Ergebnisse von Kehlkopfaufnahmen mit einer Zeitdehnerapparatur

Autor(en): **Luchsinger, R. / Pfister, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie Suisse des Sciences Medicales = Bollettino dell' Accademia Svizzera delle Scienze Mediche**

Band (Jahr): **15 (1959)**

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-307410

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

D. K.: 616.22:784.9

Ergebnisse von Kehlkopfaufnahmen mit einer Zeitdehnerapparatur[1]

Von R. Luchsinger und K. Pfister, Zürich[2]

1. Einleitung

Mit hoher Bildfrequenz aufgenommene kinematographische Filme gewinnen für die Analyse der Stimmlippenschwingungen steigende Beachtung. Die ersten einfachen kinematographischen Aufnahmen der Stimmlippen stammen von *Chevroton* und *Vlès*, die in der Sitzung vom 25. März 1913 der Académie des Sciences einen Bericht über ihr Vorgehen gaben. Einige Tage später veröffentlichten *Hegner* und *Panconcelli-Calzia* ihre Strobokinematographien der Stimmlippenschwingungen. Es sind die ersten Aufnahmen dieser Art.

Der stroboskopische Effekt kann auch durch die bloße Kinematographie erreicht werden, wenn die Bildfrequenz angenähert ein ganzzahliges Vielfaches der Tonfrequenz beträgt. Unter der dauernden Verbesserung der kinematographischen Technik gelang es *Farnsworth* u. Mitarb. (Bell Telephon and Co., 1938) Filmaufnahmen herzustellen, die zum erstenmal bei einer Bildfrequenz bis 4000 Bildern pro Sekunde ein bewundernswert genaues Studium der Stimmlippenbewegungen während der Phonation gestatten. *P. H. Holinger* und *J. D. Brubaker* (1947) haben ebenfalls wertvolle Filme der Bewegungsvorgänge in den oberen Luftwegen und der Speiseröhre aufgenommen, jedoch endoskopisch, was für unsere Fragestellung außer Betracht fällt.

Wenn im Folgenden über neue Zeitdehneraufnahmen berichtet wird, so geschieht dies in erster Linie aus der Absicht heraus, mittels neuartiger Methodik die Zusammenhänge zwischen Tonhöhe und Intensität der Stimme in einem bestimmten Bereich festzuhalten. Für unsere Untersuchungen wurden zusätzlich andere Methoden (Atemvolumenmessungen pro Sekunde, Stroboskopie, elektroakustische Analyse) bei als gut erkannten Sängern herangezogen, um physiologische Grundlagen zu gewinnen.

Auf Grund der von *K. Pfister* (Photographisches Institut der ETH,

[1] Die Arbeit konnte mit finanzieller Unterstützung der Schweiz. Akademie der medizinischen Wissenschaften ausgeführt werden, wofür wir an dieser Stelle bestens danken.

[2] Prof. Dr. *H. Loebell* zu seinem 65. Geburtstag gewidmet.

Zürich) aufgenommenen Kehlkopffilme (Zeitdehneraufnahmen mit einer Fastaxapparatur), wobei die Stimmlippenschwingungen auf ca. 5000 Bildern pro Sekunde zur Darstellung kamen, wurde die Frage der Öffnungs- und Schließungsphase erneut geprüft. Es handelte sich um die Stimme einer geschulten Sopranistin (M. L.), die während der Versuche verschiedene Aufgaben zu lösen hatte.

1. Sie mußte einen gleichmäßig starken Ton in verschiedener Tonhöhe während des geräuschvollen Ablaufs der Apparatur (es werden 30 m Film in 1,4 Sekunden transportiert!) halten. 2. Ein Schwellton mußte gebildet werden, ohne daß der Einblick in den Kehlkopf geschmälert wurde. 3. Sie hatte einen Gleitton zwischen c′–c″ mehrfach während der kurzen Zeit von etwa 1 Sekunde zu singen. Für die Vokalstellung wurde immer der gleiche Vokal ae gewählt. Die Intensitätsregistrierung erfolgte gleichzeitig mit dem *Neumann*schen Pegelschreiber. Mit einem Magnettongerät wurden alle Phonationen für die spätere Auswertung registriert. Zudem konnte laufend kontrolliert werden, ob der Ton während der Zeitdehneraufnahme richtig erfolgte. Trägt man nun die aus den Filmbildchen ausgewertete relative Öffnungsweite der Stimmritze bei verschiedener Tonhöhe auf der Ordinate und die Zahl der Filmbildchen auf der Abszisse ein, so läßt sich der *Öffnungsquotient* für die jeweilige Tonhöhe bestimmen. Dieser gibt das Verhältnis der Zeit, während der die Stimmlippen geöffnet sind (Öffnungsphase), und der Dauer eines ganzen Schwingungsablaufes an. In früheren Untersuchungen konnten folgende Öffnungsquotienten festgestellt werden: für 290 Hz (d′) 0,5; für 326 Hz (e′) 0,6 und für 845 Hz 0,62. Der Öffnungsquotient nimmt also mit steigender Tonhöhe leichtgradig zu, d. h. also die Verschlußphase wird nach der Höhe zu immer kürzer. Auch *R. Timcke* (1955) fand bei einer männlichen Versuchsperson, 28 Jahre, eine geringe Frequenzabhängigkeit des Öffnungsquotienten: 0,63 bei 120 Hz («halblaut») und 0,77 bei 500 Hz («halblaut»). Wenn man diese Quotienten in das von *Tarnoczy* angegebene Diagramm einsetzt, so passen diese recht gut in die aufsteigende Linie und stützen so die experimentell gefundenen Werte. Man muß allerdings in Betracht ziehen, daß es sich bei den Stimmlippenschwingungen um komplizierte Massenbewegungen handelt und daß die einzelnen Öffnungsweiten etwas schwanken. Aus dem Film ersieht man deutlich, daß die Stimmlippenbewegung nicht nur lateral nach Art der Polsterpfeifen, sondern auch in ventro-dorsaler Richtung vor sich geht. Das heißt, die Öffnung beginnt ventralwärts und setzt sich nach dorsal fort, unter gleichzeitigen Bewegungen caudal beginnend cranialwärts nach außen, wie dies auch durch *Brackett* aus der Analyse seiner Zeitdehneraufnahmen festgestellt wurde.

Wir können heute die Erscheinungen des Stimmechanismus mit einer beträchtlichen Genauigkeit beschreiben. Charakterisiert man die Töne durch die Stellung, Länge und Spannung der Stimmlippen, so ergibt sich folgendes Bild:

1. Bei den *tiefen* Tönen ist unter einer gewissen Außenrotation der Aryknorpel die Stimmritze etwas geöffnet. Die Öffnung hat die Form eines langen gleichschenkeligen Dreiecks, dessen Basis die Pars intercartilaginea bildet. Bei guten Stimmen findet man eine gleichmäßige Weite, wobei die Stimmlippenränder während der Phonation dauernd parallel bleiben. Die Stimmlippen zeigen eine allgemeine Entspannung, die durch die Art der der Tonhöhe entsprechenden, langsamen und ausholenden Schwingungen erkennbar ist.

2. Mit *steigender* Tonhöhe strecken und spannen sich die Stimmlippen stärker an, wobei das Sternothyreoideus-Cricothyreoideus-System (*R. Schilling*) seine Rahmenfunktion für die Anspannung der Stimmlippen ausübt. Unter der Rotation der Aryknorpel nach innen schließt sich die Stimmritze allmählich von einer gewissen Tonstufe an, und zwar so, daß man in der Mittelstimme einen fast parallelen Verlauf der Stimmlippen feststellen kann. Dabei ist Voraussetzung, daß der Luftstrom der Lunge ungefähr konstant aufrechterhalten wird. Das Verhältnis des Verschlusses zur Tonhöhe kann, je nach der Anlage des Stimmorgans, verschieden ausfallen.

Wird nun der Ton weiter erhöht, so braucht es in einem bestimmten Punkt des Ablaufes zunächst noch zu keinen andern Erscheinungen im Kehlkopf zu kommen, denn der zusätzliche Luftdruck kann nicht nur die Lautstärke der Stimme erhöhen, sondern ebenso die Tonhöhe steigern.

3. Bei *hohen* Tönen wird aber eine Stufe erreicht, wo die Stimmlippen maximal gespannt und verkürzt sind. Hier muß nun ein neuer Stimmmechanismus einsetzen, den *J. Pressmann* (1942) den *Dämpfungsprozeß* (Damping factor) nennt. Dabei sollen, abhängig von der Tonhöhe, wechselnde Segmente des M. vocalis ins Spiel treten. Dies erfolgt ohne Bewegung der Aryknorpel, die einander vollständig genähert sind.

Dabei ändert sich auch, wie *Pressmann* (1942) und *Kirikae* (1943) festgestellt haben, die Länge des schwingenden Teiles der Stimmlippen insofern, als nur der vordere freie Teil der Stimmlippe vom Ansatz am Processus vocalis des Aryknorpels ab schwingt, und zwar *nur die Randzone* dieses Teils der Stimmlippen.

Phonetische, laryngostroboskopische und tomographische Befunde an zahlreichen Tenören haben gezeigt, daß die Stimmritze nicht nur im Falsett offengehalten wird (*Luchsinger*), sondern daß die Stimmritze auch im Vollton der Kopfstimme beim guten Sänger weitgehend geöffnet

bleibt. Allerdings schwingt beim Falsett nur der mediale Rand der Stimmlippe, während der wesentlich größere laterale Teil sich nicht bewegt. Geht aber der Sänger crescendo, auf dem gleichen Ton und beim selben Vokal (ae) bleibend, in den Vollton der Kopfstimme über, so erkennt man unter zunehmender Mitbeteiligung der Brustresonanz einen wesentlich veränderten Stimmechanismus. Zu der anfänglichen Randschwingung der Stimmlippen treten immer mehr Teile der Mittelpartien, so daß schließlich beim *Vollton* (Voix mixte) die Stimmlippen fast in ihrer ganzen Breite schwingen, wobei die größere Intensität der Stimme durch verstärkte Amplituden zum Ausdruck kommt.

2. *Aufbau der Apparatur und Aufnahmetechnik*

Die Zeitdehneraufnahmen von Stimmlippenschwingungen erfolgen über einen Kehlkopfspiegel in normaler, aufrechter Körperhaltung der Versuchsperson. Anaesthetica werden grundsätzlich vermieden, um möglichst natürliche Schwingungsvorgänge beizubehalten. Fleißiges Üben der Versuchsperson mit einem Rachenspiegel hat sich als sehr vorteilhaft erwiesen und hat jeweils die Arbeit an der Aufnahmeapparatur wesentlich erleichtert.

Die Apparatur besteht aus den folgenden vier Hauptteilen:

a) der Beleuchtungseinrichtung,
b) der Aufnahmeapparatur,
c) der Zeitregistrierung und
d) der Tonregistrierung.

a) Die für Zeitdehneraufnahmen benötigte hohe Lichtintensität wird mit einer *Busch*-Spiegelbogenlampe mit axialer Kohlenstellung erzeugt. Der positive, stark leuchtende Hochintensitäts-Kohlekrater eines Gleichstrombogens von ca. 50 V und 50 Amp. wird mit Hilfe eines sphärischen Hohlspiegels über einen großen Planspiegel in den abbildenden Strahlengang eingelenkt und über den Kehlkopfspiegel im Maßstab 2,5:1 auf den Stimmlippen abgebildet. Eine im Beleuchtungsstrahlengang befindliche Flüssigkeitsküvette mit Ferroammoniumsulfat-Lösung bewirkt eine intensive Kühlung der beleuchtenden Strahlung. Um das Kochen der Kühlflüssigkeit zu vermeiden, muß die Wärme über eine in die Küvette eingebaute Kühlschlange mittels Leitungswasser abgeführt werden. Ein feines Bronzedrahtsieb im Lichtstrahlengang hält außerdem noch ca. 60% der Strahlungsenergie zurück. Durch diese Vorsichtsmaßnahmen ist eine schädigende Wärmewirkung auf die Stimmlippen ausgeschlossen. Für die Aufnahme selbst wird das Bronzegitter kurz nach Beginn des Filmablaufes elektromagnetisch aus dem Strahlengang geschwenkt, so

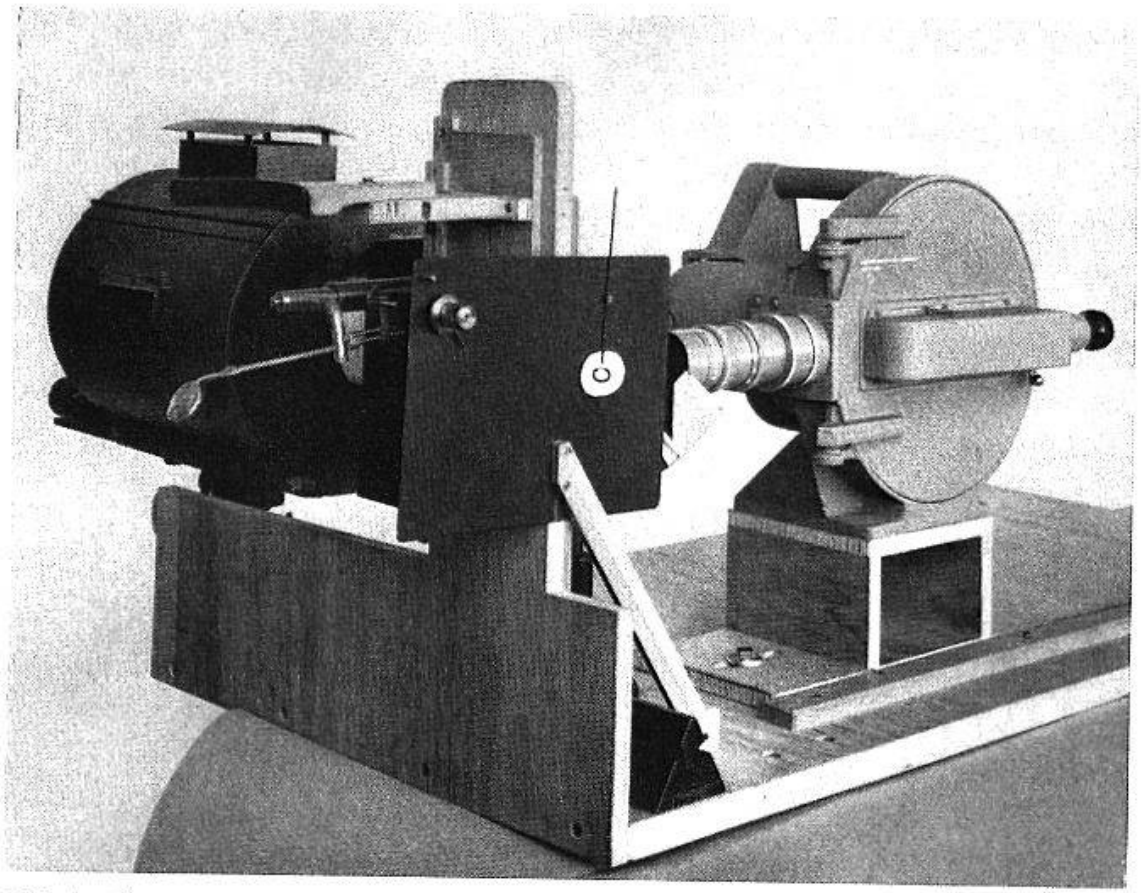

Abb. 1. Übersichtsbild der Apparatur. Rechts Fastaxkamera, links Bogenlampe; davor Kehlkopfspiegel. Aufnahme: Photographisches Institut ETH.

daß die volle Lichtleistung für die Aufnahme ausgenützt werden kann. Durch einen Fußkontakt wird der Bogenstrom für die Aufnahme auf 80 Amp. erhöht.

b) Als *Aufnahmeapparatur* wird eine Fastax-Kamera der *Wollensak*-Optical Company, Rochester, verwendet, die eine Bildfrequenz von 8000 Bildern pro Sekunde einzuhalten gestattet. Sie arbeitet nach dem Prinzip des optischen Ausgleiches, bei dem die Einzelbilder mit Hilfe eines im Bildstrahlengang rotierenden Prismas dem kontinuierlich fortbewegten Film nachgeworfen werden. Die Stimmlippen werden ca. im Maßstab 1:10 auf dem Film abgebildet. Die hohe Lichtleistung erlaubt eine Abblendung auf $k = 8$ bei 4000 Bildern pro Sekunde, so daß beim Senken oder Heben des Kehlkopfes die Stimmlippen noch innerhalb des Schärfenbereiches verbleiben. Das von den Stimmlippen reflektierte Licht gelangt über den Rachenspiegel durch ein Loch im großen, das Licht einlenkenden Planspiegel hindurch in die Kameraoptik. In diesem Strahlengang ist aber noch ein zweites Spiegelsystem eingeschaltet, über welches die Versuchsperson die eigenen Stimmlippen und deren Justierung im Bildfeld sehen und beurteilen kann, was sich außerdem zur Verminderung der Würgreize sehr wertvoll auswirkt und die Ver-

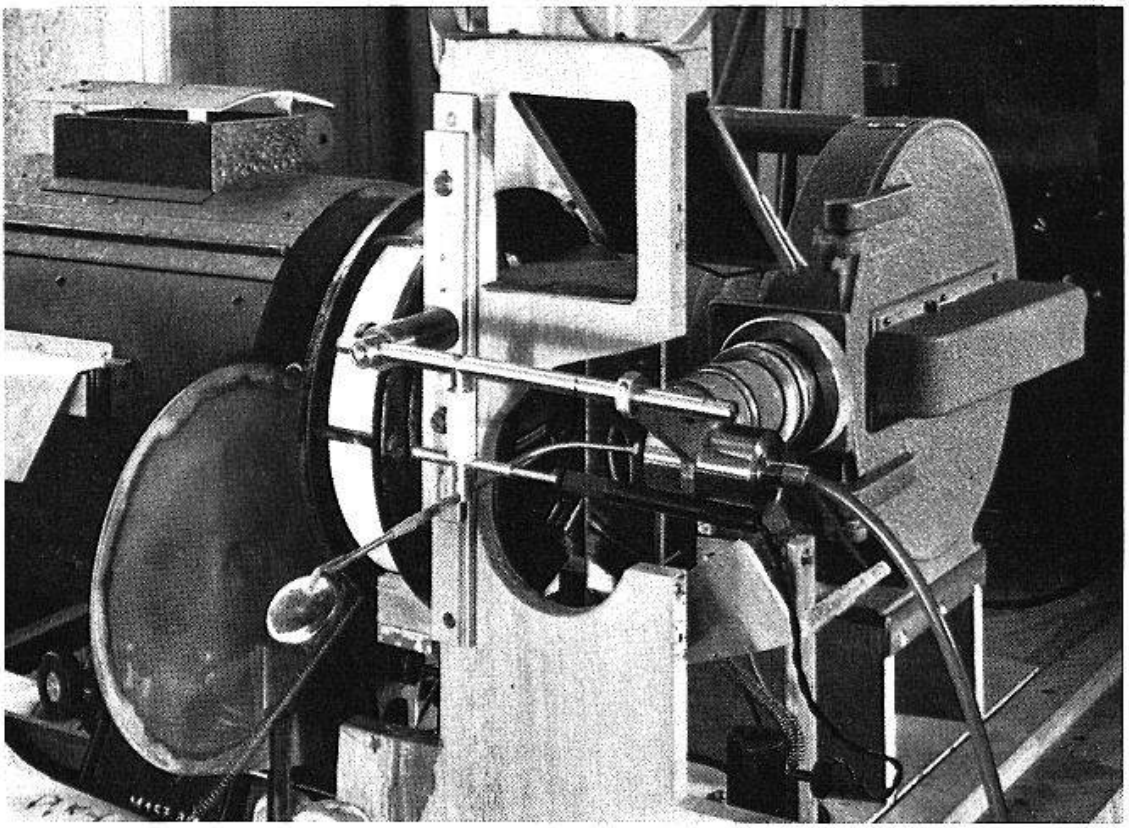

Abb. 2. Detailansicht der Apparatur mit Kehlkopfspiegel, Schallsonde und Mikrophon. Aufnahme: Photographisches Institut ETH.

suchsperson zu intensiver Mitarbeit anregt. Durch einen Elektromagneten wird dieses Spiegelsystem bei der Aufnahme automatisch aus dem Strahlengang ausgeschwenkt (Abb. 1).

c) Durch die stetige Beschleunigung des Filmes in der Kamera ist eine andauernde Steigerung der Bildfrequenz bedingt. Um diese in jedem beliebigen Zeitpunkt genau zu kennen, werden durch eine in die Kamera eingebaute Funkenstrecke Entladungsfunken auf den Filmrand aufbelichtet, die von einem Quarzgenerator erzeugt werden. Die Einzelblitzdauern dieser Funken sind kürzer als 10^{-7} Sek. bei einer Entladungsfrequenz von 1000 Hz. Durch die Verwendung eines Schwingungsquarzes ist diese *Zeitregistrierung* von sehr hoher Genauigkeit.

d) Eine *Tonregistrierung* wird mit Hilfe eines Magnettonbandgerätes durchgeführt und dient zur Bestimmung der bei der Aufnahme erzeugten Tonfrequenz, die außerdem auch aus dem Film ausgewertet werden kann. Zusätzlich kann durch die Tonbandaufnahme kontrolliert werden, ob Ton und Kamera zeitlich richtig im Betrieb waren. Nach einem Vorschlag von *Cl. Dubois* (Institut für Fernmeldetechnik der ETH) wird der gesungene Ton unmittelbar über den Stimmlippen durch den als Röhrchen ausgebildeten Halter des Kehlkopfspiegels (Abb. 2) auf ein eingekapseltes Kondensatormikrophon und über einen Verstärker auf das Tonbandgerät

geleitet. Dadurch werden die lauten und sehr störenden Kameragerräusche ausgeschaltet. Vor allem aber wird über das Kondensatormikrophon der Schalldruck in Dezibel auf einem geeichten *Neumann*-Pegelschreiber aufgezeichnet.

3. Die Versuchsperson und ihre Singstimmen

Es handelt sich bei unseren Versuchspersonen um 3 Erwachsene mit trainierten Singstimmen: C. R., Tenor, Stimmumfang H-c'', M. L., Sopranistin, Stimmumfang d-c'' und Frl. J. J., Koloratursopran, mit einer extrem hohen Stimme bis f^4 (2400 Hz) und einer Tiefe bis C (65 Hz). Phonetische und stroboskopische Untersuchungen an diesem Stimmphänomen wurden von *R. Luchsinger* und *Cl. Dubois* (1956) mitgeteilt. Nach elektroakustischen Registrierungen erscheinen die extrem hohen Töne rein sinusförmig; es war nicht möglich, harmonische Teiltöne nachzuweisen. Zu diesem Ausnahmefall trat ein 14jähriger Knabe (Rolf P.), der vor der Pubertät den Ton bis g^3 (1700 Hz) frei bilden konnte. Die Leistung dieser Sänger und Sängerinnen ist umso bewunderungswürdiger, als sich die Versuchsperson unter der Ertragung des Spiegels im Rachen und der ständigen Beobachtung der eigenen Stimmlippen im Spiegelsystem durch den beträchtlichen Lärm der sehr rasch ablaufenden Hochgeschwindigkeitsfilmapparatur nicht beeindrucken lassen darf.

Die letzteren zwei Versuchspersonen gaben auch die Möglichkeit, die Stimmlippenschwingungen bei sehr hohen Tönen kennenzulernen. Bereits aus dem Bell-Telephon-Hochgeschwindigkeitsfilm konnte man entnehmen, daß bei höchsten in dieser Filmreihe vorkommenden Tönen (800 Hz) die Stimmlippenränder nur noch kaum erkennbare Bewegungen zeigen. Sowohl Filmaufnahmen der hohen Kopftöne von Frl. J. J., dis''' (1100 Hz) als auch von g''' (1700 Hz) von Rolf P. ließen nur noch Schwingungen der Stimmlippenränder mit sehr kleiner Amplitude erkennen, die in keiner Beziehung zum hohen, vom Mund abgestrahlten Stimmklang standen. Dagegen fand eine Übereinstimmung der sich ventro-dorsalwärts bewegenden Lichtreflexe auf den Stimmlippen statt. Zur Erklärung dieser interessanten Befunde mußte man nach den bisherigen Untersuchungen einen Pfeifenmechanismus annehmen.

4. Über die Beziehung der Öffnungsphase zur Intensität der Stimme

Frühere Ausmessungen der *Öffnungsphase* annähernd gleich hoher Töne (Tenor R., 327 Hz und 325 Hz, deren Unterschied das Gehör nicht mehr erkennen kann) bei deutlich verschiedener Intensität der Stimme – 65 Phon und 80 Phon – hatten uns erkennen lassen, daß der damals

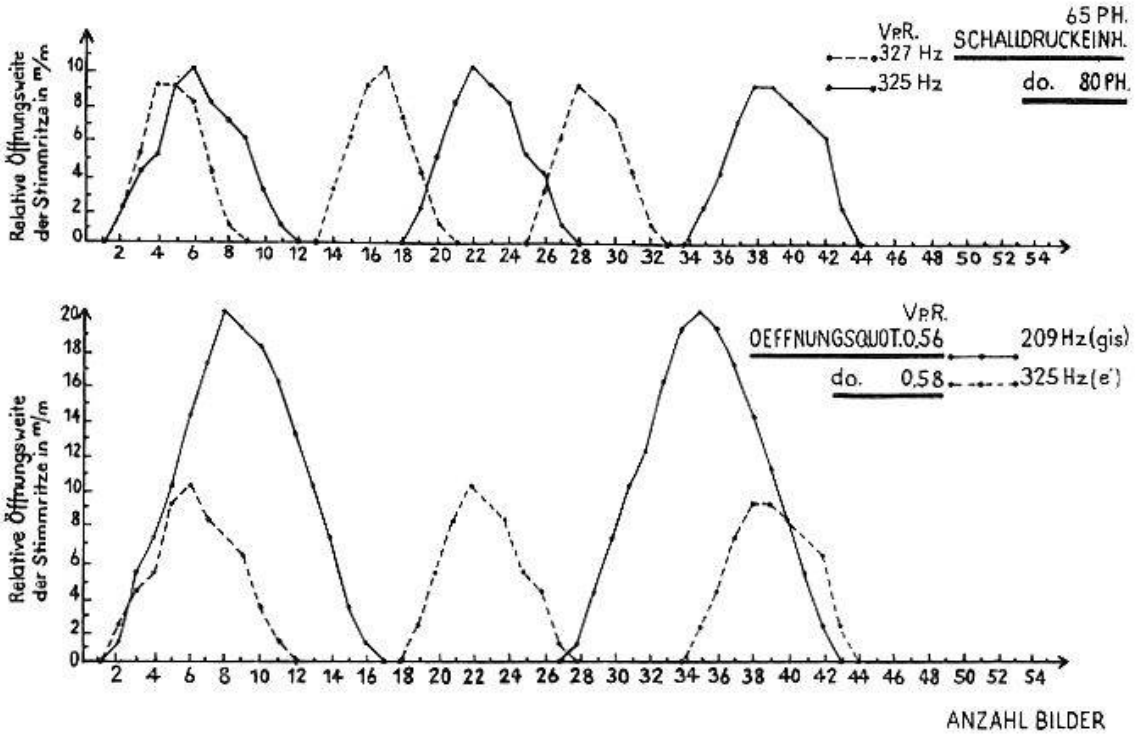

Abb. 3. Öffnungs- und Schließungsphase bei verschiedener Intensität der Stimme und verschiedener Tonhöhe (Operntenor R.). (Abszissen: Einer Einheit der Bildzahl entsprechen im oberen Diagramm: bei den Kurven – – – – $2{,}55 \cdot 10^{-4}$ s, ——— $1{,}86 \cdot 10^{-4}$ s und im unteren Diagramm: – – – – $1{,}86 \cdot 10^{-4}$ s, ——— $1{,}84 \cdot 10^{-4}$ s; Ordinaten: Die Öffnungsweiten entsprechen den in der Projektion bei ca. 50facher Vergrößerung gemessenen Stimmritzenöffnungen in mm.)

anders berechnete Öffnungsquotient (unter Berücksichtigung der Öffnungs*weite* der Stimmlippen) sehr verschieden ausfallen kann. Eine neuerliche Auswertung der in Abb. 3 (oberes Diagramm) wiedergegebenen Beobachtungen zeigt indessen, daß das Öffnungsverhältnis (Verhältnis der Öffnungsphase zur gesamten Schwingungsdauer) von der Lautstärke praktisch unabhängig ist; es beträgt: 0,66; 0,66 für 65 Phon und 0,66; 0,62 für 80 Phon. Wendet man die gleiche Rechnungsweise und Definition für das Öffnungsverhältnis auf das untere Diagramm von Abb. 3 an, so ergeben sich die Werte 0,65 und 0,62 für 325 Hz und 0,63 für 209 Hz; in diesem Bereich zeigt sich also das Öffnungsverhältnis auch praktisch unabhängig von der Tonhöhe. – Auf den Einfluß der Öffnungsweite werden wir später zurückkommen.

Nachdem es dank dem freundlichen Entgegenkommen von Prof. *Weber* (Direktor des Institutes für Fernmeldetechnik der ETH, Zürich) und seinem Assistenten, Herrn *Cl. Dubois*, möglich geworden war, mit einer als Kehlkopfspiegelträger benützten *Kehlkopfschallsonde* nach dem Verfahren von *Cl. Dubois* die Intensität der Kehlkopfklänge in bezug auf den Schalldruck mit hinlänglicher Genauigkeit zu registrieren, war die Grundlage gewonnen, reproduzierbare Vorgänge bei der Phonation auszuwerten.

Neben der bereits erwähnten Magnettonaufnahme, die eine genaue Kontrolle der Stimme vor und während der Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahme gestattete, wurde die Intensität der Stimme auf einem *Neumann*-Pegelschreiber laufend registriert[3]. Von der Versuchsperson M. L., Sopran, wurden im ganzen 9 Filme bei der Stimmbildung in verschiedener Tonhöhe unter Wahrung möglichst gleicher Lautstärke aufgenommen. Es ist bekanntlich für eine Sängerin nicht leicht, tiefe und hohe Töne (auf demselben Vokal ae) in gleicher Lautstärke zu singen, weil durch die größere Empfindlichkeit für Töne in der Höhe (etwa bei 500 Hz) das Ohr leicht getäuscht wird. Zu diesem Zwecke ist es sehr nützlich, wenn sich die Sängerin etwa an Hand eines Lautstärke-Meßgerätes kontrollieren kann. Unterschiede der *Klangfarbe* der Stimme, die an die Versuchsperson noch erhöhte Anforderungen stellen, wurden, soweit dies möglich war, vermieden. Solch interessante und wichtige Untersuchungen sollen einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben.

Von der Gesamtzahl der Filme konnten nach den oben genannten Kriterien 6 Filmabläufe verwertet werden. Zunächst erfolgte die Eintragung der Stimmritzenweite im Ablauf der *Öffnungs-* und *Schließungsphase* auf Millimeterpapier, wobei die Glottisöffnung im einzelnen Filmbildchen unter starker Vergrößerung in mm auf der Ordinate und die Anzahl der Filmbildchen eines ganzen Öffnungs- und Schließungsvorganges auf der Abszisse eingetragen wurde. Da es sich um recht komplizierte Massenbewegungen muskulärer Elemente handelt, ist zu begreifen, daß das Öffnungs- und Schließungsfeld während der Tongebung nicht schematisch gleich ausfällt, weshalb wir uns wiederum damit begnügt haben, den Öffnungsquotienten zu bestimmen. Zudem muß man auch noch die eventuelle Änderung der *Klangfarbe* (gepreßte Stimme oder eine Ermüdung der Stimme) in Betracht ziehen.

In der Tabelle 1 sind die Öffnungsquotienten bei verschiedener Tonhöhe, aber möglichst gleicher Lautstärke zusammengestellt. Bei dieser strengen Gegenüberstellung sieht man allerdings in allen 3 Filmgruppen einen merklichen Unterschied des Charakters der Öffnungsphase: *der Öffnungsquotient bei hohen Tönen ist im Vergleich zu den tiefen* im Mittel der 1. und 2. Serie größer (0,59 für 435 Hz; 0,69 bei 651 Hz). Das heißt also, die Größe und Form der Stimmritze paßt sich unter feiner Regulation beim Singen mit dem pro Sekunde verwendeten Atemvolumen an die höhere Stimmleistung an. Es wird bei höheren Tönen weniger Luft pro Sekunde verbraucht als bei tieferen; die Stimmritze steht länger offen

[3] Wir danken an dieser Stelle Herrn Prof. *H. Weber* (Institut für Fernmeldetechnik der ETH, Zürich) auch für die freundliche Zurverfügungstellung der genannten Apparatur.

Tabelle 1

Film Nr.	Tonhöhe, musikalische Beschreibung	Hz	Lautstärke der Stimme	Öffnungsquotient
1. Serie				
Film 1 . . .	a^1	435	35 db	0,53
	(g^1)	(387)		
Film 4 . . .	e''	651	36 db	0,68
2. Serie				
Film 1 . . .	a^1	435	35 db	0,65
Film 3 . . .	e''	651	35 db	0,69
3. Serie				
Film 1 . . .	as^1	411	39 db	0,66
	(a)	(435)		
Film 2 . . .	es''	615	35 db	0,72

bei höheren Tönen, und wir sehen, wie bereits erwähnt, immer mehr nur noch Randschwingungen auftreten. Schließlich, bei ganz extrem hohen Tönen (z. B. 1500 Hz), bleiben auch diese aus, und wir bemerken nur noch, synchron mit dem vom Mund abgestrahlten Klang, Bewegungen der Lichtreflexe *auf* den Stimmlippen.

5. *Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei einem Modell hoher Pfeiftöne*

Wie soll man diese zuletzt genannten Schwingungsvorgänge erklären?

Während für die Brust-, Mittel- und Kopfstimme allgemein die *Ewald*sche Polsterpfeife als Modell mit Gegenschlagsschwingungen herangezogen wird, fehlt noch ein solcher Vergleich für die hohen Kopftöne (Fistelstimme, Pfeifregister). Zwar hat *S. Smith* (1956) ein neues, wohldurchdachtes Stimmlippenmodell mit Polstern aus Schaumgummi und einer daran befestigten Gummimembran angegeben, das einen großen Tonumfang (1 ½ Oktaven) aufweist. Aber bereits 1876 hat *Carl Müller* darauf hingewiesen, daß alle damaligen Kehlkopfmodelle kein richtiges Bild des Stimmechanismus abgeben, weil eben die Stimmlippen nicht wie im Modell fixiert sind, sondern – nur gehalten vom Aryknorpel – frei schwingen. Nur für die sehr hohen Kopftöne (Fistelregister-Pfeifregister) will er ein Modell als berechtigt gelten lassen, bei dem die Begrenzung der schwingenden Membran (welche der stark gespannten Stimmlippe entspricht) als *fest* anzusehen ist. Die Membran wirkt ähnlich einer gleich eingespannten dicken Haut. «Alle bisherigen Hypothesen erklären nicht recht den so plötzlichen Sprung der Stimme aus dem Brustregister in die Falsett-Fistelstimme. Wieso wird die Klangfarbe heller?», fragt sich *C. Müller*. In seiner von der Universität Marburg preisgekrönten Arbeit

hat er zunächst das Verhalten einer einseitig schwingenden Membran studiert. Aus seinen zahlreichen Versuchen sei folgende Methodik herausgegriffen: Es wird ein ca. 0,05–0,07 mm dickes Pergamentpapier etwa 15 Minuten in Wasser gehalten, dann zwischen Löschblättern rasch getrocknet und auf die mit heißem Leim bestrichene Fläche eines Rahmens (ca. 120 × 120 mm) aufgelegt. Die allseitig angeheftete Membran wird dann mit einem scharfen Messer geschlitzt, so daß sie mit einem vollkommen freien Rand in zwei Stücke zerfällt. Die Ränder bleiben ganz scharf und glatt; höchstens zeigt der Schnitt eine lanzettartige Form. Brauchbar ist die gespannte Membran, wenn die *Knotenlinie* symmetrisch zur sogenannten *Mittellinie* (d. h. einer senkrecht über der Mitte des freien Randes errichteten Linie) die Fläche in zwei symmetrisch gleiche Teile zerlegt.

Die Knotenlinien wurden durch sehr feinen Quarzsand, Lycopodium oder Staub, sichtbar gemacht. Am besten färbt man die Körner.

Für Versuche im Luftstrom verwendet man zylindrische oder konische Röhrchen. Der Winddruck muß ziemlich stark sein. Man erhält eine beschränkte Anzahl von Tönen. Die tieferen durch Blasen gegen die Mitte; die höheren durch schwächeres Blasen gegen den Rand. Die Knotenlinien werden durch das aufgestäubte Mittel scharf markiert. Die Zahl derselben wächst im großen und ganzen – falls sie noch voneinander getrennt werden können – mit der Tonhöhe der entsprechenden Schwingungen.

Auf die Physiologie der Stimme angewendet stellte *C. Müller* die heute fast vergessene Hypothese auf: Die Falsett- oder Fisteltöne der menschlichen Stimme entstehen nicht durch Grundschwingungen der Stimmbänder, wie man bis jetzt angenommen hat, sondern durch Partialschwingungen derselben, so daß auf der Oberfläche jeder einzelnen Lippe eine oder mehrere Knotenlinien vorhanden sind.

Methodik. Im Gegensatz zum Vorgehen von *C. Müller* wurde zunächst eine auf einen quadratischen Rahmen von 6 cm Seitenlänge straffgespannte Ziegenhaut durch einen Schnitt von nur 2 cm Länge in zwei symmetrische Teile zerlegt. Dann wurde die Membran auf einem Kartonrohr von 30 cm Länge und 6 cm Durchmesser befestigt und unter starkem Druck angeblasen. Überraschenderweise konnte der gewünschte hohe Ton (d^1, 2322 Hz) erst dann erzeugt werden, wenn ein übergeordneter Schallraum (z. B. durch eine Glasplatte in einem Abstand von etwa 5 bis 10 mm von den schwingenden freien Rändern der Membran) geschaffen wurde. Schon mit bloßem Auge konnte man nun *durchschlagende* Schwingungen der Membranränder erkennen. Soweit aus unsern bisherigen Untersuchungen zu entnehmen ist, kann also in einem Tubus mit relativ tief-

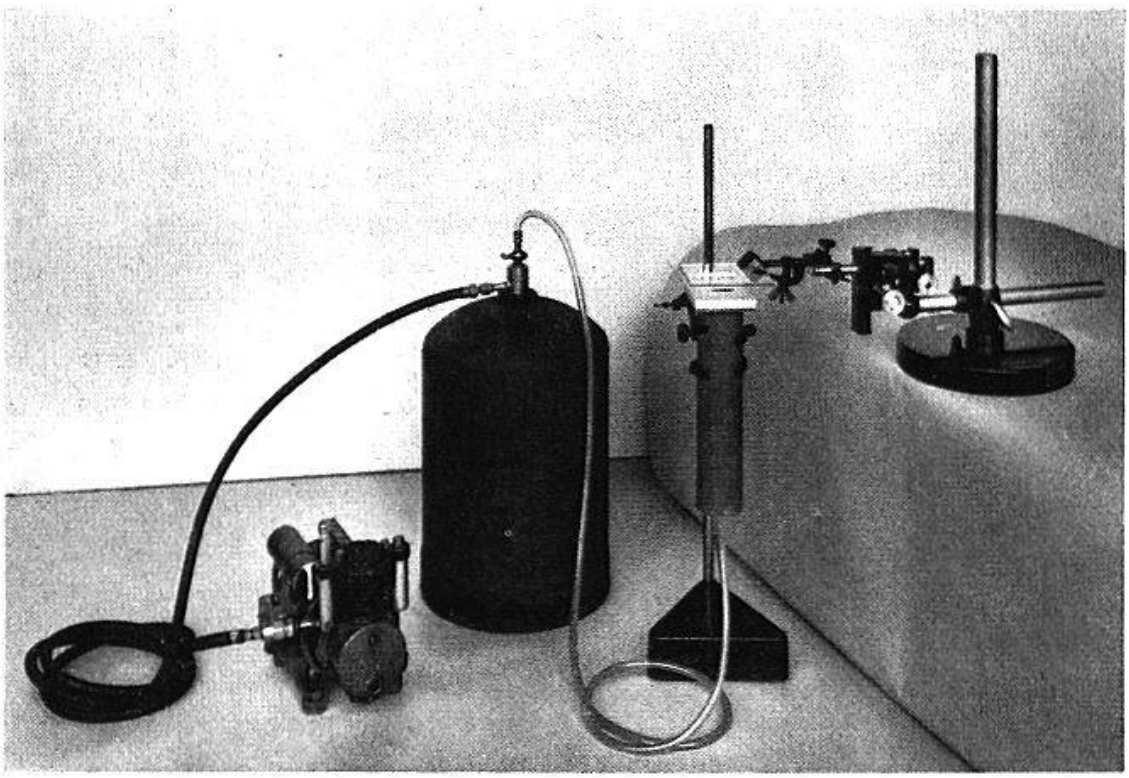

Abb. 4. Kehlkopfmodell. Aufnahme: Photographisches Institut ETH.

liegendem Eigenton – welcher dem stark gedämpften Mundraum, d. h. dem Stimmkanal über den Stimmlippen entspricht –, welcher in einem gewissen Abstand über der Membran steht, ein Kopplungseffekt erzeugt werden, so daß beim Anblasen der stark gespannten Membran, der hohen Spannung der Stimmlippen entsprechend, unter starkem Druck Schwingungen extrem hoher Frequenz hervorgebracht werden (Abb. 4).

Zusammenfassung

Es wird eine Übersicht des Aufbaues der Hochfrequenz-Zeitdehner-Apparatur zur Analyse der Stimmlippenbewegungen im Kehlkopf des normalen Menschen und deren Untersuchungsergebnisse gegeben. Mittels der Zeitdehnereinrichtung mit Registrierung der Tonhöhe und Intensität der Stimme konnte nachgewiesen werden, daß die Öffnungsphase der Stimmritze mit steigender Tonhöhe bei gleicher Intensität der Stimme leichtgradig zunimmt. Bei extrem hohen Kopftönen (bis $g^3 = 1700$ Hz) zeigen die Stimmlippen keine der Tonhöhe entsprechende Randschwingungen mehr. Man sieht bei den stark gespannten Stimmlippen nur noch dorsoventral verlaufende Oberflächenreflexe, deren Frequenz mit dem vom Mund abgestrahlten Pfeifton übereinstimmt. Es wird versucht, ein Modell einer einseitig schwingenden Membran – überlagert von einem Tubus mit Kopplungseffekt – zur Erklärung des Registers hoher Kopftöne heranzuziehen.

Résumé

Les auteurs donnent un aperçu de la construction de l'appareil pour les prises de vues à très grandes vitesses, utilisé pour étudier les mouvements des cordes vocales dans le larynx normal, et font part des premiers résultats. Grâce à la projection au ralenti, avec enregistrement simultané de la hauteur et de l'intensité des sons, les auteurs ont pu montrer que, pour la même intensité, l'écart des cordes vocales augmente légèrement avec la hauteur des sons. Dans les tons extrêmement élevés (jusqu'à g^3 = 1700 Hz), les cordes vocales n'ont plus les vibrations latérales qui correspondent à la hauteur des sons. Sur ces cordes vocales extrêmement tendues, l'on n'aperçoit plus que des réflexes superficiels dans la direction dorso-ventrale et dont la fréquence correspond bien au ton suraigu émis par la bouche. Les auteurs essayent ensuite de démontrer ces effets des tons très élevés, à l'aide d'un modèle composé d'une membrane vibrant dans un sens seulement, surmontée par un tube à action de couplage.

Riassunto

Rassegna della struttura dell'apparecchio ad alta velocità per l'analisi dei movimenti delle corde vocali della laringe umana normale, e dei risultati di detta analisi. Mediante l'apparecchio a rapido movimento per la registrazione dell'altezza del tono e dell'intensità della voce si potè dimostrare che la fase di apertura della rima vocale, a parità d'intensità della voce, aumenta leggermente con l'aumentare del tono vocale. Nei toni di testa estremamente alti (fino g^3 = 1700 Hz) le corde vocali non hanno vibrazioni marginali corrispondenti all'altezza del tono. Le corde vocali estremamente tese mostrano soltanto ancora riflessi superficiali decorrenti in direzione dorso-ventrale, riflessi la cui frequenza corrisponde a quella del suono fischiante emesso dalla bocca. Sul modello di una membrana vibrante solo da un lato e con sovrapposto un tubo ad effetto di coppia si tenta di dare una spiegazione del registro degli alti toni di testa.

Summary

A survey is given of the construction of the high speed apparatus used for the analysis of the movements of the vocal cords in the larynx in normal subjects, and a series of experimental results are presented. By means of a time-extending arrangement, with registration of the tone and intensity of the voice, it was shown that the opening of the glottis increases slightly with rising tone at the same intensity of the voice. At extremely high head tones (up to g^3 = 1700 Hz) the vocal cords show

no more lateral vibrations corresponding to the tone. With the strongly stretched vocal cords, only the dorso-ventral surface reflexes are seen whose frequency agrees with the whistling tone coming from the mouth. An attempt is made to explain the construction of the higher head tones by comparison with a model of a membrane vibrating in one direction surmounted by a tube with a coupling effect.

An dieser Stelle sei noch Herrn Prof. Dr. *J. Eggert*, Photographisches Institut der ETH, für seine wertvollen Ratschläge bei der Auswertung der verbindlichste Dank ausgesprochen.

Andersen, A.: J. Speech Dis. **15,** 4 (1951). – *Bateman, H. G.:* J. Laryng. **62,** 543 (1948). – *Bennati, F.:* Etudes physiologiques et pathologiques sur les organes de la voix humaine, Baillière, Paris 1833. – *Berendes, J., Luchsinger, R.,* und *Pfister, K.:* Arch. Ohr.-, Nas.-, u. Kehlk.-Heilk. **171,** 224 (1958). – *Brackett, J. P.:* Ann. Otol. (St. Louis) **57,** 556 (1948). – Elektronisch Messen: **2,** 6 (1948). – *Ewald, R.:* in Heymanns Handbuch der Laryngologie und Rhinolaryngologie. **1,** 165 (1898). – *Gemelli, A.:* Soc. Ital. di Biologica sper., Seduta 31. 5. 1944. – *v. Gierke, H.:* Pflüg. Arch. ges. Physiol. **249,** 307 (1947). – *Gutzmann, H.:* Z. Laryng. Rhinol. **24,** 401 (1933). – *Helmholtz, H.:* Die Lehre der Tonempfindungen. Friedr. Vieweg, Braunschweig 1863. – *Luchsinger, R.:* J. franç. Oto-rhino-laryng. **7,** 149 (1958); Folia phoniat. (Basel) **6,** 14 (1954). – *Luchsinger, R.,* und *Dubois, Cl.:* Folia phoniat. (Basel) **8,** 201 (1956). – *Merkel, L.:* Anatomie und Physiologie des menschlichen Stimm- und Sprachorgans (Anthropophonik). Ambros Abel, Leipzig 1863. – *Moore, P.:* J. franç. Oto-rhino-laryng. **5,** 4 (1956); Larynx et Phonation, Presses Universitaires de France, 1957. – *Motta, R.:* Annario del teatro Lirico Italiano. Milano 1940. – *Müller, J.:* Handbuch der Physiologie des Menschen. J. Hölscher, Coblenz 1840. – *Negus, V. E.:* Soc. Proc. roy. Med. Session Dec. 1947. – *Panconcelli-Calzia, G.:* Zbl. Hals-, Nas.- u. Ohrenheilk. **2,** 225 (1950). – *Pfister, K.:* Research Film Nr. 4, Juni 1954. – Philips Technische Rundschau: **8,** 25 (1946). – *Smith, S.:* Arch. Ohr.-, Nas.-, u. Kehlk.-Heilk. und Z. Hals-, Nas.- u. Ohrenheilk. **169** (Kongreßbericht 1956); Folia phoniat. (Basel) **9,** 32 (1957); J. franç. Oto-rhino-laryng. **5,** 323 (1956); Théorie aérodynamique de la vibration des cordes vocales. Larynx et Phonation, Presses Universitaires de France, 1957. – *Timcke, R.:* Naturwissenschaften **42,** 19 (1955). – *Vallancien, B.:* J. franç. Oto-rhino-laryng. **4,** 3 (1955); Comptes rendus des séances. Soc. franç. Oto-rhino-laryng. LXII (1957).