

Musikalische und medizinische Aspekte der Stimme

Malte Kob

*Lehr- und Forschungsgebiet für Phoniatrie und Pädaudiologie
RWTH Aachen – Universitätsklinikum, Pauwelsstraße 30, D-52074 Aachen*

Einleitung

Die menschliche Stimme ist in vielerlei Hinsicht ein bemerkenswertes Objekt wissenschaftlicher Betrachtungen. Zum einen bildet sie für viele Formen der Musik ein oft zentrales Element, zum anderen ist sie für die Kommunikationsfähigkeit zwischen Menschen fast unersetzlich.

Als Musikinstrument ist die Singstimme ein extrem vielseitiges Organ, sowohl was den Tonumfang des geübten Sängers betrifft als auch hinsichtlich der Klangvielfalt. Neben den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Stimme als Chor zur Begleitung entfaltet sie als Soloinstrument im Lied oder Jazz eine einzigartige Ausdruckskraft. Sogar mehrstimmige Melodieführungen sind mit besonderen Techniken wie dem Obertongesang erlernbar.

Wenn die Stimme versagt oder ihre Fähigkeit zur Vermittlung von Informationen verliert, wie bei Menschen mit Heiserkeit oder Stimmerkrankungen, fällt auf, wie sehr wir uns auf eine funktionierende Stimme verlassen. Sei es bei der Verwendung von mittlerweile weit verbreiteten Kommunikationssystemen mit Stimmerkennung (Telefon-Banking, Hotline von Firmen etc.) oder bei der intensiven Nutzung der Stimme als Berufssprecher (z.B. Lehrer, Moderator, Sänger oder Schauspieler): sollte die Stimme nicht mehr „normal“ sein, bedeutet dies eine erhebliche Einschränkung der Lebensqualität und führt bei Berufssprechern nicht selten zu einem vorzeitigen Ende der beruflichen Laufbahn.

In Ergänzung zu optischen Verfahren lassen sich mit Hilfe etablierter akustischer Verfahren wie der Stimmschallanalyse oder der Ultraschallanalyse sowie der erst in den letzten Jahren entwickelten Impedanzmessung der Artikulationsorgane die Funktion der gesunden Stimme und die charakteristischen Eigenschaften pathologischer Stimmen untersuchen.

Mit Modellen der Stimmerzeugung können die Einflüsse verschiedener Krankheiten auf die Schwingungsfähigkeit der Stimmlippen untersucht und hörbar gemacht werden. Hier bieten neuartige technische Möglichkeiten eine sehr spannende Verbindung zur Medizin durch die Realisierung medizintechnischer Diagnose- und Therapieverfahren für Stimmkrankheiten.

Wozu Stimmakustik?

Als Hilfe zur Einordnung des Themas „Stimmakustik“ in die bereits vielfältige Landschaft akustischer Gebiete sei zunächst eine Betrachtung dieses Themas aus zwei Perspektiven gestattet, aus dem Blick der Medizinischen Praxis und der Ingenieurwissenschaften.

Medizinische Anwendung

In der Medizin wird das Thema „Stimme“ in Längs- und Querschnitts-Studien von Patienten mit Stimmstörungen und der Anwendung von Methoden für Diagnose und Therapie behandelt. Ein besonderer Aspekt ist hierbei die Wahrung des Datenschutzes, da die Stimme – ähnlich einem Photo – eine eindeutige Erkennung eines Menschen erlaubt.

Akustische Themen mit Bezug zur Stimme sind hier Kommunikationsstörungen, die Anwendung von Geräten zur Diagnose und Therapie von Stimmstörungen, der weite Bereich des Arbeitsschutzes von Berufssprechern und Sängern sowie die Klassifikation von Stimmpathologien.

Ingenieurwissenschaften

Einen Schwerpunkt bei der Beschäftigung mit der Stimme in den Ingenieurwissenschaften stellt die Entwicklung und Optimierung von Analyse- und Syntheseverfahren dar. Für die Anwendung im phoniatischen oder logopädischen Bereich ist die Entwicklung von Diagnose- und Therapieverfahren das Ziel, wobei – je nach Art und Größe der Einrichtung – die Produktentwicklung von der Idee über die Machbarkeitsstudie bis zur Prototypfertigung geschieht.

An akustischen Methoden kommen Algorithmen zur Stimmanalyse und Artikulationsanalyse zum Einsatz, wobei auch spezielle, für die Erfassung der stimmlichen Belastung von Berufssprechern geeignete Methoden der Dosimetrie verwendet werden. Ein weiterer wichtiger Bereich der Grundlagenforschung ist die Entwicklung und Erprobung von Modellen der Stimm- und Spracherzeugung.

Auf mehrere in der Praxis der Stimmforschung, -diagnose und -therapie verwendete Verfahren wird in folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Funktion der Stimme

Physiologie der Stimmorgane

Unter Physiologie versteht man die funktionsbezogene Beschreibung der Anatomie. Für die Stimme können verschiedene Funktionseinheiten identifiziert werden, die in Relation zur Stimmgebung, ihrer physikalischen Funktion und ihrer biologischen Implementierung charakterisiert sind. In Abbildung 1 sind der Ablauf der Stimmerzeugung und die beteiligten Komponenten dargestellt.

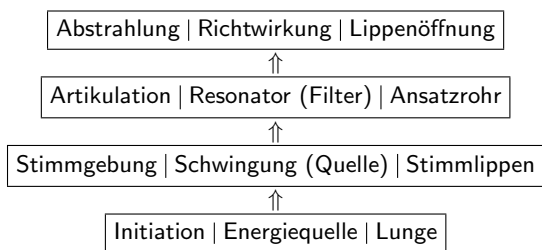


Abbildung 1: Komponenten der Stimmerzeugung (Funktion für die Stimmerzeugung | Physikalische Bedeutung | Organ)

In Abbildung 2 ist die Lage der Stimmorgane im menschlichen Körper schematisch dargestellt. Als weitere Komponente ist die bei der Stimmerzeugung insbesondere zur Produktion zeitvarianter Stimmsignale für die Bildung von Sprache oder Gesang sehr komplexe Steuerung der Stimmorgane nötig, welche zentral vom Gehirn vorgenommen wird. Auf diesen für die Entstehung der Sprechstimme sowie zum Verständnis von Sprach- und Sprechstörungen sehr wichtigen Bereich wird in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen. Der Schwerpunkt wird hier auf die Beschreibung der für die Bildung des Stimmklangs nötigen Organe und ihrer Funktionen gelegt.

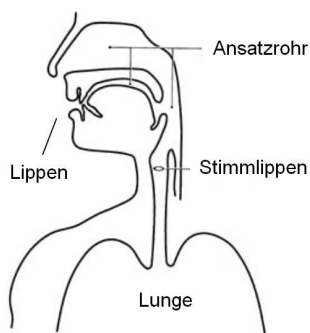


Abbildung 2: Organe für die Stimmerzeugung

Beispielhaft für den Signalfluss zwischen Stimmlippen und Mund bei der Stimmerzeugung ist in Abbildung 3 die Ansatzrohr-Filterung des durch die Volumenstrommodulation an der Glottis erzeugten Stimmsignals gezeigt. Die bei anhaltender Phonation an der Glottis erzeugte Pulsfolge wird bei der Ausbreitung durch das Ansatzrohr gefiltert (Quelle-Filter-Ansatz). In der Abbildung ist dieser Vorgang im Zeitbereich (oben) und im Frequenzbereich dargestellt (unten). Die Maxima der Filterfunktion des Ansatzrohrs werden als Formanten bezeichnet. Deren Lage und Ausprägung ist für die Charakterisierung vokalischer Klänge von großer Bedeutung.

Quelle der Stimme

Wichtigstes Organ zur Stimmerzeugung ist der Kehlkopf (lat: larynx). Seine akustische Funktion ist die periodische Modulation des Luftstroms von der Lunge in das Ansatzrohr. Im Kehlkopf befinden sich zwei Strukturen, die eine solche Modulation bewirken können: die Stimmlippen und die Taschenfalten. Während die Stimmlippen für die Steuerung der „normalen“ (physiologischen) Phonation eingesetzt werden, können die Taschenfalten zur Ersatzphonation oder Bildung spezieller Gesangstile herangezogen werden (siehe späterer Abschnitt).

In Abbildung 4 ist ein präparierter Larynx zu sehen. Die zahlreichen Muskeln im Kehlkopf haben zwei Hauptfunktionen. Zum einen öffnen und schließen sie durch Auseinanderbewegen (Abduktion) und Zusammenführen (Adduktion) der Stimmlippen die Verbindung zwischen Lunge und Umgebungsluft und ermöglichen somit das Atmen (Respiration) bzw. verhindern das Eindringen anderer Stoffe in die Lunge.



Abbildung 4: Schnittbild durch einen Larynx (Präparation: apl. Prof. Dr. med. A. Prescher, Inst. für Anatomie I der RWTH Aachen, Photo: Univ.-Prof. Dr. med. Ch. Neuschaefer-Rube, Phoniatrie)

Die für die Stimmgebung wichtige Funktion ist die Fähigkeit der Stimmlippen zur selbsterregten Schwingung, die aus einem komplexen Wechselspiel aerodynamischer und elastischer Kräfte auf die Stimmlippen resultiert. Damit die Schwingung zustande kommt, muss die Energiezufuhr in Form eines kontinuierlichen Volumenstroms aus der Lunge gewährleistet sein. Weiterhin müssen die Stimmlippen in fast geschlossene Stellung gebracht werden, so dass sich während der Schwingung lediglich eine schmale Spalte öffnet, die sogenannte Glottis. Schließlich müssen die geometrischen und elastischen Eigenschaften der Stimmlippen so beschaffen sein, dass das Wechselspiel der aerodynamischen und mechanischen Kräfte ein periodisches Öffnen und Schließen der Stimmlippen ermöglicht.

Sind von den obigen Voraussetzungen nicht alle erfüllt, kommt es zur Beeinträchtigung der Schwingungsfähigkeit, was sich in einem veränderten Stimmklang und in schwereren Fällen im Verlust der Stimmgebung äußert. So kann eine Variation des Abstands und der Spannung der Stimmlippen zu einer gepressten oder heiseren Stimme führen. Für die Bildung von Gesangsregistern und bei einigen Singstilen ist jedoch eine gezielte Veränderung der Schwingungsform beabsichtigt.

Modelle der Stimmerzeugung

Die Modellierung der Stimmgebung wird sowohl für die Stimmsynthese als auch zur Grundlagenforschung vielfältig eingesetzt.

Zur Modellierung der Sing- oder Sprechstimme kommen verschiedene konzeptionell unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Während bei einigen Methoden das vom Sänger bzw. Sprecher am Mund abgestrahlte Stimmsignal möglichst realistisch nachgebildet wird, versuchen sogenannte physikalische Modelle, die physikalischen Gegebenheiten bei der Stimmerzeugung möglichst genau nachzubilden [Kob02, Kob04b].

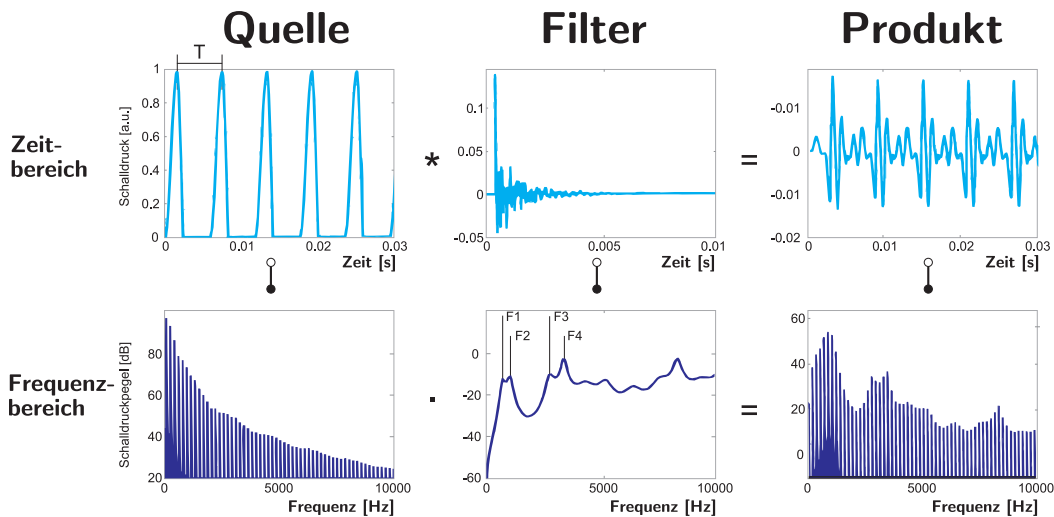


Abbildung 3: Zusammenhang von Phonation und vokalischer Artikulation (nach [Kob04b])

Ziel einer physikalischen Modellierung ist nicht eine komplette Nachbildung aller Aspekte der Stimmerzeugung, sondern – ähnlich wie bei einem physikalischen Experiment – die möglichst getreue Umsetzung einer oder mehrerer Stimmfunktionen, deren Verhalten unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden kann.

Ein weit verbreiteter Ansatz zur rechnergestützten Implementierung eines solchen schwingungsfähigen Stimm-Modells ist das bereits 1972 von Ishizaka und Flanagan entwickelte „Zwei-Massen-Modell“ [IF72]. Es erlaubt die Modulation des Volumenstroms mittels zweier gekoppelter Massen, die mit Federn an die umgebende Struktur angebunden sind, und die in zwei Ebenen die Querschnittsfläche eines rechteckförmigen Kanals periodisch verändern.

Ein prinzipielles Problem von Modellen, die Gewebeeigenschaften mit Hilfe kondensierter Elemente abbilden, ist die Zuordnung von physikalischen bzw. biologischen Eigenschaften zu den Parametern der Elemente. So ist es beispielsweise für das 2-Massen-Modell nicht möglich, Werte für die Federsteifigkeit oder Dämpfung aus Messungen zu ermitteln. Dies ist einerseits in der Schwierigkeit begründet, dynamische Gewebeeigenschaften *in vivo* zu messen, d.h. während der Phonation eines Menschen, andererseits wären solche Maße auch nicht für das gesamte oder auch nur einen Teil des Gewebes gültig, da die Muskel- und Sehnenstruktur eine inhomogene und anisotrope Kräfteverteilung in den Stimmlippen bedingt, die durch eine geringe Zahl von kondensierten Elementen wie im Fall des 2-Massenmodells nicht wiedergegeben werden kann.

Zur Modellierung von Stimmpathologien ist daher ein niedrigdimensionales Modell prinzipiell eher schlecht geeignet, da die bei Stimmpathologien auftretenden Veränderungen der Physiologie nicht oder nur unzureichend nachgebildet werden können. Abhilfe kann hier eine feinere Diskretisierung der Stimmlippen bezüglich der räumlichen Dimensionen schaffen, wie sie auch bei der Finite-Elemente-Methode (FEM) vorgenommen

wird. Hierdurch lassen sich mehr Freiheitsgrade für die Stimmlippschwingung bereitstellen, mit denen sich komplexere Phonationszustände nachbilden lassen.

Beispielhaft für ein solches komplexeres Modell ist die Verknüpfung der Massensegmente für das dreidimensionale Stimmlippenmodell „VOX“ in Abbildung 5 für eine Stimmlippe dargestellt. Das Modell ist asymmetrisch

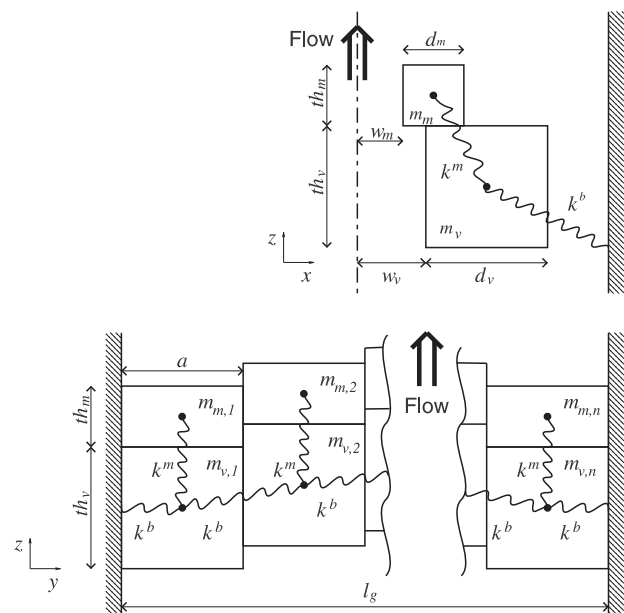


Abbildung 5: Darstellung der Verknüpfung der Massensegmente in einem 3D-Multimassen-Modell (aus [Kob02])

bezüglich der Glottis, d.h. beide Stimmlippen werden separat modelliert und sind nur über die aerodynamischen Zustände in der Glottis gekoppelt. Der Diskretisierungsgrad der Stimmlippen ist je nach Komplexität der Modellierungsaufgabe durch Wahl der Segmentanzahl n der Paare von Massen wählbar, die die Gewebe des Vokalis-Muskels (m_v) bzw. der Mucosa (m_m) repräsentieren. In der Abbildung ist weiterhin die für jedes Segment zugeordnete Federsteifigkeit k^m bzw. k^b , über die die Elasti-

zität der Stimmlippschwingung variiert werden kann. Zu jedem Zeitschritt der Simulation können alle Orts- und Kraftveränderungen für die Massensegmente visualisiert werden. Die visuelle Ausgabe der Stimmlippschwingung ist in Abbildung 6 zu sehen. Weitere Informationen zu dem Modell finden sich in [Kob02, Kob04b]. Eine besondere Eigenschaft dieses Modells ist die frei skalierbare Längs-Diskretisierung und die Ausgabe aller Werte der aerodynamischen und elastischen Kräfte sowie aller phonatorischen Parameter während der Berechnung.

Entsprechende Eingabemasken erlauben während der Berechnung des Schallsignals die Änderung individueller Parameter für jedes Segment, wie die z.T. in Abbildung 5 dargestellten Werte für die Masse, Dämpfung oder Federsteifigkeit. Das an der Glottis generierte Schallsignal kann direkt angehört werden oder zur artikulatorischen Klangformung mit einem Ansatzrohrmodell verknüpft werden [Kob02].

Jetbildung und Wirbelablösung

Ein weiteres Problem einfacher Stimmlippenmodelle ist die unzureichende Berücksichtigung aerodynamischer Effekte, die bei der Phonation auftreten. Hierzu gehören die periodische Ausbildung eines Freistrahls (Jets), der sich von der Oberfläche der Stimmlippen ablöst, die Erzeugung von Wirbeln und die turbulente Strömung. Diese Aspekte haben neben der Veränderung der Druckverhältnisse und damit der aerodynamischen Kräfte auf die Stimmlippen auch die Erzeugung des Rauschanteils in der Stimme zur Folge. Für einen natürlichen Stimmklang ist dieses periodisch erzeugte Rauschen von großer Wichtigkeit und muss bei der Stimm synthese berücksichtigt werden. In Abbildung 7 ist das Ergebnis einer einfachen Berechnung der Wirbelstärke bei glottaler Rauschbildung dargestellt. Die Schwärzung der senkrechten Linien stellt hier die Energie des durch die Wirbel erzeugten Rauschens zu einem Zeitpunkt dar. Sowohl die Lage als auch die Frequenz und Stärke der Wirbel hängt von den glottalen Randbedingungen (Öffnungsgrad, Divergenz/Konvergenz) und den phonatorischen Parametern (subglottaler Druck, Wahl des Pho-

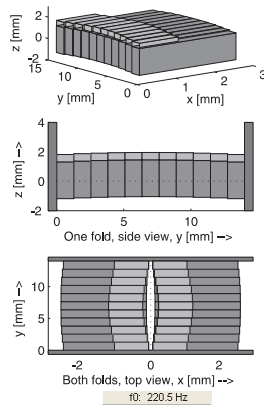


Abbildung 6: Graphische Ausgabe der Stimmlippsimulation

nems und Stimmregisters) ab [Sin99, Kob02]. Prinzipiell können jedoch mit mathematischen Ansätzen wie der Lösung der Navier-Stokes-Gleichung für die dreidimensionale Glottis mit ihren zeit- und ortsveränderlichen Randbedingungen keine Lösungen ermittelt werden [Hir92], daher beschränken sich die Berechnungen auf zweidimensionale Probleme oder quasistationäre Randbedingungen.

Im Fall pathologischer Stimmgebung ist der Anteil des glottalen Rauschens ein Maß für die Charakterisierung der Stimmstörung, etwa bei Heiserkeit.

Neben der Modellierung der Stimmgebung im Computer wird die Phonation auch mit fluiddynamischen Modellen untersucht. Ein großer Vorteil eines solchen Modells, das Luft oder ein anderes fluides Medium moduliert, ist die Möglichkeit, direkte Messungen der Strömungsverhältnisse durchführen zu können.

In Abbildung 8 ist das Glottismodell im Aufbau eines hydrodynamischen Experiments zur Untersuchung der glottalen Strömung gezeigt [BTK04]. In diesem Gemeinschaftsprojekt der Phoniatrie mit dem Aerodynamischen Institut der RWTH wird mit Hilfe von bildgebenden Verfahren (particle image velocimetry, PIV) und akustischen Messungen der örtliche und zeitliche Verlauf der Wirbelentstehung und -ausbreitung erfasst und für unterschiedliche Glottiskonfigurationen untersucht.



Abbildung 8: Hydromechanisches Stimmlippenmodell

Modellierung der Kehlkopfmuskulatur

Für die Steuerung der Positionierung der Stimmlippen zur Formung des Glottisspalts sind eine Reihe von Muskeln zuständig. Während bei Stimmgesunden die Funktion dieser Muskeln für z.B. unterschiedliche Stimmregister eine differenzierte Einstellung jeweils optimaler Phonationsbedingungen erlaubt, kann bei Ausfall oder Fehlfunktion einzelner Muskeln oder Muskelgruppen die Stimmlippschwingung eingeschränkt oder verhindert werden. Erschwerend für die Untersuchung dieser Probleme ist der erschwerte Zugang zu den Muskeln und die schwierige Messung der Muskelaktivität und -kraft. Mit Hilfe einer Nachbildung der intra- und extralaryngealen Muskulatur kann jedoch die Kräfteverteilung simuliert werden und der Einfluß von Störungen des Gleichgewichts durch Ausfall oder Fehlfunktion von Muskeln untersucht werden [KB04]. In einem Gemeinschaftsprojekt mit dem Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik der RWTH werden Finite-Elemente-Modelle für die Muskeln sowie deren Verknüpfung zwischen Larynx und Hals- und Schulterbereich entwickelt.

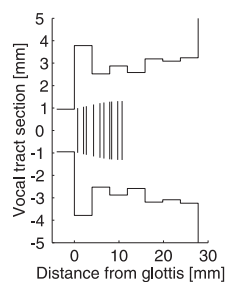


Abbildung 7: Bildung von Wirbeln oberhalb der Glottis

In Abbildung 9 ist ein solches Modell zu sehen. Blau sind die um die Glottis angeordneten Knorpelstrukturen (engl.: cartilage) dargestellt, in oranger Farbe die Stellknorpel, an deren Innenseite die als orange Linien dargestellten Stimmlippen aufgehängt sind. Ziel der Mo-

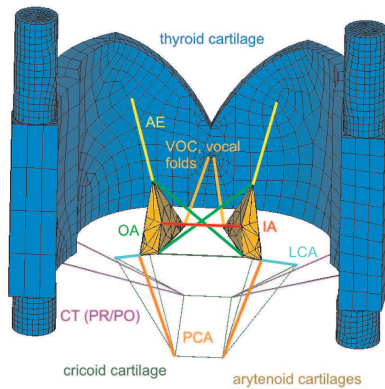


Abbildung 9: Darstellung des Finite-Elemente-Modells der intra- und extralaryngealen Muskulatur (Bild aus [Göm05])

dellierung ist die Berechnung der Kräfteverteilung in der intra- und extralaryngealen Muskulatur bei Störungen der Phonation.

Untersuchungsaspekte der Stimme

Neben der Modellbildung bildet die direkte Messung an den für die Stimmgebung beteiligten Organen einen weiteren wichtigen Aspekt der Stimmforschung. Eine große Anzahl akustischer Verfahren steht bereits z.T. seit mehreren Jahrzehnten für die Untersuchung der Stimme zur Verfügung [BO00, MS02], jedoch gibt es bislang – im Gegensatz zur Hördiagnostik – noch keine standardisierten Verfahren, die einen Vergleich von Untersuchungsergebnissen erleichtern würden und die Möglichkeit schaffen könnten, den Erfolg einer Stimmtherapie mit objektiven Maßen zu dokumentieren.

Optische Verfahren

Optische Verfahren wie die Endoskopie oder Endostroboskopie erlauben die Beobachtung der Stimmlippenbewegung (Adduktion/Abduktion) bzw. der Schwingung in einer durch die Stroboskopie verlangsamtten Bildfolge. Weitere, aufwändigere Verfahren sind die Kymographie [ŠS96, Šve00] oder Hochgeschwindigkeitsvideografie [HHK⁺96, Tig99]. Mit diesen Techniken lassen sich zahlreiche Ursachen von Stimmstörungen ermitteln, wobei jedoch ein objektives Maß für die Schwere einer Erkrankung nur schwierig abgeleitet werden kann.

Ein weiteres Einsatzgebiet optischer Analyseverfahren ist die Untersuchung der Ersatzstimmgebung bei Patienten mit eingeschränkter oder fehlender Glottisfunktion, aber auch die zum Verständnis besonderer Gesangstechniken wie dem Untertone-Gesang nötige Beobachtung der Taschenfaltenschwingung.

Ein spezielles Register

Als Untertone-Gesang bezeichnet man die Erzeugung von Stimmsignalen, deren tiefster harmonischer Anteil ein ganzzahliger Bruchteil der von den Stimmlippen erzeugten Grundfrequenz ist. Eine solche Teilung der Grundperiode kann durch eine weitere Modulation des Volumenstroms mit Hilfe der Taschenfalten erreicht werden. Diese im Englischen *vocal-ventricular fold phonation* genannte Technik wird von einigen Sängern eingesetzt, die somit Grundfrequenzen unterhalb von 50 Hz erreichen können [Fuk99]. In Abbildung 10 ist der Verlauf einer Sequenz zunächst heruntergeteilter und dann wieder aufsteigender Untertöne als Spektrogramm des Stimmsignals am Mund (Sonagramm) zu sehen. Eine ähnliche

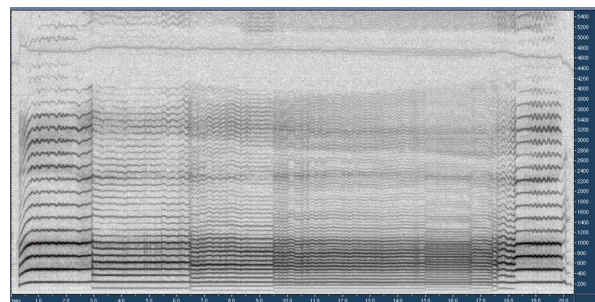


Abbildung 10: Sonagramm einer Untertone-Sequenz für die Grundfrequenzen f_0 (250 Hz), $f_0/2$ (125 Hz), $f_0/3$ (83 Hz), $f_0/4$ (63 Hz) und $f_0/5$ (50 Hz). Sänger und Bild: L. Fuks

Form der Stimmgebung kann auch bei Patienten mit gestörter Stimme beobachtet werden.

Obertongesang

Als Obertongesang wird die Fähigkeit bezeichnet, zwei oder mehrere Töne mit einer Stimme zu erzeugen.

Es gibt eine Reihe verschiedener Obertongesangstile, die sich sowohl hinsichtlich der Physiologie als auch des generierten Klangs stark unterscheiden [HG80]. In Abb. 11 ist der Verlauf einer erst aufsteigenden und dann wieder abfallenden Sequenz im Obertonstil „Sygyt“ zu sehen. Zum Verständnis der Entstehung dieses sehr speziellen Gesangstils können sowohl akustische Messmethoden als Simulationen zum Einsatz kommen [AY99, SKK⁺01, Kob04a].

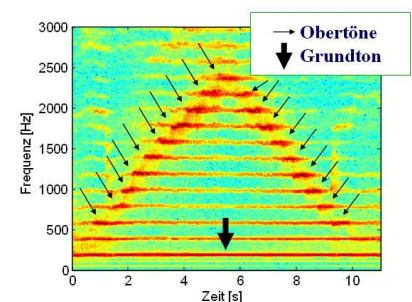


Abbildung 11: Sonagramm einer Oberton-Sequenz für eine aufsteigende und wieder abfallende Sequenz. Sänger: Stuart Hinds

Externe Anregung

Mit Hilfe externer akustischer Anregung des Ansatzrohrs können Informationen über den Artikulationszustand gewonnen werden. Ein wichtiges Verfahren ist die Sonographie, die Beschallung des Ansatzrohrs mit Ultraschall. Hierbei wird mit Hilfe eines kombinierten Sende- und Empfangskopfs ein Ultraschallsignal in den Halsbereich unterhalb der Zunge ausgesendet und das reflektierte Signal empfangen. Diese auch in anderen medizinischen Bereichen wie der pränatalen Diagnostik häufig eingesetzte Technik erlaubt die Darstellung der Zungenkontur während des Sprechens und gibt wichtige Aufschlüsse über die Beweglichkeit der Zunge und die Fähigkeit, bestimmte Ansatzrohrkonfigurationen zu realisieren [Ang94, NRSM⁺02].

Ein weiteres nicht-invasives Verfahren zur Artikulationsanalyse ist die akustische Impedanzmessung des Ansatzrohrs. Hierzu wird ein Schallsignal am Mund in das Ansatzrohr gesendet und simultan mit einem oder mehreren Sensoren am Mund aufgenommen. Bei Verwendung geeigneter Anregungssignale und Verarbeitung der empfangenen Signale kann der Frequenzverlauf der akustischen Impedanz des Ansatzrohrs ermittelt werden [KN02]. Mit diesem Verfahren können – anders als bei der Ermittlung der Formanten des Stimmsignals mit Hilfe der LPC-Analyse des Stimmsignals – sowohl während der Phonation als auch bei unzureichender Phonation die Resonanzen des Ansatzrohrs bestimmt werden [KSL⁺04].

Modellierung von Stimmpathologien

Zur Nachbildung der normalen Phonation im Brustregister werden für das Glottismodell die in Messungen an stimmgesunden Menschen ermittelten Werte für die geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften der Stimmlippen angenommen. Als Resultat entsteht eine selbst erregte Schwingung der gekoppelten Massen mit der für die jeweilige Parameterwahl (weiblich/männlich) typischen Grundfrequenz (220 bzw. 110 Hz). Die Schwingungsform ist regelmäßig, und es wird eine Phasendifferenz zwischen den oberen und unteren Massensegmenten beobachtet, die der Randkantenverschiebung der Stimmlippen im stroboskopischen Bild entspricht.

Im pathologischen Fall können verschiedene Veränderungen der Geometrie, Gewebsveränderungen oder Änderung der Positionierung und Spannung der Stimmlippen die reguläre Schwingung der Stimmlippen verhindern. In Abbildung 12 ist die gegenüber Abb. 6 veränderte Schwingungsform bei einer Simulation von Stimmlippenknötchen zu sehen. Sowohl eine Änderung der Schwingungsform als auch der Amplitude wird beobachtet. Je nach Art der Stimmstörung kann die Modulation des Volumenstroms mit geänderter Frequenz erfolgen, weniger periodisch sein oder

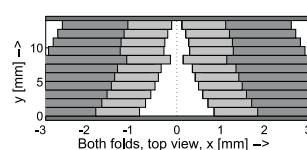


Abbildung 12: Simulation von Stimmlippenknötchen

sogar chaotisch werden. Eine irreguläre Stimmlippen-schwingung hat eine raue Stimme zur Folge, kann aber auch Biphonation oder komplett unharmonische Phonation erzeugen. Führt die Veränderung zu einem unvollständigen Glottisschluss, kann die Produktion glottalen Rauschens erhöht sein, was eine behauchte oder heisere Stimme verursacht [KNR03].

Diskussion und Ausblick

Die Stimme ist wegen der Vielzahl der akustischen Aspekte ein außerordentlich interessantes Objekt wissenschaftlicher Betrachtung.

Im Bereich der Grundlagenforschung zur Stimmakustik sind insbesondere diese Hauptgebiete von Interesse:

- Schallentstehung beim Singen und Sprechen
- Schallausbreitung im Ansatzrohr, Klangformung
- Schallabstrahlung des Sängers und Sprechers

In der Lehre wird an die Vermittlung der Grundlagen und praktischen Kenntnisse der Stimmakustik der Anspruch gestellt, die interdisziplinären akustischen, physiologischen und medizintechnischen Aspekte für Studierende verschiedener Fakultäten aufzubereiten und prüfbar zu vermitteln. Eine weitere Herausforderung ist die wegen der vielfältigen Themen schwierige Zusammenfassung der Lehrinhalte in Form eines Skripts oder Lehrbuchs.

Ein wichtiger Teil der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten finden im Bereich der Stimmsignalanalyse statt. Ziel ist hier zum Einen die Entwicklung objektiver akustischer Diagnoseverfahren für die Beschreibung von Stimmstörungen. Ein anderes Gebiet ist die Entwicklung von Geräten für die Therapie von Kommunikationsstörungen. Grundlage für die Umsetzung dieser Aufgaben ist die Kenntnis und Fähigkeit zur Umsetzung robuster Verfahren zur Aufnahme, Verarbeitung und Analyse von Audiosignalen.

Viele Grundlagen der Stimmerzeugung sind bereits verstanden und zahlreiche Eigenschaften der Stimme und Stimmorgane können bereits mit einer Reihe etablierter Verfahren analysiert werden. Dennoch gibt es sowohl insbesondere bei der Physik der Singstimme als auch bei medizinischen Fragestellungen zu Stimmkrankheiten durchaus noch unverstandene Phänomene, die weiteren Forschungsbedarf aufzeigen. Hierzu gehört die Frage der Kopplung zwischen den Taschenfalten und den Stimmlippen, die sowohl bei speziellen Singstilen als auch als Ersatzphonationsmechanismus eingesetzt wird. Ein anderer bisher nur näherungsweise bekannter Sachverhalt ist die Jet- und Wirbelbildung bei verschiedenen Phonationszuständen.

Das Hauptproblem bei beiden Phänomenen ist die Schwierigkeit, die strömungs- und schallerzeugenden Vorgänge direkt, d.h. *in vivo*, zu beobachten. Wegen der zum Schutz der Glottis sehr aufwändigen Kapselung ist eine genaue optische Beobachtung der dreidimensionalen Stimmlippen-schwingung zur Zeit noch nicht möglich.

Akustische Verfahren könnten auch hier alternative Möglichkeiten aufzeigen, die Funktion der Stimmgebung weiter zu verstehen.

Literatur

- [Ang94] W. Angerstein, *Ultraschallgestützter Untersuchungsgang zur Beurteilung der Zungenbeweglichkeit*, Sprache-Stimme-Gehör **18** (1994), 80–84.
- [AY99] S. Adachi and M. Yamada, *An acoustical study of sound production in biphonic singing, Xöömiĵ*, J. Acoust. Soc. Am. **105** (1999), no. 5, 2920–2932.
- [BO00] R. J. Baken and R. F. Orlikoff, *Clinical Measurement of Speech and Voice*, Singular Publishing Group, San Diego, 2000.
- [BTK04] C. Brücker, M. Triep and M. Kob, *Study of the vortex dynamics in a mechanical model of the vocal folds using Particle-Image Velocimetry*, Proceedings of the International Conference on Voice Physiology and Biomechanics in Marseille, France, 2004, pp. 11–17.
- [Fuk99] L. Fuks, *From Air to Music – Acoustical, Physiological and Perceptual Aspects of Reed Wind Instrument Playing and Vocal-Ventricular Fold Phonation*, Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1999.
- [Göm05] A. Gömmel, *Numerical simulation of the vocal fold movement for abduction and adduction*, Diplomarbeit, RWTH Aachen University, 2005.
- [HG80] T. Q. Hai and D. Guillou, *Original research and acoustical analysis in connection with the Xöömiĵ style of biphonic singing*, pp. 162–173, Heibonsha, Tokyo, 1980.
- [HHK⁺96] M. M. Hess, H. Herzel, O. Koster, F. Scheurich and M. Gross, *Endoscopic imaging of vocal cord vibrations. Digital high-speed recording with various systems*, HNO **44** (1996), 685–693.
- [Hir92] A. Hirschberg, *Some fluid dynamic aspects of speech*, Bulletin de la Communication Parlée **2** (1992), 7–30.
- [IF72] K. Ishizaka and J. L. Flanagan, *Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords*, Bell Syst. Tech. J. **50** (1972), 1233–1268.
- [KB04] M. Kob and C. Butenweg, *A finite element model of the interaction between intra- and extralaryngeal muscles*, Proceedings of the International Conference on Voice Physiology and Biomechanics in Marseille, France, 2004, pp. 91–92.
- [KN02] M. Kob and C. Neuschaefer-Rube, *A method for measurement of the vocal tract impedance at the mouth*, Medical Engineering & Physics **24** (2002), 467–471.
- [KNR03] M. Kob and C. Neuschaefer-Rube, *Modeling voice disorders in the time domain*, Proceedings of Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research (AQL) (Hamburg), vol. proceedings/36, IRB Verlag Stuttgart, 2003, pp. 1–6.
- [Kob02] M. Kob, *Physical modeling of the singing voice*, Ph.D. thesis, Aachen University (RWTH), 2002.
- [Kob04a] M. Kob, *Analysis and Modeling of Overtone Singing in the Sygyt Style*, Applied Acoustics **65** (2004), 1249–1259.
- [Kob04b] M. Kob, *Singing voice modelling - as we know it today*, Acta Acustica united with Acustica **90** (2004), 649–661.
- [KSL⁺04] M. Kob, J. Stoffers, M. Lievens, R. Katzer and C. Neuschaefer-Rube, *Application of impedance measurements for articulatory dysfunction*, Proceedings of CFA/DAGA in Strasbourg, 2004, pp. 1145–1146.
- [MS02] D. G. Miller and H. K. Schutte, *VoceVista: Visual Feedback for Instruction in Singing*, URL: www.vocevista.com, 2002.
- [NRSM⁺02] C. Neuschaefer-Rube, W. Saus, G. Matern, M. Kob and S. Klajman, *Sonographische und endoskopische Untersuchungen beim Obertonsingen*, Stimmen hören 3. Stuttgarter Stimmtage (St. Ingbert) (H. K. Geisner, ed.), Röhrig Universitätsverlag, 2002, pp. 219–222.
- [Sin99] D. J. Sinder, *Speech Synthesis Using an Aeroacoustic Fricative Model*, Ph.D. thesis, University of New Jersey, 1999.
- [SKK⁺01] K. I. Sakakibara, T. Konishi, K. Kondo, E. Z. Murano, M. Kumada, H. Imagawa and S. Niimi, *Vocal fold and false vocal fold vibrations and synthesis of khoomei*, Proc. of International Computer Music Conference, 2001, pp. 135–138.
- [ŠS96] J. G. Švec and H. K. Schutte, *Videokymography: high speed line scanning of vocal fold vibration*, J. Voice **10** (1996), 201–205.
- [Šve00] J. G. Švec, *On Vibration Properties of Human Vocal Folds*, Ph.D. thesis, University of Groningen, 2000.
- [Tig99] M. Tigges, *Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme-technik des Kehlkopfs*, Shaker, 1999.