



# Spezialisierungsarbeit

---

Analyse hoher Männergesangsstimmen anhand des  
Obertonspektrums

**Erstellt von** Felix Frederik Koneberg  
**Matrikelnummer** 2093808

**Institut** Selbstständiger Funktionsbereich für Phoniatrie  
und Pädaudiologie, Universitätsklinikum Düsseldorf  
**Betreuer** Univ.-Prof. Dr. med. Wolfgang Angerstein

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>1 Historischer Überblick über die hohe Singstimme des Mannes</b>	<b>4</b>
1.1 Knaben, Falsettisten und Counterenöre . . . . .	5
1.2 Kastratengesang im 16. bis 19. Jahrhundert . . . . .	6
1.3 Das 20. und 21. Jahrhundert . . . . .	7
1.3.1 Die Rückkehr der Counterenöre . . . . .	8
1.3.2 Falsettisten aus Pop und Rock . . . . .	9
<b>2 Physik der Tonbildung und der Singstimme</b>	<b>10</b>
2.1 Klangfarbe, Tonhöhe, Teiltöne, Harmonische, Obertöne und Untertöne	10
2.2 Eigenschwingungen eines Blasinstrumentes . . . . .	11
2.3 Entstehung des Stimmschalls . . . . .	13
2.3.1 Entstehung der Formanten . . . . .	17
2.4 Singen . . . . .	18
2.4.1 Sängerformanten . . . . .	18
2.4.2 Formantentuning . . . . .	21
2.4.3 Stimmregister . . . . .	22
2.4.4 Ober- und Untertongesang . . . . .	25
<b>3 Analyse von Gesangsstimmen</b>	<b>28</b>
3.1 Übersicht der Analyse- und Diagnoseverfahren . . . . .	28
3.2 Softwarevergleich . . . . .	29
3.3 Fazit zur Software . . . . .	36
<b>Literatur</b>	<b>37</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Aufl.	Auflage
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
DFT	Discrete Fourier Transform
d.h.	das heißt
EGG	Elektroglotto graphie
et al.	und Mitarbeiter
evtl.	eventuell
f. / ff.	folgende (Seite) / folgende (Seiten)
FFT	Fast Fourier Transform
LPC	Linear Predictive Coding
M.	Musculus
OA	Overtone Analyzer
p. / pp.	page (Seite) / pages (Seiten)
S.	Seite / Seiten
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

## Einleitung

Diese Spezialisierungsarbeit zielt darauf ab, in der darauf aufbauenden Masterarbeit CD-Aufnahmen diverser Kontratenöre und anderer, vorwiegend in hohen Stimmlagen singender, Künstler anhand des Obertonspektrums zu analysieren und dadurch zu untersuchen, worin sich die verschiedenen Sänger unterscheiden. Unter den Aufnahmen befinden sich einige der bekanntesten Sänger des letzten und heutigen Jahrhunderts aus der klassischen Musik, aber auch aus dem heutigen Rock- und Popbereich. Was charakterisiert Alfred Deller, welcher komplett falsettiert, im Gegensatz zu Russel Oberlin, der nach eigener Aussage ausschließlich im Brustregister singt? Des Weiteren soll auf das Phänomen der Kastratensänger eingegangen und hierbei Aufnahmen des letzten bekannten Kastraten Alessandro Moreschi analysiert werden. Diese Arbeit konzentriert sich im Schwerpunkt auf die Erklärung der physikalischen Hintergründe des Singens, die Analysemethoden für Stimmen und auf die später zur Analyse eingesetzten Programme (Overtone Analyzer, Praat, MATLAB®). Eine Analyse der Gesangsaufnahmen wird in dieser Spezialisierung nicht durchgeführt werden. Dies wird erst im Rahmen der Masterarbeit erfolgen.

Zunächst folgt ein Abriss über die Geschichte hoher Männergesangsstimmen der letzten Jahrhunderte.

## 1 Historischer Überblick über die hohe Singstimme des Mannes

Gesang ist seit Jahrtausenden ein wichtiges Element der Gesellschaft. Obwohl es nicht unbedingt intuitiv ist, die von Natur aus tiefere Männerstimme für hohen Gesang einzusetzen, so lässt sich dies schon sehr lange beobachten. Sogar Papst Isidor von Sevilla schrieb in seinem Diktum, dass „die perfekte Stimme [...] ,hoch, süß und klar‘ sein müsse“ (Herr, 2013, S. 13). Dabei waren diese hohen Männerstimmen auch nicht immer "natürlich". So gab es beispielsweise im alten China des 17. Jahrhunderts Eunuchen am kaiserlichen Hof (Clapton, 2004, S. 1) und im alten Rom des 2. Jahrhundert v. Chr. kastrierte Sklaven zur gesanglichen Unterhaltung (Fritz, 1994, S. 43). Das Interesse an hohen Singstimmen ist bis heute sehr groß, und viele der heutigen aufgeführten Stücke stammen aus der Barockzeit. Kastraten waren bis dahin Einzelfälle, doch ab dem 16. Jahrhundert häufte sich ihr Vorkommen. Es ist daher interessant, sich die Geschichte der hohen Männersingstimmen ab dem 15.

# 1 Historischer Überblick über die hohe Singstimme des Mannes

Jahrhundert genauer anzusehen.

## 1.1 Knaben, Falsettisten und Countertenöre

Mit dem steigenden Anspruch an Kunst und Kultur im europäischen Raum des 15. und 16. Jahrhunders stieg nach (Herr, 2013, S. 25 ff.) und (Fritz, 1994, S. 47 ff.) auch der musikalische Anspruch stetig. Besonders auf den Bühnen, in den Opern und in den Kirchenchören waren hohe Gesangsstimmen mehr und mehr gefragt. Frauen war es jedoch verboten, in den Kirchen zu singen, denn der erste Paulusbrief an die Korinther, Kapitel 16, Vers 34 besagt: „Let women be silent in the assemblies, for it is not permitted to them to speak“ (Barbier, 1996, S. 19 ff.), so dass hier vor allem Knaben und Falsettisten eingesetzt wurden. Allerdings war die Stimme eines Knaben nicht so kraftvoll wie die eines Erwachsenen, und bereits vor Vollendung der Gesangsausbildung setzte der Stimmbruch ein, sodass die Knaben fortan nicht wie gewohnt hoch singen konnten. Als Falsettisten werden Sänger bezeichnet, welche entweder ihren Tonumfang (*Ambitus*) nach oben durch Wechsel der Bruststimme<sup>1</sup> (Modalstimme) in die Kopfstimme<sup>2</sup> (Falsettstimme) erweitern oder komplett in Letzterem singen (Herr, 2013, S. 13 ff.). Somit können auch Männer Alt- und Sopranstimmen übernehmen. Doch es ist auch für manche Sänger (z.B. Russel Oberlin) möglich, in der Bruststimme über die Tenorlage zu kommen. Diese hohen Männerstimmen werden Hautes Contres genannt. Männliche Sänger, die in Alt oder Sopran singen, werden auch als *Countertenöre*<sup>3</sup> oder *Kontratenöre* bezeichnet. Der Einsatz des Falsett hat jedoch zur Folge, dass sich das Obertonspektrum und somit der Stimmklang ändert (siehe Abschnitt 2) und das Falsettieren daher "in frühneuzeitlichen Gesangslehren häufig abgelehnt" (Herr et al., 2012, S. 9) wurde.

---

<sup>1</sup>Die Definition der Brust- und Kopfstimme ist in Abschnitt 2.4.3 zu finden.

<sup>2</sup>In (Herr, 2013, S. 445-450) werden Uneinigkeiten über die Anzahl an Stimmregistern beschrieben. Dabei besonders, ob das Kopfregister mit dem des Falsettregisters gleichzusetzen ist. Um hier schwer zu beschreibende Stimmklangeigenschaften zu vermeiden, wird im Folgenden die Kopfstimme mit der Falsettstimme gleichgesetzt. Ardran und David (1967) zeigten, dass die manchmal unterschiedenen Falsett- und Kopfregister physiologisch die gleiche Kehlkopfbewegung erzeugen.

<sup>3</sup>Es scheint, wie in (Herr, 2013, S. 450-454) zu sehen, eine große Debatte über die Bezeichnung der hohen männlichen Singstimme zu geben. Die Argumente, ob ein Sänger nun als Falsettist oder Countertenor bezeichnet wird, beziehen sich dabei auf Eigenschaften wie Höreindruck oder verwendete Stimmregisterkombinationen. Der Begriff Countertenor bezeichnet im Folgenden Sänger, die durch Perfektionierung der Falsettstimme im Tenor, Alt oder gar Sopran singen. Darunter fallen somit beispielsweise Alfred Deller, als reiner Falsettist, aber auch Russel Oberlin, welcher mit seiner Bruststimme singt.

## 1.2 Kastratengesang im 16. bis 19. Jahrhundert

Im Verlauf des 16. Jahrhunderts kam es besonders in Südalien dazu, dass mehr und mehr *Kastratensänger* eingesetzt wurden. Die hier herrschende Armut begünstigte diese Entwicklung: Viele arme Familien ließen ihre jungen Söhne, in der Hoffnung auf eine Gesangskarriere mit guter Ausbildung und Verpflegung, kastrieren. Den jungen Knaben wurden hierbei vor dem Einsetzen des Stimmbruchs die Samenleiter durchtrennt oder die Hoden entfernt, sodass ihre Sopran- oder Altstimme durch das Ausbleiben des Testosteronschubes erhalten blieb, während ihr Körper weiterhin wuchs. Dies waren keine legalen Operationen und zudem äußerst gefährlich (Überlebenschance 10-80 % nach Barbier, 1996, S. 11). Als Ausreden dienten oftmals erfundene Geschichten, dass die Hoden des Kindes von ein wildem Tier zertrümmert wurden oder es sich unglücklich verletzt hatte (Heidecker, 2007, S. 9). Das Tragische war, dass die Kastration keine Garantie für eine Sängerkarriere bot und somit auch etliche gestörte Kinder hieraus hervorgingen. Die Begabten erhielten allerdings ausgezeichnete Gesangsausbildungen, die üblicherweise bis zu 10 Jahre dauerten (Barbier, 1996, S. 32). Durch ihre Körpergröße hatten die Kastraten den Brustumfang eines erwachsenen Mannes und dementsprechend eine deutlich ausdauerndere und kräftigere Modalstimme (Fritz, 1994, S. 78). Es war einigen von ihnen möglich, über mehr als drei Oktaven hinweg zu singen und die Töne dabei mit dem sogenannten *messa di voce*<sup>4</sup> extrem genau und bis zu einer Minute lang an- und abschwellen zu lassen (Fritz, 1994, S. 75 f.). Auch wiesen ihre Singstimmen einen ganz eigenen Charakter auf. So wurde das Stimmtimbre, das von der Präsenz der Obertöne geprägt ist, von Arthur Schopenhauer als „übernatürlich schön[...]“ (Kesting, 1995, S. 10) bezeichnet: „His beautiful supernatural voice cannot be compared with that of any woman's voice: there cannot exist a finer and fuller timbre, and with that silver purity, he acquires an indescribable power“ (aus Barbier, 1995, S. 229, zitiert nach Angus Heriot). Auch in (Fritz, 1994, S. 75, zitiert nach Mannstein) findet sich die Aussage wieder, dass die Stimmen weder weiblich noch kindlich klangen und folglich etwas Einzigartiges darstellen. Für die in Barockopern dargestellten Götter und Helden waren Kastraten somit die perfekte Besetzung (Fritz, 1994, S. 75 ff.) und den Falsettisten gesanglich überlegen. Obwohl der Großteil der Literatur die Kastraten als übernatürliche Sänger beschreibt, gibt es auch hieran Zweifel. (Baum, 2012, S. 114)

---

<sup>4</sup>An- und Abschwellen der Lautstärke (Crescendo und Decrescendo) eines lang gehaltenen Tones, wobei die Tonhöhe und der Vokal konstant bleiben (Titze et al., 1999).

## 1 Historischer Überblick über die hohe Singstimme des Mannes

f.) beispielsweise bezweifelt, dass die oft genannte Zahl tausender kastrierter Kinder pro Jahr (u.a. in Heidecker, 2007, S. 9) und die außergewöhnliche gesangliche Befähigung der Wahrheit entsprechen. Auch (Clapton, 2004, S. 11) schreibt, dass nicht alle Kastraten großartige Sänger waren und oft die Neuartigkeit ihrer Stimmen für ihren Ruhm sorgte. Dennoch kann man die Kastraten aufgrund ihrer Lebensweise und ihres Ansehens als "Popstars" der damaligen Zeit beschreiben (Clapton, 2004, S. 14). Der wohl Bekannteste unter ihnen war Carlo Broschi, auch bekannt unter seinem Künstlernamen Farinelli (1705 - 1782).

Der Höhepunkt des Kastratengesangs lag um 1680 - 1780, danach klang er langsam wieder ab. Gründe hierfür finden sich in der Kastratenkritik (u.a. Aufklärungsprozesse unter der Bevölkerung) sowie in einem Wandel der musikalischen Werke (Herr, 2013, S. 13, 414 ff.) und Werte. Der Tenor wurde fortan als passender für die Heldenrolle empfunden. Im Chor der Sixtinischen Kapelle in Rom wurde die Besetzung für Sopran- und Altstimme dennoch bis 1911 durch Kastraten belegt (Fritz, 1994, S. 47 ff.). Die Einsicht, dass das Ritual des Kastrierens zur Produktion von Sängerkastraten unmenschlich war, führte letztendlich zu einem Verbot der Kastration, ausgesprochen von Papst Leo XIII (Barbier, 1995, S. 238), welches nun, im Gegensatz zu den vorherigen Verboten, beachtet wurde.

Einer der letzten Kastratensänger und auch Leiter des päpstlichen Chors war Alessandro Moreschi (1858 - 1922). Von ihm entstanden von 1902 - 1904 die heute einzigen erhaltenen Gesangsaufnahmen eines echten Kastraten. Auf Grund der Aufnahmetechnik mittels Wachsschallplatte können diese Aufnahmen jedoch kein exaktes Bild einer echten Kastratenstimme vermitteln. Hinzu kommen weitere Faktoren, die Moreschi selbst betreffen, wie beispielsweise, dass er auf liturgische Musik spezialisiert war (Fuchs et al., 2000; Köwer, 2007).

### 1.3 Das 20. und 21. Jahrhundert

Nachdem die Kastraten an Bedeutung verloren hatten, zeigten sich im 20. und 21. Jahrhundert verschiedenste Kontratenöre wie z.B. Russel Oberlin, Alfred Deller, Jochen Kowalski, Andreas Scholl oder Philippe Jaroussky. Sie alle unterscheiden sich in ihrem Stimmtimbere und anderen gesanglichen Charakteristika. Anhand dieser Vielfalt verleihen Komponisten ihren Stücken gezielt einen bestimmten Ausdruck. Besonders bei Kontratenören ist diese Stimmcharakteristik wichtig, da hierbei oftmals der Registertonwechsel beim Übergang von Modalstimme in Falsett entscheidend ist

## 1 Historischer Überblick über die hohe Singstimme des Mannes

(Herr, 2012, S. 189). Jeder Sänger weist in seinem Ambitus bestimmte Bereiche auf, in denen seine Stimme mehr bzw. weniger klangliches Volumen erreicht (Herr, 2013, S. 475). Bekannt sind falsettierende Sänger jedoch nicht nur aus der klassischen Musik, sondern auch aus der Pop- und Rockmusik (siehe Abschnitt 1.3.2).

### 1.3.1 Die Rückkehr der Counterotenöre

Während in vielen Teilen Europas vom 16. bis ins 20. Jahrhundert Kastraten in den Kirchenchören zu hören waren, galt dies nicht für England. Dort waren die Falsettisten die ganze Zeit über erhalten geblieben (Herr, 2013, S. 444; Herr, 2012, S. 182). Der Kontratenor Alfred Deller (1912 - 1971) erlangte durch eines seiner Solokonzerte 1948 aufgrund seines einzigartigen Stimmklangs („Singularity of voice“ nach Herr, 2012, S. 183) große Bekanntheit und war somit einer der wichtigen Sänger des 20. Jahrhunderts, die den Kontratenören zur heutigen Beliebtheit verhalfen. (Herr, 2013, S. 460 ff.) entnimmt aus Dellers Biografie, dass er als Knabe im Kirchensopran gesungen hatte, und sein Stimmbruch sehr spät und schwach ausfiel. Danach sang er im Alt weiter, obwohl er von seiner Sprechstimme im Bariton einzuordnen war. Dellers Vermutung war, dass er bereits als Knabe falsettiert hatte und das nach dem Stimmbruch genau so weiterführte, sodass es für ihn „natürlich“ war, so zu singen. Sein Ambitus (ausschließlich Falsett) wird von (Herr, 2013, S. 472) mit g-ges<sup>2</sup> angegeben. Er selbst legte nach eigener Aussage weniger Wert darauf, die höchste Tonhöhe zu erreichen, sondern vielmehr die Resonanz seines Mitteltonbereichs stark zu nutzen. Zwei weitere wichtige Sänger der damaligen Zeit waren der Amerikaner Russel Oberlin (\*1928) und der Deutsche Jochen Kowalski (\*1954). Beide setzten im Vergleich zu Deller auf ein ausgeprägteres Vibrato, um ihrem Gesang einen anderen Charakter zu verleihen. Kowalskis Tief- und Mittellage war Dellers klanglich unterlegen; er setzte mehr auf die hohen Töne (Umfang: f-f<sup>2</sup>). Oberlins Stimme ist von Natur aus höher, wodurch er angeblich mit seiner Bruststimme bis f<sup>2</sup> gelangt (Herr, 2013, S. 472 ff.).

Die Counterotenöre für klassische Musik der heutigen Zeit legen im Gegensatz zu Deller vermehrt Wert auf die höheren Tonbereiche. Ihre Gesangsausbildung zielt darauf ab, die Schwächen der Falsettstimme durch gute Technik auszugleichen. Bekannte Sänger sind u.a. Andreas Scholl, Philippe Jaroussky, Kai Wessel und David Daniels.

Im Film *Farinelli* (1994) von Gérard Corbiau wurde eine Kastratenstimme aus den Gesangsaufnahmen des Counterotenors Derek Lee Ragin und der Koloratursopranis-

## 1 Historischer Überblick über die hohe Singstimme des Mannes

tin Ewa Malas-Godlewska erzeugt. Die genaue Vorgehensweise kann in Depalle et al. (1995) nachgelesen werden, vereinfachen lässt sie sich jedoch auf die folgenden Schritte: Die Musikstücke wurden auf die zwei Sänger entsprechend ihrer Ambitus aufgeteilt und aufgenommen. Anschließend erfolgte ein nicht-triviales Angleichen der Stimmtimbres mittels eines sogenannten *Phase Vocoders* und einer Änderung der Spektralhüllkurven. Zusätzlich wurden drei Noten, welche zu schwer zu singen waren, sogar synthetisiert. Nach dem Zusammensetzen der nun gleichklingenden Aufnahmen, erhielt man so eine künstliche Kastratenstimme. Diese wurde klanglich zum einen so angepasst, dass sie den historischen Erzählungen entspricht, jedoch hatten auch die Film- und Musikproduzenten einen Einfluss auf das Endergebnis (Depalle et al., 1995). Daher kann man nicht davon ausgehen, dass dies der Stimme eines echten Kastraten entspricht, es handelt sich lediglich um eine Annäherung.

Heutzutage wird kein Kind mehr zu Gesangszwecken kastriert, sodass man auch anhand Moreschis letzter Aufnahme vage erahnen kann, wie Farinelli wirklich klang. Es gibt jedoch Sänger, die beispielsweise durch das Kallmann-Syndrom (Kallmann et al., 1944) seit ihrer Jugend einen gestörten Hormonhaushalt (Testosteronmangel) und dadurch auch einen seit ihrer Kindheit nahezu unveränderten Kehlkopf haben. Bekannte Vertreter sind Paulo Abel do Nascimento, Radu Marian und der Jazzsänger Jimmy Scott.

### 1.3.2 Falsettisten aus Pop und Rock

Doch nicht nur in der Klassik wird falsettiert, viele bekannte Pop- und Rockstars singen in hohen Lagen. Einer der bekanntesten war Michael Jackson (1958 - 2009). Charakteristisch für ihn waren der hohe Gesang und der Einsatz hoher Schreie, sowie seine einzigartige Selbstdarstellung und Inszenierung. Seine Stimme wird in (Herr, 2013, S. 496 ff.) jedoch als nicht besonders gut ausgebildet und somit ohne Kraft beschrieben, weshalb auf seinen Konzerten und bei seinen Aufnahmen digitale Effekte zum Einsatz kamen, um das zu korrigieren. Auch Sänger wie die Bee Gees, David Bowie, Nomi oder Freddy Mercury prägten die Musik mit dem Einsatz der hohen Gesangsstimme. Mercurys Stimme wird mit bis zu 4 Oktaven Umfang angegeben (MonstersAndCritics.com, undatiert), mit Sicherheit wird er aber nicht dieselbe Stimmqualität über den gesamten Ambitus entwickelt haben. Genau wie Deller hatten Jackson und Mercury nie Gesangsunterricht genommen.

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

In diesem Kapitel sollen die grundlegenden physikalischen Hintergründe von Tönen, Obertönen, Klangfarben sowie der Sprech- und Singstimme erläutert werden, welche die Basis für die Analyse von Stimmen darstellen.

### 2.1 Klangfarbe, Tonhöhe, Teiltöne, Harmonische, Obertöne und Untertöne

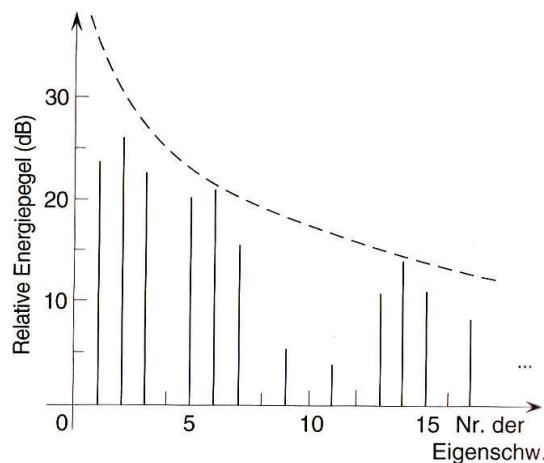


Abbildung 1: Beispielhafte Eigenschwingungen eines Instrumentes für einen gespielten Ton  
(aus Hall, 2008, S. 198)

Vergleicht man zwei Instrumente (z.B. ein Klavier und eine Klarinette), die einen Ton der gleichen Tonhöhe spielen, so unterscheidet man beide anhand ihres Klanges. Man sagt auch, sie haben unterschiedliche *Klangfarben (Timbres)*. Wenn man einen Ton hört, handelt es sich dabei nicht nur um eine einzelne Frequenz, sondern um Überlagerungen verschiedener Frequenzen mit jeweils unterschiedlichen Amplituden, also mit einem eigenen Klangspektrum. Bei den meisten Instrumenten wird man am Spektrum erkennen, dass die vorhandenen Frequenzen Vielfache einer Grundfrequenz  $f_1$  sind. Diese durch unterschiedliche Eigenschwingungen erzeugten Vielfachen werden allgemein *Teiltöne* genannt. Handelt es sich um ganzzahlige Vielfache (also  $f_2 = 2f_1$ ,  $f_3 = 3f_1$ ,  $f_4 = 4f_1$ , ...), so spricht man von *Harmonischen, harmonischen Teiltönen* oder auch *Obertönen*. Wobei zu beachten ist, dass die Teiltöne und Harmonischen ab der Grundfrequenz  $f_1$  gezählt werden, die Obertöne jedoch

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

ab dem ersten Vielfachen<sup>5</sup>  $f_2$ . Nichtharmonische (nicht ganzzahlige) Teiltöne kommen beispielsweise in Glocken und anderen perkussiven Instrumenten vor, während die meisten nicht-perkussiven Instrumente Harmonische oder zumindest annähernd Harmonische erzeugen. Ein beispielhaftes Spektrum an Eigenschwingungen ist in Abbildung 1 zu sehen.

Neben den Obertönen gibt es auch *Untertöne* (*Subharmonische*), welche durch die ganzzahligen Teiler der Grundfrequenz charakterisiert sind:  $f_{u1} = f_1/2$ ,  $f_{u2} = f_1/3$ ,  $f_{u3} = f_1/4$ , ... . In Abschnitt 2.4.4 werden Untertöne in Form von Untertongesang nochmals angesprochen.

Beim Hören kann man einem Ton eine *Tonhöhe* zuordnen. Die dabei wahrgenommene Tonhöhe ist meist die Frequenz des Grundtones. Erstaunlicherweise funktioniert dies auch dann, wenn der Grundton (oder sogar weitere Teiltöne) sehr schwach oder gar nicht vorhanden ist (Rossing et al., 2014, S. 130 f.). Das Gehirn ergänzt die fehlenden Teiltöne selbstständig. Man kennt dies vom Telefonieren: Übertragen wird nur das Frequenzband von 300 Hz bis 3400 Hz (Elektronik-Kompendium.de, Webseite), wodurch der Grundton der Stimme (etwa 100-200 Hz) nicht beim Gegenüber ankommt. Dennoch hört sich die Stimme dadurch nicht höher oder tiefer an als eine Stimme mit Grundton.

### 2.2 Eigenschwingungen eines Blasinstrumentes

Die Stimme weist hinsichtlich ihrer Erzeugung eine starke Ähnlichkeit zu Blasinstrumenten (Orgel, Flöte, Trompete, Klarinette) auf, daher werden diese hier zunächst vom Prinzip erläutert: Ein Luftstrom tritt in einen hohlen röhrenförmigen Resonator ein und wird am Anfang des Rohres in rhythmische Schwingungen versetzt, sodass sich Schallwellen eines Grundtones bilden, die durch den Resonator wandern. Bei einer Blockflöte (Abb. 2 links) ist dies eine scharfe Kante, an der der Luftstrom durch Luftverwirbelungen verändert wird. Bei Rohrblattinstrumenten beginnt das Rohrblatt mit seiner Eigenfrequenz zu schwingen und moduliert so den Luftstrom. Nun können sich im Resonator, abhängig von den Ausmaßen des Rohres und des entstandenen Grundtones, stehende Wellen bilden.

Betrachtet man dazu eine zylinderförmige Röhre der Länge  $L$  mit zwei offenen Enden (Abb. 2 rechts), in der die Luft von der einen Seite vibrierend hineinströmt, so

---

<sup>5</sup>Hier scheint es unterschiedliche Ansichten zu geben. In Hall (2008) und Rossing et al. (2014) beinhalten die Harmonischen die Grundfrequenz, in Nair (1999) ist die erste Harmonische gleich dem ersten Oberton.

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

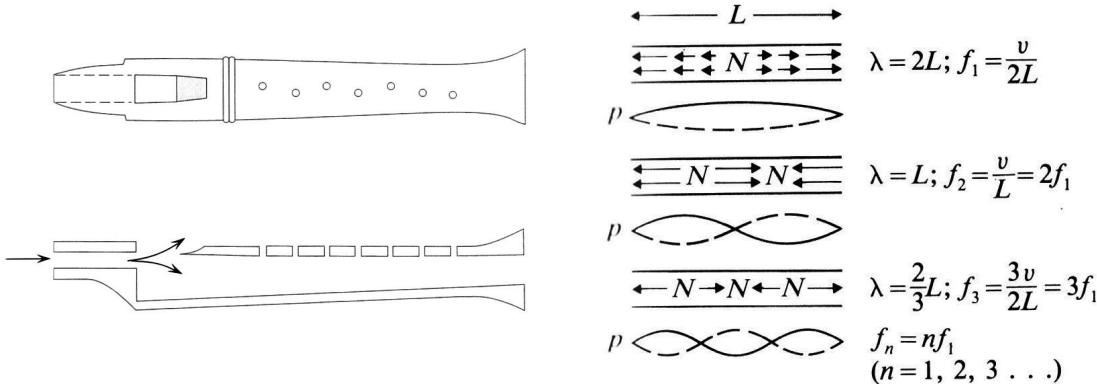


Abbildung 2: Links: Zustandekommen der Luftschnigung in einer Blockflöte. Der Luftstrom durch das Mundstück wird an der scharfen Scheidenkante in Schwingungen versetzt (aus Hall, 2008, S. 63).

Rechts: Die ersten drei Eigenschwingungen der Luft in einem einfachen Röhrenresonator mit zwei offenen Enden, was der Blockflöte mit geschlossenen Tonlöchern entspricht. Der Druck ist an den Außenseiten minimal (etwa Atmosphärendruck), während die Luftbewegung hier maximal ist (aus Rossing et al., 2014, S. 65).

werden bei geeigneter Länge die longitudinalen Luftdruckwellen des Grundtons am Ende reflektiert, und es bilden sich für bestimmte Frequenzen stehende Wellen aus. Die Resonanzbedingung der Röhre lässt die Wellenlängen  $\lambda_1 = 2L$ ,  $\lambda_2 = L$ ,  $\lambda_3 = 2L/3$ , ...,  $\lambda_n = 2L/n$  und somit alle Harmonischen der Frequenz

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad (n = 1, 2, 3, 4, \dots) \quad (2.1)$$

zu. Dabei ist  $v$  die Schallgeschwindigkeit in Luft. Oder: In einer Röhre mit nur einem offenen Ende ergeben sich analog die Teiltöne

$$f_n = n \frac{v}{4L} = n f_1 \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (2.2)$$

Die Intensität der einzelnen Teiltöne, die aus dem Instrument austreten, hängt von der Spektralverteilung der Teiltöne des Grundtons und dem Resonanzverhalten der Röhre ab. Abbildung 3a zeigt die Resonanz für eine halb offene Röhre ohne nennenswerte Dämpfung. Genau an den mit Formel (2.2) bestimmten Harmonischen zeigt sich Resonanz, während alle anderen Frequenzen ausgelöscht werden. Bei einer echten Flöte treten jedoch Dämpfungsverluste auf, wodurch die Resonanzspitzen breiter und flacher (letzteres ist in der Abbildung 3a nicht zu sehen) ausfallen (vgl. Abb.

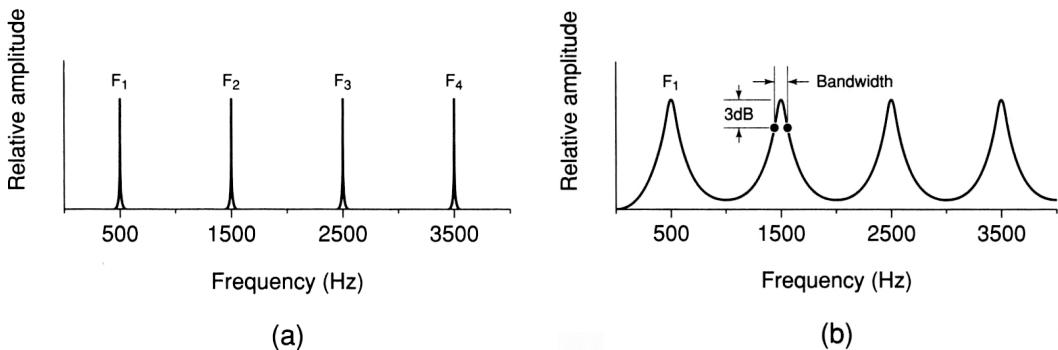


Abbildung 3: Frequenzspektrum für eine halb offene Röhre a) ohne Energieverlust b) mit mittlerem Energieverlust (aus Titze et al., 1999, S. 147)

3b). Diese Dämpfung ist wesentlich vom Material der Flöte (bzw. des Resonators) abhängig, was bei der stark schwingungsabsorbierenden Schleimhaut im Vokaltrakt für die Breite der Formanten sorgt (siehe Abschnitt 2.3.1).

### 2.3 Entstehung des Stimmschalls

In Abbildung 4 ist die schematische Entstehung des Stimmschalls zu sehen. Zunächst verursacht die Atemmuskulatur in der Lunge einen Überdruck und somit einen Luftstrom, der am Ende der Luftröhre durch den Kehlkopf (*Larynx*) und dann weiter durch den Vokaltrakt bis hin zu Mund und Nase gelangt und dort austritt (vgl. Abb. 5 links). Der Kehlkopf ist eine durch verschiedene Knorpel und Muskeln geformte Struktur und verfügt über zwei Stimmlippen (mit Stimmbändern), welche an der inneren Wand des Kehlkopfes anliegen und die V-förmige Stimmritze (*Glottis*) bilden (Abb. 5 rechts). Durch Anspannung der Kehlkopfmuskeln kann die Glottis geschlossen werden. Ab einem bestimmten Überdruck in der Lunge öffnet sich die Stimmritze, sodass die Luft hindurchströmt. Die Verengung der Glottis durch die dicht aneinander liegenden Stimmlippen erhöht die Geschwindigkeit der durchströmenden Luft, und der Druck fällt, sodass ein Sog entsteht (Bernoulli-Effekt). Ein Zusammenspiel dieser entstehenden Bernoulli-Kraft und der angespannten Muskeln schließt die Stimmritze wieder. Hierdurch wird eine kurze Unterbrechung des Luftstroms, ähnlich die der Scheidenkante einer Blockflöte oder dem Rohrblatt einer Klarinette, verursacht. Geschieht dieses Öffnen und Schließen schnell genug und periodisch, entsteht der primäre Stimmschall bestehend aus Grundfrequenz und Overtönen (Abb. 6). Der vom subglottischen Druck abhängige Offenquotient der Glottis ("Verhältnis von offenem und geschlossenem Anteil innerhalb einer Schwingungs-

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

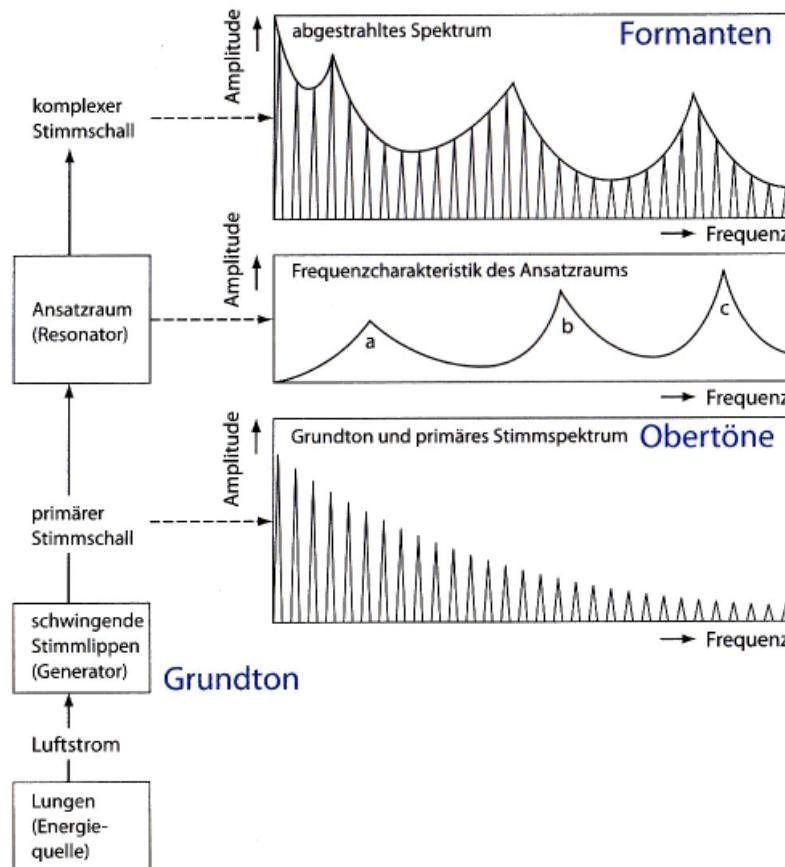


Abbildung 4: Schema der Stimmschallentstehung (aus Schneider-Stickler & Bigenzahn, 2013, S. 31)

periode" nach (Schutte & Seidner, 2006, S. 80), beeinflusst dabei das entstehende Obertonspektrum wesentlich (Schutte & Seidner, 2006, S. 80). Die Tonhöhe ist abhängig vom egressiven Luftdruck, sowie von der Länge der Stimmlippen, deren Masse und der Spannung, die die Muskeln auf sie ausüben (der genaue Vorgang im Kehlkopf wird in Abschnitt 2.4.3 erläutert). Bei Männern sind die Stimmlippen allgemein länger und dicker als bei Frauen und Kindern, sodass der Grundton in normaler Gesprächslage bei Männern etwa bei 100 Hz und bei Frauen etwa doppelt so hoch liegt (Nawka & Wirth, 2008, S. 101; Hollien, 2013).

Anschließend gelangt der Primärschall in den Vokaltrakt (auch Ansatzraum genannt), der die Funktion eines Resonators, also eines Frequenzfilters auf den primären Stimmschall hat (Abb. 4). Er ist beim erwachsenen Mann etwa 17-18 cm, bei Frauen etwa 14-15 cm lang (Högberg, 1995) und schließt den Rachen-, Mund- und Nasenraum ein. Der enorme Vorteil gegenüber einem starren Röhrenresonator

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

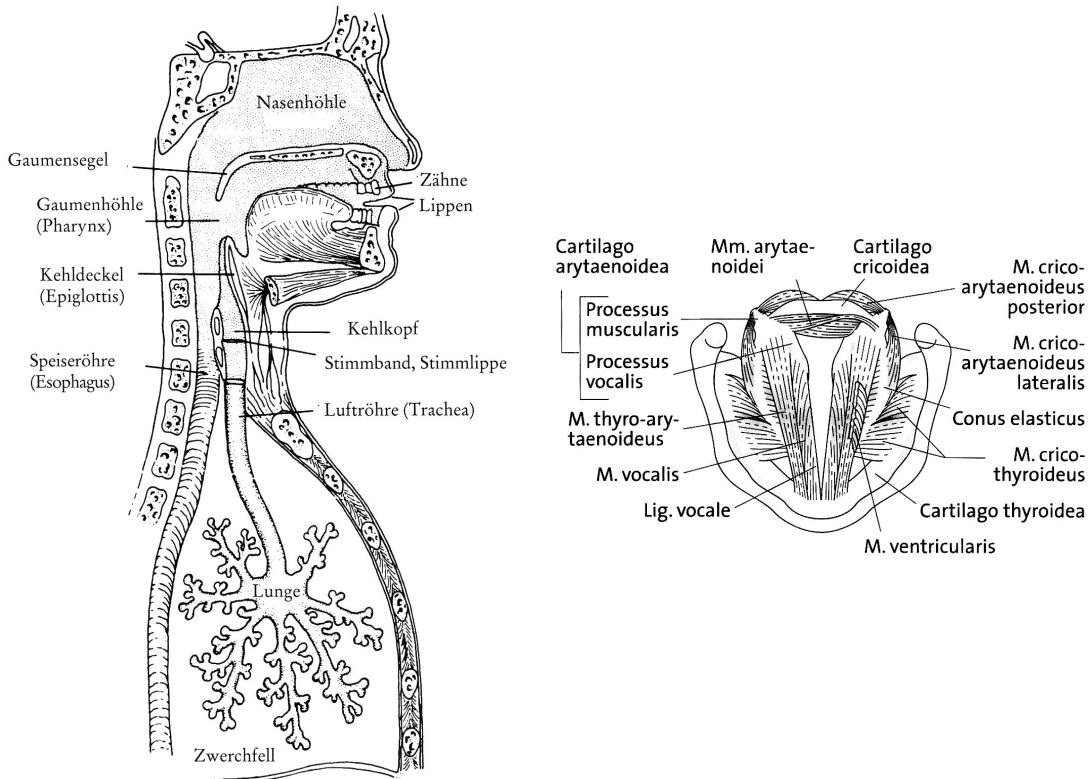


Abbildung 5: Links: Anatomische Übersicht über den stimmbildenden Bereich (aus Hall, 2008, S. 298)

Rechts: Ansicht auf die Larynxmuskulatur von oben. Zu erkennen ist die V-förmige Glottis im offenen Zustand (aus Nawka & Wirth, 2008, S. 37).

eines Instruments ist hierbei, dass sich durch bewusste Verformung des Vokaltraktes (Position von Zunge, Gaumensegel, Lippen, Kiefer, Rachenwänden, ...) gezielt charakteristische Resonanzfrequenzen erzeugen lassen, die den Primärschall dann gemäß der aktuellen Vokaltraktform filtern (Abb. 4 Maxima a, b und c). Der fast ausschließlich (d.h. mit Ausnahme von geringsten Schallemissionen aus Schädelknochen und Brustwänden) aus Mund und Nase austretende Schall wird komplexer Stimmschall genannt. Die Frequenzen, bei denen der Primärschall maximal verstärkt wird, nennt man *Formanten* oder *Formantbereiche* (Abb. 4). Formanten sind somit essenziell für die Erzeugung von Sprache, insbesondere der Vokale, und für das Stimmtimbre des Sprechers. Zur Bildung von Vokalen sind hauptsächlich die ersten zwei Formanten (F1, F2) ausschlaggebend, die höheren Formanten F3, F4 usw. sind wichtig für die

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

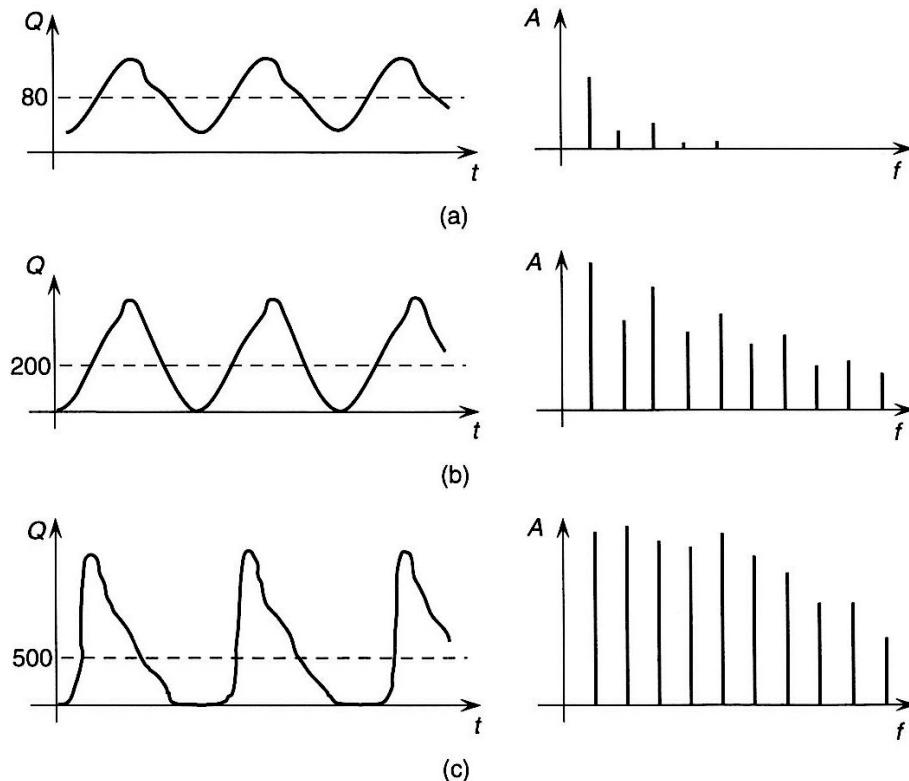


Abbildung 6: Links: Luftdurchflussmenge  $Q$  [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] als Indikator für das Öffnungs- und Schließverhalten der Glottis bei verschiedenen Lautstärken: a) leise, b) normal, c) laut. Während bei leiser Phonation kein Glottisschluss stattfindet, nimmt dieser bei lauter Phonation einen deutlichen Teil der Schwingungsperiode ein.  
Rechts: Entsprechende Spektren des primären Stimmschalls. Durch längeren Glottisschluss fällt das Spektrum obertonreicher aus (aus Hall, 2008, S. 306).

Tragfähigkeit<sup>6</sup> der Stimme und das Stimmtimbre. Dabei hängt  $F_1$  hauptsächlich von der Öffnung des Unterkiefers,  $F_2$  von der Form des Zungenhauptkörpers und  $F_3$  von der Zungenspitze ab (Hall, 2008, S. 307). Aufgrund der anatomischen Unterschiede jedes Sprechers und auch dessen aktueller Tagesform liegen Formanten bestimmter Vokale nicht immer bei derselben Frequenz, sondern mehr in einem bestimmten Frequenzbereich, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist. Tendenziell sind Männer in dieser Darstellung in den jeweiligen Bereichen unten links, Frauen mittig und Kinder oben rechts.

<sup>6</sup>Wird nach Klingholz (2000) definiert als: "Tragfähigkeit[:] wie Durchschlagskraft oder Durchdringungsfähigkeit akustisch nicht definierter Begriff, der die Reichweite der Stimme und ihr Vermögen, Musikinstrumente zu übertönen, charakterisieren soll". Pahn et al. (2001) geben (ausdrücklich für die Sprechstimme) eine quantitative Möglichkeit der Bewertung der Durchdringungsfähigkeit an.

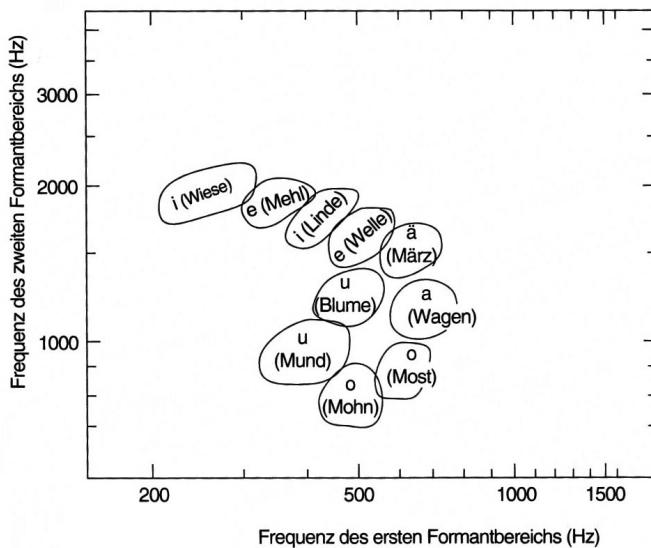


Abbildung 7: Typische Bereiche für Formanten verschiedener Vokale (aus Hall, 2008, S. 309)

### 2.3.1 Entstehung der Formanten

Man kann das Entstehen der Formanten recht einfach erklären, indem man sich den Vokaltrakt zunächst als einfachen Zylinder der Länge  $L = 17\text{ cm}$  mit einem offenen Ende (Mund) und einem geschlossenen Ende (Anfang des Vokaltraktes) vorstellt. Wie bereits erläutert, werden nach Formel (2.2) die Frequenzen  $f_n = nc/4L$  verstärkt. Mit  $v = 340\text{ m/s}$  erhält man so  $f_1 = 500\text{ Hz}$ ,  $f_3 = 1500\text{ Hz}$  und  $f_5 = 2500\text{ Hz}$ . Untersuchungen zeigen, dass die ersten drei Formanten bei Bildung des Vokals /e/ typischerweise um 500 Hz, 1800 Hz und 2500 Hz (Rossing et al., 2014, S. 290) und damit bereits ziemlich nah an den Ergebnissen des einfachen Modells sind.

Die Resonanzspitzen (a, b, c in Abb. 4) sind jedoch nicht so scharf wie beispielsweise bei einer Röhre aus Holz, was damit zusammenhängt, dass das weiche Gewebe der Schleimhaut Schallenergie aufnimmt und absorbiert (Hall, 2008, S. 304). Dadurch fallen, wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, die Resonanzspitzen flacher aber breiter aus (ähnlich Abb. 3b). Es wird also kein Frequenzanteil komplett herausgefiltert, weshalb auch Frequenzen zwischendrin  $f_1, f_3, f_5, \dots$  vorhanden sind. Für die halb offene Röhre ergibt sich die in Abbildung 8a dargestellte Resonanzkurve. Formanten sind somit relativ breite Frequenzbereiche (vgl. Abb. 8b,c), wobei sich die angegebene Frequenz auf ihr Maximum bezieht. Ebenfalls ist in der Abbildung zu erkennen, dass die Formanten weitestgehend unabhängig von der Grundfrequenz sind. Erhöht

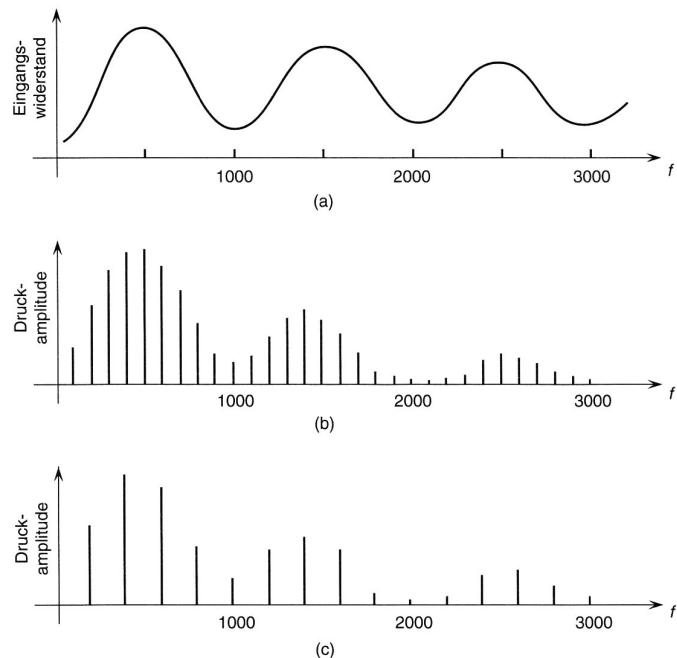


Abbildung 8: a) Filterfunktion des Vokaltraktes ausgehend von einem zylinderförmigen Modell mit 17 cm Länge  
 b) Spektrum an Teiltönen nach Verlassen des Ansatzrohres.  $f_1$  hat eine Frequenz von 100 Hz, es wird von der Abbildung 6b) ausgegangen (jedoch ohne die ungeraden Teiltöne abzuschwächen)  
 c) Selbiges mit einer Grundfrequenz von 200 Hz (aus Hall, 2008, S. 307)

man den Grundton von 100 Hz auf 200 Hz, so verdoppeln sich die Abstände der Teiltöne, die Formaten bleiben jedoch an derselben Position. Anders ist es jedoch, wenn man Helium einatmet, denn hier ändert sich die Schallgeschwindigkeit (etwa  $v \approx 1000 \text{ m/s}$ ) im Ansatzraum, und die Formanten verschieben sich zu höheren Frequenzen. Weitere Modelle zur Berechnung von Formanten verwenden z.B. zwei Zylinder mit unterschiedlichen Durchmessern (vgl. Abb. 9) und simulieren dadurch Eng- und Weitstellen im Vokaltrakt.

## 2.4 Singen

Singen und Sprechen unterscheidet sich physikalisch und physiologisch auf den ersten Blick nicht, weisen bei genauerer Betrachtung jedoch wesentliche Unterschiede auf.

### 2.4.1 Sängerformanten

In Oper und klassischen Stücken singen die Sänger meist ohne Mikrofon und sind dennoch hörbar, obwohl sie gegen ein ganzes Orchester "ansingen". Diese enorme

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

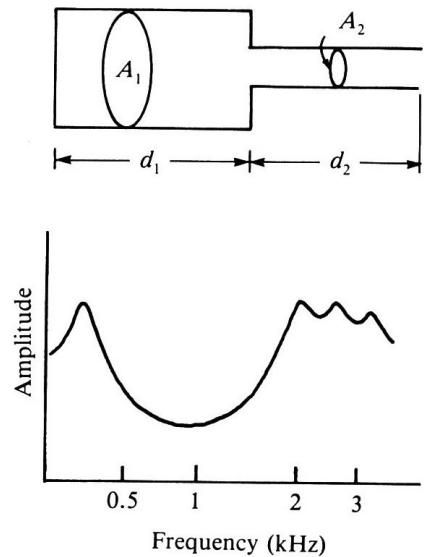


Abbildung 9: Weiteres Modell bestehend aus einer Röhre mit unterschiedlichen Radien zur Berechnung von Formanten (hier zum Vokal /i/) (aus Rossing et al., 2014, S. 352)

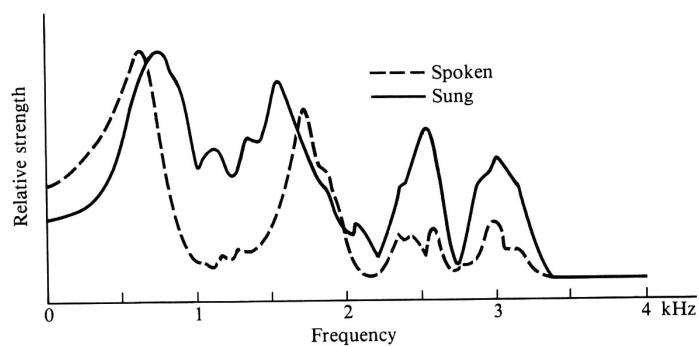


Abbildung 10: Spektrum eines von einem professionellen Sänger gesprochenen und gesungenen Vokals /ae/. F1 und F2 sind leicht verschoben, F3 und F4 sind beim Singen deutlich verstärkt (aus Rossing et al., 2014, S. 379).

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

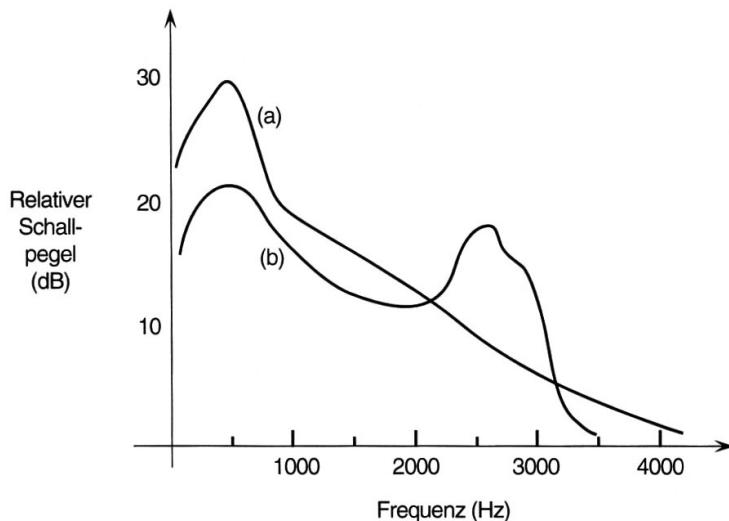


Abbildung 11: Über einen längeren Zeitraum gemitteltes Spektrum (a) eines Orchesters und (b) eines professionellen Operntenors (aus Hall, 2008, S. 314)

Tragfähigkeit der Stimme kommt durch eine Vergrößerung der Resonanzräume beim Tiefertreten des Kehlkopfes zustande. Vergleicht man Singen und Sprechen, so ist bei professionellen Sängern der Kehlkopf niedriger, der Kiefer ist weiter geöffnet, und Zungenspitze sowie Lippen sind bei bestimmten Vokalen weiter vorn (Sundberg, 1974). Besonders durch den tieferen Kehlkopf entsteht im Rachen ein weiterer kleiner Resonanzraum (Sundberg, 1974), der vor allem Frequenzen von 2500 Hz bis 3000 Hz verstärkt, somit im Bereich von F3 und F4, oder auch von F4 und F5 (Nair, 1999, S. 202). Dies ist der sogenannte Sängerformant, den man deutlich erkennt, wenn man das Spektrum eines gesprochenen und eines professionell gesungenen Vokals aus Abbildung 10 vergleicht. F3 und F4 sind deutlich verstärkt, was zu einer erhöhten "Brillanz"<sup>7</sup> und Tragfähigkeit der Stimme führt und somit dem Sänger ermöglicht, unverstärkt neben dem gesamten Orchester zu singen (Abb. 11). Das Orchester weist den höchsten Schallpegel im Bereich des Grundtons auf. Der Schallpegel der Obertöne nimmt mit zunehmender Frequenz stark ab. Hört man sich in einer Tonaufnahme den Sängerformanten isoliert an, so klingt dieser nicht spektakulär. Dennoch reichen die etwa 10 dB Verstärkung, damit das Gehirn die Stimme als wesentlich präsenter und klarer wahrnimmt (Nollmeyer, 2013, S. 133 ff. mit dazugehörigen Videos). Interessant ist, dass der Frequenzbereich des Sängerformanten nahe der Resonanzfrequenz des menschlichen Gehörgangs liegt, weshalb

<sup>7</sup>Wie auch Tragfähigkeit, ist Brillanz nicht akustisch definiert, sondern mehr ein Höreindruck für einen klaren Ton.

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

das menschliche Gehör in diesem Bereich besonders empfindlich ist (Rossing et al., 2014, S. 380). Nach (Rossing et al., 2014, S. 377) zeigt sich der Sängerformant besonders bei guten männlichen Sängern im Modalregister, für Sopranstimmen und Falsettisten ist er jedoch weniger stark ausgeprägt.

### 2.4.2 Formantentuning

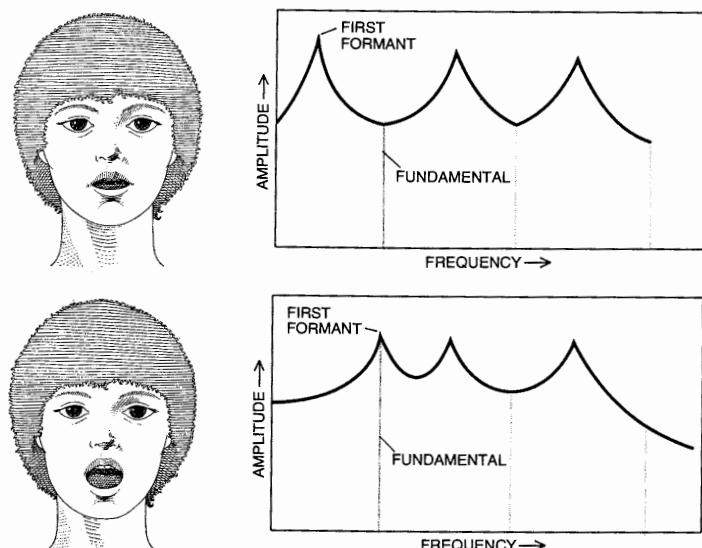


Abbildung 12: Verschiebung des ersten Formanten auf die Grundfrequenz durch Absenken des Unterkiefers (aus Sundberg, 1977)

Professionelle Sänger erhöhen mit dem sogenannten *Formantentuning* oder *Formantenschieben* die Lautstärke ihrer Stimme. Denn je höher der Grundton liegt, desto weiter liegen die Obertöne auseinander. Somit fallen die Teiltöne nicht zwangsläufig in die Formantenbereich, wodurch "Stimmpotenzial" verschenkt wird. Im Sopran und bei Kontratenören ist dieser Effekt besonders markant, denn wenn die Grundfrequenz oberhalb des ersten Formanten liegt, kommt von diesem keinerlei Verstärkung (Rossing et al., 2014, S. 382), was in Abb.12 dargestellt ist. Ein professioneller Sänger kann nun, z.B. durch Öffnen des Unterkiefers, seinen Vokaltrakt so anpassen, dass der erste Formant zur Grundfrequenz "hinverschoben" und diese damit maximal verstärkt wird. Verschoben werden meist nur F1 oder F2 (und das in den höheren Frequenzbereich), wobei eine "Verschiebung nach unten" (d.h. in tiefere Frequenzbereiche) ebenfalls möglich ist (Rossing et al., 2014, S. 379 f.). Durch das Formantentuning ändert sich zwangsläufig auch der Klang gesungener Vokale. Dennoch werden die gesungenen Vokale in den meisten Fällen trotzdem verstanden,

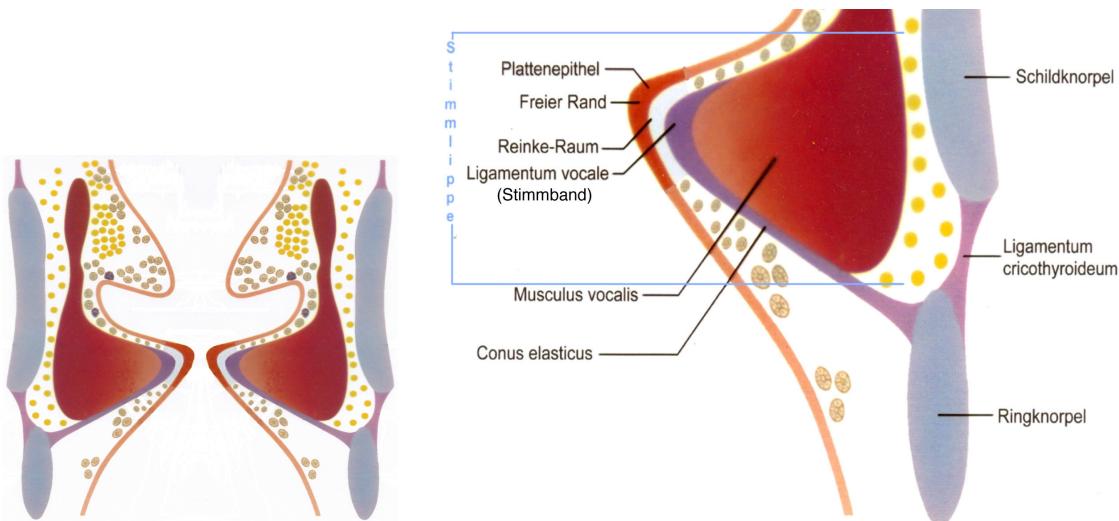


Abbildung 13: Links: Frontalschnitt des Kehlkopfes (ohne Epiglottis)  
Rechts: Ausschnitt des Schichtaufbaus einer Stimmlippe (nach Lehmann et al., 1981, S. 15)

da die Klangveränderungen nicht allzu groß sind und man Rückschlüsse aus dem Kontext ziehen kann (im Gegensatz zu isoliert gesungenen Vokalen). In den höchsten Sopranlagen kommt es allerdings vor, dass Vokale durch Formantenschieben so stark verändert werden, dass der Ausgangsvokal nicht mehr erkennbar ist. Aus diesem Grund ist nach (Rossing et al., 2014, S. 380) der unverständliche Text solcher Gesangspassagen entweder unwichtig oder wird nochmals in einer tieferen Tonlage wiederholt.

#### 2.4.3 Stimmregister

Ein Stimmregister ist nach (Schürenberg, 1989, S. 22) definiert als "eine Reihe aufeinanderfolgender, nach einem ähnlichen physiologischen Prinzip gebildeter Töne", bzw. nach (Nadoleczny, 1923, S. 45) als "eine Reihe von aufeinanderfolgenden gleichartigen Stimmklängen, die das musikalisch geübte Ohr von einer anderen sich daran anschließenden Reihe ebenfalls unter sich gleichartiger Klänge an bestimmten Stellen abgrenzen kann. Ihr gleichartiger Klang ist durch ein bestimmtes konstantes Verhalten der Obertöne bedingt.".

Man differenziert dabei nach (Schürenberg, 1989, S. 22) zwischen Brustregister (auch Vollregister oder Modalregister) und Kopfregister (auch Randregister). Um die beiden Register zu unterscheiden, ist es notwendig, sich die physiologischen Vorgänge im Kehlkopf bei Verwendung des Brust- und Kopfregisters genauer anzusehen. Die

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

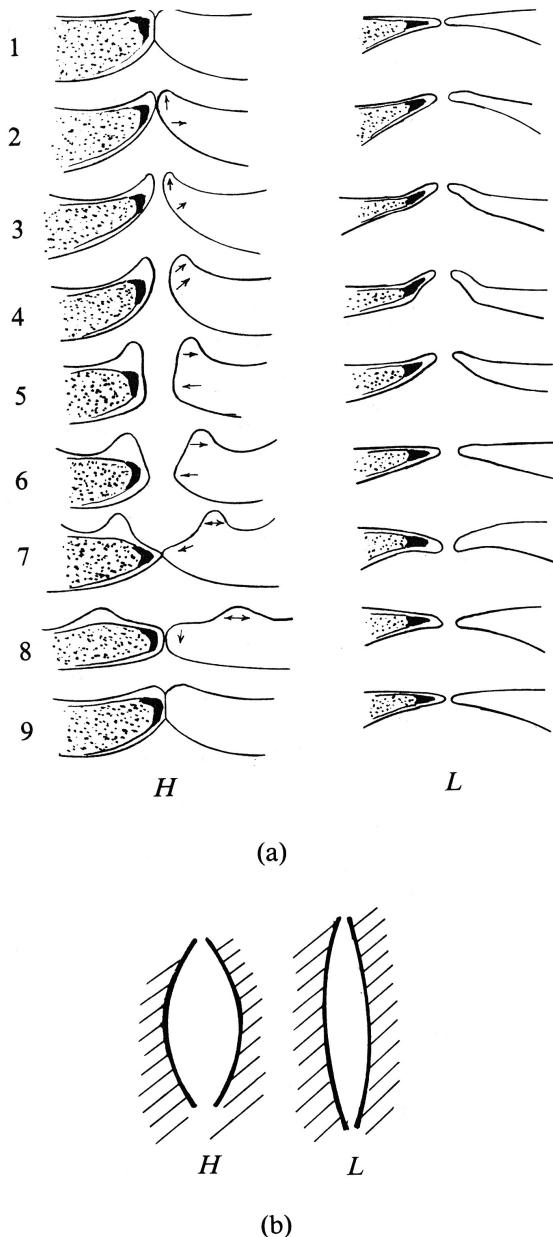


Abbildung 14: a) Seitenansicht des Schwingungsvorgangs der Stimmlippen bei Verwendung der Bruststimme (H) und der Kopfstimme (L)  
 b) Stark schematisierte Draufsicht auf den Glottisspalt in den entsprechenden Fällen (aus Rossing et al., 2014, S. 387)

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

Stimmlippe, wie in Abbildung 13 dargestellt, weist einen Schichtaufbau auf. Die äußere Schleimhautschicht (auch Cover genannt, bestehend aus dem freien Rand, Epithel) ist durch eine Verschiebeschicht (Reinke-Raum) von der Unterlage (auch Body genannt, bestehend aus Stimmband und dem M. vocalis) getrennt. Strömt Luft durch den Kehlkopf, so können durch muskuläre Vorspannung und den Bernoulli-Effekt die Stimmlippen zum Schwingen gebracht werden. Dabei können Body und Cover gegeneinander in Schwingung versetzt werden. Im Vollregister schwingen beide, Body und Cover, im Randregister lediglich der freie Rand der Schleimhaut. Die erzeugte Grundfrequenz des primären Stimmschalls wird dabei höher, je höher die Spannung der Stimmlippen, eingestellt durch den M. anticus (M. cricothyreoides) und den M. vocalis, und höher je geringer die effektive schwingende Masse der Stimmlippen ist. Die grobe Vorspannung erfolgt durch den M. anticus (Approximation von Schild- und Ringknorpel durch Anhebung des Ringknorpels gegen den fixierten Schildknorpel), während der M. vocalis die Feinabstimmung übernimmt. Das Einzigartige am M. vocalis ist, dass er durch die zopfartige Verwringung seiner Muskelstränge die Spannung erhöhen kann, ohne sich wesentlich zu verkürzen.

Im Vollregister schwingt somit viel Masse und erzeugt einen tiefen Ton, der sowohl durch Anspannung des M. vocalis, als auch des M. anticus erhöht werden kann. Man spürt durch Vibrationen auf der Brust, dass dort bei tiefen Tönen die größte Resonanz stattfindet, weshalb man auch von der Bruststimme spricht. Während des Schwingungsvorgangs (Abb. 14 links) tritt in der Regel ein vollständiger Glottisschluss auf. Daher ergeben sich nach (Nawka & Wirth, 2008, S. 95) und (Rossing et al., 2014, S. 388 f.) deutlich ausgeprägte Obertöne (Abb. 6c).

Dieser Zusammenhang zwischen Glottisschluss und der Ausprägung der Obertöne wird in den Quellen nicht weiter erläutert. Eine mögliche Erklärung liegt in der Modulation der Schallwellen durch die Glottis: Die Wellenform der entstehenden Schallwellen wäre bei einem stark sinusähnlichen Öffnungs- und Schließverhalten der Glottis ebenfalls sinusähnlich und hätte daher wenige Obertöne (vgl. Abb. 15a). Wie man anhand der Luftdurchflussmengen in Abbildung 6 erkennen kann, ähnelt das Öffnungs- und Schließverhalten jedoch eher einer Dreiecks- und nicht einer Sinus-Kurve (vgl. Abb. 15b). Wenn zudem die Glottis zu einem signifikanten Anteil der Schwingungsperiode geschlossen ist, werden die entstehenden Schallwellen dadurch stark moduliert, was zu komplexeren Wellenformen und damit zu stärkeren Obertonteilen führt. In Abbildung 15 sind unterschiedliche Wellenformen und ihre jeweils

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

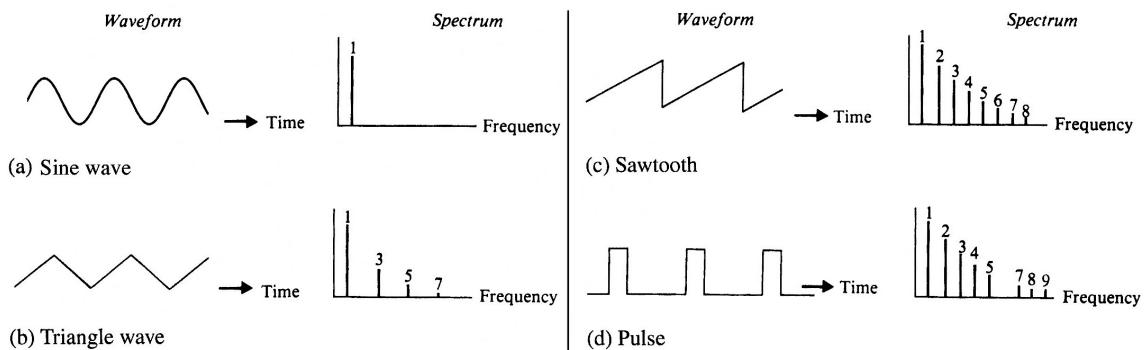


Abbildung 15: Spektren verschiedener Wellenformen (nach Rossing et al., 2014S. 137)

entsprechenden Spektren zu sehen.

Im Gegensatz zum Vollregister ist beim Randregister nur wenig schwingende Masse vorhanden, und der M. vocalis stärker angespannt (Abb. 14). Durch die geringe Masse kann die Grundfrequenz leicht erhöht werden. Der Glottisschluss ist jetzt meist nicht mehr vollständig gegeben, was wiederum Auswirkungen auf die Modulation des egressiven Luftstroms und somit den Primärschall hat. Während der Grundton nun stark betont wird, fallen nach (Nawka & Wirth, 2008, S. 96 f.) und (Rossing et al., 2014, S. 386 ff.) die Obertöne deutlich schwächer aus.

In einem Videointerview mit Russel Oberlin (Youtube.com, undatiert) singt dieser an einer Stelle eine Vokalise einmal im Falsett und einmal in Modalstimme. Das Spektrogramm der Vokalisen und die beiden zeitlich gemittelten Spektren sind in Abbildung 16 zu sehen. Man erkennt in der Mittelung deutlich, dass die Spektren bis etwa 2000 Hz kaum unterschiedlich sind. Ab dort zeichnet sich ein sehr klarer Sängerformant ab. Auch im Spektrogramm ist der durchgehende Sängerformant um 3000-4000 Hz deutlich zu erkennen.

### 2.4.4 Ober- und Untertongesang

Bei der Gesangsform des Obertonsingens machen sich Obertonsänger wie Wolfgang Saus die Verformbarkeit und die daraus resultierende Filterform des Vokaltraktes auf extreme Art und Weise zunutze, um zweistimmige Vokalmelodien zu singen. Dabei wird gezielt ein Oberton im Spektrum so stark hervorgehoben, dass es so klingt, als sei zum gesungenen Ton ein flötenähnliches Instrument zu hören. Im Spektrogramm in Abbildung 17 erkennt man, wie über die gesamte Dauer ein konstanter Ton von etwa 200 Hz Grundfrequenz mit klaren Obertönen gesungen wird. Ab etwa 25 s werden die Obertöne von 400 Hz bis 2500 Hz aufwärts und anschließend (bis etwa

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

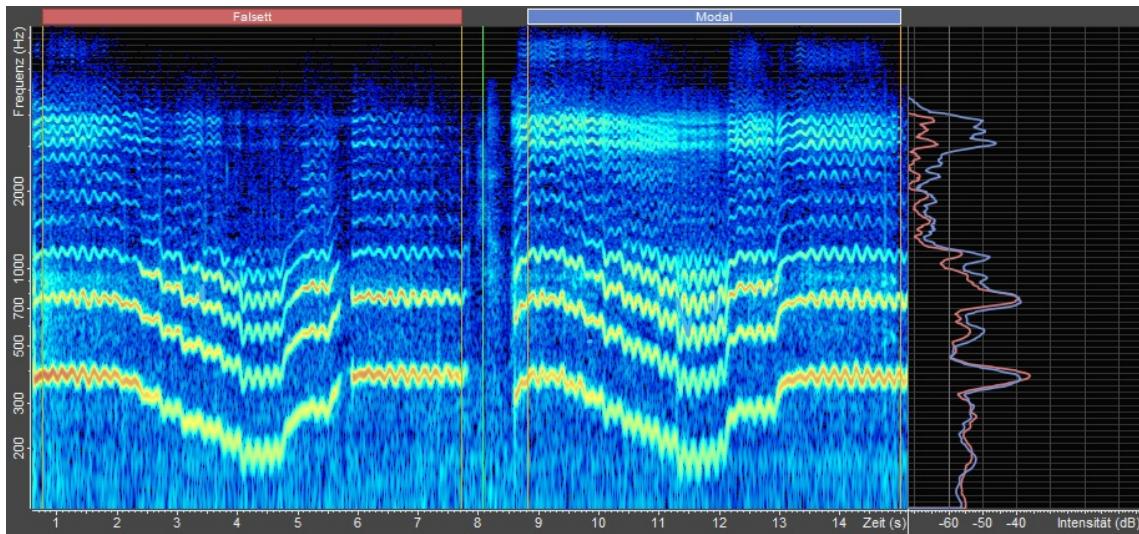


Abbildung 16: Mit dem Overtone Analyzer erstelltes Spektrogramm einer Vokalise, gesungen von Russel Oberlin, zunächst im Falsett und dann in Modalstimme. Rechts zu sehen sind die zeitlich gemittelten Spektren in den jeweiligen Registern. Rot entspricht der Falsettstimme, Blau der Modalstimme.

31 s) wieder abwärts einzeln und nacheinander verstärkt.

Manche Stimmkünstler sind ebenfalls in der Lage, Untertöne ( $f_1/2$ ,  $f_1/3$ ,  $f_1/4$ , ...) zu erzeugen. Diese liegen unterhalb der Grundfrequenz und sind frequenzabhängig manchmal auch nicht mehr hörbar. Relativ bekannt ist dies vom Meditationsgesang tibetanischer Mönche. Es gibt zwei Techniken für das Untertonsingen: Den Strohbass (engl. vocal fry) und den Kehlgesang. Bei beiden werden zusätzliche, niedrigerfrequente Schwingungen im Kehlkopf, z.B. durch das Mitschwingen der aryepiglottischen Falten, erzeugt (Saus, Website).

## 2 Physik der Tonbildung und der Singstimme

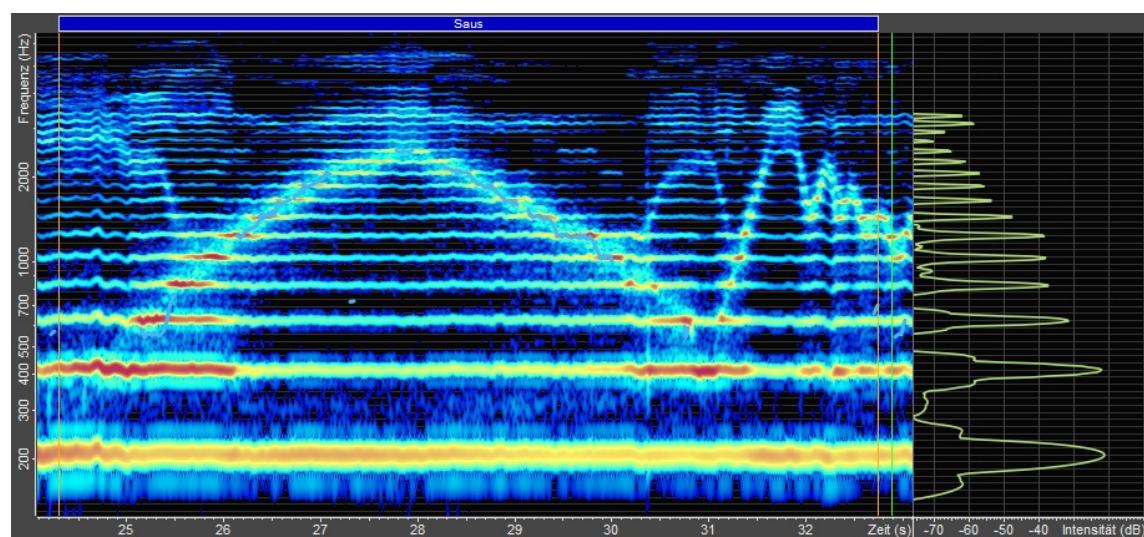


Abbildung 17: Spekrogrammausschnitt und gemitteltes Spektrum aus dem Titel "J-Technik" der beiliegenden CD von Saus (2006)

## 3 Analyse von Gesangsstimmen

### 3.1 Übersicht der Analyse- und Diagnoseverfahren

Es gibt zahlreiche Methoden und Möglichkeiten, Stimmen zu untersuchen. Diese sind oft auf pathologische Diagnosen ausgerichtet (daher wird im Folgenden auch teilweise von Patienten<sup>8</sup> gesprochen) und können sowohl subjektiv als auch objektiv sein.

Ein Basisprotokoll zur Vereinheitlichung von Stimmuntersuchungen existiert von der European Laryngological Society (ELS) und besteht nach (Schneider-Stickler & Bigenzahn, 2013, S. 63 ff.) aus den folgenden fünf Grundmethoden:

#### Perzeption

Der Arzt oder Stimmtherapeut stuft die Stimme anhand seines akustischen Höreindrucks ein. Einheitliche Vorlagen, wie die GRBAS-Skala (Grade, Roughness, Breathiness, Asthenia, Strain) oder die RBH-Klassifikation (Rauigkeit, Behauchtigkeit, Heiserkeit) werden herangezogen. Hierbei lassen sich deutlich einheitlichere und besser vergleichbare Ergebnisse, als beispielsweise durch die Beschreibung von Heiserkeit anhand von 59 frei gewählten Adjektiven (wie in Schneider-Stickler & Bigenzahn, 2013, S. 128 erwähnt), erzielen. Allein die Erfahrung des Beurteilenden ist entscheidend, zusätzliches Equipment wird nicht benötigt.

#### Subjektive Bewertung durch den Patienten

Subjektive Eindrücke des Patienten werden ebenfalls verwendet. Denn der Patient selbst weiß meist am besten, was für ihn normal ist. Hierzu werden standardisierte Fragenkataloge (Singing Voice Handicap Index auf Englisch nach Cohen et al., 2007 und auf Deutsch nach Lorenz et al., 2013) herangezogen, die anhand visueller Analogskalen bewertet werden können.

#### Videostroboskopie

Anhand optischer Untersuchungsmethoden wird die Funktion des Kehlkopfes untersucht. Z.B. kann mit einem einfachen Kehlkopfspiegel oder mit einem Lupenendoskop im Rachenraum die Stimmgebung beobachtet werden. Da die schnellen, nahezu periodischen, Schwingungen der Stimmlippen für das menschliche Auge nicht

---

<sup>8</sup>Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbeziehungen gelten im Folgenden gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

genau erkennbar sind, bedient man sich des Stroboskopeffekts (Schönhärl, 1960). Durch kurzzeitiges, starkes Beleuchten mit Lichtblitzen hebt man gezielt einzelne Zeitpunkte der Schwingung für das Auge hervor und kann auf diese Weise bei geeigneter Blitzfrequenz ein stehendes oder bewegtes Bild der Stimmlippen erzeugen. Untersucht man so den Unterschied zwischen Brust- und Falsettstimme, erkennt man, dass beim Falsett die Stimmlippen meist nicht komplett schließen.

#### **Aerodynamische Messungen und Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Stimme**

Dies beinhaltet verschiedene Lungenfunktionstests und Luftstrommessungen beim Ausatmen. Eine einfache Untersuchung ist die Bestimmung der maximalen Tonhaltedauer (in normaler Sprechlautstärke) für den Vokal /a/, die mit einer Stoppuhr durchgeführt werden kann. Werte ab 15 s sind normal, während unter 10 s von einer Störung ausgegangen werden kann.

#### **Akustische Analysen**

Die Stimme des Patienten wird nach bestimmten Richtlinien (Mund-Mikrofonabstand, schallgedämpfte Umgebung, Tonhaltedauer, ...) aufgenommen und danach mit Softwareprogrammen analysiert. Die Analyse der Obertöne fällt in diese Kategorie. Bestimmbare Werte sind neben vielen weiteren möglichen: Formantenfrequenz, Shimmer, Jitter und Vibratofrequenz. - In vielen phoniatrischen und logopädischen Einrichtungen werden Singstimmfeldmessungen durchgeführt. Hierbei werden nacheinander Grundtöne verschiedener Frequenzen vorgegeben, die jeweils so laut und so leise wie möglich gesungen werden müssen. Werden die entsprechenden Schalldruckpegel gegen die Tonhöhen aufgetragen, erhält man das Singstimmprofil (bei verbundenen Punkten: Singstimmfeld).

Abbildung 18 zeigt einen Auszug aus dem ELS-Protokoll von 2001. Man erkennt deutlich, dass die Bewertungsrichtlinien in den Bereichen Perzeption, Videostroboskopie und subjektive Selbstbewertung durch 4-Punkte-Skalen und visuelle Analogskalen subjektiv sind und stark vom ausführenden Arzt bzw. dem Patienten selbst abhängen. Oft kommen Standardtexte (z.B. „Der Nordwind und die Sonne“) zum Einsatz.

#### **3.2 Softwarevergleich**

In diesem Abschnitt werden getestete Programme vorgestellt, die sich am besten für die Analyse des Obertonspektrums von Gesangsstimmen eignen. Der Overtone

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

Komponente	Beispiele	Bewertung
Perzeption	Auditive Beurteilung von Sprechstimmlage und Phonationslautstärke;  Stimmklangbeurteilung nach der GRBAS-Skala (v. a. Rauigkeit und Behauchtheit) bzw. RBH-Klassifikation	Beschreibend  4-Punkte-Skala (0 = keine Abweichung, 1 = geringgradige Störung, 2 = mittelgradige Störung, 3 = hochgradige Störung) oder visuelle Analogskala (100 mm)
Videolaryngostroboskopie	Beurteilung der Stimmrippenschwingungen:  – Glottisschluss  – Regularität  – Randkantenverschieblichkeit  – Symmetrie	4-Punkte-Skala (0 = keine Abweichung, 1 = geringgradige Störung, 2 = mittelgradige Störung, 3 = hochgradige Störung) oder visuelle Analogskala
Aerodynamische Untersuchungen	Maximale Tonhaltedauer /a:/  Phonationsquotient (Vitalkapazität/maximale Tonhaltedauer)  Vitalkapazität	In s  In ml/s  In ml
Akustische Messungen	Periodizitätsanalysen (von Frequenz/Jitter und Amplitude/Shimmer)*  Harmonics-to-Noise-Ratio*  Stimmfeldmessungen:  – höchste Frequenz  – geringste Intensität  – Tonhöhenumfang	In %  In Hz  In dB  In Halbtonschritten (HT)
Subjektive Bewertung durch den Patienten	Beurteilung der Stimmqualität mit Hilfe stimmbezogener Fragen	Visuelle Analogskalen (0 = normale Stimme ohne Einschränkung und 100 = hochgradige Stimmstörung mit Einschränkung im täglichen Leben)

Abbildung 18: Auszug aus dem ESL Basisprotokoll (2001) für funktionelle Stimmbeurteilung (aus Schneider-Stickler & Bigenzahn, 2013, S. 62)

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

Analyzer (OA) war ursprünglich für die Analyse vorgesehen. Die getesteten Programme entsprechen hauptsächlich den in Kramer (2009) und (Schneider-Stickler & Bigenzahn, 2013, S. 143) Aufgeführten. Zusätzlich wurden im Internet gefundene Programme getestet.

Eine Grundvoraussetzung, die die Software erfüllen muss, ist, Audiodateien als Spektrogramme ( $x = \text{Zeit}$ ,  $y = \text{Frequenz}$ , Farbcodierung = Intensität) und als Spektren ( $x = \text{Frequenz}$ ,  $y = \text{Intensität}$ ) darstellen zu können. Dies geschieht meist durch diskrete Fourier-Transformation (DFT) mit Hilfe des Fast-Fourier-Transform-Algorithmus (FFT). Eine ähnliche Möglichkeit für die Erstellung von Spektren (nicht für Spektrogramme) nennt sich Linear-Predictive-Coding (LPC). Sie ist besonders zur Formantenbestimmung geeignet, da hierbei spektrale Hüllkurven dargestellt und somit Formanten (statt vieler einzelner Obertöne) deutlich hervorgehoben werden (vgl. Abb. 19).

Mit Hilfe des Spektrogramms sollen in der Masterarbeit zur Stimmanalyse die Oberspektralzonen verschiedener Sänger verglichen werden. Wichtig hierbei sind eine klare und wissenschaftlich korrekte Darstellung, sowie die Möglichkeit, das Spektrum eines bestimmten Zeitpunkts und über einen Zeitraum gemittelt darzustellen. Das Spektrum lässt eine genauere Beurteilung der Intensitäten der Obertöne zu, als die farbcodierte Darstellung im Spektrogramm. Um auch quantitative Ergebnisse zu ermöglichen, bedarf es zusätzlich entweder einer programminternen Analysemöglichkeit oder einer Exportfunktion. Auch die Bestimmung von Vibrato (Frequenz und Amplitude), Shimmer und Jitter zeigen sich als optionale, nützliche Funktionen. Als letzte Voraussetzung ist zu erwähnen, dass lediglich Programme getestet

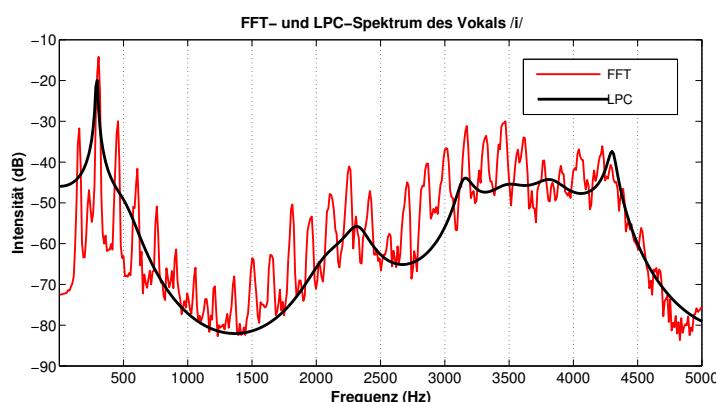


Abbildung 19: FFT- und LPC-Spektrum des aufgenommenen Vokals /i/ im Vergleich

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

werden, welche kostenlos sind oder als kostenlose Testversion vorliegen.

**Overtone Analyzer 3.3.0.4727 (Sygyt Software)** Der OA bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche mit einem großflächig angelegten Spektrogramm und einem direkt daneben befindlichen FFT-Spektrum der aktuell ausgewählten Gesangspassage (vlg. Abb. 20). Das Spektrum dieser Gesangspassage kann punktuell, oder auch über einen zeitlichen Ausschnitt gemittelt sein. Man kann mehrere Zeitpunkte bzw. Zeitintervalle markieren und diese im selben Spektrum miteinander vergleichen. Zur quantitativen Auswertung gibt es jedoch nur die Möglichkeit, sich einzelne Werte mit dem Mauscursor anzeigen zu lassen und die 20 stärksten Obertöne mit Frequenz und Intensität herauszukopieren.

In Bezug auf die farbliche Gestaltung der Spektrogramme und die Auswahl an FFT-Parametern (Fenster, Fensterbreite, Abtastrate, ...) sind dem Nutzer kaum Grenzen gesetzt, wodurch sich qualitativ hochwertige Spektrogramme erstellen lassen. Für wissenschaftliche Ausarbeitungen ist die Darstellung der farbigen Schallspektren allerdings nicht geeignet, bedingt durch:

1. die fehlende Beschriftungsmöglichkeit für die dargestellten, verschiedenfarbigen Kurven.
2. die vom Schallspektrum sehr weit entfernte Beschriftung der Ordinate.
3. das um 90° im Uhrzeigersinn gedrehte Schallspektrum, welches zwar zum Spektrogramm passt, aber durch die Drehung schwerer abzulesen ist.
4. die gekoppelte Regelung von Farbintensität im Spektrogramm und Intensitätsskalierung im Schallspektrum.

Die angesprochenen Nachteile in den Punkten 1, 2 und 3 wurden in Abbildung 21 beispielhaft behoben. Hierbei wurden die Daten mit Audacity® exportiert und dann in einem angepassten Diagramm aufgetragen. Zu Punkt 4 ist anzumerken: Zwar lassen sich die Spektrogramme optimieren (besserer Kontrast durch das Hervortreten der schwarzen Hintergrundfärbung) und zeigen dann mehr Details. Dadurch ändert sich jedoch automatisch die Abszisse des Schallspektrums, wodurch Teile dieses Schallspektrums nicht mehr im Schaubild zu sehen sein können. Um diese grafischen Defizite zu vermeiden, sollen in der Masterarbeit die Schallspektren isoliert von den Spektrogrammen dargestellt werden. Aufgrund seiner guten Bedienbarkeit wird der OA zur Auswahlfindung

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

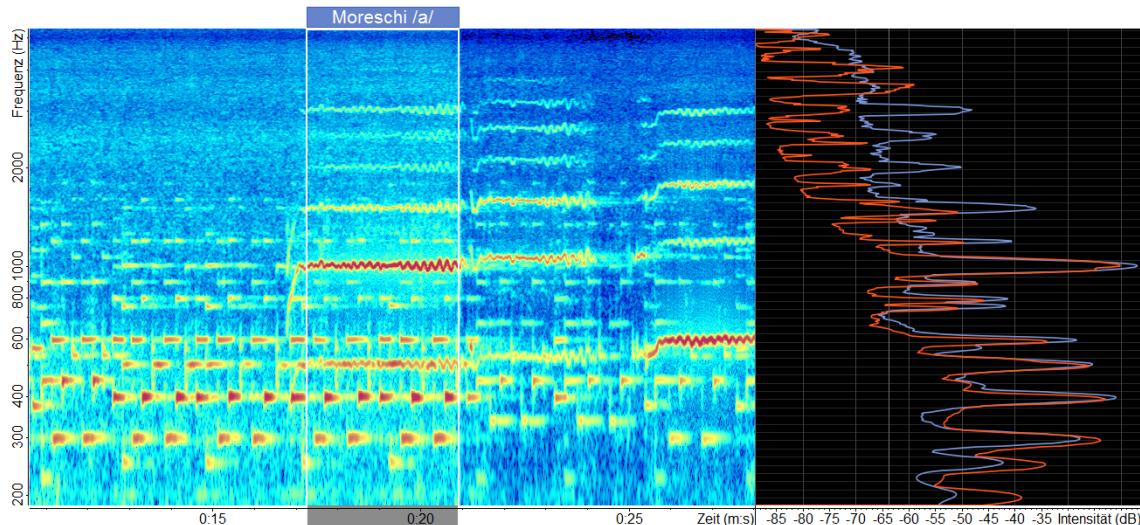


Abbildung 20: Spektrogramm einer Aufnahme Moreschis (Vokal /a/ bei ca. 500 Hz, mit Klavierbegleitung) sowie die zeitlich gemittelten Spektren Moreschis (blau) und Radu Marians (rot) (jeweils die gleiche Gesangspassage aus Schuberts *Ave Maria*)

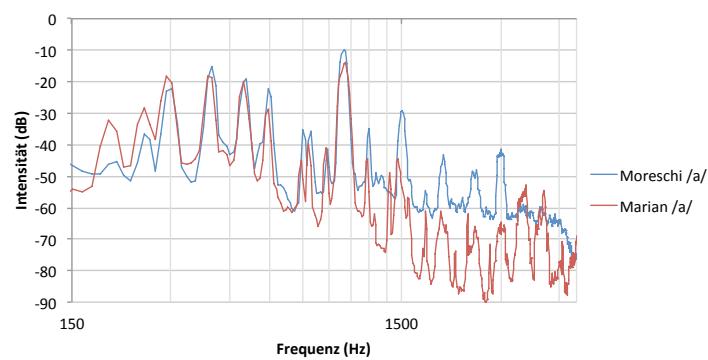


Abbildung 21: Dieselben Spektren wie in Abbildung 20

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

der für die Analyse geeigneten Lieder und zur Darstellung farbiger Spektrogramme verwendet werden. Wegen der eingeschränkten quantitativen Aussagekraft (eingeschränkte Exportfunktion für Weiterverarbeitung der Werte) sind für die Analyse allerdings weitere Programme nötig.

**Praat 5.3.75 (Paul Boersma und David Weenink)** Das speziell zur Sprachanalyse entwickelte Programm bietet eine ausgesprochen große Vielfalt an Analyse- und Einstellungsmöglichkeiten (Spektrum, Spektrogramm (jedoch nur Schwarz-Weiß), Tonhöhe, Formantenanalyse, Jimmer, Shitter, ... ), sowie eine Skriptfunktion zur Stapelverarbeitung bei vielen Dateien. Der Export von Daten ist möglich, was eine eventuelle Weiterbearbeitung und Analyse mit anderen Programmen ermöglicht. Im Vergleich zum OA, gestaltet sich das Auffinden auswertbarer Liederausschnitte mit Praat deutlich langsamer, was auf die nicht optimierte Handhabung zurückzuführen ist. Bei Praat steht (im Gegensatz zum OA) definitiv die Anzahl an Funktionen im Vordergrund und weniger das schnelle Arbeiten. Insgesamt bietet Praat neben MATLAB® wohl den größten Funktionsumfang aller getesteten Programme und wird daher zur Analyse eingesetzt. Da Praat von vielen Wissenschaftlern verwendet wird, existieren etliche vorgefertigte Skripte und Beispieldaten im Internet.

**WaveSurfer 1.8.8p4 (Centre for Speech Technology, KTH Stockholm)**

Neben dem gut konfigurierbaren (Farb-)Spektrogramm bietet es ein Spektrum mit FFT- und LPC-Analyse des aktuellen Ausschnittes und eine Exportfunktion. Man kann mehrere Spektralausschnitte im selben Fenster übereinanderlegen und somit einfach vergleichen. Zwar verfügt WaveSurfer über gute Funktionen, es stürzt aber regelmäßig ab, wodurch ein reibungsloser Arbeitsablauf nicht möglich ist.

**Audacity®<sup>9</sup> 2.0.5** Mit diesem kostenlosen Programm ist es möglich, Spektrogramme und Spektren (einzelne Zeitpunkte oder zeitlicher Durchschnitt) darzustellen. Die Datenpunkte dieser Spektren lassen sich exportieren, wie dies in Abbildung 21 gemacht wurde, und nach Bedarf weiterverarbeiten. Audacity® eignet sich daher besonders für einzelne Spektralausschnitte und den gezielten Datenexport. Des Weiteren bietet es zahlreiche Bearbeitungsmöglichkeiten, von denen evtl. die Funktion zum Normalisieren der Lautstärke und die zum Entfernen von Rauschen wichtig sein könnten. In der Benutzerfreundlichkeit

---

<sup>9</sup>Offizielle Website: <http://audacity.sourceforge.net>, zuletzt aufgerufen: 12.07.2014

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

und der Farbgestaltung (zur Auswahl stehen lediglich 2 Farbprofile) der Spektrogramme kommt es allerdings nicht an den OA heran.

**VoceVista<sup>10</sup> 3.2** VoceVista eignet sich, um zwei spektrale Ausschnitte direkt zu vergleichen, wobei die Diagramme keine Skalierung haben. EGG-Daten können gleichzeitig angesehen werden (was in der Masterarbeit jedoch nicht geschehen wird). Die Einstellmöglichkeiten der FFT sind allerdings begrenzt, wodurch vor allem die Frequenzauflösung bei Dateien mit hoher Abtastrate (z.B. eine CD mit standardmäßig 44100 Hz) erst ab einer Singstimmfrequenz von etwa 1000 Hz akzeptabel wird. Dies kann man umgehen, indem man (z.B. mit Audacity<sup>®</sup>) die Abtastrate verringert, wodurch aber evtl. wichtige Anteile des Obertonspektrums verloren gehen. Daher wird VoceVista höchstens mit seinen Funktionen zur Bestimmung von Vibratofrequenz und Jitter zum Einsatz kommen, sollten die Funktionen in Praat dafür nicht bereits ausreichen.

**lingWAVES 2.6 (WEVOSYS)** Das Programm eignet sich für die Erstellung von Spektrogrammen, FFT-Spektren, LPC-Spektren, sowie für Shimmer- und Jitter-Analysen. Durch die LPC-Spektren lassen sich auch Formanten bestimmen (allerdings nur als Abbildung, nicht in Form messbarer Parameter). Der Export ist ausschließlich als Bilddatei möglich, und wie auch bei VoceVista ist die Frequenzauflösung begrenzt.

**MATLAB<sup>®</sup> 8.3.0.532 (MathWorks)** Bei MATLAB<sup>®</sup> handelt es sich um eine kommandozeilenbasierte und auf numerische Berechnungen ausgelegte Software, die durch zahlreiche Zusatzpakete ("Toolboxes") in ihrem Funktionsumfang stark erweitert werden kann. Voraussetzung für die Analyse von Stimmen ist die *Signal-Processing Toolbox*. Nahezu alle erdenklichen Datenanalyse- und Datenauswertemethoden für Audiodateien, sowie Darstellungsmöglichkeiten sind dadurch umsetzbar. Der Nutzer muss allerdings, ähnlich einer Programmiersprache, jeden einzelnen zu erledigenden Schritt vorgeben. An der Hochschule für Musik in Detmold findet MATLAB<sup>®</sup> häufig Anwendung<sup>11</sup> (z.B. zur Erstellung von Spektren, Spektrogrammen). Aufgrund der numerischen Funktionsweise ist ein Datenexport nicht mehr notwendig, sondern kann programmintern direkt weiterverarbeitet werden. Die Software konnte aus zeitlichen Gründen noch nicht bis ins Detail getestet werden. Als Beispiel für die Möglichkeiten sei

<sup>10</sup>Offizielle Website: <http://www.vocevista.com>, zuletzt aufgerufen: 12.07.2014

<sup>11</sup>Telefonat mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Malte Kob am 30.06.2014

### 3 Analyse von Gesangsstimmen

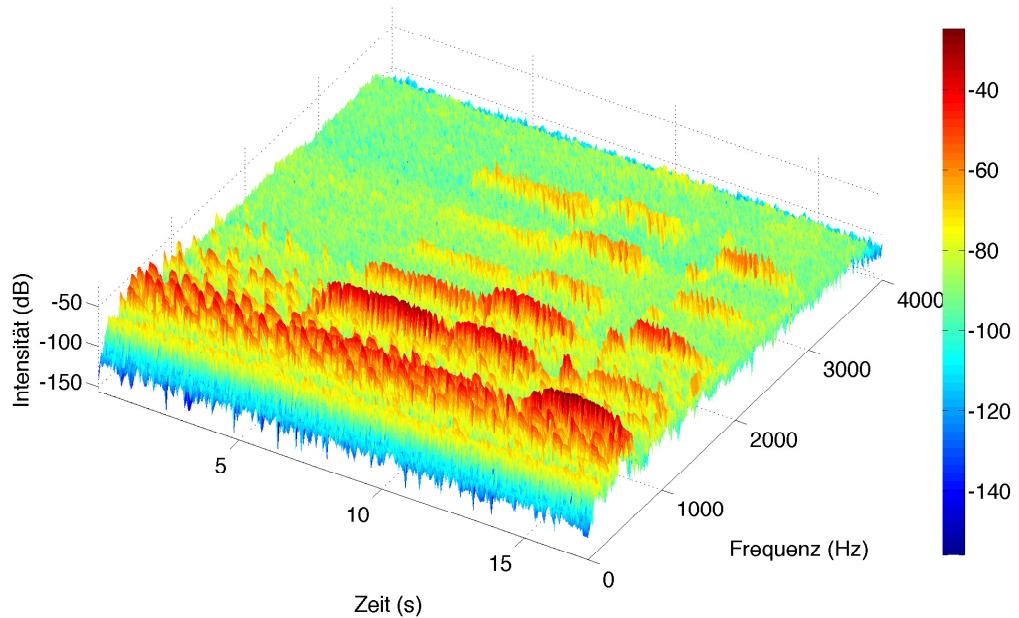


Abbildung 22: Ausschnitt aus Abbildung 20 in 3D

aber auf das in Abbildung 22 erzeugte 3D-Spektrogramm hingewiesen. Zusammen mit den gewonnenen Eindrücken aus einschlägigen Internetseiten, wird MATLAB® zum jetzigen Zeitpunkt als sehr vielversprechendes Programm zur späteren Analyse eingeschätzt.

#### Nicht getestete Software:

Die folgenden Programme haben die Grundanforderungen nicht erfüllt oder sind nicht als kostenlose Testversion verfügbar:

- DiVAS (XION medical)
- Multi-Dimensional Voice Program (MDVP™) (Kay Elemetrics)
- VRRP!! (Christian Herbst)
- SFS/ESection 2.5 (Mark Huckvale, University College London)

### 3.3 Fazit zur Software

Es haben sich an Programmen somit der OA, Praat und MATLAB® etabliert. Alle weisen Vor- und Nachteile auf, die jeweils mit anderen Programmen ausgeglichen werden können. Mit dieser Konstellation der drei Programme sind die Analyseansätze zielführend umsetzbar.

## Literatur

1. Ardran, G. M., David, W.  
*The alto or countertenor voice.* *Music and Letters*, 1967;48(1):17-22.
2. Barbier, P.  
*Farinelli. Der Kastrat der Könige. Die Biographie.* ECON Verlag, Düsseldorf, 1995.
3. Barbier, P.  
*The world of the castrati. The history of an extraordinary operatic phenomenon.* Souvenir Press, London, 1996.
4. Baum, H.  
*Die Sängerkastraten der Barockzeit.* Ibidem Verlag, Stuttgart, 2012.
5. Clapton, N.  
*Moreschi. The last castrato.* Publishing Limited, London, 2004.
6. Cohen, S. M., Jacobson, B. H., Garrett, C. G., Noordzij, J. P., Stewart, M. G., Attia, A., Ossoff, R. H., Cleveland, T. F.  
Creation and validation of the singing voice handicap index. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 2007;116(6):402–406.
7. Depalle, P., Garcia, G., Rodet, X.  
The recreation of a castrato voice, Farinelli's voice. *IEEE ASSP Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 1995:242-245.
8. Elektronik-Kompendium.de  
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0211193.htm>, Website, undatiert, zuletzt aufgerufen am: 15.07.2014.
9. Fritz, H.  
*Kastratengesang. Hormonelle, konstitutionelle und pädagogische Aspekte.* Schneider Verlag, Tutzing, 1994.
10. Fuchs, M., Kleinke, A., Behrendt, W., Geissner, H.  
*Computergestützte Analyse einer Kastratenstimme im Vergleich zum männlichen Altus, zur Frauen- und Knabenstimme.* In: Geissner, H. K. [Hrsg.]: *Stimmen hören. 2. Stuttgarter Stimmtage. Akademie für gesprochenes Wort.* Röhrlig Universitätsverlag, St. Ingbert, 2000, S. 167-172.

## Literatur

11. Hall, D. E.  
*Musikalische Akustik. Ein Handbuch.* Schott Music Verlag, Mainz, 2008.
12. Heidecker, E.  
*Die Geschichte der Gesangskastraten unter besonderer Berücksichtigung Farinellis.* GRIN Verlag, München, 2008.
13. Herr, C.  
*Alfred Deller und die Grundlagen des Countergesangs im 20. Jahrhundert.*  
In: Herr, C., Jacobshagen, A., Wessel, K.: *Der Countertenor. Die männliche Falsettstimme vom Mittelalter zur Gegenwart.* Schott Music Verlag, Mainz, 2012, S. 181-196.
14. Herr, C.  
*Gesang gegen die 'Ordnung der Natur'? Kastraten und Falsettisten in der Musikgeschichte.* Bärenreiter Verlag, Kassel, 2013.
15. Herr, C., Jacobshagen, A., Wessel, K.  
*Der Countertenor. Die männliche Falsettstimme vom Mittelalter zur Gegenwart.* Schott Music Verlag, Mainz, 2012.
16. Höglberg, J.  
From sagittal distance to area function and male to female scaling of the vocal tract. *Speech Transmission Laboratory, Quarterly Progress and Status Report*, 1995;36(4):11–54.
17. Hollien, H.  
Vocal fold dynamics for frequency change. *Journal of Voice*, 2013;28(4):305–405.
18. Kallmann, F. J., Schönfeld, W. A., Barrera, S. E.  
The genetic aspects of primary eunuchoidism. *American Journal of Mental Deficiency*, 1944;48(3):203–236.
19. Kesting, J.  
*Die Stimme als Kunstwerk.* In: Barbier, P.: *Farinelli. Der Kastrat der Könige.* ECON Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 9-16 (Einleitung).
20. Klingholz, F.  
*Medizinischer Leitfaden für Sänger.* Online verfügbar:  
<http://www.xinxii.com/gratis/124789dir1328286681.pdf>, zuletzt aufgerufen am: 16.07.2014, Libri Books on Demand, Hamburg, 2000.

## Literatur

21. Köwer, M.  
*Alessandro Moreschi. Sind seine Tonaufnahmen stellvertretend für den Kastratengesang?* GRIN Verlag, München, 2007.
22. Kramer, J.  
Computergestützte Stimmanalyse. *Forum Logopädie*, 2009;23(6):26–32.
23. Lehmann, W., Pidoux, J.-M., Widmann, J.-J.  
*Larynx*. Inpharmazam Medical-Publications, Cadempino, 1981.
24. Lorenz, A., Kleber, B., Büttner, M., Fuchs, M., Mürbe, D., Richter, B., Sandel, M., Nawka, T.  
Validierung des Singing Voice Handicap Index in der deutschen Fassung. *HNO*, 2013;61(8):699-706.
25. MonstersAndCritics.com  
<http://www.monstersandcritics.com/people/Freddie-Mercury/biography/>, Website, undatiert, zuletzt aufgerufen am: 06.05.2014.
26. Nadoleczny, M.  
*Untersuchungen über den Kunstgesang. 1. Atem- und Kehlkopfbewegungen*. Springer Verlag, Berlin, 1923.
27. Nair, G.  
*Voice - tradition and technology. A state-of-the-art studio*. Singular Publishing Group, San Diego, 1999.
28. Nawka, T., Wirth, G.  
*Stimmstörungen*. Deutscher Ärzteverlag, Köln, 5. Aufl., 2008.
29. Nollmeyer, O.  
*VoxVisionEar. Stimmarbeit mit dem interaktiven Sonogramm*. Ilmenau / Göttingen, 2013.
30. Pahn, R., Dahl, R., Pahn, E.  
Beziehung zwischen Messung der stimmlichen Durchdringungsfähigkeit, Stimmstatus nach Pahn und ausgewählten Parametern des Stimmanalyseprogramms MDVP (Kay). *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 2001;53(6):308–316.
31. Rossing, T. D., Moore, R. F., Wheeler, P. A.  
*The science of sound*. Pearson Education, Edinburgh, 3. Aufl., 2014.

## Literatur

32. Saus, W.  
*Oberton Singen. Das Geheimnis einer magischen Stimmkunst.* Traumzeit Verlag, Battweiler, 2006.
33. Saus, W.  
<http://www.oberton.org/obertongesang/untertongesang/>, Website, undatiert, zuletzt aufgerufen am: 07.05.2014.
34. Schneider-Stickler, B., Bigenzahn, W.  
*Stimmdiagnostik. Ein Leitfaden für die Praxis.* Springer Verlag, Wien, 2. Aufl., 2013.
35. Schönhärl, E.  
*Die Stroboskopie in der praktischen Laryngologie.* Thieme Verlag, Stuttgart, 1960.
36. Schürenberg, B.  
*Leistungen des Atem- und Stimmapparates.* In: Kittel, G.: *Phoniatrie und Pädaudiologie.* Deutscher Ärzteverlag, Köln, 1989, S. 21-23 (Kap. 2).
37. Schutte, H. K., Seidner, W.  
*Physiologische Grundlagen.* In: Wendler, J., Seidner, W., Eysholdt, U.: *Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie.* 4. Auflage, Thieme Verlag , Stuttgart, 2006, S. 71-95 (Kap. 7).
38. Sundberg, J.  
Articulatory interpretation of the singing formant. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974;55(4):838–844.
39. Sundberg, J.  
The acoustics of the singing voice. *Scientific American*, 1977;236(3):104-116.
40. Titze, I. R., Long, R., Shirley, G. I.  
Messa di voce: an investigation of the symmetry of crescendo and decrescendo in a singing exercise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999;105(5):2933–2940.
41. Youtube.com  
<https://www.youtube.com/watch?v=2YgrPBTRjMk>, Website, undatiert, zuletzt aufgerufen am: 07.05.2014.