Bewegungsanalyse der Pharyngo-Ösophagealen Schleimhaut

Thomas Wittenberg*, Robert Frischholz♠, Jan Ernst♠,
Corina van As◇, Frans Hilgers◇, Monika Tigges* und Ulrich Eysholdt*

*Abt. für Phoniatrie und Pädaudiologie, Klinikum der Universität Erlangen,
Bohlenplatz 21,91054 Erlangen
♠DCS Dialog Communication Systems AG, Am Wetterkreuz 19a, 91058 Erlangen,
◇ Dept. of Otolaryngology-Head & Neck Surgery, Netherlands Cancer Institute,
Plesmanlaan 121, 1066 CX Amsterdam, Holland
Email: thomas.wittenberg@phoni.med.uni-erlangen.de

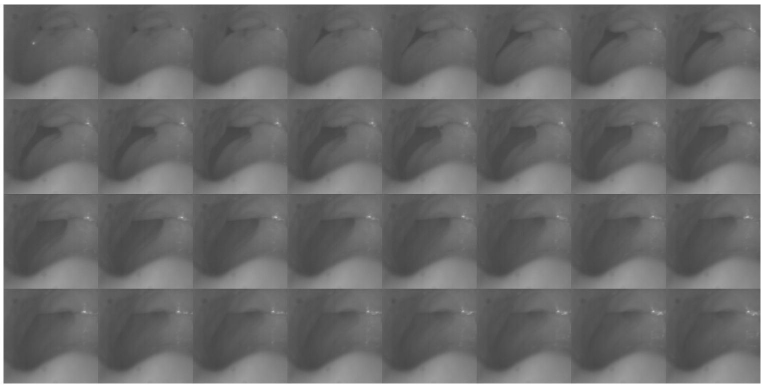
Zusammenfassung. In dieser Arbeit werden aktiven Konturen verwendet, um die wellenförmigen Bewegungen des pharyngo-ösophagealen Segmentes während der Phonation mit einer Stimmventilprothese zu beschreiben. Zur Parametrisierung der Schwingungen werden die Kurvenparameter Umfang, Fläche sowie Zirkularität als Funktionen der Zeit berechnet. Aus diesen Parametern läßt sich zudem die Grundfrequenz f_0 der pharyngo-ösophagealen Schleimhautbewegung ermitteln.

Schlüsselwörter: Bewegungsanalyse, Aktive Konturen, Stimmrehabilitation

1 Einleitung

Im fortgeschrittenen Stadium eines Kehlkopfkarzinoms muß der gesamte Kehlkopf operativ entfernt werden. Durch diese Laryngektomie stehen für die verbale Kommunikation keine Stimmlippen mehr als Klanggenerator zur Verfügung. Bei der Operation erfolgt zudem eine vollständige Trennung von Luft- und Speiseröhre, zum Atmen wird im vorderen Halsbereich eine Öffnung (*Tracheostoma*) zur Luftröhre eingerichtet. Der Atemluftstrom steht damit für eine mögliche Stimmproduktion nicht mehr direkt zu Verfügung [1].
Für die Patienten ist nach einer solchen Operation die Rehabilitation der Stimme zur Möglichkeit der Kommunikation eine wichtiges Ziel. Zu diesem Zweck werden seit ca. zwei Jahrzehnten vermehrt Stimmprothesen eingesetzt. Wegen ihrer guten Stimmqualität werden heutzutage insbesondere die sog. Niederdruckventilprothesen verwendet [3]. Diese sitzen auf der Höhe des Tracheostomas und bilden bei Bedarf eine künstliche Verbindung zwischen Luft- und Speiseröhre. Wenn der Patient das Tracheostoma mit einem Finger verschließt, öffnet sich das Ventil der Prothese und der auströmende Atemstrom fließt durch das Prothesenventil über die Speiseröhre in die Mundhöhle. Damit wird die Schleimhaut am oberen Ende der Speiseröhre, dem sog. *pharyngo-ösophagealen (PE) Segment* in Schwingung versetzt [5].
Durch die Verwendung einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera ist es möglich, die Schleimhautbewegungen im PE-Segment aufzunehmen. Im Gegensatz zu

Abb. 1. Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des schwingenden PE-Segmentes bei der Phonation mit Stimmventilprothese, Aufnahmerate $T_s = 1987$ Bilder/sek, Δt zwischen zwei Bildern 5.03 ms, räumliche Auflösung: 128 × 128 Pixel.



anderen bildgebenden Verfahren zu Erfassung schneller Bewegungen wie z.B. der Video-Stroboskopie oder der Video-Kymographie, können die irregulären Schwingungen des PE-Segmentes aufgrund der digitalen Bildsequenzen nicht nur qualitativ [1, 5, 4] sondern auch quantitativ beschrieben werden.
Zusammen mit dem holländischen Krebs-Institut wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von laryngektomierten Patienten mit einer Prothese vom Typ *Provox TM* [3] durchgeführt, um die Vibration des Speiseröhrenendes zu untersuchen. Das Ziel dieser Studie ist ein vertieftes Verständnis der Mechanismen bei der tracheo-ösophagealen Phonation.
Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt einer solchen Aufnahme. Man blickt von oben in Rachen und sieht den Übergang von der Speiseröhre zum Rachenraum. Die obere Öffnung der Speiseröhre erscheint als dreieckige Öffnung. Neben einer mediolateralen Bewegung der Schleimhaut ist eine ausgeprägte kreisförmige Schleimhautwelle zu beobachten. Diese Welle kommt aus den tieferen Schichten der Speiseröhre und wandert nach oben bis zum Speiseröhrenende [5].

2 Bewegungsanalyse

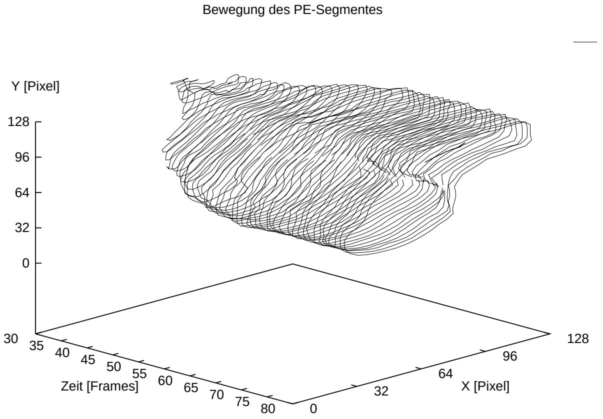
Zur Berechnung der räumlichen Ausdehnung des PE-Segmentes sowie dessen geometrische Veränderung über die Zeit wurde das Programm *RegionTrack*© der Firma Mikromak verwendet. Dieses Programm verwendet aktive Konturen (*Snakes*) [2, 6], um die Bewegung einer zusammenhängenden Fläche — im vorliegenden Fall das PE-Segment — aus einer Bildfolge zu extrahieren. Eine Kontur K besteht aus einer Menge von Knotenpunkten $V = \{v_1, v_2, ..., v_n\}$, von denen jeweils zwei benachbarte v_i und v_{i+1} durch eine Kante miteinander verbunden sind. Jeder Knoten v_i läßt sich innerhalb eines Einzelbildes bezüglich eines definierten Nullpunktes eindeutig durch einen Positionsvektor $v_i = (x_i, y_i)$ beschreiben. Im vorliegenden Fall wurde eine Kontur mit $n = 60$ Knoten verwen-

det. In Analogie zu physikalischen Systemen besitzt eine Kontur eine sog. Konturenergie: $E_{Snake} = \alpha E_{elastic} + \beta E_{bend} + \gamma E_{image}$, bestehend aus den zwei internen Energietermen $E_{elastic}$ und E_{bend} sowie der externen Energie E_{image}. Die Terme $E_{elastic}$ und E_{bend} repräsentieren die inneren Eigenschaften Elastizität, Steifigkeit sowie die Krümmungsfähigkeit einer Kontur. Die externe Energie E_{image} beschreibt dagegen den äußeren Einfluß auf eine Kontur K, also die Form und Position des zu beschreibenden PE-Segmentes. Durch ein iteratives Energie-Minimierungsverfahren, im vorliegenden Fall mit dem *Greedy-Algorithmus*, wird die Position jedes Knotens v_i und damit die zugehörige Knotenenergie iterativ variiert, bis die Gesamtenergie E_{snake} minimal ist. Das Iterationsverfahren wird abgebrochen, wenn sich entweder die Gesamtenergie E_{snake} nicht mehr ändert oder eine vordefinierte Anzahl von Iterationsschritten durchlaufen wurde. Alle Energieterme wurden einheitlich mit $\alpha = \beta = \gamma = 1.0$ gewichtet.
Die Startkontur $K_{t=0}$ wird im Anfangsbild manuell mit der Maus eingezeichnet, wahlweise freihändig oder als Ellipse. Anschließend wird diese Kontur automatisch iterativ an die reale Kontur des PE-Segmentes angepaßt. Für alle weiteren Bilder wird die Kontur K_{t-1} des vorherigen Bildes als Startkontur verwendet. Der Benutzer kann zu jedem Zeitpunkt der Konturberechnung korrigierend eingreifen, d.h. jeder einzelne Knotenpunkt einer Kontur kann manuell mit Hilfe der Maus verschoben werden.
Abb. 2 zeigt eine Folge von berechneten Konturen des PE-Segmentes. In dem vorliegenden Beispiel bewegen sich die Schleimhautfalten des Hypopharynxtrichters zu Beginn einer Schwingungsperiode über ca. 7.5 ms seitlich auseinander, vgl. auch Abb.1. Die Schleimhautwelle hat ihren Ursprung in den tieferen Abschnitten des Ösophagus und pflanzt sich bis zur Öffnung des Hypopharynxtrichters nach kranial fort [4]. Die dabei entstehende Öffnung besitzt in diesem Beispiel eine elliptische Form. Über ca. 15 ms bleiben Position, Form und Umfang dieser Öffnung relativ konstant, anschließend wird eine neue Schleimhautwelle sichbar.

3 Frequenzanalyse

Zur Approximation der Grundfrequenz f_0 der pharyngo-ösophagealen Schleimhautbewegung werden separat zu jeder Kontur der zugehörige Konturumfang $U = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 (y_i - y_{i-1})^2}$, die Fläche A der Kontur $A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} (x_i y_{i+1}) - (x_{i+1} y_i)$ sowie die *Zirkularität* $Circ = \frac{4\pi A}{U^2}$ berechnet. Die Grundfrequenz f_0 der pharyngo-ösophagealen Schleimhautbewegung läßt sich aus dem Maximum des Leistungsdichte-Spektrums des Umfangs als auch der Fläche bestimmen. In der Praxis hat sich allerdings die Verwendung des Mittelwertes $f_0 = \frac{f_A + f_U}{2}$ bewährt.
Die Zirkularität ist ein Rundheitsmaß für die jeweiligen Kontur, ein Wert von 1 bezeichnet einen exakten Kreis, kleinere Werte beschreiben gestreckte, ellipsenförmige Polygone. Abb.3 zeigt die Änderung von Umfang, Fläche und Zirkularität als Funktionen der Zeit. In dem dargestellten Zeitraum von 450 ms läßt sich eine periodische Wiederholung der Schleimhautbewegung beobachten. Im vorliegenden Beispiel beträgt die berechnete Grundfrequenz $f_0 = 42$ Hz.

Abb. 2. Eine einzelne Periode der Bewegung des PE-Segmentes während der Phonation mit Stimmventilprothese: Der Umfang der Speiseröhre nimmt an der beobachteten Stelle über ca. 15 ms zu und bleibt anschließend über ca. 30 ms konstant



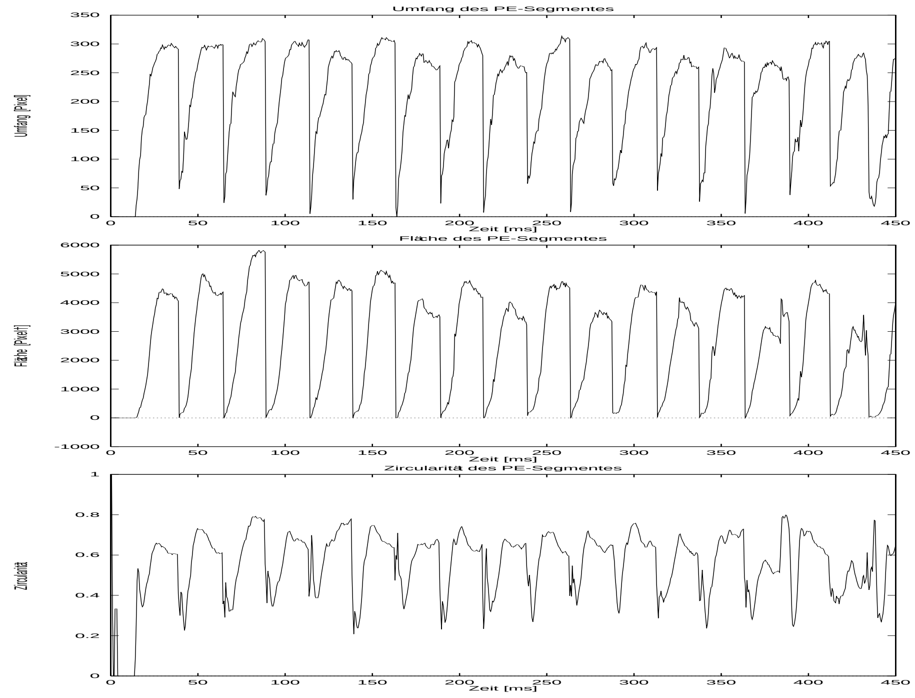
4 Diskussion

Im Gegegensatz zur automatischen Bewegungsanalyse von Stimmlippenschwingungen lassen sich bei der rechnergestützten Schwingungsanalyse der pharyngoösophagealen Schleimhautbewegung mithilfe aktiver Konturen keine lokalen Bewegungstrajektorien an bestimmten Punkten, sondern nur globale Parameter wie die Flächen- bzw- Umfangsänderungen als Funktion der Zeit bestimmen. Diese Parameter genügen jedoch, um die Grundfrequenz der Schleimhautbewegung zu berechnen.
Der einzige Nachteil an dem vorgestellten Verfahren ist die notwendige Benutzerinteraktion während der Konturberechnung. Eine solche Interaktion ist derzeit noch an zwei Stellen notwendig: (1) Zu Beginn einer jeder neuen Schwingungsperiode muß der Anwender die Startkontur neu um den Beginn der Schleimhautwelle setzten, da ansonsten die aktuelle Kontur an der Außenwand des Hypopharynxtrichters liegen bleibt. (2) Da die Konturen der Schleimhautwellen nicht immer klar in jedem Einzelbild ersichtlich ist, entstehen vereinzelt Rechenartefakte in den berechneten Konturen. Diese Artefakte müssen vom Benutzer manuell beseitigt werden. Diese beiden Aspekte sollen in nächster Zeit durch eine wissensbasierte Programmerweiterung berücksichtigt werden, um den Analysevorgang effizienter zu gestalten.

Literatur

1. van As C, Tigges M, Hilgers F, Eysholdt U: Oesophageal Vibration in Voice Rehabilitation after Laryngectomy, in: *Advances in Quantitative Laryngoscopy*,

Abb. 3. Umfang, Fläche, und Zirkularität des PE-Segmentes als Funktionen der Zeit, es ist eine periodische Schwingung zu erkennen, die Grundfrequenz der Schwingung beträgt 42 Hz.



Wittenberg T, Mergell P, Tigges M, Eysholdt U (Eds.), Verlag Abt. Phoniatrie, 95–102,1997.

2. Kass M, Witkin A, Terzopoulus D, Snakes: Active Contour Models, Int.J.of Comp.Vision, 321–331, 1988.
3. Hilgers F, Schouwenburg PF: A new low-resistance self-retaining prothesis (*PROVOX TM*) for voice rehabilitation after total laryngectomy,Laryngoscope 100(11),1202–1207, 1990.
4. Tigges M, van As C, Wittenberg T, Hilgers F, Eysholdt U: Direkte Beobachtung der tracheoösophagealen Phonation bei 46 Laryngektomierten, in *Aktuelle phoniatrisch-padaudiologische Aspekte (APPA) 1997, Band 6*, Gross M (Ed), Median Verlag, Heidelberg, in print.
5. Tigges M, Wittenberg T, Mergell P, Eysholdt U: Phonationsmechanismus der Ersatzstimme nach Stimmventilprotheseneinlage, in: *APPA 1997, Band 5*, Gross M (Ed), Median Verlag, Heidelberg, 152–156, 1998.
6. Wittenberg T, Tigges M, Mergell P, Eysholdt U: Bewegungsanalyse von Stimmlippenschwingungen mittels aktiver Konturen (Snakes): Ein neuer Ansatz zur automatischen Extraktion von Beurteilungsparametern zur Stimmdiagnose, in: *APPA 1996, Band 4*, Gross M, Eyshold U (Hrsg), Verlag Abteilung Phoniatrie, Göttingen, 8–10, 1997.