

Untersuchungen der akustischen Eigenschaften des Obertongesangs

Malte Kob¹, Christiane Neuschaefer-Rube², Wolfgang Saus³

¹ Institut für Technische Akustik, RWTH, 52056 Aachen, email: kob@akustik.rwth-aachen.de

² Klinik für Phoniatrie und Pädaudiologie, Universitätsklinikum der RWTH, 52074 Aachen, email: cneuschaefer@post.klinikum.rwth-aachen.de

³ Melatener Str. 92, 52074 Aachen, email: oberton@gmx.de

Einleitung

Obertongesang ist eine Gesangstechnik, die das Obertonspektrum des Stimmklangs zum zentralen musikalischen Element erklärt. Über dem Grundton wird durch spezielle Artikulation jeweils einer (oder mehrere) seiner Partialtöne so verstärkt, dass er neben dem Grundton als zweiter (mehrfacher) Melodieton zu hören ist. Geübte Sänger können erreichen, daß dieser Oberton einen höheren Schallpegel erreicht als der Grundton. In Zentralasien (Tuva, Mongolei, Tibet, rund um das Altai-Gebirge) pflegt man eine uralte Tradition des Obertongesangs, auch Khöömij genannt, die in Europa seit etwa Mitte der 80er Jahre zunehmend bekannt wird. Obertoniger Gesang, bei dem ebenfalls Obertöne im Stimmklang wahrzunehmen aber nicht dominant sind, ist auch im tibetischen Buddhismus und in anderen Traditionen anzutreffen. Grundsätzlich sind Obertöne natürlicher Bestandteil jeder Gesangstechnik, und durch Artikulation (z. B. Sprache) entstehen Obertonklänge, die aber in der Regel nicht als Einzeltöne wahrgenommen werden. Als Obertongesang wird nur solcher Gesang bezeichnet, bei dem den Obertönen eine musikalisch tragende Rolle zukommt.

Beim Obertonsingen kann man über einem konstanten Grundton beliebige Tonfolgen aus den charakteristischen Partialtönen, der Naturtonreihe, singen, die sich mit flötenähnlichem Klang etwa zwei bis drei Oktaven über dem Grundton bewegen (siehe Bild 1).

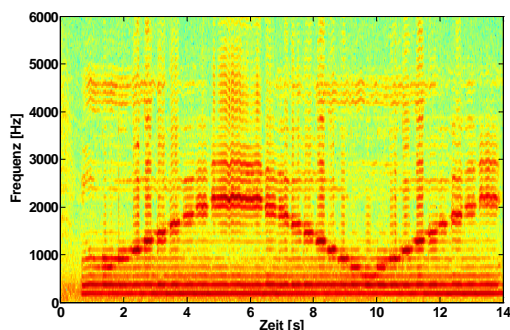


Bild 1: Spektrogramm einer bitonalen Sequenz

Im unteren Bereich des Bildes ist der Grundton als zeitlich unveränderte Linie zu sehen. Die Obertonstruktur weist hingegen eine treppenförmige Melodie auf, deren Tonmaterial den Stufen der Obertonreihe entnommen ist. Die übliche Bandbreite der Töne liegt je nach Gesangstechnik zwischen dem 3. und 16. Partialton. Es gibt auch Sänger die über den 22. Partialton hinaus singen. Durch Kombination von Grundtonwechseln mit Obertonmelodien kann ein geübter Obertonsänger zwei kontrapunktische Stimmen zugleich singen [1]. Männer- und Frauenstimmen haben bei den Obertönen weitgehend den gleichen Frequenzumfang. Die Frequenz der differenziert artikulierbaren Obertöne ist nach oben physiologisch begrenzt, so dass bei tieferem Grundton (Basslage) eine größere, bei hohem Grundton (Sopranlage) eine geringere Zahl von Obertönen zur Verfügung steht. Die Erzeugung des Quellsignals im Kehlkopf bestimmt nicht nur die Grundfrequenz, sondern auch wesentlich den Obertongehalt vor der Übertragung durch das Ansatzrohr [2]. Im folgenden werden die Betrachtungen darauf beschränkt, wie das Stimmsignal im Ansatzrohr seine besondere Eigenart der Bitonalität erhält.

1 Sonografische Untersuchungen

Um den Zusammenhang zwischen den geometrischen Gegebenheiten im Ansatzrohr und den akustischen Phänomenen beim Obertonsingen näher zu untersuchen, wurde sowohl mit einer Kamera die Lippenstellung als auch sonographisch die Position der Zunge beim Singen der in Bild 1 zwischen 1 und 5 Sekunden dargestellten ansteigenden Sequenz von 9 Obertönen untersucht. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse dargestellt.

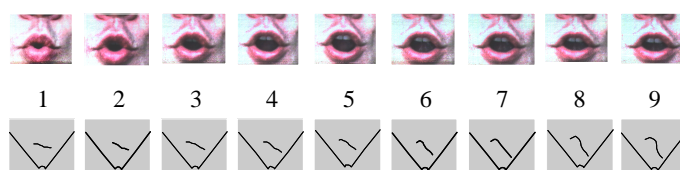


Bild 2: Lippenstellungen (oben) und Zungenlängsschnitt (unten) beim Singen einer bitonalen Sequenz von neun aufsteigenden Obertönen bei konstantem Grundton

Lippenstellung

Anfangs ist der Mund fast geschlossen, bei den Obertönen mittlerer Höhe öffnet er sich weiter, während die Lippen sich bei den höchsten Obertönen bis auf eine mittlere Öffnung wieder schließen. Die Feineinstellung der Mundöffnung ist für die Erzeugung eines besonders ausgeprägten Obertons nötig.

Zungenstellung

Mit Hilfe eines Sonographen wurde die Zungenstellung bei derselben Folge von Obertönen untersucht. In Bild 2 unten ist die Zungenrückkontur im Medianschnitt dargestellt (links = vorne, rechts = hinten). Aus den Zungenstellungen läßt sich erkennen, daß beim Anstieg der Obertöne eine allmähliche Steilstellung der Zunge erfolgt. Die größte Steilheit des Zungenrückens war beim Singen des höchsten Obertons nachweisbar. Eine entsprechende Untersuchung wurde auch für den Zungenquerschnitt gemacht (nicht abgebildet). Es ist zu beobachten, daß sich eine mediane Zungenrinne ausbildet, deren Ausprägung mit steigenden Obertönen stärker wird.

2 Akustische Untersuchungen

Eingangsimpedanz am Mund

Eine gängige Methode zur Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Musikinstrumenten ist die Messung der Eingangsimpedanz am Eingang des Resonators. Diese Methode läßt sich für die Singstimme nicht ohne weiteres anwenden, da diese Messung an den Stimmlippen erfolgen müßte. Stattdessen kann jedoch eine Messung am Ausgang des Resonators, d.h. am Mund vorgenommen werden. Bei Verwendung einer geeigneten Meßtechnik [3] läßt diese Messung sogar während der Phonation Aussagen über die Frequenzen und relativen Amplitude von Resonanzen bzw. Formanten zu. Im folgenden Bild ist eine Reihe von Impedanzmessungen dargestellt, bei denen der Obertonsänger eine aufsteigende Reihe von Obertönen artikuliert.

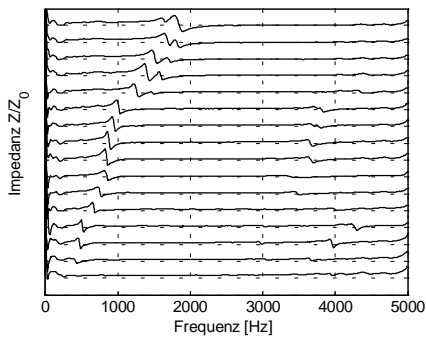


Bild 3:
Impedanzmessung am Mund:
Sequenz aufsteigender Obertöne (von unten nach oben).
Die Impedanzen sind auf Werte einer Messung ohne Vokaltrakt normiert.

Aus dem Bild ist im Bereich zwischen ca. 500 Hz und 2000 Hz der Oberton zu erkennen, wobei insbesondere bei den höheren Frequenzen eine Doppelresonanz sichtbar ist. Außer der starken Resonanz des Obertons sind fast keine beim Singen auftretende Formanten sichtbar. Offensichtlich werden diese beim Obertonsingen stark gedämpft.

Richtcharakteristik

Eine weitere interessante Konsequenz der hohen Güte des Obertonfilters ist die Abstrahlung von Obertönen. Die Richtcharakteristik eines Sängers wurde bereits früher vorgestellt [4], und könnte insbesondere im Frequenzbereich zwischen 1 und 2 kHz wegen der Ausbildung starker Nebenkeulen nach schräg unten sowie nach oben für den schwebenden Klang bei der Aufführung und die z.T. problematische Mikrofonierung von Obertongesang verantwortlich sein.

3 Modellierung von Obertongesang

Modelle für die Stimmerzeugung gehen im einfachsten Fall von einer obertonreichen Quelle aus, dessen Signal von einem nachfolgenden Filter geformt wird. Ein einfaches Zeitbereichsmodell für eindimensionale Schallausbreitung ist das Kelly-Lochbaum-Modell [5], bei dem sich der Schalldruck am Mund als Überlagerung reflektierter und transmittierter Wellen ergibt, die an den Diskontinuitäten zwischen aneinandergereihten Zylindersegmenten entstehen (siehe Bild 4).

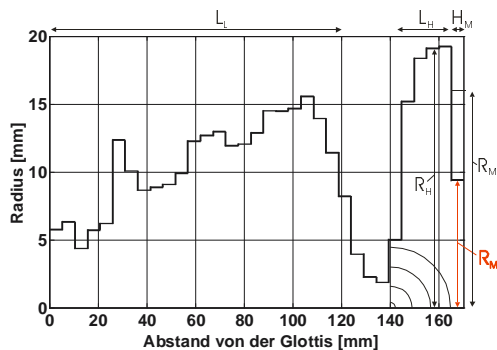


Bild 4:
Zylindermodell des Ansatzrohres. Die Flächenfunktionen ohne Optimierung (R_{M1}) stammen aus [6].

Der Verlauf der Radien repräsentiert eine Anordnung von Zylindersegmenten mit einer Fläche, die der Fläche sagittaler Schnittebenen durch das Ansatzrohr entspricht. Es ist zu erkennen, dass zwei Bereiche zu unterscheiden sind, die im Abstand 140 mm von der Glottis von der Zungenspitze unterteilt sind. Eine Berechnung der Längsresonanzfrequenz f_{0L} kann unter Annahme jeweils schallharter Randbedingungen an der Glottis und an der Verengung mit folgende Formel vorgenommen werden:

$$f_{0L} = \frac{c}{2 L_L} \quad (1)$$

Für die hier dargestellte modifizierte Konfiguration des Vokaltraktes nach Adachi [6] ergibt sich eine Resonanzfrequenz des $\lambda/2$ -Resonators von ca. 1,5 kHz.

Für den zweiten Resonanzraum lässt sich bei etwas geschlossenem Mund ein Helmholtz-Resonator ansetzen, dessen Resonanzfrequenz sich unter Berücksichtigung einer Mündungskorrektur berechnet zu

$$f_{0H} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{R_{M2}^2}{L_H R_H^2 (h + 0,8R_{M2})}} \quad (2)$$

Für die Resonanzfrequenz mit optimierter Mundstellung (R_{M2}) ergibt sich ein Wert von knapp 2 kHz, was in etwa der Größenordnung der Längsresonanz entspricht.

Die Berechnung einer Quermode mit dem Radius R_H , die durch Abstrahlung von Elementarwellen an der Verengung angeregt werden könnte, ergibt eine Resonanzfrequenz von ca. 4 kHz. Dies könnte die Dämpfung der Vokalformanten oberhalb von 3000 Hz erklären. Eine Modellierung der Übertragungsfunktion mit zwei unterschiedlichen Modellen ist im folgenden Bild dargestellt.

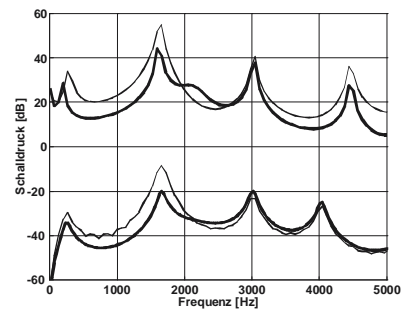


Bild 5:
Berechnete Vokaltrakt-Übertragungsfunktionen nach Kelly-Lochbaum (unten) und Barjau (oben).
Mund offen (dicke Linie) und Mundstellung optimiert (dünne Linie)

In der unteren Bildhälfte wurde die Simulation mit dem Kelly-Lochbaum-Modell [5] simuliert. Die Berücksichtigung der Helmholtz-Resonanz führt hier zu einem Gewinn von über 10 dB bei der Frequenz des Obertons.

Eine zweite Modellierung der Übertragungsfunktion mit einem anderen Algorithmus [7] ist in der oberen Bildhälfte dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass sich beim Schließen des Mundes eine Resonanz von einer höheren Frequenz auf die Längsresonanz legt und somit die Verstärkung des Obertons hervorruft.

4 Zusammenfassung

Es wurden Stimmschallmessungen und bildgebende Untersuchungen am Ansatzrohr eines Obertonsängers durchgeführt, um eine Erklärung für die außerordentlich hohe Güte der auftretenden Obertonresonanz zu erhalten. Es konnte gezeigt werden, dass eine Doppelresonanz auftreten kann, welche die exakte Abstimmung zweier Hohlräume voraussetzt.

Literatur

- [1] Trần Quang Hai: New Experiments on Overtone Singing. Dokumentation 3. Internationale Stuttgarter Stimmtage 2000, Akademie für Gesprochenes Wort, Staatliche Hochschule für Musik und Darstellende Kunst Stuttgart, 2000, 13-14.
- [2] Leonardo Fuks: From Air to Music – Acoustical, Physiological and Perceptual Aspects of Reed Wind Instrument Playing and Vocal-Ventricular Fold Phonation. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1999.
- [3] S. Müller, P. Massarani (2001): Transfer Function Measurement with Sweeps. Submitted to J. Audio Eng. Soc.
- [4] Malte Kob und Harald Jers: Directivity measurement of a singer. (Poster) The Conference CD-ROM: Collected papers from the joint meeting "Berlin99" Article 2AMU__19
- [5] J. L. Kelly und C. C. Lochbaum: Speech synthesis. Proceedings of the 4th International Congress on Acoustics, 1962, 1-4 Reprinted in: J. L. Flanagan and L. R. Rabiner (Editors): Speech Synthesis (Dowden, Hutchinson & Ross, Stoudsburg), S. 127-130.
- [6] Seiji Adachi und Masashi Yamada: An acoustical study of sound production in biphonic singing. Xöömij. J. Acoust. Soc. Am. 105 (5), 1999, 2920-2932.
- [7] Ana Barjau, D. H. Keefe and S. Cardona: Time-domain simulation of acoustical waveguides with arbitrarily spaced discontinuities. J. Acoust. Soc. Am. 105 (3), 1999, 1951-1964.