

# **Biological development and the normal voice in puberty**

*German edition*

# **DIE BIOLOGISCHE ENTWICKLUNG DER STIMME IN DER PUBERTÄT**

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Mette Pedersen**

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Dr. Habil. HNO Phoniatrie**

**Für meine Tochter**

## **Vorwort**

Die vorliegenden Untersuchungen begannen während meiner Tätigkeit an der Hals-NasenOhren-Klinik, Universitäts Krankenhaus Gentofte, Kopenhagen, Dänemark, und erstreckten sich über einen Zeitraum von 10 Jahren. In dieser Zeit arbeitete ich auch als betreuende Phoniaterin an einer Schule mit Musik - Spezialausbildung in Kopenhagen. Nach Publikationen in Fachzeitschriften und als Habilitation wurde von mehreren Seiten der Wunsch an mich herangetragen, eine Übersicht über die Ergebnisse zu veröffentlichen.

Die technische Messung einzelner Parameter in so komplexen Bereichen wie Musik und Gesang hat erst in den letzten Jahren an Akzeptanz gewonnen. Wie wichtig objektivierbare Parameter der normalen Stimmentwicklung sind, zeigt sich insbesondere dann, wenn pathologische Abweichungen erkannt und definiert werden müssen. Es ist jedoch auch möglich, unterschiedliche Qualitäten einer normalen Stimmentwicklung in gewissem Umfang in meßbaren Parametern darzustellen.

Die hormonellen Veränderungen haben einen großen Einfluß auf die physische und psychische Entwicklung der Jungen und Mädchen. Wie ausgeprägt dieser Einfluß auf die Stimmentwicklung beider Geschlechter ist, soll in der vorliegenden Arbeit anhand einer Vielzahl von Parametern verdeutlicht werden. Ich hoffe, damit Anregungen für weitergehende Untersuchungen auf diesem Gebiet zu geben. Mögliche interessante weiterführende Forschungsgebiete sind im Text hervorgehoben.

Die Arbeit mit den Heranwachsenden und die Dokumentation ihrer stimmlichen Entwicklung hat viel Freude gemacht. Kollegen der verschiedensten Fachrichtungen haben mich dabei unterstützt. Die praktische Bedeutung der Arbeit zeigt sich u.a. darin, daß die gewonnenen Ergebnisse (Kurven und Tabellen) heute von Phoniatern und Gesangslehrern in ihrer täglichen Arbeit benutzt werden und daß die Bestimmung der Hormonwerte im Verlauf der Pubertät inzwischen in einigen Chören zur Routine gehört.

Das Buch ist auf ein Vortrag am Jahreskongress 1991 Bundesverband Deutscher Gesangspädogen und mein Thesis: Biological Development and the Normal Voice in Puberty, basiert.

Die Überführung zu Internet ist von Lars Paaske Kopenhagen, und Grit Bühring Leipzig, durchgeführt.

## **Inhalt**

### **I Fragestellung**

### **II Möglichkeiten und Grenzen der Untersuchungstechnik**

1. Stimmfeldmessung
2. Elektrolottographie
  - 2.1. Elektrolottographie in Kombination mit Stroboskopie
  - 2.2. Elektrolottographie zur Bestimmung der Grundfrequenz der Sprechstimme
3. Klang- und Registeranalyse

### **III Material und Methode**

1. Probanden
2. Untersuchungsmethoden
  - 2.1. Stimmfeldmessung
  - 2.2. Messung der Grundfrequenz
  - 2.3. Hormonstatus und Pubertätsanalyse
  - 2.4. Statistische Methoden

### **IV Ergebnisse**

1. Das Stimmfeld im Verlauf der Pubertät
2. Die Sprechstimme im Verlauf der Pubertät
3. Weitere Ergebnisse der statistischen Auswertung

### **V Diskussion**

1. Hormonstatus und Pubertätsanalyse
2. Das Stimmfeld im Verlauf der Pubertät
3. Die Sprechstimme im Verlauf der Pubertät

### **VI Beantwortung der Fragestellung**

### **VII Literaturverzeichnis** **Hauptreferenzen** **Andere Referenzen**

## I Fragestellung

In Zusammenarbeit mit Mädchen- und Knabenchören und deren Dirigenten und Stimmbildnern wurden folgende Fragestellungen herausgearbeitet:

1. Wie entwickelt sich der Tonumfang und der Dynamikumfang der Stimme während der Pubertät bei stimmlich ausgebildeten Chorknaben und Chormädchen?
2. Wie entwickelt sich die Grundfrequenz der Sprechstimme während der Pubertät bei stimmlich ausgebildeten Chorknaben und Chormädchen?
3. Welche Beziehungen gibt es zwischen den hormonellen Veränderungen und den Veränderungen der ausgebildeten Stimme während der Pubertät bei Chorknaben und Chormädchen?
4. In welchem Stadium der Pubertät verändert sich die ausgebildete Stimme der Chorknaben und Chormädchen?



## II Möglichkeiten und Grenzen der Untersuchungstechnik

### 1. Stimmfeldmessung

Die Stimmfeldmessung ergänzt die früher übliche Messung des Tonumfangs bei Chorkindern um die gleichzeitige Registrierung des Dynamikumfangs. Seit 1981 liegt ein Standardisierungsvorschlag der Union der Europäischen Phoniater für diese Untersuchungsmethode vor (Seidner et al. 1981, Schutte et al. 1983). Das in diesem Vorschlag entwickelte und bei den vorliegenden Untersuchungen verwendete Formular für die Dokumentation der Messungen zeigt Abb. 1.

Zu Anfang unserer Untersuchungen erfolgte die Messung des Dynamikumfangs mit einem Lautstärkemeßgerät der Fa. Brüel und Kjaer. Das Mikrofon wurde im Abstand von 30 cm vom Mund des Probanden aufgestellt. Der Proband sollte zuerst so leise wie möglich und dann so laut wie möglich einen vorgegebenen Ton nachsingen. Die jeweilige Lautstärke des Tones wurde mit dem Lautstärkemeßgerät erfaßt und manuell in das abgebildete Formblatt eingetragen. Diese Art der Stimmfeldmessung erfordert jedoch einiges Geschick sowohl des Probanden (exaktes Nachsingen des Tones) als auch des Untersuchers (Zeitpunkt der Lautstärkemessung im Verlauf des gesungenen Tones) und ist außerdem wegen der manuellen Dokumentation der Untersuchungsergebnisse zeitaufwendig.

Aus diesen Gründen entwickelten Pedersen et al. 1984 ein computergestütztes Stimmfeldmeßgerät. Das Gerät ermittelt die maximale bzw. minimale Intensität eines Tones als Mittelwert über eine bestimmte Tonhaltedauer (0,5 - 5 Sekunden) auf jedem Halbton und speichert die gemessenen Werte. Das Gerät wurde mit dem von Wendler und Seidner entwickelten Stimmfeldmeßgerät verglichen und es wurde eine Übereinstimmung der Messungen von 96 % gefunden.

Auch in der Literatur kann die Entwicklung von der konventionellen zur computergestützten Meßwerterfassung nachvollzogen werden. Nach Publikationen mit konventioneller Meßwerterfassung (Bloothoofst 1981, Stürzeberger et al. 1982) werden zunehmend Geräte mit computergestützter Meßwerterfassung (Klingholz et al. 1983, Seidner et al. 1985, Hacki 1988, Pabon 1991, Kay Elemetrics 1993, Schutte 1995) benutzt.

Auch die computergestützte Auswertung der Meßergebnisse eröffnete neue Möglichkeiten. Es ist möglich, aus den Stimmfeldern mehrerer Einzelpersonen „Durchschnittsstimmfelder“ zu ermitteln und dabei auch die Standardabweichung der Intensitätskurven zu berechnen (Abb. 2,3; Pedersen et al. 1986a).

Die breite Anwendung der Stimmfeldmessung in der phoniatischen Forschung spiegelt sich in der Literatur wider. Es wurden Relationen zwischen Klang und Gesamtintensität gefunden

(Vilkman et al. 1986, Sundberg 1987, 1994). In pathologischen Fällen gibt es Intensitätsvariationen, die von Gramming (1988) diskutiert wurden. Hirano (1989) wies auf die Probleme hin, die bei der Untersuchung unmusikalischer Menschen entstehen (genaues Nachsingen des Tones, Halten des Tones). Auch für dieses Problem gibt es inzwischen eine technische Lösung, indem die Messung in Halboktav-Schritten und während eines kürzeren Zeitintervalls erfolgt.

## 2. Elektrolottographie

Die Elektrolottographie wurde von Smith (1954) und Fabre (1957) als Untersuchungsverfahren der Stimme eingeführt. Über 2 Hautelektroden in Höhe der Stimmbänder fließt ein hochfrequenter Strom geringer Intensität durch den Kehlkopf. Die Amplitudenmodulation des Stromes durch die Widerstandsänderungen während der Phonation repräsentiert die Bewegung der Stimmlippen über die Zeit. Die Anwendung dieser Methode in der Forschung können wir über mehrere Jahrzehnte verfolgen (Loebell 1968, Frokjaer-Jensen et al. 1968, Foucin et al. 1971, Lecluse 1977, Guidet et al. 1979, Kitzing (1979, 1990), Smith 1981, Hirose et al. 1988, Rothenberg 1992, Hertegård 1995). Eine Übersicht über die Publikationen, die sich mit der Elektrolottographie und ihrer Anwendung beschäftigen, findet sich bei Dejonckere (1995).

### 2.1. Elektrolottographie und Stroboskopie

Die Stroboskopie, die 1989 - zusammen mit anderen Untersuchungsverfahren, wie z.B. der Stimmfeldmessung - von der Internationalen Föderation der HNO-Gesellschaften als Basismethode zur Diagnostik von Erkrankungen der Stimme empfohlen wurde, ist zur Untersuchung von Qualitätsunterschieden der gesunden Stimme nicht geeignet. Mit dieser Methode allein kann nur die pathologische von der normalen Stimmlippenfunktion differenziert werden. Die Methode der Videostroboskopie eignet sich jedoch sehr gut zur Visualisierung der Stimmbandschwingungen und zur Darstellung der sonst oft schwer verständlichen Phänomene der Kehlkopffunktion (Wendler et al. 1988, Colton et al. 1989, 1995).

Da sowohl mit der Elektrolottographie als auch mit der Stroboskopie die Stimmlippenfunktion dargestellt wird, ist die Kombination der beiden Methoden sinnvoll, um aus den sich ergänzenden Parametern eine umfassendere Beschreibung der Stimmlippenfunktion zu erhalten. Die Probleme der Interpretation der Elektrolottographie-Kurven (Amplitude, genaue Zuordnung der einzelnen Kurvenabschnitte zu den Phasen der Stimmlippenschwingung) können so besser gelöst werden. Erste Ergebnisse zur Kombination von Stroboskopie und Elektrolottographie lagen bereits vor, als auf dem internationalen Kongreß der Logopäden und Phoniater 1974 eine lebhafte Diskussion um die Interpretation der Glottographiekurve entstand (Pedersen 1974). Schönhärl hatte eine systematische Erfassung der stroboskopischen Befunde bei Patienten mit Stimmstörungen durchgeführt, eine statistische Analyse der Behandlungsergebnisse war jedoch nicht möglich (Schönhärl 1960).

Wir setzten die simultane Anwendung von Stroboskopie und Elektrolottographie mit dem Elektrolottographiegerät der dänischen Fa. FJ Electronics in Kopenhagen zur Untersuchung von Musikstudenten (geschulte Stimmen) und Krankenhausmitarbeitern (ungeschulte Stimmen) ein (Abb. 4; Pedersen 1978). Ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen konnte in der Schließungsphase gefunden werden; hier zeigten die geschulten Stimmen der Musikstudenten eine größere Winkelgeschwindigkeit und eine kürzere Dauer. Sonst waren die synchronisierten Bilder der Stroboskopie und Elektrolottographie der beiden Gruppen vergleichbar. Das elektrolottographische Bild bei stimmlich geschulten Chorknaben entsprach dem der:

Musikstudenten im unteren Register. Auch für die Messung der Registerübergänge eignet sich die Elektrolottographie. Die Übergänge ändern sich in Abhängigkeit von der Intensität und davon, ob die Messung von hoch nach tief oder von tief nach hoch durchgeführt wird (Abb. 5,6,7; Pedersen 1, 1977).

Karnell (1989) und Anastopolo et al. (1988) haben auf der Basis unserer Konstruktion ein Gerät entwickelt, das die Kombination der Videostroboskopie mit der Elektrolottographie ermöglicht. Dadurch ist der Vergleich zwischen verschiedenen individuellen Untersuchungen und der Vergleich zu Durchschnitts- oder Normalbefunden möglich, um zukünftig die Untersuchungsergebnisse noch präziser interpretieren zu können. Auch eine klinische Anwendung der Methode wird dadurch möglich. Diese Methode scheint optimal zur Darstellung der von Smith (1954) erstmals beschriebenen Randkantenbewegung der Stimmlippen zu sein. Herzel et al. (1994) diskutierten die nichtlinearen Aspekte der Stimmlippenbewegung. Die Analyse der Stimmunterschiede zwischen den Geschlechtern hat bisher keine Unterschiede gezeigt, die nicht frequenzabhängig sind, was auch durch Muskelstudien belegt wurde (Kurita et al. 1980, Kersing 1983). Die Funktion der Maculae flavae wurde von Sato et al. (1995) analysiert. Inzwischen liegen interessante geschlechtsabhängige Muskelstudien des Larynx vor (Tobias et al. 1991, 1995, Mann et al. 1996).

## **2.2. Elektrolottographie zur Bestimmung der Grundfrequenz der Sprechstimme**

Neben der Darstellung der Einzelschwingung der Stimmlippen eignet sich die Elektrolottographie auch für die genaue Registrierung der Grundfrequenz der Sprechstimme. Wir entwickelten ein Computerprogramm, bei dem dieser Parameter aus 2000 elektro - glotto - graphischen Zyklen errechnet wurde. Die Messung erfolgte während des lauten Lesens eines Textes der International Phonetic Society (1964), der phonetisch korrekt ins Dänische übersetzt wurde („Der Nordwind und die Sonne“). Die Mittelwerte wurden in Hertz angegeben. Der Tonumfang der Sprechstimme konnte als Standard Abweichung in Halbtönen erfasst werden, indem die Signale in Halbton-Gruppen von 60 - 684 Hertz eingeteilt wurden (Pedersen et al. IV 1985, 111 1986, II 1990).

Für die Analyse der Grundfrequenz der Sprechstimme wurde der Elektrolottograph von Kitzing (1979) verwendet. Die Fa. Teltec entwickelte eine computerisierte Variante dieses Geräts. Roubeaue et al. (1987) setzten die Elektrolottographie für die Analyse der Grundfrequenz der Sprechstimme bei neurologischen Patienten ein. Auch die Grundfrequenzvariation bei gleichzeitiger Analyse der Histogrammkonfiguration wurde von Fourcin (1971) und Kitzing (1979) durchgeführt.

In Übersichten über die Methoden zur Messung der Grundfrequenz (Baken 1987, SchultzCoulon et al. 1988) zeigt es sich, daß noch bis vor 10 - 15 Jahren die manuellen, Auswertungsmethoden der Elektrolottographie auch für wissenschaftliche Studien angewandt wurden. Die genaue Frequenzanalyse (in Kombination mit Jitter und Shimmer), wie sie mit der computergestützten Auswertung möglich ist, wurde 1980 von Askenfelt durchgeführt. Methode und Dauer der Messung wurden von Karnell (1991) diskutiert. Im Zeitalter der computergestützten Sprachperzeption (Pahn et al. 1991) sollten genaue Messungen kein Problem mehr sein (Elman et al. 1988, Rikhanan et al. 1994). Mit neuronalen Netzwerken eröffnet sich die Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen Grundfrequenz und Gehirndurchblutung zu erfassen (Sataloff 1995; Pedersen 1991b, 1995). Von diesen Untersuchungen könnten in der Zukunft vielleicht Informationen zum besseren Verständnis der zentralen Steuerung der Stimmentwicklung beigetragen werden.

### 3. Klang- und Registeranalyse

Der Klanganalysator (1/3 Oktave) von Brüel und Kjaer und der Nicolet Spektralanalysator Ubiquitous 44A wurde für die Analyse der Formantentwicklung benutzt. Die Analysen wurden auf dem internationalen Kongreß der Logopäden und Phoniater 1977 präsentiert und zeigten bei den 12 - 13jährigen Probanden einen hohen Sängerformanten von im Durchschnitt 5000 Hertz.

Auch auditive Untersuchungen waren für die Beurteilung der Registerübergänge notwendig. In unseren Untersuchungen wurde diese Aufgabe von Gesangslehrern übernommen.

Ein Videofilm mit stroboskopischen Untersuchungsbeobachtungen dänischer Chorknaben, ausgeführt mit dem Stroboskopiegerät von Timcke von der Medizinischen Hochschule in Hannover wurde auf dem Voice Symposium in New York, Manhattan School of Music, präsentiert (Pedersen et al. 1988). Hier sind die Schwierigkeiten, die Veränderungen der Stimmlippenschwingungen in der Pubertät festzuhalten, illustriert. Für die qualitative Dokumentation der Registerübergänge eignet sich die Stroboskopie besser als die Stimmfeldmessung oder die Elektrolottographie (Svec et al. 1994, Vilkmann 1995). Die beiden letztgenannten Methoden werden jedoch für die quantitative Erfassung der Registerübergänge eingesetzt (Seidner et al. 1982, Frokjaer-Jensen 1983).

Das Ziel der Arbeit bestand zwar nicht in erster Linie in einer Klanganalyse der geschulten Pubertätsstimme, die Dokumentation der Formantanalyse erscheint jedoch interessant (Sundberg 1987). Die Formantentwicklung in der Pubertät unterliegt vielen Einflußfaktoren, wie z.B. Untersuchungsumgebung, körperliche Entwicklung und Stimmtechnik.

Die Registerübergänge in der Pubertät sind wie die Grundfrequenz der Sprechstimme und der niedrigste Ton des Stimmumfangs bei Knaben vom Testosteronspiegel abhängig. Bei Mädchen fehlte bisher eine solche Analyse. Die Zusammenhänge zwischen Hormonveränderungen und Stimmentwicklung in der Pubertät bei Mädchen wurden erstmalig von unserer Forschungsgruppe untersucht.

### **III Material und Methode**

#### **1. Probanden**

An der Querschnittsstudie nahmen 48 Jungen und 47 Mädchen teil. Aus jeder Klassenstufe kamen 4-5 Schüler, das Alter betrug 8-29 Jahre. Alle wurden einer Musikalitätsprüfung unterzogen, die das Nachklopfen von Rhythmen (Test nach Wöldike), das Nachsingen von Tönen und den Vortrag eines vorgegebenen Liedes mit hohen Tönen einschloss (Abb.8). Alle wurden einer Musikalitätsprüfung, die die Schüler gut kannten, teilten sie den klassischen Stimmgattungen zu. Stroboskopisch zeigte sich bei allen ein Normalbefund. Das Pubertätsstadium wurde vom Pädiater als altersentsprechend eingeschätzt (Pedersen 1991c, Brook 1995).

#### **2. Untersuchungsmethoden**

##### **2.1. Stimmfeldmessung**

Die Messung der Stimmfelder erfolgte entsprechend dem Standardisierungsvorschlag der Union Europäischer Phoniater 1981. Der niedrigste Ton, der mittlere Ton und die Stimmfeldfläche in Halbtönen  $\times$  dB(A) [HT  $\times$  dB(A)] wurden für statistische Auswertungen herangezogen. Bevor wir die Möglichkeit der computergestützten Stimmfeldauswertung hatten, führten wir die Berechnung der Stimmfeldfläche mittels Planimetrie durch ( $lcm^2 = 32 HT \times dB(A)$ ). Der Tonumfang wurde in Halbtönen angegeben, um sowohl auf der Abszisse als auch auf der Ordinate eine logarithmische Skala zu erhalten und so Fehler in der Statistik zu vermeiden. Als Untersuchungsraum diente ein normales Schulzimmer. Im computerisierten Stimmfeldmeßgerät (mit transportablem IBM-PC) wurden alle Daten gespeichert (Pedersen et al. 1984, 1986b).

##### **2.2. Messung der Grundfrequenz**

Die Grundfrequenz der Sprechstimme wurde elektrolottographisch registriert und mittels Computer aus 2000 Zyklen ermittelt. Aus den Mittelwerten der Frequenz in Hertz errechnete sich die Grundfrequenz; auch der Tonumfang während der fließenden Rede wurde ermittelt:

Tonumfang der Sprechstimme. Wie unter II 2.2. angegeben, erfolgte die Messung während des Lesens eines vorgegebenen Textes. Es wurden ein transportabler IBM-Computer, ein Elektrolottograph der Fa. FJ Electronics Typ 830, ein Geräuschmesser Typ 2208, ein Stroboskop Typ 5066 (Brüel und Kjaer) und ein Tectronix Oscilloscop verwendet.

### **2.3. Hormonstatus und Pubertätsanalyse**

Die Hormonanalysen bezogen sich auf jene Parameter, die sich unseres Wissens nach während der Pubertät am ehesten ändern. Es wurden Kinder ab 8 Jahre in die Untersuchungen einbezogen, da die Adrenarche (erhöhte Funktion der Nebenniere in diesem Alter) möglicherweise Informationen liefert, die helfen, die Pubertät besser zu verstehen. Folgende Werte wurden analysiert: Serum-Testosteron (frei und total, wobei zwischen den beiden Werten ein enger Zusammenhang besteht), Dihydroepiandrosteron (DHEAS), Delta - 4 - Androsteron und das Transportglobulin für das Testosteron, das Sex-Hormon-Binding-Globulin (SHBG). Für die Mädchen umfaßte das Untersuchungsprogramm außerdem folgende Parameter: Östradiol (E2), Östron (E1) und Östronsulfat (E1SO4). Aufbau und Wirkungszeit der Androgene und Östrogene sind kompliziert, das gleiche gilt für mögliche Interaktionen zwischen den einzelnen Hormonen. Nachdem wir durch diese Untersuchungen einen Einblick in die Zusammenhänge zwischen Hormonveränderungen und Stimmentwicklung gewonnen hatten, hätten wir uns gewünscht, daß wir alle Androgene in die Untersuchungen mit einbezogen hätten, um genauere Ergebnisse zu erhalten. Es bleibt zu hoffen, daß unsere Arbeit Ausgangspunkt für detailliertere Forschungen in der Zukunft ist.

Auch Körpergröße und -gewicht, Hodenvolumen, Stadium der Schambehaarung und (bei Mädchen) Stadium der Mammaentwicklung wurden bei jedem Probanden bestimmt (Pedersen et al, IV 1985. Brook 1995).

### **2.4. Statistische Analyse**

Meßresultate erhalten ihren wissenschaftlichen Wert erst durch die statistische Auswertung hinsichtlich ihrer Signifikanz. Das erste Problem lag in der Frage, ob lineare oder logarithmische Zusammenhänge angewandt werden sollten. Die benutzten logarithmischen Kriterien, die auf geometrischen Durchschnitten basieren, sind wesentlich strenger als die linearen. Es wurde eine one-way multivariate Analyse durchgeführt, die von der Grundfrequenz der Sprechstimme klassifiziert wurde, um die Unterschiede zwischen den Gruppen finden zu können. Für alle Variablen bestimmten wir den Korrelationskoeffizienten, um die Zusammenhänge zwischen ihnen und ihre Abhängigkeit vom Alter mit Hilfe des partiellen Korrelationskoeffizienten berechnen zu können. Es wurde das BMDP-Statistikprogramm benutzt.

## IV Ergebnisse

### 1. Das Stimmfeld im Verlauf der Pubertät

Eine Darstellung der Entwicklung der Stimmfelder über die Pubertät bei Jungen zeigt Abb. 9 (Pedersen et al. 1986). In der Pubertät ist die Fläche des Stimmfeldes kleiner und die Registerübergänge ändern sich. Nach der Pubertät liegt der niedrigste Ton tiefer und die Flächen des unteren als auch des oberen Registers nehmen zu.

Die Stimmfelder der Mädchen zeigten ebenfalls Veränderungen in der Pubertät (Abb. 10). Liegen zu Beginn der Pubertät nur leichte Veränderungen vor, so kommt es wie bei den Jungen im Alter von ca. 14,5 Jahren zu einer Verlagerung der Registerübergänge (Pedersen et al. 1990).

Für die Querschnittsstudie teilten wir die Probanden in 3 Gruppen von Jungen ein: Präpubertäre, pubertäre und postpubertäre Stimmen. Die Stimmfelder der Gruppen unterscheiden sich bei den männlichen Probanden bezüglich Fläche, niedrigstem Ton und Tonumfang signifikant ( $p < 0,01$ ). Das gleiche gilt für die Grundfrequenz, das Serum-Testosteron und das SHBG (Abb. 11, Pedersen et al. 1986).

Bei den weiblichen Probanden gibt es signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen bzgl. der Stimmfeldfläche, dem niedrigsten Ton und dem Tonumfang der Sprechstimme. Für die durchschnittliche Grundfrequenz der Sprechstimme selbst zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Beim Östron und Östronsulfat fanden wir signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ); dies gilt auch für Androstendion und DHEAS, jedoch nicht für das SHBG (Abb. 12, Pedersen et al. 1990).

Die Stimmfeldfläche ändert sich bei den Jungen in Abhängigkeit vom Hodenvolumen entsprechend dem Serum-Testosteron-Spiegel. Die Veränderungen der Stimmfeldfläche über die Pubertät sind jedoch ein sehr komplexes Geschehen, in dem auch die altersmäßige Entwicklung eine entscheidende Rolle spielt (Abb. 13, Pedersen et al. 1986).

Die Stimmentwicklung bei Mädchen zeigt mehrere bemerkenswerte Unterschiede zu der bei Jungen. Die durchschnittliche Grundfrequenz der Sprechstimme ändert sich bei Mädchen unabhängig von der Stimmfeldfläche ( $r = 0,29$ ), im Gegensatz dazu besteht eine Abhängigkeit zwischen den beiden Parametern bei Jungen ( $r = 0,50$ ). Für den Tonumfang der Sprechstimme gibt es keine Unterschiede zwischen den Geschlechtern (Mädchen  $r = 0,54$ , Jungen  $r = 0,49$ ). Die Stimmfeldfläche verändert sich in Abhängigkeit vom Stadium der Schambehaarung bei Mädchen ( $r = 0,51$ ) wie bei Jungen ( $r = 0,65$ ); Bei Mädchen besteht auch eine Beziehung zur Mammaentwicklung.

Die Zunahme des Körpergewichts ist als normales Phänomen der Pubertät anerkannt. Der Zusammenhang zwischen Entwicklung der Stimmfeldfläche und der körperlichen:

Veränderungen während der Pubertät ist für beide Geschlechter für das Stadium der Schambehaarung, das Körpergewicht und für die Mädchen auch für die Mammaentwicklung signifikant. Bezüglich der hormonellen Parameter spielen bei Mädchen wie bei Jungen die Androgene eine signifikante Rolle, obwohl bei Mädchen nicht so hohe Werte wie bei Jungen gefunden wurden, bei den Mädchen konnte auch für das Östron und das Östronsulfat ein signifikanter Zusammenhang zur Entwicklung der Stimmfeldfläche errechnet werden. Für die Körpergröße der Mädchen besteht keine signifikante Altersabhängigkeit; alle anderen Parameter ändern sich jedoch im Verhältnis zum Alter signifikant (Abb. 14 und 15. Pedersen et al. 1990).

Abb. 16 zeigt graphisch die Veränderung der Stimmqualität bei Jungen in Abhängigkeit vom sinkenden Spiegel des SHBG und dem steigenden Serum-Testosteronspiegel; auch zwischen dem Hodenvolumen, dem Stadium der Schambehaarung und der Stimmfeldfläche gibt es Zusammenhänge (Pedersen et al. 1986).

Entsprechendes gilt für die Mädchen. Hier ändert sich die Stimme in Abhängigkeit vom Androstendion, Östron, Körpergewicht und Stadium der Schambehaarung (Abb. 17, Pedersen et al. 1990).

Bei den Jungen wurde die durchschnittliche jährliche Änderung z.B. der Grundfrequenz der Sprechstimme (11%) und der Stimmfeldfläche (9,2%) errechnet (Abb. 18). Ein interessanter Parameter ist auch der niedrigste Ton des Stimmfeldes, der in ähnlichem Maße wie die Grundfrequenz der Sprechstimme fällt (12%). Der Androgenspiegel steigt in ähnlichem Maße wie der Spiegel des SHBG sinkt (Pedersen et al. 1982).

## **2. Die Sprechstimme im Verlauf der Pubertät**

Die Grundfrequenz der Sprechstimme ist auch für sich allein ein häufig untersuchter Parameter zur Beschreibung der Stimmentwicklung. Aus dieser Tatsache erklärt sich die frühere Annahme, daß sich die Mädchenstimme in der Pubertät fast nicht verändert. Wie bereits unter IV 1. beschrieben fehlt bei Mädchen eine signifikante Korrelation zwischen Grundfrequenz der Sprechstimme und Stimmfeldfläche; sie findet sich jedoch zwischen Stimmfeldfläche, niedrigstem Ton des Stimmfeldes und Tonumfang der Sprechstimme. Bei Jungen ändert sich die Grundfrequenz mit dem Alter parallel zum tiefsten Ton des Stimmfeldes und zum gleichen Zeitpunkt, an dem Tonumfang der Sprechstimme und Stimmfeldfläche steigen, wobei es im Alter von ca. 14,5 Jahren zu einer Einschränkung der Stimmfeldfläche kommt (Abb. 19, Pedersen et al. III 1986).

Die Änderung der Grundfrequenz der Sprechstimme ist - berechnet in Hertz - bei Mädchen kleiner und weniger ausgeprägt als die Änderung des niedrigsten Tones im Stimmfeld. Auch bei Mädchen nimmt die Stimmfeldfläche zu (postpubertale Gruppe Mädchen  $28,3 \text{ cm}^2 = 895,6 \text{ HT} \times \text{dB(A)}$ ; postpubertale Gruppe Knaben  $34 \text{ cm}^2 = 1088 \text{ HT} \times \text{dB(A)}$  bei Umrechnungsfaktor  $1 \text{ cm}^2 = 32 \text{ HT} \times \text{dB(A)}$ , s. 1112.1.). Am deutlichsten ändert sich der Tonumfang der Sprechstimme (postpubertale Gruppe Mädchen 5 HT, Knaben 5,2 HT), wie in Abb. 20 dargestellt (Pedersen et al. 11 1990, III 1986).

Eine Tatsache, die oft übersehen wird, ist, daß die physiologischen Veränderungen einen wesentlich größeren physikalischen Effekt bei den Mädchen haben. Dies ist dadurch begründet, daß von einer Grundfrequenz ausgegangen wird, die bei den Mädchen doppelt so viele Schwingungen aufweist wie bei den Jungen. Die Grundfrequenz der Sprechstimme ändert sich bei Mädchen von 256 Hz in der präpubertalen Gruppe auf 241 Hz in der postpubertalen Gruppe. Der Tonumfang der Sprechstimme erhöht sich von 3,7 HT präpubertal auf 5,2 HT postpubertal; diese Änderung ist zu 99 % signifikant. Parallel dazu ändert sich der Serum-Östronspiegel (E1) von 57 auf 123 pmol/l (piko entspricht nano/1000).



Das Körpergewicht beträgt in der jüngsten Altersgruppe bei den Mädchen durchschnittlich 37,8 kg und in der ältesten Gruppe 64,4 kg. In der Gruppe der 8,6 - 12,9 Jahre alten Mädchen hatten 4 von 18 bereits ihre Menarche; in der Altersgruppe 16 - 19,5 Jahre waren es alle Mädchen (Abb. 21, Pedersen et al, 11 1990). Es wurde eine lineare Korrelation zwischen dem SHBG-Spiegel und dem Eintritt der Menarche bei Mädchen gefunden ( $r=0,93$ ); die Korrelation konnte jedoch nicht bestätigt werden, wenn der statistischen Berechnung logarithmisch transformierte Werte zugrundegelegt wurden (Pedersen et al. 1987).

Abb 22 zeigt die Grundfrequenz der Sprechstimme bei Jungen im Verhältnis zum Stadium der Schambehaarung, zum Hodenvolumen, zum Serum-Testosteron und zum SHBG (Pedersen et al, III 1986). In einer früheren Pilotstudie (Pedersen et al. 1982) an 25 Knaben konnten wir zeigen, daß die Grundfrequenz der Sprechstimme bis zum Alter von 13 Jahren hoch ist, auch in der Altersgruppe von 13 - 15 Jahren liegt die Grundfrequenz noch über 195 Hz., wobei das Serum-Testosteron jedoch schon auf bis zu 10 nmol/l gestiegen ist, Erst in der Altersgruppe ab 15 Jahre fällt die Grundfrequenz der Sprechstimme unter 150 Hz, der Serum-Testosteron-Spiegel betrug in dieser Altersgruppe nicht unter 10 nmol/l. Das hohe Serum-Testosteron zeigte eine Korrelation entweder zu sinkenden Stimmumfängen in der Höhe oder zu klareren Registerübergängen. Alle jungen Männer im Alter von 17 - 18 Jahren hatten einen erwachsenen Stimmklang. Der Durchschnitt der Grundfrequenz der Sprechstimme lag 8 - 12 Halbtöne über dem niedrigsten Ton im Stimmfeld (Abb. 23).

Die Registerübergänge bei Jungen lagen - auditiv bestimmt von Personen mit dahingehend geübtem Gehör - bei 627 Hz in Gruppe 1 (Alter 11,8 - 13,2 Jahre; Testosteron  $< 1$  nmol/l) und bei 649 Hz in Gruppe 2 (Alter 13,2 - 14,7 Jahre; Testosteron  $< 10$  nmol/l). In der Gruppe der 14,8 - 16,9 jährigen war der Registerübergang mit einer Signifikanz von 99 % auf durchschnittlich 312 Hz (Standardabweichung 70 Hz) gefallen (Pedersen et al. 1983) ( abb. 24 ).

### **3. Weitere Ergebnisse der statistischen Auswertung**

Auch in der Musik- und Gesangsforschung scheinen gute statistische Methoden für aussagekräftige Schlußfolgerungen aus Analyseergebnissen nützlich zu sein.

Mit unserem Material haben wir - bezogen auf die durchschnittliche Grundfrequenz der Sprechstimme - eine one-way multivariate Analyse durchgeführt, um in Bezug auf die hormonellen und körperlichen Veränderungen im individuellen Fall den Zeitpunkt der Stimmveränderungen vorraussagen zu können (Abb. 25, Pedersen et al, IV 1985). Bei den Jungen in der Gruppe mit Stadium 2 - 4 der Schambehaarung und einem Durchschnittsalter von 13,5 Jahren wurde ein Zusammenhang zwischen dem Absinken der durchschnittlichen Grundfrequenz der Sprechstimme und dem sinkenden SHBG-Spiegel gefunden. Dies bedeutet, daß bei sinkendem SHBG-Spiegel auch ein Sinken der Grundfrequenz erwartet werden kann. Bei den Mädchen bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Sinken der Grundfrequenz und dem steigenden Serumspiegel für Östron ( $p<0,05$ ) und Östronsulfat sowie dem Tonumfang der Sprechstimme ( $p<0,05$ ) unabhängig vom Alter. Vor der Menarche bestand ein Zusammenhang zwischen der Grundfrequenz und dem Östronsulfat-Spiegel, der Körpergröße sowie auch dem Stadium der Schambehaarung, Nach der Menarche zeigte sich eine hochsignifikante Abhängigkeit ( $p<0,001$ ) zum Tonumfang der Sprechstimme aber auch zum Zeitraum, der seit der Menarche vergangen war. Je größer der Tonumfang der Sprechstimme ist, desto niedriger liegt also die Grundfrequenz der Sprechstimme bei Mädchen (Abb 26, 27, Pedersen et al. II 1990).

## V Diskussion

### 1. Hormonstatus und Pubertätsanalyse

Die Pubertät wird als Zeitraum des Erreichens der Reproduktionsfähigkeit definiert. In der Praxis wird dies auf die Entwicklung der sekundären Geschlechtsmerkmale bezogen. Bereits die normale Entwicklung des Menschen während der Pubertät ist ein sehr komplexer Vorgang. Von Brook (1995) liegt eine Übersichtsarbeit vor, die teilweise auf den Untersuchungen von Tanner et al. (1976) basiert. Die Stimmentwicklung ist bei Brook (1995) nur als „Stimmbruch“ im Alter von ca. 14,5 Jahren und dem sicheren Erreichen der Erwachsenenstimme etwa 1 Jahr später beschrieben. Der Kalziumstoffwechsel steht in Beziehung zu den Sexualhormonen und ist mehr vom Pubertätsstadium als vom Alter abhängig (Krabbe 1989). Die Körpergröße dänischer Kinder wurde bei Andersen (1968) und später bei Roed et al. (1989) und Hertel et al. (1995) referiert und entspricht unseren Messungen.

Brook (1995) beschreibt, daß das Wissen über die Entwicklung des Herzens und der Lunge begrenzt ist und die Entwicklung dieses Organsystems bisher nur zur Körpergröße und zur Entwicklung der sekundären Geschlechtsmerkmale ins Verhältnis gesetzt wurde. Ähnliches gilt in der pädiatrischen Literatur auch für die Stimmentwicklung. Hägg et al. (1982) bezeichnen die Stimme als kindlich, pubertär oder erwachsen, Karlberg et al. (1976) beschreiben den Stimmbruch im Verhältnis zum Pubertätsstadium im Alter von 14,5 Jahren, Heinemann (1976) beschäftigt sich in seiner Arbeit mit abnormen Verläufen der Stimmentwicklung in der Pubertät. Kahane (1982) analysiert die Entwicklung der Schilddrüse im Verhältnis zur Körpergröße und Hirano et al. (1983, 1988) haben das Wachstum der Stimmbänder über die Zeit der Pubertät gemessen.

Die normale endokrinologische Entwicklung wird vom Gonadotropin-releasing Hormon aus dem Hypothalamus gesteuert (Brook 1995). Durch die Wirkung dieses Dekapeptids werden LH und FSH aus dem Hypophysenvorderlappen freigesetzt. Diese regulieren das Wachstum von Testes und Ovarien. Von diesen Organen werden die Sexualhormone produziert. Unsere Meßmethoden sind bei Lykkesfeldt et al. (1985) beschrieben. Die Messungen sind mit denen anderer Autoren vergleichbar (Apter et al. 1985). Eine Übersicht über die Funktion des SHBG findet sich u.a bei Strel'Chyonok et al. (1985).

Mit der Entwicklung einer Methode, mit der man Hormonanalysen aus dem Speichel durchführen kann, eröffneten sich neue Möglichkeiten, die Beziehungen zwischen Hormonveränderungen und der Stimmentwicklung in physiologischen und pathologischen Fällen zu untersuchen (Young et al. 1988, Walker et al. 1993). Die neuen Einblicke in die Beziehungen zwischen cerebraler Regulation und dem SHBG erlauben, das Phänomen Stimmwechsel zukünftig auch unter neurophysiologischen Gesichtspunkten zu erforschen (Rodriguez-Sierra 1986, Behre et al. 1995, Nastiuk et al. 1995). Perspektivisch können auch neue Aspekte im Verständnis der Psychologie der Musik erwartet werden (Seashore 1938, Pedersen 1992, Dejonckere et al. 1995).

## **2. Das Stimmfeld im Verlauf der Pubertät**

Die Stimmentwicklung in der Pubertät wurde in der vorliegenden Arbeit im Rahmen einer Querschnittsstudie untersucht. Längsschnittstudien haben in diesem Zusammenhang den Vorteil, daß nur intraindividuelle Vergleiche vorgenommen werden. Wir haben deshalb 3 Jungen über den Zeitraum eines Jahres untersucht (Ende Klasse 7 bis Ende Klasse 8). Die Messungen fanden alle 2 Monate statt. Die 6 Stimmfelder eines Jungen werden in Abb. 28 gezeigt (Pedersen V 1993). Es wurden auch die Durchschnittsstimmfelder vor und während der Mutation errechnet (Abb. 29). Der Beginn der Mutation lag für alle 3 Jungen im 8. Schuljahr. Die Stimmveränderungen innerhalb dieses Jahres waren nicht altersabhängig. Der niedrigste Ton im Stimmfeld, für den in früheren Untersuchungen eine hohe Korrelation zur Grundfrequenz der Sprechstimme bei Jungen gefunden wurde, war signifikant vom SHBG-Spiegel abhängig. Das SHBG erwies sich also auch in dieser Studie als der empfindlichste Parameter für das Sinken der Stimmfrequenz. Da nur ein begrenzter Zeitabschnitt der gesamten Pubertät untersucht wurde, konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen Veränderungen der Stimmfeldfläche und Testosteron-Spiegel gefunden werden. Bezüglich des Serum-Testosteron-Spiegels gibt es in diesem Abschnitt der Pubertät wesentlich mehr interindividuelle Unterschiede als in früheren oder späteren Stadien. Die Stimmfeldfläche ändert sich innerhalb dieses kurzen Zeitraums ebenfallsentscheidend; das Stimmfeld wird lediglich unregelmäßiger und die Registerübergänge treten deutlicher hervor. Versuche der mathematischen Beschreibung der Unregelmäßigkeit (Stimmfeldkennzahl, fraktale Dimension) brachten jedoch bisher keine befriedigenden Ergebnisse; eine Einbeziehung dieser Werte in statistische Berechnungen war nicht sinnvoll (Bühning et al. 1992).

Um mögliche Einflüsse lokaler Besonderheiten der Kopenhagener Probanden sowohl im Hinblick auf Stimmparameter als auch auf die Hormonwerte beurteilen zu können, führten wir eine Untersuchung an Mitgliedern des Thomanerchores Leipzig durch (Gruppe 1: Knabensopranen - vor der Mutation; Gruppe 2: Mutanten), wobei in jeder Gruppe 4 Probanden untersucht wurden (Abb. 30). Betrachtet man die Stimmfelder der Kopenhagener Mädchen und Jungen, so zeigt sich eine Vergrößerung der Stimmfeldfläche beim Vergleich zwischen Gruppe 1 (präpubertal) und Gruppe 3 (postpubertal). Während der Pubertät (Alter um 14,5 Jahre) wird die Fläche des Stimmfeldes vorübergehend kleiner (Abb. 31,32). Die Soprangruppe der Thomaner ist hinsichtlich niedrigstem Ton und Stimmfeldfläche mit der Soprangruppe der Kopenhagener Knaben vergleichbare der höchste Ton der Thomaner-Sopranen lag jedoch um das 1,3-fache höher als bei den Kopenhagener Sopranen. Dieser Unterschied ist möglicherweise in einer strengerer Auswahl der Chormitglieder oder in einer besseren technischen Beherrschung der Stimme begründet. In den Durchschnittsstimmfeldern der beiden Thomaner-Gruppen findet man auch eine sehr kleine Standardabweichung in der Forte-Kurve, die lediglich im Bereich der Registerübergänge etwas größer wird.

Wir führten an den Thomanern auch eine Pilotstudie zur elektrolottographischen Bestimmung der Registerübergänge durch. Die Jungen sangen zuerst so leise wie möglich und dann so laut wie möglich die chromatische Tonleiter von-unten nach oben; währenddessen wurden die Elektrolottogramme aufgezeichnet. Bezüglich des Hormonwerte fand sich kein Unterschied zwischen der Leipziger und Kopenhagender Probanden (Behrendt et al. 1989, Pedersen 1991c).

Bis zur Entwicklung des Stimmfeldes als Methode der gleichzeitigen Registrierung des Ton- und Dynamikumfangs der Stimme wurde die Stimmentwicklung nur durch den Tonumfang beschrieben. Schon früh in der Geschichte der Phoniatrie wurden Untersuchungen des Stimmumfangs bei normalen Schulkindern durchgeführt (Flatau et al. 1905). Eine Übersicht über die Ergebnisse der Erforschung der Kinderstimme wurde auf dem Kongreß der Logopäden und Phoniater 1936 vorgeschlagen und später von Weiss (1950) durchgeführt. Diese Übersicht geht über einen Zeitraum von 4000 Jahren und zeigt, daß man sich fast ausschließlich mit der Knaben- und Eunuchenstimme beschäftigt hat. Das Durchschnittsalter bei der Mutation betrug:

ca. 14,5 Jahre; die Grundfrequenz der Sprechstimme sank bei Knaben um eine Oktave, bei Mädchen um 1/3 Oktave. Auch Frank et al. (1970) und Wendler et al. (1987) kommen zu ähnlichen Resultaten. Blatt (1983) diskutiert die Aspekte der Stimmerziehung in der Pubertät.

Fast zeitgleich zu unseren Untersuchungen analysierten Komiyama et al. (1984) die Stimmfelder in der Pubertät. Sie führten jedoch keinen Vergleich zu anderen Pubertätsphänomenen durch und legten die untere Meßgrenze für die Intensität bei 60 dB fest. In unseren Untersuchungen lag die Intensität der Stimme beim leisen Singen wesentlich niedriger; die Messungen sind also nicht vergleichbar.

Meuser et al. (1977) zeigten, daß die Stimmgattungen bei Männern (Tenor, Bariton, Baß) zum Serum-Testosteron-Spiegel in Relation standen. Large et al. (1972) fanden Unterschiede zwischen den Formanten in Abhängigkeit von der Stimmgattung bei Erwachsenen. Wir sind auch der Meinung, daß eine Unterscheidung zwischen den Stimmgattungen notwendig ist, wenn eine exakte Auswertung der Stimmentwicklung über die Zeit der Pubertät erreicht werden soll. Zukünftig sollte dies auch in Untersuchungen zu Pathologie der Stimme berücksichtigt werden (Pedersen et al. 1980, 1985).

Während des Zeitraums unserer Untersuchungen führten Klingholz et al. (1989) Stimmfeldmessungen bei Mitgliedern des Tölzer Knabenchores durch; auch Konzelmann et al. (1989) untersuchten die Stimmfelder bei Chorknaben. Eine Literaturübersicht findet sich bei Bühring (1990). Behrendt (1989) verfolgte die Entwicklung des Fistelregisters bei Knaben des Thomanerchores bis ins Erwachsenenalter, setzte dies Phänomen aber nicht zu anderen Parametern ins Verhältnis.

Auch für Gesangslehrer und Künstler ist die Stimmfeldmessung eine Hilfe in ihrer Arbeit. Mit dieser Methode ist es möglich, die Resultate in der Ausbildung der Regulierung der Dynamik (besonders beim leisen Singen) und der Registerübergänge auch in Chören besser zu kontrollieren (Bonet et al. 1994, McAllister et al. 1994, Böhme et al. 1995, Sulter et al. 1995). Die Stimme kann jedoch nicht unabhängig von der anderen Körperfunktionen beurteilt werden (Pedersen 1991a, Krusnevska et al. 1992). ( abb. 33 )

### **3. Die Sprechstimme im Verlauf der Pubertät**

Eine Übersicht über wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit der Grundfrequenz der Sprechstimme bei Kindern beschäftigen, findet sich bei Baken 1987 und Schultz - Coulon et al. 1988. U.a. haben Fairbanks et al. 1949, Michel et al. 1966, Hollien et al. 1967, 1972, 1983, 1994, Fitch et al. 1970, McGlone et al. 1972 und Coleman et al. 1977 die Entwicklung der Grundfrequenz der Sprechstimme bei Kindern studiert, ohne jedoch den Tonumfang der Sprechstimme mitzuuntersuchen. Vuorenkoski et al. (1978) haben bei Kindern mit endokrinologischen Erkrankungen die durchschnittliche Grundfrequenz der Sprechstimme mit dem Hormonspiegel verglichen. Bastian et al. (1980) untersuchte die Grundfrequenz in den verschiedenen Pubertätsstadien. In der Literatur finden sich jedoch nicht viele Studien, in denen die geschlechtliche Reifung des Körpers in Verbindung mit der hormonellen Entwicklung zum wichtigen sekundären Geschlechtsmerkmal Stimme in Beziehung gesetzt wird.

Die Stimme ist natürlich nicht nur in der Pubertät, sondern auch in der Menopause ein interessanter biologischer Parameter. Truuverk et al. (1992) untersuchten das Sprechstimmfeld im Verhältnis zu Androgen und Östrogen bei Amateur-Chorsängerinnen im World Festival Choir. Es wurde ein Zusammenhang zwischen der Einnahme von Östradiol und einer größeren Fläche des Sprechstimmfeldes gefunden. Russel et al. (1995) analysierten den Tonumfang der Sprechstimme bei erwachsenen Frauen und erhielten ähnliche Resultate. Chan (1994) dokumentierte mit der Elektrolottographie Verbesserungen der Stimme bei Kindergärtnerinnen.

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

Vielleicht wird die Berechnung mit neuen mathematischen Modellen (Titze 1994, Siegel 1994) bisher nicht bekannte Aspekte der hormonellen Regulation der Stimme aufzeigen (Blaustein 1986, Miranda et al. 1996). Dies wäre auch für die quantitative Abgrenzung der physiologischen von der pathologischen Stimmentwicklung interessant (Andersson-Wallgren et al. 1994, Yukizane et al. 1994). Für die moderne Stimmforschung ist die Nutzung moderner Technologien und die Interpretation der Meßergebnisse unter biologischen Gesichtspunkten von großer Wichtigkeit.

## VI Beantwortung der Fragestellung

Stimmfeldmessung und Elektrolottographie liefern wichtige Meßwerte, die - interpretiert in Verbindung mit anderen Parametern - unser Verständnis für die Vorgänge während der Stimmentwicklung erweitern können.

Anhand der aus unseren Untersuchungen gewonnenen Informationen können wir die zur Beginn der Arbeit formulierte Fragestellung in folgender Weise beantworten:

1. Wie entwickelt sich der Tonumfang und der Dynamikumfang der Stimme während der Pubertät bei stimmlich ausgebildeten Chorknaben und Chormädchen?

Die Stimmfeldfläche nimmt im Verlauf der Pubertät bei beiden Geschlechtern allmählich zu. Sie verringert sich aber vorübergehend in der Altersstufe zwischen 13,5 und 14,5 Jahren, dieses Phänomen ist bei Jungen stärker als bei Mädchen ausgeprägt.

2. Wie entwickelt sich die Grundfrequenz der Sprechstimme während der Pubertät bei stimmlich ausgebildeten Chorknaben und Chormädchen?

Die Sprechstimme verändert sich bei beiden Geschlechtern während der Pubertät. Bei Jungen ist die Veränderung vom Serum-Testosteron-Spiegel abhängig, bei Mädchen vom Östron-Spiegel. In der männlichen Gruppe sinkt die durchschnittliche Grundfrequenz der Sprechstimme, in der Gruppe der Mädchen erweitert sich der Tonumfang der Sprechstimme.

3. Welche Beziehungen gibt es zwischen den hormonellen Veränderungen und den Veränderungen der ausgebildeten Stimme während der Pubertät bei Chorknaben und Chormädchen?

Die Stimme ändert sich in der Pubertät in Abhängigkeit vom Testosteron- bzw. Östron-Spiegel und nicht in Abhängigkeit vom Alter. Der sinkende Spiegel des SHBG geht dem Absinken der Grundfrequenz der Sprechstimme bei Jungen voraus. Diese Veränderung findet im Pubertätsstadium 2 - 4 statt, in diesem Zeitraum steigt auch der Testosteron-Spiegel. Bei Mädchen folgt das Absinken der Grundfrequenz der Sprechstimme dem steigenden Östron- und Östronsulfat-Spiegel und dem erweiterten Tonumfang der Sprechstimme.

4. In welchem Stadium der Pubertät verändert sich die ausgebildete Stimme der Chorknaben und Chormädchen?

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

Zeitpunkt und Verlauf der Pubertät sind bei Jungen und Mädchen verschieden; die Stimmveränderungen treten jedoch bei beiden Geschlechtern im Alter von 13,5 - 14,5 Jahren ein. Mädchenchöre konnten sich bisher nicht in gleicher Weise wie Knabenchöre etablieren. Neben Traditionsgründen spielt hier sicherlich auch das geringe Wissen über die Mädchenstimme und ihre Veränderung in der Pubertät eine Rolle. Um eine optimale Entwicklung des musikalischen Ausdrucks bei Mädchen zu erreichen, sollte darauf geachtet werden, daß auch die Sprechstimme im biologischen, individuell richtigen Frequenzbereich und nicht zu hoch liegt (Collin et al. 1995).

## Referenzen



- I Pedersen, M.F. (1977) Electroglottography compared with synchronized stroboscopy in normal persons. *Folia Phoniatr.* 29: 191-199.
- II Pedersen, M.F., Møller, S., Krabbe, S., Bennett, P & Svenstrup, B. (1990) Fundamental voice frequency in female puberty measured with electroglottography during continuous speech as a secondary sex characteristic. A comparison between voice, pubertal stages, oestrogens and androgens. *Int. J. Pediatr. otorhinolaryngol.* 20: 17-24.
- III Pedersen, M.F., Møller, S., Krabbe, S. & Bennett, P. (1986) Fundamental voice frequency measured by electroglottography during continuous speech. A new exact secondary sex characteristic in boys in puberty. *Int. J. Pediatr. otorhinolaryngol.* 11: 21-27.
- IV Pedersen, M.F., Møller, S., Krabbe, S., Munk, E. & Bennett, P. (1985) A multivariate statistical analysis of voice phenomena related to puberty in choir boys. *Folia Phoniatr.* 37: 271-278.
- V Pedersen, M.F. (1993) A longitudinal pilot study an phonetograms / voice profiles in pre-pubertal choir boys. *Clin. Otolaryngol.* 18: 488-491.

- Airainer, R. & Klingholz, F. (1993) Quantitative evaluation of phonetograms in the case of functional dysphonia. *J. Voice* 7: 136-141.
- Anastopolo, S. & Karnell, M.P. (1988) Synchronized videostroboscopy and electroglottography. *J. Acoust. Soc. Am.* 83: 1883-90.
- Andersen, E. (1968) Skeletal maturation of danish school children in relation to height, sexual development and social conditions. *Acta Paediatr. Scand. Suppl.* 185, p. 64 72 and 98-101.
- Andersson-Wallgren, G. & Albertsson-Wikland, K. (1994) Change in speaking fundamental frequency in hormone-treated patients with Turner's syndrome - a longitudinal study of four cases. *Acta Paediatr. Scand.* 83: 452-5.
- Apter, D. & Vihko, R. (1985) Premenarcheal endocrine changes in relation to age at menarche. *Clin. Endocrinol.* 22: 753-60.
- Askenfelt, A., Gauffin, J., Sundberg, J. & Kitzing, P. (1980) A comparison of contact microphone and electroglottography for the measurement of vocal fundamental frequency. *J. Speech Hear. Res.* 23: 258-73.
- Baken, R.S. (1987) *Clinical measurement of speech and voice.* College Hill. Boston: 197-240.
- Bastian, H.-J. & Unger, E. (1980) Untersuchungen des Zusammenhangs von Akzeleration, Mutation und Dysphonie anhand von Langsschnitt Untersuchungen. *Arztl. Jugendkd.* 71: 205-11.
- Behre, H.M. & Nieschlag, E. (1995) Biological effects of testosterone: new aspects. *Eur. J. Clin. Invest.* 25 (suppl. 2): A 49.
- Behrendt, W. (1989) Auditive Beurteilung des Stimmklanges männlicher Fistelstimmen bei ehemaligen Chorknaben. *Sprache, Stimme, Gehör* 13: 60-63.
- Behrendt, W. & Pedersen, M.F. (1989) A comparative pubertal study of Thomaner choir, Leipzig and Copenhagen boys choir. Oral presentation at Voice Symposium, Philadelphia.
- Blatt, J.M. (1983) Training singing children during the phase of voice mutation. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 92: 462-68.
- Blaustein, J.D. (1986) Steroid receptors and hormone action in the brain. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 474: 400-13.
- Bloothoof, G. (1981) Voice profiles, vowel spectra and vocal registers. *Proc. IXth Congr. Union of European Phoniaticians.* Amsterdam. 1981: 83-85.
- Bohme, G. & Stuchlik, G. (1995) Voice Profiles and Standard Voice Profile of Untrained Children. *J. Voice* 9: 304-307.

- Bonet, M. & Casan, P. (1994) Evaluation of dysphonia in a childrens choir. *Folia. Phoniatr.* 46: 27-34.
- Brook, C.G.D. (ed.) (1995) *Clinical Endocrinology*. Blackwell scientific publications. 3rd. ed. Oxford.
- Buhring, G. (1990) *Die Anwendung der CAD-System: CADy bei der Computer - gestutzten Stimmfeldwertung*. Dissertation A. Leipzig.
- Buhring, G. & Pedersen, M.F. (1992) Fractal dimensions of phonetograms, a stratified and longitudinal study during development of male voices. *Proc. XXIInd Congr. Int. Ass. Logoped. Phoniatr.* 1:1-9.
- Byrne, D., Dillon, H. & Tran, K. (1994) Aninternational comparison of long-term average speech spectra. *J. Acoust. Soc. Am.* 96: 2108-20.
- Calvet, J & Malhiac, G. (1952) Courbe vocales et mue de la voix. *Congres Bull. Soc. Fr. Foniatr.* (1950) and *J. Fr. Otorhinolar.* 1:115-124.
- Chan, R.W.K. (1994) Does the voice improve with vocal hygiene education? A study of some instrumental voice measures in a group of kindergarten teachers. *J. Voice* 8: 279-291.
- Coleman, R.F., Mabis, J.H. & Hinson, J.K. (1977) Fundamental frequency - sound pressure level profiles of adult male and female voices. *J. Speech. Hear. Res.* 20: 197-204.
- Collin, F. & Koppe, S. (ed.) (1995) *Humanistisk videnskabsteori*. The Danish Radio publications. Copenhagen.
- Colton, R.H., Casper, J.K., Brewer, D.W. & Aronson, D.G. (1989) Digital processing of laryngeal images: A priliminary report. *J. Voice* 3: 132-42.
- Colton, R.H., Woo, P., Brewer, D.W., Griffin, B. & Casper, J. (1995) Stroboscopic Signs Associated with Benign Lesions of the Vocal Folds. *J. Voice* 9: 312-325.
- Dejonckere, PH. (1995) *Electroglottography:an useful test in voice evaluation*. Ist. World Conf. of Voice, Portugal. Abstract book: 136.
- Dejonckere, PH., Hirano, M. & Sundberg, J. (1995) *Vibrato*. ed. Singular publishing group, San Diego.
- Elman, J.L. & Zipser, D. (1988) Learning the hidden structure of speech. *J. Acoust. Soc. Am.* 83: 1615-26.
- Fairbanks, G., Wiley, J.M. & Larsman, F.H. (1949) An acoustical study of vocal pitch in seven and eight-year-old boys. *Child. Dev* 20: 63-9.
- Fabre, P. (1957) Un precode electrique percutane d'inscription de l'accolement glottique au cours de la phonation glottographie de haute frequence. *Premiers resultats. Bull. Acad. Natl. Med.* 121: 66.
- Fitch, J.L. & Holbrook, A. (1970) Modal vocal fundamental frequency of young adults. *Arch. Otolaryngol.* 92: 379-82.
- Flatau, T.S. & Gutzmann, H. (1905) Die Singstimme des Schulkindes. *Archiv Laryngologie* 20: 327-48.
- Fourchin, A.J. & Abberton, E. (1971) First application of a new laryngograph. *Med. Biol. Illus.* 21: 172-182.
- Frank, F. & Sparber, M. (1970) Stimmumfang bei Kindern aus neuer Sicht. *Folia Phoniatr.* 22: 397-402.
- Frokjaer-Jensen, B. (1983) Can electroglottography be used in the clinical practice. *Proc. XIXth Congr. of IALP, Edinburgh.* vol II: 849-851.
- Frokjaer-Jensen, B. & Thorvaldsen, P. (1968) *Construction of a Fabre Glottograph*. ARIPUC. Copenhagen University, Denmark 3: 1-8.

- Gramming, P., Pedersen, M.F. & Kitzing, P. (1983) Datoriserade fonetogram for objectivering av rost funktions störningar. Lakar stamman / Stockholm. Otolaryngologisk section (oral presentation).
- Gramming, P. (1988) The phonetogram. Thesis. University of Lund. Sweden.
- Guidet, C. & Chevrie-Muller, C. (1979) Computer analysis of prosodic and electroglottographic parameters in diagnosis of pathologic voice. In: Winkler, P. (ed.) Investigations of the speech process. Quantitative linguistics. Dr. Brockmeyer Studienverlag, Bochum. 19: 233-61.
- Hacki, T. (1988) Die Beurteilung der quantitativen Sprechstimm - leistung. Das Sprechstimmfeld. Folia Phoniatr. 40: 190-6.
- Hacki, T. (1989) Klassifizierung von Glottisdysfunktionen mit Hilfe der Elektroglottographie. Folia Phoniatr. 41: 43-48.
- Hagg, U. & Taranger, T. (1982) Maturation indication and the pubertal growth spurt. Am. J. Orthod. October: 299-309.
- Heinemann, M. (1976) Hormone und Stimme. J. Ambrosius Barth Verlag. Leipzig.
- Hertegard, S. & Gauffin, J. (1995) Glottal area and vibratory Patterns studied with simultaneous stroboscopy, flow glottography and electroglottography. J. Speech. Hear. Res. 38: 85-100.
- Hertel, N.T., Scheike, T., Juul, A., Main, K., Holm, K., Bach-Mortensen, N. Skakkebaek, N.E. & Muller, J.R. (1995) Kropsproportioner hos danske børn. Ugeskr. Laeger. 157: 6876-81.
- Herzel, H., Berry, D., Titze, I.R. & Saleh, M. (1994) Analysis of vocal disorders with methods from nonlinear dynamics. J. Speech. Hear. Res. 37: 1008-1019.
- Hirano, M. (1989) Objective evaluation of the human voice: clinical aspects. Folia Phoniatr. 41: 89-144.
- Hirano, M., Kurita, S. & Nakashima, T. (1983) Growth, Development and Aging of Human Vocal Folds. In: Bless, D.M. & Abbs, J.H. (eds) Vocal Fold Physiology, College Hill Press, San Diego California: 22-43.
- Hirano, M., Kiyokawa, K. & Kurita, S. (1988) Laryngeal Muscles and Glottic Shaping. In: Fujimura, O. ed. Vocal Physiology: Voice Production, Mechanisms and Functions. Vol. 2. Raven Press, Ltd. N.Y.: 49-65.
- Hirose, H., Kiritani, H. & Imagawa, H. (1988) High-Speed Digital Image Analysis of Laryngeal Behavior in Running Speech. In: Vocal Physiology: Voice Production, Mechanisms and Functions. Vol. 2. Fujimura, O. (ed.) Raven Press, Ltd. N.Y.: 335-45.
- Hollien, H. & Malcik, E. (1967) Evaluation of cross-sectional studies of adolescent voice change in males. Speech Monographs 34: 80-84.
- Hollien, H. & Shipp, T. (1972) Speaking fundamental frequency and chronologic age in males. J. Speech. Hear. Res. 15: 155-59.
- Hollien, H. (1983) In Search of Vocal Frequency Control Mechanisms. In: Bless, D.M. & Abbs, J.H. (eds) Vocal Fold Physiology. College - Hill Press, San Diego, California: 361-67.
- Hollien, H., Green, R. & Massey, K. (1994) Longitudinal research an adolescent voice change in males. J. Acoust. Soc. Am 96: 2646-54.
- International Phonetic Assoziation (1964) reprint from 1949: The Principles of the International Phonetic Assoziation. ed. Dept. Phonetics, Univ. College, London, W.C.1.
- Kahane, J.C. (1982) Growth of the human prepubertal and pubertal larynx. J. Speech. Hear. Res 25: 446-55.
- Karlberg, P. & Taranger, J. (1976) The somatic development of children in a swedish urban community. Acta Paediatr. Scand. Suppl.: 256, 1-148.

- Karnell, M.P. (1989) Synchronized video stroboscopy and electroglottography. *J. Voice* 3: 68-75.
- Karnell, M.P. (1991) Laryngeal perturbation analysis: Minimum length of analysis window. *J. Speech Hear. Res.* 34: 544-548.
- Kay Elemetrics Corp. (1993) Voice range profile model 4326. Operation manual. Pine Brook NJ.
- Kersing, W. (1983) De Stimmband Musculatur. Een Histologische histochemische Studie. Thesis. Utrecht. The Netherlands.
- Kitzing, P. (1979) Glottographisk Frekvensindikering. Thesis. University of Lund. Sweden.
- Kitzing, P. (1990) Clinical application of electroglottography. *J. Voice* 4: 238-249.
- Klingholz, F. & Martin, F. (1983) Die quantitative Auswertung der Stimmfeld Messung. *Sprache, Stimme, Gehör* 7: 106-110.
- Klingholz, F., Jolk, A. & Martin, F. (1989) Stimmfeld Untersuchungen bei Knabenstimmen (Tolzer Knabenchor). *Sprache, Stimme, Gehör* 13: 107-111.
- Komyama, S., Watanabe, H. & Ryu, S. (1984) Phonetographic relationship between pitch and intensity of the human voice. *Folia Phoniatr.* 36: 1-7.
- Konzelmann, U., Moser, M. & Kittel, G. (1989) Stimmfeldmessungen bei Chor Sängern vor und nach Stimmbelastung unter besonderer Berücksichtigung des Sangerformanten. *Sprache, Stimme, Gehör* 13: 112-118.
- Krabbe, S. (1989) Calcium homeostasis and mineralization in puberty. *Dan. Med. Bull.* 36: 113-24.
- Krusnevsckaja, I.I. & Pedersen, M.F. (1992) Phonetograms of radiated voices in Chernobyl. *Proc. XXI Congr. Int. Ass. Logoped. Phoniatr.* Hannover 16: 1-9.
- Kurita, S., Hirano, M., Mihashi, S. & Nakashima, T. (1980) Layer structure of the vocal fold, age-dependant variation. *Proc. XVIIIth Congr. Int. Ass. Logoped. Phoniatr.:* 537-39.
- Large, J. & Iwata, S. (1972) The male operatic head registers versus falsetto. *Folia Phoniatr.* 24: 19-29.
- Lecluse, F.L.E. (1977) Electroglottographie. Thesis. Utrecht. The Netherlands.
- Loebell, E. (1968) Über den klinischen Wert der Electroglottographie. *Arch. Klin. Exp. Ohren Nasen Kehlkopfheilkd.* 191: 760-764.
- Lykkesfeldt, G., Bennett, P., Lykkesfeldt, A.E., Micic, S., Moller, S. & Svenstrup, B. (1985) Abnormal androgen and oestrogen metabolism in men with steroid sulphatase deficiency and recessive x-linked ichthyosis. *Clinical Endocrinol.* 23: 385-93.
- Marin, M.L., Tobias, M.L. & Kelley, D.B. (1990) Hormone-sensitive stages in the sexual differentiation of laryngeal muscle fiber in *Xenopus laevis*. *Development* 110: 703-11.
- McAllister, A., Sederholm, E., Sundberg, J. & Gramming, P. (1994) Relations between voice range profiles and physiological and perceptual voice characteristics in ten-year-old children. *J. Voice* 8: 230-239.
- McGlone, R.E. & McGlone, J. (1972) Speaking fundamental frequency of eight-year-old girls. *Folia Phoniatr.* 24: 313-317.
- Meuser, W. & Nieschlag, W. (1977) Sex hormones and vocal register in adult men. *Acta Endocrinol. Suppl. (Copenh.)* 208: 61.
- Michel, J.F., Hollien, H. & Moore, P. (1966) Speaking fundamental frequency characteristics of 15, 16 and 17-year old girls. *Language and Speech* 9: 46-51.
- Miranda, R., Sohrabji, F., Singh, M. & Toran-Allerand, D. (1996) Nerve growth factor (NGF) regulation of estrogen receptors in explant cultures of the developing forebrain. *J. Neurobiol.* 31: 77-87.

- Nastiuk, K.L. & Clayton, D.F. (1995) The canary androgen receptor mRNA is localized in the song control nuclei of the brain and is rapidly regulated by testosterone. *J. Neurobiol.* 26: 213-224.
- Pabon, J.P.H. (1991) Objective acoustic voice-quality parameters in the Computer phonetogram. *J. Voice* 5: 203-16.
- Pahn, J. & Pahn, E. (1991) Formblatt, Eigenschaften, Ablauf und Bedeutung des Tests der Sensibilität formaler sprachlicher Elemente im Hinblick auf Perzeption und Produktion. *Sprache, Stimme, Gehör* 15: 19-23.
- Pedersen, M.F. (1974) A clinical examination of patients with benign tumors of the larynx, before and after microlaryngoscopy. *Proc. XVIth Congr. Int. Ass. Logopedics and Phoniater.*: 378-83.
- Pedersen, M.F. (1978) Electroglottography compared with synchronized stroboscopy in students of music. *The study of sound, Tokyo* 18: 423-434.
- Pedersen, M.F., Eriksen, K. & Heramb, S. (1980) A follow up study of patients with voice disorders. *Proc. XVIIIth Congr. Int. Ass. Logopedics and Phoniater. Washington* 1: 621-26.
- Pedersen, M.F., Kitzing, P., Krabbe, S. & Heramb, S. (1982) The change of voice during puberty in 11 to 16 year old choir singers measured with electroglottographic fundamental frequency analysis and compared to other phenomena of puberty. *Acta Otolaryngol. Suppl. (Stockh.)* 385: 189-192.
- Pedersen, M.F. & Munk, E. (1983) Register examination during mutation in the Copenhagen Boys Choir. *Proc. XIXth Congr. Int. Ass. Logopedics and Phoniater.*: 686-87.
- Pedersen, M.F., Lindskov Hansen, T., Lindskov Hansen, H. & Munk, E. (1984) A Phonetograph for Use in Clinical Praxis. *Acta Otolaryngol. Suppl. (Stockh.)* 412: 138.
- Pedersen, M.F., Moller, S., Eriksen, K. & Sondergaard, U. (1985) Quantitative and qualitative diagnoses of children with voice disorders. *New Dimensions in Otorhinolaryngology - Head and Neck Surgery* vol 2: 470-71.
- Pedersen, M.F., Moller, S., Krabbe, S., Bennett, P. & Munk, E. (1986) Phonetograms in Choir Boys Compared with Voice Categories, Somatic Puberty and Androgen Development. *J. Research Singing* 9: 39-49.
- Pedersen, M.F. & Lindskov Hansen, H. (1986) Computerized phonetograms for clinical use. *Folia phoniater. Proc. XXth Congr. of IALP, Tokyo*: 170-171.
- Pedersen, M.F. & Moller, S. (1987) A transport globulin, serum hormon binding globulin, as a predicting factor of voice change in puberty?. *Proc. XIth int. Congr. Phonetic Sciences, Tallinn* 4: 296-299.
- Pedersen, M.F., Seidner, W. & Wendler, J. (1988) Collection and processing of voice field data. Methodical approaches. *Proc. XVth Congr. Union of European Phoniatericians. Erlangen*: 107.
- Pedersen, M.F., Hacki, T. & Loebell, E. (1988) Videostroboscopy of choir boys in puberty. Video presentation. *Medizinische Hochschule. Hannover*.
- Pedersen, M.F., Moller, S. & Bennett, P. (1990) Voice Categories Compared with Phonetograms, Androgens, Estrogens and Puberty Stages in 8-19 Year Old Girls. *J. Research Singing* 13: 1-4.
- Pedersen, M.F. (1991a) Computed phonetograms in adult patients with benign voice disorders before and after treatment with a non - sedating antihistamine (Loratadine). *Folia Phoniater.* 43: 60-67.
- Pedersen, M.F. (1991b) Pilotstudie der Stimmfunktion vor und nach Behandlung von Hirngeschädigten. In: H. Gundermann (ed.) *Die Krankheit der Stimme, die Stimme der Krankheit.* Fischer Verlag, Stuttgart: 162-71.

- Pedersen, M.F. (1991c) Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät. Bundesverband Deutscher Gesangspädagogen. Dokumentation ed. Detmold Hochschule für Musik: 28-37.
- Pedersen, M.F. (1992) Bookreview. C.E. Seashore. *Psychology of Music. Folia Phoniatica* 44:312.
- Pedersen, M.F. (1995) Stimmfunktion vor und nach Behandlung von Hirngeschädigten, mit Stroboskopie, Phonetographie und Luftstrom - analyse durchgeführt. *Sprache, Stimme, Gehör* 19: 84-89.
- Roubeau, B., Chevie-Muller, C. & Arabia-Guidet, C. (1987) Electroglotto - graphic study of the change of voice registers. *Folia Phoniatr.* 39: 280-9.
- Rihkanen, H., Leinonen, L., Hiltunen, T. & Kangas, J. (1994) Spectral pattern recognition of improved voice quality. *J. Voice* 8: 320-326.
- Rodriguez-Sierra, J. (1986) Extended organizational effects of estrogen at puberty. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 474: 293-306.
- Roed, J., Larsen, R.B. & Ibsen, K.K. (1989) The heights of a population of children in greater Copenhagen aged 7-18 years in 1981 and 1985. *Ugeskrift Laeger* 159: 895-897.
- Rothenberg, M. (1992) A multichannel electroglottograph. *J. Voice* 6: 36-43.
- Russell, A., Penny, L. & Pemberton, C. (1995) Speaking fundamental frequency changes over time in women: a longitudinal study. *J. Speech. Hear. Res.* 38: 101-109.
- Sataloff, R.T. (1995) Genetics of the voice. *J. Voice* 9: 20-26.
- Sato, K. & Hirano, M. (1995) Histologic investigations of the macula flava of the human vocal fold. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 104: 138-143.
- Schonharl, E. (1960) Die Stroboskopie in der praktischen Laryngologie. Thieme. Stuttgart.
- Schulz-Coulon, H.J. & Klingholz, F. (1988) Objective und semiobjective Untersuchungen der Stimme. In: *Proc. XV Congr. Union of European Phoniaticians Erlangen*: 3-88.
- Schutte, H.K. & Seidner, W. (1983) Recommendation by the Union of European Phoniaticians (UEP): Standardizing voice area measurement / phonetography. *Folia Phoniatr.* 35: 286-8.
- Schutte, H.K. (1995) Phonetogram: Voice capacities and clinical value. Abstracts, 1st. World Conf. of Voice, Oporto, Portugal: 265.
- Seashore, C.E. (1938) *Psychology of music*. McGraw-Hill. 1. Republication Dover 1967.
- Seidner, W. & Schutte, H.K. (1981) Standardisierungsvorschlag Stimmfeld Messung / Phonetographie. *Proc. IXth Congr. Union of European Phoniaticians. Amsterdam*: 88-94.
- Seidner, W. & Wendler, J. (1982) Die Sangerstimme. Wilhelmshafen, Heinrichshofen: 174-78
- Seidner, W., Kruger, H. & Wernecke, K.D. (1985). Numerische Auswertung spektraler Stimmfelder. *Sprache, Stimme, Gehör* 9: 10-13.
- Siegel, W. ed. (1994) *Proceedings, Int. Computer Music Conference, Århus*.
- Smith, S. (1954) Remarks an the physiology of the vocal cords. *Folia Phoniatr.* 6: 166-79.
- Smith, S. (1981) Research an the principle of electroglottography. *Folia phoniatr.* 33: 1-10.
- Strel'Chyonok, O.A. & Vihko, R. (1985) Specific steroid-binding glycoproteins of human bloodplasma. Novel data an their structure and function. *J. Steroid. Biochem.* 35: 519-34.
- Sturtzeberger, E., Wagner, H., Becker, R., Rauhut, A. & Seidner, W. (1982) Einrichtung zur simultanen Registrierung von Stimmfeld und hohem Sangerformant. *HNO-Praxis Leipzig*; 7: 223-226.

- Sulter, A.M., Schutte, H.M. & Miller, D.G. (1995) Differences in Phonetogram Features Between Male and Female Subjects With and Without Vocal Training. *J. Voice* 9: 363-377.
- Sundberg, J. (1987) The science of the singing voice. Northern Illinois Univ. Press. Sundberg, J. (1994) Perceptual aspects of singing. *J. Voice* 8: 106-122.
- Svec, J. & Pesak, J. (1994) Vocal breaks from modal to falsetto register. *Folia Phoniatr.* 46: 97-103.
- Tanner, J.M. & Whitehouse, R.H. (1976) Clinical longitudinal standards for height, weight, height velocity and stages of puberty. *Arch. Dis. Child.* 51: 170-9.
- Titze, I.R. (1994) Toward standards in acoustic analysis of voice. *J. Voice* 8: 1-7.
- Tobias, M.L. & Kelley, D.B. (1995) Sexual differentiation and hormonal regulation of the laryngeal synapse in *Xenopus laevis*. *J. Neurobiol.* 28: 515-26.
- Tobias, M.L., Marin, M.L. & Kelley, D.B. (1991) Temporal constraints an androgen directed laryngeal masculinization in *Xenopus laevis*. *Dev. Biol.* 147: 260-70.
- Truuverk, C. & Pedersen, M.F (1992) A pilot study of phonetograms compared with menopausal estrogens and androgens in 4 sopranoes in World Festival Choir. Abstracts XXInd Congr. Int. Ass. Logopedics Phoniatr. *Folia Phoniatr.* 1-2: 85.
- Vilkman, E., Sonninen, A. & Hurme, P. (1986) Observations an voice productions by means of Computer voice profiles. Proc. XXth congr. Int. Ass. Logopedics and Phoniatr, Tokyo: 370-1.
- Vilkman, E. Aiku, P. & Laukkanen, A.-M. (1995) Vocal-fold collision as a differentiator between registers in the low-pitch range. *J. Voice* 9: 66-73.
- Vuorenkoski, V., Lenko, H.L., Tjernlund, P., Vuorenkoski, L. & Perheentupe, J. (1978) Fundamental frequency during normal and abnormal growth, and after androgen treatment. *Arch. Dis. Child.* 53: 201-9.
- Walker, J.M., Williams, D.M., Harries, M., Hacking, J. & Hughes, I.A. (1993) A study of the mechanisms of normal voice maturation in pubertal boys. *Pediatr. Res.* 33, (5 suppl) S 84.
- Weiss, D.A. (1950) The pubertal change of the human voice. *Folia Phoniatr.* 2: 126-59.
- Wendler, J. & Seidner, W. (1987) Entwicklung der Stimme, in Lehrbuch der Phoniatrie. Thieme Verlag: 164-69.
- Wendler, J., Koppen, K. & Fischer, S. (1988) The validity of stroboscopic data in terms of quantitative measuring. *Folia Phoniatr.* 40: 297-302.
- Wendler, J. (1989) Basic equipment for voice diagnosis. Newsletter. Int. Fed. Otorhinolaryngol. Societies. Febr.-March: 3.
- Young, M.C., Robinson, J.A., Read, G.F., Riad-Fahmy, D. & Hughes, I.A. (1988) 170 H-progesterone rythms in congenital adrenal hypoplasia. *Arch. Dis. Child* 63: 617-23.
- Yukizane, S., Yamakawa, R., Murakami, T., Kato, H. & Niikawa, N. (1994) A 15-year-old girl with pubertal masculinization due to bilateral gonadoblastoma and 45, X/46, X, +Mar Karyotype. *Kurume Med. J.* 41: 155-9.



## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

DHEAS	dihydroepiandrosterone sulphate
EGG	electroglottography
E1	estrone
E2	estradiol
E1SO <sub>4</sub>	estrone sulphate
F0	mean fundamental frequency in running speech in a reading situation of a standard text
F0-range	frequency variation in semitones in running speech in a reading situation of a standard text (= voice range)
LTAS	long term averaged spectrogram
Octaves	German discription: C-c-cl-c2-c3, American: C3 = c, C4 = cl, C5 = c2 etc.
SHBG	sex hormone binding globulin
ST	semitone in the octave, defined from the phonetogram
SPL	sound pressure level
Total pitch range	the range from the lowest to the highest semitone in the phonetogram

**ORIGINAL COMMUNICATIONS**

The permission of the following copyright owners to reproduce original articles is gratefully acknowledged:

Karger (Folia Phoniatria, Reports of IALP Conferences)  
Elsevier (Int. J. Pediatric Otorhinolaryngology)  
Blackwell (Clinical Otolaryngology)

## **Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät**

Untersuchungen

Phoniater

Schule

Musikausbildung

Thomaner Chor

Kopenhagener Chor

Mädchen Chöre

Technische Messung

Geschlechter

Dokumentation

Praktische Bedeutung

Gesanglehrer

Pubertäts Stadium

Stimmfeld Messung

Ton Umfang

Dynamik Umfang

Standardisierungs Vorschlag

Gerät

Tonhaltedauer

Electroglottographie

Stroboskopie

Videostroboskopie

Kombination mit Electroglottographie

Schliessungs Phase

Register Übergänge

Geschlechts Abhängigkeit

Muskel Struktur

Neurologische Phänomene

Neurale Netzwerke

Grundfrequenz Analyse

Querschnitt Studien

Longitudinelle Studie

Untersuchungs Rahmen

Portable Computer

Mittelwert der Frequenz im Sprechen

Ton Umfang des Sprechens

Hormon Status

Pädiatrische Pubertäts Analyse

Alter

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

Statistische Analyse  
Korrelations Koeffizienter  
Niedrigste Ton

Stimmfeld Fläche

Testosteron Spiegel  
Mamma Entwicklung  
Hoden Volumen  
Schaum Beharung  
Androgenen  
Östrogenen  
Körper Gewicht

SHBG  
Jährliche Änderung

Grundfrequenz der Sprech Stimme  
Schwingungs Zahl  
Schwingungen der Stimmlippen  
Picomol  
Menarche

Gonadotropin Releasing Hormon  
LH  
FSH

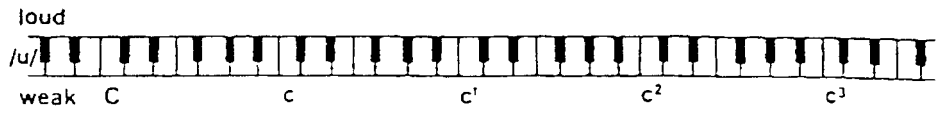
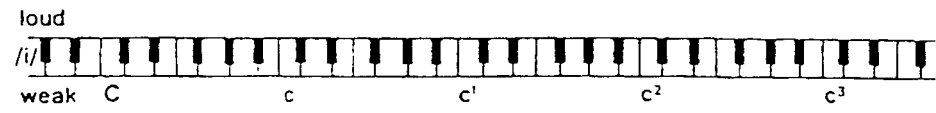
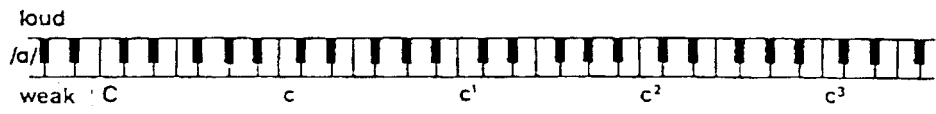
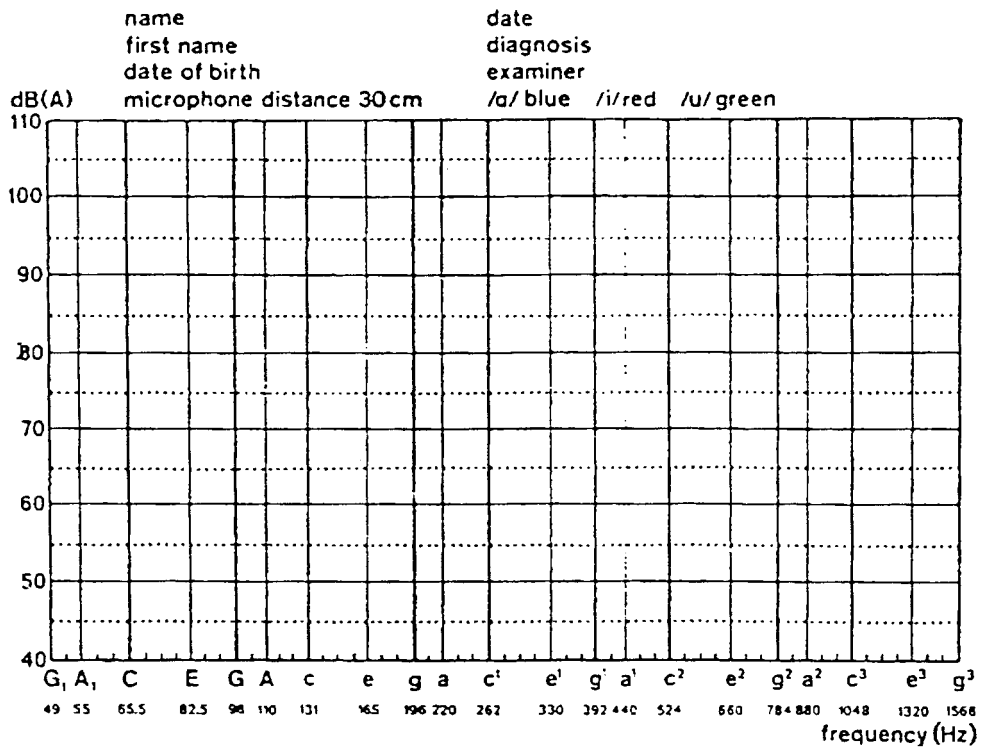
Mutanten  
Sopranen  
Mädchen  
Knaben

## **Beschriftungen der Abbildungen**

## Beschriftungen der Abbildungen

**Abb.1.** Formular für die Stimmfeldmessung entsprechend dem Standardisierungsvorschlag der UEP 1981.

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

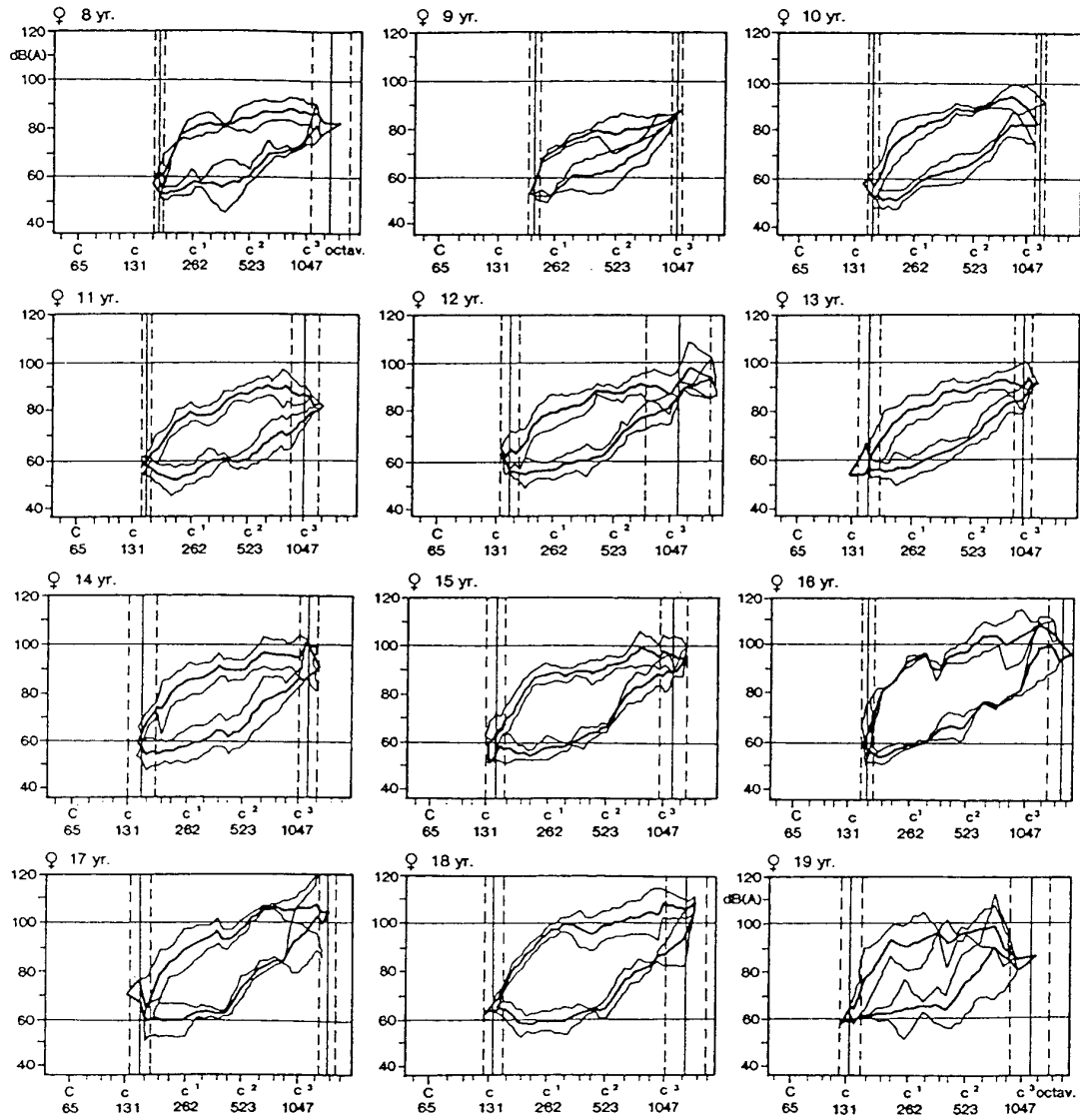


## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.2.** Durchschnittsstimmfelder der Mädchen mit Standardabweichung in Abhängigkeit vom Alter. Die Abszissen sind in Halbtöne gegliedert, die Frequenz in Hertz ist in jeder Oktave vermerkt. Die Ordinate ist in dB(A) eingeteilt.



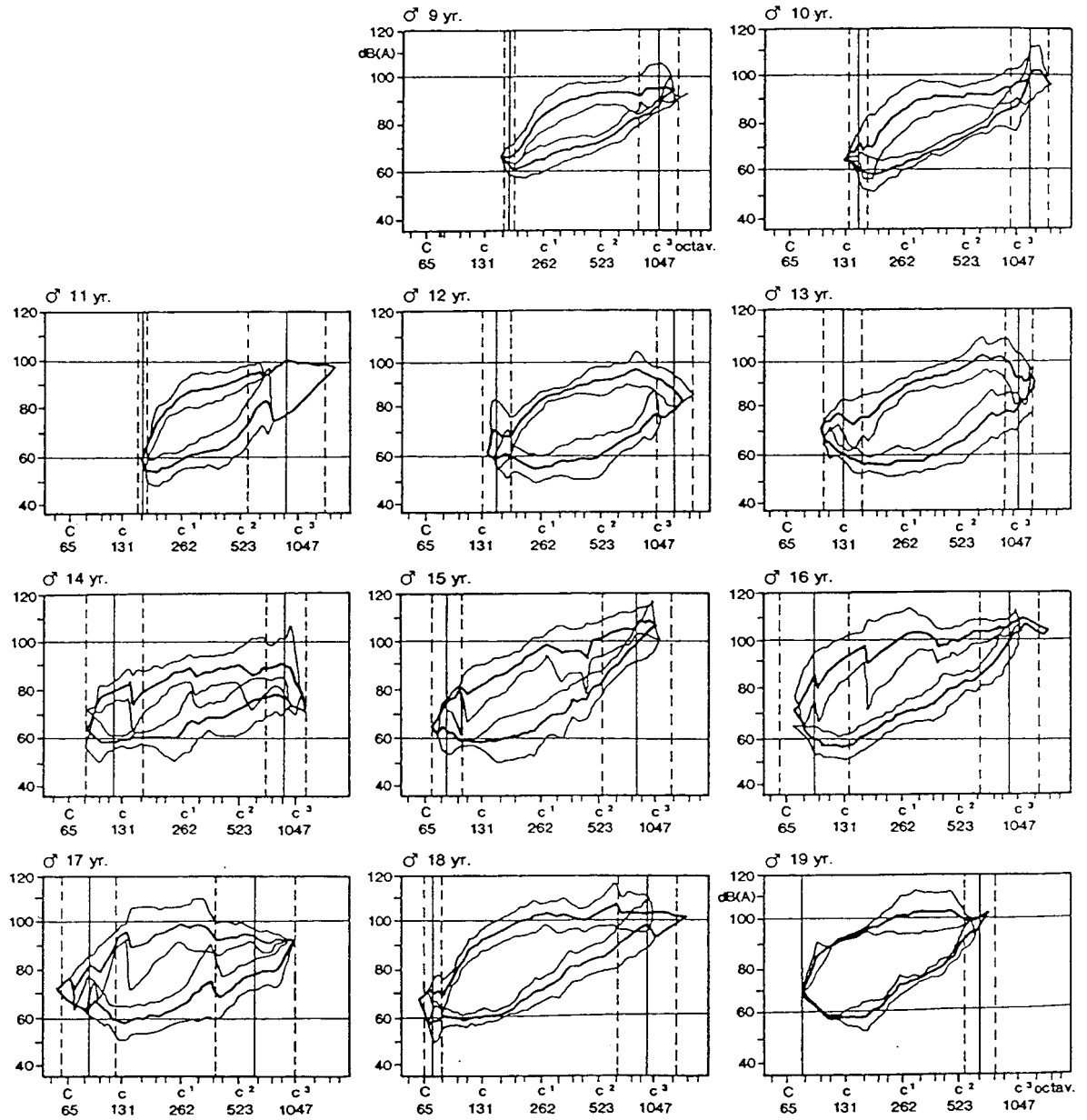
# Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.3.** Durchschnittsstimmfelder der Jungen mit Standardabweichung in Abhängigkeit vom Alter. Die Abszissen sind in Halbtöne gegliedert, die Frequenz in Hertz ist in jeder Oktave vermerkt. Die Ordinate ist in dB(A) eingeteilt.

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb. 4.** Durchschnitte und Standardabweichungen nach Auswertung von Elektrolottogrammen, Vergleich Krankenhausangestellte (unausgebildete Normalstimme) und Musikstudenten (ausgebildete Stimme). Die Quotienten  $a/e$ ,  $a/b$  und  $f/e$  unterscheiden sich bei den Musikstudenten signifikant zu denen der Probanden mit unausgebildeter Stimme (s. Abb.6)

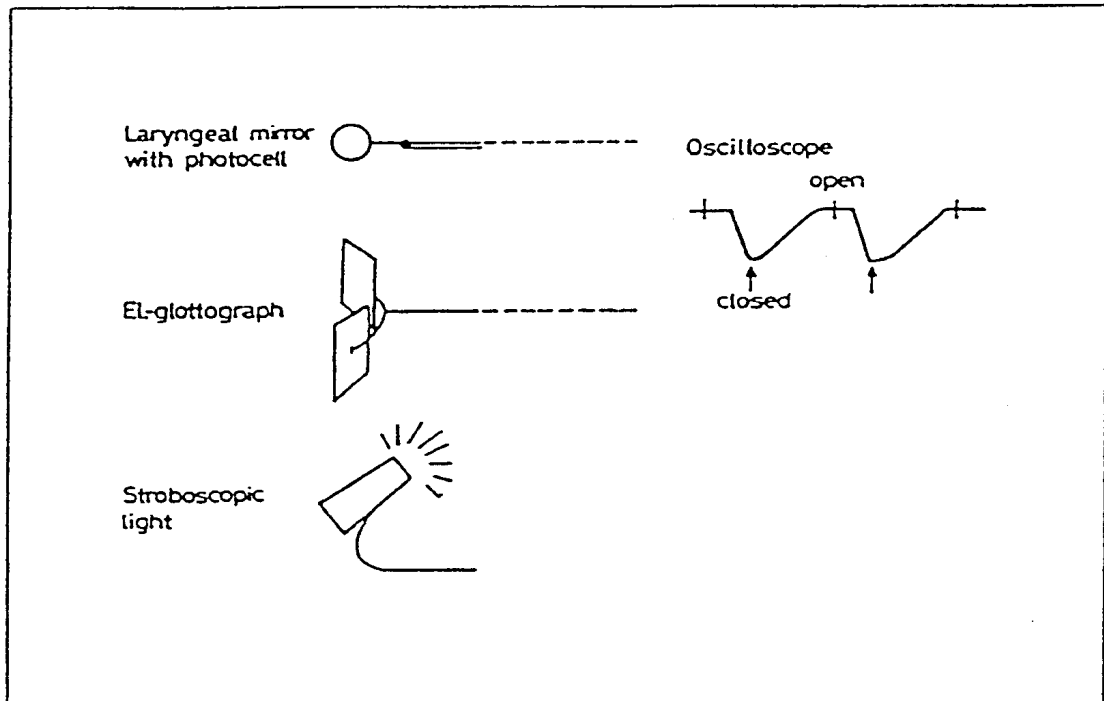
Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

quotients		I 20 hospital employccs	II 26 music students	8 exam. of 4 students
<u>a</u>	av. %	10,5	X 21,2	23,8
<u>e</u>	s	3,88	3,38	4,59
	95% single obs.	2,9—13,1	4,8—37,6	—
	<u>95% of mean</u>	<u>8,7—13,3</u>	<u>17,9—24,5</u>	—
<u>a</u>	av. %	27,2	X 47,6	23,8
<u>b</u>	s	12,54	19,41	13,16
	95% single obs.	13,7—43,9	9,8—35,8	—
	<u>95% of mean</u>	<u>21,3—33,1</u>	<u>40,0—63,8</u>	—
<u>c</u>	av. %	33,8	35,3	40,9
<u>e</u>	s	7,72	10,81	5,54
	95% single obs.	13,7—48,9	6,3—64,3	—
	<u>95% of mean</u>	<u>30,1—48,9</u>	<u>30,9—39,7</u>	—
<u>c</u>	av. %	59,6	59,1	67,3
<u>d</u>	s	13,58	24,33	23,0
	95% single obs.	33,0—36,2	10,4—100	—
	<u>95% of mean</u>	<u>53,2—66,0</u>	<u>49,0—69,1</u>	—
<u>b</u>	av. %	42,6	44,6	33,8
<u>e</u>	s	11,93	3,02	6,1
	95% single obs.	13,8—65,6	29,1—30,5	—
	<u>95% of mean</u>	<u>37,2—43,2</u>	<u>41,6—48,0</u>	—
<u>f</u>	av. %	50,0	X 38,5	34,2
<u>e</u>	s	10,83	10,34	5,12
	95% single obs.	28,8—71,2	diff. 19,4—59,8	—
	<u>95% of mean</u>	<u>44,9—55,1</u>	p < 0.001 <u>39,3—42,7</u>	—

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.5.** Darstellung der Versuchsanordnung: Stroboskop, Larynxspiegel mit Photozelle, Elektrolottograph, Oszilloskop.

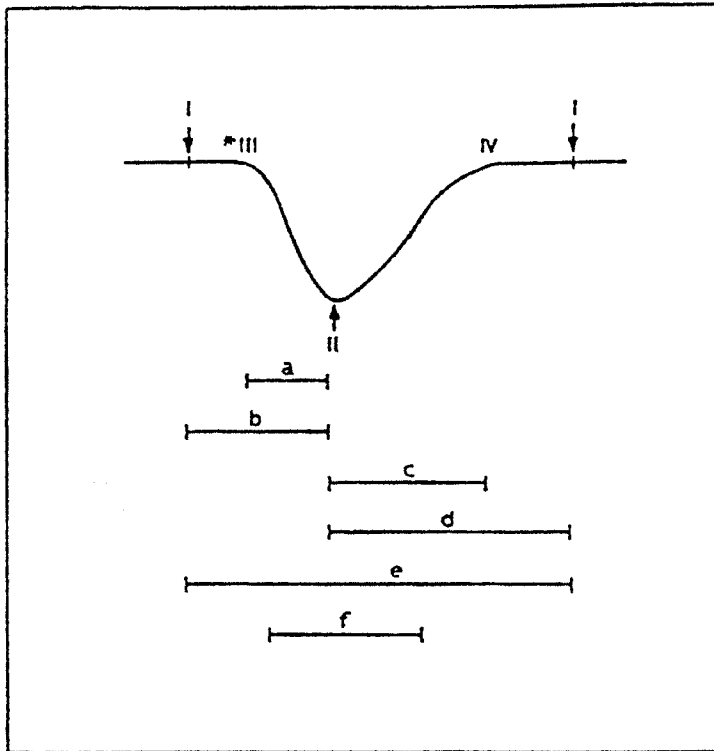
Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.6.** Maximale Glottisöffnung, II: maximaler Glottisschluß (stroboskopisch bestimmt und auf die Elektroglottographie-Kurve übertragen). III und IV stellen die Widerstandsänderungen während des Übergangs zwischen diesen beiden Zuständen dar (s. Abb.4)

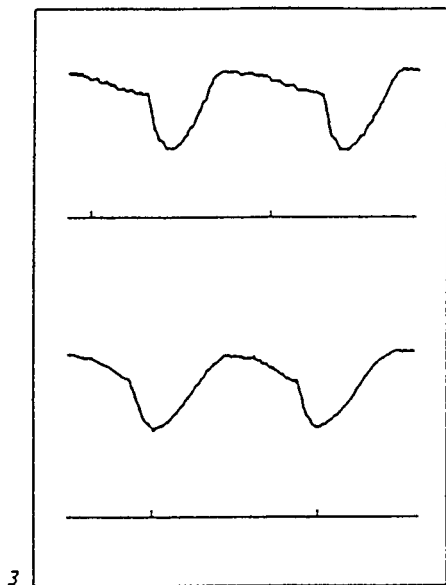


Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

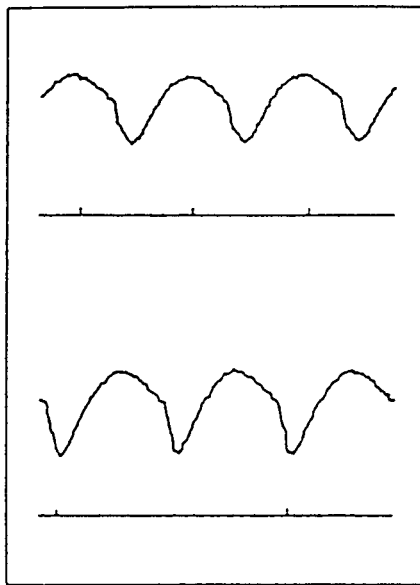


**Abb.7.** Beispiele für Normvarianten der Elektrolottographie-Kurve. Die maximalen Öffnungs- und Schließungsphase wurde stroboskopisch bestimmt und auf der Elektrolottographie-Kurve markiert.

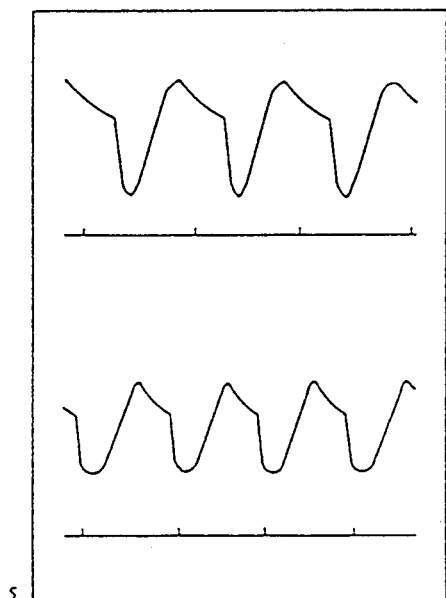
Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



3



4



5

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.8.** Musikalitätsprüfung (Nachsingen von Tönen, Rhythmus-Test nach Wöldike)

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

2. school class

Musical notation for the 2. school class, consisting of four staves of music. The measures are numbered 1 through 24. The notation includes various rhythmic values and accidentals (sharps, flats, and naturals).

7. school class

Musical notation for the 7. school class, consisting of two staves of music. The notation includes various rhythmic values and accidentals.

Wöldiketest

Musical notation for the Wöldiketest, consisting of 13 numbered measures. The notation includes various time signatures (4/4, 6/4, 6/8, 2/4, 5/4, 7/4) and rhythmic patterns.

1 2. school class  
4/4

2 3 6/4

4 5 6/8

6 7 4/4

8 9 6/8 2/4

10 only 4-7 class  
6/8

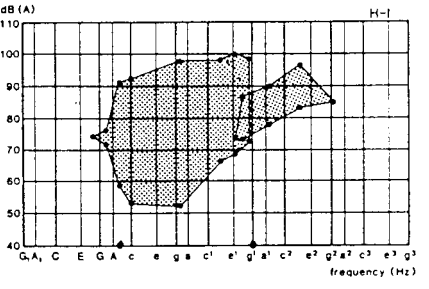
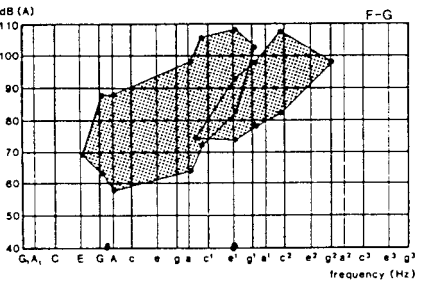
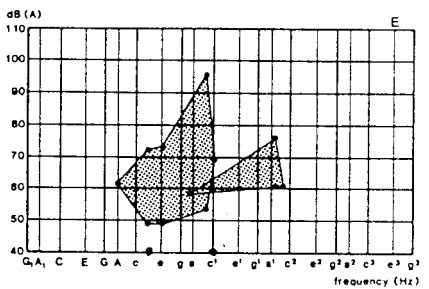
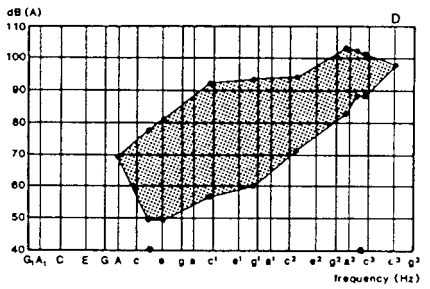
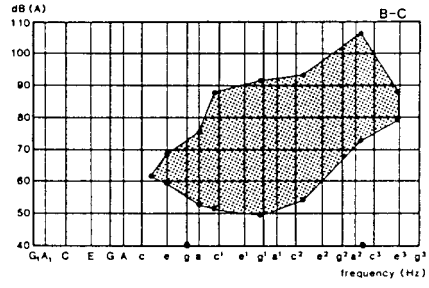
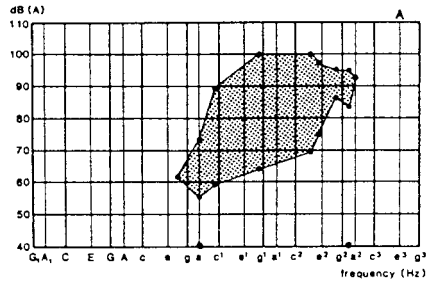
11 only 7. class  
5/4

12 13 7/4

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.9.** Durchschnittsstimmfelder von Knaben und jungen Männern in Abhängigkeit von der Stimmgattung (Stimmgattung vom Gesangslehrer festgelegt). Der Umfang der künstlerisch einsetzbaren Gesangsstimme ist auf der Abszisse markiert. (A: Anfänger, B - C: Sopran, D: Alt, E: Pubertätsstimme, F - G: Tenor, H - I: Baß)

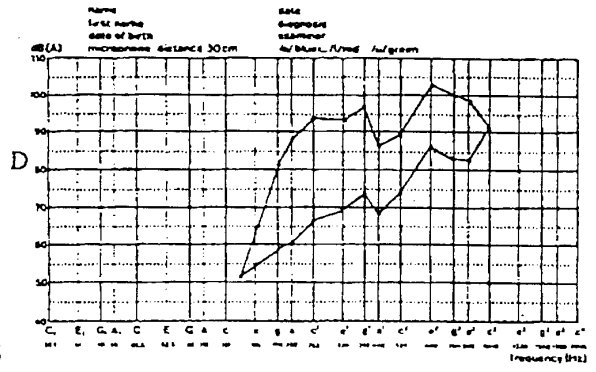
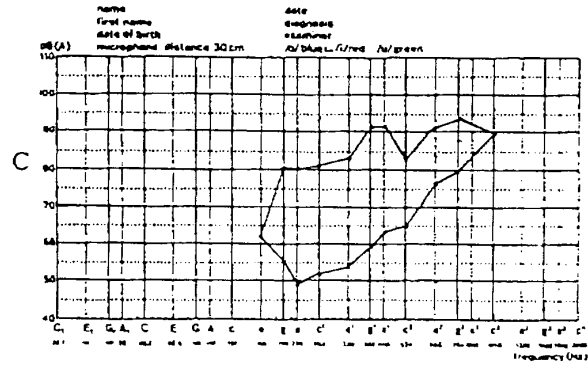
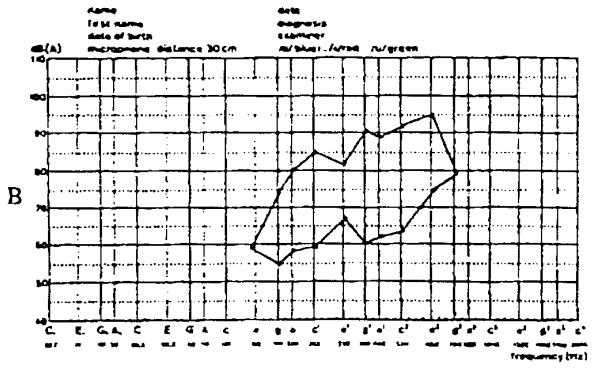
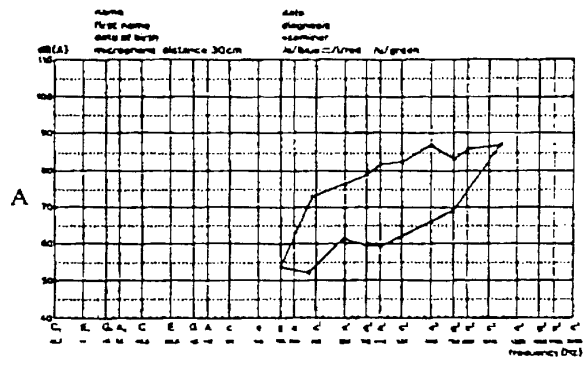
# Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.10.** Stimmfelder von Mädchen verschiedenen Alters. **A** (8,9 J.) - Anfängerin im Chor. **B** (11,7 J.) - Typische Kinderstimme mit Registerübergang bei fis 1 (330 - 392 Hz). **C** (13,8J.) - Gut ausgebildete Stimme ohne meßbare Registerübergänge mit eingeschränkter Dynamikbreite. **D** (14,8 J.) - Pubertätstimme; Registerübergänge bei gis 1 und d2 (durch Gesangslehrer festgestellt)



Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.11.** Vergleich zwischen den männlichen Stimmgattungen bzgl. Stimmfeldfläche, Grundfrequenz der Sprechstimme, Stimmumfang der Gesangsstimme in Halbtönen, SHBG, Stadium der Schambehaarung und freiem Testosteron.

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

Voice category	Voice category group	Number of boys	Age years	Phoneto-gram area cm <sup>2</sup>	Fo/Fo range Hz/semitones	Tone range semitones	SHBG nmol/l	Pubic hair stage	Free testosterone nmol/l
Non-differentiated beginners	I	5	9.1	13.0	286/3.6	30.3	112	1.0 (1)	0.0019
1. Soprano	II	5	11.3	20.6	234/4.3	37.3	123	1.6 (1-2)	0.0254
2. Soprano	III	7	12.0	23.5	266/4.2	35.8	132	2.1 (1-4)	0.0194
Alto	IV	10	12.3	25.2	259/3.4	33.9	130	2.1 (1-4)	0.0210
Puberty	V	4	14.9	23.3	144/5.0	35.2	56	4.3 (3-5)	0.21
1. Tenor	VI	2	18.0	29.2	141/4.7	40.5	46	5.0 (5)	0.42
2. Tenor	VII	6	16.8	34.7	131/5.2	41.1	33	5.2 (3-5)	0.47
1. Bass	VIII	7	17.5	35.2	127/4.8	42.7	42	5.4 (5-6)	0.26
2. Bass	IX	2	16.7	30.0	109/6.2	39.1	48	5.3 (5-5.5)	0.32
Mutual SD within groups (f = 39) in per cent of mean				37	17	17	61		315

**Abb.12.** Geometrische Durchschnitte einiger Stimm- und Hormonparameter von verschiedenen Stimmgattungen der weiblichen Gruppe (8 - 19 Jahre). 1: Kinderstimme 1. Sopran, 2: Kinderstimme 2. Sopran, 3: Kinderstimme Alt, (4: Mutationsstimme (keine Werte)}, 5: Erwachsenenstimme 1. Sopran, 6: Erwachsenenstimme 2. Sopran, 7: Erwachsenenstimme Alt. SD - Standardabweichungen der Durchschnittswerte. Signifikanzberechnung mittels T-Test: Gruppe 1 - 3 gegenüber Gruppe 5 - 7

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

	1	2	3	5	6	7	SD	significancy
Age	11,1	11,6	12,7	15,9	16,4	17,8		
Number	3	11	5	5	6	3		
Weight (KG)	36	40	56	59	60	65		
Mamma stage	1	1-3	2-4	3-5	4-5	4-5		
Phonetogram area (CM2)	16,2	18,0	22,4	24,2	26,1	33,2	32	<0,01
Fundamental frequency in ct. sp. (Hz)	248	261	229	249	253	229	11	NS
Tone range in ct. speech (semitones)	3,74	4,31	3,77	5,41	4,70	4,58	21	<0,01
Tone range in singing (semitones)	33,0	34,2	33,7	35,1	35,7	40,9	10	NS
Phonetogram (Hz)								
lowest tone	185	162	145	167	148	136	12	NS
middle tone	466	432	365	465	391	431	14	<0,05
highest tone	1245	1165	1022	1288	1163	1449	22	NS
E1 (p-mol)	65,6	59,4	75,7	151,5	126,2	126,4	46	<0,001
E1S04 (p-mol)	703	901	1214	2378	2438	2618	115	<0,001
E2 (p-mol)	71,6	79,6	95,1	170,4	101,9	94,0	115	NS
Androsten dione (n-mol)	1,22	1,94	1,75	3,94	3,21	3,61	138	<0,05
DHEAS (n-mol)	4200	3500	2900	4700	5900	7600	68	<0,01
Total testosterone (n-mol)	0,79	0,67	0,46	0,92	0,98	0,70	86	NS

**Abb. 13.** Logarithmische Korrelationskoeffizienten verschiedener Stimm- und Hormonparameter im Verhältnis zu Alter und Stimmfeldfläche.

	Age	Phonetogram area <sup>x)</sup>
<b>Voice parameters</b>		
Total tone range	0.48	0.63
Fo in fluent speech	-0.86	-0.50
Voice range	0.58	0.54
Lowest frequency	-0.87	-0.62
Middle frequency	-0.73	-0.34
<b>Puberty</b>		
Axillary hair stage	0.84	0.58
Pubic hair stage	0.89	0.65
Testis volume	0.87	0.71
Height	0.90	0.64
Weight	0.86	0.60
<b>Hormones</b>		
Total testosterone	0.83	0.72
Free testosterone	0.81	0.69
Dihydrotestosterone	0.81	0.69
Delta-4-androstendione	0.80	0.76
DHEAS	0.83	0.59
SHBG	-0.66	-0.41

x)  $r = 0.66$  age/phonetogram area

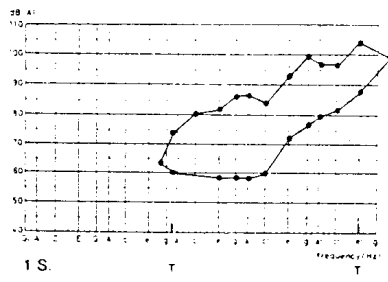
All  $p < 0.01$  except middle frequency/phonetogram area

**Abb.14.** Stimmfelder von Mädchen unterschiedlicher Stimmgattungen. Im oberen Frequenzbereich gibt es größere Intensitätsschwankungen bei den Sopranistinnen, im unteren Frequenzbereich bei den Altistinnen. Der Umfang der künstlerisch einsetzbaren Gesangsstimme ist auf der Abszisse markiert.

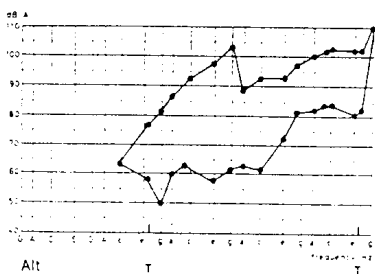
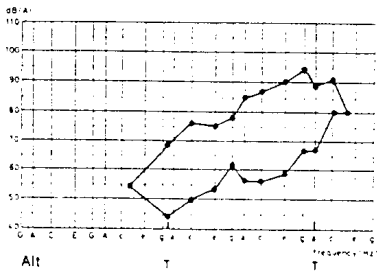
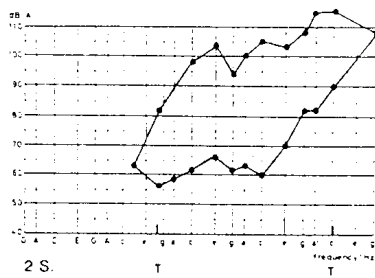
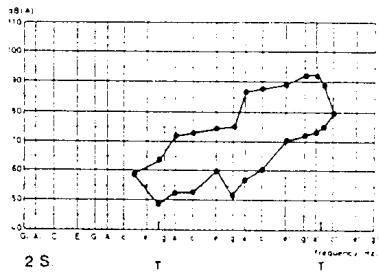
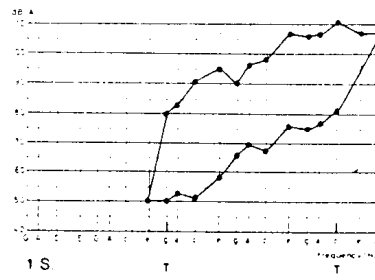


Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

"PRE-PUBERAL"



"POST-PUBERAL"



**Abb.15.** Korrelationskoeffizienten verschiedener Stimm- und Hormonparameter im Verhältnis zu Alter und Stimmfeldfläche bei Mädchen (Alter / Stimmfeldfläche  $r=0,65$ )

Signifikanz:

$p < 0,05$  ( $r \geq 0,30$ ) x

$p < 0,01$  ( $r \geq 0,39$ ) xx

$p < 0,001$  ( $r \geq 0,49$ ) xxx

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

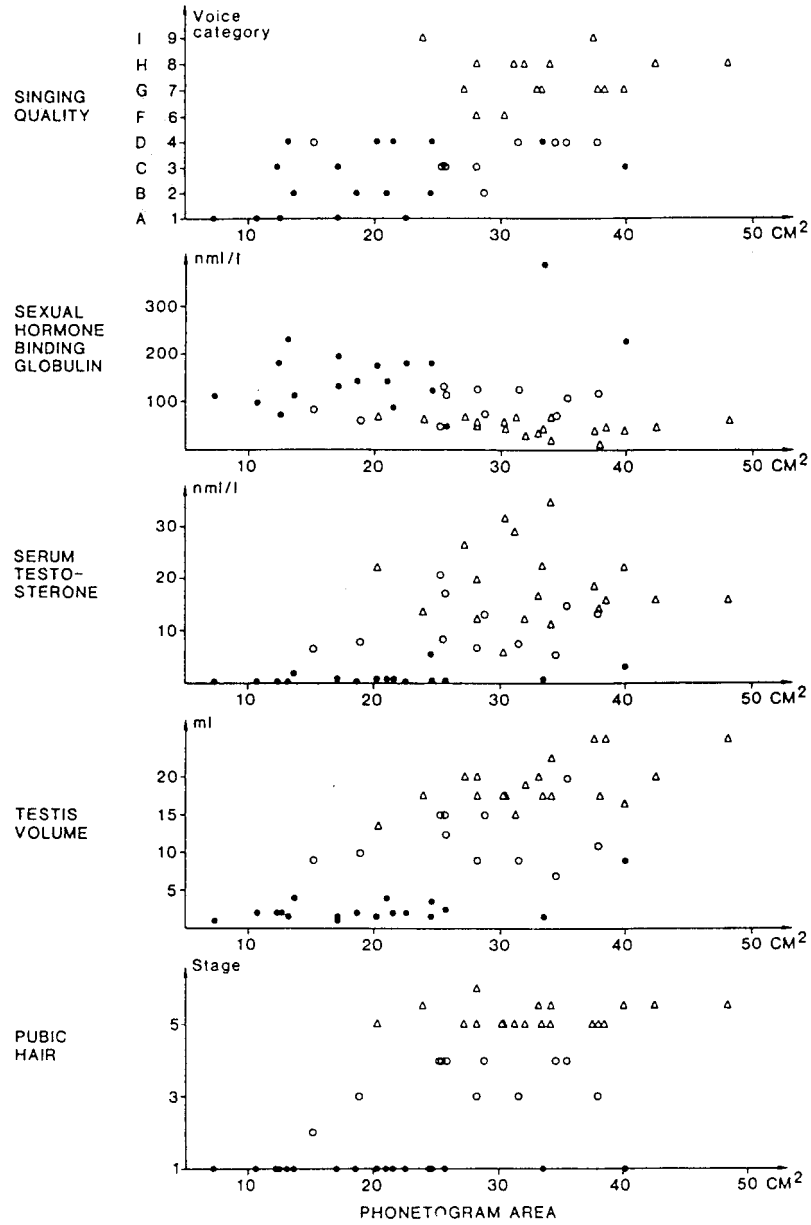
(significance:  $p < 0,05$  ( $r > \text{or} = 0,30$ ):\*  
 $p < 0,01$  ( $r > \text{or} = 0,39$ ):\*\*  
 $p < 0,001$  ( $r > \text{or} = 0,49$ ):\*\*\*

		Age	Phonetographic area
<b>Voice</b>	Total tone range in singing	0,44 **	0,66 ***
	Fundamental frequency in continuous speech	-0,44 **	-0,29
	Tone range in continuous speech	0,59 ***	0,49 ***
	Lowest frequency	-0,57 ***	-0,58 ***
	Middle frequency	-0,30 **	-0,15
	<b>Puberty</b>	Axillary hair stage	0,61 ***
Pubic hair stage		0,76 ***	0,51 ***
Mamma development stage		0,48 **	0,38 *
Menarch, time after		0,52 ***	0,29
Weight		0,69 ***	0,48 **
Height		0,22	0,20
<b>Hormone</b>		Total testosterone	0,49 ***
	Delta-4-androstendione	0,57 ***	0,39 **
	DHEAS	0,66 ***	0,38 *
	Oestrone (E1)	0,74 ***	0,47 **
	Oestradiol (E2)	0,35 *	0,20
	Oestrone sulphate (E1SO4)	0,69 ***	0,44 **

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.16.** Graphische Darstellung des Stadiums der Schambehaarung, des Hodenvolumen, des Serum-Testosteron-Spiegels (total), des SHBG und der Stimmgattungen (A - I, s. Abb.9) bei Jungen in Abhängigkeit zur Stimmfeldfläche (Abszisse) **o** 8,7 - 12,9 Jahre. **○** 13 - 15,9 Jahre. **∩** 16 - 19,5 Jahre.

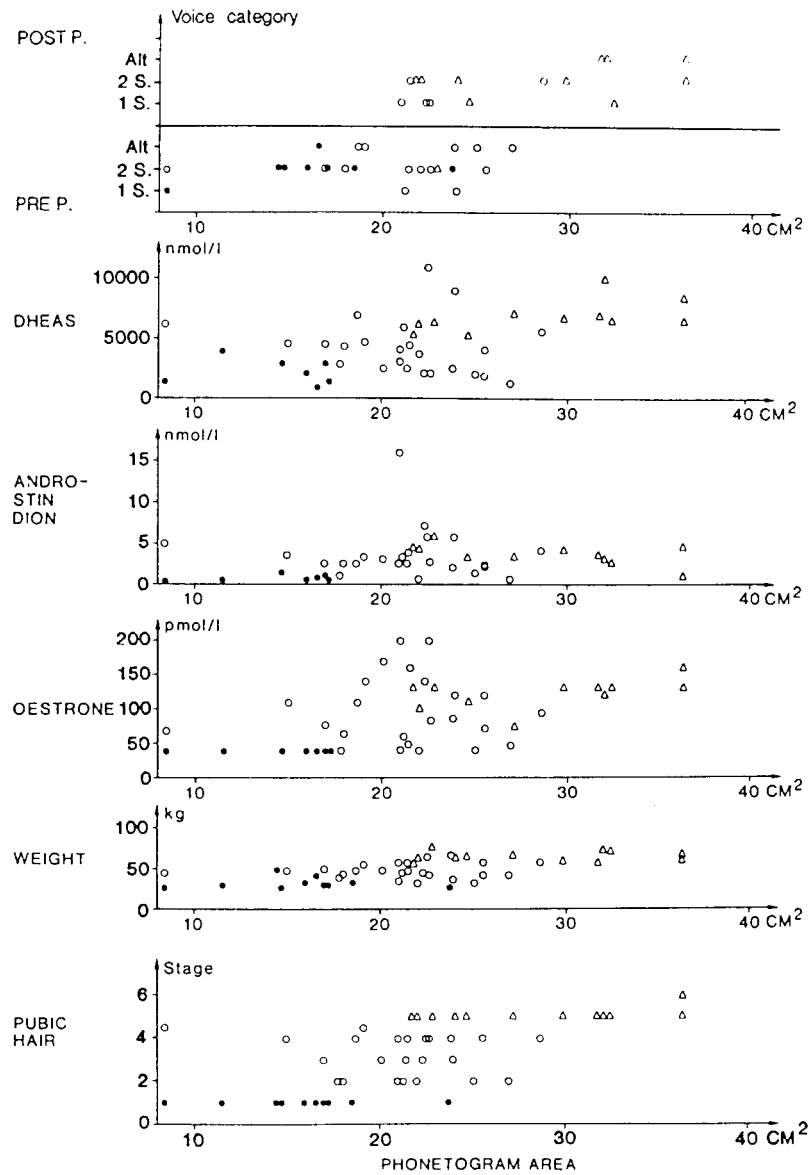
# Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.17.** Graphische Darstellung der Parameter mit der höchsten Korrelation zur Stimmfeldfläche ( $1\text{cm}^2 = 32 \text{ HT} \times \text{dB(A)}$ ) bei Mädchen

- o Mammaentwicklung Stadium 1
- O Mammaentwicklung Stadium 2 - 4
- /-\ Mammaentwicklung Stadium 5 – 6

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.18.** Geometrische Durchschnitte einiger Hormon-, Pubertäts- und Stimmparameter bei Jungen (eingeteilt nach Altersgruppe) und jährliche Änderung der Parameter in %



Age	(years)	8.7-12.9	13.0-15.9	16.0-19.5	Pr yr % change
No of boys		19	15	14	
Serum testosterone	(nmol/l)	0.54	10.5	18.9	68
Dihydrotestosterone	(nmol/l)	0.18	1.21	1.57	37
Free testosterone	(nmol/l)	0.007	0.14	0.33	77
Sexual hormone Binding globulin	(nmol/l)	134	66	45	-16
Delta 4 androstene Dione	(nmol/l)	0.59	1.7	2.5	24
Dehydro epi andro Sterone sulfate	(nmol/l)	1400	4100	5900	25
Testis volume	(ml)	2.3	13	20	36
Fundamental frequency (Hz)		273	184	125	-11
Voice range	(semitones)	3.7	4.8	5.0	3.9
Phonetogram area	(cm <sup>2</sup> )	19	28	34	9.2
Lowest biological tone	(Hz)	158	104	72	-12

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

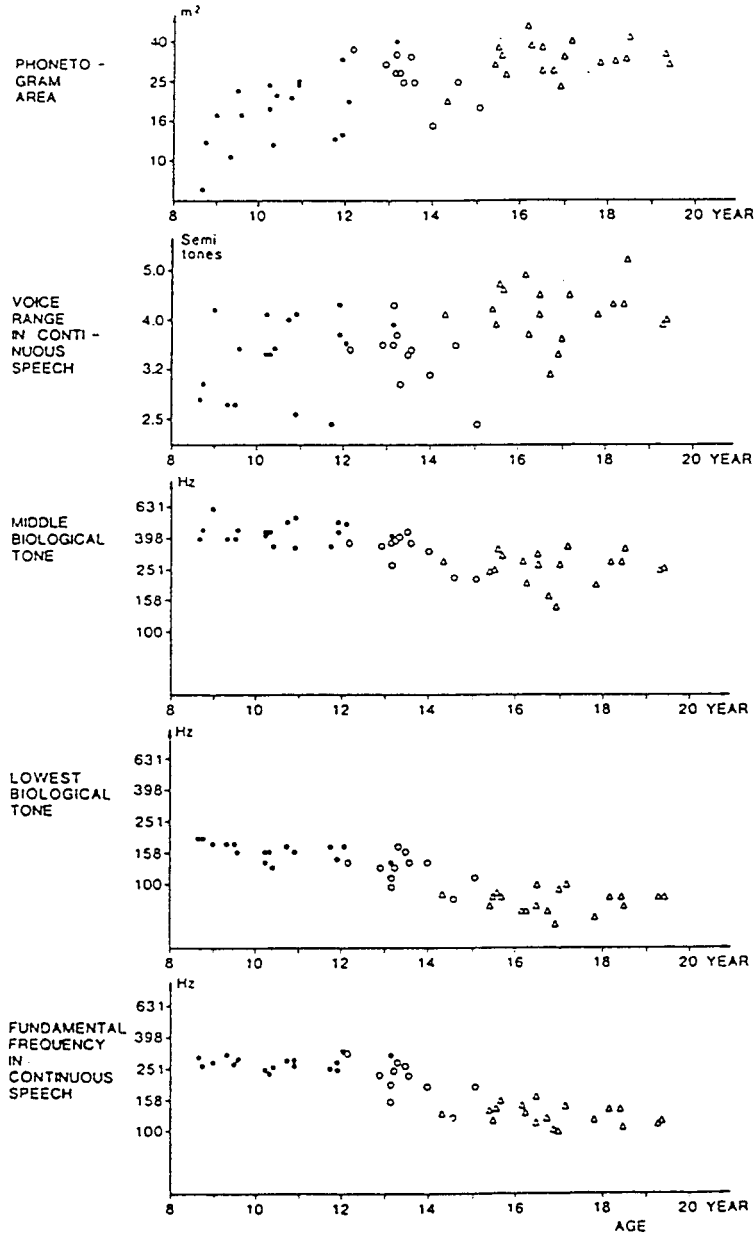
**Abb.19.** Graphische Darstellung der Stimmfeldfläche, des Tonumfangs der Sprechstimme, des niedrigsten und mittleren Tones des Stimmfeldes und der Grundfrequenz der Sprechstimme bei Jungen in Abhängigkeit vom Alter (Abszisse)

o 8,7 -12,9 Jahre

o 13 - 15,9 Jahre

o 16 - 19,5 Jahre

# Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

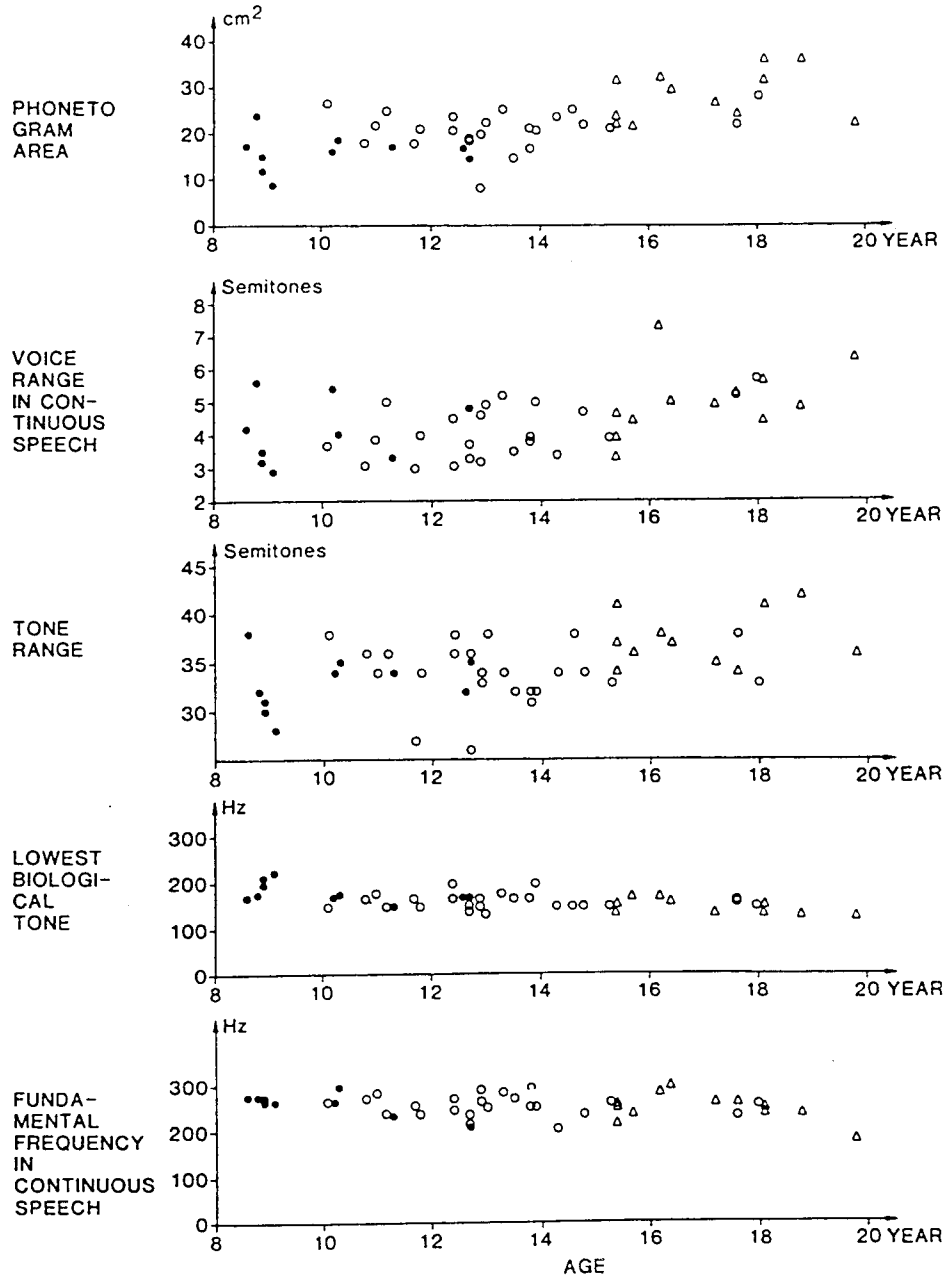


## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.20.** Graphische Darstellung von Stimmparametern (Stimmfeldfläche, Tonumfang der Sprechstimme, Tonumfang der Singstimme, niedrigster Ton des Stimmfeldes, Grundfrequenz der Sprechstimme) bei Mädchen in Abhängigkeit vom Alter (Abszisse)

- o Mammaentwicklung Stadium 1
- O Mammaentwicklung Stadium 2 - 4
- /-\ Mammaentwicklung Stadium 5 - 6

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.21.** Geometrische Durchschnitte einiger Hormon-, Pubertäts- und Stimmparameter bei Mädchen (eingeteilt nach Altersgruppe). Die relativen Standardabweichung lag zwischen 11 und 140% (Signifikanz der Unterschiede zwischen den Gruppen:

$p < 0,01$  xx;  $p < 0,05$  x)

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

The relative standard deviations were between 11 and 140% (significance of difference between groups: \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ ).

		<i>Age (years)</i>			<i>Signifi- cance</i>
		<i>8.6-12.9</i>	<i>13-15.9</i>	<i>16-19.8</i>	
Total number		18	12	11	
Oestrone (E1)	pmol	57	104	123	**
Oestradiol (E2)	pmol	73	135	108	
Total testosterone	nmol	0.5	0.76	0.94	
Free testosterone	nmol	0.006	0.037	0.009	
Oestrone sulphate (E1SO <sub>4</sub> )	pmol	732	1924	2342	**
DHEAS	nmol	3210	3700	7200	**
Androstendione	nmol	1.44	3.28	3.43	*
Sex hormone binding globulin (SHBG)	nmol	153	130	123	
Menarche		+4	+9	+11	
Pubic hair stage		1-4	2-5	4-6	
Mamma development stage		1-4	2-5	5	
Height		144.5	159.7	165.1	
Weight		37.8	53.0	64.4	
Fundamental frequency in continuous speech	Hz	256	248	241	
Tone range in continuous speech	+	3.7	4.2	5.2	**
Tone range in singing	+	23	30	38	**
Phonetographic area	++	17.3	21.8	28.3	**
Phonetogram lowest tone	Hz	166	156	145	*
Phonetogram middle tone	Hz	429	409	413	
Phonetogram highest tone	Hz	1136	1105	1263	

+, measured in semitones, ++, cm<sup>2</sup> conversion factor: 1 cm<sup>2</sup> = 32 semitones × dB(A).

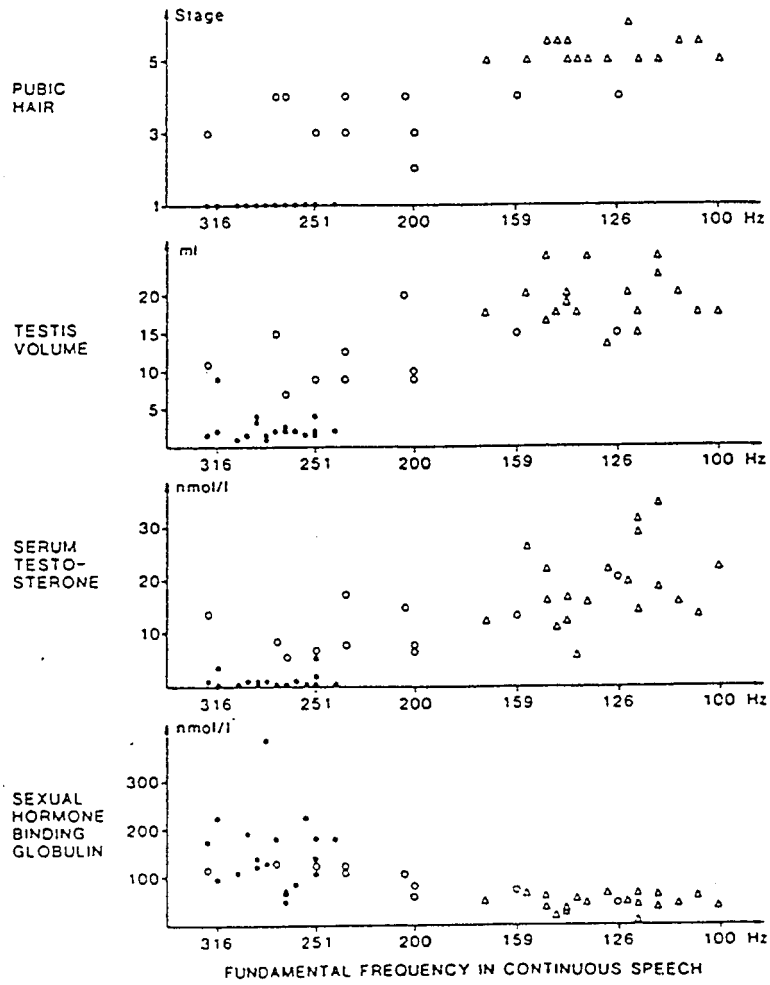
## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb 22.** Graphische Darstellung des Stadiums der Schambehaarung, des Hodenvolumens, des Serum-Testosteron (total) und des SHBG bei Jungen in Abhängigkeit von der Grundfrequenz der Sprechstimme (Abszisse)

- o 8,7 - 12,9 Jahre
- O 13 - 15,9 Jahre
- /-\ 16 - 19,5 Jahre



Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



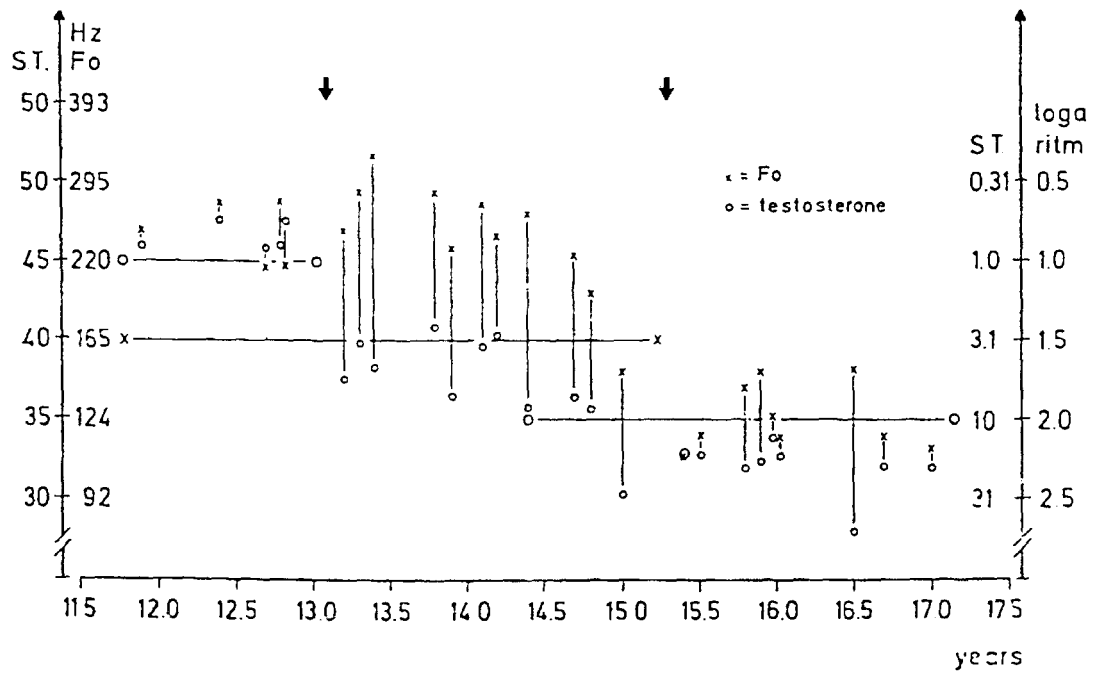
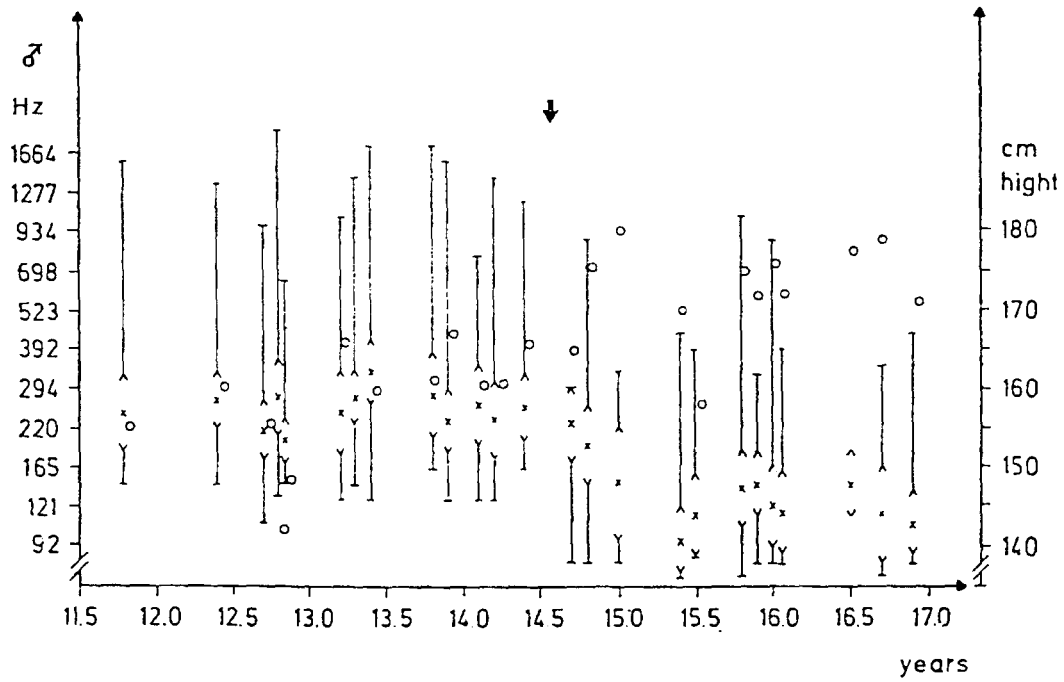
## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.23.** Oben: Grundfrequenz der Sprechstimme, Tonumfang der Sprechstimme und Tonumfang der Singstimme bei Jungen im Verhältnis zur Körpergröße (Ordinate) und zum Alter (Abszisse).

Unten: Grundfrequenz der Sprechstimme [Hz] im Vergleich zum Serum-Testosteron-Spiegel [nmol/l]. Die Abszisse zeigt das Alter in Jahren.

Die Pfeile markieren die Mutation (oben: Ende der Mutation; unten Beginn und Ende der Mutation)

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.24.** Registerübergänge bei Jungen, Gruppeneinteilung nach Serum-Testosteron-Spiegel (I: < 1 nmol/l; II: < 10 nmol/l; III: > 10 nmol/l). Der Tonumfang der Singstimme wird hier einmal als biologischer Tonumfang und einmal als künstlerisch einsetzbarer Tonumfang angegeben; die Differenz zwischen beiden wurde berechnet.

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

♂	'Biological tonerange'		Training situation			Difference biol.–music. tonerange	
	X/SD	X/SD	X/SD	Lower (reg) X/SD	Higher X/SD	X/SD	X/SD
Group I < 1 nMol*	136.4 (20.5)	1302.0 (690.06)	190.40 (22.46)	627.67*** (216.5)	990.50 (208.5)	54.0 (24.3)	495.33 (767.25)
Group II < 10 nMol*	124.17 (31.0)	1223.30 (893.01)	174.78 (44.22)	649.86*** (154.7)	990.0 (276.2)	46.51 (28.8)	534.12 (838.6)
Group III > 10 nMol*	79.74** (5.4)	471.22 (287.44)	86.02** (12.97)	321.56** (70.4)	723.57 (366.12)	6.08 (10.90)	263.33 (**)

- \* Serumtestosterone
- \*\* one pupil could not sing
- \*\*\* group 1:3 pupils, group 11:7 pupils.

**Abb.25.** Koeffizient zwischen Grundfrequenz der Sprechstimme und Alter, Hormonparametern und Pubertätsstadium errechnet im Rahmen einer multiplen Regressionsanalyse. Unabhängige Parameter sind nicht mit dargestellt.

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

Number of boys	Stage of puberty	Geometrical mean values			Coefficient	
		$\bar{x}$ F <sub>0</sub> Hz	age	$\bar{x}$ SHBG nmol	age	log SHBG
18	1	274	10.5	141	0.0002	0.010
11	2-4	219	13.5	91	-0.0016	0.501*
19	5-6	129	16.9	42	-0.0014	0.005
48	total				-0.0033*	0.171*

Mean values of the remaining parameters according to grouping.  
 \* Coefficient is significantly different from zero ( $p < 0.05$ ).

**Abb.26.** Korrelationskoeffizienten  $R$  zwischen Grundfrequenz der Sprechstimme und Tonumfang der Sprechstimme bei Mädchen im Verhältnis zu weiblichen Geschlechtshormonen, Androgenen, Stadium der Schambehaarung, Stadium der Mammaentwicklung und Stimmparametern. Außerdem Darstellung der Korrelation zwischen niedrigstem Ton des Stimmfeldes und Alter. (Signifikanz:  $p < 0,01$  xx;  $p < 0,05$  x)



Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

The correlations to the lowest tone in the phonetogram and age are also shown. (Significance: \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ .)

	<i>Fo</i>	<i>/Fo tone range</i>	<i>Lowest tone</i>	<i>Age</i>
Oestrone (E1)	-0.34 *	/0.40 **	-0.35 *	0.74 **
Oestradiol (E2)	-0.21	/0.10	-0.18	0.35 *
Total testosterone	-0.08	/0.36 *	-0.34 *	0.49 **
Free testosterone	-0.17	/0.27	-0.40 **	0.52 **
Oestrone sulphate (E1SO <sub>4</sub> )	-0.18	/0.32 *	-0.29	0.69 **
DHEAS	-0.17	/0.40 **	-0.24	0.66 **
Androstenedione	-0.19	/0.30	-0.35	0.57 **
Sex hormone binding globulin (SHBG)	0.06	/0.05	-0.14	0.30
Menarche time after beginning	-0.06	/0.33 *	-0.14	0.52 **
Pubic hair stage	-0.19	/0.53 **	-0.46 **	0.76 **
Mamma development stage	-0.08	/0.37 *	-0.34 *	0.48 **
Height	0.06	/0.26	-0.15	0.22
Weight	-0.22	/0.51 **	-0.44 **	0.69 **
Fo in continuous speech	-	-	0.51 **	-0.40 **
Tone range in continuous speech	-0.07	-	-0.28	0.59 **
Tone range in singing	-0.19	/0.45 **	-0.46 **	0.44 **
Phonetographic area	-0.29	/0.49 **	-0.58 **	0.65 **
Phonetogram lowest tone	0.51 **	/-0.28	-	-0.57 **
Phonetogram middle tone	0.45 **	/0.05	0.71 **	-0.30
Phonetogram highest tone	0.14	/0.33 *	0.18	0.08

**Abb.27.** Ausgewählte Parameter und ihre Korrelation zur Grundfrequenz der Sprechstimme bei Mädchen, berechnet für alle Probanden und unterteilt in 2 Gruppen (vor und nach der Menarche).  
Linearer Korrelationskoeffizient SHBG zur Menarche:  $r = 0,93$

Signifikanz:

$P < 0,05$  x  
 $p < 0,01$  xx  
 $p < 0,001$  xxx

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

Linear correlation coefficient SHBG,  $r = -0.93$  to menarche. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$ .

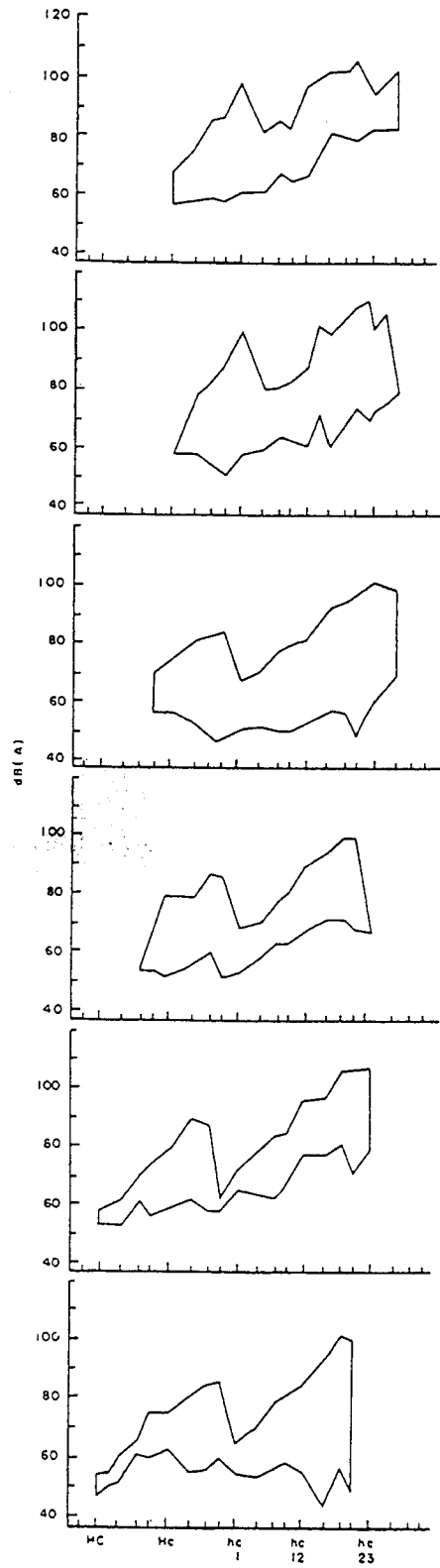
<i>All girls</i>		<i>Pre-menarche</i>		<i>Post-menarche</i>	
<i>Variable</i>	<i>P-value of t-test</i>	<i>Variable</i>	<i>P-value of t-test</i>	<i>Variable</i>	<i>P-value of t-test</i>
Weight	0.066	Height	<u>0.001</u> ***	Age	<u>0.033</u> *
Log (tone range in speech)	<u>0.042</u> *	Pubic hair (stage)	0.022 *	time after menarche	<u>0.008</u> **
Log (E1)	0.054	Log(E1SO <sub>4</sub> )	<u>0.001</u> ***	Log(tone range in speech)	<u>0.001</u> ***
Log (E1SO <sub>4</sub> )	<u>0.043</u> *			Log(androst)	0.068
S.E. of estimation	0.034	0.0166	0.0288		
S.D. of log	0.037	0.0300	0.0409		
<i>F-test</i>					
<i>P-value</i>	0.0443	0.0006	0.0036		

## Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

**Abb.28.** 6 Stimmfelder, gemessen im Abstand von je 2 Monaten bei einem Jungen (Alter 13,7 - 14,6 Jahre) Das 3. Stimmfeld (Dezember) wies die größte Fläche auf und zeigte die geringsten Unregelmäßigkeiten. Im Januar wurde der Junge wegen des Einsetzens der Mutation vorübergehend vom Chorgesang suspendiert.

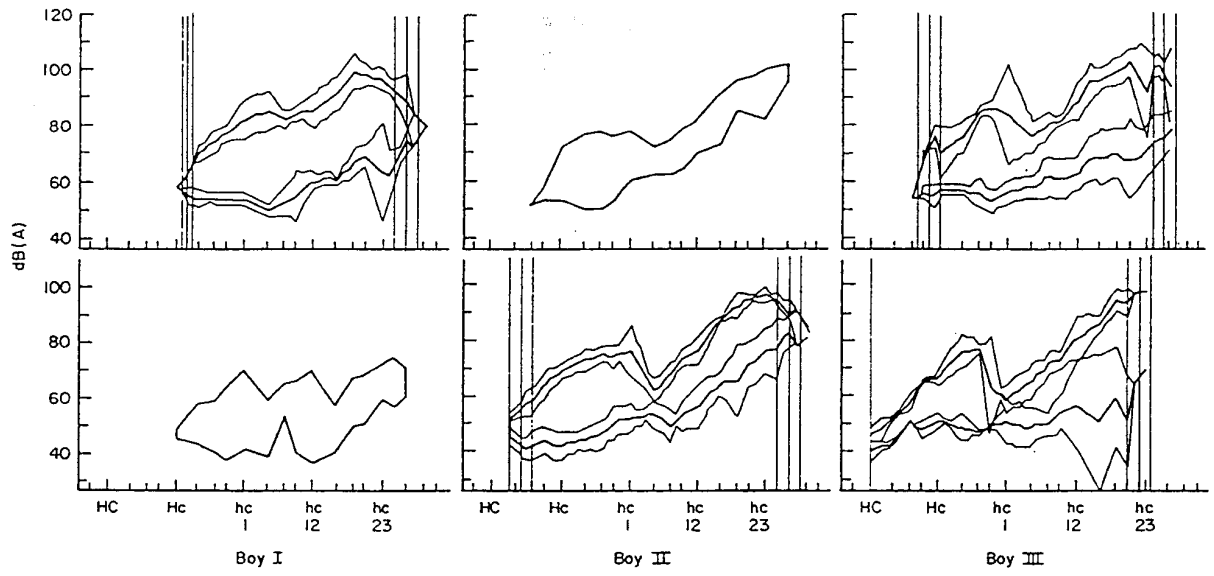
(c1 = 262 Hz)

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.29.** Durchschnittsstimmfelder und Standardabweichungen der 3 Chorknaben (I- III) der Längsschnittstudie. Es wurden die Stimmfelder vor und während der Mutation verglichen. Bei Proband I und II konnte nur jeweils 1 Stimmfeld vor bzw. während der Mutation gemessen werden. Bei Proband III wurden 3 Stimmfelder vor und 3 während der Mutation gemessen.

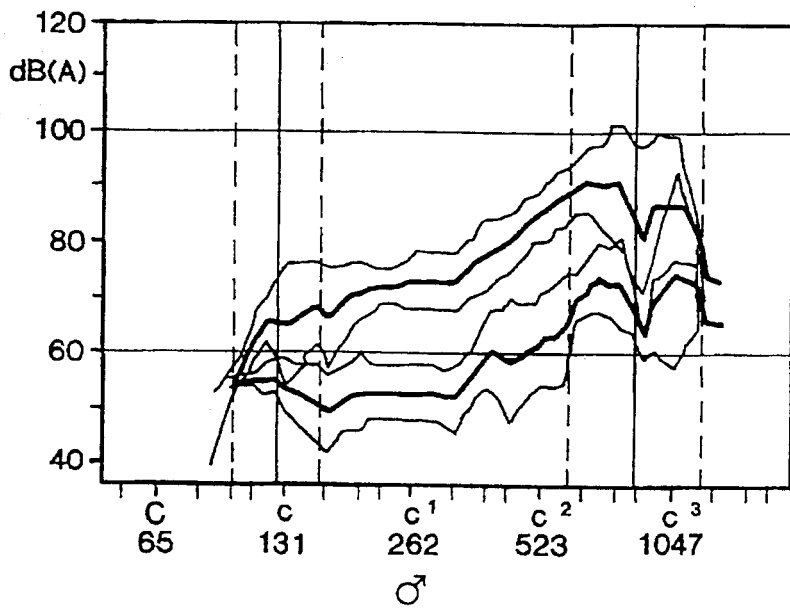
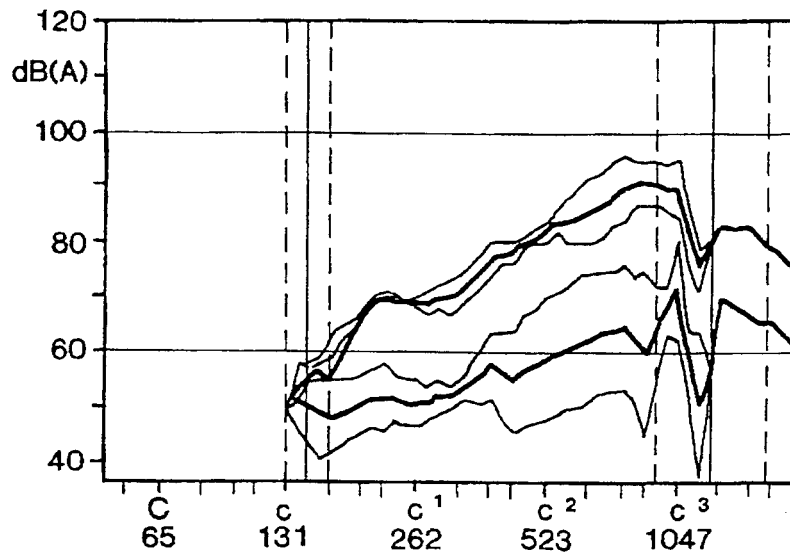
Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.30.** Durchschnittsstimmfelder mit Standardabweichung der Gruppe der Soprane und der Mutanten des Thomanerchoers Leipzig. Die Hormonparameter waren mit denen der Kopenhagener Knaben vergleichbar.

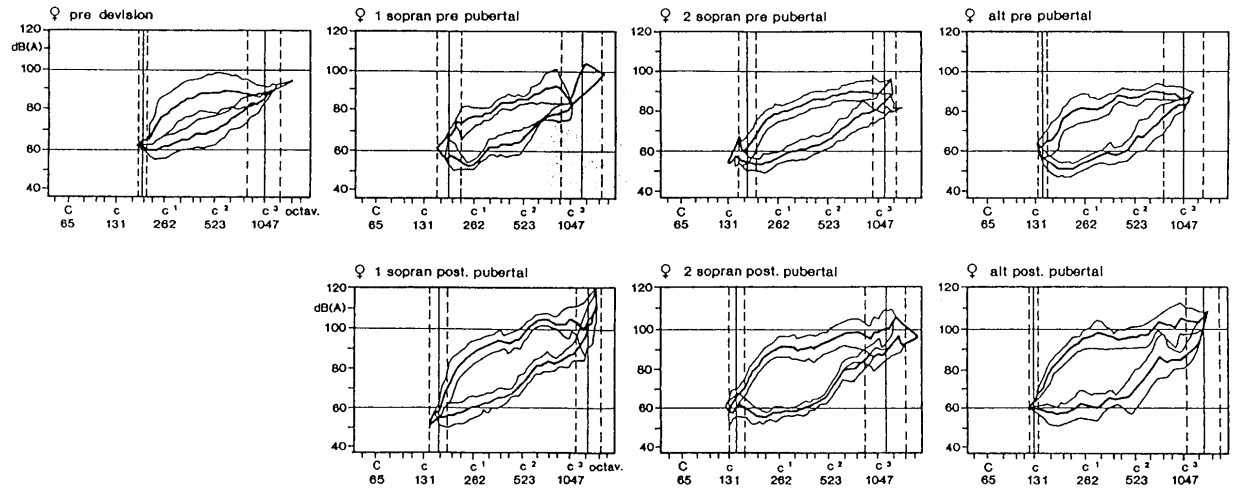


Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



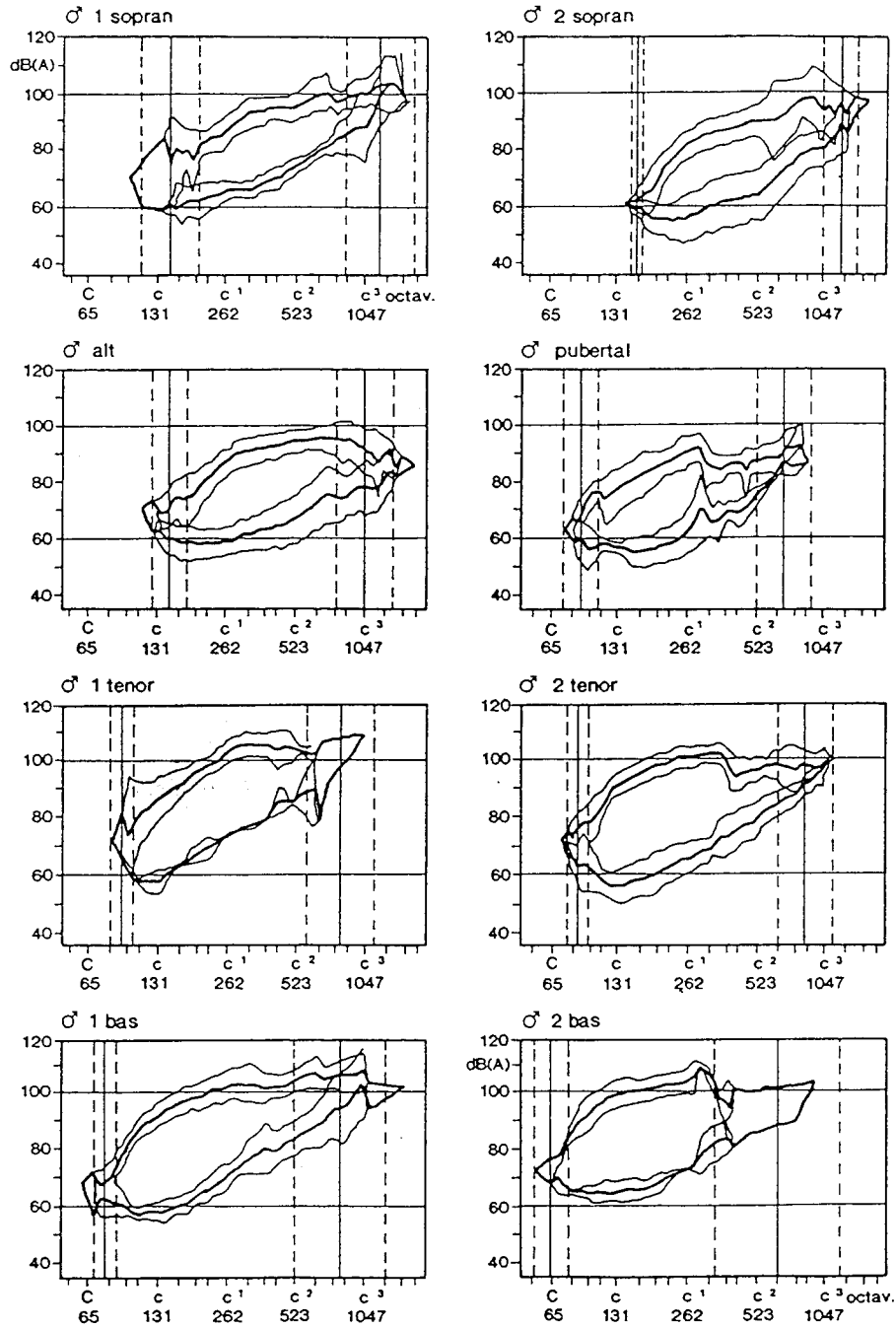
**Abb.31.** Durchschnittsstimmfelder mit Standardabweichung von Mädchen und jungen Frauen eines Mädchenchores einer dänischen Chorschule in Abhängigkeit von der Stimmgattung (Stimmgattung vom Gesangslehrer festgelegt). Die Abszissen sind in Halbtöne gegliedert, die Frequenz in Hertz ist in jeder Oktave vermerkt. Die Ordinate ist in dB(A) eingeteilt. Eine Gruppe während der Pubertät konnte nicht ermittelt werden.

# Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.32.** Durchschnittsstimmfelder mit Standardabweichung von Knaben und jungen Männern eines Chores einer dänischen Chorschule in Abhängigkeit von der Stimmgattung (Stimmgattung vom Gesangslehrer festgelegt). Die Abszissen sind in Halbtöne gegliedert, die Frequenz in Hertz ist in jeder Oktave vermerkt. Die Ordinate ist in dB(A) eingeteilt. Hier konnte auch eine Gruppe während der Pubertät ermittelt werden.

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät



**Abb.33.** Vergleich von Tonumfang der Singstimme, des niedrigsten Tones des Stimmfeldes, der Stimmfeldfläche und der Grundfrequenz der Sprechstimme zwischen den Geschlechtern ( $1 \text{ cm}^2 = 32 \text{ HT} \times \text{dB(A)}$ )

Die biologische Entwicklung der Stimme in der Pubertät

