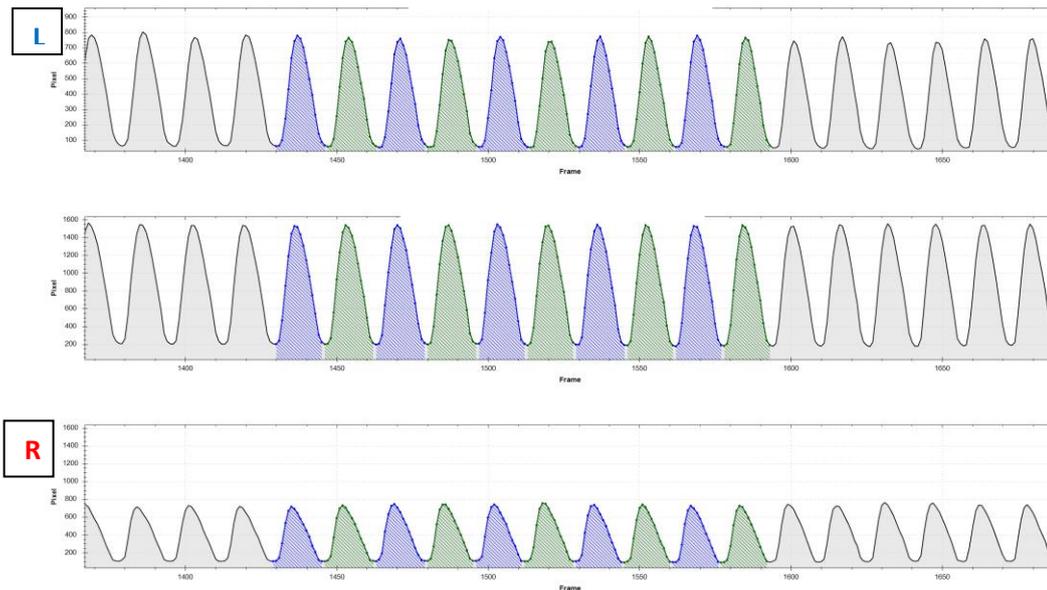


Abb. 12 – Glottal area wave form (GAW). Hier 10 Zyklen von Methode B3 exemplarisch hervorgehoben. L – linke Seite, entsprechend dem medialen Rand der linken Stimmlippe. R – rechte Seite, entsprechend dem medialen Rand der rechten Stimmlippe. In der Mitte ist die Summe beider Seiten dargestellt.

1. Amplitude Symmetry

$$\text{Amplitude Symmetry} = \frac{\max(GA_i^L)}{\max(GA_i^R)}$$

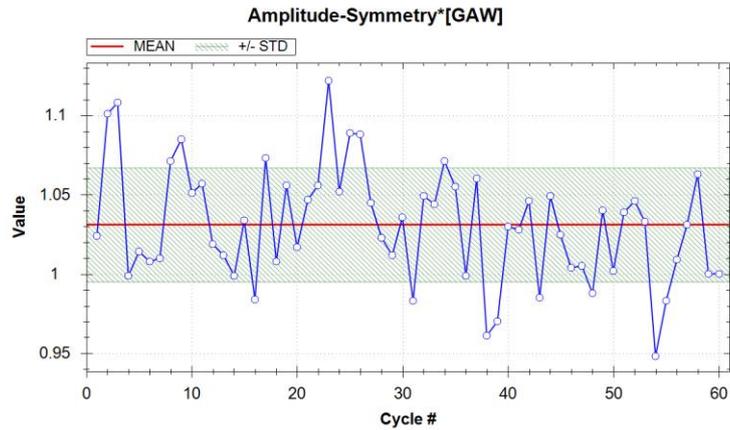


Abb. 13 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Amplitude Symmetry berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $1,03 \pm 0,04$.

2. Amplitude Symmetry Index

$$\text{Amplitude Symmetry Index} = \frac{\max([GA_i^L], \max[GA_i^{Rt}])}{\max([GA_i^L], \max[GA_i^R])}$$

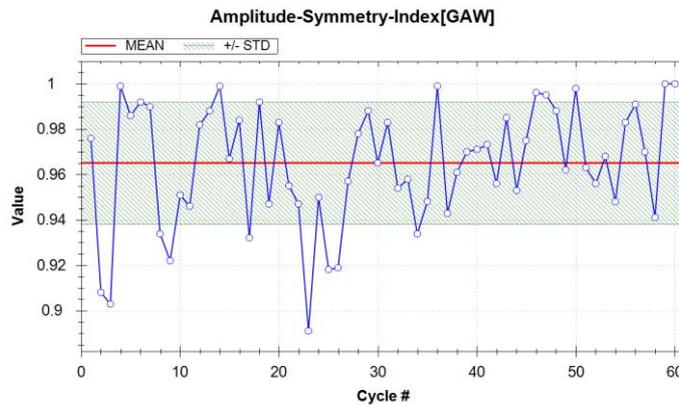


Abb. 14 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Amplitude Symmetry Index berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $0,97 \pm 0,03$.

3. Dynamic Range Symmetry

$$\text{Dynamic Range Symmetry} = \frac{A_i^L}{A_i^R}$$

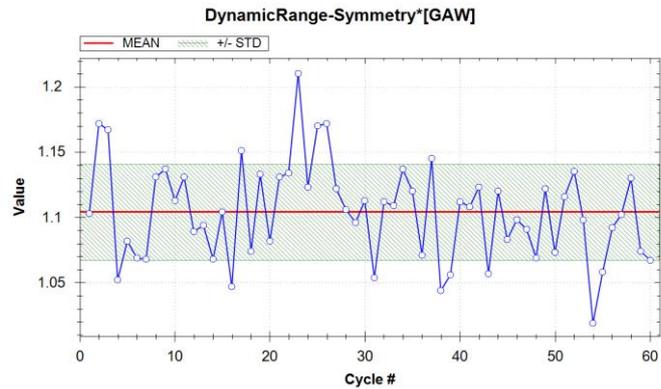


Abb. 15 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Dynamic Range Symmetry berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $1,10 \pm 0,04$.

4. Dynamic Range Symmetry Index

$$\text{Dynamic Range Symmetry Index} = \frac{\min(A_i^L, A_i^R)}{\max(A_i^L, A_i^R)}$$

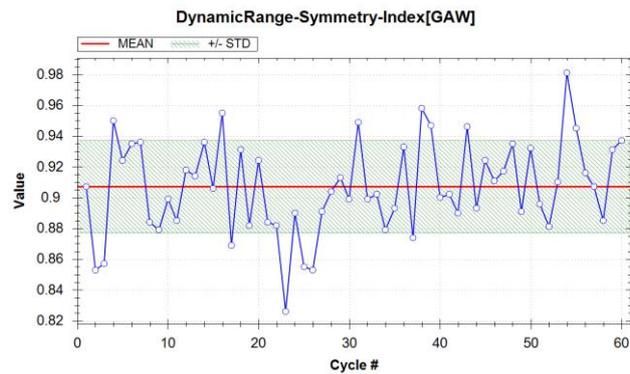


Abb. 16 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Dynamic Range Symmetry Index berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $0,91 \pm 0,03$.

5. Phase Asymmetry

$$\text{Phase Asymmetry} = \frac{t_i^L(\max) - t_i^R(\max)}{T_i}$$

Wo, t_i^L oder $t_i^R(\max)$ der Zeit an der maximalen glottalen Flächen für die linke bzw. rechte Seite für den Zyklus i

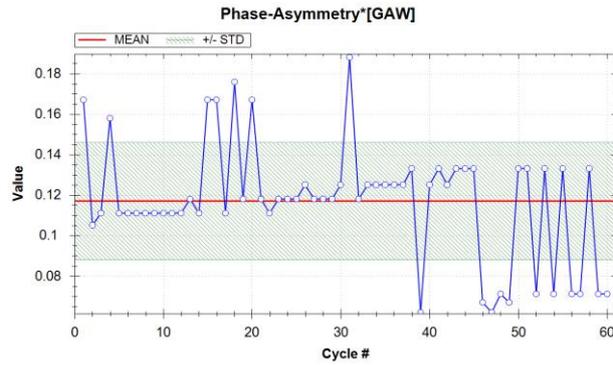


Abb. 17 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Phase Asymmetry berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $0,12 \pm 0,03$.

6. Phase Asymmetry Index

$$\text{Phase Asymmetry Index} = \frac{|t_i^L(\text{max}) - t_i^R(\text{max})|}{T_i}$$

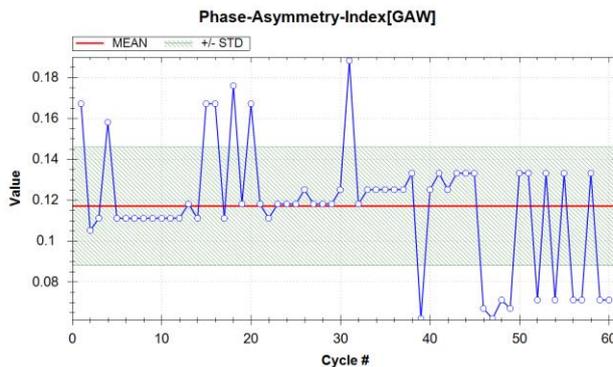


Abb. 18 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Phase Asymmetry Index berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $0,12 \pm 0,03$.

7. Spatial Symmetry

$$\text{Spatial Symmetry} = \frac{\sum_{t \in T_i} GA_i^L(t) - \sum_{t \in T_i} GA_i^R(t)}{\sum_{t \in T_i} GA_i(t)}$$

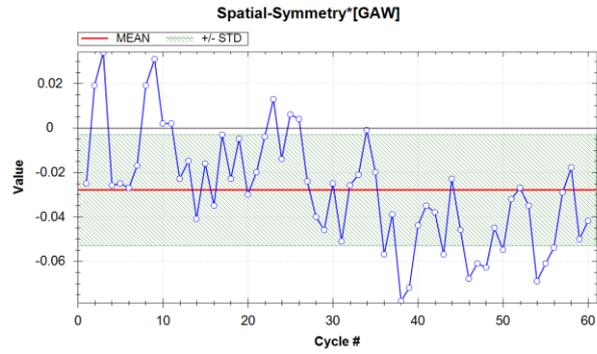


Abb. 18 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Spatial Symmetry berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $-0,03 \pm -0,03$.

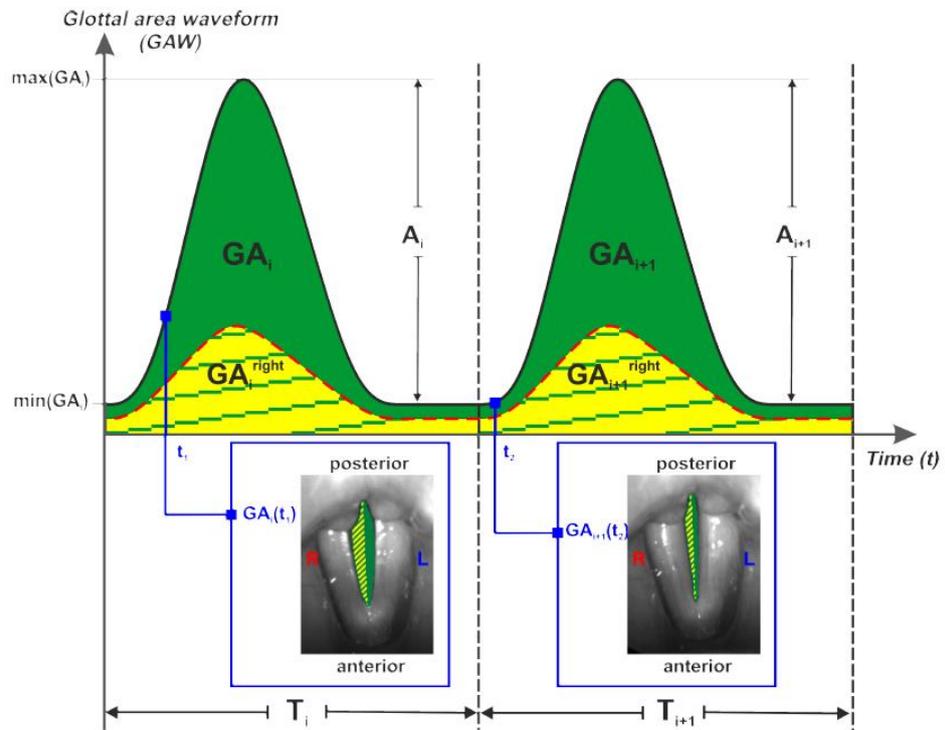


Abb. 19 – $GA_i(t)$ und T_i hier dargestellt. (Bild vom Glottis Analysis Tools - User Guide)

8. Spatial Symmetry Index

$$\text{Spatial Symmetry Index} = \frac{|\sum_{t \in T_i} GA_i^L(t) - \sum_{t \in T_i} GA_i^R(t)|}{\sum_{t \in T_i} GA_i(t)}$$

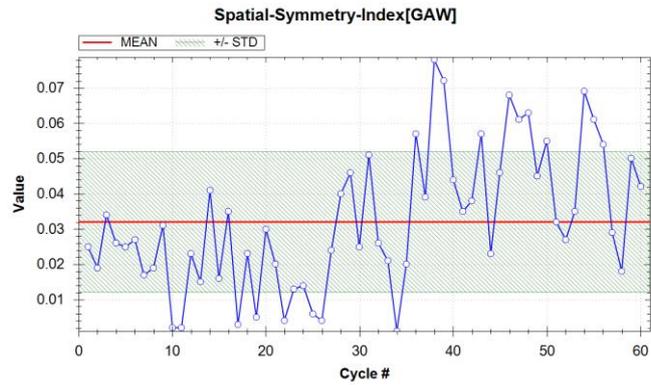


Abb. 20 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Spatial Symmetry Index berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $0,03 \pm 0,02$.

9. Waveform Symmetry Index

$$\text{Waveform Symmetry Index} = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{\langle GA_t^L, GA_t^R \rangle}{\|GA_t^L\|_2 \cdot \|GA_t^R\|_2} \right]$$

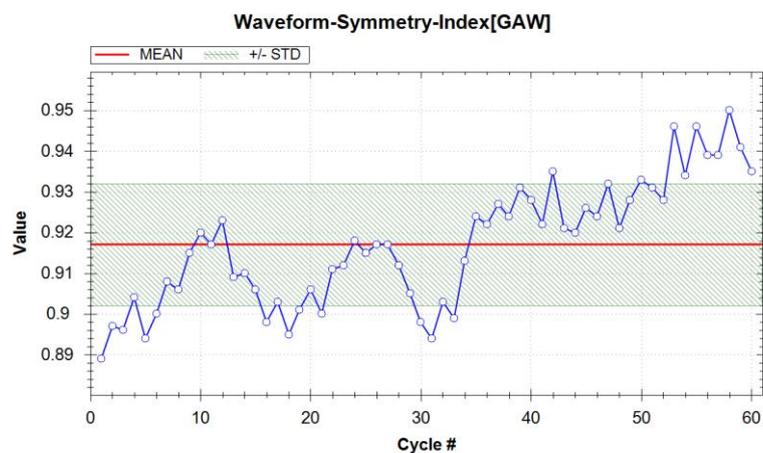


Abb. 21 – Exemplarisch für die Methode B2 wurde bei einem Proband der Parameter Waveform Symmetry Index berechnet. Durchschnittswert \pm Standardabweichung = $0,92 \pm 0,02$.

Von den jeweiligen 60 Zyklen Sequenz wurde nur der Durchschnittswert dem jeweiligen Parameter entnommen. Zum Beispiel, der Waveform Symmetry Index für den oben gezeigten Proband, dessen Mittelachse mit dem Methode B2 berechnet wurde, wird vollständig durch den **Wert 0,92 definiert**.

Alle Parameter für die besten drei Methoden der jeweiligen Patienten wurden berechnet und in Tabellen und Diagrammen festgehalten. Aus den oben gezeigten Formeln wird deutlich, dass bei Patienten mit normalen Stimmlippen, d.h., ohne Pathologien die die Symmetrie oder die Abständen der freien Kante der Stimmlippen beeinflussen, das Ergebnis der Funktionen: **Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic Range Symmetry Index und Waveform Symmetry Index** 1(eins) beträgt und für die Funktionen **Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry und Spatial Symmetry Index** Wert 0 (null) beträgt. Diese sind die erwarteten Werte bei einer symmetrischen Bewegung der Stimmlippen in Bezug auf die Mittelachse der Stimmritze.

4. Ergebnisse:

1. Subjektive Benotung der Mittelachse

Die HG-Aufnahmen von den Patienten wurden segmentiert, die oben beschriebene visuellen Parameter für jeden benotet. Die Patienten wurden in verschiedene Untergruppen unterteilt und eine Durchschnittsnote für jede Methode zur Mittelachsenbestimmung in der jeweiligen Untergruppe festgehalten.

Durchschnittsnote von:	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
Alle Patienten (34)	1,8 ± 1,0	1,9 ± 1,0	1,9 ± 1,0	2,4 ± 1,0	1,6 ±0,9	1,5 ± 0,8	1,7 ± 0,8	2 ± 1	1,9 ± 1	1,9 ± 0,9	2,1 ± 1,0	2,2 ± 1,1
Frauen (21)	1,9 ± 1,0	2,0 ± 1,1	1,9 ± 0,9	2,3 ± 1,0	1,6 ± 1,0	1,5 ± 0,9	1,8 ± 0,9	2,1 ± 1,1	1,5 ± 0,8	1,8 ± 0,9	2,0 ± 0,9	2,1 ± 1,0
Männer (13)	1,5 ± 0,8	1,9 ± 1,0	1,8 ± 1,1	2,6 ± 0,9	1,5 ± 0,7	1,6 ± 0,7	1,6 ± 0,7	2,1 ± 1,0	2,4 ± 1,2	2,0 ± 1,0	2,4 ± 1,2	2,4 ± 1,3
Nur mit komplettem Glottisschluss	2,1 ± 1,4	2,4 ± 1,2	2,1 ± 1,1	2,7 ± 1,1	1,9 ± 1,2	2 ± 1,1	2 ± 1,1	2,5 ± 1,3	2,2 ± 0,8	2,1 ± 0,8	2,3 ± 1,0	2,2 ± 1,1
Nur mit inkomplettem Glottisschluss	1,6 ± 0,6	1,7 ± 0,8	1,7 ± 0,9	2,3 ± 0,8	1,4 ± 0,6	1,3 ± 0,5	1,5 ± 0,6	1,8 ± 0,7	1,7 ± 1,1	1,7 ± 1,0	2 ± 1,0	2,2 ± 1,2
Polypen (15)	1,6 ± 1,1	2 ± 1,2	1,9 ± 1,0	2,5 ± 1,0	1,5 ± 1,1	1,7 ± 1,0	1,9 ± 1,1	2,3 ± 1,2	1,9 ± 1,2	1,9 ± 0,9	2,2 ± 1,1	2,4 ± 1,2
Polypen (Männer) (8)	1,4 ± 0,5	2,1 ± 1,0	2,0 ± 0,9	2,9 ± 0,8	1,4 ± 0,5	1,8 ± 0,5	1,8 ± 0,7	2,4 ± 0,9	2,5 ± 1,4	2,3 ± 1,0	2,4 ± 1,3	2,8 ± 1,4
Polypen (Frauen) (7)	1,9 ± 1,5	1,9 ± 1,5	1,7 ± 1,1	2,1 ± 1,1	1,7 ± 1,5	1,7 ± 1,5	2,0 ± 1,4	2,1 ± 1,5	1,3 ± 0,5	1,4 ± 0,5	2,0 ± 0,8	2,0 ± 0,8
Kontaktgranulome (4)	1,3 ± 0,5	1,3 ± 0,5	1,3 ± 0,5	1,8 ± 1,0	1 ± 0,0	1 ± 0,0	1,3 ± 0,5	1,3 ± 0,5	1,8 ± 1	2,0 ± 0,8	2,3 ± 1,3	1,5 ± 1,0
Kontaktgranulome (Männer) (3)	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	2,0 ± 1,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,3 ± 0,6	2,0 ± 1,0	2,0 ± 1,0	2,3 ± 1,5	1,7 ± 1,2
Kontaktgranulome (Frauen) (1)	2,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0	1,0 ± 0,0
Zysten (5)	2,2 ± 0,8	2,4 ± 0,5	2,2 ± 1,1	2,2 ± 0,8	2,0 ± 1,0	1,8 ± 0,8	1,8 ± 0,4	1,8 ± 1,1	2,0 ± 0,7	1,4 ± 0,5	2,0 ± 1,0	2,0 ± 0,7
Zysten (Männer) (2)	3,0 ± 0,0	2,5 ± 0,7	2,5 ± 2,1	2,5 ± 0,7	2,5 ± 0,7	2,0 ± 1,4	2,0 ± 0,0	2,0 ± 1,4	2,5 ± 0,7	1,0 ± 0,0	2,5 ± 0,7	2,0 ± 0,0
Zysten (Frauen) (3)	1,7 ± 0,6	2,3 ± 0,6	2,0 ± 0,0	2,0 ± 1,0	1,7 ± 1,2	1,7 ± ±0,6	1,7 ± 0,6	1,7 ± 1,2	1,7 ± 0,6	1,7 ± 0,6	1,7 ± 1,2	2,0 ± 1,0
Reinke-Ödeme (10) (Nur Frauen)	2,0 ± 0,9	1,9 ± 0,9	2,0 ± 1,1	2,5 ± 1,0	1,6 ± 0,7	1,4 ± 0,5	1,6 ± 0,7	2,1 ± 0,8	1,7 ± 1,1	2,0 ±1,1	2,0 ± 0,9	2,2 ± 1,3

Tabelle 3 – Die Noten sind von 1 bis 5 vergeben, wobei 1 entspricht einem nahezu perfekten Mittelachsenbestimmungsmethode. Rot werden die besten bewerteten Methoden für die jeweilige Untergruppe hervorgehoben.

Die Methoden B1, B2 und B3 sind im Durchschnitt die am besten bewerteten Methoden. Dies wird deutlicher, je mehr Patienten in der jeweiligen Untergruppe sind.

2. Berechnung der Symmetrie Parametern

Die Symmetrien Parametern werden für die besten drei Methoden, des jeweiligen Probandes berechnet. Die Beschriftung der folgenden Diagrammen erfolgt folgendermaßen: In der X-Achse befinden sich die Patienten der jeweiligen Untergruppe (Zysten – Z, Polypen – P, K – Kontaktgranulome, Reinke-Ödeme – R) mit Nummern kodiert (siehe Methoden).

Zwischen Klammern befinden sich die besten Methoden zur Mittelachsenbestimmung für den jeweiligen Patient. Die Werte der Parameter sind dimensionslos. Das nachfolgenden F oder M identifiziert der Proband als Frau bzw. als Mann. Bei den Polypen werden um die Darstellung zur Erleichtern die Frauen und Männer in zwei getrennten Diagrammen abgebildet.

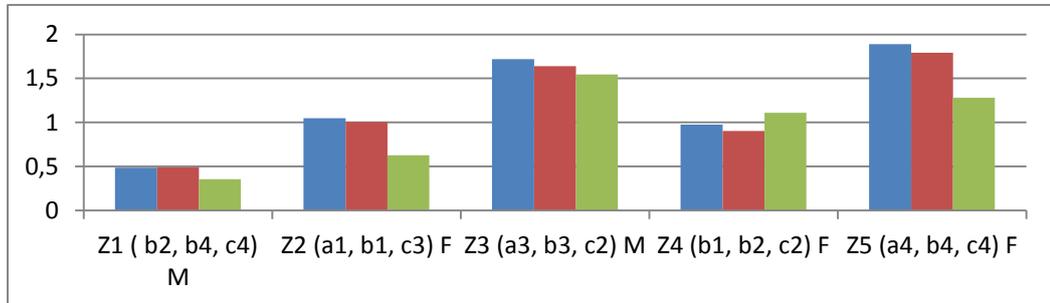
Unter jedem Diagramm befindet sich die Berechnung des Mittelwertes und Standardabweichung der ausgewählten (besten) Methoden. Dies wird für die Gruppe als Ganzes durchgeführt aber auch getrennt für Frauen und Männer berechnet. Diese Information wird am Ende in Form einer Tabelle zusammengefasst.

Symmetrieparameter (Glottis Analysis Tools – User Guide, Punkt 2.6).

- 1. Amplitude Symmetry**
- 2. Amplitude Symmetry Index**
- 3. Dynamic Range Symmetry**
- 4. Dynamic Range Symmetry Index**
- 5. Phase Asymmetry**
- 6. Phase Asymmetry Index**
- 7. Spatial Symmetry**
- 8. Spatial Symmetry Index**
- 9. Waveform Symmetry Index**

1. Amplitude Symmetrie

- Zysten



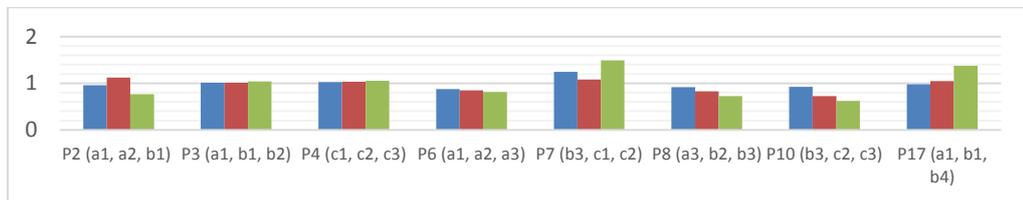
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 1.12 ± 0.51

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = 1.04 ± 0.66

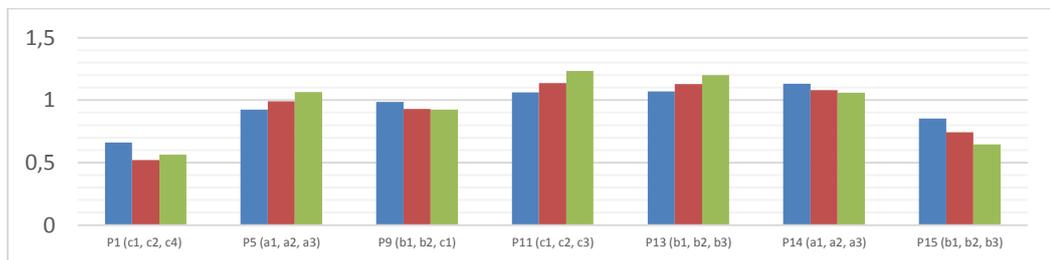
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = 1.18 ± 0.41

- Polypen

Männer



Frauen

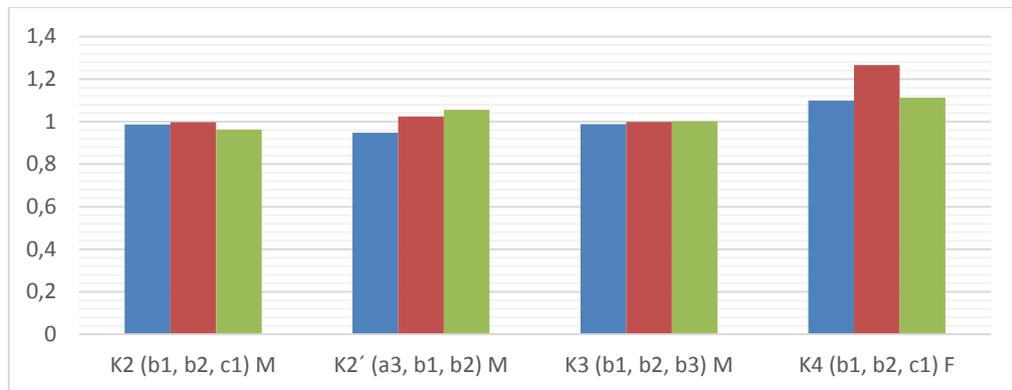


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.96 ± 0.20

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,98 \pm 0,20$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,95 \pm 0,21$

- **Kontaktgranulome**

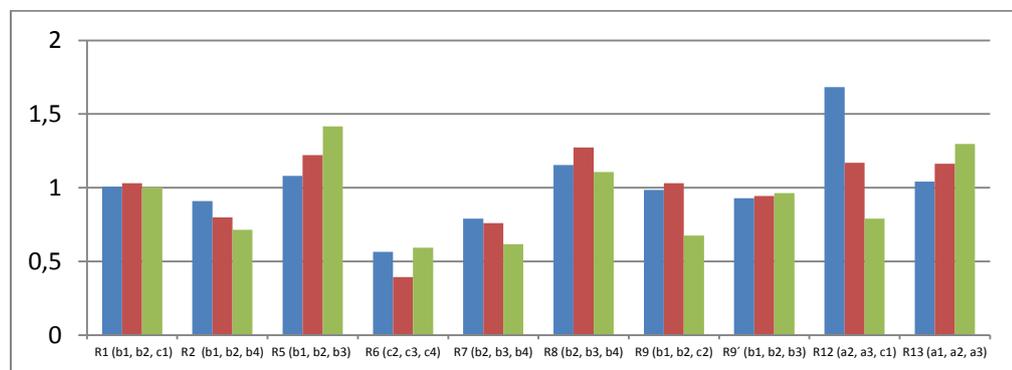


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 1.04 ± 0.09

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $1,00 \pm 0,03$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $1,16 \pm 0,09$

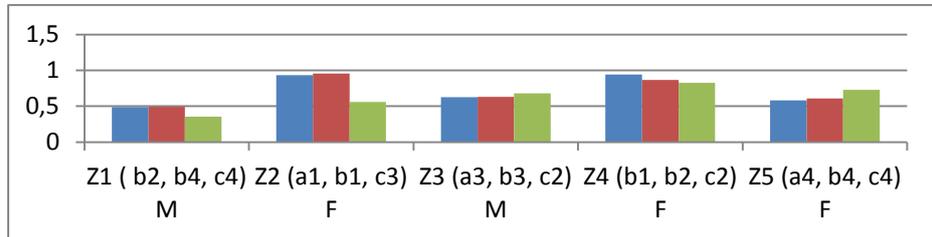
- **Reinke-Ödeme**



Gesamtgruppe (nur Frauen) Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.97 ± 0.27

2. Amplitude Symmetry Index

- Zysten



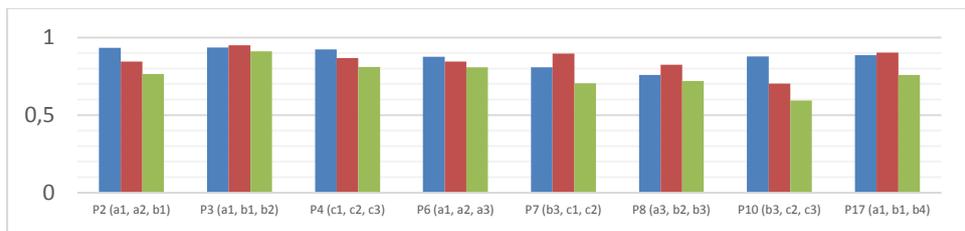
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.68 ± 0.19

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.78 ± 0.16

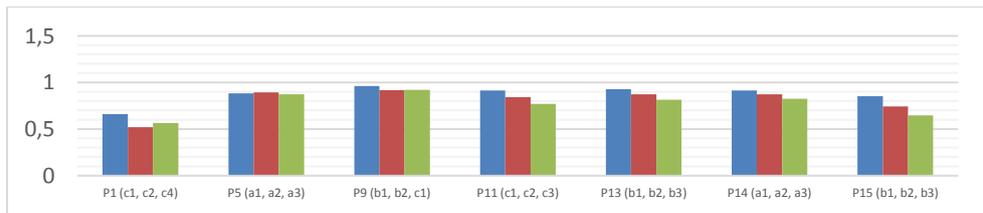
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.54 ± 0.12

- Polypen

Männer



Frauen

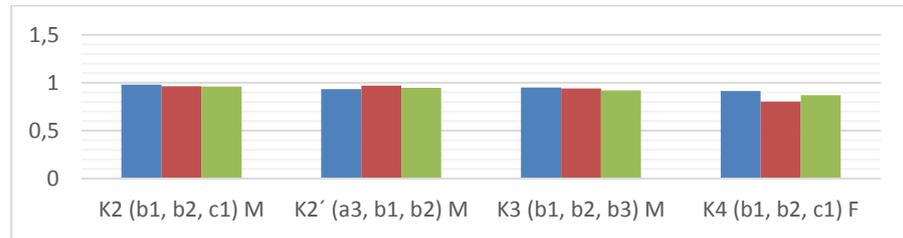


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.82 ± 0.11

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0.83 \pm 0,09$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0.82 \pm 0,12$

- **Kontaktegranulome**

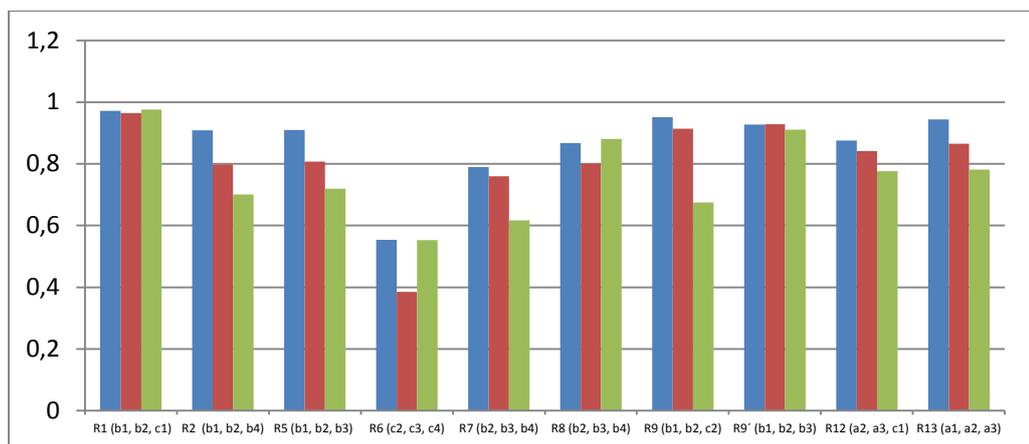


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.93 ± 0.05

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0.95 \pm 0,02$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0.86 \pm 0,05$

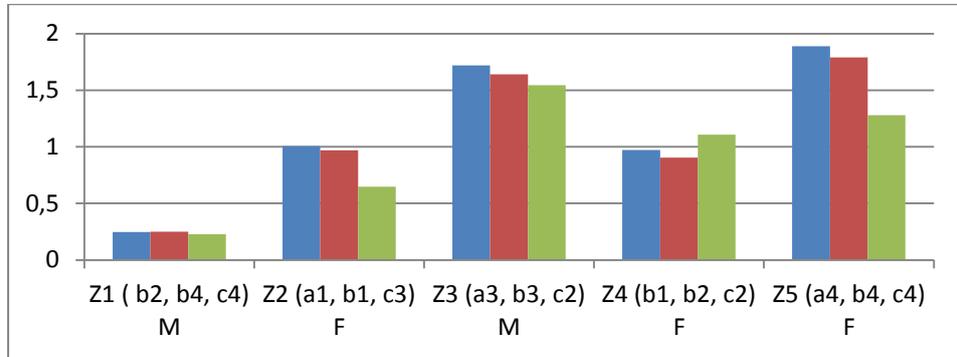
- **Reinke-Ödeme**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.81 ± 0.14

3. Dynamic Range Symmetry

- Zysten



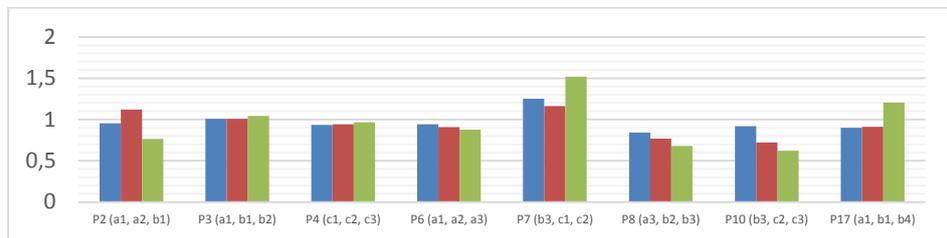
Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = 1.08 ± 0.57

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = $0.94 \pm 0,77$

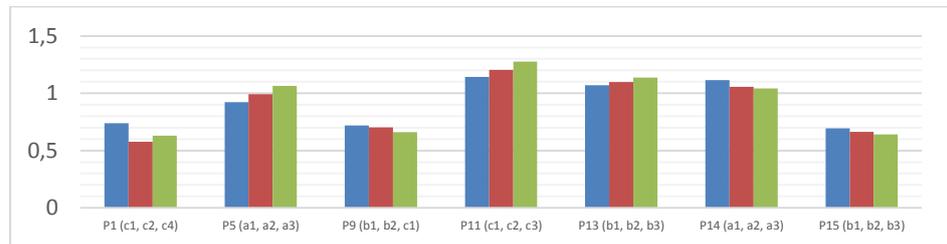
Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = $1,17 \pm 0,41$

- Polypen

Männer



Frauen

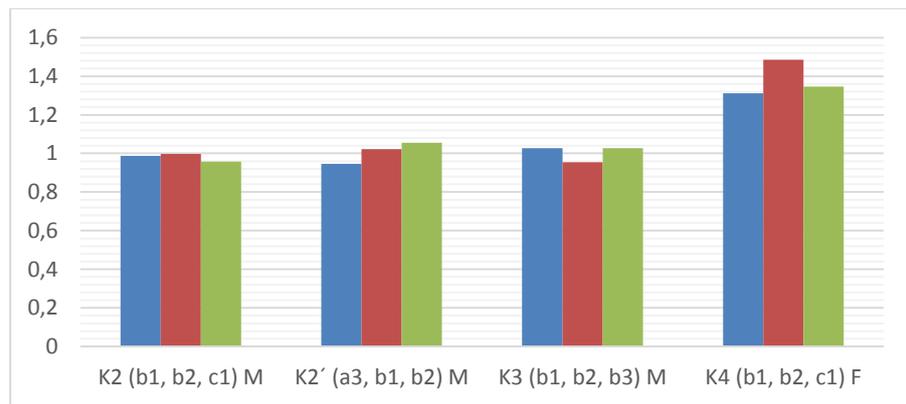


Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = 0.94 ± 0.21

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = $0.96 \pm 0,20$

Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,91 \pm 0,23$

- **Kontaktgranulome**

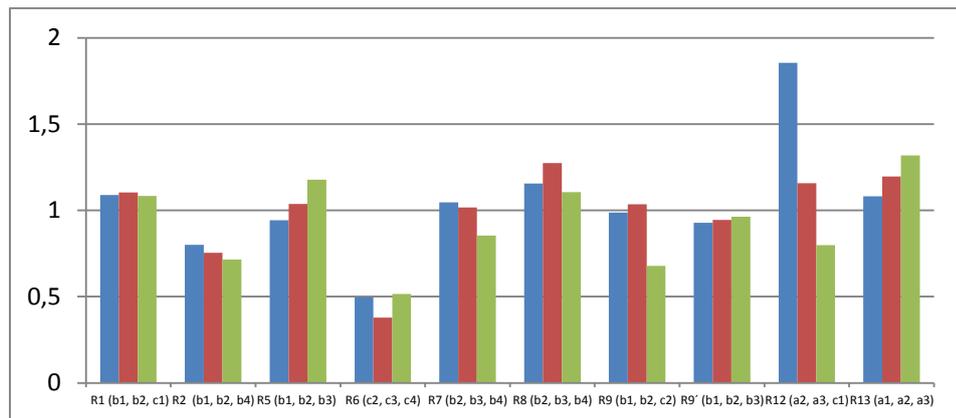


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 1.09 ± 0.18

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $1,00 \pm 0,04$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $1,38 \pm 0,09$

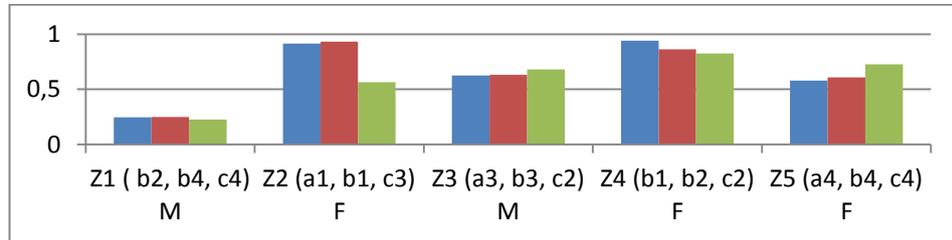
- **Reinke-Ödeme**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.98 ± 0.28

4. Dynamic Range Symmetry Index

- **Zysten**



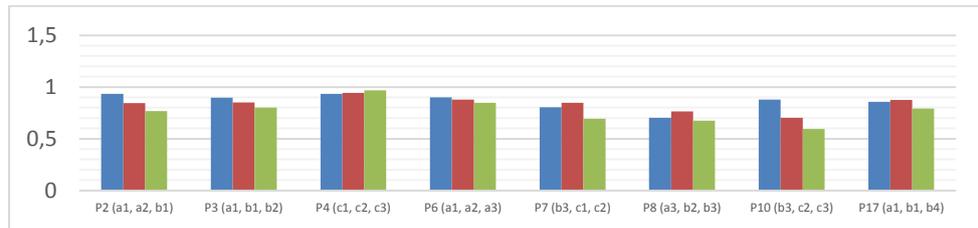
Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = 0.64 ± 0.24

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,44 \pm 0,22$

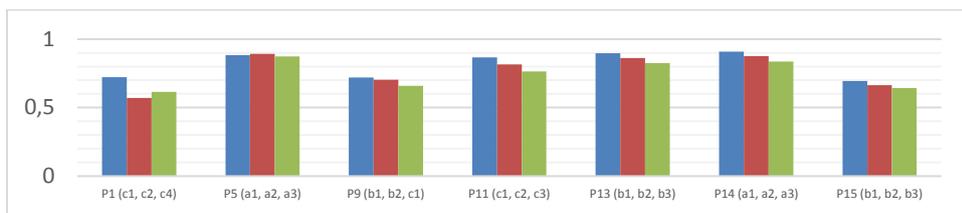
Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,78 \pm 0,16$

- **Polypen**

Männer



Frauen

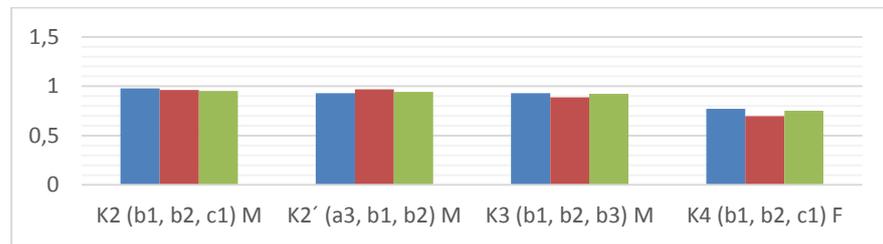


Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = 0.80 ± 0.10

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,82 \pm 0,10$

Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,78 \pm 0,10$

- **Kontaktgranulome**

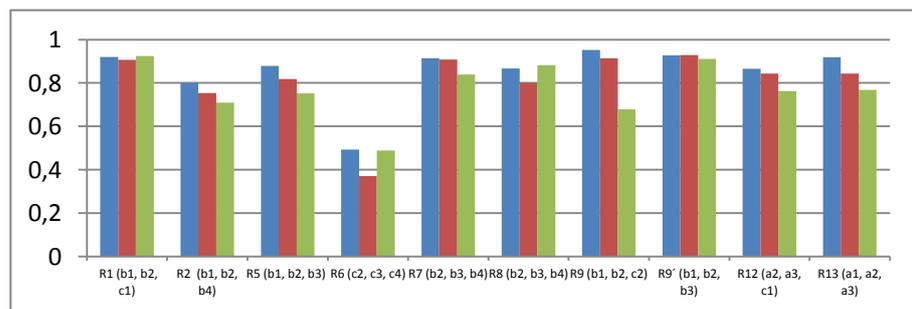


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.89 ± 0.10

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,94 \pm 0,03$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,74 \pm 0,04$

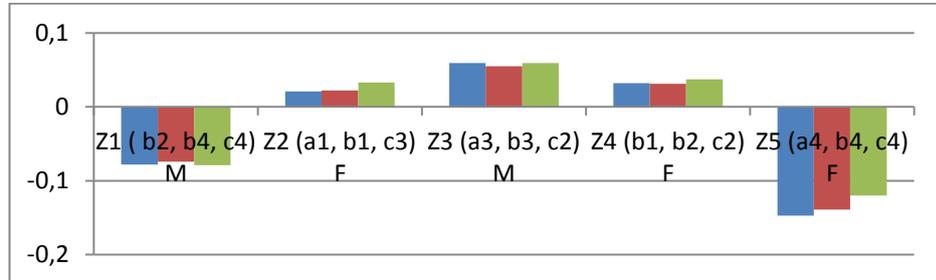
- **Reinke-Ödeme**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.81 ± 0.14

5. Phase Asymmetry

- Zysten



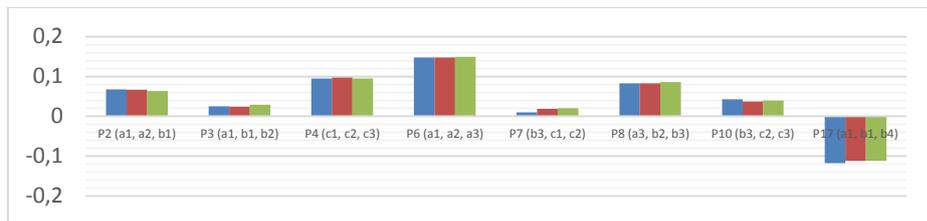
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,02 \pm 0,08$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,01 \pm 0,07$

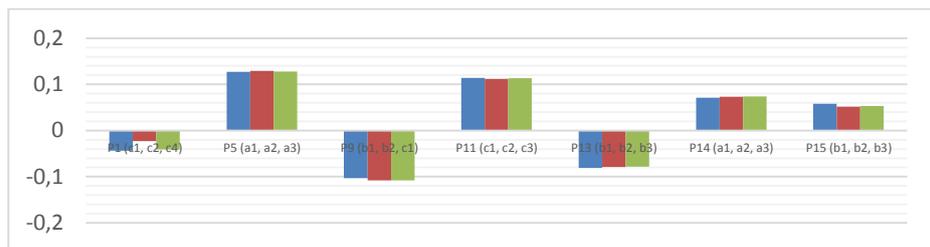
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,03 \pm 0,08$

- Polypen

Männer



Frauen

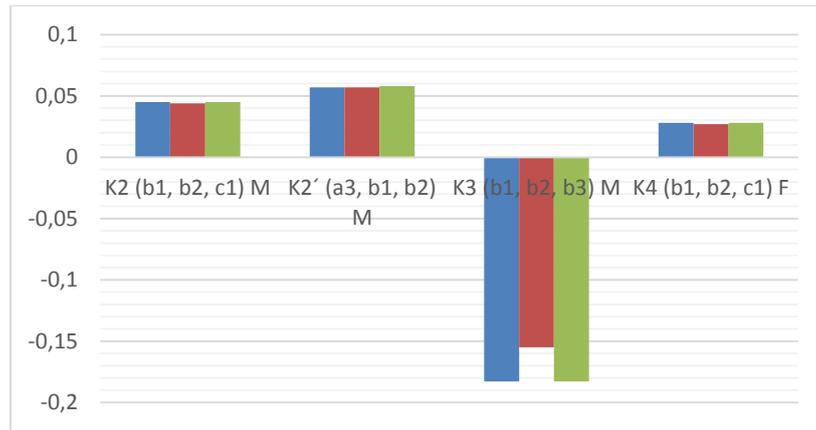


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,03 \pm 0,08$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,05 \pm 0,07$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,02 \pm 0,09$

- **Kontaktgranulome**

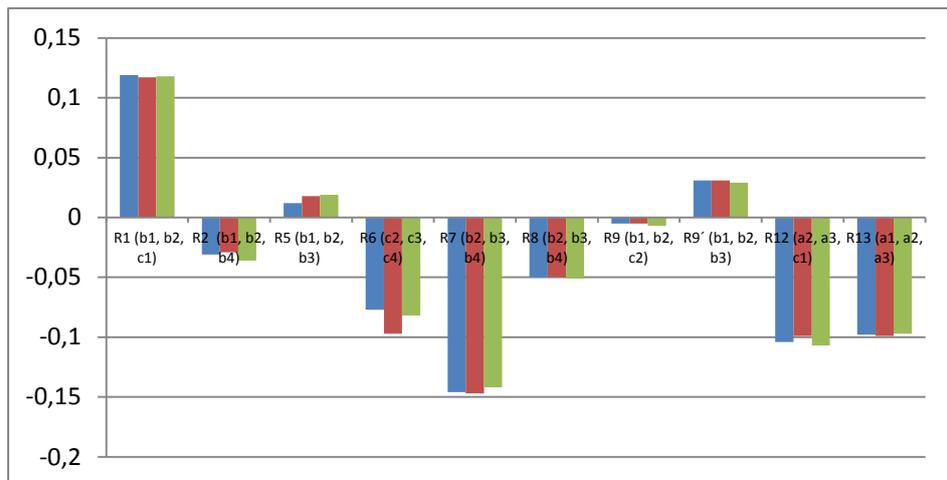


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,01 \pm 0,10$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,02 \pm 0,11$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,03 \pm 0,00$

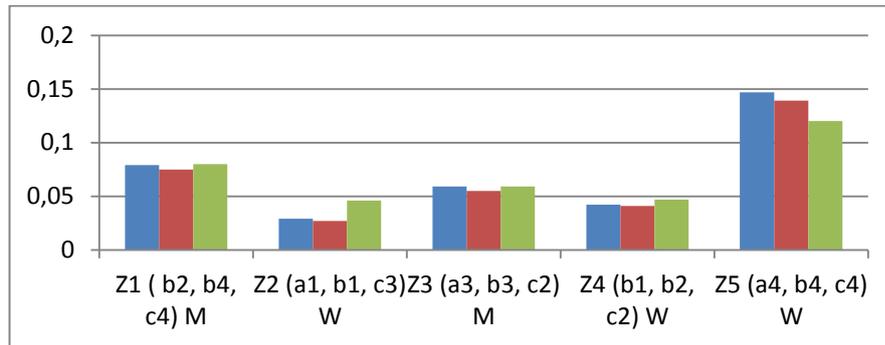
Reinke-Ödeme



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,03 \pm 0,08$

6. Phase Asymmetry Index

- Zysten



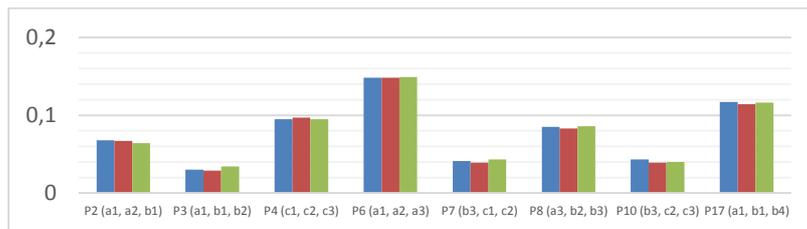
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.07 ± 0.04

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.07 ± 0.01

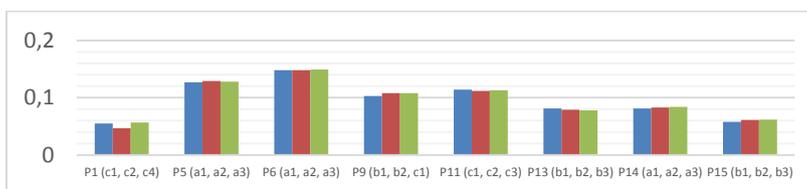
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.07 ± 0.05

- Polypen

Männer



Frauen

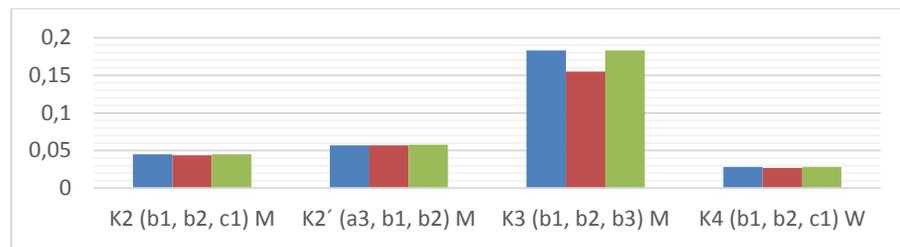


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.08 ± 0.03

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.08 ± 0.04

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.09 ± 0.03

- **Kontaktgranulome**

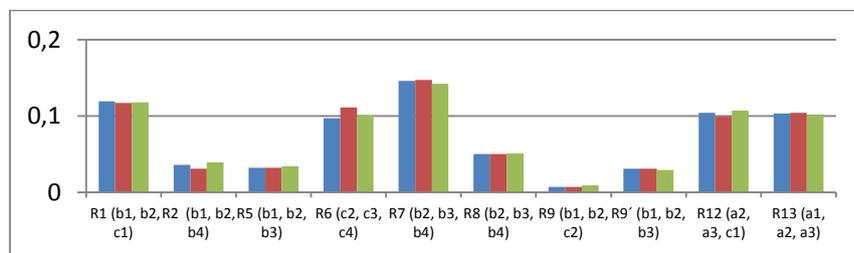


Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,08 \pm 0,06$

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,09 \pm 0,06$

Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = $0,03 \pm 0,00$

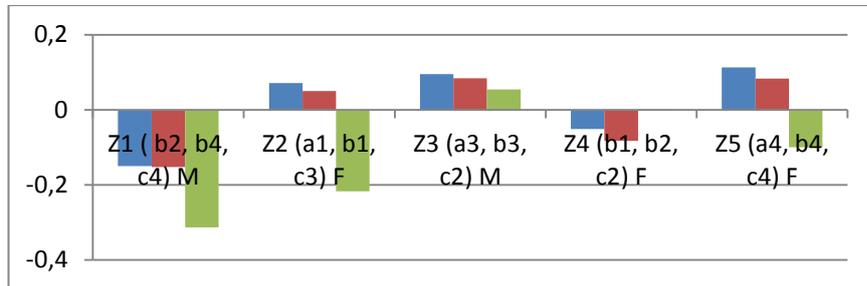
- **Reinke-Ödem**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert ± Standardabweichung = $0,07 \pm 0,05$

7. Spatial Symmetry

- **Zysten**



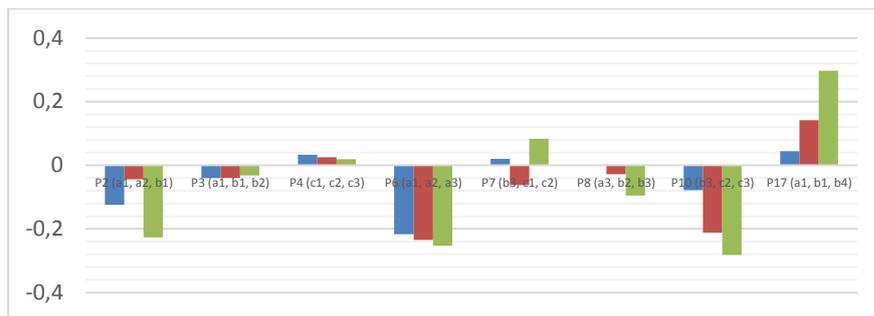
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,03 \pm 0,13$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,06 \pm 0,17$

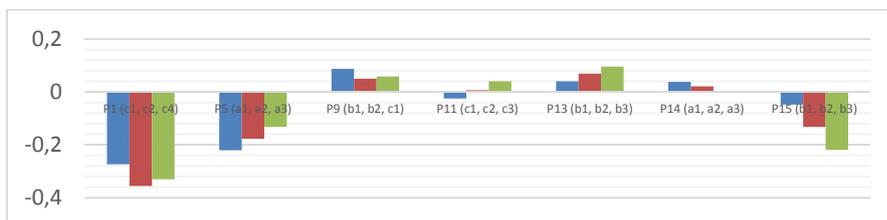
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,01 \pm 0,11$

- **Polypen**

Männer



Frauen

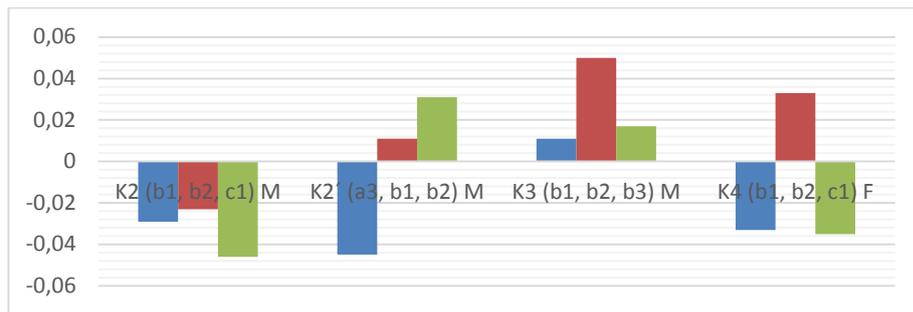


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,06 \pm 0,14$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,05 \pm 0,14$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $-0,07 \pm 0,14$

- **Kontaktegranulome**

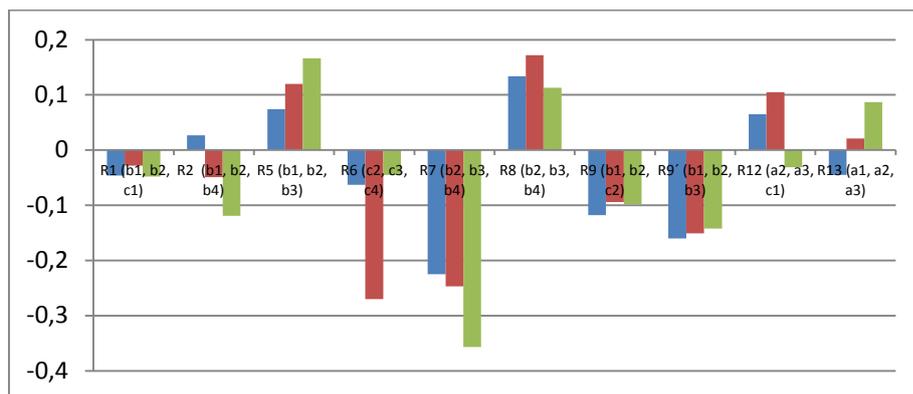


Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = 0,00 ± 0,03

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = -0,00 ± 0,03

Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = -0,01 ± 0,04

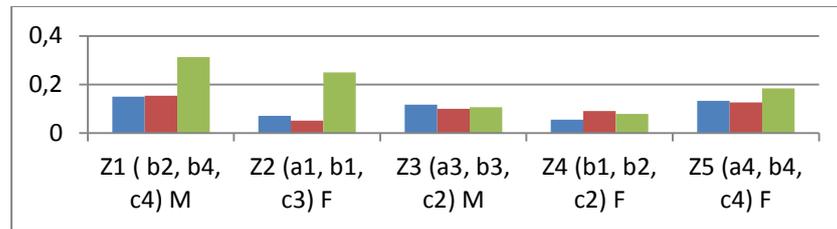
- **Reinke-Ödem**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert ± Standardabweichung = -0,04 ± 0,13

8. Spatial Symmetry Index

- Zysten



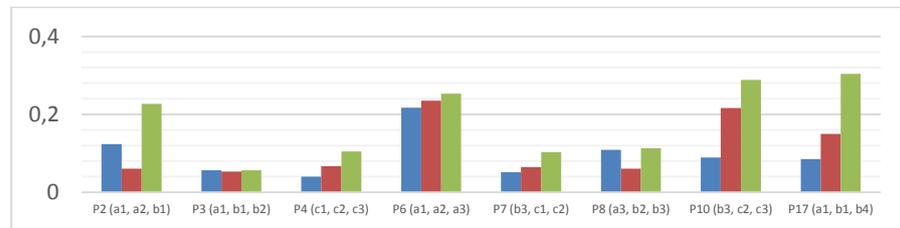
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.13 ± 0.07

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.16 ± 0.08

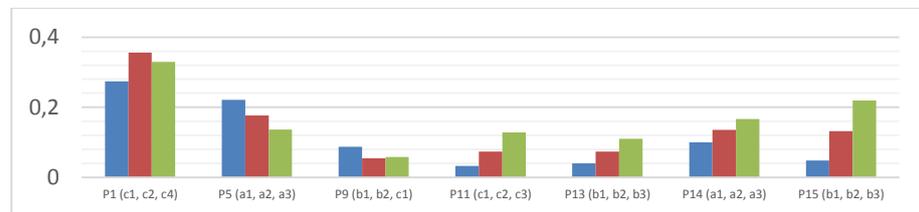
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.12 ± 0.07

- Polypen

Männer



Frauen

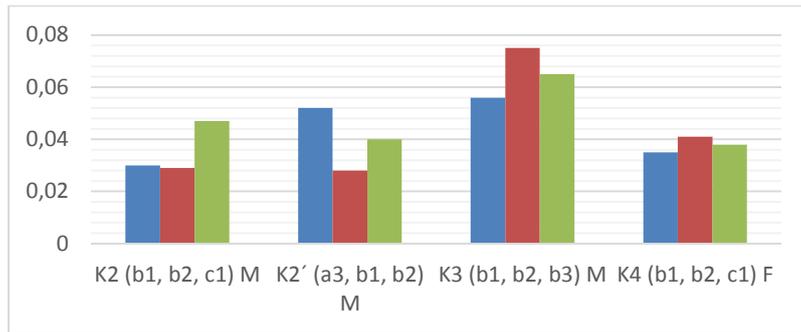


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.14 ± 0.09

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.13 ± 0.08

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.14 ± 0.09

- **Kontaktegranulome**

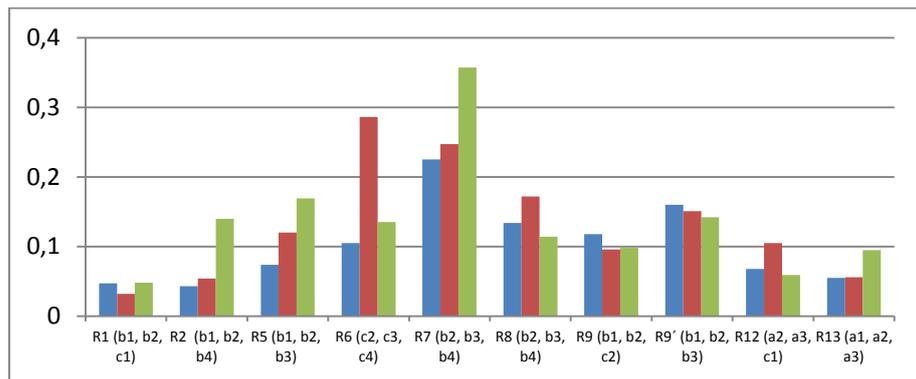


Gesamtgruppe: Mittelwert ± Standardabweichung = 0,04 ± 0,01

Männer: Mittelwert ± Standardabweichung = 0,05 ± 0,02

Frauen: Mittelwert ± Standardabweichung = 0,04 ± 0,00

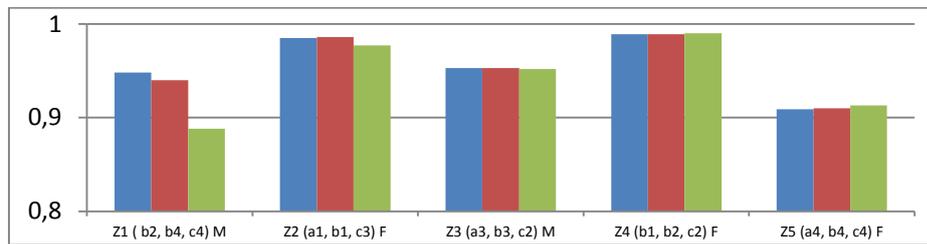
- **Reinke-Ödeme**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert ± Standardabweichung = 0,12 ± 0,08

9. Waveform Symmetry Index

- Zysten



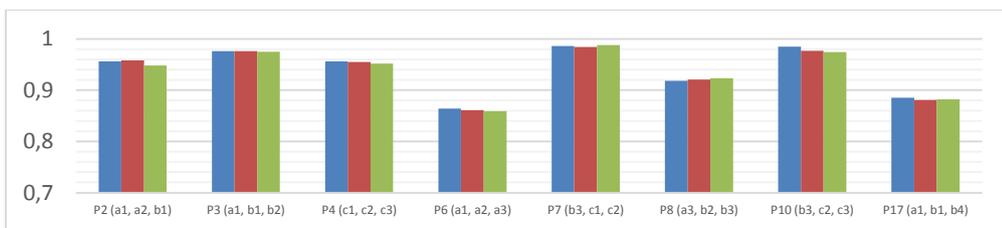
Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,95 \pm 0,03$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,94 \pm 0,03$

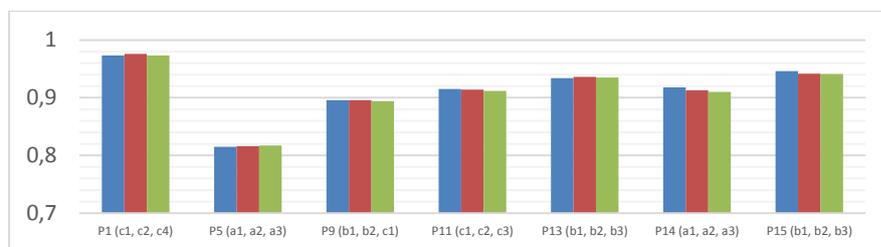
Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,96 \pm 0,04$

- Polypen

Männer



Frauen

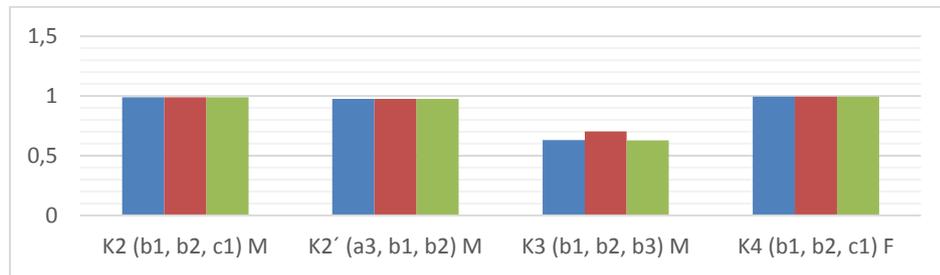


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,92 \pm 0,05$

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,94 \pm 0,05$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,90 \pm 0,04$

- **Kontaktegranulome**

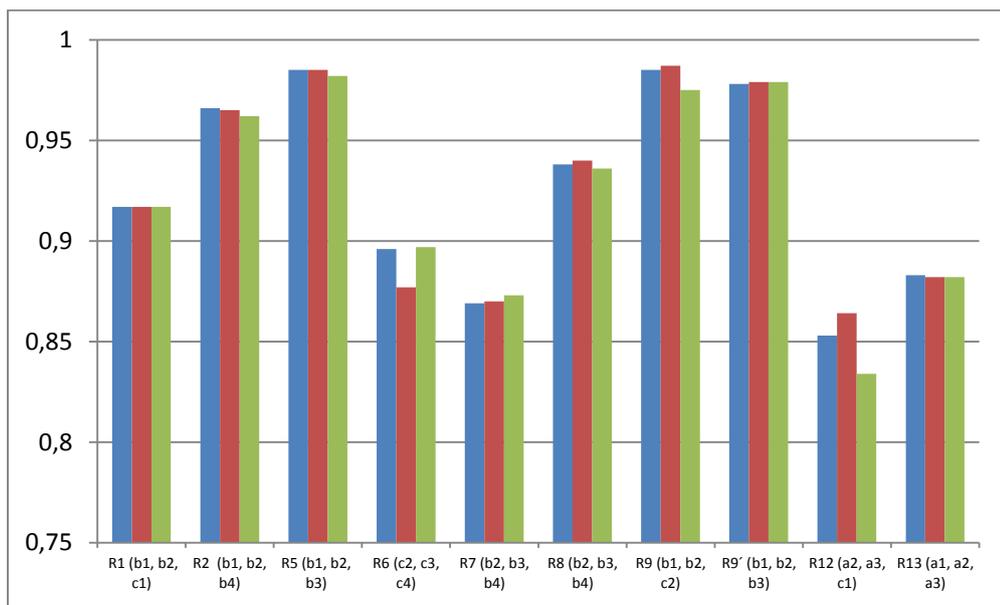


Gesamtgruppe: Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.90 ± 0.15

Männer: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,87 \pm 0,17$

Frauen: Mittelwert \pm Standardabweichung = $0,99 \pm 0,00$

- **Reinke-Ödeme**



Gesamtgruppe (nur Frauen): Mittelwert \pm Standardabweichung = 0.93 ± 0.05

	Amplitude Symmetry	Amplitude Symmetry Index	Dynamic Range Symmetry	Dynamic Range Symmetry Index	Phase Asymmetry	Phase Asymmetry Index	Spatial Symmetry	Spatial Symmetry Index	Waveform Symmetry Index
Zysten									
Gesamtgruppe	1.12 ± 0.51	0.68 ± 0.19	1.08 ± 0.57	0.64 ± 0.24	-0.02 ± 0.08	0.07 ± 0.04	-0.03 ± 0.13	0.13 ± 0.07	0.95 ± 0.03
Männer	1.04 ± 0.66	0.78 ± 0.16	0.94 ± 0,77	0,44 ± 0,22	-0,01 ± 0,07	0,07 ± 0,01	-0,06 ± 0,17	0,16 ± 0,08	0,94 ± 0,03
Frauen	1.18 ± 0.41	0.54 ± 0.12	1,17 ± 0,41	0,78 ± 0,16	-0,03 ± 0,08	0,07 ± 0,05	-0,01 ± 0,11	0,12 ± 0,07	0,96 ± 0,04
Polypen									
Gesamtgruppe	0.96 ± 0.20	0.82 ± 0.11	0.94 ± 0.21	0.80 ± 0.10	0.03 ± 0.08	0.08 ± 0.03	-0.06 ± 0.14	0.14 ± 0.09	0.92 ± 0.05
Männer	0,98 ± 0,20	0,83 ± 0,09	0,96 ± 0,20	0,82 ± 0,10	0,05 ± 0,07	0,08 ± 0,04	-0,05 ± 0,14	0,13 ± 0,08	0,94 ± 0,05
Frauen	0,95 ± 0,21	0,82 ± 0,12	0,91 ± 0,23	0,78 ± 0,10	0,02 ± 0,09	0,09 ± 0,03	-0,07 ± 0,14	0,14 ± 0,09	0,90 ± 0,04
Kontaktgranulome									
Gesamtgruppe	1.04 ± 0.09	0.93 ± 0.05	1.09 ± 0.18	0.89 ± 0.10	-0.01 ± 0.10	0.08 ± 0.06	0.00 ± 0.03	0.04 ± 0.01	0.90 ± 0.15
Männer	1,00 ± 0,03	0,95 ± 0,02	1,00 ± 0,04	0,94 ± 0,03	-0,02 ± 0,11	0,09 ± 0,06	0,00 ± 0,03	0,05 ± 0,02	0,87 ± 0,17
Frauen	1,16 ± 0,09	0,86 ± 0,05	1,38 ± 0,09	0,74 ± 0,04	0,03 ± 0,00	0,03 ± 0,00	-0,01 ± 0,04	0,04 ± 0,00	0,99 ± 0,00
Reinke-Ödeme									
Gesamtgruppe (nur Frauen)	0.97 ± 0.27	0.81 ± 0.14	0.98 ± 0.28	0.81 ± 0.14	-0.03 ± 0.08	0.07 ± 0.05	-0.04 ± 0.13	0.12 ± 0.08	0.93 ± 0.05

Tabelle 4 – Die Symmetrie Parametern für die besten Methoden des jeweiligen Probandes wurden mittels Glottis Analysis Tools berechnet. Hier tabellarisch dargestellt sind die Durchschnittswerte plus Standardabweichung der besten Methoden für den jeweiligen Gruppe und für Männer und Frauen separat.

5. Diskussion

Die Stroboskopie ist eine geeignete Visualisierungstechnik für allenfalls leicht aperiodische Schwingungsmuster der Stimmlippen. Im Gegensatz dazu ermöglichen die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen die Beurteilung von stark aperiodischen oder unregelmäßigen Schwingungen und gestatten eine genaue objektive Analyse von Intra- und Interzyklen Abweichungen (Bohr et al., 2014). Die verfahrenstechnischen Vorteile, welche die Laryngoskopie mit Nutzung von Hochgeschwindigkeitskameras zur Diagnostik von Dysphonien gegenüber der Stroboskopie aufweist, offenbaren sich erst durch eine quantitative Analyse von Hochgeschwindigkeitsvideos (Unger et al., 2013, Olthoff et al., 2007).

Das Ziel dieser Arbeit war es, die verschiedenen Mittelachsenbestimmungsmethoden subjektiv zu bewerten und anhand deren, verschiedene geeignete objektive Parameter zu berechnen und zu vergleichen. Diese Studie ist Teil der langfristigen Bestrebungen die Stimmstörungen in ihrer Komplexität objektiv, reproduzierbar und exakt klassifizieren zu können. Eine automatische Berechnung der Mittelachse ist deshalb so wichtig, weil die Menge an Bildern, die man von einer zwei sekündigen Aufnahme der Stimmlippen mittels Hochgeschwindigkeitskamera bekommt, zu groß ist, diese in der Praxis einzeln durchzusehen und manuell die Mittelachse zu bestimmen. Dies würde auch die vom Untersucher unabhängige Reproduzierbarkeit stark einschränken.

Zwölf verschiedenen Methoden zur Mittelachsenbestimmung wurden in dieser Arbeit subjektiv bewertet (Tabelle 5. Im Anhang beigefügt). Die verschiedenen Methoden ergeben sich aus der Kombination von drei unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung des vorderen Punktes (**Lowest point, 2nd Principal component und Lower – Region „ 10 pixel“**) und vier verschiedenen Möglichkeiten zur Berechnung der Mittelachse, die auf den vorderen Punkt Bezug nehmen (**Centroid-based (C), Anterior-based (A), Average of (A) und (C) und Anterior-Posterior Line (A-P)**). Aus den zuvor erläuterten Schritten zur Berechnung des vorderen Punktes sowie der entsprechenden Mittelachse wird deutlich, dass eine Glottis die sich ungefähr vertikal im Bild präsentiert und dessen untersten und obersten Punkte im Bild und der vorderen bzw. hinteren Kommissur entspricht sehr ähnlichen Ergebnisse zwischen den verschiedenen Methoden zur Mittelachsenbestimmung

erlaubt. Exemplarisch dargestellt ist ein Frame einer solchen Glottis, deren Mittelachse mit den verschiedenen Methoden zu Vergleichszwecke berechnet wurde (Abb. 22).

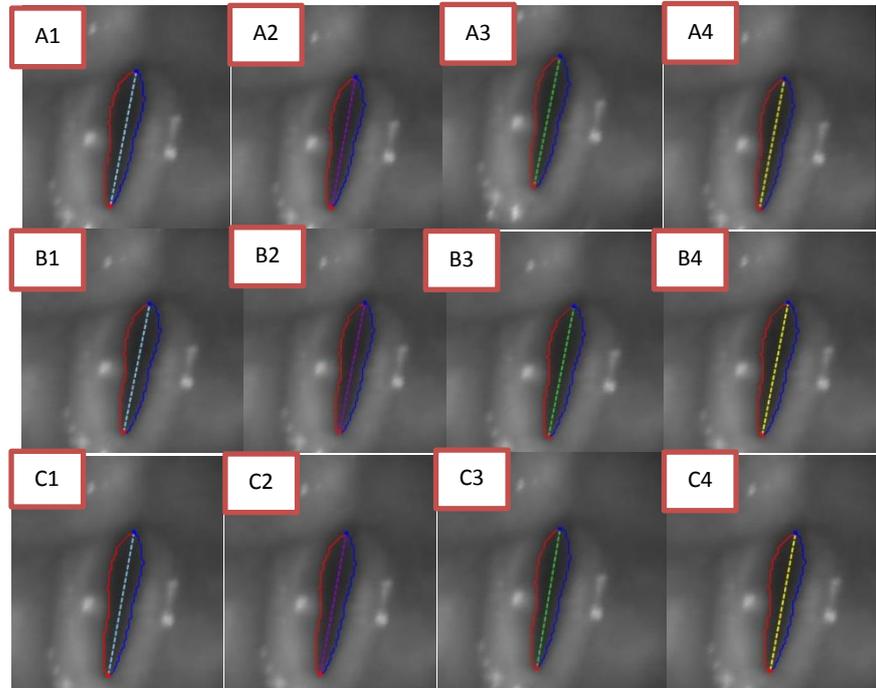


Abb. 22 – Hier die 12 verschiedenen Methoden zur Berechnung der Mittelachse in einer idealen Aufnahme, bei der die Glottis fast vertikal steht und die hinteren und vorderen Kommissuren deutlich zu identifizieren sind.

Die Symmetrie Parameter werden nicht alle genau gleich ausfallen, da in der Praxis Kamera und Patient nie vollständig ruhig sind. Deshalb ändert sich die Position und Orientierung der Glottis, trotz extrem kurzen Aufnahmezeiten (zwei Sekunden), im Bild (Tabelle 6).

	Amplitude Symmetry	Amplitude Symmetry Index	Dynamic Range Symmetry	Dynamic Range Symmetry Index	Phase Asymmetry	Phase Asymmetry Index	Spatial Symmetry	Spatial Symmetry Index	Waveform Symmetry Index
A1(1)	0,923	0,883	0,923	0,883	0,127	0,127	-0,221	0,221	0,815
A2(1)	0,991	0,893	0,991	0,893	0,129	0,129	-0,177	0,177	0,816
A3(1)	1,065	0,874	1,065	0,874	0,128	0,128	-0,132	0,137	0,817

Tabelle 6 - Drei Parameter subjektiv als 1 (nahezu perfekt) bewertet. Die Amplitude Symmetrie, Spatial Symmetry und Spatial Symmetry Index stark variieren (im Spatial Symmetry Index bis zu 62% Variation). Alle anderen Parameter haben sich stabil gezeigt mit Variationen im niedrigen einstelligen Prozentbereich.

Auch dadurch, dass sich die Kamera relativ zum Patient nicht nur in der horizontalen Ebene sondern auch in der vertikalen Ebene bewegt, kann sich die Qualität einer Mittelachsenbestimmungsmethode ändern. Dies kommt dadurch zustande, wenn zum Beispiel die Kamera sich vom Kehldeckel (etwa durch eine tiefere und hintere näher zur Oropharynx-/Hypopharynxhinterwand Stellung) entfernt und dadurch die Überstrahlung von dem Kehldeckel geringer wird. Dieses Phänomen ändert die Graustufen in der Glottisebene und dadurch wird auch der durch die verschiedenen Seedpoints ermittelte Bereich/Areal anders aussehen (Abb. 23).

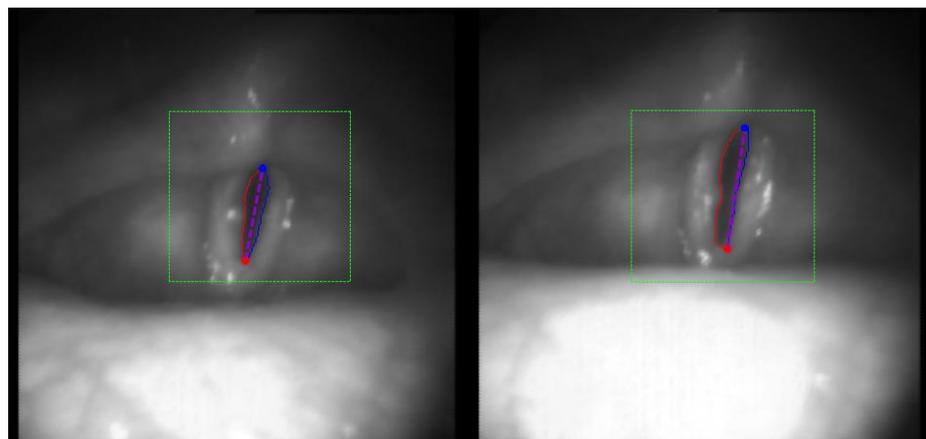


Abb. 23 – Hier der Effekt der Änderung der Kamerastellung. Durch die Überstrahlung von der Epiglottis, wurden die Graustufen geändert, die Form der segmentierten Fläche verändert und schließlich auch die Mittelachse. Was am Bild links nach einem nahezu perfekten Mittelachsenbestimmungsmethode aussah (theoretisch Note 1) hat sich dann als eine, zumindest in einem Teil der Sequenz, inadäquate Methode (Note 4) herausgestellt.

Aus diesen Gründen sollte eine relativ kurze Sequenz ausgesucht werden. Empirisch und anhand der Erfahrung, die in den letzten Jahren mit dem Glottis Analysis Programm gesammelt wurde, wurde eine Sequenz von 60 Zyklen für jeden Patienten genommen. Dies entspricht einem Kompromiss zwischen Reproduzierbarkeit, Stabilität und notwendiger Menge an Information zu Diagnostikzwecken, wie sie von der Analyse von Dysphonien erforderlich sind. In frühere Arbeiten (Havla et al., 2009) wurde die Reproduzierbarkeit und Reliabilität des Phonovibrograms untersucht und für die getesteten Winkelparameter Parametern auch nachgewiesen (α_1 , β_1 , α_2 , β_2). In der vorliegenden Arbeit konnten diese Ergebnisse aber nur bedingt übertragen werden. Die Exaktheit des Verfahrens hängt, wie bereits in früheren Arbeiten festgestellt, extrem von den Abbildungseigenschaften der Kamera ab. Das liegt zum einen an der begrenzten räumlichen und farblichen Auflösung aktueller Sensoren, bei denen bereits ein Quantisierungsfehler von einem Pixel zu einer Unsicherheit der lateralen Amplitudensymmetrie von etwa 10% führt (Lohscheller et al., 2007), zum anderen vom Untersucher, der die Kamera möglichst still und mittig zu halten hat. In Tabelle 7 werden die Parameterwerte von verschiedenen Teilsequenzen einer einzigen HG-Aufnahme als Beispiel dafür dargestellt.

	AmpSym	AmpSymIndex	DynSym	DynSymIndex	PhasAssy	PhasAssyIndex	SpacSym	SpacSymIndex	WaveForIndex
B1 (anfang) (1)	0,985	0,951	0,988	0,952	-0,005	0,007	-0,118	0,118	0,985
B1 (1)(mittel)	1,049	0,928	1,072	0,913	0,002	0,005	-0,059	0,06	0,986
B1 (4) (ende)	0,899	0,894	0,932	0,911	0,023	0,023	-0,073	0,074	0,99
B1 (alles)	0,975	0,929	0,997	0,927	0,004	0,01	-0,082	0,083	0,988
B2 (anfang) (1)	1,031	0,914	1,035	0,914	-0,005	0,007	-0,094	0,096	0,987
C2 (anfang) (1)	0,675	0,675	0,679	0,679	-0,007	0,009	-0,098	0,098	0,975

Tabelle 7 - In dieser Teilsequenz wurden vier verschiedenen Teilsequenzen genommen (die ersten 60 Zyklen, die 60 Zyklen von der Mitte, die letzten 60 Zyklen und die 273 der gesamten Sequenz). Die Abweichung der Ergebnisse der berechneten Parameter zeigt sich zwischen unterschiedlichen Sequenzen mit der einen Methode als auch zwischen einer bestimmten Sequenz mit unterschiedlichen Methoden. Dies bekräftigt das vorhin Gesagte, dass die kleine Varianz innerhalb einer jeden Sequenz zu großen Abweichungen der Symmetrie Parameter führen können.

Anhand der klinischen Erfahrung, (Glottis häufig schräg im Bild und vordere Bereich nicht einsehbar ist), könnte von vornweg vermutet werden, dass eine Methode, die den untersten Punkt des segmentierten Areals der vorderen Kommissur gleichstellt eine realitätsfern Methode wäre. Dass, die Methoden A1-4 im Schnitt, die schlechtere Benotungen erzielen ist damit erklärbar, dass was als vordere Kommissur genommen wird, häufig einfach ein lateraler Punkt der Glottis ist. In den Fällen wo die Glottis komplett abgebildet ist und diese auch senkrecht im Bildsteht, ist diese Methode optimal. Es muss aber auch erwähnt werden, dass wenn die Glottis diese ideale Form/Position annimmt, dann sind alle Methoden auch gleich gut und dementsprechend alle mit einem „1“ benotet. Für die genaue Noten und Standardabweichungen der verschiedenen Mittelachsenbestimmungsmethoden wird auf die Tabelle 7 im Anhang verwiesen.

Insgesamt waren die Methoden B1, B2 und B3 die besten bewerteten Methoden. In dem großen Kollektiv der Patienten war die Benotung dieser Methoden jeweils B1 $1,6 \pm 0,9$, B2 $1,5 \pm 0,8$ und B3 $1,7 \pm 0,8$

Was über den anterioren Punkt gesagt wurde, gilt auch grundsätzlich für den hinteren Punkt. Dieser Punkt kann pauschal schlecht mit der hinteren Kommissur gleichgestellt werden, weil bei einer schrägstehenden Glottis, was als die hintere Kommissur genommen wird, eigentlich ein lateral stehender Punkt ist. Die Praxis hat diese Vermutung bestätigt, in dem die Benotung der Methode B4 (also, **2nd Principal component mit Anterior-Posterior Line (A-P)**) schlechter ausgefallen ist als die Benotung von B1 bis B3. Weil B1 (**2nd Principal component und Centroid-based (C)**) und B2 (**2nd Principal component und Anterior-based (A)**) und adäquate Methoden zur Darstellung des Mittelachsen darstellen, ist die Methode B3 **2nd Principal component mit Average of (A) and (C)** auch eine gute Methode. B3 ist im Grunde der Mittelwert von B1 und B2. Obwohl dies im Einzelfall letzten Endes nicht immer zutrifft, lässt sich dennoch immer wieder zeigen, dass B1 bis B3 gute bis sehr gute Ergebnisse zur Mittelachsenbestimmung liefern.

Die Methode zur Bestimmung des vorderen Punktes „**Lower-Region“ (10 Pixel)** (Kodiert als C1, C2, C3 und C4 ist abhängig davon welche Variante zur Berechnung der Mittellinie ausgesucht wird) scheint weniger versprechend. Ein Stimmlippenpolyp ist eine gutartige Raumforderung, die laut Definition ausschließlich an der freien Kante des vorderen Stimmlippendrittels entsteht (Kleinsasser, 1991) und in 90% der Fälle einseitig auftreten. Die Methode „**Lower-Region“ (10 Pixel)** braucht für die Berechnung des vorderen Punktes den Querabstand zwischen den beiden medialen Kanten der Stimmlippen, der sich 10 Pixel

oberhalb der untersten segmentierten Punkt im Bild befindet. Dies ist dem Bereich wo sich die Stimmlippenpolypen befinden, also im vorderen Drittel der Stimmlippe. Der Querabstand wird sich folglich verringern und zwar asymmetrisch, da 90% der Polypen unilateral auftreten. Somit wird die Mittelachse enorm von einer kleinen Struktur im vorderen Drittel beeinflusst, die in Wirklichkeit keine Einfluss auf das reale Mittelachse hat. Dieselbe Schlussfolgerung kann auch grundsätzlich für die Rinne-Ödeme gezogen werden. Wenn die Rinne-Ödeme sehr ausgeprägt sind, ist eine Segmentierung des vorderen (eventuell sogar des mittleren) Drittel nicht möglich oder ergibt eine extrem schmale Glottisspalte. In dieser Situation ergibt es auch wenig Sinn den Querabstand oberhalb der untersten Konturpunkt als Bezugslinie für die Berechnung der Mittelachse zu wählen. Kontaktgranulome befinden sich fast immer im hinteren Drittel (Kleinsasser, 1991) und da ist die Methode „„**Lower-Region“ (10 Pixel)“** gegenüber dem **2nd Principal component** weder vor- noch nachteilig.

Aus den oben erwähnten Gründen erscheinen die Methoden zur Mittelachsen Bestimmung die auf den **2nd Principal component** basierend, die vielversprechendsten. Von der Berechnung der Mittellinie hat sich gezeigt, dass die **Centroid-based (C)**, **Anterior-based (A)** und **Average of (A) and (C)** die besten Ergebnisse zeigen.

Die berechneten Parameter der besten Methoden zur Mittelachsenbestimmung, wie in der Tabelle 6 erläutert sind, erlauben keinen allgemeinen Rückschluss auf die in Frage kommende Erkrankung noch können für eine eventuell folgenden Kontrolluntersuchung zur Vergleichszwecke gezogen werden.

Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic Range Symmetry Index und WaveformSymmetry Index nähern sich dem Wert 1(eins) in alle Gruppen an. **Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry und Spatial Symmetry Index** nähern sich dem Wert 0 (null) an. Die Pathologien, die Objekt dieser Studie waren, haben einen geringen Einfluss auf die durchschnittlichen Abstände zwischen den freien Rändern der Stimmlippen in Bezug auf die Mittelachse. Dies ist im Allgemein der Fall, weil diese Raumforderungen sowohl relativ klein im Vergleich zur gesamten Stimmlippenlänge sind als auch dadurch, dass diese gutartige Raumforderungen in der Regel die Muskulatur und somit Beweglichkeit der Stimmlippe nicht stark beeinflussen. Zusammenfassend, kann man von einer Symmetrischen Bewegung der

Stimmklappen ausgehen. Bei einer symmetrischen Bewegung der Stimmklappen (Abständen rechts- Mittelachse und links-Mittelachse immer gleich) sollten die Werte der oben genannten Funktionen gleich eins (**Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic Range Symmetry Index und WaveformSymmetry Index**) oder null (**Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry und Spatial Symmetry Index**). Die Tatsache, dass subjektiv gut bewerteten Methoden sich diesen Werten annähern bestätigt die visuelle Beurteilung.

Die Analyse wurde bei allen Krankheitsbildern zusätzlich für Frauen und Männer getrennt durchgeführt. Aufgrund der niedrigen Zahl an Probanden, konnten keine signifikanten Werte zur Unterscheidung zwischen Männer und Frauen ermittelt werden. Die deskriptive Analyse, besonders bei der größten Gruppe (Polypen) wo Männer und Frauen fast gleich verteilt waren, legt nahe, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Symmetrie Parametern auftreten (Tabelle 7).

Polypen	Amplitude Symmetry	Amplitude Symmetry Index	Dynamic Range Symmetry	Dynamic Range Symmetry Index	Phase Asymmetry	Phase Asymmetry Index	Spatial Symmetry	Spatial Symmetry Index	Waveform Symmetry Index
Gesamtgruppe	0.96 ± 0.20	0.82 ± 0.11	0.94 ± 0.21	0.80 ± 0.10	0.03 ± 0.08	0.08 ± 0.03	-0.06 ± 0.14	0.14 ± 0.09	0.92 ± 0.05
Männer	0,98 ± 0,20	0.83 ± 0,09	0.96 ± 0,20	0,82 ± 0,10	0,05 ± 0,07	0,08 ± 0,04	-0,05 ± 0,14	0,13 ± 0,08	0,94 ± 0,05
Frauen	0,95 ± 0,21	0.82 ± 0,12	0,91 ± 0,23	0,78 ± 0,10	0,02 ± 0,09	0,09 ± 0,03	-0,07 ± 0,14	0,14 ± 0,09	0,90 ± 0,04

Tabelle 8 – Teil der bereits in den Ergebnisse vorgelegter Tabelle. Sehr geringe Unterschiede (niedrige einstellige Prozentbereich) zwischen den Parametern.

Einige methodische Verbesserungen könnten die Aussagefähigkeit zukünftiger Arbeiten erhöhen.

- Definierte und standardisierte Untersuchungsbedingungen (z.B. Patient in 90 grad aufrecht sitzend, Lupenlaryngoskopie mittig, links oder rechts lateral der Uvula einführen oder Flexibelendoskopie.)
- Bessere Kameras mit größerer räumlicher und farblichen (entweder mit mehr Graustufen oder mit Farbkodierung) Auflösung (Abb. 24)
- Patienten mit begleitenden Recurrensparese ausschließen (die oben genannten Methoden sowie die Schlussfolgerung für ein adäquates Ergebnis, was die Werte

der Parameter anbezieht, können nicht auf Patienten mit Stimmlippenpareesen übertragen werden (Beispiel Abb. 25)

- Die kleinste Sequenz nehmen, die immer noch aussagefähig genug ist um eine Dysphonie zu beurteilen (z.B. 60 Zyklen?)
- Die Glottis soll eine gewisse objektivierte Größe haben (x Pixel), vollständig abgebildet und sich nur minimal im Bildschirm bewegen (diese Faktoren definieren und bei Wanderung der Glottis außerhalb eine noch zu definieren eingerahmten Areal im Zentrum des Bildes wird die Sequenz verworfen)
- Größere Patientenzahl und zwar mit gesunden Probanden. Mehrere Patienten in unterschiedlichen Zeitpunkten untersuchen und nicht nur einmal vor und nach der Behandlung.
- Der Schwerpunkt sollte auf den Methoden B1, B2 und B3 gesetzt werden. Ausnahme ist falls die Patienten begleitende Diagnosen haben wie z.B. Recurrensparesen oder Stimmlippenhämatome.

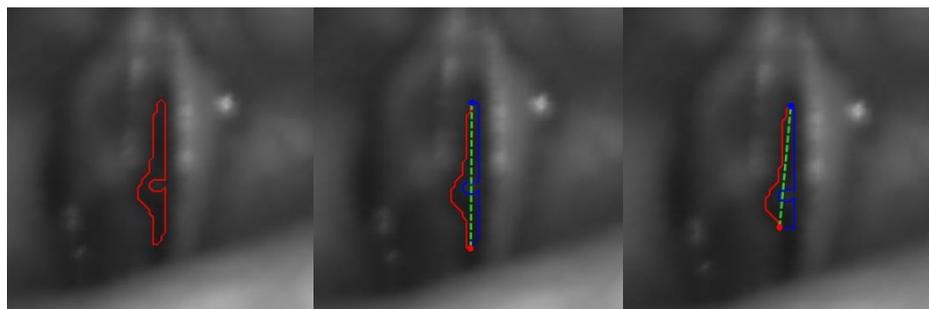


Abb. 24 - A. Im Bild A anhand der eingezeichneten Kontur könnte den Eindruck gewonnen werden, dass auf der linken Stimmlippe eine Raumforderung in die Stimmritze hinein wächst. In diesem Patient ist aber ein Stimmlippenpolyp auf der rechten Stimmlippe zu sehen und nicht auf der linken Seite. Auf der linken Stimmlippe handelt es sich um eine Artefakt, die durch ein begleitendes Stimmlippenhämatom bedingt ist. Hier werden die Grenzen der benutzten Kamera verdeutlicht. Eine höhere Auflösung oder Farbcodierung hätte wahrscheinlich das Auftreten dieses Artefakts vermieden können. **B.** Ein fast optimales Ergebnis. Hier wird die Methode C1 benutzt und die Mittelachse wird zufriedenstellend berechnet. Wenn man die Anomalie der Kontur auf der linken Seite ignoriert, kann man erkennen, dass im mittleren Drittel der rechten Stimmlippe der Polyp die Stimmritze einengt. **C** – Hier mit dem Methode A1. Die Mittelachse wird hier falsch berechnet. Die gestielte Anomalie der Kontur nimmt einen großen Einfluss auf die Berechnung der Mittelachse mittels A1.

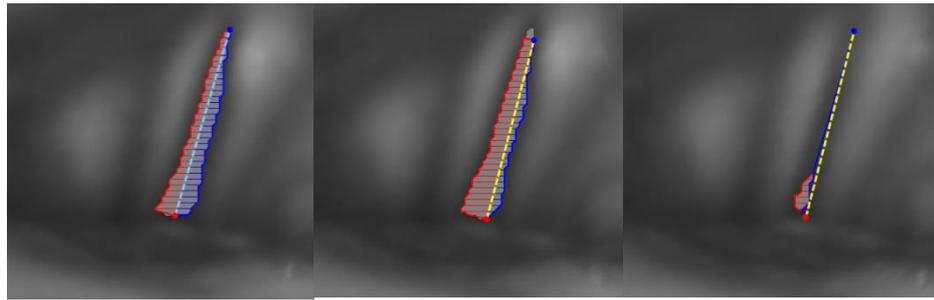


Abb. 25 – A. Das Bild A gibt den Eindruck, dass die Mittelachse mit der Methode B3 fast **optimal berechnet ist. Die Stimmlippen sind beide ungefähr gleich von der Mittellinie entfernt.** In dieser Berechnung der Mittelachse wird aber nicht ins Kalkül gezogen, dass eine der Stimmlippen steht. Hier in diesem Patient besteht eine Recurrensparese und somit bei der Phonation steht die linke Stimmlippe in Paramedianstellung. B – Im zweiten Bild ist andersrum eine deutliche bessere Mittelachse berechnet (hier C2). Die linke Stimmlippe liegt Paramedian, wenigen Millimeter von der eigentliche Mittellinie entfernt. Die rechte Stimmlippe, mit regelrechter Beweglichkeit entfernt sich der Norm entsprechend von der Mittellinie. C – Im Bild C wird die Mittelachse auch mit C2 berechnet. Hier sind die beiden Stimmlippen dargestellt. Die linke Stimmlippe steht in derselben Position, die rechte Stimmlippe hat sich angenähert.

6. Fazit

In dieser Arbeit wurden die verschiedenen Methoden zur Mittelachsenbestimmung untersucht. Von den zwölf Methoden, die das Programm Glottis Analysis Tools imstande zu generieren ist, waren die Methoden B1, B2 und B3 die besten. Das galt allerdings nur für die Glottis, deren Stimmlippen sich symmetrisch bewegen. Auf Pathologien, bei denen die Symmetrie gestört ist, wie zum Beispiel Paresen des Nervus laryngeus recurrens, Nervus laryngeus superior, Nervus Vagus, Mindermotilität einer Stimmlippen infolge von Synechien oder Tumoren, können diese Ergebnisse nicht übertragen werden. Die Genauigkeit der Technik wird stark vom räumlichen und farblichen Auflösungsvermögen der benutzten Kamera begrenzt.

Die Berechnung der Parameter bestätigt die visuelle Beurteilung der Methoden indem sich die tatsächlich berechneten Werte sich den Werten, die von der Funktionen bei einer symmetrischen Methode zu erwarten wären, annähern. **Amplitude Symmetry, Amplitude Symmetry Index, Dynamic Range Symmetry, Dynamic Range Symmetry Index und Waveform Symmetry Index nähern sich** dem Wert **1** (eins) in alle Gruppen an. **Phase Asymmetry, Phase Asymmetry Index, Spatial Symmetry und Spatial Symmetry Index** nähern sich dem Wert **0** (null) an. Diese sind die erwarteten Werte bei einer symmetrischen Bewegung der Stimmlippen und bestätigen die visuelle Beurteilung der Methoden.

Die getrennte Analyse für Männer und Frauen ergibt keine signifikanten Unterschiede der Symmetrie. Ob das allein an der niedrigen Anzahl an Probanden liegt ist nicht zu beurteilen. Eine Konstanz der Symmetrie Parameter kann entlang großer Sequenzen nicht festgestellt werden. Dies könnte durch eine ruhigere Stellung der Kamera sowie durch bestimmte Qualitätsanforderungen an Hochgeschwindigkeitsvideos, bevor die Segmentierung stattfindet, verbessert werden.

Es wurden neue Erkenntnisse im Bereich der objektiven (semi-)automatisch Beurteilung der pathologisch veränderten Stimmlippen und der Stimme gesammelt. Diese Erkenntnisse bringen uns einen Schritt weiter an das langfristige Ziel, die Stroboskopie im ELS-Protokoll durch das PVG zu ersetzen.

7. Literaturverzeichnis

Eysholdt U (2014) Heiserkeit: Biomechanik und quantitative Laryngoskopie. HNO. 62:541-552

Van den Berg JW (1958) Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. J Speech Hear Res 1:227-244

Havla J, Döllinger M, Eysholdt U, Lohscheller J (2009) Reproduzierbarkeit und Reliabilität des Phonovibrograms: Quantifizierung gesunder Stimmlippenschwingungen. HNO 57:160-168

Hoppe U (2001). Mechanisms of hoarseness-visualization and interpretation by means of nonlinear dynamics. Habilitationsschrift. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Nawka T, Anders LC, Wendler J (1994) Die auditive Beurteilung heiserer Stimmen nach dem RBH-System. Sprache Stimme Gehör 18:130-133

Lohscheller J, Eysholdt U, Toy H, Döllinger M (2008) Phonovibrography: Mapping High-Speed Movies of Vocal Fold Vibrations Into 2-D Diagrams for Visualizing and Analyzing the Underlying Laryngeal Dynamics. IEEE Transactions on Medical Imaging 27:300-309

Gloger O, Lehnert B, Schrade A, Völzke H (2014) Fully Automated Glottis Segmentation in Endoscopic Videos Using Local Color and Shape Features of Glottal Regions. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 62(3):795-806.

Schüssler J, Bonkowsky V (2009) Untersuchung des Larynx und der Trachea. In Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie. Strutz J, Mann WJ. Thieme 103-117.

Olthoff A, Woywod C, Kruse E (2007) Stroboskopie versus high-speed glottography: a comparative study. Laryngoscope 117:1123-1126.

Dejonckere PH, Bradley P, Clemente P, Cornut G, Crevier-Buchman L, Friedrich G, Van De Heyning P, Remacle M, Woisard V (2001). A basic protocol for functional assessment of voice pathology, especially for investigating the efficacy of (phonosurgical) treatments and evaluation new assessment techniques. Guideline elaborated by the Committee on Phoniatrics of the European Laryngological Society (ELS) Eur Arch Otorhinolaryngol 258:77-82.

Friedrich G, Dejonckere P (2005) The voice evaluation protocol of the European laryngological society (ELS) – the first results of a multicenter study. *Laryngorhinootologie* 84:744-752.

Eysholdt U, Lohscheller J (2008) Phonovibrogramm: Stimmlippedynamik in einem Bild. *HNO* 56:1207-1212.

Schade G, Müller F (2005) Hochgeschwindigkeitsglottographische Diagnostik in der Laryngologie. *HNO* 53:1085-1091

Richter B, Wittenberg T, Dippold S, Löhle E, Tigges M (2005) Praktische Anwendung der Hochgeschwindigkeitsglottographie bei Sängern. *Sprache Stimme Gehör* 29:23-28.

Neubauer J, Mergell P, Eysholdt U, Herzel HP (2001) Spatio-temporal analysis of irregular vocal fold oscillations: biphonation due to desynchronization of spatial modes. *J Acoust Soc Amer* 110:3179-3192.

Lohscheller J, Toy H, Rosanowski F, Eysholdt U, Döllinger M (2007) Clinical evaluated procedure for the reconstruction of vocal fold vibrations from endoscopic digital high-speed videos. *Med. Image Anal.* 11(4):400-413.

Bohr C, Kräck A, Dubrovskiy D, Eysholdt U, Svec J, Psychogios G, Ziethe A, Döllinger M (2014) Spatiotemporal Analysis of High-Speed Videolaryngoscopic Imaging of Organic Pathologies in Males. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 57:1148-1161

Unger J, Meyer T, Herbst C, Fitch WT, Döllinger M, Lohscheller J (2013) Phonovibrographic waegrams: Visualizing vocal fold kinematics. *J. Acoust. Soc. Am.* 133(2):1055-1064

Olthoff A, Woywod C, Kruse E (2007) Stroboscopy versus high-speed glottography: a comparative study. *Laryngoscope* 117:1123-1126.

Kleinsasser O (1991) Mikrolaryngoskopie und endolaryngeale Mikrochirurgie. Technik und typische Befunde, 3. Auflage, Schattauer.

Inwald EC, Döllinger M, Schuster M, Eysholdt U, Bohr C (2010) Multiparametric Analysis of Vocal Fold Vibrations in Healthy and Disordered Voices in High-Speed Imaging. *Journal of Voice* 25(5):575-590.

8. Anhang

PROBANDEN	GESCHLECHT	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
P1	W	5	5	4	4	5	5	5	5	1	2	3	1
P2	M	1	2	2	3	1	2	2	3	3	3	4	4
P3	M	1	3	2	4	1	2	2	4	2	2	2	4
P4	M	2	2	2	3	1	1	1	2	1	1	1	1
P5	W	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	3	3
P6	M	1	1	1	2	2	2	2	2	2	4	4	4
P7	M	1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1
P8	M	2	2	1	2	1	1	1	2	4	3	3	4
P9	W	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2	2
P10	M	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	1	2
P11	W	2	2	2	3	2	2	2	3	1	1	1	3
P13	W	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2
P14	W	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
P15	W	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
P17	M	1	4	4	4	1	2	3	1	5	2	3	2
K2	M	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K2'	M	1	1	1	3	1	1	1	1	2	2	2	1
K3	M	1	1	1	2	1	1	1	2	3	3	4	3
K4	W	2	2	2	1	1	1	2	1	1	2	2	1
Z1	M	3	3	4	3	2	1	2	1	2	1	3	2
Z2	W	1	3	2	3	1	2	2	3	2	2	1	3
Z3	M	3	2	1	2	3	3	2	3	3	1	2	2
Z4	W	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2
Z5	W	2	2	2	1	3	2	2	1	2	2	3	1
R1	W	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R2	W	4	4	4	4	2	2	3	3	4	4	3	2
R5	W	2	2	2	3	1	1	1	2	2	2	2	3
R6	W	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
R7	W	2	2	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1
R8	W	3	3	3	2	2	1	1	1	2	2	2	2
R9	W	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2
R9'	W	1	1	1	4	1	1	1	3	1	1	2	3
R12	W	2	1	1	3	1	1	1	3	1	2	2	3
R13	W	1	1	1	3	3	2	2	3	3	4	4	5

Tabelle 4 – Teil 1 – P: Polypen, K: Kontaktgranulome, Z: Zysten, K: Kontaktgranulome. M:Männer, W: Frauen, Benotung von 1 bis 5 wie in den Methoden (Seite 23).

PROBANDEN	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P1	2	3	3	1	1	2	2	3408	230
P2	2	3	2	1	1	2	1	3221	121
P3	2	4	3	2	1	2	2	2565	90
P4	1	3	4	2	3	2	2	1421	146
P5	1	2	2	3	1	2	2	1615	80
P6	2	3	4	2	5	3	2	4255	351
P7	1	3	4	2	3	2	2	6477	326
P8	1	3	3	1	5	3	2	2021	111
P9	1	5	5	2	4	5	5	2316	164
P10	1	3	2	1	1	2	2	2112	139
P11	1	1	1	1	2	2	2	6248	450
P13	1	1	2	2	3	2	2	1966	113
P14	1	1	1	1	2	2	2	3900	192
P15	1	2	2	1	2	3	2	5013	389
P17	2	4	5	2	5	2	2	5571	328
K2	1	1	2	1	1	2	2	4172	225
K2'	1	1	2	1	1	2	2	2026	62
K3	1	2	3	3	5	2	2	2164	105
K4	1	1	1	1	3	2	2	2753	250
Z1	1	2	3	2	5	2	1	4173	159
Z2	1	3	3	1	1	2	2	524	33
Z3	1	2	3	3	1	2	2	3103	140
Z4	2	3	3	2	3	2	2	1977	146
Z5	2	3	4	3	1	2	2	1344	98
R1	1	1	2	3	3	2	2	2655	165
R2	1	3	3	3	1	2	1	3266	216
R5	1	2	2	1	3	2	1	1705	115
R6	1	2	1	1	3	2	2	2453	144
R7	1	2	2	2	5	2	2	3165	201
R8	3	4	4	3	1	2	1	1282	74
R9	1	2	2	1	2	2	1	3867	273
R9'	1	1	1	1	2	2	2	4151	244
R12	1	2	3	4	3	2	2	1759	69
R13	2	1	1	3	3	2	1	4131	145

Tabelle 4 – Teil 2 – 2: Aufnahme, 3: Schärfe, 4: Helligkeit/Kontrast, 5: Schwingung, 6: Glottisschluss, 7 – Randkantenverschiebung, 8 – Schleimablagerung, 9 – Anzahl der Frames, 10 – Anzahl der Zyklen. (Seite 24)

9. Danksagung

Besonderen Dank möchte ich Herrn **Professor Dr. med Christopher Bohr** und Herrn **Professor Dr.-Ing. Michael Döllinger** aussprechen, für die Vergabe des Themas und die kompetente Betreuung.

Des Weiteren möchte ich mich für die intensive und zuverlässige Unterstützung sowie für die konstruktive Beratung bei meinem Betreuer Herr **Dipl.-Ing. Denis Dubrovskiy** bedanken.

Herrn **Prof. Dr. Dr. h.c. H. Iro** danke ich für die Möglichkeit an seiner Klinik zu Dissertieren.

10. Lebenslauf

Name: Miguel Henrique de Jesus Gonçalves
Geburtsdatum / Ort: 03.09.1990 / Coimbra
Familienstand: Ledig
Staatsangehörigkeit: Portugieser

Schul- und Berufsausbildung:

2008 Abitur in Colégio da Rainha Santa Isabel

2008-2014 Integrierter Master in Humanmedizin an der Universität Coimbra

Berufserfahrung und Ausbildung:

2014-

- Assistenzarzt an der HNO Klinik, Kopf- und Halschirurgie des Universitätsklinikums Erlangen

2013/2014

- Mastersarbeit: „Wiederherstellung der Ohrmuschel nach Entfernung von Hauttumoren“
- Praktisches Jahr im Klinikum Augsburg – Akademisches Lehrkrankenhaus der LMU München

2011/2012

- ERASMUS Jahr an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (zwei Semester)

Auszeichnungen

- Preis für die 3% besten Studenten der Universität Coimbra 2009/2010
- Preis für die 3% besten Studenten der Universität Coimbra 2010/2011
- Preis für die 3% besten Studenten der Universität Coimbra 2011/2012
- Preis für die 3% besten Studenten der Universität Coimbra 2012/2013
- Preis für die 3% besten Studenten der Universität Coimbra 2013/2014

Sprachen

Portugiesisch: Muttersprache

Deutsch: fließend in Wort und Schrift

Englisch: fließend in Wort und Schrift

Spanisch: gut

11. Erklärung der Eigenständigen Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die Dissertation selbständig angefertigt habe.

Außer der von mir angegebenen Hilfsmitteln habe ich keine weiteren verwendet und alle Erkenntnisse die aus den Hilfsmitteln/Literaturangaben übernommen worden sind, sind als solche gekennzeichnet.

Ich habe bisher noch nie an einer Doktorprüfung teilgenommen.

Die vorliegende Dissertation wurde nicht in gleicher oder ähnlicher Form, zur Erlangung eines akademischen Grades, bei einem anderen Institut eingereicht.

.....

Miguel Henrique de Jesus Gonçalves