EXPERIMENTE ZUM ÜBERTRAGUNGSVERHALTEN MAREYSCHER KAPSELN

Dieter Mehnert, Rolf Dietzel, Dietmar Richter, Jürgen Landgraf

Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Akustik und Sprachkommunikation
di.mehnert@freenet.de

Abstract: Im Institut für Akustik und Sprachkommunikation der Technischen Universität Dresden befindet sich eine umfangreiche Sammlung historischer akustisch-phonetischer Geräte, von der bereits zu verschiedenen Anlässen ausgewählte Objekte vorgestellt wurden.
In dieser Sammlung befinden sich auch akustisch-mechanische Wandler – so genannte MAREYsche Kapseln – unterschiedlicher Ausführungsformen. Diese Wandlerkapseln dienten in der experimentellen Phonetik zur Umwandlung akustischer und physiologischer Größen (Sprach-Schall, Atembewegungen, ...) in mechanische Ausschläge, die dann über Zeigersysteme auf bewegtem Rußpapier, das auf einer Kymographen-Trommel aufgespannt war, aufgezeichnet wurden.

Aus der Vielzahl der noch vorhandenen, seinerzeit benutzten und vielseitig erprobten Wandlerkapseln werden an einigen ausgewählten Exemplaren systematische Untersuchungen zum statischen und dynamischen Übertragungsverhalten angestellt. Die Ergebnisse lassen Aussagen zur Leistungsfähigkeit MAREYscher Kapseln zu. Abschließend wird E. J. MAREY als Wissenschaftler seiner Zeit skizziert.

1 Vorbemerkung

Im Institut für Akustik und Sprachkommunikation der Technischen Universität Dresden besteht eine Sammlung historischer akustisch-phonetischer Geräte. Sie widerspiegelt die Entwicklung der Experimental-Phonetik nahezu lückenlos in der Zeit zwischen etwa 1890 und 1960, d. h. bis zum Einzug der Computertechnik in dieses Teilgebiet der Sprachverarbeitung. [1]

In dieser Sammlung existieren zahlreiche so genannte MAREYsche Kapseln in verschiedenen Ausführungsformen. Sie sind akustisch-mechanische Wandler und dienten zur Umwandlung von Schalldrücken in mechanische Auslenkungen, die sich mit geeigneten Registriergeräten aufzeichnen ließen. Derartige Kapseln sind damit quasi die historischen Vorläufer moderner elektroakustischer Mikrofone, einem der traditionellen Forschungsgegenstände am Institut für Akustik und Sprachkommunikation.

Über einige Teilgebiete der Gerätesammlung wurde bereits verschiedentlich wissenschaftlich gearbeitet und veröffentlicht [2, 3, 4, 8, 9]. Rüdiger Hoffmann hat für den Aufbau dieser Sammlung seit den Anfängen im Jahr 2000 außergewöhnliches Interesse gezeigt, deren Bearbeitung intensiv gefördert und nach Kräften unterstützt. Es ist seiner Initiative zu verdanken, dass diese Sammlung in den Bestand der zahlreichen wissenschaftlich-technischen Sammlungen, die von der Kustodie der Technischen Universität Dresden betreut werden, eingegliedert werden konnte.

Die vorliegende Arbeit soll die Verdienste von Rüdiger Hoffmann für den Erhalt historischer technischer Zeugnisse würdigen.

2 Einleitung

Seit Beginn der experimentellen Phonetik war es notwendig, für die Beschreibung von Intonationsverläufen der Sprache die Grundfrequenz der vokalischen Anteile zu messen und die Zeitverläufe dieser Grundfrequenzen zu ermitteln. Deren zeitliche Anstiege und Abfälle kennzeichnen Satz-Strukturen, wie z. B. Fragesätze, Ausrufesätze oder Satz-Enden. Bei Aufnahmen der Inventare von Fremdsprachen, insbesondere von Tonhöhensprachen (wie z. B. Chinesisch, Burmesisch, Vietnamesisch) waren die Grundfrequenz-Messungen unerlässlich, da derartige Anstiege bzw. Abfälle in diesen Sprachen semantische Bedeutung haben.

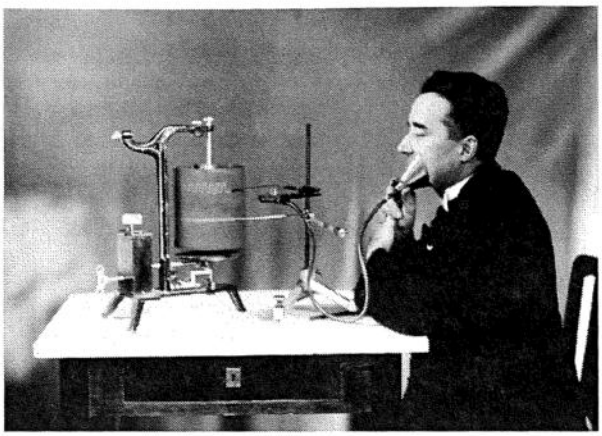

Abbildung 1 - G. Panconcelli-Calzia (Hamburg) am Kymographen während einer Aufzeichnung mit Mund-Trichter, Schlauch und Mareyscher Kapsel. Historisches Foto.

MAREYsche Kapseln sind akustisch-mechanische Wandler, mit denen Schall in mechanische Größen umgewandelt wird. Über einen Schlauch speist man den Sprachschall (oder andere Druckschwankungen) in den Hohlraum einer flachen, kreisrunden Kapsel ein, die mit einer dünnen Gummimembran abgeschlossen ist [5, 6]. Druckschwankungen in der Kapsel erzeugen Auslenkungen der Membran, die einen leichten Hebel mit aufgestecktem Zeiger bewegen. Dessen Spitze zeichnet die Schwingungen auf einem rasch bewegten, berußten Papier auf, das sich auf einer drehend angetriebenen Kymographentrommel befindet, Bilder 1 und 2.

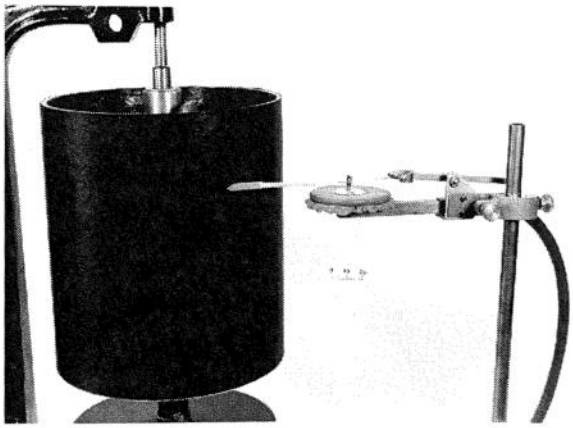

Abbildung 2 - Kymograph mit MAREYscher Kapsel.

Der Kymograph – eine Aufzeichnungsapparatur für Schwingungsvorgänge – war in der Frühphase der experimentellen Phonetik das wesentlichste Speichergerät. Die damit gewonnenen Aufzeichnungen von Schwingungen konnten anschließend mit großer Präzision ausgewertet und ausgemessen werden, vgl. Bild 3.

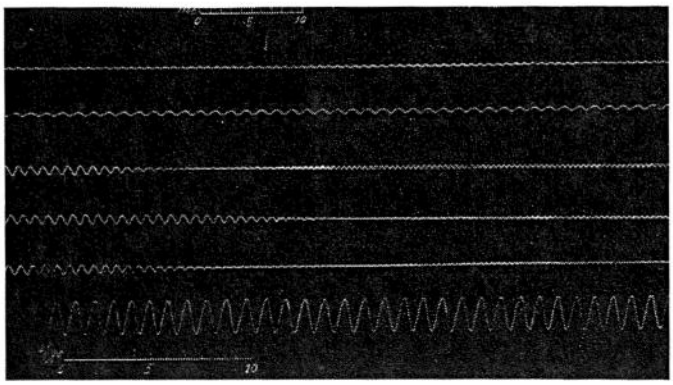

Abbildung 3 - Ausschnitt aus einem Kymogramm. Am unteren Rand sind Stimmgabel-Schwingungen mit bekannter Frequenz aufgezeichnet, sie dienen bei der Auswertung als Zeitmaßstab.

MAREYsche Kapseln gab es in vielen unterschiedlichen Ausführungsformen. Sie wurden vom Experimentator je nach den Frequenzen und Amplituden der zu messenden Zeitfunktionen ausgewählt. Bild 4 zeigt das Schnittbild einer häufig verwendeten Kapsel mit 47 mm Membrandurchmesser.

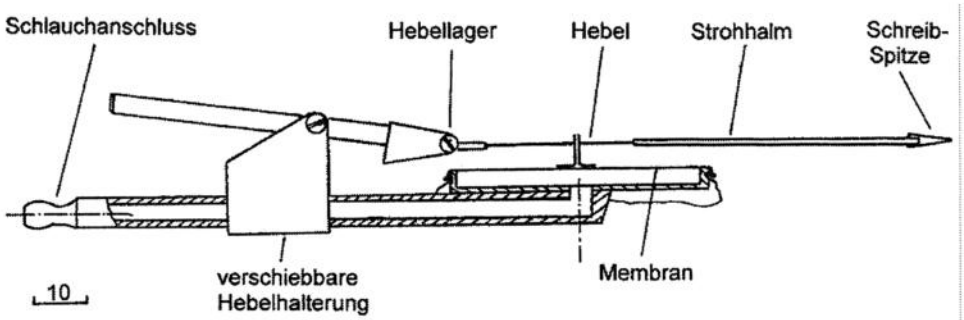

Abbildung 4 - Mareysche Kapsel, Schnittbild. Membrandurchmesser = 47 mm.

Im vorliegenden Beitrag interessiert die Frage: **Welche Übertragungsfunktion hat der Messaufbau aus Schallquelle - Schlauch - MAREYscher Kapsel - Zeiger ?**

3 Messanordnungen

3.1 Blockschema der Messanordnung

Im Bild 5 ist der prinzipielle Aufbau der benutzten Messanordnung aus Schalldruckquelle, Schlauch, MAREYscher Kapsel mit Hebel und Schreibspitze an der Kymographentrommel dargestellt.

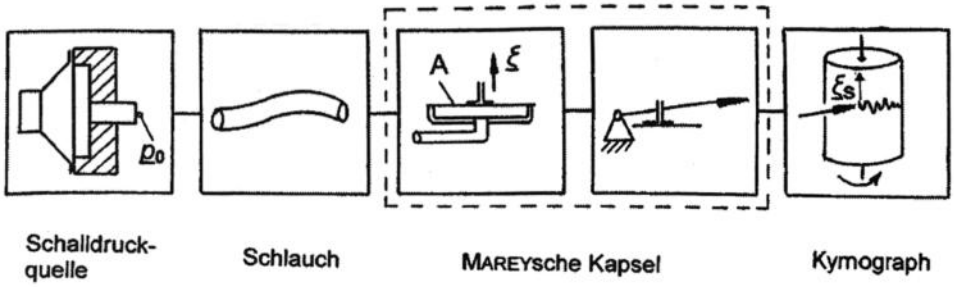

Abbildung 5 – Prinzip der Messanordnung. $\underline{p}_0$ = Schalldruck der Schallquelle, A = Membranfläche, $\underline{\xi}$ = Membranauslenkung, $\underline{\xi}_S$ = Auslenkung der Schreibspitze.

Die Bestandteile dieser Anordnung lassen sich mit Hilfe der elektroakustischen und elektromechanischen Analogie-Beziehungen schematisch als Ersatzschaltungen beschreiben, wie das im Bild 6 dargestellt ist.

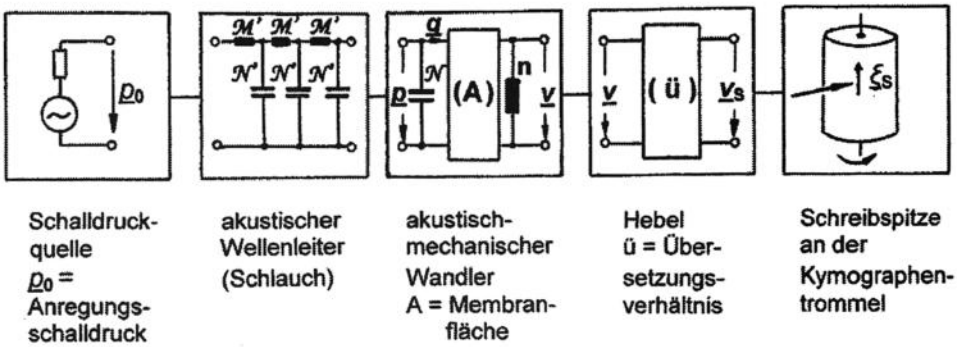

Abbildung 6 – Blockschaltbild der Messanordnung aus analogen elektrischen Baugruppen und der Kymographentrommel.

Der Schlauch lässt sich als akustischer Wellenleiter abbilden, der dieselbe Schaltungsstruktur hat wie die Nachbildung einer elektrischen Leitung: Sie besteht aus aneinander gereihten kurzen Leitungselementen mit jeweils einer längenbezogenen Induktivität L' und einer längenbezogenen Kapazität C'. Der Vierpol der gesamten Leitung besteht aus einer Kettenschaltung vieler solcher gleichartiger Elemente. Analog dazu ist ein schalldurchflossener Schlauch unter Vernachlässigung der Schlauchnachgiebigkeit und -reibung auch darstellbar als eine Kettenschaltung aus einzelnen kurzen Rohrelementen, die aus längenbezogenen akustischen Massen der Luft $\mathcal{M}'$ und längenbezogenen akustischen Nachgiebigkeiten $\mathcal{N}'$ bestehen.

Die MAREYsche Kapsel ist ein akustisch-mechanischer Wandler, der die akustischen Eingangsgrößen Druck $\underline{p}$ und Schallfluss $\underline{q}$ in mechanische Ausgangsgrößen Kraft $\underline{F}$ und Schnelle $\underline{v}$ umwandelt. Mit den hier verwendeten Analogiebeziehungen wird dieser Wandlertyp durch einen elektrischen Gyrator abgebildet, der Differenzgrößen am Eingang (z. B. Schnelle $\underline{v}$) in Flussgrößen am Ausgang (Schallfluss $\underline{q}$) umwandelt. Die Membranfläche A dieses Wandlers ist der gyratorische Übertragungsfaktor ($\underline{q} = A\,\underline{v}$; $\underline{p} = \underline{F}$ / A).

Der Hebel ist ein mechanischer Wandler, der Kraft und Schnelle $\underline{v}$ am Eingang wieder in Kraft und Schnelle $\underline{v}_S$ am Ausgang umwandelt, so wie das in der Elektrotechnik ein elektrischer Transformator mit Spannungen und Strömen bewerkstelligt. Das Hebel-

Übersetzungsverhältnis ü entspricht direkt dem Übersetzungsverhältnis des analogen Transformators.

Die Kettenschaltung dieser elektrischen Vierpole im Bild 6 mit den Zweipolen am Ein- und Ausgang (Schalldruck-Quelle und Schreibspitze) bildet die gesamte Anordnung derart analog ab, dass man die aus der elektrischen Netzwerktheorie bekannten Beziehungen darauf anwenden kann.

Für die hier beschrieben Untersuchungen lässt sich das Schema von Bild 6 weiter vereinfachen. Man erhält dann für tiefe Frequenzen das im Bild 7 gezeigte Blockschaltbild.

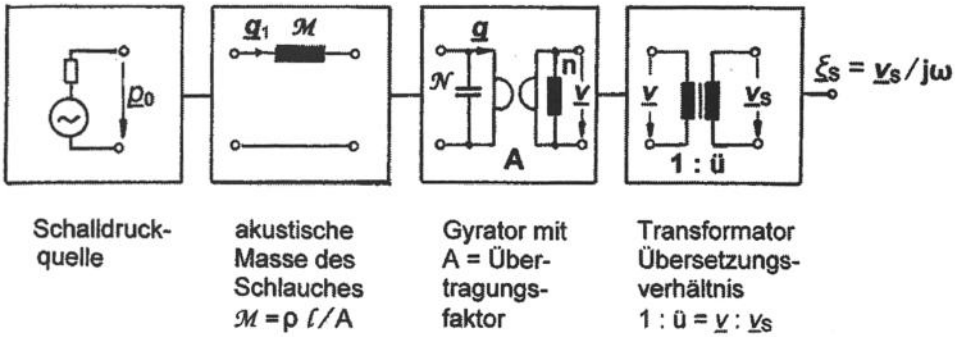

Abbildung 7 – Vereinfachtes Blockschaltbild der Messanordnung für tiefe Frequenzen.

Die Luft im Schlauch wirkt nur als akustische Masse $\mathcal{M}$. Die Kapsel ist ein Wandler, der akustische Größen (z. B. die Eingangsgröße Schallfluss $\underline{q}$) in mechanische Ausgangsgrößen (Schnelle $\underline{v} = \underline{q}$ / A) umwandelt und bei den hier gewählten Analogien als Gyrator wirkt (A = Membranfläche). Der Hebel ist ein translatorischer mechanischer Wandler, der als Transformator mit dem Übersetzungsverhältnis 1: ü = $\underline{v}$: $\underline{v}_S$ dargestellt wird. Die Auslenkung der Schreibspitze ist dann $\underline{\xi}_S = \underline{v}_S / j\omega = ü\, \underline{v} / j\omega$.

Bei den hier beschriebenen Messungen blieb der Hebel ohne aufgesteckten Strohhalm. Dieser Strohhalm ist nicht starr, sondern biegeweich. Das hat zusätzliche Resonanz-Erscheinungen zur Folge.

3.2 Messaufbau zur Ermittlung der dynamischen Übertragungsfunktion MAREYscher Kapseln

Das Übertragungsverhalten der MAREYschen Kapseln wird im Folgenden beschrieben durch den Quotienten aus Membranauslenkung $\underline{\xi}$ in der Mitte der Kapsel und Schalldruck $\underline{p}_0$ am Schlauchanfang. Es wird also die Übertragungsfunktion $B(f) = |\underline{\xi} / \underline{p}_0|$ gemessen.

Der Frequenzgang dieser Übertragungsfunktion $B(f)$ konnte mit dem in Bild 8 gezeigten Aufbau gemessen werden. Im Bild 9 ist der zentrale Teil der Messanordnung zu sehen.

Als Schalldruckquelle dient ein Tiefton-Lautsprecher mit einer unmittelbar davor angebrachten Adapterplatte, an deren Öffnung sich über passende Buchsen die Schläuche mit unterschiedlichen Durchmessern anbringen ließen. In das andere Schlauchende wird das Metallrohr der MAREYschen Kapsel gesteckt. Um die Auslenkungen $\underline{\xi}$ der Kapsel-Membran-Mitte berührungslos zu messen, wurde senkrecht darüber ein Laser-Vibrometer (Polytec OFV 302) angebracht. Dessen Ausgangssignal gelangt zum Zweikanal-FFT-Analysator (Brüel & Kjaer 3550). Der Anregungsschalldruck $\underline{p}_0$ im flachen Hohlraum der Adapterplatte ließ sich mit einem Mikrofon messen, das in einer zweiten Bohrung steckte. Dessen Ausgangssignal speist den zweiten Kanal des FFT-Analysators. Er bildet nach entsprechender

Signalverarbeitung den gesuchten Quotienten $|\underline{\xi} / \underline{p}_0|$. Der im FFT-Analysator eingebaute Tonfrequenz-Generator erzeugt eine Wechselspannung mit stetig durchstimmbarer Frequenz, mit der über einen Leistungsverstärker der Lautsprecher gespeist wird.

Die Bilder 11, 12 und 15 zeigen derartige gemessene Frequenzgänge $B(f)$ in doppelt-logarithmischer Darstellung.

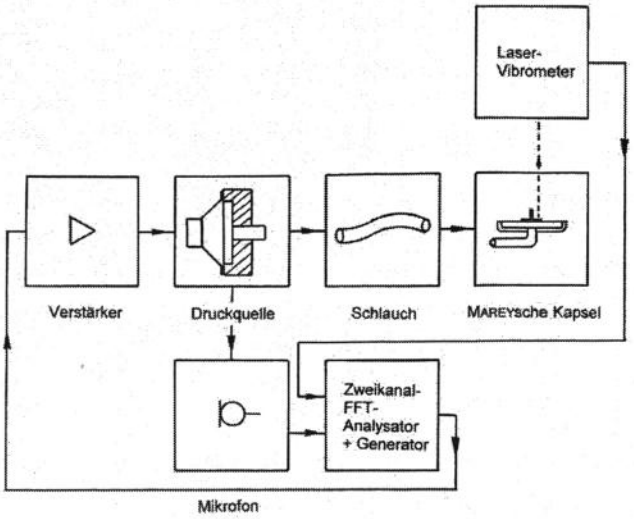

Abbildung 8 – Messaufbau zur Ermittlung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion von MAREYschen Kapseln mit Anschluss-Schlauch.

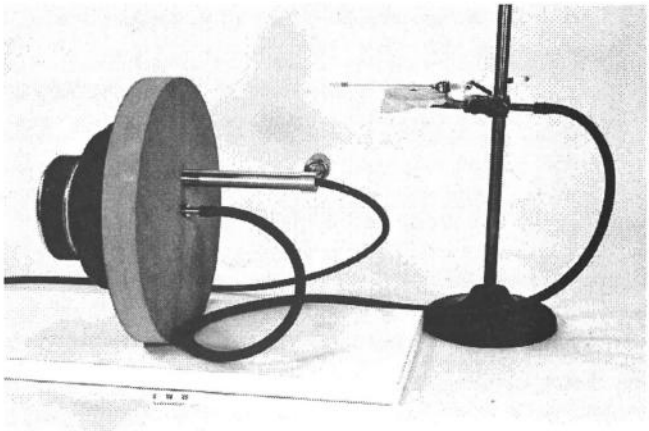

Abbildung 9 – Anordnung zur Messung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion von MAREYschen Kapseln mit Anschluss-Schlauch.

3.3 Messaufbau zur Ermittlung des statischen Übertragungsfaktors MAREYscher Kapseln

Außer der dynamischen Übertragungsfunktion von solchen MAREYschen Kapseln mit Anschluss-Schlauch sollte auch deren *statischer* Übertragungsfaktor gemessen werden. Dazu ließen sich Apparaturen einsetzen, die ebenfalls in der Sammlung historischer akustisch-

phonetischer Geräte des Dresdner Instituts aufbewahrt werden, vgl. Bild 10. Mit einer Druckdose (links im Bild) lassen sich statische Luftdrücke p_{stat} unterhalb und oberhalb des Atmosphärendrucks erzeugen, die mit dem wassergefüllten U-Rohr-Manometer gemessen werden. Die Membranauslenkung ξ in Kapselmitte wird mit einer Mikrometerschraube gemessen.

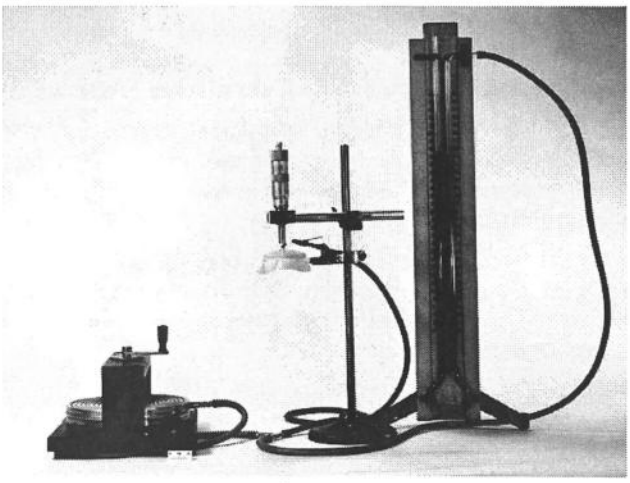

Abbildung 10 – Messanordnung zur Bestimmung des statischen Übertragungsfaktors der MAREYschen Kapseln mit historischen Apparaturen aus der Dresdner Sammlung akustisch-phonetischer Geräte.

4 Messergebnisse

Bild 11 zeigt die gemessene frequenzabhängige Übertragungsfunktion $B(f)$ einer MAREYschen Kapsel mit 16 mm Durchmesser, 0,3 mm Membrandicke und unbelasteter Membran (d. h. ohne aufgesetzten Hebel oder Zeiger).
Schlauchlänge = 80 cm, Innendurchmesser des Schlauches = 4,5 mm.

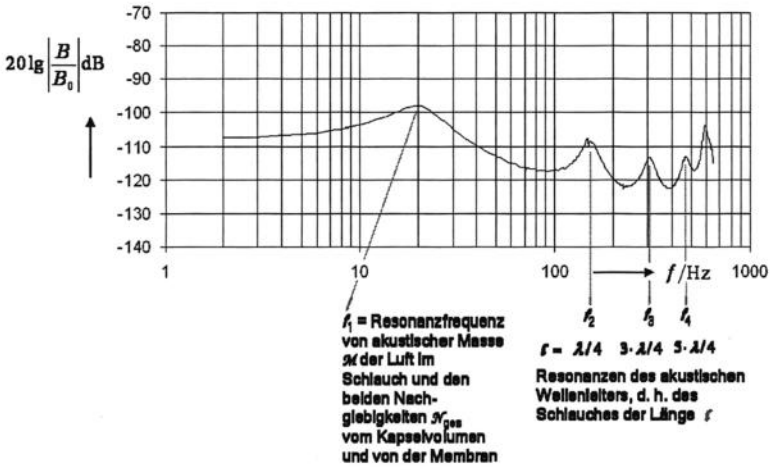

Abbildung 11 – Frequenzabhängige Übertragungsfunktion B (*f*) einer MAREYschen Kapsel mit 16 mm Durchmesser, 0,3 mm Membrandicke und unbelasteter Membran (d. h. ohne aufgesetzten Hebel oder Zeiger). Schlauchlänge = 80 cm, Innendurchmesser des Schlauches = 4,5 mm.

Das erste Maximum dieser Übertragungsfunktion bei der tiefen Frequenz f_1 entsteht aus der Resonanz von der akustischen Masse $\mathcal{M}$ der Luft im Schlauch und den beiden Nachgiebigkeiten $\mathcal{N}_{ges} = \mathcal{N} + \mathcal{N}_n$ vom Kapselvolumen und der Membran.

Die nachfolgenden Resonanzmaxima bei f_2, f_3 und f_4 entstehen durch die Bildung stehender Wellen im Schlauch der Länge ℓ jeweils bei den ungeradzahligen Vielfachen von $\lambda/4$, d. h. bei $\ell = 1/4\,\lambda,\ 3/4\,\lambda,\ 5/4\,\lambda, \ldots$

4.1 Übertragungsfunktion des Schlauches als akustischer Wellenleiter

Aus den historischen Bildern in der Literatur ist bekannt, dass zwischen dem Mundtrichter und der MAREYschen Kapsel Schläuche benutzt wurden, die etwa 1 m lang waren. Deshalb sind bei den hier beschriebenen Messreihen zunächst zahlreiche Kapseln — mit vergleichbaren Schlauchlängen — angeregt worden.

Um den Einfluss des Schlauches allein auf den Frequenzgang der Anordnung zu untersuchen, wurde die dynamische Übertragungsfunktion B_{Schl} (f) *ohne* angeschlossene MAREYsche Kapsel gemessen. Dazu wurde an Stelle der MAREYschen Kapsel ein Mikrofon am Schlauch-Ende angebracht. Das Ergebnis zeigt Bild 12.

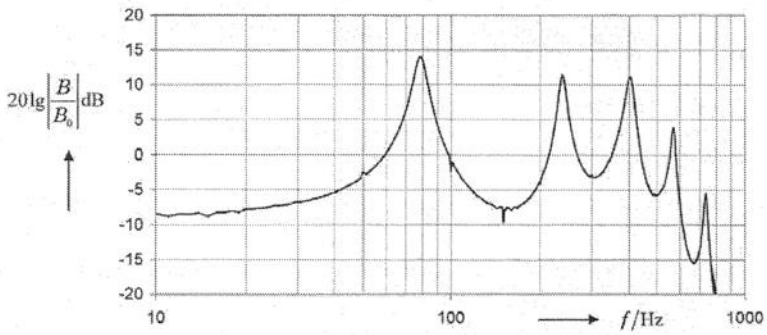

Abbildung 12 – Frequenzabhängige Übertragungsfunktion B_{Schl} (f) eines Schlauchs der Länge ℓ = 1,0 m, Innen-Durchmesser = 10,0 mm.

Daraus erkennt man, dass der Schlauch als akustischer Wellenleiter wirkt und die erwarteten Resonanzmaxima aufweist. Aus den gemessenen Frequenzen f_1 bis f_3 dieser Resonanzmaxima lassen sich mit der Schallgeschwindigkeit c = 340 m/s die zugehörigen Wellenlängen λ_1 bis λ_3 berechnen. Daraus ergeben sich die fiktiven Schlauchlängen von $\ell_1 = \lambda_1/4 = 1{,}07$ m; $\ell_2 = 3/4 \cdot \lambda_2 = 1{,}07$ m und $\ell_3 = 5/4 \cdot \lambda_3 = 1{,}06$ m. Der tatsächlich benutzte Schlauch ist 1,0 m lang, d. h. die berechneten Werte $\ell_{1,2,3}$ weichen um nur etwa 7 % davon ab.

4.2 Elastizitätsmoduln der Membranmaterialien

Als Membranmaterialien für die MAREYschen Kapseln sind unterschiedliche Gummisorten mit Dicken zwischen 0,05 und 0,3 mm benutzt worden. Von mehreren dieser hier eingesetzten Gummisorten sind die Elastizitätsmoduln gemessen worden. Dazu wurden Probestreifen mit 10 mm Breite und Längen l_0 zwischen 40 und 85 mm mit statischen Kräften F (angehängte Gewichte unterschiedlicher Masse) belastet und ihre Auslenkung Δl gemessen. Trägt man die elastische Dehnung $\varepsilon = \Delta l\ /\ l_0$ als Funktion der elastischen Spannung $\sigma = F/A_P$ (A_P = Probenquerschnitt) auf, erhält man die im Bild 13 dargestellten Kurven. Für niedrige

mechanische Spannungen bestätigt der nahezu lineare Anstieg der Kurven dieser Proben die Gültigkeit des HOOKEschen Gesetzes $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (E = Elastizitätsmodul).

In der Umgebung des Koordinatenursprungs haben die Dehnungs-Spannungs-Kurven aller Gummisorten annähernd denselben Anstieg, d. h. die Proben haben nur geringfügig unterschiedliche Elastizitätsmoduln $E = (1{,}4 \ldots 1{,}7)\ 10^6\ \mathrm{N/m^2}$.

Für die Auswahl geeigneter Membranmaterialien ist also die Dicke der benutzten Gummisorten ausschlaggebend.

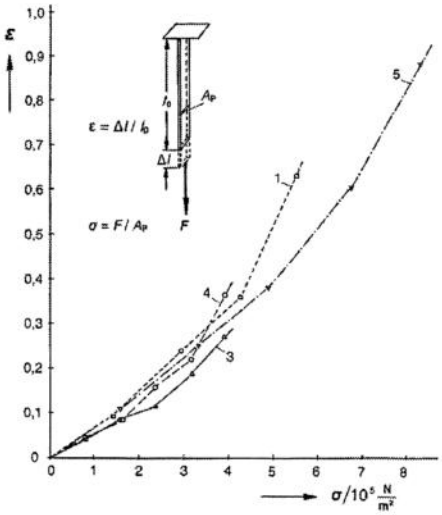

Abbildung 13 – Dehnungs-Spannungs-Kurven von Probestreifen der als Membranmaterial eingesetzten Gummisorten.

Proben-Nr.:	1	3	4	5
Dicke in mm:	0,28	0,1	0,1	0,05.

4.3 Statische Übertragungsfaktoren

Die statischen Übertragungsfaktoren von den untersuchten MAREYschen Kapseln sind mit der Messanordnung gemessen worden, die sich aus Beständen der historischen Geräte-Sammlung aufbauen ließ, vgl. Bild 10. Diese Übertragungsfaktoren $B_{\mathrm{stat}} = \xi / p_{\mathrm{stat}}$ (ξ = Auslenkung der Membranmitte, p_{stat} = statischer Druck in der Kapsel) von jeweils typengleichen Kapseln (mit 16 mm bzw. 47 mm Durchmesser) sind mit fünf verschiedenen Membranmaterialien und drei unterschiedlichen Membrandicken gemessen worden. Sie lagen jeweils bei den Kapseln mit gleichem Durchmesser dicht beieinander. Bei Kapseln mit verschiedenem Durchmesser unterscheiden sie sich jedoch erwartungsgemäß deutlich, wie an den zwei Beispielen aus Bild 14 zu erkennen ist.

$B_{\mathrm{stat}} = 0{,}3\ \mu\mathrm{m} / \mathrm{Pa}$ (Kapsel 8 mit 16 mm Durchmesser)

$B_{\mathrm{stat}} = 4{,}1\ \mu\mathrm{m} / \mathrm{Pa}$ (Kapsel 9 mit 47 mm Durchmesser).

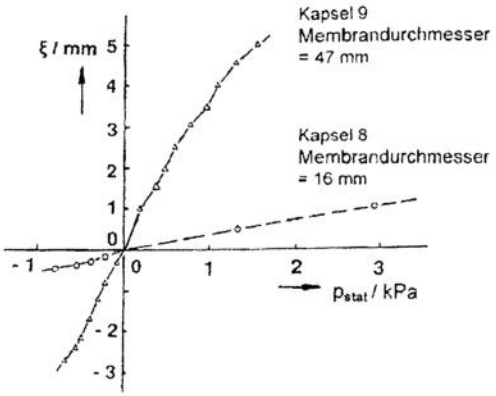

Abbildung 14 – Membranauslenkung ξ als Funktion des statischen Drucks p_{stat} im Kapselinneren von den beiden MAREYschen Kapseln, deren dynamische Übertragungsfunktionen im Bild 15 dargestellt sind. Aus dem Anstieg im Nullpunkt wurde der statische Übertragungsfaktor $B_{stat} = \xi / p_{stat}$ berechnet. Beide Kapseln sind mit dem gleichen Membrangummi bespannt: Membrandicke = 0,3 mm, $E = 1{,}4 \cdot 10^6$ N/m^2.

4.4 Dynamische Übertragungsfunktionen

Im Bild 11 ist bereits eine typische Übertragungsfunktion B (f) dargestellt und erläutert worden. In vergleichbarer Weise sind zahlreiche andere MAREYsche Kapseln untersucht worden.

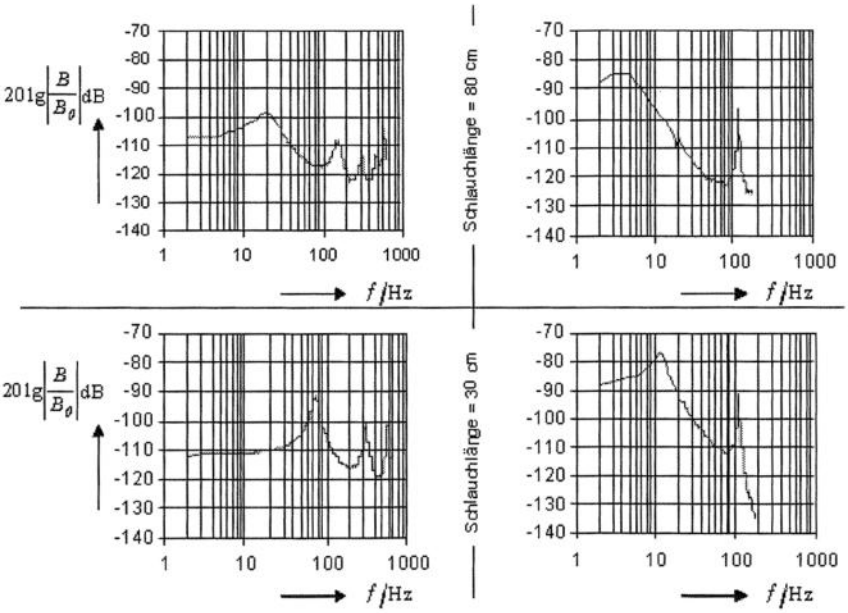

Abbildung 15 – Übertragungsfunktion von zwei MAREYschen Kapseln (Nr. 8 und 9) mit verschiedenen Schlauchlängen. Links MAREYsche Kapsel mit 16 mm Durchmesser; rechts mit 47 mm Durchmesser. Oben: Langer Verbindungsschlauch (80 cm lang); unten: kurzer Verbindungsschlauch (30 cm lang).

Der Einfluss der Schlauchlänge auf die Messergebnisse war erwartungsgemäß erheblich. Bild 15 zeigt in doppelt-logarithmischer Darstellung vier gemessene Übertragungsfunktionen $B(f)$, links für eine Kapsel mit 16 mm Durchmesser, rechts mit 47 mm Durchmesser, oben für einen 80 cm langen Verbindungsschlauch, unten für einen kürzeren, 30 cm langen Schlauch.

Das erste Maximum jeder dieser Kurven wird verursacht von der Resonanz zwischen der akustischen Masse $\mathcal{M}$ der Luft im Schlauch und einer akustischen Nachgiebigkeit $\mathcal{N}_{ges} = \mathcal{N} + \mathcal{N}_n$, die aus der Zusammenschaltung von zwei Nachgiebigkeiten entsteht: (a) Akustische Nachgiebigkeit des Kapsel-Hohlraumes $\mathcal{N} = V / \rho \cdot c^2$ (V = Kapselvolumen, ρ = Dichte der Luft, c = Schallgeschwindigkeit). (b) Mechanische Nachgiebigkeit n der Membran; sie wird gyratorisch auf die akustische Seite des akustisch-mechanischen Wandlers übertragen als akustische Nachgiebigkeit $\mathcal{N}_n = A^2 \cdot n$ (A = Membranfläche).

Die nachfolgenden Maxima dieser Übertragungsfunktionen $B(f)$ im Bild 15 sind die bereits erwähnten Resonanzstellen des akustischen Wellenleiters. Um deren Einfluss zu verringern bzw. in höhere Frequenzgebiete zu verschieben, wurden deshalb weiterführende Versuche schließlich auf kurze Schlauchlängen (30 cm) beschränkt. Bei einem kurzen Schlauch ist bei tiefen Frequenzen nur die akustische Masse $\mathcal{M}$ der Luft im Schlauch (als konzentriertes Bauelement im vereinfachten Blockschaltbild, Bild 7, eingezeichnet) wirksam. $\mathcal{M} = \rho \cdot \ell / A_S$ (ρ = Luftdichte, ℓ = Schlauchlänge, A_S = Schlauchquerschnitt).

Bei extrem tiefen Frequenzen, d.h. bei $f < 10$ Hz ist die frequenzabhängige (dynamische) Übertragungsfunktion $B(f)$ der gesamten im Bild 5 skizzierten Messanordnung etwa frequenzunabhängig (Bild 15). $B(f < 10\ \text{Hz})$ stimmt in guter Näherung mit dem gemessenen statischen Übertragungsfaktor B_{stat} überein.

Eine nach dem historischen Vorbild angefertigte Modellkapsel (mit 47 mm Durchmesser) war ursprünglich dafür vorgesehen, bei gleicher Membrandicke und gleichem Elastizitätsmodul des Membranmaterials einstellbare, erheblich unterschiedliche Membranspannungen herzustellen. Das hat sich in der hier beschriebenen Versuchsreihe als undurchführbar erwiesen, weil der Aufwand dafür zu hoch war. Das könnte späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

5 Folgerungen

Wie bereits erwähnt, sind die Stimmton-Grundfrequenzen und deren zeitliche Verläufe in der experimentellen Phonetik von besonderem Interesse und als wesentlichstes Merkmal der Intonation (neben den Intensitäts- und Zeit-Verläufen) wirksam [4]. Die Stimmton-Grundfrequenzen liegen bekanntlich im Mittel bei männlichen Sprechern um $f = 120$ Hz, bei weiblichen Sprechern um $f = 240$ Hz. Der interessierende Bereich solcher hier beschriebener Messaufbauten liegt also in der Größenordnung von 100 Hz bis 350 Hz.

Der gemessene dynamische Übertragungsfaktor einer MAREYschen Kapsel mit 47 mm Membran-Durchmesser und 0,05 mm dicker Membran beträgt bei sehr tiefen Frequenzen $B = |\xi / p_0| = 15\ \mu\text{m/ Pa}$.

Aus mehreren Messungen mit einer Vielzahl unterschiedlicher MAREYscher Kapseln mit verschiedenen Membran-Materialien, Membran-Dicken und Membran-Flächen lässt sich folgendes sagen:

— Auswertbare Zeigerauslenkungen kommen überhaupt nur dann zustande, wenn man die Kapseln mit Frequenzen anregt, die etwa mit den Resonanzfrequenzen f_2 übereinstimmen (vgl. Bezeichnung von f_2 in Bild 11) oder zumindest sich nur geringfügig davon unterscheiden.

— Die Membranauslenkungen sind so gering, dass eine für die kymographische Aufzeichnung halbwegs ausreichende Amplitude nur dann zustande kommt, wenn ein leichter Zeiger (Stroh- oder Grashalm) auf den Hebel aufgesteckt wird, d. h. man muss immer von der Hebelübersetzung Gebrauch machen.

Das Ergebnis einer solchen zeitgenössischen kymographischen Aufzeichnung sah so aus wie im Bild 16 als Ausschnitt dargestellt.

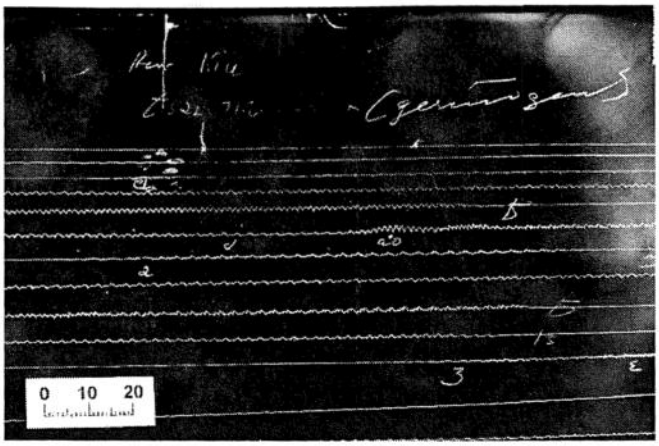

Abbildung 16 – Ausschnitt aus einer zeitgenössischen kymographischen Aufzeichnung von gesungenen Lauten einer männlichen Stimme.

Wie daraus ersichtlich, sind die gesprochenen oder gesungenen Lautabschnitte im Kymogramm nur als grobe Abbilder der jeweiligen Zeitfunktion aufgezeichnet, die der Schalldruck am Mund-Trichter hatte.

Das wichtigste Merkmal, die Periodizität dieser Zeitfunktion ist erkennbar und auswertbar. Auf jedem Kymogramm, das seinerzeit aufgenommen wurde, ist außerdem grundsätzlich eine sinusförmige Schwingung mit bekannter Frequenz, z.B. von einer Stimmgabel mit $f = 100$ Hz, aufgezeichnet worden (vgl. Bild 3).

Sie dient als Zeitmaßstab für die nachfolgende Auswertung. Durch Ausmessen der Abstände zwischen benachbarten Maxima (oder Minima) der stimmhaften Anteile des Sprachsignals lässt sich deren momentane Frequenz bestimmen [4].

Derartige Auswertungen erfolgten mit extra dazu angefertigten mechanischen Messeinrichtungen, vielfach sogar mit Lupen-Ablesung oder mikroskopischer Betrachtung.

6 Schlussbemerkung

Vermutlich haben die Experimental-Phonetiker von den hier beschriebenen Unzulänglichkeiten des Mess- und Aufzeichnungs-Verfahrens gewusst. Die in jedem phonetischen Laboratorium seinerzeit vorhandene große Anzahl von MAREYschen Kapseln mit verschiedenen Durchmessern und unterschiedlichen Bespannmaterialien (Dicke, Elastizitätsmodul, ...) lässt folgende Vermutung zulässig erscheinen: Der Versuchsleiter hat durch Vorversuche für einen bestimmten Sprecher dessen mittlere Stimmton-Grundfrequenz ermittelt. Danach hat er aus dem ihm verfügbaren Sortiment die am besten geeignete MAREYsche Kapsel ausgewählt, das heißt jene Kapsel, die bei dem zu erwartenden Stimmton-Grundfrequenz-Bereich die größten Zeigerausschläge erzeugte.

Obwohl die Aufzeichnung von Sprachsignalen mit den hier beschriebenen Mess- und Registriergeräten noch unvollkommen war, sind damit dennoch bemerkenswerte wissenschaftliche Ergebnisse erzielt worden:
Der Experimental-Phonetiker konnte damit der Sprachforschung Grundlagen zur Beschreibung von Sprachen liefern, insbesondere auf dem Gebiet der Intonation und der systematischen Inventarisierung von Tonhöhensprachen. Im Zeitraum um 1900 hatten z. B. Beschreibungen afrikanischer und asiatischer Sprachen eine hohe Blüte erreicht.

Die experimentelle Phonetik war bis in die zwanziger Jahre des vorigen Jahrhunderts mit zahlreichen wissenschaftlichen Einrichtungen in Deutschland (Hamburg, Berlin, Bonn) und dem übrigen Europa (z. B. Paris, Prag, Amsterdam, Barcelona, London, St. Petersburg) an den Fortschritten auf den genannten Gebieten maßgeblich beteiligt.

Die Wissenschaftler dieser Forschungseinrichtungen waren aus heutiger Sicht Universalgelehrte, die auf den Gebieten Physiologie und Psychologie, Linguistik und Phonetik, Angewandte Akustik und Experimentiertechnik gleichermaßen erfolgreich arbeiteten.

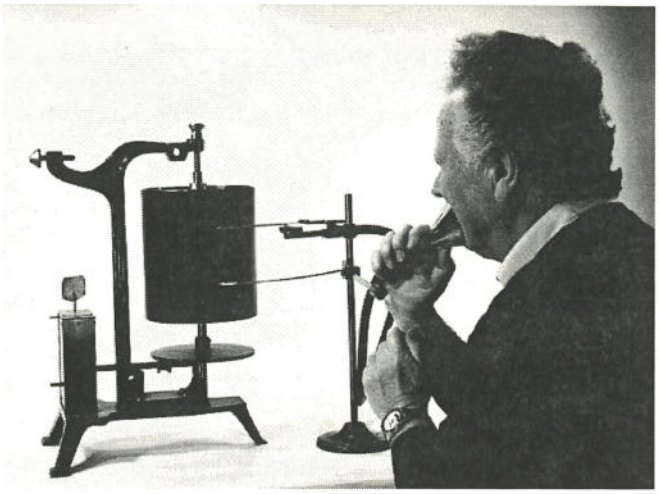

Abbildung 17 – D. Mehnert am Messaufbau mit Geräten aus der Sammlung historischer akustisch-phonetischer Geräte: Kymograph, Mundtrichter, Schlauch, MAREYsche Kapsel und Pendel-Chronograph. (Aufnahme 2008).

7 E. J. MAREY als Wissenschaftler seiner Zeit

ETIENNE JULES MAREY [7] wurde am 5. 3. 1830 in Beaune, Departement Côte-d'Or (Frankreich), geboren. Er starb am 16. 5. 1904 in Paris. Nach einem Studium der Physiologie und Medizin in Paris und praktischer Tätigkeit wurde er 1869 Professor für Naturgeschichte am Collège de France in Paris. Seit 1878 war er Mitglied der Französischen Akademie der Wissenschaften. Auf ihn geht die Gründung des Physiologischen Instituts im Prinzenpark zu Paris zurück („Institut Marey"). Er führte zahlreiche experimental-physiologische Arbeiten durch und leistete wesentliche Beiträge zur Lehre von den Mechanismen der Bewegung von Menschen und Tieren.

MAREY konstruierte als erster einen Kardiographen und den Sphygmographen (= Pulsschreiber). Ein vierteiliger Pulsschreiber besteht aus vier Kapseln, die jeweils mit einer Gummimembran abgeschlossen sind. Sie werden an den Stellen des Körpers angebracht, deren Puls-Bewegungen aufgezeichnet werden sollen. Von jeder Aufnehmer-Kapsel führt ein

Schlauch zu einer ähnlich aufgebauten Schreib-Kapsel. Deren Membranauslenkungen bewegen über jeweils einen kleinen Hebel einen Schreibstift. Die Auslenkungen der vier Schreibstifte lassen sich gemeinsam auf der Papierbahn einer rotierenden Trommel aufzeichnen. Diese Messmethode bezeichnete E. J. MAREY als Chronographie = Zeitregistrierung.

Derartige Wandler-Kapseln wurden später nach MAREY benannt und zu einem der wichtigsten Messhilfsmittel in der Experimentalphonetik.

Mit dieser Messmethode gelang ihm unter anderem der Nachweis, dass ein galoppierendes Pferd sich zunächst auf einen, dann auf drei, anschließend auf zwei und dann wieder auf nur einen Huf stützt, dazwischen jedoch sogar überhaupt nicht den Boden berührt (Bild 18). Er konnte damit eine unter Pferdekennern seinerzeit heftig diskutierte, lang anhaltende Streitfrage entscheiden: Berührt das Pferd beim Galopp in einem kurzen Augenblick mit keinem Huf den Boden? Sein Ergebnis lautete: Ja!

Abbildung 18 – Aufzeichnung der Bewegungen von den Hufen eines galoppierenden Pferdes mit dem so genannten Pulsschreiber von E. J. MAREY mit seiner Methode der Chronographie, aus [7].

Der Gouverneur von Kalifornien, LEALAND STANFORD, war von MAREYs Ergebnissen sehr beeindruckt, wollte aber die Antwort auf die Streitfrage mit photographischen Aufzeichnungen bestätigen lassen. Er beauftragte den Berufsphotographen EADWEARD MUYBRIDGE (1830 – 1904) mit den entsprechenden Versuchen zur Reihenphotographie von schnellen Bewegungsabläufen. E. MUYBRIDGE konnte 1872 mit seinen photographischen Reihenaufnahmen von galoppierenden Pferden die früheren Bewegungsstudien von E. J. MAREY bestätigen.

Die Ergebnisse seiner Serien-Momentphotographien von den Bewegungen zahlreicher Tiere veröffentlichte E. MUYBRIDGE später (1887) in elf großen Bildbänden mit 781 Tafeln und über 20 000 einzelnen Phasenbildern unter dem Titel „Muybridge Animal Locomotion". Er gilt neben E. J. MAREY als einer der frühesten und wichtigsten Pioniere bei der Entwicklung der Kinematographie.

1881 ging E. MUYBRIDGE mit seinem Aufnahme-Gerät (dem so genannten Zoopraxiskop) und zahlreichen Serien-Diapositiven von derartigen Reihenaufnahmen auf Tournee nach Europa. In Paris besuchte er E. J. MAREY, der von seiner Apparatur und den Aufnahmen begeistert war. E. J. MAREY nahm dessen Anregung auf, sich bei ähnlichen Untersuchungen der Momentphotographie zu bedienen.

Zur Erforschung des Vogelflugs konstruierte E. J. MAREY 1885 seine „Photographische Flinte", mit der er Serienbilder in schneller Abfolge aufnehmen konnte. In einer Trommel rotiert – von einem Uhrwerk angetrieben – eine kreisförmige Photoplatte. Sie befindet sich im Fokus eines Fernrohrs. Nachdem der Beobachter sein Zielobjekt anvisiert hatte, löste er den Antriebsmechanismus aus und konnte auf der jeweils kurzzeitig stillstehenden Platte, die nach jeder Einzelbelichtung um 30° weitergedreht wurde, innerhalb einer Sekunde 12 Einzelbilder aufnehmen.

E. J. MAREY benutzte zur photographischen Reihen-Aufnahme von schnellen Bewegungen zunächst bewegte Negativ-Platten, später fest stehende Platten, auf denen die Einzelbilder nebeneinander aufgenommen wurden. Sein entsprechendes Gerät nannte er „Chronophotographe".

Seit der Anregung durch E. MUYBRIDGE befasste sich E. J. MAREY viele Jahre damit, die Bewegungen von Menschen photographisch exakt zu erfassen. Derartige Aufnahme-Serien erinnern bereits auffallend an die späteren kinematographischen Aufnahmen eines Films.

Ein verbessertes Nachfolgegerät mit einem lichtempfindlichen, unperforierten gerollten Papierband als Aufnahme-Material aus dem Jahr 1888 nannte E. J. MAREY „Photochronograph". 1890 verwendete er in diesem Gerät inzwischen Zelluloid-Bänder mit einer lichtempfindlichen Photoemulsion. Es enthielt also bereits das Grundprinzip einer Filmaufnahmekamera. Später konnte er mit dem „Photochronograph" sogar Aufnahmen mit bis zu 120 Bildern je Sekunde machen (bei verringerter Bildhöhe).

Eine ausführliche Beschreibung seiner Arbeiten veröffentlichte MAREY 1890 unter dem Titel „Physiologie du Mouvement. Le Vol des Oiseaux". Dieses Werk und die Veröffentlichungen von E. MUYBRIDGE bilden die wesentlichsten Arbeiten der frühen Bewegungsphysiologie. In den folgenden Jahren erschienen weitere Publikationen von MAREY, u. a. „Le mouvement" (1894), „La Chronophotographie" (1899).

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. Magnus Petursson, Hamburg, für sein Interesse und seine freundliche Unterstützung bei den Literatur-Recherchen für diese Arbeit.

Literatur

[1] Hoffmann, R.; Mehnert, D.: Die historische akustisch-phonetische Sammlung der TU Dresden. DAGA 2006, Braunschweig. In: Fortschritte der Akustik, 2006, S. 331 – 332.

[2] Hoffmann, R.; Mehnert, D.; Dietzel, R.; Kordon, U.: Acoustic Experiments with Wethlo's Larynx Model. Proc. Kempelen Workshop. Budapest, March 2004 = Grazer linguistische Studien 62, 2004, S. 51 – 59.

[3] Mehnert, D.; Hoffmann, R.: Schallerzeugung, Schallaufzeichnung und Schallanalyse mit historischen phonetischen Instrumenten. Studientexte zur Sprachkommunikation, Bd. 29. Dresden, 2003, S. 77 – 91.

[4] Mehnert, D.: Prosodieforschung zu Beginn des 20. Jahrhunderts – Tonhöhenmess- und Analyseverfahren mit historischen phonetischen Apparaten. In: Sprachsignalverarbeitung – Analyse und Anwendungen. Zum 65. Geburtstag von Klaus Fellbaum. Studientexte zur Sprachkommunikation, Band 44. Dresden: TUDpress, 2007, S. 28 – 45.

[5] Zimmermann, E.: MAREYsche Tamboure. Firmenkatalog Wissenschaftliche Apparate. Leipzig, 1928, S. 281 – 283.

[6] Panconcelli-Calzia, G.: Der Kehltonschreiber Calzia-Schneider.
In: Z. f. Laryngologie, Rhinologie u. ihre Grenzgebiete. VII (1914) Heft 3, S. 339 – 343.
[7] v. Zglinicki, Friedrich: Der Weg des Films. Die Geschichte der Kinematographie und ihrer Vorläufer. Berlin: Rembrandt, 1956.
[8] Mehnert, D., Dietzel, R., Richter, D., Landgraf, J.: MAREYsche Kapseln in der experimentellen Phonetik – ihr Übetragungsverhalten aus heutiger Sicht.
DAGA 2008, Dresden. In: Fortschritte der Akustik 2008, S. 703 - 704.
[9] Mehnert, D.: Historische phonetische Geräte. www.ias.et,tu-dresden.de/sprache.