

University of Groningen

Physica van de stenvorming, met toepassingen

Berg, Jan Willem van den

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1953

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Berg, J. W. V. D. (1953). *Physica van de stenvorming, met toepassingen*. [S.n.].

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

PHYSICA VAN DE STEMVORMING,
MET TOEPASSINGEN

J. VAN DEN BERG

ERRATA

Physica van de stemvorming, met toepassingen

blz. regel van

3	4	b	er staat: unscientific	i. p. v. unscientific
4	2	o	: Nostrans	i. p. v. Nostrand
5	8	b	: flexebele	i. p. v. flexibele
15	12	o	: heeft	i. p. v. geeft
18	4	o	: geluidsdron	i. p. v. geluidsbron
20	7	o	: Froschels	i. p. v. Fröschels
29	2	o	: van	i. p. v. van de
31	12	o	: 1937	i. p. v. 1837
35			de voetnoot staat onder blz. 36	
40	12	o	er staat: 4.6	i. p. v. 4.6.3
51	22	o	: 2.2.2	i. p. v. 2.2.1
	10	o	: ordinairly	i. p. v. ordinarily
55			in het kopje staat 2.4	i. p. v. 2.5
61			in formule (1) staat in de exponent j	i. p. v. $2\pi j$
62			in het kopje staat 4.2.1	i. p. v. 4.1.2
	20	b	er staat: kan dan	i. p. v. kan dan o. i.
63	14	b	: iedaal	i. p. v. ideaal
66			toevoegen: afmetingen in mm	
71	8	b	er staat: ruim 2%	i. p. v. 2%
73			in formule (3) ontbreken grote haken om de laatste twee termen	
81	22	b	er staat: Ch 7, 27	i. p. v. Ch 7, § 27.
83	2	o	: $\frac{1}{3}$	i. p. v. $\frac{1}{3}$
89	12	o	: 4.2.2	i. p. v. 4.4.2
92			in de kolom van de formanten ontbreekt f	
93			in het kopje staat 4.5.2	i. p. v. 4.5.3
94	13	o	er staat: 1932	i. p. v. 1930
95	6	b	: MEIJER	i. p. v. MEYER
96			in fig. 17 is de trap 15-10 db vervloeid, zie tabel 1 op blz. 92	
100	19	b	er staat: 1926	i. p. v. 1927 ^b
101	16	b	: 24	i. p. v. 20
	16	o	: R.	i. p. v. R_s
103			in het kopje staat 4.6.2.	i. p. v. 4.6.3
	20	o	er staat: 4.2.2	i. p. v. 4.3
113	4	o	: ω^2	i. p. v. ω^{-2}
114	12	o	: mond	i. p. v. mond en die
115	1	o	: een	i. p. v. de

blz. regel van

116	15	o	er staat: intensiteit	i.p.v. amplitudo
118	23	o	: Kasier	i.p.v. Kaiser
121	5	b	: 1.3	i.p.v. 1.3.5
	7	b	: 200 tot 200	i.p.v. 20 tot 200
125	5	b	: verandert	i.p.v. hoger wordt
132	9	b	: 40.000	i.p.v. 4000
143	9	b	: verhoogte	i.p.v. verhoogde
	11	o	: klingt	i.p.v. klinkt
147	7	b	: formanten is	i.p.v. formanten
	24	b	: (40)	i.p.v. (36)
148			in het kopje staat 6.4	i.p.v. 6.3
	4	o	er staat: hogere i.p.v.	hogere (verder doorlopende)
149	16	o	: Kruger	i.p.v. Krüger
150	6	b	: bij	i.p.v. bij de
157			de kopjes van hoofdstuk VIII ontbreken	
159	5	b	er staat: le	i.p.v. la
163	18	b	: s'ouverture	i.p.v. d'ouverture
172	6	o	: Winckler	i.p.v. Winckel
173	2	o	: 2.3.2	i.p.v. 2.3.1
174	5	b	: klinkers	i.p.v. klinker
175	1	b	: 2.2.3	i.p.v. 2.3.3
176	3	o	: 4.5.2, 4.5.3	i.p.v. 4.5.2
179	12	b	: factions	i.p.v. factors
	23	o	: construction of	i.p.v. constriction or
180	5	b	: tabel	i.p.v. table
183	19	o	: Winckler	i.p.v. Winckel
184	14	o	: 2.3.2	i.p.v. 2.3.1
	9	o	: and and	i.p.v. and ə and
185	12	o	: 2.2.3	i.p.v. 2.3.3
186	16	o	: because	i.p.v. because the
187	4	o	: 4.5.2 and 4.5.3	i.p.v. 4.5.2

PHYSICA VAN DE STEMVORMING,
MET TOEPASSINGEN



STELLINGEN

1. Een nieuw ontdekt type koppeling, die van de stemplooiën aan elkaar, kan - onder zekere pathologische omstandigheden - karakteristieke verschijnselen in het strottenhoofd veroorzaken.

Hoofdstuk VIII, 8.2., punt 11.

De merkwaardige effecten als gevolg van de koppeling van het aanzetstuk aan het strottenhoofd kunnen verklaard worden door de orde van grootte van de betrokken impedanties in aanmerking te nemen.

Hoofdstuk IV, 4.7.2.

Voorzover bij andere verschijnselen de physica op de voorgrond staat, kunnen deze verklaard en in onderling verband gebracht worden door uit te gaan van het gedrag van de transmissiekromme van het aanzetstuk en van een theoretische conclusie over het door het strottenhoofd afgegeven spectrum.

Hoofdstuk IV, V, VI, VII en VIII.

2. De historische strijd „HELMHOLTZ” - HERMANN berust op misverstanden van weerszijden.

Hoofdstuk II, 2.1.2.

3. De waarnemingen van HUSSON en CHENAY - over de grenzen van de registers en de chronaxie van de motorische zenuw naar de spier tussen het borstbeen en het sleutelbeen - leveren geen enkele grond voor de conclusies die zij daaruit trekken over de stemvorming.

R. HUSSON en C. CHENAY

Comptes rendus 236: no. 10, 1077, 1953.

4. De drempelwaarde voor de prikkeling van de pijn-lichaampjes in de huid ligt bij energieën, die ongeveer een factor 10 kleiner zijn dan de waarden die VON FREY opgeeft.

De oorzaak hiervan is, dat VON FREY *onvoldoende* rekening houdt met de elasticiteit van het weefsel.

M. VON FREY

Hdb. der norm. und pathol. Physiol. 11:94, 1926.

Zeitschr. f. Biol. 70:333, 1920.

5. Door gebruik te maken van de *wisselstroom*-impedantie van een ionisatievat kan men grote Röntgenintensiteiten *continu* meten.

6. De moeilijkheden van de elektrische impedantie-plethysmografie - bij het meten van de *stuwing* van lichaamsdelen - worden veroorzaakt door het veranderen van de soortelijke weerstand van het bloed en door haemodynamische factoren.

7. De redenering van VAN CITTERT, om *plausibel* te maken, dat de beschouwingen van VON HELMHOLTZ en ABBE over de beeldvorming tot hetzelfde resultaat omtrent het oplossend vermogen leiden, is innerlijk tegenstrijdig.

P.H. VAN CITTERT
Het Microscop, 2e druk 1947, blz.95.

8. De localisatie van een zwak radioactief praeparaat met korte levensduur dient te gebeuren met niet-richtingsgevoelige tellers.

In dit geval zijn minstens vier tellers met bijbehorende kanalen nodig.

Vergelijk

W.K. SINCLAIR en L.F. LAMERTON,
Progress in Biophysics 2:104, 1951.

9. Van bollen met straal R worde de diameter bepaald door middel van coupes met dikte d, die op willekeurige afstanden van het centrum worden aangebracht.

Bepaalt men in elke coupe steeds de grootste diameter en onttrekken diameters $\leq 2a$ zich aan de waarneming, dan is de verwachtingswaarde voor de gemiddelde diameter, $2 Rg$.

$$2 Rg = 2 R \cdot \frac{\frac{d}{R} + bg \sin \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2} + \frac{a}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2}}{\frac{d}{R} + 2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^2}}$$

$$= 2 R \cdot f \left(\frac{d}{R}, \frac{a}{R} \right)$$

In de meeste praktische gevallen wijkt $f \left(\frac{d}{R}, \frac{a}{R} \right)$ minder dan 10% van $\frac{\pi}{4}$ af.

10. Gegeven zij de functionaalvergelijking

$$\Phi(\alpha x) - \beta \Phi(x) = F(x) \quad (x \neq 0)$$

waarin α en β gegeven constanten zijn, die voldoen aan $0 < \alpha < 1$, $\beta > 0$ en $\alpha \neq \beta$, terwijl de functie $F(x)$ de eigenschap heeft, dat in de omgeving van $x = 0$ geldt

$$F(x) = F(0) + x \cdot G + O(|x|^\tau) \quad (\tau > \alpha \log \beta)$$

waarbij G een constante voorstelt.

De algemene oplossing luidt in dit geval

$$\Phi(x) = \frac{F(0)}{1-\beta} + \frac{x \cdot G}{\alpha-\beta} - \frac{x}{\beta} \sum_{v=0}^{\infty} \left\{ \frac{F(\alpha^v x) - F(0)}{\beta^v x} - \frac{\alpha^v}{\beta^v} \cdot G \right\} + \\ + \beta^{[\alpha \log |x|]} \cdot \omega \{x \alpha^{-[\alpha \log |x|]}\}$$

hierin stelt $\omega(\theta)$ een willekeurige functie van θ voor.

De voorwaarde $0 < \alpha < 1$ houdt geen essentiële beperking in.

Het betreft hier een uitbreiding van het door HADWIGER behandelde geval met $\alpha = \beta$. Deze stelt daarbij de niet-noodzakelijke voorwaarden $x > 0$ en $F(x)$ differentieerbaar in $x=0$.

H. HADWIGER, Elemente der Mathematik 5:86, 1950.

11. Gegeven zij de functionaalvergelijking

$$\Phi(\alpha x) - \beta \Phi(x) = 0 \quad (x \neq 0)$$

met constanten α en β , die voldoen aan $\alpha, \beta > 0$.

De oplossingen hiervan, die continu zijn en tegelijkertijd voor oneindig veel stellen waarden van α en β voldoen, waarbij α elke waarde in een interval om het punt 1 kan aannemen, zijn alle van het type

$$\Phi(x) = C \cdot x^\gamma$$

waarin C en γ constanten voorstellen.

De bijbehorende stellen α en β voldoen dan $\alpha^{\log \beta} = \gamma$.

12. Aan de voorstellen en verlangens van de sectie geneeskunde van de staatscommissie tot reorganisatie van het hoger onderwijs ware - met betrekking tot het theoretisch en praktisch behandelen van de physica - toe te voegen:

1. Een deel van de te behandelen stof, in het bijzonder de atoomtheorie en haar toepassingen, worde - met het oog op het nuttig effect - verschoven naar een later semester dan thans gebruikelijk is.

2. Er worde gelegenheid gegeven aan de assistenten van klinieken en laboratoria om zich door praktische oefeningen de grondslagen, toepassingen en mogelijkheden van de moderne fysieke hulpmiddelen (en de daaraan te stellen eisen) eigen te maken.

Rapport van Sectie K, Geneeskunde, van de Staatscommissie tot reorganisatie van het hoger onderwijs, ingesteld bij Koninklijk Besluit van 11 April 1946, nr. 1.



PHYSICA VAN DE STEMVORMING, MET TOEPASSINGEN

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD VAN
DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE
AAN DE RIJKSUNIVERSITEIT TE GRONINGEN,
OP GEZAG VAN DE RECTOR MAGNIFICUS
Mr J. H. BEEKHUIS, HOOGLERAAR IN DE
FACULTEIT DER RECHTSGELEERDHEID, IN
HET OPENBAAR TE VERDEDIGEN OP
DONDERDAG 18 JUNI 1953,
DES NAMIDDAGS TE 4 UUR

DOOR

JANWILLEM VAN DEN BERG
GEBOREN TE AKKRUM



UITGEVERIJ EXCELSIOR — 's-GRAVENHAGE

Promotor: Prof. Dr. Hl. DE VRIES

Alles wat adem heeft love den Heerel
Ps. 150 : 6

Aan mijn Ouders
Aan mijn Vrouw

Aan de Nederlandse Vereniging voor Phonetische Wetenschappen

Aan de Nederlandse Laryngologen

I N H O U D

I. <i>Inleiding</i>	
1.1 Algemene beschouwingen	i
1.2 Anatomie en functie van de organen	3
1.3 Stenvorming	7
1.3.1 Modulatie	7
1.3.2 Spreekstem en zangstem	8
1.3.3 Abnormale methoden	9
1.3.4 Horen van de eigen stem	9
1.3.5 Energie	10
1.3.6 Spectrale verdeling	11
1.3.7 Verdeling om het eigen hoofd	11
1.4 Probleemstelling	11
1.4.1 Gedragen klinkers	11
1.4.2 Physica van de stenvorming, met toepassingen	14
1.5 Opzet van het eigen onderzoek	15
II. <i>Theorie en praktijk van de stenvorming en van de analyse daarvan</i>	
2.0 Inleiding	17
2.1 Modulatie	18
2.1.1 Experimentele methoden	18
2.1.2 Stenvorming en analyse. Historische strijd- vragen	20
2.1.3 Trillingsvergelijking. Theorie van WEGEL	26
2.1.4 Resultaten	27
2.2 Frequentiemodulatie	28
2.2.1 Methoden van onderzoek	28
2.2.2 Stemplooien, Stemspleet, Ruimte van MORGAGNI, valse stemplooien	30
2.2.3 Experimenten met praeparaten en modellen	33
2.2.4 Aerodynamische theorie van SAVART en GUILLEMIN	36
2.2.5 Theorie „Neuro-Chronaxique” van HUSSON	37
2.3 Amplitudomodulatie	38
2.3.1 Transmissiekromme	38
2.3.2 Dempingsfactoren en halfwaardebreedten	41
2.3.3 Practische kwesties	43
2.4 Koppeling	45
2.4.1 Theorie van WIEN. Proeven van VOGEL en WIEN	45
2.4.2 Proeven met het natuurlijke aanzetstuk en met modellen	48
2.4.3 Koppeling en inwendige weerstand	52
2.5 Spreekmachines	54

III. *Inleiding tot de experimentele hoofdstukken IV, V en VI* 56

IV. *Transmissiekromme*

4.1	Methode	60
4.1.1	Constante instelling van het aanzetstuk	60
4.1.2	Zoeksnelheid	61
4.1.3	Plaats van de microfoon	63
4.2	Mechanische apparatuur	64
4.2.1	Keelluidspreker, eisen	64
4.2.2	Keelluidspreker met meetkop	65
4.2.3	Resonantiekromme en volumesnelheid	70
4.3	Electrische apparatuur	75
4.4	Echo-arme kamer	80
4.4.1	Bolbron in het centrum van een bol. Voorwaarden voor de metingen	81
4.4.2	Metingen om de kamer te onderzoeken	85
4.5	Proeven met het natuurlijke aanzetstuk	86
4.5.1	Methode	86
4.5.2	Resultaten	88
4.5.3	Bespreking van de resultaten	93
4.6	Berekeningen over de transmissie van modellen. Localisatie van de demping	97
4.6.0	Doel van de berekeningen	97
4.6.1	Oorzaak van de demping	97
4.6.2	Cylindrische buis met harde wand	98
4.6.3	Model voor een klinker	103
4.6.4	Demping door vernauwingen en door de wand	109
4.7	Conclusies	115
4.7.1	Transmissiekromme, Amplitudomodulatie	115
4.7.2	Inwendige weerstand, koppeling	118
4.7.3	Spectrum van de generator, Frequentie- modulatie	122

V. *Nabootsing van klinkers en medeklinkers*

5.0	Doel van de proeven	126
5.1	Methode	126
5.2	Apparatuur	127
5.3	Resultaten	129
5.4	Conclusies	135

VI. *Transpositie van de klinkers*

6.0	Doel van de proeven	137
6.1	Methode	137
6.2	Apparatuur	140
6.3	Resultaten	142
6.4	Conclusies	149

VII. <i>Ruimte van Morgagni</i>	
7.1 Filter voor de hoge harmonischen	151
7.2 Kwaliteit van de stem	152
7.3 Geluidsvolume en timbre	153
7.4 Conclusies	155
VIII. <i>Theorie „Neuro-Chronaxique” van HUSSON</i>	
8.1 Bezwaren van HUSSON tegen de globale theorie over de stemvorming	156
8.2 Weerlegging van deze bezwaren	159
8.3 Theorie van HUSSON en weerlegging daarvan	163
8.4 Conclusies	164
<i>Samenvatting</i>	166
<i>Summary</i>	177
<i>Literatuurlijst</i>	188
<i>Lijst van figuren en tabellen</i>	194

I

I N L E I D I N G

1.1. Algemene beschouwingen

Tot de grote voorrechten van de mens behoort het beschikken over het communicatiemiddel bij uitstek, dat wij kortweg aangeven met de stem. In de meeste gevallen zal men zich nauwelijks realiseren van hoe groot belang deze mogelijkheid van contact is, omdat het verwerven ervan zo langs geleidelijke weg gaat en omdat het een ingesleten en haast automatisch proces is geworden.

Dat de processen, die zich bij de stemvorming afspelen echter niet van zo eenvoudige aard zijn als men geneigd zou zijn om op grond hiervan stilzwijgend aan te nemen, blijkt wel, wanneer men aan de hand van de uitgebreide literatuur op het gebied van de Phonetiek (in de ruimste zin genomen) tot de conclusie moet komen, dat over de aard van deze processen nog geenszins een afgerond beeld verkregen is. De opvattingen en hypothesen zijn vrijwel even rijk gesorteerd als de klanken, die ons ten dienste staan.

De interesse voor de stemvorming is in de loop der jaren van verschillende zijden gekomen. Van de kant van de Medici en dan speciaal van de Physiologen en van de Keel-, Neus- en Oorartsen, waarbij men er dikwijls op uit was om door de bestudering van pathologische afwijkingen inzicht te verkrijgen over de normale stemvorming. Van de kant van de Phonetici en dan met name van hen die zich voor spraak- en zang-technische kwesties interesseerden en van de zijde der Physici. Het streven van de laatsten was dan in het algemeen om het proces in formule te brengen. De problemen van de communicatietechniek hebben daarbij stimulerend gewerkt, vooral het zoeken naar een machine voor test-doeleinden, die natuurgetrouw zou kunnen spreken en zingen. In de laatste jaren is hierdoor ook de informatie-theorie naar voren gekomen, waardoor de voorwaarden waaraan de klank en de analyse daarvan moeten voldoen scherper geformuleerd konden worden, uitgaande van de eigenschappen van de klankontvanger. Ook op het gebied van de stemvorming zijn overigens belangrijke bijdragen geleverd door personen, die men niet zonder meer bij een bepaalde groep kan indelen, met name door PAGET.

Vraagt men zich af, wat er tot nu toe bereikt was door de verschillende onderzoekers, dan moet het antwoord luiden, dat het proces van de stemvorming nog slechts globaal begrepen was en dat

er in quantitatief opzicht nog veel ontbrak aan het verworven beeld.

De redenen hiervoor zijn gemakkelijk aan te geven. In de eerste plaats is het object van onderzoek, zoals zo vele biologische objecten, niet vrij toegankelijk, zodat de waarneming in de meeste gevallen een min of meer ernstige storing teweeg zal brengen, waardoor de organen belemmerd worden in de normale verrichting van hun functie. Het is b.v. nog niet gelukt om een gevoelig microfoonje van zo kleine afmetingen te construeren, dat het overal langs de acoustische weg in de klankgever geplaatst kan worden, zonder deze te hinderen bij het normale spreken of zingen. Aan het experimenteren met een proefpersoon zijn grenzen gesteld en wanneer door een chirurgische ingreep, naar aanleiding van een pathologische afwijking, de organen beter toegankelijk zijn geworden, moet men zich steeds afvragen, of, en wat de restanten kunnen leren over de functie van het normale orgaan. In de tweede plaats zijn er moeilijkheden, die veroorzaakt worden door de acoustische aard en de ruimtelijke uitbreiding van het geproduceerde signaal, waarbij de golflengten variëren van waarden, die groot zijn in vergelijking met de afmetingen langs de weg in de spreker, tot waarden, die van dezelfde orde van grootte zijn. Bovendien kunnen de ademhalingsgassen, waaraan het signaal gebonden is, in sommige holten gecomprimeerd worden, of in werveling geraken. In de derde plaats kan opgemerkt worden, dat het onderzoek speciale moeilijkheden oplevert, doordat het stemorgaan wordt aangedreven met lucht, het medium, dat ook de drager is van het geluid.

Steeds opnieuw probeert men echter, met behulp van nieuwe of gewijzigde oude methoden, een quantitatief inzicht te verwerven. Daarbij moet dan vermeden worden wat door RUSSELL (1929) gechargeerd werd opgemerkt, nadat hij door uitvoerig Röntgenmateriaal (1928) had gevonden, dat de modelvoorstellingen, waarvan o. a. de Physici tot die tijd uitgegaan waren, slechts een ruwe benadering vormden:

"In seeking the answer, the usual proces has been to record the speech sound as it emits from the mouth, give the same a Fourier harmonic analysis and then imagine the physiology which would supposedly give the results noted. Thereupon the investigator makes the ex parte assumption that the imagined cavity air volume influences were responsible for all vowel and voice quality distinctions as manifest in the speech curve.

Even the most careful scientists have fallen into that unscientific way of dealing with the problem. This is especially true of physicists and others not at home in the physiological field. Curiously enough many such do not hesitate to state their own subjective physiological imaginings as facts or assume them be

such, when they would be the first to disclaim any attempt at scientific physiological experimental proof by way of verification. They resort in other words, to unsupported physiological surmises of an unscientific type they would be the first to condemn in their own field of physics".

Het eigen onderzoek, dat in de volgende hoofdstukken beschreven zal worden, wil eveneens een bijdrage zijn tot het juiste begrip van wat zich bij de stemvorming afspeelt. Alvorens de probleemstelling aan te geven, 1.4, zal echter in de nu volgende paragrafen eerst een korte samenvatting gegeven worden over de anatomie en de functie van de organen, 1.2, en over de stemvorming in het algemeen 1.3, om de begrippen, die voor het beschrijven van de proeven gebruikt worden, beknopt toe te lichten.

1.2. Anatomie en functie van de organen

Fig. 1 geeft een schematisch overzicht van alle organen, die bij de stemvorming betrokken zijn. Voor ons doel is een summier overzicht voldoende, gedetailleerde gegevens worden vermeld in de leer- en handboeken der Physiologie en Anatomie, in het leerboek der Phonetiek van ZWAARDEMAKER en EYKMAN (1928), Speech and Voice van RUSSELL (1931), in het leerboek van LUCHSINGER en ARNOLD (1949) en speciaal van het strottenhoofd in de boeken van NEGUS (1929 en 1949).

De longen kan men vergelijken met de blaasbalg van andere geluidsbronnen en zij zijn bijzonder geschikt voor deze functie. Hun bouw wordt algemeen vergeleken met die van een spons, waarbij de vaste massa overeenkomt met het longweefsel, dat zeer veel bloed bevat, terwijl de holten overeenkomen met de luchtblaasjes in de longen. Het aantal vertakkingen neemt van de luchtpijp naar het inwendige van de longen steeds toe, terwijl elke tak een kleinere diameter en een slappere wand dan de voorgaande heeft, tot aan de kleinste luchtblaasjes, die voor de gasuitwisseling met het bloed dienen, waar men nauwelijks meer van een wand kan spreken. De lucht kan uit de longen gedreven worden met behulp van de spieren voor de ademhaling, die aan de borstkas aangrijpen en door middel van het middenrif, dat de borstholte scheidt van de buikholte. Tijdens de uitdrijving van de lucht veranderen de acoustische eigenschappen van de longen practisch niet, wat zeer belangrijk is. Geluidstrillingen, die in het strottenhoofd opgewekt worden en zich voortplanten naar het inwendige van de longen worden namelijk practisch niet teruggekaatst, omdat de wanden zeer geleidelijk steeds slapper worden, zodat de geluidsenergie

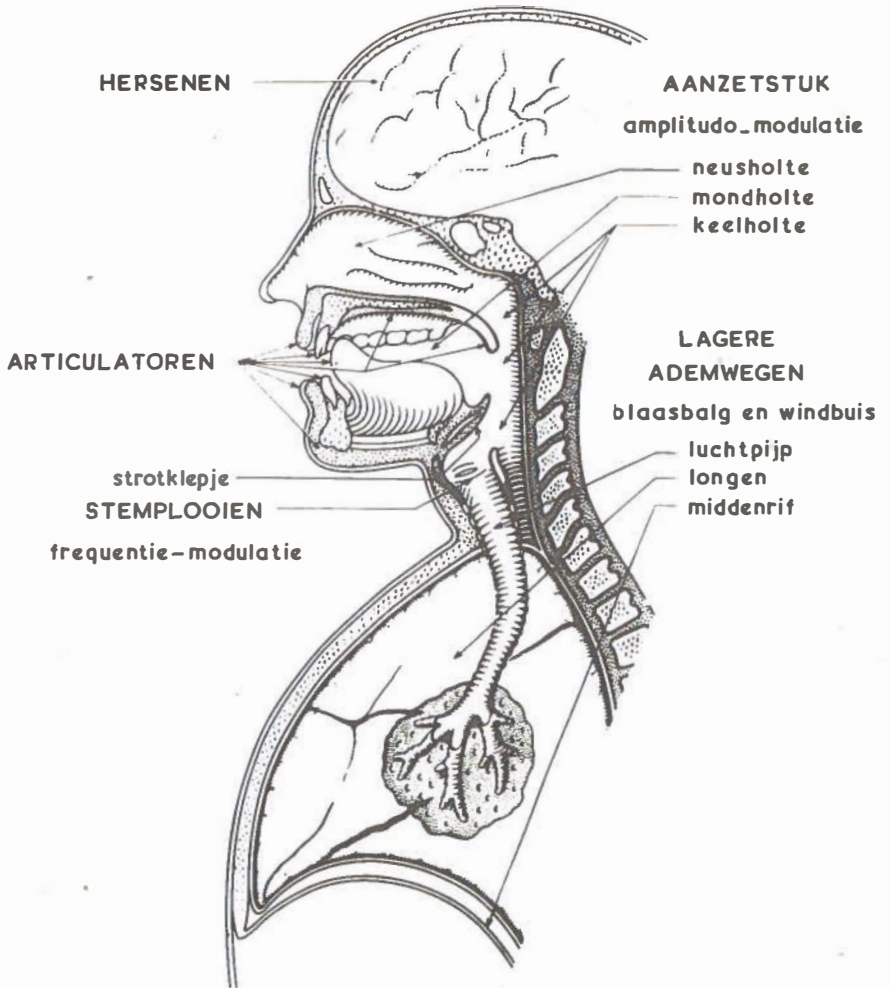


fig. 1. Overzicht van de stemorganen.
 (naar fig. 2 in Visible Speech. D. van Nostrans Comp.
 New York 1947).

vrijwel volledig geabsorbeerd en in warmte omgezet wordt *). Tijdens het uitdrijven van de lucht kan de blaasbalg a.h.w. ook betokkeld worden, door rhythmische contracties van de tussenribspieren b.v. (met een frequentie van omstreeks 6 per sec.), waardoor het vibrato ontstaat. Het middenrif is wel in staat om plotseling lucht uit te drijven, bij een uitroep b.v., maar het kan geen snelle rhythmiek bereiken, rond 2 per sec. is het maximum.

De luchtpijp is een wat flexebele buis, met een wand, die door C-vormige kraakbeenringen verstevigd is **).

Het strottenhoofd is bij de normale stemvorming het eigenlijke stemorgaan. Het skelet bestaat uit een aantal kraakbeentjes, die door spieren te zamen gehouden worden en daardoor iets van plaats kunnen veranderen ten opzichte van elkaar. Dit zijn: het schildkraakbeen, dat bij de man naar voren uitsteekt (adamsappel), het ringkraakbeen, waaraan de luchtpijp bevestigd is en twee kleine, pyramidevormige kraakbeentjes (ary-kraakbeentjes), die links en rechts boven de achterrand van het ringkraakbeen zitten. Aan de binnenwand van het strottenhoofd bevindt zich links en rechts een plooi, die uitgespannen is tussen de voorkant van het schildkraakbeen en een ary-kraakbeentje, zie fig. 2, blz.56. Bij het schildkraakbeen komen deze plooien, de zogenaamde stemplooien te zamen. Zij zijn tamelijk massief, in het inwendige hebben zij een spier die gespannen kan worden. De opening tussen de stemplooien, de stemspleet, kan zeer verschillend zijn, bij een snelle en diepe ademhaling is de opening maximaal en vlak voor een kuch b.v. zijn de plooien stevig tegen elkaar gedrukt, zodat de longen afgesloten zijn. De opening wordt geregeld door de stand van de ary-kraakbeentjes ten opzichte van elkaar, die door spiertjes ingesteld kan worden.

De stemplooien kunnen op twee manieren gespannen worden. Door aanspannen van de eigen spieren en door vergroten van de afstand van de punten waartussen zij uitgespannen zijn. Bij de ongedwongen stemvorming heeft men meestal met een combinatie te maken.

Door lucht uit de longen te drijven kunnen de stemplooien in trilling gebracht worden en men kan dan twee gevallen onderscheiden, met verschillende overgangsvormen ertussen. a) De plooien zijn slap en trillen over hun gehele lengte en breedte en de spleet is gedurende een gedeelte van de periode gesloten: Borstregister, met lage grondtonen, met daar tegenover b) het Falset-

*) In de techniek wordt ditzelfde principe, geleidelijk aanpassing, toegepast om echo-vrije ruimten te maken.

**) Terloops zij nog opgemerkt, dat men bij muziekinstrumenten, die met een blaasbalg werken op moeilijkheden stuit, wanneer de overeenkomstige windbuis ontbreekt. Het is dan meestal onmogelijk om het instrument aan te laten spreken.

register, met hoge grondtonen, de plooiën zijn zeer sterk gespannen en trillen slechts over een gedeelte van hun lengte en alleen aan de rand van de spleet, die nu gedurende de gehele periode open is *).

Voor de stemvorming alleen zouden de plooiën niet zo massief behoeven te zijn, maar ze dienen ook nog voor verschillende andere doeleinden, die alle dit gemeen hebben, dat de longen tijdelijk goed afgesloten moeten kunnen worden.

Het strottenhoofd kan in zijn geheel bewegen, naar voren of naar achteren en naar beneden of naar boven, dank zij een aantal spieren, die aangrijpen aan het borstbeen, aan de schedel of aan het tongbeen, dat weer met spieren verbonden is met de onderkaak, met de kin, met de tong, met de wervelkolom, met het borstbeen en met de sleutelbeenderen.

Alles wat zich boven de stemspleet bevindt vat men samen onder de naam aanzetstuk. In de eerste plaats is dat de eigenaardig gevormde ruimte vlak boven de stemspleet en nog in het strottenhoofd, de ruimte van MORGAGNI, die in de loop der jaren aanleiding heeft gegeven tot veel strijd op het punt van de acoustische betekenis. Aan de bovenkant wordt deze ruimte begrensd door de valse plooiën, die door spierwerking ook verschillende standen kunnen aannemen.

Daarop volgt de keelholte, die bij geopende mond ook met het ongewapende oog te zien is. De verbinding tussen strottenhoofd en keelholte hangt af van de stand van het strotklepje, dat bevestigd is aan de voorzijde en aan de onder- en achterkant van de tong. Dit klepje kan naar boven geklapt worden, zodat de toegang maximaal is, maar het kan ook naar beneden geklapt worden, zodat de weg afgesloten wordt. Dit komt b.v. voor tijdens het proces van een kuch. Tijdens de stemvorming neemt het klepje allerlei standen aan, afhankelijk van het register, van de toonhoogte, van de klinker en van de klankkleur van de klinker, waardoor het een vrij grote acoustische betekenis heeft.

De keelholte staat in verbinding met de slokdarm, die bij de normale stemvorming gesloten is en met de neusholte en de mondholte. Afhankelijk van de instelling van de mond, de stand van de tong en de stand van het zachte gehemelte, zijn de mondholte en de neusholte gelijktijdig in contact met de keelholte en de buitenlucht of is een van beide afgesloten.

De neusholte is constant van afmetingen, afgezien van de grootte van de opening naar de keelholte, die afhangt van de stand van

*) Het is bekend, dat de lengte van de plooiën afhangt van het geslacht, bij de man, die op lagere toon spreekt dan de vrouw, zijn zij het langst, en deze grotere lengte hebben zij gekregen gedurende de puberteit, waarbij men de daarmee gepaard gaande eigenaardigheden van de stem o.a. wel toeschrijft aan ongelijkmatige groei van de beide plooiën. Zie ook 2.4.3 en 4.7.2.

het zachte gehemelte. De grootte van deze opening en de variaties daarin hebben acoustische betekenis.

De mondholte kan zeer sterk gevarieerd worden en elke wijziging heeft invloed op het voortgebrachte geluid. De grove instelling wordt bereikt door de stand van de onderkaak en de vorm van de mondopening, terwijl de tong, daartoe in staat gesteld door een aantal spieren, vele vormen en standen kan aannemen, waardoor de meest subtiele variaties in het geluid teweeg gebracht kunnen worden.

1.3. Stemvorming

Gezien de vele aspecten van de stemvorming is een onderverdeling nuttig.

1.3.1. *Modulatie van de luchtstroom*

Bij de normale stemvorming heeft men altijd te maken met een modulatie van de constante luchtstroom, die door de longen geleverd wordt. Daardoor wordt op deze stroom een patroon gedrukt, waarin men verschillende frequenties kan onderkennen, die in het algemeen met ongelijke amplituden (sterkten) aanwezig zijn.

Deze modulatie kan op vele wijzen ontstaan, maar er zijn twee hoofdgroepen te onderscheiden, de stemhebbende en de stemloze klanken. Het begrip stem wordt hier dan in engere zin gebruikt, de indeling wordt namelijk gemaakt naar het al of niet in trilling zijn van de stemplooiën, wat men o. a. door betasten van het strottenhoofd kan constateren.

Tot de stemloze klanken behoren de fluisterstem (klinkers en medeklinkers) en sommige medeklinkers, die tijdens het spreken en zingen in afwisseling met de stemhebbende klinkers en medeklinkers gebruikt worden.

De medeklinkers, die gemeen hebben, dat het kortdurende verschijnselen zijn, worden ingedeeld, zie ZWAARDEMAKER en EYKMAN (1928), naar de wijze van modulatie, die op verschillende manieren en op verschillende plaatsen tot stand kan komen.

De gefluisterde klinkers ontstaan, doordat de lucht de geopen-de stemspleet passeert en bij vernauwingen in werveling raakt. Deze wervels hebben een ruis-spectrum.

De holten van het aanzetstuk bezitten verschillende eigen-frequenties, die voor het eerst door DONDERS (1858 en 1864), nauwkeurig werden aangetoond, later ook door vele anderen, zie 2.1.4. en 4.5., en zij halen dus uit het ruis-spectrum de bijpassende frequenties naar voren, SOVIJÄRVI (1938) en TOKIZANE (1951). De demping is echter vrij groot (halfwaardebreedten van enkele hon-

derden Hz, qualiteitsfactoren van 3 tot 40), zodat ook de frequenties in een vrij groot gebied om de eigenfrequentie heen nog behoorlijk versterkt worden. Aan deze frequentiegebieden geeft men sinds HERMANN de naam formanten.

Hoewel men met de fluïsterstem, overdreven bij het zogenaamde toneelfluïsteren, wel enige dynamiek kan bereiken, krijgt de stem toch pas zijn volle omvang en uitdrukkingmogelijkheid, wanneer het eigenlijke stemorgaan, het strottenhoofd, ten volle benut wordt.

Daardoor ontstaan dan de stemhebbende klinkers, die de dragers zijn van de gesproken of gezongen tekst (en daarvan omstreeks 50% van de tijd in beslag nemen) en tevens de stemhebbende medeklinkers, waarbij de stemplooiën nog op verschillende manieren betrokken kunnen zijn, ZWAARDEMAKER en EYKMAN (1928).

Wanneer de stemplooiën in trilling geraken hoort men de voortgebrachte klank op een toonhoogte, die gelijk is aan de frequentie waarmee de plooiën trillen.

1.3.2. *Spreekstem en Zangstem*

Vergelijkt men de spreekstem met de zangstem, met elk hun vele variaties, KAISER (1950), SCHEMINTZKY (1935), dan valt direct op, dat de overgangen bij het spreken zeer snel kunnen zijn, BACKHAUS (1932), STEINBERG (1934), LOTTERMOSER (1950), zowel wat de toonhoogte als wat het geluidsvolume betreft en de overgangen zijn vloeiend, terwijl bij het zingen de frequentie-overgangen abrupt zijn, door de gebondenheid aan de toonladder, bij een veel meer constant gehouden volume. Bij het zingen worden vooral de klinkers langer aangehouden, waardoor men het acoustische karakter van een klinker beter kan beoordelen.

Dit wil niet zeggen, dat een lang aangehouden klinker meer informatie voor de klankontvanger bezit. Integendeel, het is bekend, dat men tijdens het lang aanhouden van een klinker onzeker raakt over de aard van de klinker, nog afgezien van de moeite, die het een zanger kost om een klinker gedurende lange tijd met dezelfde klankkleur te zingen. Alle constructeurs van spreekmachines hebben, sinds VON KEMPELEN, die veel aandacht schonk aan de contrastwerking, hiermee rekening gehouden.

Tijdens het spreken en zingen is het aanzetstuk voortdurend in beweging, omdat de spraakklanken op zeer uiteenlopende manier geproduceerd worden. Het vormen van de klanken, de articulatie, gebeurt op verschillende plaatsen en door verschillende elementen, deze worden samengevat onder de naam articulatoren en de voorname zijn in fig. 1 aangegeven.

1.3.3. *Abnormale methoden*

Bij de normale stemvorming speelt de periodieke interruptie van de luchtstroom door de stemplooien en de verdere modulatie van het daar gevormde "basis-geluid" door het aanzetstuk een zeer grote rol, omdat de klinkers, in hun bonte verscheidenheid, alle stemhebbend zijn. In sommige gevallen moet een patient, wegens pathologische afwijkingen, het strottenhoofd echter missen en moet hij verder ademen door een opening in zijn luchtpijp, terwijl zijn aanzetstuk ter hoogte van het strottenhoofd afgesloten wordt of er wordt een gedeelte van het strottenhoofd weggenomen, terwijl de opening later weer gesloten wordt. Er bestaan dan nog enkele interessante methoden om tot de productie van een "basis geluid" te komen, dat dan weer door de geschikte articulatie tot zinvolle spraakklanken gevormd wordt, VAN GILSE (1951).

Een methode bestaat in de zogenaamde slokdarmspraak. De patient slikt lucht in en bewaart deze in de slokdarm, waarna de lucht geleidelijk wordt uitgedreven, waarbij de mond van de slokdarm in trilling komt en zo de functie van het strottenhoofd overneemt, VAN GILSE (1930), HUIZINGA EN MOLENAAR-BIJL (1941 en 1953).

Een veel lastiger techniek bestaat in het nemen van lucht tussen de wangen en de tanden, waarna de lucht langzaam wordt uitgeknepen. Ook hierbij kunnen trillingen ontstaan, die bij de juiste articulatie het oorspronkelijke "basis geluid" kunnen vervangen, VAN GILSE (1951). Het geluid kan ook ontstaan door zuigbewegingen, waarbij de tong gebruikt wordt, de zogenaamde klikken.

Een curieuze mogelijkheid is nog in de literatuur beschreven onder de naam: *The talking frog of Marion County*, Hauser (1947). Het betreft hier een patient, die een kleine kikker in de mond neemt, waarbij de samenwerking zo goed is, dat de kikker op het juiste moment gaat kwaken.

1.3.4. *Horen van de eigen stem*

Bij de stemvorming is het zeer belangrijk, dat de klankgever de eigen klank kan horen, zodat hij deze kan controleren.

Het gehoororgaan kan op twee manieren de trillingen ontvangen, door geleiding via de beenderen en spieren, v. BÉKÉSY (1949) en door geleiding via de lucht. Bij de stemhebbende klanken is het strottenhoofd namelijk in sterke trilling en deze plant zich o.a. voort naar het gehoororgaan. Daardoor kan men ook direct uitmaken of een klank stemhebbend is of niet. De geleiding hangt af van de frequentie, ze neemt, globaal genomen, met toenemende frequentie af.

Dat het horen van de eigen stem, door de gewenning, belangrijk is, blijkt o.a. uit het feit, dat een proefpersoon die in een

ruimte komt, die acoustisch gezien sterk afwijkt van de ruimten, waarin wij gewend zijn te leven, eerst enige tijd nodig heeft om te acclimatiseren. Het heeft dan geen zin om te beginnen met de proeven, voordat de proefpersoon zich ingesteld heeft op de zo andere klank van de geluiden, die hij toch op de van ouds bekende wijze produceert, want anders is hij nog voortdurend aan het experimenteren, om te trachten door kleine veranderingen in het aanzetstuk de herinneringsklank te benaderen, zie ook Hoofdstuk III, IV en VI.

1.3.5. *Energie*

Het is bekend, dat alle muziekinstrumenten, die door wind gedreven worden (zoals trouwens alle andere muziekinstrumenten) een gering nuttig effect hebben. De uitgezonden acoustische energie is slechts een fractie van de mechanische energie, die ten koste gelegd moet worden aan het drijven van de blaasbalg. Zo is het nuttig effect van een orgelpijp omstreeks 1%. Het overgrote deel van de energie gaat verloren in de vorm van wrijvingswarmte en met de zogenaamde wilde lucht.

Bij de stemvorming is het nuttig effect nog veel kleiner, omdat de blaasbalg zelf reeds met een gering nuttig effect werkt. De ademhalingspijpen grijpen niet loodrecht op het oppervlak aan, maar zijn daar langs gericht en een beweging van het middenrif moet gepaard gaan met veranderingen in de buikholte. Daardoor wordt hier niet het nuttig effect van 25% bereikt, dat men vindt bij actie van b.v. de arm- en beenspieren. Bovendien komen er nog wrijvingsverliezen, wanneer de longen van vorm veranderen. Het nuttig effect van de betrokken spieren (uitgaande van de verhoging van de stofwisseling) kan op 1 à 2 % gesteld worden en de energie van de luchtstroom wordt voor ca 1% in acoustische energie omgezet, zodat het nuttig effect van de stemvorming als totaal ongeveer $1,5 \cdot 10^{-5}$ bedraagt, geciteerd naar KAISER (1949).

De druk onder de stemspleet tijdens het spreken kan op rond 15 cm water gesteld worden, terwijl luid roepen tot 10 keer zo grote waarden kan geven. Bij het gedragen zingen zijn de waarden kleiner. Zoals men eenvoudig zelf kan constateren, is de druk, die men bij afgesloten mond en neus kan opbrengen rond 1 m water en bij een plotselinge stoot rond 2,5 m water.

Tijdens het zingen of spreken werd een luchtverbruik gemeten van 20-200 cm³/sec., geciteerd naar KAISER (1949) en WEGEL (1930). HOOYKAAS (1935) constateerde bij de afzonderlijke lettergrepen, klinkers en medeklinkers gemiddeld een luchtverbruik van 80, 20 resp. 30 cm³.

De energie van de spreekstem hebben SACIA en SIVIAN (1925) bepaald op 10 μ W, bij normale spraak en gemiddeld over een langere periode, met piekwaarden tot 2000 μ W.

1.3.6. *Spectrale verdeling*

Verschillende onderzoekers hebben de energie van de spraak als functie van de frequentie bepaald. Deze verdeling is vooral van belang voor de communicatietechniek. Bezielt men het gemiddelde voor alle gangbare spraakklanken, dan kan gezegd worden, dat de energie na een maximum bij ca 180 Hz met toenemende frequentie afneemt, CRANDALL en MACKENZIE (1922).

De afzonderlijke spraakklanken vertonen onderling echter zeer grote verschillen. De ratelmedeklinker r heeft b.v. een uitgesproken maximum bij omstreeks 10 Hz, de explosieve medeklinkers p, t, h hebben vrijwel een ruis-spectrum, de sis-klanken hebben een ruis-spectrum, zie ook p.16, dat tot zeer hoge frequenties voortgezet wordt en de klinkers hebben hun karakteristieke formanten.

Voor het waarderen van de resultaten moeten natuurlijk ook de oorgevoeligheidskrommen in rekening gebracht worden, omdat de gevoeligheid van het oor sterk afhangt van de frequentie.

1.3.7. *Verdeling om het eigen hoofd.*

Onderzoekt men het geluidsmengsel op verschillende afstanden van de mond, dan blijkt, dat de samenstelling afhangt van de plaats en van de orientatie t.o.v. het hoofd, DUNN en FARNSWORTH (1938).

Theoretisch interessante resultaten krijgt men natuurlijk slechts, indien deze proeven genomen worden in echo-vrije ruimten, zodat men geen last heeft van reflecties aan de wanden. Onder sterk vereenvoudigde omstandigheden kan deze verdeling dan theoretisch afgeleid worden, MORSE (1936).

De genoemde afhankelijkheid ontstaat, doordat het mengsel uit vele golven, met verschillende golflengten, opgebouwd is. De stralingseigenschappen van de mond hangen namelijk sterk van de golflengte af en de buiging om het hoofd en de romp evenzeer. *)

1.4. **Probleemstelling**

1.4.1. Gedragen klinkers. Van oudsher heeft men bij het onderzoek van de stemvorming de nadruk gelegd op de stemhebbende klanken en dan speciaal op de klinkers. Zoals reeds werd opgemerkt, vormen de stemhebbende klinkers immers de dragers van de gesproken of gezongen tekst.

*) Dit effect komt overeen met dat bij luidsprekers: het nuttig effect van een luidspreker neemt toe wanneer de golflengte kleiner wordt, tot deze van de orde van de omtrek van de conus van de luidspreker is van URK en VERMEULEN (1939) en DE BOER (1939), maar tevens wordt het geluid steeds meer in voorwaartserichting geconcentreerd, wat men in de praktijk door verschillende kunstgrepen, b.v. klankverstrooiers, moet compenseren.

De medeklinkers, overgangen tussen twee klinkers of begin en einde van een spraakklank, zijn kortdurend en daarom is het moeilijk om de bijdrage van alle factoren, die aan de modulatie meewerken, afzonderlijk te bepalen. De primaire modulatie heeft dikwijls het karakter van de ruis en het is in de praktijk niet mogelijk om exact te bepalen, of, en hoe, de holten modulerend werken op dit spectrum. Deze bijdrage is namelijk afhankelijk van de duur van het verschijnsel, die dikwijls van de orde van grootte van de inslingertijd *) van de holten is en tijdens het kortdurende signaal is het aanzetstuk dan nog voortdurend in beweging, zodat er effectief minder tijd overblijft voor het opslingeren van de holten. Bovendien hangt het eventuele bedrag van de modulatie door de holten sterk af van de articulatieplaats. Door al deze oorzaken moet men voor het onderzoek van de medeklinkers andere methoden gebruiken dan voor dat van de klinkers.

Zoals later nog zal blijken (hoofdstuk II), vormen de klinkers een eenheid, waarbij men ze, ondanks alle verschillen, als op dezelfde wijze ontstaan moet denken; er zijn slechts modificaties van een algemeen proces. De medeklinkers zijn daarentegen niet als één groep te beschrijven, omdat de wijze van modulatie voor elke medeklinker weer anders is. De karakteristieke invloed van het aanzetstuk kan dan ook alleen bij de klinkers exact bepaald worden.

Dat men zich concentreerde op het onderzoek van de klinkers berustte mede op de overweging, dat de overgangverschijnselen slechts dan begrepen kunnen worden, wanneer het stationnaire karakter voldoende bekend is.

De moeilijkheden met de medeklinkers zijn bovendien niet van principiële aard. In theoretisch opzicht leveren zij geen nieuwe gezichtspunten.

Is het bij de medeklinkers dus zo, dat onze kennis omtrent de modulatie en hoe deze veroorzaakt wordt, van zeer globale aard is, bij de klinkers en vooral bij de lang aangehouden, gedragen klinkers kan het kwantitatieve meer de nadruk krijgen.

Over de relatieve bijdrage van klinkers en medeklinkers tot de totale informatie-inhoud van de spraak is hiermede niets gezegd.

Wij kunnen hier onderscheid maken tussen de objectieve informatie, die vastgesteld kan worden door wiskundige analyse van de door een goede opneem-apparatuur geregistreerde klank en tussen de subjectieve informatie, die dezelfde klank voor een klankontvanger bezit. Deze laatste hangt tevens af van de waarnemings-eigenschappen van het oor.

*) Wanneer men een op een bepaalde frequentie afgestemde kring, b.v. een resonantieholte, plotseling bekrachtigt, dan duurt het enige tijd voordat de kring geheel op gang gekomen is, zie ook 4.1.2.

Hoewel reeds veel bekend is over de analyse van een samengestelde klank door het gehoororgaan, begint men toch pas in de laatste tijd met het definiëren van de informatie-inhoud in verband met de bekende eigenschappen van het oor, zoals halfwaardebreedte en tijd waarover geïntegreerd wordt bij de analyse, JACOBSON (1951), PETERSON (1952). Wellicht zal men daardoor dan eindelijk kunnen komen tot een definitie van kwalitatieve en zangtechnische begrippen over de stem, zoals sonoriteit, rijkdom, enz., welke begrippen tot nu toe in hoofdzaak op subjectieve waardering berusten, met alle consequenties daaraan verbonden.

Het zal ook opgevallen zijn, dat wij ons zorgvuldig hebben onthouden van het geven van een definitie van het begrip klinker. Een scherpe definitie is namelijk niet mogelijk, zo lang niet vast staat, welke elementen, die bij een analyse van de objectieve informatie aanwezig blijken te zijn, essentieel zijn in verband met de door het gemiddelde oor te ontleenen subjectieve informatie.

Dat men bij informatie-inhoud inderdaad onderscheid moet maken tussen objectieve en subjectieve informatie blijkt o.a. uit de ervaringen van de communicatietechnici, FLETCHER (1929). Deze hebben, uit het oogpunt van economie, onderzocht, met welke minimale bandbreedte men bij de transmissie nog juist toe kan en het bleek, dat men zonder bezwaar voor de subjectieve inhoud (intelligibility) grote frequentiegebieden kan afsnijden, gebieden, waarin wel degelijk frequenties voorkomen, die voor het patroon vandetrillingen van belang zijn. In het algemeen kan men zeggen, dat het voldoende is, wanneer de klinkers goed doorgegeven worden. In ons land laat men langs de intercommunale lijnen de frequenties van de 300-3400 Hz door.

Evenals bij het lezen van een verminkte tekst is voor het interpreteren van de spraakklanken een gedeelte van de objectieve informatie voldoende en men heeft wel gezegd, dat dit een essentiële voorwaarde is voor het op grote schaal commercieel gebruiken van de telefoontechniek, waardoor de informatie ook op andere wijze nog belangrijk verminkt wordt. Objectieve gegevens over de transmissie van een telefoonlijn kan men dan ook alleen verkrijgen, wanneer als over te seinen en waar te nemen tekst geen gangbare zinnen maar abacadabra wordt gebruikt.

Bij het waarden van muziek liggen de verhoudingen al heel anders. Daar moet men een transmissielijn met een veel grotere bandbreedte (50-10.000 Hz in ons land) gebruiken, de zogenaamde muzieklijn, en een gesprek langs een dergelijke lijn, waarbij microfoon en telefoon natuurlijk ook goed moeten zijn, is een openbaring. De medeklinkers en de karakteristieke eigenschappen van de stem van de spreker komen nu veel beter door. Dit spreekt

vanzelf voor een ratel-medeklinker met zijn lage frequenties en voor een sis-klank met zeer hoge frequenties, maar ook de overgangen, de snelle wisselingen komen nu pas tot hun recht en men weet, dat ook bij het herkennen van een muziekinstrument de wijze van inzetten en uitsterven van groot belang is, BACKHAUS (1932), F.TRENDELENBURG c.s. (1938). Snijdt men grote frequentiegebieden af, dan is de spraak nog wel verstaanbaar, maar de individuele eigenschappen van de spreker gaan verloren.

Ook op ander gebied, b.v. bij de waardering van diverse methoden van transmissie door codering, OLIVER, PIERCE en SHANNON (1948) en SHANNON (1949), SCHOUTEN, JAGER en GREEFKES (1951) en bij de methoden van de Visible Speech, STEINBERG en FRENCH (1946) en J. Acoust. Soc. Am. 1946 en 1947, werkt een beschouwing vanuit de informatie-theorie verhelderend. Bij de Visible Speech, die o.a. belangrijk kan worden voor het onderwijs van doofstommen, is men er b.v. toe overgegaan, ten einde economisch te kunnen werken zonder evenwel te weinig informatie te geven, om het patroon, dat aan het oog wordt aangeboden, te laten "corresponderen" met de waarneming door het normale oor, uitgaande van de daarvan bekende eigenschappen.

1.4.2. *Physica van de stemvorming, met toepassingen*

Over de wijze van productie van de in acoustisch opzicht zo belangrijke en tevens zo eenvoudige klinkers heerst nog geen eenstemmigheid en er bestaat nog veel verwarring, ook in de hedendaagse literatuur. De algemene redenen daarvoor zijn reeds in paragraaf 1.1 aangegeven.

De belangrijke vragen waren nog steeds:

- a. Leveren de stemplooien inderdaad de primaire modulatie.
- b. Hoe komt de primaire modulatie in dat geval exact tot stand.
- c. Hangt de trillingswijze van de stemplooien af van de klinker (klinkerpatroon) en welk effect kan dit hebben.
- d. Hoe ziet het spectrum van deze generator er dan uit.
- e. Wat is de functie van de ruimte van Morgagni en van de valse stemplooien.
- f. Werkt het aanzetstuk uitsluitend amplitudomodulerend.
- g. Hoe moeten de gevolgen van de terugkoppeling van het aanzetstuk op het strottenhoofd verklaard worden.

De physica van de stemvorming was dus nog allerminst begrepen en het gevolg was, dat verschillende praktische kwesties niet op de juiste wijze verklaard konden worden.

Nadat wij door het onderzoek naar de waarde van de opvatting van de physici Savèrt en Guillemin over het karakter van de stemvorming, zie hoofdstuk VI, in aanraking waren gekomen met deze

interessante kwesties *), werd dit al spoedig als een leemte gevoeld.

Wij hebben daarom getracht om te komen tot een uitgewerkte, sluitende en fysisch gefundeerde theorie over de stemvorming, waarbij tevens verschillende toepassingen besproken werden.

Over de resultaten van dit onderzoek wordt verslag gegeven in de volgende hoofdstukken.

1.5. Opzet van het eigen onderzoek

Het gestelde doel hebben wij nagestreefd door:

1. Proeven met een man met een hemilaryngectomie **), hoofdstuk IV. Met behulp van een speciaal geconstrueerd keelluidsprekertje konden de eigenschappen van het natuurlijke aanzetstuk nauwkeurig onderzocht worden. Door berekeningen over modellen en over verschillende organen konden wij hier verder komen. Daardoor kon de koppeling van het aanzetstuk aan het strottenhoofd begrepen worden en konden wij een theoretische conclusie over het spectrum van de generator toetsen.
2. Proeven met dezelfde man, hoofdstuk V, over de nabootsing van de klinkers en de medeklinkers. Hierdoor konden de verschillende opvattingen getoetst worden.
3. Proeven met normale proefpersonen, die ademen uit afwijkende gasmengsels en dan zingen, hoofdstuk VI. Deze vormen een controle op de theorie van SAVART en GUILLEMIN en op de conclusies van de voorgaande hoofdstukken.
4. Critische verwerking van de gegevens uit de belangrijke literatuur uit de Duitse, Angelsaksische, Nederlandse, Japanse en Franse wereld. Dit mede met het oog op de praktische toepassingen ***).

Verder wordt een eigen mening over de functie van de ruimte van Morgagni nader uitgewerkt, hoofdstuk VII en wordt de recente theorie van HUSSON over het wezen van de stemvorming weerlegd, hoofdstuk VIII.

Op deze hoofdstukken heeft hoofdstuk III een korte inleiding.

Het nu volgende hoofdstuk II geeft onze theorie over de stemvorming, die gebaseerd is op de resultaten van de eigen proeven, berekeningen en beschouwingen en waarin vele resultaten van anderen verwerkt zijn. De belangrijke literatuur wordt voor het merendeel in dit hoofdstuk besproken.

*) Dank zij een artikel van Dr L.Kaiser.

**) Dank zij de welwillende medewerking van Prof. Dr E. Huizinga, directeur van de keel-, neus- en oorheelkundige kliniek te Groningen die ik daarvoor nog hartelijk dank zeg.

***) Hierdoor kwamen wij b.v. op het spoor van een nieuw type koppeling, zie 8.2.

Voor de **quantisering** van de verschillende begrippen wordt telkens verwezen naar de volgende hoofdstukken.

Dit hoofdstuk wil niet enkele detailpunten maar het geheel van de stemvorming bespreken, voorzover het in dit kader van belang is. Verschillende praktische toepassingen worden eveneens besproken.

II

THEORIE EN PRACTIJK VAN DE STEMFORMING EN VAN DE ANALYSE DAARVAN

2.0. Inleiding

In dit hoofdstuk geven wij een theorie van de stemvorming, die gebaseerd is op de eigen proeven, berekeningen en beschouwingen van de volgende hoofdstukken en tevens in ruime mate op gegevens uit de literatuur. Wij menen, dat op deze wijze een sluitend geheel verkregen is.

Naast de theorie komen ook verschillende praktische kwesties ter sprake, o.a. over de juiste wijze van analyseren in verband met de eigenschappen van het oor en over de constructie van spreekmachines, omdat daarmee ervaringen zijn opgedaan, die ook van belang zijn voor het begrijpen van de normale stemvorming.

De verschillende aspecten van de stemvorming bij de gedragen klinkers worden het best overzien aan de hand van een indeling:

Men kan de modulatie, zoals deze zich laat registreren aan het signaal, dat de mond verlaat, namelijk opvatten als het product van een drietal factoren. In formule

$$M = F.M. \times A.M. \times K.$$

De modulatie M stellen wij ons dan voor als de resultante van de frequentiemodulatie $F.M.$, de amplitudomodulatie $A.M.$ en de koppeling K .

Onder frequentiemodulatie, een term, die wat erfelijk belast is door de radiotechniek, verstaan wij dan het proces, dat zich bij de stemplooiën afspeelt, wat tevoren aangegeven werd met basisgeluid en primaire modulatie. Door het openen en sluiten van de stemspleet wordt op de constante luchtstroom een patroon gedrukt, waarin frequenties te herkennen zijn.

Wil men een Fourier-analyse toepassen, dan zullen behalve de grondtoon ook vele hogere harmonischen aangetroffen worden, met een zekere verdeling van de amplituden *).

Door de amplitudomodulatie wordt dan aan elke component een amplitudo gegeven overeenkomstig de resonantie-eigenschappen van

*) Elke periodieke trilling, hoe ingewikkeld ook, kan formeel opgebouwd worden met behulp van sinusvormige trillingen, met frequenties die alle een veelvoud (harmonischen) zijn van de herhalingsfrequentie van de periodieke trilling. De sterkte (amplitudo) van elke component en de manier van optellen (phase) hangt dan nog van de aard van de periodieke trilling af.

het aanzetstuk, uitgedrukt in de betreffende transmissiekromme.

Van deze beide factoren geldt, dat A.M. onafhankelijk is van F.M., maar dat F.M. niet onafhankelijk is van A.M.

Integendeel, het aanzetstuk is gekoppeld aan de stemspleet en heeft invloed op de trillingen, die daar ontstaan. Deze afhankelijkheid is ondergebracht in de aparte factor K, wegens de belangrijkheid van de effecten, die daardoor onder bijzondere omstandigheden voorkomen *).

2.1. Modulatie

2.1.1. Experimentele methoden

Aan de registratie van de door de klankgever veroorzaakte modulatie moet men de eis stellen, dat het voor de stem belangrijke frequentie gebied binnen de band van de gezamenlijke apparatuur valt en dat de frequentie-karakteristiek voor dit gebied binnen enkele db vlak is. Is aan deze laatste voorwaarde niet voldaan, dan zal bij de bewerking van de resultaten een tijdrovende correctie nodig zijn. Eventuele conclusies hebben bovendien slechts dan zin, wanneer tevens opgegeven is, hoe de eigenschappen van de ruimte zijn en hoe de microfoon opgesteld was.

Op de registratie van de klank zal in het algemeen een analyse volgen, hetzij praktisch momentaan, hetzij na afloop van het hele verschijnsel, via de opgenomen strook (film of magnetische draad of band).

Daarbij komt men direct tot de vraag, aan welke voorwaarden deze analyse moet voldoen **). Het antwoord hierop hangt af van het doel van de analyse. Men kan de modulatie onderzoeken met het doel om eigenschappen van de klankgever vast te leggen, dus afgezien van de betekenis die de klank heeft als communicatiemiddel en in dit geval zullen b.v. de phaserelaties tussen de samenstellende delen van belang zijn en men kan de modulatie onderzoeken met het oog op de informatie, die de klank bezit voor de klankontvanger, waarbij de phasebetrekkingen, binnen zekere grenzen, SCHOUTEN (1939 en 1940), niet van belang zijn.

In de meeste gevallen is de informatie het doel en zal het voordelen hebben om de analyse aan te passen aan de eigenschappen van het oor, waardoor een aanmerkelijke vereenvoudiging verkregen wordt.

*) Het in rekening brengen van de koppeling komt overeen met het verantwoorden van de inwendige weerstand van een geluidsbron.

***) Bij een ander type van de analyse komt men namelijk een andere groepering van de eigenschappen op het spoor. Dit triviale feit wordt dikwijls vergeten.

Bij de gedragen klinkers, speciaal wanneer het vibrato zoveel mogelijk onderdrukt is, vindt men, dat, afgezien van de inzet en het uitsterven, de verschillende perioden een getrouwe copie zijn van elkaar. Het blijkt, dat men in dit geval kan volstaan met de analyse van één periode. Algemeen geformuleerd: de analyse van één enkele periode is voldoende, wanneer de grondtoon van deze periode hoog genoeg is, namelijk veel groter dan omstreeks 20 Hz, de bandbreedte van de frequentie onderscheiding door het oor, naar MEYER-EPPLER (1949 en 1950), en wanneer de wisselingen gedurende het voortbrengen van de klank langzamer zijn dan overeenkomt met een frequentie van 20 Hz. Dit wil b.v. zeggen, dat men de r, een ratelmedeklinker met belangrijke frequenties bij ongeveer 10 Hz, niet goed analyseert, wanneer men slechts één periode uitkiest.

De resultaten van proeven waarbij het ging om het herkennen van de klinker, wanneer slechts korte uitgesneden stukken aan het oor aangeboden werden, zijn hiermee in overeenstemming. GEMELLI en PASTORI (1934^a) vonden, dat 2 perioden voldoende waren, volgens MENZERATH (1941) was 1 periode reeds voldoende. Voor het herkennen van de toonhoogte van een enkelvoudige toon zijn ca 4 perioden bij 100 Hz tot 12 bij 1000 Hz en 250 bij 10.000 Hz nodig, BÜRCK, KOTOWSKI en LICHTÉ (1936). Dat men voor het herkennen van de klinker een kleiner aantal perioden nodig heeft wordt veroorzaakt door de bouw van de afzonderlijke perioden. Deze bevatten namelijk ook hogere frequenties, waarvan een evenredig groter aantal perioden samenvalt met een periode van de grondtoon. Het is tevens waarschijnlijk, dat de herkenning van de klinker samenhangt met een overschot aan informatie.

Wanneer de wisselingen gedurende de stemvorming vrij snel zijn is de analyse van één periode niet voldoende. In dit geval moet men andere methoden toepassen, b.v. die van LABROUSTE-VERCELLI *), GEMELLI en PASTORI (1934^b) en TOMEY (1944), waarbij ook de zogenaamde anharmonischen gevonden worden. Op de wijze van analyseren van één enkele representatieve periode, komen wij in de volgende paragraaf terug.

Wanneer de analyse bedoeld is om eigenschappen van de klankgever op te sporen, dan zullen de eisen die men er aan moet stellen afhangen van het speciale aspect. Een algemene formulering is dan ook niet te geven.

De oorspronkelijke literatuur over de verschillende methoden van registratie en analyse is over vele periodieken verspreid. MEYER-EPPLER (1950) gaf een fraai overzichtsartikel, waarin de literatuur tot begin 1950 verwerkt is. Na die tijd is slechts één essentieel nieuwe methode ontworpen, namelijk door HUGGINS (1952 a en b)

*) Echter onder voorbehoud, zie 2.1.2.

Men kan met MEYER-EPPLER de volgende indeling maken: 1. Simultane analysatoren, waarbij de complexe trilling gelijktijdig aan een groot aantal kanalen wordt toegevoerd, die elk voorzien zijn van een filter, terwijl de uitgangsspanning van elk kanaal wordt opgetekend als functie van de tijd. Het doorlaatgebied van de filters verschuift daarbij van kanaal tot kanaal, zodanig, dat het hele spectrum bestreken wordt. 2. Zoekfiltermethoden, waarbij men de complexe trilling toevoert aan een filter, waarvan men het doorlaatgebied het spectrum laat doorlopen. 3. Analysatoren met ruimtelijke periodiciteit, waarbij de standaardfrequenties, waarmee de te onderzoeken trilling vergeleken moet worden, afgeleid worden uit een ruimtelijke periodiciteit (interferentie-spectroscop, buigingsrooster enz.) en 4. Zoektoon-methoden, waarbij de elektrische trilling, die het acoustische signaal vertegenwoordigt, gemengd wordt met een trilling met continu in te stellen frequentie, die het hele spectrum doorloopt. De resulterende trilling voert men dan toe aan een filter met vaste instelling, dat aangeeft, wanneer een mengfrequentie overeenkomt met de frequentie van het filter, zie hoofdstuk VI.

HUGGINS past wel een zoektoon-methode toe, maar gebruikt daarbij filters in een speciale schakeling, waardoor de uitslagen afhangen van de fasen in de samengestelde trilling (het door nul gaan van de componenten) en niet van de amplituden. Hij bereikt daarmee een scheiding tussen de zogenaamde structurele informatie van het signaal, die de eigenschappen van de klankgever vertegenwoordigt (de klinker geeft informatie over de instelling van het aanzetstuk) en de tijdsafhankelijke informatie van het signaal, die aangeeft, hoe de proefpersoon gebruik maakte van deze eigenschappen.

Om de eigenschappen van de klankgever te leren kennen zal men in vele gevallen tegelijk met het acoustische signaal de afmetingen en de instelling van het aanzetstuk willen registreren. Dit kan op vele manieren gebeuren, b.v. met de keelspiegel en de larynxperiscoop, met stroboscopie, door Röntgen foto's, door Röntgen stroboscopie, door vastlegging van de stand van de lippen, de onderkaak en het strottenhoofd en door afgietsels van het inwendige van de mond. Overzichten van deze methoden zijn te vinden bij ZWAARDEMAKER en EYKMAN (1928), bij FROSCHELS, HAJEK en WEISS (1937) en bij L. KAISER (1939-1944), met een zeer uitvoerige literatuurdocumentatie.

2.1.2. *Stemvorming en Analyse. Historische strijdvragen.*

Over de aard van de modulatie en de doeltreffende analyse ervan is gedurende het laatst van de 19e eeuw en het begin van onze eeuw een verwoede strijd gevoerd tussen Hermann en zijn volgelingen.

gen en de volgelingen van „Helmholtz”, waarvan de nasleep nog in de hedendaagse literatuur wordt aangetroffen, in de vorm van begripsverwarring.

Tot 1700, toen DODART (1700, 1706, 1707) zijn beschouwingen en onderzoeken publiceerde, gold nog de opvatting van de antieke wereld, dat de stem gevormd wordt door de luchtpijp, die als een fluit zou werken. GALIEN had wel, omstreeks 200 n. Chr., aangegeven, dat de stemspleet het eigenlijke stemorgaan was, maar hij handhaafde de fluitende luchtpijp nog. DODART maakte duidelijk, dat het strottenhoofd het eigenlijke stemorgaan moet zijn en dat de luchtpijp een ondergeschikte rol speelt. Hij wilde echter alles verklaren door slechts naar de doorsnede van de stemspleet te zien. De wisselingen in de sterkte en de toonhoogte zouden het gevolg zijn van verandering van deze doorsnede en van wijziging van de hoeveelheid lucht, die passeert, terwijl de stemplooiën passief zouden zijn (hoewel ze door het schuren van de lucht wel wat in trilling zouden kunnen komen.)

Hij trachtte alles te verklaren met wat wij tegenwoordig wrijvingstonen noemen (zie hiervoor 6.4.) en kwam daardoor tot een gekunstelde theorie. Hiertegen verzette FERREIN (1741) zich, die als eerste experimenten met het strottenhoofd van cadavers beschreef.

FERREIN, die evenals DODART meestal niet correct geciteerd wordt, constateerde, dat het in trilling geraken van de stemplooiën essentieel is. Het bleek daarvoor noodzakelijk te zijn om de plooiën naar elkaar toe te brengen, want anders spraken de praeparaten bij nog zo hoge druk niet aan. De term „cordes vocales” of „vocal cords” is van FERREIN afkomstig. Hij vatte het stemorgaan op als een „instrument à cordes et à vent”. Daarmee bedoelde hij, dat het geluid het directe gevolg is van de trilling van de plooiën, omdat deze door hun trilling zelf geluid zouden geven. Deze mening heeft zich ongeveer een eeuw lang kunnen handhaven (o. a. JOH. MÜLLER, die zeer veel bijgedragen heeft tot de kennis van de physiologie van het strottenhoofd, vooral door middel van proefnemingen met praeparaten, was deze mening nog toegedaan). HELMHOLTZ zag echter al in, dat het geluid praktisch volledig het gevolg is van het stootsgewijs passeren van de lucht tussen de stemplooiën.

Dat de modulatie verder afhangt van de resonantie-eigenschappen van de holten, was in de dagen van Ferrein reeds gemeengoed.

Eerst in 1830 kwam Willis met een nieuwe, belangrijke bijdrage. Hij toonde aan, dat een klinker nagebootst kan worden door een snelle en sterk gedempte trilling in een bepaald rythme te herhalen. Bij een voldoende hoge herhalingsfrequentie versmelten de afzonderlijke impulsen en hoort men een klank met als grond-

toon de herhalingsfrequentie, terwijl de overige kwaliteiten van de klank afhangen van de frequentie en de demping van de afzonderlijke impulsen. Tevens vond hij, dat de klinkers benaderd konden worden, door op een aangedreven tong een cilindrische buis met variabele lengte aan te sluiten. Met een verandering van de lengte van de buis correspondeert een verandering van de klinker, en eenzelfde klinker kon met verschillende lengten van de buis verkregen worden, terwijl deze lengten een eenvoudig verband hadden.

Van deze laatste eigenschap gaf WHEATSTONE (1837) een eenvoudige verklaring, door de resonantie van de buis terug te brengen tot een aanspreken op de verschillende harmonischen van de grondtoon van de tong.

HELMHOLTZ gaf in zijn boek: Die Lehre von den Tonempfindungen (1863) een kort overzicht over de stemvorming, als schakeltje in het geheel, dat aanleiding werd tot de reeds genoemde strijd, waaraan men ten onrechte zijn naam verbindt. Bij Helmholtz stond de betekenis van de klank als communicatiemiddel op de voorgrond, zoals in het bijzonder blijkt uit zijn opmerking over de eerstgenoemde proeven van WILLIS. Hij zegt daarvan, dat deze waarschijnlijk goed aangeven hoe de klinkers geproduceerd worden, maar dat dit niets zegt over de waarneming ervan. In verband met deze waarneming en de opvattingen die hij daarover had, ging hij uit van een Fourier-analyse van de glottis (stemspleet) toon, waarbij de transmissie (overdracht) van de verschillende frequenties zal afhangen van de eigenschappen van het aanzetstuk. Op grond van zijn proeven over de nabootsing van klinkers met behulp van een aantal electrisch aangedreven stemvorken, waarvan de frequenties harmonischen waren van eenzelfde grondtoon, besloot hij, dat phaserelaties niet van belang waren. Tegenwoordig weten wij, dat deze wel enige betekenis hebben voor het timbre van de klinker, SCHOUTEN (1939 en 1940).

Toen HERMANN (samenvatting 1911) met verbeterde methoden de modulatie nauwkeuriger kon registreren bleek, dat deze in vele gevallen, vooral bij lage grondtonen, eenvoudiger verklaard kon worden in analogie met de proeven van WILLIS. De curve kon opgevat worden als het gevolg van het herhaalde aanstoten van een resonator, waarbij de trilling telkens weer snel uitsterft. De zo gevonden eigenfrequenties noemde HERMANN de formanten van het aanzetstuk. Bij een Fourier-analyse volgens HELMHOLTZ vindt men, dat de transmissie maximaal is in het gebied rondom de eigen frequentie.

HERMANN en zijn medestanders, die de modulatie in hoofdzaak vanuit de productie beschouwden, meenden, dat men voor de verklaring van de modulatie niet kon uitgaan van een grondtoon met har-

monischen ter plaatse van de stemspleet en hierdoor ontbrandde de strijd met een aantal onderzoekers, die dit aspect van de theorie van HELMHOLTZ verdedigden.

De discussie onttaarde al spoedig tot een twist over de vraag of de klinker opgebouwd is uit harmonischen van de grondtoon of dat ook anharmonischen aanwezig zijn. Dit is des te merkwaardiger omdat HERMANN zelf zeer goed inzag, dat elke curve met een vaste periodiciteit formeel volgens FOURIER te analyseren is.

Zijn bezwaren betroffen in hoofdzaak het feit, dat men de klinker volgens een glijdende toonschaal kan zingen zonder belangrijke schommelingen te bemerken, die men wel zou verwachten, uitgaande van één formant met een betrekkelijk geringe dempingsfactor. Tegenwoordig weten wij, dank zij sterk verbeterde registratiemethoden, dat de klinker door veel meer formanten bepaald wordt, waardoor dit bezwaar vervalst.

De tegenstanders legden er de nadruk op, dat men bij de klinker geen anharmonischen waarneemt, hoewel de formanten in het algemeen geen harmonischen van de grondtoon zullen zijn, zoals Hermann terecht vaststelde.

Het spreekt echter vanzelf, dat men geen anharmonischen waarneemt, gezien de eigenschappen van het gehoororgaan. De inslingeren uitsterftijden zijn zo groot, dat de relatief hoog frequente gedempte formanten niet afzonderlijk waargenomen kunnen worden.

Als reactie op de apodictische beweringen van SCRIPTURE (1930-'32) werd het probleem o.i. gedurende vele jaren scheef getrokken. Deze beschouwde alleen kortdurende verschijnselen en beweerde op grond daarvan, dat de grondtoon vrijwel steeds ontbrak (uit analyses van CRANDALL en SACIA, 1924, die daarbij echter de gevoeligheid van het oor in rekening brachten), dat de trillingen anharmonischen waren endat twee opeenvolgende perioden nooit gelijk waren. Op grond daarvan kwam hij met zijn profieltheorie, die op de waarneming gericht was en waarvoor hij een hypothese ad hoc opstelde over "drie-dimensionale" analyse door het gehoororgaan. Het profiel verkreeg hij, door het nul-niveau van de trillingen over een zekere afstand te verschuiven, wat overeenkomt met het vergroten van de constante factor bij een Fourier-analyse.

F.TRENDELENBURG (1927, 1935, 1938, 1939) en anderen toonden aan, teruggrijpend op een opmerking van RAYLEIGH (1896), dat de opvattingen van HELMHOLTZ en HERMANN tot dezelfde resultaten moesten leiden, omdat beide een analyse zijn van hetzelfde verschijnsel. Daarbij moet de voorwaarde gesteld worden, dat in beide gevallen de koppeling van het aanzetstuk aan de stemspleet in rekening gebracht wordt. De invloed van deze koppeling is theoretisch en experimenteel door WIEN en VOGEL (1897, 1920^a en 1920^b) onderzocht. Merkwaardig is al weer, dat men van weerszijden ge-

zegt heeft, dat de andere opvatting niet toe zou staan om de koppeling te verantwoorden.

Als reactie op SCRIPTURE hechtte TRENDELENBURG, vooral in zijn eerste publicaties, veel waarde aan curven van lang aangehouden klinkers, waarbij de opeenvolgende perioden een getrouwe copie van elkaar zijn. Als gevolg daarvan vindt men in de meest recente, overigens zeer waardevolle, litteratuur nog steeds de opvatting, dat het verschil van mening hierin zou bestaan, dat volgens HELMHOLTZ de klinker zuiver periodiek zou zijn en volgens HERMANN wisselend en anharmonisch van karakter.

In wezen betreft het hier slechts een kwalitatief verschil. Ook bij de lang aangehouden klinker zal men immers, wanneer het begin en het einde bij de analyse betrokken worden, niet toekomen met één grondtoon en een aantal harmonischen. De integratietijd van het oor, die afhangt van de halfwaardebreedten, is de belangrijke factor en tot nu toe is nog geen aandacht geschonken aan het feit, dat de halfwaardebreedten van de formanten, die de snelheid bepalen waarmee mogelijke wisselingen kunnen optreden, van dezelfde orde van grootte zijn. Er is tevens nog nooit op gewezen, dat men voor het berekenen van de modulatie door het aanstoten van een resonator de methoden van HELMHOLTZ moet toepassen, zodat men in beide gevallen op precies dezelfde moeilijkheden stuit.

Door LULLIES (1926) werd de opvatting van HERMANN over het ontstaan van de trillingen bij de stemspleet scherper geformuleerd. HERMANN sprak namelijk van aanstoten van het aanzetstuk tengevolge van het aanblazen door een stoot lucht, wanneer de stemplooiën uit elkaar gedreven worden, zonder aan te geven, waarin het verschil bestond met de opvatting, dat men bij elke klinker te maken zou hebben met een bepaalde, voor alle klinkers dezelfde, glottistoon, die dan door het aanzetstuk op de corresponderende wijze gemoduleerd zou worden.

Men had ontkend, dat deze mogelijkheid bestond, op grond van de overweging, dat het bij een serie van dergelijke stoten mis zou gaan wegens de phaserelaties.

Door proeven met opslaande tongen en aangesloten buizen toonde LULLIES echter aan, dat in de openingsphase bij voldoende snelheid van de luchtstroom langs de tong een wervel kon ontstaan, waarbij in de resonantiebuïs en de windbuïs tegengestelde drukvariatiën optraden. In dit geval kan men spreken van een aanblazen van het aanzetstuk door wervelvorming, waarbij dit echter nog niet, zoals LULLIES meende, "selbststeurend" behoeft te verlopen. Wanneer het overeenkomstige verschijnsel bij de stemvorming zou voorkomen, dan kan men natuurlijk toch formeel een Fourieranalyse op de glottistoon toepassen en het is waarschijnlijk, dat de

glottistoon weinig zou afhangen van de klinker, mits men de koppeling (inwendige weerstand) in rekening brengt, omdat het ontstaan van de wervel door de snelheid van de luchtstroom bepaald werd.

Het blijkt nog steeds verleidelijk te zijn om de oude strijd-vraag te projecteren op moderne inzichten. Zo MEYER-EPPLER (1950-p. 249): "Ein mit dem Grundton 150 Hz gesprochener Vokal wird also bereits durch eine einmalige Analyse richtig und vollständig beschrieben (Fall HELMHOLTZ), ein Zungen-r, dessen Periode bei 10 Hz liegen kann, dagegen nicht mehr (Fall HERMANN)".

Een analyse op formanten (HERMANN) is echter volkomen gelijkwaardig met een analyse op harmonischen (HELMHOLTZ) en deze laatste heeft vooral voordelen voor de communicatietechnicus en wanneer het gaat om de analyse door het oor.

Hoewel deze laatste analyse nog niet volledig begrepen is en er in de laatste tijd nog belangrijke publicaties over verschenen zijn: VON BÉKÉSY (1951 en 1952), DE VRIES (1952), en HUGGINS (1952 a en b), die er een nieuw licht op werpen, staat toch wel vast, dat voor de waarneming niet alleen de momentane waarde maar ook de amplituden gedurende een zekere herinneringstijd van belang zijn, met een naar het verleden exponentieel afnemende invloed.

Daarom zijn analyses van een veranderlijke klank volgens een Fourier-integraal of volgens de methode van LABROUSTE-VERCELLI, die door GEMELLI en PASTORI (1934 a en b), GEMELLI (1938) en TOMMEY (1944) toegepast werden, niet zonder meer van betekenis, omdat hierin de exponentieel afnemende invloed van het verleden niet tot uitdrukking komt. In dit opzicht zijn experimenten van STUMPF (1926) van belang. Deze vond bij nabootsingsproeven, dat de kwaliteit van de klinker achteruit ging, zodra een anharmonische component werd toegevoegd.

F.TRENDELENBURG heeft nog opgemerkt (1938), dat de opvatting van HERMANN over het ontstaan van de modulatie onbelangrijk is voor de karakteristiek van de klinker, omdat men van een kort stuk, dat uit het middendeel van een lang aangehouden klinker gesneden is, niet kan uitmaken, in welke richting het wordt afgespeeld op een gramfoon. De flanken van de klinker mogen er niet bijgenomen worden, omdat men dan zonder meer de volgorde herkent. Het geluid van een piano b.v. lijkt dan op dat van een orgel en omgekeerd en de explosieven van de spraak worden direct onherkenbaar. Bij het afspelen in de normale richting heeft men gedempt uitstervende formanten, bij de omgekeerde richting exponentieel tot een bepaald niveau toenemende formanten, waarbij de fase-betrekkingen van teken omkeren.

Over de ontstaanswijze zeggen deze proeven echter niets. De

enige conclusie mag o.i. zijn, dat voor het herkennen van de klinker uit een kort, uitgesneden stuk, waarbij veel informatie verloren gaat, de fasebetrekkingen van gering belang zijn, in overeenstemming met de eigenschappen, die sinds HELMHOLTZ aan het oor worden toegeschreven.

2.1.3. Trillingsvergelijking. Theorie van WEGEL.

De modulatie zou veel beter begrepen kunnen worden, wanneer het zou gelukken om het hele systeem in vergelijking te brengen, met conclusies over het onderhouden van de trilling en over de energielevering. Tot nu toe is dit nog slechts gedeeltelijk voor het falsetregister gelukt, onder sterk vereenvoudigde omstandigheden, maar nog niet voor het belangrijkere borstregister, omdat de moeilijkheden daar groter zijn. Deze worden veroorzaakt door het strottenhoofd en wel door de stemplooien, want over de eigenschappen van de lucht tussen de plooiën is een redelijke schatting te maken, zie 4.7.2. In het borstregister voeren de plooiën over hun volle lengte en breedte een relaxatietrilling uit, terwijl ze elk uitgespannen zijn tussen twee vaste punten en de effectieve verdeling van de massa, de elasticiteit en de demping, in afhankelijkheid van hun uitslag, is niet bekend. Bovendien worden ze in de gesloten fase gedurende enige tijd stevig tegen elkaar gedrukt, waarbij ze nog doorveren. Ook hier is echter een schatting te maken, zie 4.7.2.

De trillingsvergelijking is vooral gewenst voor het exact in rekening brengen van de koppeling, op grond van de theorie van WIEN. Hoewel deze theorie betrekking heeft op het eenvoudige geval van twee gekoppelde systemen, zouden de resultaten toch in principe toegepast kunnen worden, door longen, luchtpijp en strottenhoofd als één systeem te beschouwen en het aanzetstuk als het andere. Dit zou ook van belang zijn voor proeven waarbij gezongen wordt in een ander gas dan lucht, of in lucht met een afwijkende atmosferische druk, JONGBLOED (1940).

WEGEL heeft in 1930 een theorie van de vibratie van het strottenhoofd gegeven, die betrekking heeft op het falsetregister (wat hij niet zegt) onder sterk vereenvoudigde omstandigheden, in een eerste orde benadering, zonder de constanten die in de formules voorkomen te bepalen; met slechts een symbolische uitdrukking voor de koppeling van aanzetstuk en windbuis en in een weinig uitgewerkte vorm.

Hoewel na die tijd geen nadere uitwerking verschenen is, is de methode toch zeer interessant. Deze berust op het opstellen van krachtenvergelijkingen, die de trilling van het complete mechanische systeem (stemplooien, lucht in de stemspleet, aanzetstuk en luchtpijp) beschrijven, door middel van Lagrange vergelijkin-

gen, uit formules voor de totale momentane kinetische en potentiële energieën, de momentane krachten en de snelheid waarmee de energie gedissipeerd wordt. De resulterende simultane differentiaalvergelijkingen, waarin de uitwijkingen en de snelheden van de verschillende delen voorkomen, worden dan benut om te komen tot de eigenfrequenties en tot betrekkingen tussen de verschillende parameters van het systeem, die een voorwaarde zijn voor het ongedempt onderhouden van een van deze frequenties. Tenslotte wordt dan een parallel getrokken met elektrische trillingen in radioschakelingen.

De krachtenvergelijking voor de lucht in de stemspleet blijkt ook termen te bevatten, die afhankelijk zijn van de uitwijking en van de snelheid van de stemplooiën, omdat de weerstand (de stroming is verre van laminair) en de massa van de lucht afhangen van de doorsnede van de stemspleet. De krachtenvergelijking van de stemplooiën bevat ook „gyrostatische” termen, waarvan één afkomstig is van het Bernoulli-effect van de luchtstroom.

Het belangrijkste resultaat is, dat voor het onderhouden van een trilling vereist is, dat de relatieve verandering van de weerstand met de doorsnede groter moet zijn dan de relatieve verandering van de massa met de doorsnede, en dat de luchtstroom groter moet zijn dan een zeker minimum, in overeenstemming met bekende feiten.

2.1.4. Resultaten

Wanneer men aan de onderzoeken over de registratie en de analyse van de modulatie de eisen stelt a. dat deze tot 4000 Hz toe de formanten met hun halfwaardebreedten en sterkteverhouding opleveren, b. dat de opname gebeurde in een ruimte, die acoustisch voldoende dood is, zodat de resultaten niet beïnvloed zijn door een modulatiefactor van de ruimte en c. dat ze over een serie klinkers gaan, dan houdt men slechts zeer weinig over.

Door verschillende oorzaken zijn pas na 1930 publicaties verschenen, die aan al deze voorwaarden voldoen. De allereerste voldoen niet aan voorwaarde a, omdat de registratie niet tot deze frequentie komt. Eerst sinds de ontwikkeling van de radiotechniek, de lusoscillografen en de electronenstraalbuis bereikt men deze frequenties en de nog veel hogere, die voor de sis-klanken van belang zijn. Latere publicaties voldoen nog niet aan voorwaarde b en voorwaarde c vereist een snelle methode van analyse. Hoewel door de mechanische analysatoren de zeer lange analyseduur van rekenschema's belangrijk teruggebracht is, heeft men voor de analyse van één enkele periode toch nog verschillende uren nodig. De moderne elektrische analysemethoden, die onder 2.1.1. werden aangegeven, hebben deze tijd teruggebracht tot minuten en enkele

methoden (met een kleiner oplossend vermogen) vereisen slechts onderdelen van een seconde.

Na 1930 zijn onderzoeken gepubliceerd door: STEINBERG (1934), die met een mechanische analysator talrijke perioden van verschillende klinkers in een gesproken zin onderzocht; LEWIS (1936), die, eveneens met een mechanische analysator, talrijke perioden van enkele klinkers onderzocht, waarbij hij de formanten en hun halfwaardebreedten nauwkeurig kon bepalen door de perioden te selecteren uit een frequentie vibrato, zodat de harmonischen door het formantgebied liepen; LEWIS en TUTHILL (1940), een uitbreiding van het vorige onderzoek, BARCZINSKI en THIENHAUS (1935), volgens een zoektoonanalyse van lang aangehouden klinkers; SOVIJÄFVI (1938) eveneens een zoektoonanalyse, maar nu van gefluisterde klinkers; TARNÓCZY (1943), die met rekenschema's talrijke perioden onderzocht van klinkers, die volgens een toonladder gezongen werden; POTTER c.s. (1947) en de leden van werkgroep voor de Visible Speech. J. Acoust. Soc. Am. (1946 - 1947), waarbij de belangrijkste resultaten verkregen werden door het gebruik van de Sound Spectrograph (KOENIG c.s. 1946), een instrument, dat volgens het zoektoonprincipe werkt. Aan voorwaarde *b.* is daarbij slechts gedeeltelijk voldaan en men past in het algemeen een versterking van de hogere frequenties met ongeveer 6 db per octaaf toe; TOKIZANE (1951), die de geregistreerde curve met rekenschema's direct op de formanten en hun dempingsfactoren analyseert; MC GINNIS c.s. (1951), die met behulp van een zoektoonmethode commerciële gramfoonplaten van bekende zangers onderzochten; HUGGINS (1952), die eveneens direct op formanten analyseert, dank zij een zeer speciaal zoektoonprincipe, waarbij de dempingsfactoren ook bepaald kunnen worden, maar met verlies van de sterkteverhoudingen.

Het resultaat van al deze onderzoeken is, dat de klinker door verschillende formanten gekarakteriseerd wordt, waarvan er gemiddeld vier belangrijk zijn, terwijl voor de halfwaardebreedten enkele honderden Hz worden gevonden. In hoofdstuk IV komen wij hier op terug.

2.2. Frequentiemodulatie

2.2.1. Methoden van onderzoek

Zoals reeds in hoofdstuk I werd opgemerkt, is het tot nu toe nog niet gelukt om een kleine microfoon van voldoende gevoeligheid te construeren, die overal langs de acoustische weg in de klankgever gebracht kan worden. Voor de bepaling van de volumesnelheid ter plaatse van de stemplouien is men dan ook op andere

methoden aangewezen. Men heeft wel getracht om het te doen, door een metalen buis tot vlak boven de stemplooiën te schuiven en het doorgelaten mengsel te analyseren (KATZENSTEIN, 1910). Dit mengsel blijkt dan weinig af te hangen van de klinker die de proefpersoon bedoelt te zingen. De methode is echter onnauwkeurig, want de omstandigheden bij het strottenhoofd zijn verre van normaal, men weet niet hoeveel nog langs de buis lekt en bovendien wordt meestal vergeten, dat ook een dergelijke buis resonantie eigenschappen heeft.

TONNDORF (1927) haalt enkele gevallen aan van mensen, die getracht hadden om zelfmoord te plegen, door zich de keel, boven de stemspleet, door te snijden, waarbij de grote vaten niet beschadigd waren. Men heeft daarbij wel geconstateerd dat het aanzetstuk versterkend werkt (met open wond daalde het geluidsvolume sterk), maar het spectrum is verder niet onderzocht.

TARNÓCZY (1951) paste een andere methode toe. Hij nam het geluid op, wanneer het aanzetstuk een zo goed mogelijk indifferente instelling had (ongeveer [ə] in Engelse *above*), zodat er zo weinig mogelijk resonantie was, d.w.z. met een transmissiekromme, die zo goed mogelijk recht is.

Verder is men aangewezen op methoden, die nog meer indirect zijn, namelijk op de bestudering van het strottenhoofd tijdens de stemvorming, met behulp van een keelspiegel (Garcia 1854) of een larynxperiscoop (RUSSELL), in de hoop, dat de analyse van de trillingswijze conclusies kan opleveren over de modulatie door het strottenhoofd.

Een belangrijke stap vooruit was de mogelijkheid van stroboscopische waarneming, WEISS (1932^c), MOORE (1937), TIFFIN c.s. (1938), FRÖSCHELS c.s. (1937). De verlangzaming van de trilling, die men visueel waarneemt, is echter slechts schijnbaar, want de trilling is opgebouwd uit stukjes van een groot aantal opeenvolgende trillingen, waarvan men niet weet, hoe nauwkeurig ze aan elkaar gelijk zijn (Over de interpretatie, zie TONNDORF 1926 en WEISS 1932^c).

De film, die in 1940 in de Laboratoria van de firma Bell werd opgenomen door FARNSWORTH en SMITH (1940 ^a en ^b), heeft daarom belangrijke voordelen, want hier is een verlangzaming van de enkele perioden bereikt. De film is namelijk voor het grootste deel opgenomen met een snelheid van 4000 opnamen per sec. (HERRIOTT, 1938), waarna hij afgedraaid kan worden in een normaal tempo, b.v. met een verlangzaming van 250 maal. Men heeft op deze wijze onderzocht *a.* Veranderingen met de toonhoogte, *b.* Veranderingen met het geluidsvolume, *c.* Individuele verschillen, o.a. tussen getrainde en niet getrainde stemmen, *d.* De invloed van eigenschappen van het aanzetstuk op de trilling van de stemplooiën. De

afzonderlijke perioden zijn zeer goed waarneembaar en de film heeft tal van interessante kwesties opgehelderd, hoewel er o.i. een vrij groot detailverlies moet zijn, doordat de belichtings-tijd voor elke opname 40% van de tijd tussen twee opnamen be-draagt.

2.2.2. Stemplooien, stemspleet, ruimte van Morgagni. Valse stem-plooien

Een zeer belangrijk punt bij de stemvorming is, of de modula-tie door het strottenhoofd op eenvoudige wijze (lineair b.v.) af-hangt van de trilling van de stemplooien. In dit geval zou men op de doorsnede van de stemspleet een Fourier analyse kunnen toepas-sen om de harmonischen in hun sterkteverhouding en phaserelaties te vinden. Vele onderzoekers hebben geconstateerd, dat dit niet zo is, b.v. W.TRENDELENBURG en WULLSTEIN (1935), BROEMSER (1918) en FARNSWORTH en SMITH (1940^b).

Het openingsquotient, d.w.z. het gedeelte van de periode waar-in de stemplooien geopend zijn, is bij deze analyse een belang-rijke factor. TARNÓCZY (1951) vond, dat het ongeveer lineair met de frequentie toenam, de openingstijd was namelijk praktisch con-stant.

De proeven van WEGEL (1930) over de weerstand van de stem-spleet, aan een model, toonden aan, dat de stroming verre van laminair was voor de gangbare volumesnelheden. Er zal dus ook wervelvorming optreden, en het resultaat is, dat men de stem-spleet zelf als geluidsbron moet opvatten.

Dit wil niet zeggen, dat de trilling van de stemplooien slechts de grondtoon bepaalt, zonder invloed te hebben op het mengsel van hogere harmonischen. Integendeel, verschillende onderzoekers, o.a. ZWAARDEMAKER en EYKMAN (1928) en RUSSELL (1931^a en ^b) hebben ge-vonden, dat de trillingswijze wat afhing van de klinker, dus van het verlangde spectrum van harmonischen. De scherpte van de rand en het gedeelte dat in trilling komt, bleek namelijk af te hangen van de klinker, en dit heeft zeker enige invloed op het spectrum. Er bestaat dus een zeker klinkerpatroon, zie daarvoor 5.3 en 5.4.

Door het niet-lineaire karakter van de doorstroming van de stemspleet is het mengsel rijker aan harmonischen, dan een ana-lyse van de doorsnede als functie van de tijd zou doen verwach-ten. Dit komt des te sterker uit, naarmate de stroomsnelheden groter zijn, d.w.z. naarmate eenzelfde zanger een groter geluids-volume gaat voortbrengen bij dezelfde toonhoogte; FARNSWORTH en SMITH (1940^b), STOUT (1938), LASTOTCHKINE PELSKEY (1941), WINCKEL (1952), en af te leiden uit gegevens bij LEWIS en TUTHILL (1940). Dat een analyse van de doorsnede van de stemspleet wel een zekere benadering geeft, blijkt uit het feit, dat enkele getrainde zan-

gers, bij wie het mengsel relatief rijker was aan harmonischen dan bij niet-getrainde zangers, een kleiner openingsquotient (de duur van het geopend zijn t. o. v. de periode) hadden dan deze, FARNSWORTH en SMITH (1940^b).

Dat het openingsquotient toeneemt met de frequentie levert geen moeilijkheden op, want het rangnummer van de harmonische, die bij een bepaalde formant hoort, is omgekeerd evenredig met de frequentie van de grondtoon.

Het karakter van de doorstroming van de stemspleet komt duidelijk tot uiting bij experimenten met zeefkringen, door F.TRENDELENBURG en FRANZ (1935), W.TRENDELENBURG (1936^b), F. en W.TRENDELENBURG (1937), W.TRENDELENBURG en HARTMANN (1937), en W.TRENDELENBURG (1940^b). Hier analyseert men, door het geluidsmengsel gelijktijdig toe te voeren aan een aantal zeefkringen, die aan elkaar aansluiten en die elk een octaaf of een gedeelte daarvan doorlaten. De inslingertijden van deze zeefkringen kunnen zeer klein zijn, ongeveer gelijk aan het omgekeerde van de bandbreedte in Hz, zodat het verloop van de amplituden gedurende de periode gevolgd kan worden. Bij lage grondtonen bleek, dat bij het openen en bij het sluiten van de stemspleet trillingen met hoge frequentie worden aangeslagen, die verder gedempt verlopen, terwijl de trillingen met lagere frequenties soms pas enige tijd na het openen op gang komen en gedurende de gehele openingsfase, en soms zelfs nog enige tijd daarna, opgebouwd worden, om daarna gedempt te verlopen.

Door al deze redenen is het niet mogelijk om een „standaardspectrum” voor de trillingen in de stemspleet aan te geven. FLETCHER (1929, p. 50) heeft eens geopperd, als illustratie, dat de sterkte (intensiteit) van de harmonischen zou afnemen met de derde macht van het rangnummer. Deze hypothese ad hoc heeft verschillende onderzoekers nog diensten bewezen *).

Men zou wensen, dat een exacte bepaling mogelijk was op de curieuze manier waarvan WHEATSTONE (1937) bericht. Het betreft daar een zanger, die in staat was om zijn aanzetstuk zo in te stellen, dat hij „elke” harmonische naar believen naar voren kon brengen en vasthouden.

Men kan zich de vraag stellen: Waarop gaan de stemplooiën nu eigenlijk open en dicht? want in de luchtpijp treft men eveneens een mengsel van harmonischen aan, gesuperponeerd op een constante druk, die, tezamen met de effectieve stijfheid en massa van de stemplooiën, de hoogte van de grondtoon bepaalt. Is de grondtoon, zoals men deze bij een analyse vindt, de bepalende factor of zijn

*) Zie voor de bepaling van het spectrum verder de hoofdstukken IV, V en VI.

de hogere harmonischen ook nog van invloed. Zijn m.a.w. de stemplooiën gekoppeld aan de grondtoon alleen, of tevens aan de hogere harmonischen. Bij de beantwoording van deze vraag mag niet vergeten worden, dat de relatieve sterkte van de grondtoon ter plaatse van de plooiën niet gelijk is aan die in het mengsel dat de mond verlaat, omdat hier de transmissiekromme van het aanzetstuk nog tussen zit. In het strottenhoofd is de grondtoon de sterkste van alle harmonischen.

Hogere harmonischen zullen vanzelfsprekend weinig invloed op de trillingswijze kunnen hebben, maar het is o.i. mogelijk, dat de laagste nog enige betekenis hebben, hoewel de grondtoon in hoofdzaak bepalend zal zijn *).

Omdat de stemplooiën een relaxatietrilling uitvoeren kan niet zonder meer over phaseverschillen gesproken worden. De phase van de grondtoon kan echter wel betrokken worden op het moment waarop de plooiën opengaan. Het is waarschijnlijk, dat er een phaseverschil bestaat (wellicht tot 90^0), dat afhankelijk is van de kundigheid van de zanger. Hiervan uitgaande kunnen de proeven van LUCHSINGER (1951), over de snelheid waarmee de lucht verbruikt wordt tijdens het inzetten van een toon, namelijk verklaard worden, en tevens ligt hierin wellicht de oplossing voor enkele praktische kwesties, die samenhangen met de ademhalingstechniek, zoals de geheimzinnige Atemstütze, MAATZ (1937), WINCKEL (1952). De proeven van WETHLO (1939) over het luchtverbruik kunnen op deze wijze tevens ongedwongen verklaard worden.

Bij het falsetregister, waartoe men geleidelijk moet overgaan wanneer het openingsquotient de waarde 0.7 bereikt, liggen de verhoudingen wat anders. Ook hier is de doorstroming van de stemspleet niet-lineair, maar de spleet is nu gedurende de gehele periode geopend en slechts de randen van de plooiën zijn in trilling. De koppeling van de trilling in de stemspleet aan die van de plooiën en het aanzetstuk kan zo sterk zijn, dat slechts de grondtoon aanwezig is *). Dit is het geval, wanneer de frequentie van de grondtoon gelijk is aan die van een formant van het aanzetstuk. Bij juist gekozen toonhoogte kan men in het falsetregister elke klinker zuiver sinusvormig maken, TARNOĆZY (1943).

Tot nu toe hebben wij nog niet verder gekeken dan onze stemspleet hoog is. Boven de stemspleet en ingesloten tussen de ware en de valse stemplooiën bevindt zich echter de ruimte van MORGAGNI, en het aandeel van deze ruimte aan de stemvorming is eveneens een punt van discussie geweest.

Dit aandeel is overschat door SAVART en GUILLEMIN, zie 2.2.4.,

*) Zie voor de nadere uitwerking van deze mening hoofdstuk IV, 4.7.2.

maar aan de andere kant wordt het door anderen praktisch genegeerd, op grond van de overweging, dat het volume zo klein is, dat de eigenfrequentie van deze holte van geen belang kan zijn, omdat de formanten van de klinkers niet hoog genoeg liggen.

Hoewel toegestemd moet worden, dat de invloed op de transmissiekromme klein moet zijn, menen wij echter, dat de modulatie wel degelijk van deze ruimte zal afhangen en op een variabele wijze.

Door RUSSELL (1931^a en ^b) en anderen is reeds gevonden, dat de valse stemplooien verre van passief zijn gedurende de stemvorming. Zij zijn in staat tot contractie, waardoor de doorgang nauwer wordt en zij kunnen naar beneden gedrukt worden, tot ze zelfs stevig op de ware stemplooien drukken en deze belemmeren in hun functie. Door deze veranderingen zal het volume van de ruimte van MORGAGNI gewijzigd worden, evenals de weerstand voor de stroming tussen de valse stemplooien.

Tezamen met de doorgang naar het aanzetstuk zal de ruimte van MORGAGNI als een buffer voor de stoot lucht werken en men moet verwachten, dat de amplituden van de hogere harmonischen sterk van deze instelling zullen afhangen. Op deze wijze, dat deze amplituden, relatief genomen, zullen afnemen naarmate de doorgang nauwer en het volume groter wordt. Bij een dergelijke constrictie door de valse stemplooien constateert men inderdaad een afname van de harmonischen, wat zich uit door een verlies aan kwaliteit van de stem, HUSSON (1933) en HUSSON en TARNEAUD (1933).

Zie voor de nadere uitwerking van deze mening hoofdstuk VII, ook in verband met de kwaliteit van de stem en met het handhaven van het timbre bij verandering van geluidsvolume.

Enkele onderzoekers wezen nog op een andere functie, bij hun proeven bleek het strottenhoofd gemakkelijker aan te spreken, wanneer zij de valse stemplooien en de keelholte met het strottenhoofd intact lieten. De opvatting van NEGUS (1929, p.461) over de invloed van de laryngeal saccule:

"It has no vocal function, for the reasons firstly that it is not required, and secondly that it is much too small to have any influence on voice" achten wij dan ook onjuist.

PAGET (1930, p.34) bespreekt nog het geval van een zanger, die in staat was om gelijktijdig op twee toonhoogten te zingen. De hoge toon, tenorregister, door trilling van de ware stemplooien en de lage toon, een constant muzikaal interval van 17 halve tonen lager, door trilling van de valse stemplooien, die vlak bij elkaar gebracht werden.

2.2.3. Experimenten met praeparaten en modellen.

Om ongehinderd te kunnen experimenteren over het ontstaan van

de modulatie heeft men in vele gevallen gebruik gemaakt van een praeparaat van een strottenhoofd of van een model daarvan. En met verschillende doeleinden: met het oog op de frequentiemodulatie (2.2.), op de eigenschappen van het aanzetstuk (2.3.) op de koppeling (2.4.) en voor het gebruik bij spreekmachines (2.5).

W. TRENDELENBURG c.s. namen praeparaten van het strottenhoofd van een mens of een kalf, NEGUS dat van een aap, en sloten het aan op een windbuis, waarna de plooiën in trilling gebracht werden, met al of niet aangesloten resonator. Modellen van het strottenhoofd, die het voordeel van betere reproduceerbaarheid hebben, zijn op vele wijzen geconstrueerd. MÜLLER (1938 en 1939) gebruikte kikkerspieren, EWALD (1913) en WETHLO (1913 en 1949) construeerden kussenpijpen, die alleen in dwarse richting kunnen trillen en waarvan men een tijdlang meende, dat ze het best overeen kwamen met de werking van het strottenhoofd. STUMPF (1926, p.353) getuigt van deze kussenpijpen, dat ze een schreeuwend geluid geven, zodat de hogere harmonischen goed vertegenwoordigd zijn. WETHLO (1939) deed het ook met een stuk slang (binnenband) waarvan de mond wat uitgerekt werd, zodat de randen tegen elkaar kwamen en PAGET (1923, 1924, 1930) gebruikte een stukje rubber in een nauwe spleet en opslaande tongen. Quantitatieve gegevens over de modulatie door het natuurlijke strottenhoofd worden op deze wijze vanzelfsprekend niet verkregen, maar menig detail is er toch door opgehelderd.

W. TRENDELENBURG en WULLSTEIN (1935) experimenteerden met het praeparaat van een kalf (dat geen valse stemplooien heeft) en zij registreerden gelijktijdig de trilling van de stemplooien (met een methode analoog aan die van de condensator-microfoon), de diameter van het midden van de stemspleet (met een optische methode) en het voortgebrachte geluid. Het bleek, dat de trilling van de plooiën vrijwel sinusvormig was, terwijl een Fourier-analyse van de doorsnede van de stemspleet onvoldoende hogere harmonischen opleverde.

E. MÜLLER (1938) nam proeven met een model met kikkerspieren, waarbij hij gelijktijdig het geluid en de beweging van de pseudo plooiën registreerde. De zijwaartse en de opwaartse beweging bleken ongeveer even groot te zijn, van de orde van 1 mm, en de heenweg van de plooiën was iets anders dan de terugweg. Bij vergroten van de winddruk nam de opwaartse beweging het meeste toe. De frequentie van de toon verhoogde hij op verschillende manieren, door de winddruk te vergroten, door de uitwendige spanning (lengte) op te voeren en door de inwendige spanning (prikkeling van de spieren) te versterken. De frequentie kon echter slechts weinig opgevoerd worden, enkele hele tonen. De bewegingsvorm van de lippen en het timbre van het geluid bleken af te hangen van

de wijze waarop de frequentie verhoogd werd. Hij constateerde verder, dat de amplituden in het geluid toenamen met toenemende snelheid van de plooiën en dat bij grote winddrukken de hogere harmonischen, relatief genomen, sterk toenamen. Dit komt o.i. waarschijnlijk op rekening van wervelvorming. Dat het ten slotte toch maar een model was, dat onderzocht werd, blijkt uit het feit, dat MÜLLER vond, dat het openingsquotient af nam met toenemende frequentie, dus juist omgekeerd als bij de normale stemvorming.

HARTMANN (1938) onderzocht de zijwaartse en de opwaartse beweging, eveneens met een optische methode (schaduwprojectie), aan het praeparaat van een mens en van een kalf. Bij het praeparaat van het strottenhoofd van de mens bleken de uitslagen eveneens practisch gelijk te zijn, ongeveer 1 tot 1,5 mm. Verder bleek, dat het maximum van de opwaartse beweging samenvalt met dat van de zijwaartse beweging en dat de plooiën bij het sluiten vrijwel niet naar beneden doorzwaaiën, ze blijven boven de ruststand, maar persen zich na het sluiten nog wel dichter op elkaar, terwijl ze in de laagste stand hun grootste dikte hebben. Bij het falsetregister waren de uitslagen zeer gering.

WETHLO (1939) onderzocht met een model (fietsband) het luchtverbruik, in afhankelijkheid van de mate waarin de plooiën gesloten zijn, dat nodig is voor het bereiken van een bepaald geluidsvolume. Hij vond, dat het voor het op gang komen van de trillingen niet noodzakelijk was, dat de stemspleet in de beginstand volledig gesloten was. Tevens bleek het luchtverbruik en het timbre van het geluid weinig af te hangen van de sluitingsgraad van de plooiën in de beginstand, althans binnen zekere grenzen. De gunstigste instelling bleek een matig tegen elkaar liggen te zijn. Wanneer de plooiën in de beginstand sterk tegen elkaar gedrukt waren moest de winddruk veel groter gemaakt worden en het luchtverbruik nam zo toe, dat de werking ongunstig werd.

De omvang van de normale stem, gemiddeld 3 octaven *), is verrassend groot, vergeleken met de omvang van enkele hele tonen, die men bij experimenten met praeparaten en modellen dikwijls vond. Het is waarschijnlijk, dat deze omvang voor het overgrote deel op rekening van inwendige spanningsveranderingen en verandering van de effectieve massa komt, want de lengteveranderingen kunnen slechts gering zijn.

Getrainde zangers houden hun strottenhoofd namelijk op dezelfde hoogte wanneer zij een toonladder opklimmen, of brengen het zelfs iets naar beneden. Dit in tegenstelling tot niet-getrainde zangers, wier strottenhoofd meeklimt. HUSSON (1933, LUCHSINGER (1942, RUSSELL (1931^b), CURRY (1937, 1938). Alleen door een voor-

of achterwaartse beweging van de ary-kraakbeentjes kan de lengte van de plooiën dan nog gewijzigd worden en dit moet gering zijn.

Er zijn nog meer verschillen tussen getrainde en niet-getrainde zangers, b.v. bij het produceren van een zgn. zweltoon, d.w.z. wanneer men van klein geluidsvolume geleidelijk overgaat op groot volume, maar bij dezelfde grondtoon. Bij getrainde zangers wordt het openingsquotient dan kleiner, terwijl de plooiën sterker tegen elkaar gedrukt worden, terwijl bij niet-getrainde zangers het openingsquotient groter kan worden, doordat de plooiën wat verslappen. Zie ook hoofdstuk VIII, 8.2.

2.2.4. Aerodynamische theorie van SAVART en GUILLEMIN.

Door GUILLEMIN is in 1897 een aerodynamische theorie van de stemvorming gegeven, die in oorsprong afkomstig is van SAVART, naar analogie van de verklaring voor de werking van het zogenaamde jagersfluitje en gebaseerd op de wervelvorming, die door Lootens bij orgelpijpen gevonden was.

Het jagersfluitje bestaat uit een dunne cilindrische doos, met in voor- en achterkant een centraal gat. Het geeft geluid, wanneer het van één kant wordt aangeblazen en de verklaring van SAVART is, dat in de holte wervels ontstaan, die de toestromende lucht periodiek comprimeren. Deze verklaring is zonder twijfel juist en geeft ook de gang van zaken weer wanneer wij fluiten, waarbij tussen de lippen de tong en het gehemelte of de tanden een holte ontstaat, die aangeblazen kan worden.

GUILLEMIN paste dit toe op de stemvorming, waarbij de ruimte van Morgagni op deze wijze zou worden aangeblazen. De oorspronkelijke literatuur is niet verkrijgbaar, maar de Franse physiologen MORAT en DOYON (1918) hebben de opvatting van GUILLEMIN krachtig verdedigd en zij geven uitgebreide citaten, p. 416:

"Le courant d'air d'amenée est fourni par le mouvement d'expiration plus ou moins prolongé qui suit l'inspiration préparatoire de l'émission du son. Ce courant traverse la fente glottique, qui est située entre les cordes vocales inférieures; en arrivant à celle qui est située entre les cordes vocales supérieures, le jet s'est élargi; une partie sort directement; l'autre partie forme un courant dérivé, qui s'infléchit à droite et à gauche contre les parois des ventricules, suit les parois latérales de ces cavités et vient comprimer périodiquement le courant d'entrée, d'où les vibrations imprimées à l'air et qui se traduisent par un son".

*) In een uitgebreid onderzoek constateerde Preiszler (1939), dat de omvang van de stem meestal $2\frac{1}{2}$ tot $3\frac{1}{2}$ octaaf is, met uiterste waarden van 4 tot $4\frac{1}{2}$ octaaf.

Bij deze opvatting zijn de trillingen van de stemplooiën van secundaire aard en dit wordt ook duidelijk uitgesproken, p. 419: "... produits par les tourbillons si rapides de l'air dans les cavités laryngiennes. Les cordes vocales n'ont en effet, pas une rigidité suffisante pour résister à ces chocs de l'air. Elles vibrent secondairement".

Zij menen hiervoor een bewijs te zien in de waarneming van LISCOVIUS, dat het geluid niet verdwijnt op het moment, dat de plooiën aangeraakt worden. Dit is echter onjuist, bij het aanraken van de plooiën veranderen slechts de randvoorwaarden,

Zoals de grondtoon in de ruimte van MORGAGNI langs aerodynamische weg zou ontstaan, zouden de formanten verderop in het aanzetstuk eveneens op deze wijze ontstaan, p. 423:

"... fondé sur l'aerodynamique. Il est basé sur l'existence de cyclones de LŒTENS, se produisant au passage de l'air dans les cavités supérieures, cyclones donnant naissance à des sons qui ne sont nullement tenus d'être des harmoniques du son laryngien et qui s'ajoutent à lui suivant des conditions variées".

Deze opvatting is in strijd met de experimenten, bij de gedragen klinkers constateert men immers opeenvolgende perioden die exact gelijk zijn aan elkaar. Dit onderdeel kan men echter laten vallen zonder dat de theorie daardoor wordt aangetast.

Deze theorie is een intern Franse aangelegenheid gebleven. BOUASSE (1929 a en b, 1930), HUSSON en TARNEAUD (1933) en HUSSON (1936) hebben zich er tegen verzet, met het argument, dat het vormen van wervels als een parasitair verschijnsel beschouwd moet worden, dat afbreuk doet aan de energie van de lopende golf; zoals dit door BOUASSE was geconstateerd bij wervelvorming aan snaarinstrumenten.

Hoewel men vele kwalitatieve argumenten tegen deze theorie kan aanvoeren, was tot nu toe nog geen kwantitatief argument geleverd. Wij menen dit gedaan te hebben door de proeven die in hoofdstuk VI beschreven worden voor wat betreft de invloed van de ruimte van Morgagni en door die in hoofdstuk V (ten overvloede) betreffende het ontstaan van de formanten.

Als kwalitatief argument heeft men merkwaardig genoeg niet gebruikt, dat vele dieren stem kunnen vormen, zonder dat zij valse stemplooiën bezitten, dus zonder een ruimte van MORGAGNI. Hoewel dit argument slechts aan een analogie ontleend wordt, geeft het toch aan, dat de aerodynamische theorie slechts in een beperkt aantal gevallen een verklaring zou kunnen geven.

2.2.5. Theorie "Neuro-Chronaxique" van HUSSON.

In de laatste jaren is in Frankrijk een nieuwe theorie over de stemvorming gelanceerd, Husson (1950), door een vooraanstaand lid van een actieve en invloedrijke werkgroep.

Deze theorie berust op wanbegrip over de physica van de stemvorming en op een hypothese ad hoc over een uiterst korte chromaxie van de spiervezeltjes, die zich loodrecht op de lengterichting in de stemplooien bevinden.

De theorie is gevaarlijk, omdat men op grond er van bij pathologische afwijkingen van het strottenhoofd de oorzaak op de verkeerde plaats zoekt en omdat er slechts verwarring door kan ontstaan.

Omdat de bespreking en de weerlegging van deze theorie ons hier te sterk zou ophouden hebben wij deze verschoven naar het aparte hoofdstuk VIII:

2.3. Amplitudomodulatie

2.3.1. *Transmissiekromme*

De modulatie van het uitgaande signaal is het resultaat van de werking van het aanzetstuk op de frequentiemodulatie door de stemplooien. Wij gaan er daarbij van uit, dat het aanzetstuk slechts op de amplituden in het mengsel van harmonischen in de stemspleet modulerend werkt, wat in de term amplitudomodulatie opgesloten ligt. Door het aanzetstuk worden geen frequenties bijgemengd, laat staan anharmonischen.

Het gaat hier immers om gedwongen trillingen, zij het dan in een systeem met vele vrijheidsgraden. Daarbij moet wel een beperking gemaakt worden. De trilling mag niet zo sterk worden, dat het systeem in een gebied komt, waar de werking niet-lineair is. Als dit toch zou voorkomen, dan is de vervorming echter zodanig, dat uitsluitend harmonischen van de eigen grondtoon bijgevoegd worden en dit zou er dus op neerkomen, dat het mengsel van harmonischen bij de stemspleet een iets andere samenstelling kreeg.

Niet-lineaire vervorming zou kunnen ontstaan als gevolg van de tamelijk slappe wanden van het aanzetstuk. RUSSELL (1929 en 1931^a) heeft hier de aandacht op gevestigd en het vermoeden uitgesproken, dat hierdoor dan toch de beroemde anharmonischen zouden kunnen ontstaan. Hij deed dit naar aanleiding van de proeven van MILLER (1922, p. 180) over de invloed van de wand op het geluid van pijpen. Deze constateerde namelijk, dat daardoor onder omstandigheden de verschillende tonen in het mengsel niet volkomen harmonisch waren. Een verklaring geeft hij niet. Waarschijnlijk wordt door dit wandeffect de voortplantingssnelheid van het geluid in de buis frequentieafhankelijk. LOTTERMOSER (1937) onderzocht eveneens de invloed van de wand.

Bij de stemvorming kunnen echter door een eventueel wandeffect geen anharmonischen ontstaan, omdat detrilling van de stemplooien

dwingend oplegt, dat de trillingen in de stemspleet harmonischen zijn van de frequentie waarmee zij trillen, in verband met de fasen *). Dit in tegenstelling tot de proeven van MILLER, die betrekking hebben op aangeblazen pijpen.

Op grond van de proeven van KING en LAWTON (1950) en de theorie die zij geven over de trilling van weefsels, moet men echter verwachten, dat het meegeven van de wanden, bij de frequenties waar het hier om gaat, gering zal zijn. Dit is in overeenstemming met de proeven van BERGER (1932), die bij een patient met een opening in het strottenhoofd een zuiver sinusvormige toon aan het aanzetstuk toevoerde en constateerde, dat de uitgaande toon eveneens sinusvormig was, zonder merkbare vervorming.

De eigenschappen van het aanzetstuk kunnen dus weergegeven worden door een transmissiekromme voor de betreffende instelling, die een grafiek is van het quotient van de volumesnelheid in het uitgaande mengsel en de volumesnelheid aan het begin van het aanzetstuk, in afhankelijkheid van de frequentie.

Over deze transmissiekromme bestonden slechts schattingen. Experimenten met het natuurlijke aanzetstuk of met modellen waren niet verricht. In hoofdstuk IV beschrijven wij proeven over de transmissie van het aanzetstuk (voor de belangrijkste klinkers) bij een man met een hemilaryngectomie **).

Er doet zich echter een moeilijkheid voor, waaraan nog te weinig aandacht is geschonken. Bij de stemvorming zijn de eigenschappen van het aanzetstuk namelijk niet constant, ook niet wanneer het een klinker betreft, die zo goed mogelijk op constante toon en met constant timbre gezongen wordt, want de doorsnede van de stemspleet is niet constant.

Men krijgt dan eerst te maken met de impedantie (complexe weerstand) van de stemspleet en daarna met de aanpassing aan de zoveel wijdere luchtpijp en de daarmee verbonden longen.

De aanpassing aan de luchtpijp en de longen is practisch dezelfde als die aan de vrije ruimte, als gevolg van de tamelijk slappe wanden van de luchtpijp en omdat de longen slechts zwak resoneren. Er is hoogstens een sterk gedempte eigenfrequentie aan de onderkant van het gebied waarin de grondtonen van de spreekstem van de man liggen, namelijk bij rond 100 Hz, GIESZWEIN (1925). Zie ook PIERACH (1931), W. TRENDELENBURG en STAHL (1938) en TARNÓCZY (1943^b).

De impedantie van de stemspleet is echter vrij groot, zie

*) Op deze uiterst belangrijke conclusie komen wij nog terug in 2.4.

***) Door deze proeven en de aansluitende berekeningen en beschouwingen over modellen, over het aanzetstuk en over het strottenhoofd konden wij belangrijk verder komen. Zij vormden de basis van het onderzoek en van de theorie in dit hoofdstuk

4.7.2. en daardoor is het effect toch gering. Men zal het relatief sterkste effect verwachten bij die klinkers, waarbij het klinkerpatroon zodanig is, dat de stemspleet wijd open gaat en bij de lage formanten.

Het effect van het open en dicht gaan van de stemspleet bestaat in dit opzicht in het sterker dempen van de formanten.

SOVIJÄRVI (1938) heeft met behulp van een zoektoonmethode de structuur van gefluisterde klinkers onderzocht. De kromme, die op deze wijze verkregen wordt, is verwant met de transmissiekromme. De bekrachtiging gebeurt nu echter niet in één punt; de stemplooiën zijn voortdurend uiteen en in rust en het geluid wordt verkregen, doordat overal langs het aanzetstuk wervels ontstaan door de voorbijstrijkende lucht.

Men veronderstelt, dat het spectrum van de wervels zo is als dat van de witte thermische ruis (in even grote frequentiebanden evenveel energie). Afgezien van het feit, dat het aanzetstuk toch iets verschilt van dat voor de gezongen klinkers (door de voortdurend geopende stemspleet) moeten de formanten dezelfde zijn omdat het een lineair en volledig systeem betreft. De sterkteverhouding zal echter een andere zijn. De resultaten van TOKIZANE (1951), die zowel de stemhebbende als de gefluisterde klinkers onderzocht, bevestigen dit.

SOVIJÄRVI merkte vele, in het algemeen kleine, formanten op, die bij elke klinker in hetzelfde frequentiegebied aanwezig waren. Deze zogenaamde constante formanten voert hij terug op de verschillende kleine holten en onderverdelingen van het aanzetstuk. Deze formanten zijn echter zo klein, dat het niet redelijk is om er enige invloed op de karakteristiek van de stem van te verwachten. TOKIZANE vond deze kleine formanten met zijn veel onnauwkeuriger methode niet.

De transmissiekromme is afhankelijk van de voortplantingssnelheid van het geluid in het gas dat de holten opvult. Berekeningen tonen aan, o.a. DUNN (1950), zie 4.6., dat de frequentie van de formanten recht evenredig is met deze voortplantingssnelheid.

Het effect van de ademing van een ander gas dan lucht moet dus een transpositie zijn, zie hoofdstuk VI. Het spreekt dus vanzelf, dat bij de proeven van JONGBLOED (2.1.3.), de formant dezelfde bleef, want de samenstelling van het gas bleef dezelfde.

TYNDALL wordt genoemd als de eerste, die proeven nam met een vulling met waterstof. Hij beschrijft het merkwaardige effect als bovenaards. BÁRÁNY (1936) heeft, eveneens met waterstof, de invloed op de verstaanbaarheid nagegaan. Hij constateerde, dat deze bij een transpositie van een octaaf nog zeer goed was, dit in tegenstelling tot de transpositie door middel van een te snel ge-

draaide gramfoonplaat, waarbij de toch reeds kortdurende medeklinkers nog meer verkort worden.

In hoofdstuk VI beschrijven wij onze eigen proeven over de transpositie met een mengsel van zuurstof en waterstof, waarbij de zuurstof toegevoegd werd om de anders zeer inspannende en slecht reproduceerbare proeven ongehinderd te laten verlopen. Dank zij de zuurstof ontstaat namelijk geen ademnood meer. In Amerika kan men het ongevaarlijke helium gebruiken.

In dit verband moet o.i. nog opgemerkt worden, dat bij de normale ademing het uitgedemde gas van samenstelling verandert in de loop van de uitademing: de voortplantingssnelheid wordt kleiner. Bij het inzetten van de toon zal men daarom eerst de lucht van normale samenstelling, die zich in de schadelijke ruimte van de longen bevindt, moeten uitademen, voordat men een constant mengsel en dus een constante waarde van de formanten bereikt.

Berekeningen over de transmissiekromme van het aanzetstuk zijn zeer omslachtig, omdat een trial and error methode gevolgd moet worden en het invoeren van de demping maakt de formules vrijwel onhanteerbaar. Tot nu toe waren deze berekeningen dan ook slechts in een eerste en grove benadering en onder verwaarlozing van de demping gelukt, CHIBA en KAJIYAMA (1941) en DUNN (1950).

Wij berekenden aan een model de transmissie met inachtneming van de demping, hoofdstuk IV, 4.6., en konden daaruit verschillende conclusies trekken over de normale stemvorming.

CRANDALL (1927) heeft de omgekeerde weg gevolgd, uit de gegeven waarde van de formanten en het totale volume van het aanzetstuk heeft hij de verschillende holten berekend, die daarvoor verantwoordelijk konden zijn.

Deze moeilijkheden werden reeds samengevat in reden 3 van opraaf 1.1. De kleinste golflengten in het mengsel zijn namelijk van dezelfde orde of groter dan de kromtestralen van de vormveranderingen langs het aanzetstuk en de golflengten van de grondtonen kunnen een factor 30 groter zijn. De golflengten van de hogere harmonischen zijn niet zo groot, dat men mag afzien van de phaseverschillen langs het aanzetstuk, zodat de holten niet beschouwd mogen worden als buffers (condensatoren). In een lang en ongeveer cilindrisch gedeelte van het aanzetstuk kunnen b.v. staande trillingen optreden. Daarom is een methode van distributie van de constanten, zoals deze door DUNN (1950) en ook door ons wordt toegepast, hoofdstuk IV, noodzakelijk.

2.3.2. *Dempingsfactoren en halfwaardebreedten.*

De trillingen van het aanzetstuk worden door verschillende oorzaken gedempt, namelijk door:

1. Wand- of meetrildemping, d.w.z. door het meetrillen van de

wanden van het strottenhoofd, wat geregistreerd kan worden met behulp van een keelmicrofoon, b.v. J. en K. DE BOER (1940), of door het meetrillen van de wangen en in het algemeen van alle slappe delen.

2. Vernauwings- of wrijvingsdemping, d.w.z. door het verlies aan energie in een vernauwing van het aanzetstuk.

3. Stralingsdemping, doordat de mond in acoustische zin belast is door de ruimte waarin gesproken wordt en waaraan energie wordt afgedragen.

De relatieve bijdrage van elk van deze factoren was niet bekend en er waren geen berekeningen over uitgevoerd.*).

In hoofdstuk IV geven wij berekeningen, waaruit conclusies volgen over de bijdragen van de verschillende factoren. Deze berekeningen zijn tevens van belang voor de frequentie-modulatie, de inwendige weerstand en de koppeling, terwijl verschillende zangtechnische kwesties er door opgehelderd worden.

Uit proeven over de modulatie kan de halfwaardebreedte van de formanten bepaald worden (enkele honderden Hz), of, wanneer de modulatie direct geanalyseerd is op formanten, de dempingsfactoren (logarithmisch decrement van ongeveer 0,1 tot 0,4). Neemt men aan, dat het profiel van de formant in de naaste omgeving beschreven kan worden door de resonantiekromme van een gedempte oscillator met één vrijheidsgraad, en de experimenten en de theoretische overwegingen wijzen daar op, dan volgt hieruit een eenvoudige betrekking tussen de halfwaardebreedten en de dempingsfactoren, zie hoofdstuk IV.

Dempingsfactoren kunnen ook bepaald worden zonder stem te vormen, door het aanzetstuk op andere wijze in trilling te brengen, b.v. door het te bekloppen, of met een vonkontlading.

W. TRENDLENBURG (1936^a), TARNÓCZY (1943^a en ^b) en v. BÉKÉSY (1937) vonden zo waarden van 0,1 tot 0,4 voor het logarithmisch decrement, in goede overeenstemming met de op directe wijze gevonden waarden. TARNÓCZY constateerde aan modellen en aan het aanzetstuk, dat de doorsnede van de stemspleet enige invloed had, de demping nam toe bij toenemende doorsneden. v. BÉKÉSY wijst er op, dat de afwijkende resultaten van COTTON (1934), die evenals SCRIPTURE o. a. met een zogenaamde waterresonator werkte en grote dempingsfactoren vond, veroorzaakt werden, doordat de wanden van COTTON's modellen een zekere poreuze structuur hadden, waardoor in de zeer vele en kleine holten een extra demping optrad. STEWART (1922) en WAGNER (1936) constateerden met hun spreekmachines, dat

*) De proeven en de theorie van KING en ALLEN (2.3.1.) over de eigenschappen van weefsels maken het waarschijnlijk, dat de demping door de weefsels afneemt bij toenemende frequentie.

de grootte van de dempingsfactoren betrekkelijk weinig invloed had op het waargenomen karakter van de klinker. Het best voldeden waarden, die ongeveer gelijk waren aan de in de modulatie voorkomende.

Dat de demping niet geheel onbelangrijk is concluderen wij uit de experimenten van DUNN en SCHOTT (1950) met een spreekmachine. Zij verbazen zich er over, dat de klank neusachtig is, terwijl de machine niet voorzien is van een „neus”. De dempingsfactoren van hun apparaat zijn echter te groot en daarvoor heeft het oor een goede neus.

2.3.3. *Practische kwesties.*

De ervaring leert, dat men eenzelfde klinker op vele manieren kan produceren, met handhaving van vrijwel hetzelfde timbre.

Bekend is b.v., dat men redelijk kan spreken terwijl iets tussen de tanden geklemd wordt. Dat dit niet gaat zonder dat de tong ongebruikelijke standen aanneemt wordt nog duidelijker, wanneer men probeert om de klinkers uit te spreken wanneer tevens de lippen niet veranderd worden.

Na enige oefening is het ook gemakkelijk om te compenseren voor een niet al te lange buis, die in de mond gehouden wordt. Ook kan men compenseren voor het verkleinen van de mondholte, door deze, bij overigens constante instelling, langzaam te laten vollopen met water, en deze correctie behoeft maar zo gering te zijn, dat het nauwelijks opgemerkt wordt.

Bij het spreken en zingen hangt de instelling voor de klinker af van het woord waarin hij voorkomt, de voorafgaande en de volgende medeklinker hebben invloed, zie HOUSE en FAIRBANKS (1953). Normaal zal in een bepaald geval steeds weer dezelfde stand gebruikt worden, door de gewenning en omdat niet elke instelling voldoet aan de voorwaarde, dat het stemapparaat zo goed mogelijk ontspannen is.

Deze ervaringsfeiten worden bevestigd door conclusies op grond van theoretische overwegingen, o.a. DUNN (1950), zie 4.6.3. Door de over een groot gebied continu instelbare tong zijn er zoveel vrijheidsgraden beschikbaar, dat gemakkelijk door tal van instellingen voldaan kan worden aan de voorwaarde, dat de belangrijke formanten gelijktijdig in hun juiste gebied liggen.

Waar de stem het individuele karakter aan ontleent is nog steeds niet duidelijk. SOVIJÄRVI (2.3.1.) zocht het in de constante formanten. KAISER (1939, p.41) constateerde uit statistisch materiaal over Nederlanders, dat de klankvolheid (sonoriteit) verband hield met de afmetingen van het gehemelte.

De klank wordt als neusachtig gewaardeerd, wanneer speciaal in het gebied van 2000 tot 3000 Hz formanten aanwezig zijn. Dit is

normaal het geval, wanneer het zachte gehemelte de neusholte vrij laat. Op grond van het grote aantal vrijheidsgraden kan verwacht worden, dat de neusholte niet steeds behoeft mee te doen. Over de demping zie 2.3.2.

Het is bekend, dat in het hoge register het onderscheid tussen de verschillende klinkers teloor gaat, maar de verklaring ervan wordt niet steeds gezien. Deze is 1e. dat de grondtoon dan boven de laagste formant ligt, zodat deze niet aanspreekt en 2e, dat dank zij de hoge grondtonen in het voor de spraak belangrijke gebied weinig harmonischen aanwezig zijn, zodat de trefkans van een formant op een bijbehorende harmonische gering is. Voor de karakterisering van een klinker is één formant nog niet voldoende, en de kans dat enige formanten een harmonische zullen aantreffen is zeer gering.

Afgezien van het feit dat de hoge tonen, waarvoor dit geldt, met het falsetregister voortgebracht worden, is dit niet in strijd met de opvatting, dat de stem gevormd wordt door het periodiek aanstoten van een resonator, zoals wel gemeend wordt. De herhalingsfrequentie is dan immers zo groot, dat de voorgaande stoot nog niet uitgedempt is wanneer de volgende komt, zodat de te bereiken amplituden sterk van de fasen afhangen.

Vooral wanneer het strottenhoofd wordt opgetrokken bij de hoge tonen kunnen er moeilijkheden ontstaan, wanneer de grondtoon in de buurt van een formant komt. Het karakter gaat dan verloren en het geluidsvolume wordt soms zeer klein, wat samenhangt met de koppeling, zie 2.4.

Getraïnde zangers voorkomen dit door het zogenaamde dekken, een term, die afkomstig is uit de orgeltechniek. Het strottenhoofd wordt dan naar beneden gebracht en het aanzetstuk wordt gewijzigd, door het strotklepje wat naar boven te klappen. Hierdoor ontstaat een grotere keelholte, met een lagere formant, die waarschijnlijk wat sterker gedempt wordt en het timbre wordt iets anders, de hogere harmonischen komen beter door. SCHILLING (1914), HUSSON (1933), LUCHSINGER (1942).

Deze wijzigingen in de keelruimte mogen niet overdreven worden. RUSSELL (1931^b) constateerde in een bepaald geval een eigenaardige constrictie van de keelruimte. Tussen de basis van het strotklepje en de wigvormige kraakbeentjes van WRISBERG was een vernauwing ontstaan, op de wijze van een sluitspier, die als een effectief filter voor de hogere harmonischen werkte.

Zangleraren vertellen, dat de stem in het hoofd ontstaat en daarmee bedoelen zij waarschijnlijk, dat bij de juiste instelling van het aanzetstuk en bij een flink geluidsvolume de resonantie duidelijk merkbaar is in de holten van het hoofd. Om de kwaliteit van de stem van hun leerlingen te verbeteren, laten zij deze neu-

riën en dit heet, behalve voor het leren wennen aan de eigen stem en het trainen op het vasthouden van de toonhoogte, in de eerste plaats bedoeld te zijn om hen te leren op de juiste wijze, met zo ruim mogelijke keelholte, een flink geluidsvolume te produceren. De resonantie van de holten in het hoofd wordt daardoor goed gevoeld, bij overdrijven zelfs als hoofdpijn.

Of hier nog de psychologische factor bijkomt, dat de aandacht van de zanger afgeleid wordt van zijn strottenhoofd, dat men los en ontspannen wenst, is ons onbekend.

Bij het grote volume behoort ook het zogenaamde „staan” van de stem. De resonantie is dan zo krachtig, dat de borstholte sterk in trilling komt en het is de bedoeling, om deze trilling door een juiste ademtechniek te handhaven.

Verder zijn termen als „klankbord”, voor het harde gehemelte, in zwang. PAGET (1930) wees er reeds op, dat deze term sterk overdreven is, want de golflengte van de lagere harmonischen is groot ten opzichte van de afmetingen van het gehemelte. De term is waarschijnlijk ontstaan, omdat men bij een groot volume duidelijk trillingen in het hoofd voelde. Eerst voor de hoogste harmonischen, die PAGET nog niet kende, met hun golflengten van ongeveer 8 cm, begint dit effect een rol te spelen.

De snelheid van spreken kan, behalve om andere redenen, niet willekeurig opgevoerd worden wegens de begrensde halfwaardebreedten. Bij onveranderde klinker mag de grondtoon niet te snel variëren en bij onveranderde grondtoon mag het aanzetstuk niet te snel van de ene in de andere klinker overgaan.

2.4. Koppeling

2.4.1. *Theorie van WIEN. Proeven van VOGEL en WIEN.*

Wien heeft in 1897 de theorie van twee gekoppelde systemen met één vrijheidsgraad opgesteld, waarbij hij formules gaf voor de vrije ongedempte trilling, de vrije gedempte trilling en de gedwongen trilling, wanneer een van beide systemen aangedreven wordt.

De resultaten voor de gedempte vrije trilling interesseren ons hier. Het blijkt, dat in elk systeem tegelijkertijd twee van elkaar onafhankelijke trillingen ontstaan, met in het algemeen ongelijke frequenties en ongelijke dempingsfactoren, die verschillen van die in de niet-gekoppelde systemen.

Wanneer de dempingsfactoren van de losse systemen aan elkaar gelijk zijn, dan zijn ze dit ook voor de vrije trillingen van de gekoppelde systemen, zodat er dan steeds zwevingen zullen optreden. Zijn de dempingsfactoren van de losse systemen verschillend,

dan hangt het er van af, hoe de koppelingsfactor zich verhoudt ten opzichte van het verschil van de dempingsfactoren. Wanneer de koppeling gering is, dan is een van de trillingen zwak gedempt en de andere sterk, zodat na enige tijd slechts de zwak gedempte over is. De frequenties van deze trillingen liggen in de buurt van de eigenfrequenties van de losse systemen.

In de omgeving van de resonantie (wanneer de eigenfrequenties van de losse systemen dicht bij elkaar liggen) komen er toonverschuivingen en toonsprongen. Is de koppelingsfactor gelijk aan het verschil van de dempingsfactoren, dan is er in het resonantiepunt een discontinuïteit. Bij sterke koppeling zijn er in het resonantiepunt zwevingen, die gedurende de gehele trilling aanhouden, zie fig. 3, waarin de verschillende gevallen zijn aangegeven.

fig. 3.

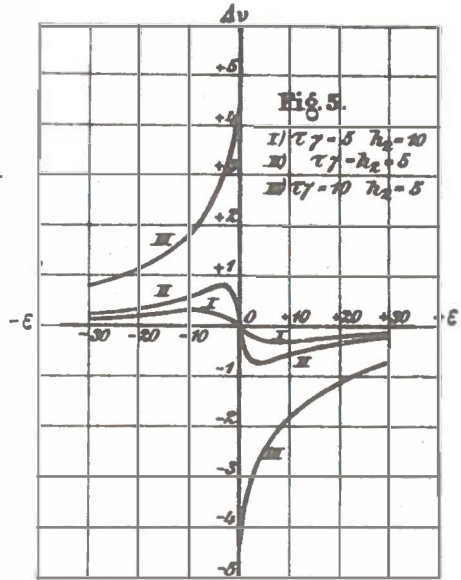
Invloed van de koppeling op de toonhoogte.

Geval I: Damping overwegend.

Geval II: Damping gelijk koppeling.

Geval III: Koppeling overwegend.

Verdere toelichting in de tekst (fig.5 uit artikel van WIEN, 1897).



De invloed van de koppeling op het weinig gedempte systeem (alleen het dempingsverschil is belangrijk), frequentieafwijking $\Delta\nu$, is uitgezet als functie van de frequentieverstemming ϵ tussen de beide systemen. De dempingsfactoren worden voorgesteld door h en het verschil tussen de dempingsfactoren is $h_2 (h_1 = 0)$; γ is de eigen frequentie van het weinig gedempte systeem; τ is de koppelingsfactor bij krachtkoppeling, $\tau^2 = \tau_1 \cdot \tau_2$, waarbij τ_1 en τ_2 bepaald worden door de coëfficiënten in de vergelijking voor de potentiële energie.

Koppeling door de versnelling leidt tot een geheel analoog resultaat en koppeling door de wrijving blijkt verwaarloosd te kunnen worden.

Bij mechanische systemen vond WIEN deze conclusies, die wij beknopt weergaven, bevestigd. VOGEL (1920) paste de theorie van WIEN toe op het ingewikkelder geval van een doorslaande tong, die gekoppeld is aan een resonator, een cilindrische buis of een bol.

Van de beide vrije koppelingstrillingen bleek de zwak gedempte in de regel de toonaangevende te zijn en de frequentie daarvan is ongeveer gelijk aan de eigen frequentie van het systeem met de kleinste demping *).

In de omgeving van de resonantie werden de dempingsfactoren aan elkaar gelijk en traden bij vaste koppeling labiele toestanden van de frequentie op. Was de buis iets te hoog gestemd, dan werd de toon van tong en pijp verlaagd. Dit betekent, dat van de losse systemen de tong het zwakst gedempt was. Bij het overschrijden van de resonantie volgde een meer of minder plotselinge verhoging van de toon. Werde de buis nog langer gemaakt, dan werd de toon weer lager, tot bij afstemming op de eerste boventoon van de buis een soortgelijke sprong volgde.

De grootte van de toonveranderingen en het plotselinge karakter van de sprong hingen van de sterkte van de koppeling af, zoals bewezen werd door boringen in de kop, vlak bij de tong. Dikwijls verdween de toon bij de resonantieplaats geheel.

De verklaring hiervan is, dat de demping van de koppelings-trilling dan zo groot wordt, dat het ontstaan van de trilling verhinderd wordt, want bij lossere koppeling sprak de buis onder overigens dezelfde voorwaarden wel aan. In dit verband is nog interessant, dat de koppeling met langer wordende buis lossier wordt, hij is voor de boventoon kleiner dan voor de grondtoon.

De eenmaal aanwezige trilling had zekere stabiliteit, door langzame verandering van de lengte van de buis kon de toon een zeker bedrag over de resonantieplaats getrokken worden, omlaag en omhoog. Des te meer, naarmate de koppeling vaster was.

VOGEL heeft niet aangegeven, dat bij het afsluiten van de extra opening in de kop (in de buurt van de resonantie sprak het systeem dan in het geheel niet aan) de resonantie van de buis verschuift naar die van de gesloten pijp en dit heeft o.i. latere onderzoekers parten gespeeld. VOGEL en WIEN (1920) toonden aan, dat men met elektrische systemen, een generator en een gekoppelde

*) Hieruit trekken wij een zeer belangrijke theoretische conclusie: de effectieve demping van de stemplooiën moet kleiner zijn dan die van het aanzetstuk. Was dit niet het geval, dan zou de trilling bepaald worden door het aanzetstuk, met het gevolg, dat het strottenhoofd zijn dynamiek zou verliezen.

Verder volgt er een zeer belangrijke praktische conclusie uit: wanneer het strottenhoofd nog slechts een geringe dynamiek te weeg kan brengen, dan bestaat er kans, dat dit slechts door een te grote demping van de stemplooiën veroorzaakt wordt, zonder dat de spierwerking geleden heeft.

secundaire kring, alle verschijnselen die door VOGEL gevonden waren, kan reproduceren.

2.4.2. *Proeven met het natuurlijke aanzetstuk en met modellen.*

Bij de stemvorming heeft men ook te maken met gekoppelde systemen en de verhoudingen zijn er nog iets gecompliceerder dan bij de proeven van VOGEL.

Om te beginnen kunnen de stemplooien beter vergeleken worden met een opslaannde tong dan met een doorslaande. Verder komt men voor de vraag te staan, welke systemen nu eigenlijk aan elkaar gekoppeld zijn en hoe. Het aanzetstuk zal het ene systeem zijn en wil men verder maar één ander systeem hebben, om de theorie van WIEN toe te kunnen passen, dan moeten luchtpijp en longen tesamen genomen worden met de stemplooien. Vogel moest het overeenkomstige doen, hij verwaarloosde de windruimte in de berekening; bij de proeven werd deze constant gehouden. De functie van de windruimte zocht hij uitsluitend in het onderhouden van de vrije trilling van tong en pijp, en hij kwam op deze wijze tot een goede overeenstemming met de theorie.

Dat de windruimte en de tong twee systemen vormen, komt o.i. waarschijnlijk tot uitdrukking in het meetrekken van de toon over de resonantieplaats, maar in eerste benadering kunnen tong en windbuis als één systeem beschouwd worden. Zo ook de stemplooien en de luchtpijp en de longen, temeer, omdat de acoustische eigenschappen van de longen practisch niet veranderen tijdens de uitademing.

Wanneer men bij de stemvorming naar het effect van de koppeling zoekt, zie ook 2.4.3., dan moet wel duidelijk zijn, wat er van verwacht kan worden, want hierover heerst verwarring in de literatuur. Bijzondere effecten kunnen alleen dan verwacht worden, wanneer de frequentie van de grondtoon of die van een andere lage harmonische ongeveer gelijk is aan de frequentie van een formant, en niet, wanneer dit met een van de hogere harmonischen het geval is, want de trilling van de stemplooien zal zeer weinig van de hogere harmonischen afhangen, zoals reeds onder 2.1.1. werd betoogd. De amplitudo en het karakter van de trillingen van de plooiën kan slechts dan door het aanzetstuk beïnvloed worden, wanneer een formant samentreft met een van de laagste harmonischen en deze invloed zal sterk afnemen met toenemend rangnummer van de harmonische. Verder zal het afhangen van de sterkte van de koppeling, die des te lossier is, naarmate de demping van het aanzetstuk voor de betreffende formant groter is. Zie voor de uitwerking van deze mening 4.7.2.

HUSSON acht de proef van THOORIS (1927, p.189) een bewijs voor de invloed van de koppeling op de trilling van de plooiën. THOORIS

drukte namelijk via de neusholte het zachte gehemelte neer van een proefpersoon, die op zeer hoge toon zong (480 Hz), en constateerde, dat de toon daardoor lager werd (426 Hz). Door het meedoen van de neusholte worden formanten tussen 2000 en 3000Hz toegevoegd en wordt de koppeling lossier en daaraan wijt Husson het verlagen van de toon.

De gegevens over deze proef zijn echter onvoldoende om na te kunnen gaan, of dit overeenkomt met de theorie van WIEN. Wij achten het overigens niet onmogelijk, dat dit effect een andere, mechanische, oorzaak heeft. Vooral aan de hoge kant van het register zijn de spieren, die het stemapparaat instellen, namelijk zo gecoördineerd, dat een ingreep in het ene deel consequenties heeft voor het andere deel. Bekend is b.v., dat boven een bepaalde frequentie de klinkers niet meer genasaliseerd kunnen worden.

NEGUS (1929, p.390) experimenteerde met het strottenhoofd van een aap, om de invloed van het aanzetstuk op de grondtoon te bepalen. Hij gebruikte cilindrische buizen, die uitgeschoven konden worden, als aanzetstuk.

Er bleek geen invloed op de toonhoogte te zijn, hoewel de druk onder de stemspleet bij zijn proefopstelling van de lengte van de buis afhing. De toonhoogte veranderde wel, wanneer het aanzetstuk zo nauw gemaakt werd, dat het een flinke weerstand had, omdat de druk boven de stemspleet dan opliep.

Dit resultaat wordt nogal eens aangehaald in de literatuur om daarmee aan te tonen, dat de koppeling te verwaarlozen is. NEGUS vermeldt echter niet, of hij buizen van minstens 50 cm lengte gebruikte en pas in dat geval zou hij, bij de opgegeven grondtoon, resonantie hebben kunnen krijgen. Deze proeven bewijzen o.i. slechts, dat het aanzetstuk de sterkst gedempte van de twee systemen was.

WEISS (1932^a en b) heeft een proef beschreven, die een fraai voorbeeld is van het effect van de koppeling. Hij verlaagde de laagste formant van het aanzetstuk door middel van een in de mond genomen buis, zodat deze binnen het frequentiegebied voor de normale zang kwam te liggen. Bij het zingen van een glijdende toon bleken nu moeilijkheden voor te komen, zoals VOGEL ze had beschreven. Het volume nam sterk af wanneer de grondtoon in bepaalde frequentiegebieden kwam en er kwamen frequentiestoringen. WEISS bracht deze in verband met de zogenaamde registerovergangen, moeilijkheden, die zich voordoen tijdens het vormen van de stem, wanneer deze het gehele frequentiegebied doorloopt. Deze proef, die gemakkelijk te herhalen is, is later nauwkeuriger en met verschillende variaties door anderen uitgevoerd en beschreven.

HUSSON (1933) verklaarde een opmerkelijk geval, dat door TARNEAUD (1933) waargenomen was, „phénomène paradoxal de Tarneaud”,

door de koppeling, zonder dit exact te bewijzen. Het betrof een zangeres, die het strottenhoofd bij de hoge tonen veel te sterk had opgetrokken en ook bij zeer grote krachtsinspanning nog geen behoorlijk volume kon onbrengen, hoewel de laagste formant slechts met de 2e of 3e harmonische samenviel. De amplitudo van elke plooi kon tot $\frac{1}{2}$ cm (!) bedragen. Als therapie werd toegepast het naar beneden brengen van het strottenhoofd, het ontspannen en groot maken van de keelholte, het dekken van de stem. Daarna kon de zangeres bij dezelfde toonhoogte met een matige amplitudo van de plooiën een groot volume voortbrengen.

KÅGEN en W.TRENDELEBURG (1937) herhaalden de proef van WEISS met cilindrische buizen van verschillende lengten, onder registrering van de modulatie. Bij een buis van 1,5 m lengte b.v. vonden zij storingen bij 90, 180 - 195, 270 en 380 Hz, dus ruwweg volgens de reeks van harmonischen van een aan beide zijden open pijp.

De storingen bestonden in een voorbijgaande opheffing van de periodiciteit en de trillingen werden zeer onoverzichtelijk. In de omgeving van de resonantie waren de betreffende lagere harmonischen afwisselend sterk aanwezig, wat subjectief de indruk van toonhoogtesprongen wekte. De grondtoon bleef echter steeds behouden, hoewel soms zwak. Probeerde men om de toon bij de resonantie te handhaven, dan ontstonden tremoloachtige (rhythme van ongeveer 10 per sec.) schommelingen. De storingen waren des te geringer, naarmate zij bij een hogere harmonische van de buis ontstonden en door te nasaliseren, d.w.z. door te zingen met open neusholte, vielen zij geheel weg, wat met VOGEL verklaard wordt door het lossen van de koppeling, dank zij de extra luchtweg naar buiten. Zij konden geen verklaring geven voor de aard van de storingen, zie 2.4.3.

W.TRENDELEBURG (1938^a) heeft hetzelfde verschijnsel nog nader onderzocht aan het zingen met constante toonhoogte in een buis van variabele lengte. Hij constateerde, dat de toonstoringen overeenkwamen met de door VOGEL gevonden resultaten.

HUSSON nam aan, dat de plooiën aperiodisch gedempt zijn, wat plausibel lijkt, omdat zij telkens bij het sluiten tegen elkaar klappen. Het is echter o.i. niet juist (effectief zijn zij het zeker niet, zie de voetnoot bij 2.4.1.), want STEINBERG (1934) vond, dat bij het inzetten van een toon het volume in rond 8 m sec. maximaal kon worden en bij een frequentie van 150 Hz is dit slechts iets langer dan de duur van de periode. Dit is in overeenstemming met de resultaten van BACKHAUS (1932) en van W.TRENDELEBURG (1937). In het geval van resonantie tippen de plooiën bij het sluiten waarschijnlijk ook slechts even tegen elkaar, of misschien zelfs helemaal niet, dit in analogie met de proeven van MÜLLER, zie ook 2.4.3.

E. MÜLLER (1939) experimenteerde over de invloed van de lengte van de aanzetbuis en windbuis op de trilling van de pseudo plooien van een model met kikkerspieren. De resultaten wijken af van die met een normaal strottenhoofd, in zoverre, dat de storingen optraden bij een gegeven lengte van aanzetbuis en windbuis te zamen, die reageerden als een aan één kant gesloten pijp. Ze kwamen echter ook hier, wanneer de grondtoon of een boventoon van een buis met de bewuste totale lengte overeenkwam met de frequentie van de plooien. Het karakter van de storingen kwam goed overeen met de theorie van WIEN. Bij de resonantie bleken de spieren niet meer te sluiten, maar te trillen vanuit een ander niveau en een andere evenwichtsstand, overeenkomend met het falsetregister.

W. TRENDELEBURG (1938^{b, c} en 1940^a) onderzocht, of de moeilijkheden bij het normale aanzetstuk, dus zonder in de mond genomen buizen, wanneer een glijdende toon gezongen wordt vanaf de laagste toon in het borstregister tot de hoogste in het falsetregister, inderdaad veroorzaakt werden door de koppeling, zoals WEISS had geopperd. Hij kwam tot een negatief resultaat, omdat het karakter van deze storingen niet overeen kwam met wat van de koppeling verwacht moet worden, en schrijft de storingen toe aan de grenzen van de registers. Een bevestiging hiervoor ziet hij in de resultaten bij kinderen. Ook daar zijn de storingen duidelijk en hun plaats is onafhankelijk van de gekozen klinker (formant).

FARNSWORTH en SMITH hebben bij de reeds genoemde film, 2.2.2., tevens de invloed van de koppeling nagegaan. Zij onderzochten namelijk de invloed van het aanzetstuk op de trillingswijze van de stemplooien bij constante instelling van het aanzetstuk (nodig in verband met de opname), door op andere wijze de formanten te variëren. Door ademing of opvulling met helium, waardoor de formanten getransponeerd worden en door de mond af te sluiten door een doorzichtig schermpje, waardoor de formanten practisch geheel onderdrukt worden, het geluid wordt dan vrijwel een stemhebbende m.

De invloed op de trillingen van de plooien was niet significant. Hun conclusie, p 14: „The evidence obtained by these two experiments is that modification of the vocal resonances which ordinarily occur in the production of the various sounds cause little or no reaction on the movement of the vocal cords” is echter voorbarig, want in het ene geval werden de formanten nog hoger dan ze al waren en in het andere geval verdwenen ze practisch.

De conclusie over al deze onderzoekingen kan zijn, dat de koppeling van het aanzetstuk aan de stemplooien een storende invloed heeft onder abnormale omstandigheden, hetzij door verlenging met een buis, hetzij in het hoge register door een onverstandige opwaartse beweging van het strottenhoofd. In het normale geval zal de koppeling niet tot storingen leiden, omdat deze gemakkelijk

vermeden kunnen worden, door het zogenaamde dekken, door de keelholte te ontspannen en groot te maken, of door de neusholte actief bij het aanzetstuk te betrekken, in het algemeen door het dempingsverschil groot te maken. Er blijven dan slechts eventuele moeilijkheden bij de overgangen tussen de registers over.

2.4.3. Koppeling en inwendige weerstand.

Het vraagstuk van de koppeling kan in een geheel nieuw licht geplaatst worden, door gebruik te maken van de impedantievoorstelling.

Het strottenhoofd is namelijk op te vatten als een generator, met een zekere inwendige weerstand, waarvan het karakter niet exact bekend is, maar die blijkens onze berekeningen, zie 4.7.2, en de verschillende aangehaalde proeven groot moet zijn en toenemend met het rangnummer van de harmonische, die in de trilling van de stemspleet aanwezig is.

Aan deze generator is het aanzetstuk aangesloten, dat voorgesteld kan worden door een transmissielijn met een zekere frequentie karakteristiek.

De uitbreiding die wij nu, in verband met de koppeling, aan deze voorstelling geven is deze, dat, zoals uit theoretische overwegingen volgt, voor de formant de ingangsimpedantie van de lijn oneindig groot wordt, ware het niet, dat er altijd demping is.

Deze ingangsimpedantie van het aanzetstuk hangt sterk van de frequentie af. Voor de formanten wordt een hoge waarde bereikt, die des te groter is naarmate de demping voor de betreffende formant geringer is en tussen de formanten bereikt de ingangsimpedantie een minimum.

Moeilijkheden door de koppeling zullen slechts dan kunnen ontstaan, wanneer de ingangsimpedantie van het aanzetstuk van dezelfde orde is als de inwendige weerstand van de generator, of groter dan deze.

Anders geformuleerd: De acoustische impedantie, het quotient van de druk en de bijbehorende volumesnelheid, vlak boven de stemspleet is sterk afhankelijk van de frequentie. Bij een formant is dit quotient groot, zodat reeds bij een geringe volumesnelheid van deze frequentie de druk boven de stemspleet grote waarden bereikt; en de transmissie is groot. Voor een frequentie tussen twee formanten in is het quotient klein, zodat een grote volumesnelheid slechts een geringe tegendruk boven de stemspleet geeft; en de transmissie is klein *).

De koppeling van het aanzetstuk aan het strottenhoofd, dat

*) Daardoor komt het ook (en niet omdat de dempende laag daar het dunst is, J. en K. DE BOER, 1940), dat men met een keelmicrofoon de klinker zo goed kan waarnemen, want de drukken in het strottenhoofd zijn voor de corresponderende formanten groot.

werkt op de drukken die door longen en luchtpijp geleverd worden, kan slechts dan invloed hebben, wanneer de drukken boven de stemspleet groot worden en dit is het geval, wanneer een formant samentreft met een harmonische. Door het speciale karakter van de trillingen van de plooiën moeten de hogere harmonischen dan nog uitgezonderd worden.

Dan is ook duidelijk, waarom vele proefpersonen van WEISS het gevoel hadden „(als) schlüge ihnen der Ton auf die Stimmlippen zurück“.

Legt men dit criterium aan, dan worden de resultaten van de proeven van KÄGÉN en W.TRENDELENBURG (1937) o.i. inzichtelijk. Deze onderzoekers schreven de storingen namelijk toe aan de resonanties van een buis met twee open einden, maar dan zou de impedantie bij de stemspleet juist minimaal zijn.

De storingen worden echter veroorzaakt door de opeenvolgende resonanties van een aan één kant practisch gesloten buis en de lengte van deze buis is gelijk aan die van de in de mond genomen buis, met een correctie voor de lengte van het aanzetstuk.

In alle gevallen, waar de aard van de storing nader omschreven is, blijkt het namelijk zo te zijn, dat er een storing is, wanneer de grondtoon of de 1^e boventoon van de stemspleet gelijk is aan de grondtoon of een boventoon van de gesloten buis. Zo komt b.v. de 1^e boventoon van de stemspleet zeer sterk door, wanneer deze gelijk is aan een boventoon van de buis en wanneer dit het geval was met de grondtoon van de stemspleet, dan werd de uitgaande trilling vrijwel sinusvormig en kon de frequentie van de stemplooiën moeilijk veranderd worden.

Wanneer in het resonantiegebied getracht werd om de toonhoogte te handhaven, dan traden tremoloachtige schommelingen op. Wij menen, dat de reden hiervoor is, dat de toonhoogte toch nooit geheel constant gehouden kan worden, zodat de betreffende harmonische van de stemspleet wat heen en weer schommelt en daardoor verstemd raakt. Met het oog op de amplituden van de transmissiekromme is dit niet ernstig, want deze verlopen slechts langzaam, maar de fasen veranderen juist zeer sterk en dit is o.i. de reden van het ontstaan van een tremolo.

Door de impedantievoorstelling te gebruiken wordt het ook duidelijker, hoe het komt, dat in het falsetregister elke klinker sinusvormig gemaakt kan worden. Een formant valt dan samen met de grondtoon en de acoustische impedantie vlak boven de stemspleet is zeer hoog geworden, terwijl de andere harmonischen geen formant aantreffen en dus een geringe transmissie krijgen. De beschikbare energie wordt dan practisch volledig aan de grondtoon afgedragen. Het is waarschijnlijk, dat de stemspleet bij de resonantie iets meer geopend wordt, zodat het mengsel van harmonischen in voor de hogere ongunstige zin gewijzigd wordt.

Aan de hand van deze voorstelling kan men ook verwachten, dat de moeilijkheden tijdens de puberteit voor een deel veroorzaakt worden door de koppeling, b.v. bij het zgn. overslaan van de stem, wanneer dit ongeveer met een octaafsprong gebeurt. Bij deze labiele omstandigheden kan de druk aan de ingang van het aanzetstuk een grote rol gaan spelen, vooral wanneer b.v. de 2^e harmonische samentreft met de laagste formant.

Over de inwendige weerstand, die men aan de generator moet toekennen, zijn geen proeven genomen. Op grond van onze experimenten en berekeningen, zie hoofdstuk IV, 4.7.2, konden wij een schatting maken over de minimale waarde ervan.

2.5 Spreekmachines

In de loop der jaren is door een groot aantal onderzoekers getracht, om de verschillende spraakklanken, en ook gehele zinnen, na te bootsen met behulp van mechanische of elektrische modellen. WHEATSTONE (1837), RUSSELL (1928), PAGET (1930) en DUDLEY en TARNOCZY (1950) geven overzichten, waarbij ook oude methoden, die soms op meer of minder listig bedrog berustten, ter sprake komen.

De moderne ontwikkeling loopt over KRATZENSTEIN (1780), die als antwoord op een prijsvraag van de Universiteit van St. Petersburg mechanisch modellen voor de vijf cardinale klinkers construeerde, met een vorm, die zeer weinig met het aanzetstuk te maken had; VON KEMPELEN (1791), die er na lange jaren in slaagde om een mechanische machine te construeren, die hij in verschillende talen kon laten spreken. De gebruikte holten vertoonden wat meer gelijkenis met het aanzetstuk; WILLIS (1830), door wiens werk met mechanische modellen het karakter ende eigenschappen van de klinkers beter bekend werden; HELMHOLTZ (1863), die met behulp van een serie stemvorken aantoonde, dat de klinker opgebouwd kan worden uit harmonischen; STUMPF (1926), die met een groot aantal orgelpijpen het werk van HELMHOLTZ herhaalde en uitbreidde; PAGET (1923, 1924, 1930), die modellen van plasticine maakte met eigenfrequenties zoals hij die bij de spraak en de zang had waargenomen. De modellen waren voor een deel een copie van het aanzetstuk en hij kon er allerlei zangtechnische kwesties door ophelderen; STEWART (1922), die een electrisch model maakte, bestaande uit een generator en twee trillingskringen, die elk op een formant waren afgestemd; WAGNER (1936), die op soortgelijke wijze met vijf trillingskringen (grondtoon en vier formanten) werkte; DUDLEY, RIESZ en WATKINS (1939), die deze constructie vervolmaakten, zodat hele zinnen uitgesproken werden, VODER (gedemonstreerd op de Wereldtentoonstelling van San Francisco), DUDLEY (1939)

Vocoder (zelfde principe als de Voder, maar de dynamiek wordt ontleend aan geanalyseerde echte spraak) en DUNN en SCHOTT (1950), die een geheel nieuw principe toepassen, waarbij het aanzetstuk wordt voorgesteld door een overeenkomstige elektrische transmissielijn, zodat zij, op dezelfde wijze als bij het spreken, veranderingen kunnen aanbrengen langs het traject.

Over het succes van hun methode zijn ook de ontwerpers zelf niet geheel tevreden geweest. De waarneming door de hoorders werd b.v. beïnvloed door wat hun tevoren verteld was over wat nagebootst zou worden. De methode van DUNN en SCHOTT belooft echter veel voor de toekomst (mits de te grote demping weggewerkt kan worden).

Door al het werk over de synthetische spraak is veel bijgedragen tot de kennis van de subjectieve waarneming door de klankontvanger en tot de kennis van de wijze van productie door de klankgever.

Zo is b.v. gebleken, dat het dynamische karakter van de spraak zeer belangrijk is. Reeds VON KEMPELEN zorgde daarom voor een goede contrastwerking en DUNN en SCHOTT laten de frequentie van de grondtoon variëren, zodat de klinkers niet doods en saai worden.

Uit het werk van PAGET volgde de belangrijkheid van kleine holten, van de ligging van de articulatieplaats en de oorzaak van het neusachtig worden van de klank.

De dempingsfactoren bleken door het werk van STEWART en WAGNER weinig belangrijk te zijn, mits ze niet te groot genomen worden, want dan krijgt de stem een neusachtige klank, zoals uit het werk van DUNN en SCHOTT kan worden afgeleid.

Bij elektrische modellen blijkt verder, dat men er van uit kan gaan, dat de inwendige weerstand van de generator practisch oneindig groot is, STEWART, WAGNER, DUDLEY C.S. en DUNN en SCHOTT.

Hoewel slechts gedeeltelijk onder spreekmachines vallend, mag hier het werk van RIESZ (1929) en WRIGHT (1940) toch niet onvermeld blijven. RIESZ construeerde een kunstmatig strottenhoofd voor patienten, bij wie het strottenhoofd weggenomen was en die verder moesten ademen door een opening in de luchtpijp. De uitgeademde lucht wordt gebruikt om een tong in trilling te brengen en de gemoduleerde lucht wordt dan met een slangetje in de mondholte gebracht. WRIGHT nam willekeurige geluiden op en gebruikte deze voor de bekrachtiging van de keel, door middel van een soort beengeleiding. Hiermede kunnen zeer bijzondere effecten bereikt worden (Sonovox).

III

INLEIDING TOT DE EXPERIMENTELE HOOFDSTUKKEN IV, V EN VI

De eigen proeven vallen in drie groepen uiteen en zij worden in systematische volgorde beschreven in de hoofdstukken IV, V en VI.

Dit is niet de chronologische volgorde. Het onderzoek heeft zich ontwikkeld uit een test over de waarde van de aerodynamische theorie van SAVART en GUILLEMIN over de stemvorming, zie hoofdstuk VI.

In de eerste plaats, zie hoofdstuk IV, zijn proeven genomen om de transmissiekromme van het aanzetstuk te bepalen voor een aantal klinkers. Hierover waren nog niet eerder experimenten verricht.

Het natuurlijke aanzetstuk is voor deze proeven vanzelfsprekend verre te prefereren boven een model. Een model, ook al geeft het afmetingen nog zo goed weer, doordat het b.v. gegoten is naar een werkelijk aanzetstuk, heeft altijd het bezwaar, dat nog onbekend is, hoe goed het aanzetstuk voorgesteld wordt. Het bezitten van de goede formantwaarden is geen garantie, dat ook de dempingsfactoren juist zullen zijn, want de graad van demping heeft blijkens de practijk binnen zekere grenzen een vrij geringe invloed op de waardering van het resultaat. Het is ook niet eenvoudig, om de demping op de juiste wijze te verdelen over het model.

Bovendien kan een model slechts één klinker voorstellen. Hier staat als voordeel tegenover, dat het constantere meetresultaten kan geven, bij reproduceerbare variaties.

Door de medewerking van Prof. Dr E. Huizinga, directeur van de Keel-, Neus- en Oorheelkundige Kliniek, kregen wij de gelegenheid om metingen te doen aan het aanzetstuk van een daarvoor zeer geschikte proefpersoon, zie fig. 4. Bij deze man was de linkerhelft van het strottenhoofd verwijderd, terwijl de rechterstemplooi nog volkomen intact was. De operatie was nog niet voltooid, zodat er in luchtpijp en strottenhoofd nog een opening was met een lengte van ruim 3 cm.

De man kon spreken door het hoofd tegen de linkerschouder aan te leggen of door met duim en vinger de twee gedeelten tegen elkaar te brengen, waardoor de opening afgesloten werd en de overgebleven stemplooi tegen de wand aangedrukt werd, zodat deze door de uitgeademde lucht in trilling kon komen.

De stem was zeer goed verstaanbaar en maakte een normale in-

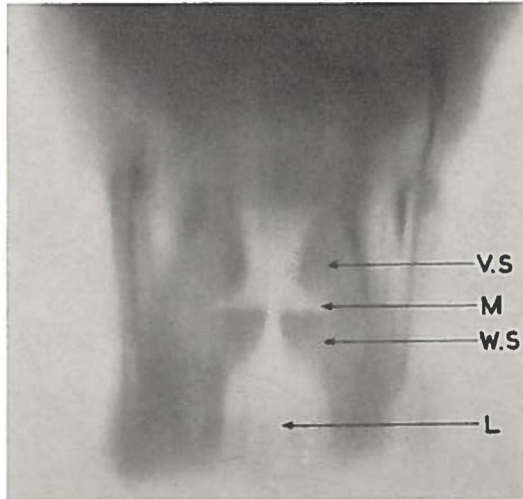


Fig. 2 Strottenhoofd op ware grootte, tijdens de ademhaling.
Röntgenfoto (tomogram) van H.B., frontale doorsnede, met luchtpijp L, ware stemplooiën W.S., ruimte van Morgagni M en valse stemplooiën V.S.
(Foto: Radiologisch Instituut, Dir. Prof. Dr. S. Keyser)



Fig. 4 Proefpersoon S., met hemilaryngectomie

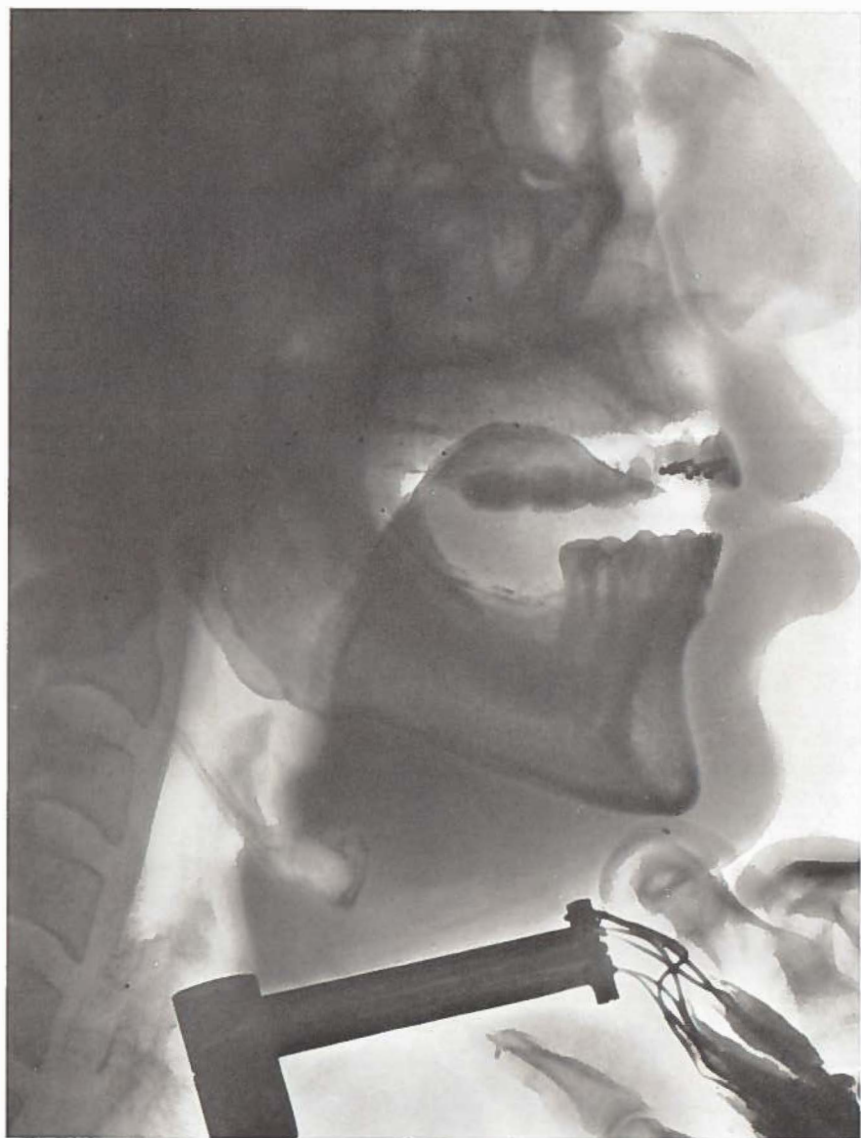


Fig. 5 Röntgenfoto van aanzetstuk en keelluidspreker met meetkop
Proefpersoon S., y van fuut (Foto: Radiologisch Instituut, Dir. Prof. Dr. S. Keyser)

druk, ook het volume was goed. Dit had het voordeel, dat de proefpersoon dus nog precies wist, hoe de mond ingesteld moest worden voor een willekeurige klinker.

Nadat met behulp van proefbuisjes gemeten was wat de grootste afmetingen mochten zijn van een luidsprekertje, dat zo in de luchtweg aangebracht moest worden, dat het aan de bovenkant, zie fig. 5, zo goed mogelijk het aanzetstuk afsloot, terwijl het aan de onderkant voldoende ruimte vrij liet voor de ademhaling, werd een passend luidsprekertje geconstrueerd, waarvan de eigenschappen nauwkeurig onderzocht werden. Dit luidsprekertje diende verder als pseudo-strottenhoofd, waarbij het membraan iets boven de overgebleven stemplooi kwam te liggen.

Bij de proeven bleek, dat na voorafgaande verdoving van het strottenhoofd het inbrengen goed verdragen werd en het verblijf hinderde zeer weinig. De opening onder het luidsprekertje was groot genoeg voor normale ademhaling.

De proefpersoon werd dan verzocht om de mond naar een bepaalde klinker te vormen, waarna het luidsprekertje werd bekrachtigd met een wisselstroom van variabele frequentie, waarbij het uit de mond komende geluid geregistreerd werd met behulp van een op enige afstand opgestelde microfoon.

Gedurende het opnemen van een kromme bleek de instelling van de mond goed gehandhaafd te kunnen worden. Deze instelling werd vastgelegd op een Röntgenfoto en door afdrukken van boven- en ondergebit.

Uit deze gegevens volgde dan de transmissiekromme van het aanzetstuk voor de betreffende klinker, want het luidsprekertje was voorzien van een inrichting om de snelheid van het membraan te meten, waardoor bekend was, welke volumesnelheid aan het aanzetstuk werd toegediend. Dank zij een versterker met uitgestelde automatische volumeregeling was deze volumesnelheid praktisch onafhankelijk van de frequentie, wat tevens het voordeel gaf van een praktisch oneindig grote inwendige weerstand.

Deze krommen werden vergeleken met de gegevens uit de literatuur over de modulatie bij klinkers, die er zo dicht mogelijk bijkomen.

De voorwaarden, waaraan de methode van analyseren moet voldoen werden onderzocht, evenals die voor de ruimte, waarin de proeven genomen worden.

Behalve de ligging van de formanten zijn hun dempingsfactoren van groot belang. Uit de verhouding van de dempingsfactoren in de transmissiekromme en die in de totale modulatie van de overeenkomstige klinker trekken wij namelijk een conclusie over de verhouding van de inwendige weerstand van het normale strottenhoofd tot die van de ingangsimpedantie van het aanzetstuk bij de afstemming op een formant.

Ook hebben wij berekeningen uitgevoerd over de demping en met verschillende oogmerken:

1. Om een minimale waarde te vinden voor de halfwaardebreedte van de formanten. Dit als controle voor de berekening van de inwendige weerstand.
2. Om de orde van grootte van de ingangsimpedantie van het aanzetstuk bij de afstemming op een formant te bepalen. Daaruit volgt dan de inwendige weerstand van het strottenhoofd.
3. Om de relatieve bijdrage van de verschillende dempingen: stralings-, wrijvings- en meetrildemping te bepalen.
4. Om daardoor de koppeling te kunnen overzien (via de orde van grootte van alle betrokken impedanties).

De inwendige weerstand van het strottenhoofd was ook direct af te schatten door berekeningen en de gevonden waarden stemmen goed overeen.

Om de koppeling volledig te overzien werd ook een schatting gemaakt over de impedantie van de stemplooiën.

De berekeningen over de dempingen leverden verder conclusies op over de demping van de lage formanten door de keelwand en over de orde van grootte van de impedantie van deze wand.

Het karakter van het spectrum dat door het strottenhoofd wordt afgeleverd bepaalden wij op grond van theoretische overwegingen.

De bepaling van de transmissiekromme stelde ons in staat om een gedetailleerde schatting te maken over de frequentiemodulatie in het strottenhoofd, uitgaande van de theoretische conclusie.

De waarnemingen die in de hoofdstukken V en VI beschreven worden leverden hier een controle op.

In de tweede plaats, zie hoofdstuk V, hebben wij proeven genomen over de nabootsing van de klinkers en de medeklinkers, die van beslissende betekenis zijn voor de theorie van de stemvorming.

Dit gebeurde met dezelfde proefpersoon en met hetzelfde luidsprekertje. Het werd nu echter bekrachtigd door elkaar regelmatig opvolgende korte stroomstoten (piekgenerator), zodat het afgegeven geluidsmengsel rijk was aan harmonischen. Deze bekrachtiging werd constant gelaten en de proefpersoon werd verzocht om de mond in te stellen op een aantal klinkers, resp. om de mond langzaam te vormen naar een voorgezegd woord.

Het uitgangsmengsel werd weer geregistreerd met behulp van de microfoon en de resultaten werden vergeleken met die, waarbij de transmissiekromme in zijn geheel bepaald werd.

Tevens werd hierdoor een onafhankelijk gegeven verkregen over de samenstelling van het frequentie-spectrum in het strottenhoofd en dit werd vergeleken met de berekeningen in hoofdstuk IV.

Deze resultaten waren ook van belang voor de klinkervorming in het algemeen en speciaal om de belangrijkheid van het zogenaamde

klinkerpatroon 2.2.2., van de stemplooiën te kunnen beoordelen, want de verschillende klinkers, die met een en dezelfde wijze van bekrachtiging werden opgewekt, klonken volkomen normaal, al week het timbre soms iets af.

Het klinkerpatroon blijkt acoustisch gezien dus wel enige invloed te hebben (zie ook hoofdstuk VII).

In de derde plaats, zie hoofdstuk VI, zijn proeven genomen met een aantal geroutineerde zangers, die dezelfde klinkers onder verschillende omstandigheden zongen. Eerst in de lucht en daarna in een mengsel van zuurstof en waterstof met bekende samenstelling, waardoor de transmissiekromme op theoretisch te voorspellen wijze veranderde.

Deze proeven zijn eveneens van beslissende betekenis voor de theorie van de stemvorming.

Zij leveren namelijk een controle op de resultaten van de vorige hoofdstukken over de frequentiemodulatie, weer uitgaande van theoretische overwegingen.

Door proeven met deze gassen kon tevens definitief bewezen worden, dat de aerodynamische theorie van SAVART en GUILLEMIN over de stemvorming onjuist is *).

*) De experimenten zijn uitgevoerd in het Physiologisch Laboratorium. Prof. Dr. M.N.J. Dirken heeft mij hiertoe alle gelegenheid gegeven, waarvoor ik hem ook op deze wijze hartelijk dank zeg.

Het personeel van dit Laboratorium dank ik voor de zeer gewaardeerde hulp die het mij geboden heeft. In het bijzonder geldt dit de instrumentmakers B. Buitenkamp en S. Krans, de amanuensis Jt. Niemeyer en de secretaresse L.J.A. Zuiveld.

IV

TRANSMISSIEKROMME

4. 1. Methode

Onder de transmissiekromme van het aanzetstuk verstaan wij het quotient van de volumesnelheid ter plaatse van de lippen en de volumesnelheid aan de ingang van het aanzetstuk (bij de stempleet), die deze eerste veroorzaakt, als functie van de frequentie en opgenomen in de vrije ruimte.

Deze transmissiekromme kan niet direct gemeten worden, want het is niet mogelijk om de volumesnelheid tussen de lippen te bepalen zonder grote fouten te maken. Daarom moet men volstaan met het geluidsveld op enige afstand van de mond te bepalen en daaruit de volumesnelheid bij de lippen af te leiden.

De gevolgde methode bestaat in het toevoeren van een zoektoon van bekende sterkte aan de ingang van het aanzetstuk, onder gelijktijdige registratie van de sterkte van de toon die uit de mond komt. De frequentie van de zoektoon loopt door het gehele belangrijke frequentiegebied, tot 4500 Hz, en het quotient van uitgangs- en ingangssignaal wordt uitgezet als functie van de frequentie.

Hierbij moet aan een drietal voorwaarden voldaan zijn:

1. De instelling van het aanzetstuk moet gedurende de meting voldoende constant zijn.
2. De zoeksnelheid, d.w.z. de snelheid waarmee de frequentie van de zoektoon verandert, mag niet te groot zijn en
3. Het moet in de praktijk mogelijk zijn om vanaf de microfoon terug te rekenen op de mond.

4.1.1. *Constante instelling van het aanzetstuk.*

De instelling van het aanzetstuk moet gedurende de meting voldoende constant zijn. Het doormeten voor één klinker vroeg 15 tot 25 sec. en gedurende deze tijd moet de instelling voor deze klinker bewaard blijven en mag het aanzetstuk niet variëren tussen een tweetal uiterste klinkers.

In de eerste plaats niet om de triviale reden, dat men dan niet nauwkeurig zou kunnen opgeven, bij welke klinker een bepaalde transmissiekromme behoort. De frequentieschaal, die ook een tijdschaal is, zou dan tevens een klinkerschaal zijn. Dit is echter niet de belangrijkste reden, want ook op het klinkerthema zijn vele variaties mogelijk, die niet als zodanig worden waargenomen.

In de tweede plaats mag de instelling namelijk niet veranderen, b.v. door bewegingen van de tong, omdat de formanten dan verschuiven en dit kan grote invloed hebben op de meting, zie voorwaarde 2 onder 4.1.

Bij de proeven bleek, dat het aanzetstuk redelijk constant bleef gedurende het verloop van de meting wanneer er maar niet te veel aandacht aan werd geschonken. Was dit wel het geval, b.v. wanneer gevraagd werd om de neusholte goed afgesloten te houden, dan lokte dit kleine bewegingen uit, in casu van het zachte gemelte.

Dat het aanzetstuk gedurende deze tijd constant gehouden kan worden behoeft ons niet te verwonderen. Geroutineerde zangers kunnen *immers* gedurende deze tijd een klinker met constant timbre zingen, waarbij men echter wel moet bedenken, dat volgens SEASHORE (1936), de fysische veranderingen veel groter zijn dan de psychologisch waargenomene.

De proefpersoon wende vlug aan het ingebrachte luidsprekertje, fig. 4 en fig. 5, blz. 56 en 57, en nadat hem door enige oefening zijn bijdrage tot het geheel duidelijk was geworden, werd het aanzetstuk ongedwongen in een bepaalde instelling gehandhaafd. Het bleek echter, zie 4.5., dat de transmissiekrommen van „dezelfde” klinker onverwacht grote verschillen vertoonden. De constantheid per meting was belangrijk groter dan die over een serie metingen van dezelfde klinker.

Overigens heeft het geen zin om de eis van constante instelling onredelijk hoog te stellen, omdat dan niet meer de transmissiekromme van het natuurlijke aanzetstuk tijdens het normale zingen gemeten wordt. Wanneer de constantheid krampachtig nagestreefd wordt zullen o.a. de eigenschappen van de wanden veranderen.

4.1.2. Zoeksnelheid

Het is helaas niet mogelijk om de voorwaarde waaraan de zoeksnelheid moet voldoen exact af te leiden voor het geval van een experimenteel filter, zoals dit o.a. door het aanzetstuk gevormd wordt. Ook niet, wanneer wij dit geval vereenvoudigen, door één formant te nemen, die beschreven kan worden door de differentiaalvergelijking van de eenvoudigste trilling.

Deze differentiaalvergelijking luidt, in het geval, dat de frequentie van de opgelegde kracht lineair met de tijd verandert:

$$m \ddot{x} + 2 k m \dot{x} + \omega_0^2 x = A e^{j(a t^2 + b t + c)} \quad (1)$$

waarin A, a, b en c willekeurige constanten mogen zijn. A is de amplitudo van de kracht, c is de phase van de zoektoon op het tijdstip $t = 0$, b is de frequentie op dit tijdstip en $2a (= \Delta \nu)$ is de zoeksnelheid.

Deze vergelijking kan namelijk niet in een gesloten vorm opgelost worden en er bestaat ook geen oplossing met behulp van bekende hulpintegralen.

Dit laatste is wel gedaan door SALINGER (1929) voor een ideaal filter, wat hij voor een aantal gevallen numeriek doorrekende *).

Het profiel van de amplitudokarakteristiek van het filter wordt dan goed beschreven door een zoektoon met constante amplitudo, waarbij het effect van de beginphase c zeker binnen de 5 % blijft en de vertraging verwaarloosbaar is, wanneer

$$\Delta v \leq \frac{1}{16} (\Delta B)^2 \quad (2)$$

waarin ΔB de bandbreedte van het filter voorstelt.

De toelaatbare zoeksnelheid hangt dus wel van de bandbreedte van het filter af, maar niet van de ligging van het doorlaatgebied op de frequentie-schaal.

Bij een te grote zoeksnelheid wordt het profiel van het filter niet goed beschreven. De flanken worden uitgesmeerd en er kunnen in het gebied van de flanken nevenmaxima gesuggereerd worden.

SALINGER oppert, dat men in het geval van een werkelijke filter zoiets als de halve halfwaardebreedte moet invoeren als bandbreedte ΔB . Dit lijkt plausibel en men kan dan de halfwaarde op de amplitudo betrekken. De factor 16 is blijkens het artikel aan de ruime kant, men kan volstaan met 10. Dan wordt de voorwaarde in ons geval in ronde getallen:

$$\Delta v \leq \frac{1}{10} (\Delta f)^2 \quad (2^a)$$

waarbij Δf de halfwaardebreedte voor de energie voorstelt. Dit voldeed in de praktijk goed.

Aan deze voorwaarde moest ook bij onze proeven voldaan zijn. Nu weet men van te voren niet, hoe groot de halfwaardebreedte van de formanten is. Uit de gegevens over de totale modulatie is slechts af te leiden, dat deze enkele honderden Hz of kleiner is. Daarom moet de zoeksnelheid in elk geval minder dan 4000 Hz per sec. bedragen, d.w.z., dat het frequentiegebied van 150 tot 4500 Hz, dat wij bij onze proeven maten, zeker niet vlugger dan in 1 sec. doorgemeten mag worden. Een te grote zoeksnelheid zou hier onder meer tot een te grote halfwaardebreedte leiden.

Bij onze metingen hebben wij eerst met kleine zoeksnelheden een formant doorgemeten, om de toelaatbare zoeksnelheid te bepalen. Dit is te constateren aan het nog juist niet afnemen van de piekwaarde van het uitgangssignaal. Het bleek, dat de zoeksnelheid rond 300 Hz per sec. mocht bedragen, zodat de analyseduur 15 sec. of meer moest zijn.

*) Onder een ideaal filter verstaat men een filter met rechthoekige doorlaatkarakteristiek voor de amplitudo en met een phaseverschuiving die evenredig is met de frequentie, zodat een signaal er met een zekere vertraging door komt.

De toelaatbare zoeksnelheid kan ook uitgedrukt worden in de inslingertijd τ of de uitsterftijd τ van het filter. Hieronder verstaat men de tijd, waarin de amplitudo van het inschakelverschijnsel, of van de uitstervende trilling, tot op $1/e$ afneemt.

Voor een resonantiefilter is $\tau = 1/\pi\Delta f$, zodat (2^a) dan overgaat in $\Delta v \leq 1/10\pi^2\tau^2$. Vergelijking (2^a) wordt inzichtelijker wanneer wij deze zo formuleren, dat de tijd waarin een formant gepasseerd mag worden omgekeerd evenredig is met zijn halfwaardebreedte en dat deze halfwaardebreedte in $30 \times (= 10 \pi)$ de inslingertijd gepasseerd mag worden. (3τ is het tijdstip, waarop het inschakelverschijnsel tot op 5 % is afgenomen.)

Dat in het geval van een resonantiefilter de halfwaardebreedte Δf genomen mag worden, achten wij bevestigd door de volgende overweging. Voegt men aan een ideaal filter met bandbreedte $W = \Delta f$ een korte stoot toe, dan neemt de spanning aan de uitgang van het filter af volgens $V = V_0 \cdot \sin 2\pi Wt / 2\pi Wt$, zie OLIVER, PIERCE en SHANNON (1948, blz. 1326). In de tijd $T = 10/\pi W = 10/\pi \Delta f$ is de amplitudo dan op 5% gekomen en bij een resonantiefilter is dit reeds na $3/\pi \Delta f$ sec. het geval.

4.1.3. Plaats van de microfoon.

Het uitgangssignaal wordt op enige afstand van de mond geregistreerd en het moet mogelijk zijn om terug te rekenen op de volumesnelheid tussen de lippen. Daarbij kan dan gebruik gemaakt worden van de eigenschappen van eenvoudige geluidsbronnen.

Het moet echter tevens mogelijk zijn om met goede nauwkeurigheid de drukken in het geluidsveld, zoals deze door onze microfoon geregistreerd worden, af te leiden uit de volumesnelheid van de geluidsbron.

Hieruit blijkt, dat de eigenschappen van de ruimte van groot belang zijn. Het mag niet voorkomen, dat door interferentie-effecten pseudo-formanten geregistreerd worden, want een directe meting van de transmissiekromme van de mond naar de microfoon is niet goed mogelijk omdat de randvoorwaarden van de geluidsbron dan ook een rol gaan spelen.

Dit stelt bij een gegeven ruimte eisen aan de plaatsing van de microfoon. Hierop komen wij terug onder 4.4., waar tevens de minimale eisen, die men aan een ruimte moet stellen en de gevolgde methode van testen met de geconstrueerde apparatuur ter sprake komen.

Wanneer de ruimte acoustisch voldoende is en de microfoon goed is opgesteld, dan is de terugrekening eenvoudig uit te voeren, vooral, omdat het absolute niveau van de transmissiekromme minder interessant is dan het algemene verloop, de frequenties en de dempingsfactoren van de formanten.

4.2. Mechanische apparatuur

4.2.1. Keel-luidspreker, eisen

Aan de keel-luidspreker, waarvan de afmetingen, gezien de opening in de keel van de proefpersoon, maximaal die van een cylinder met een diameter van 14 mm en lengte van 30 mm mochten bedragen, werden de volgende eisen gesteld:

- a. De ingang van het aanzetstuk moet volkomen afgesloten worden,
- b. De proefpersoon moet de phonatietoestanden ongehinderd kunnen aannemen.
- c. Het afgegeven geluid moet sterk zijn in vergelijking met de onvermijdelijke bijgeluiden, b.v. door de ademhaling.
- d. De volume-snelheid van de lucht ter plaatse van het membraan moet gemeten kunnen worden.
- e. De niet-lineaire vervorming moet klein zijn.
- f. De lineaire vervorming (resonantie) moet voldoende onderdrukt kunnen worden.

Aan eis a kan bij de geconstrueerde luidspreker, zie fig. 5 en 6, voldaan worden, door gebruik te maken van geschikte gummiringetjes om de kop. Wegens eis b moet de hele constructie licht gehouden worden, zodat de proefpersoon tijdens een proef, die 15 tot 25 sec. duurt, kleine bewegingen met hoofd en romp kan maken. Bij de gekozen uitvoeringsvorm is hieraan voldaan,

De bruikbaarheid van de luidspreker wordt verder bepaald door de mate, waarin aan de eisen c tot en met f voldaan is.

De keel-luidspreker zou ideaal zijn, wanneer de volumesnelheid, in het frequentiegebied dat voor de karakterisering van de klinker belangrijk is, in de eerste plaats groot is en in de tweede plaats alleen afhankelijk is van de bekrachtigingsstroom en dus onafhankelijk van de frequentie en van de acoustische belasting door het aanzetstuk. De frequentie-karakteristiek zou dan volkomen vlak moeten zijn, terwijl de inwendige weerstand van het systeem oneindig groot moet zijn. In dit ideale geval zou de volumesnelheid tijdens de proeven niet gemeten behoeven te worden.

Van de bestaande typen van koptelefoons (BERANEK, blz. 410) benaderen de magnetische, waarbij het membraan gedempt wordt, en de uitvoeringen met een kristal de ideale toestand het beste. De bestaande typen van telefoons voor gehoorapparaten zijn ver van de ideale toestand verwijderd, omdat men daarvoor dikwijls gebruik maakt van weinig gedempte resonantie, om bij de hoge frequenties nog een redelijke amplitudo te bereiken. Bij het kleiner worden van de toelaatbare afmetingen raakt men steeds verder van de ideale omstandigheden verwijderd, behalve bij de thermofoon, maar deze heeft een lage inwendige weerstand en bovendien was een thermofoon van kleine afmetingen om andere redenen niet bruikbaar;

tijdens de proeven komt b.v. altijd vocht op de luidspreker terecht. Het was dan ook noodzakelijk, om de luidspreker te voorzien van een inrichting, die het meten van de volumesnelheid mogelijk maakt.

Wegens eis c, groot volume, kan de luidspreker niet voorzien zijn van een plaat, omdat deze dan veel te dun zou moeten zijn. De luidspreker zou dan te kwetsbaar worden, met bovendien een grote kans op inhomogeniteiten van de plaat, terwijl de eigen frequenties van de plaat dan laag zijn.

Bij de geconstrueerde keelluidspreker werd een vrij dik (40μ) messingmembraan gebruikt, waarvan de eigen frequenties hoog zijn. Deze hoge eigenfrequenties zijn noodzakelijk, zie 4.2.3. De gewenste geringe stijfheid kreeg het membraan door een drietal concentrische groeven, zodat het centrale gedeelte als een zuiger reageert *).

Wegens de vrije toegang van vocht kon de luidspreker niet uitgevoerd worden als een condensatorluidspreker met hulprooster voor het meten van de volumesnelheid (of voor de bekrachtiging). Bovendien zou de bekrachtigingsspanning dan minstens 1000 V moeten bedragen om een groot genoeg geluidsvolume te produceren.

De volumesnelheid zou het best gemeten kunnen worden met behulp van een rooster op geringe afstand van het membraan, waarbij de capaciteitsveranderingen van het rooster ten opzichte van het membraan bepaald worden, hetzij op de manier van een condensator-microfoon, hetzij door de frequentie-veranderingen in een hoog frequente kring waarin deze capaciteit opgenomen is, maar hierbij wordt men gestoord door de groeven in het membraan en door de naar verhouding zeer grote nulcapaciteit, zodat een zeer omvangrijke elektrische hulpapparatuur vereist zou zijn. Daarom werd naar een andere oplossing gezocht.

4.2.2. Keel-luidspreker met meetkop

De geconstrueerde keel-luidspreker met meetkop bestaat uit twee compartimenten, zie fig. 6, die op elkaar geschroefd kunnen worden.

Het ene compartiment bevat het permanente magneetveld voor het meespoeltje, dat vast verbonden is met het membraan en bij trilling een spanning geeft, die evenredig is met de snelheid. Het meespoeltje is met hard soldeer bevestigd aan een staafje, dat met zacht soldeer bevestigd is aan het membraan. Dit staafje draagt ook het bekrachtigingsspoeltje. (Het gebruik van hard en zacht soldeer hangt, ook bij de nog te noemen onderdelen, samen met de volgorde van monteren.)

*) Later bleek, dat het ook mogelijk is om een membraan met een kleine conus te forceren.

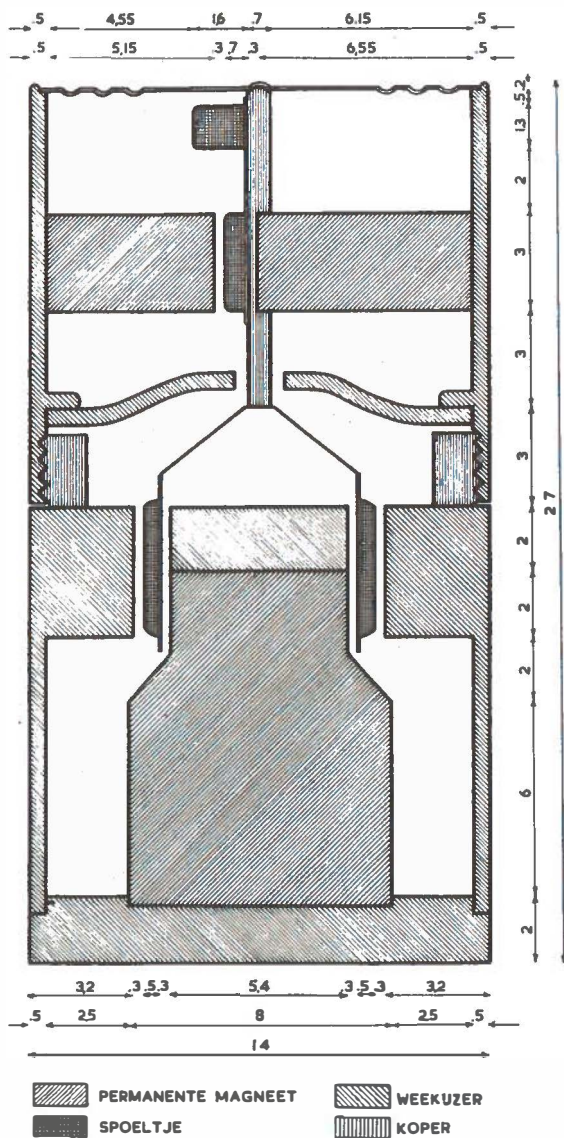


fig. 6. Keelluidspreker met meetskop

Het andere compartiment bevat het permanente magneetveld voor de bekrachtiging.

Er werd gebruik gemaakt van twee verschillende magneetvelden om te voorkomen, dat het meetspoeltje door transformatorwerking direct op de bekrachtigingsstroom reageert.

Om het effect van strooivelden zoveel mogelijk te voorkomen, werd het meetspoeltje zo opgesteld, dat de symmetrieas van het bekrachtigingsveld in het vlak van de windingen ligt. Bovendien werd een magnetische afscherming tussen de beide compartimenten aangebracht. Door deze constructie is bereikt, dat de keel-luidspreker in dit opzicht bruikbaar is tot 6000 Hz, zie fig. 7.

De technische gegevens, voor zover niet in fig. 6 aangegeven, zijn:

Membraan: 40 μ messing; 45 min. uitgegloeid bij 600^o C.; stijfheid: $1,5 \cdot 10^6$ dyne cm^{-1} .

Trillende systeem: Membraan + staafje + 2 spoeltjes; totale gewicht 530 mgr.

Meetspoeltje: 50 μ geïsoleerd koperdraad, 320 windingen, 55 Ω . Effectieve lengte in het magneetveld: 2 m. Met schellak bevestigd op een koperen plaatje van 20 μ , isolatiepapier ertussen, dat met hard soldeer verbonden is aan het staafje.

Meetveld: 4200 Oersted effectief.

Bekrachtigingsspoeltje: 0,1 mm geïsoleerd koperdraad, 136 windingen, 6,5 Ω . Lengte in het magneetveld: 2,8 m. Gewonden op een busje koper, 20 μ dik, isolatiepapier er tussen en geschellakt. Aan het busje is met hard soldeer een brugje bevestigd, dat met zacht soldeer verbonden is aan het staafje.

Bekrachtigingsveld: 2200 Oersted effectief.

Als permanent magnetisch materiaal werd Ticonal E toegepast, dat onder de gegeven omstandigheden goed bruikbaar is. De bekrachtiging van de magneten gebeurde na de montage, door ze te ver zadigen in het sterke veld van een grote electromagneet.

Het membraan moet aan hoge eisen voldoen en het moest daarom zorgvuldig worden uitgezocht. De kwaliteit werd onderzocht door het op de opening van een passend cylindertje aan te brengen en de luchtdruk in het cylindertje te variëren. De uitslagen van het membraan werden dan gemeten met behulp van een microscoop, via het einde van een loodrecht op het membraan bevestigde naaldje. Met een stuk messing, dat zorgvuldig tot 40 μ werd uitgewalst en dat daarna de reeds genoemde warmtebehandeling onderging, werden goede resultaten bereikt. De uitslagen waren binnen ruime grenzen (4 keer de bij een experiment optredende) lineair.

Het bleek niet nodig te zijn om het staafje, dat de spoeltjes draagt, een extra ondersteuning te geven ter plaatse van de afscherming tussen de beide compartimenten.

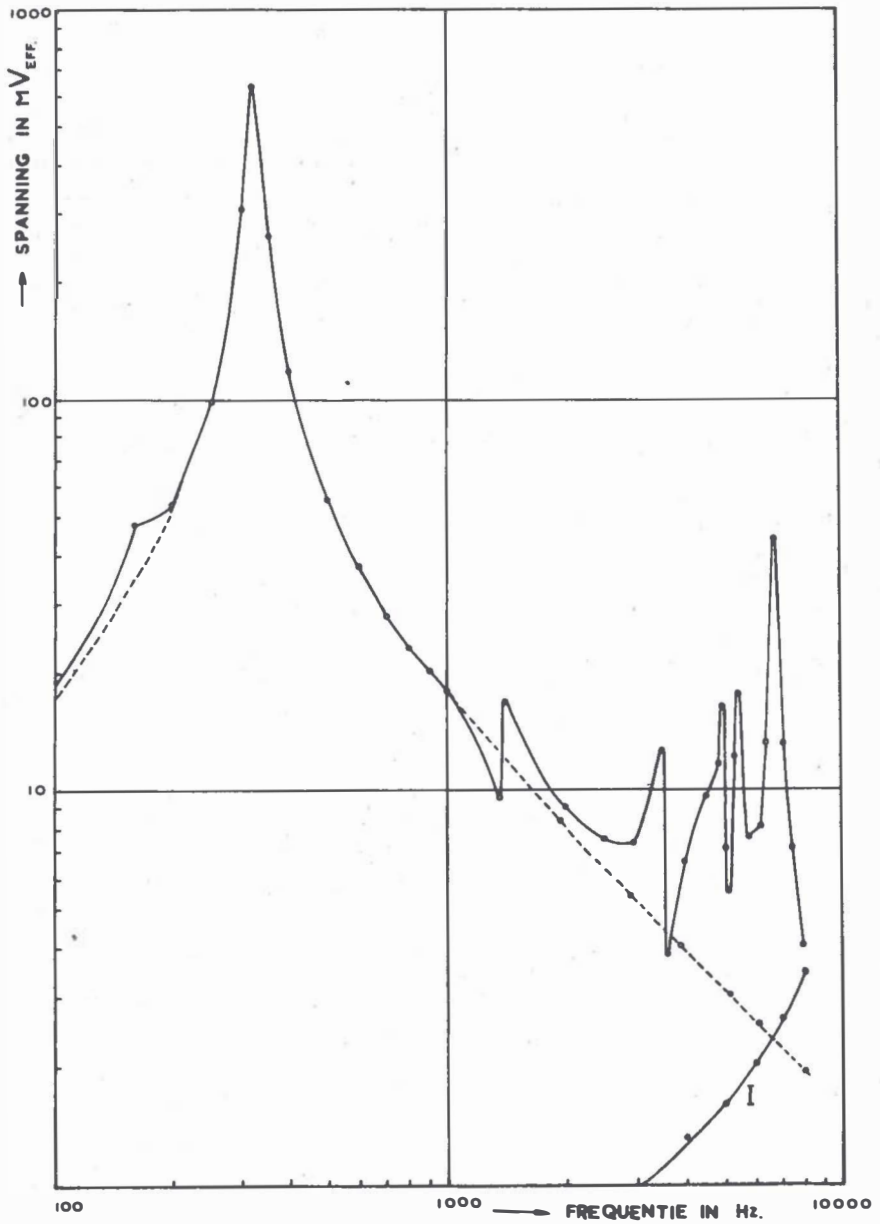


fig. 7. Frequentiearakteristiek (Resonantiekromme) van de keel-luidspreker met meetekop.
 De gestreepte kromme geldt voor een eenvoudige resonator.
 De kromme I geeft het resterende inductie-effect.
 Spanning in mV_{eff} bij bekrachtiging met 200 mA.

Het was ook niet nodig om het membraan, dat reeds door het er aan hangende gewicht van ca 530 mgr een voor-uitwijking heeft, door middel van een gelijkstroom door het bekrachtigingsspoeltje een extra uitwijking te geven. De niet-lineaire vervorming door het membraan was namelijk al zeer klein; eis e .

De frequentie-karakteristiek (resonantiekromme) van de keel-luidspreker met verwaarloosbare acoustische belasting (practisch in de vrije ruimte) is in fig. 7 aangegeven. De spanning aan de meetspoel is uitgezet in afhankelijkheid van de frequentie van de bekrachtigingsstroom, waarbij alle spanningen omgerekend zijn tot die bij bekrachtiging met 200 m A.

In het gebied van de hoge frequenties wordt de dissipatie in het spoeltje de begrenzende factor voor de stroomsterkte, omdat bij 300 m A de schellak week wordt. Bij de lage frequenties werkt de toelaatbare uitslag van het membraan beperkend.

Bij de resonantiefrequentie, 320 Hz, mocht de bekrachtigingsstroom, na zorgvuldige centrering van het trillende systeem, 5,5 m A bedragen. De spanning aan de meetspoel bedraagt dan 17,2 m V. Met behulp van de gegevens over de meetkop is hieruit de amplitudo, A , van de uitslagen van het membraan te berekenen. Is v de snelheidsamplitudo, dan geldt:

$$17,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-3} = 10^{-8} \cdot H.v.l. = 10^{-8} \cdot 4200 \cdot v \cdot 200; \quad v = \omega A; \text{ dus} \\ A \approx 14 \mu.$$

In fig. 7 is tevens het resterende inductie effect aangegeven. Dit werd gemeten, door bij een stroomsterkte van 200 m A het membraan te fixeren. Het werd voor ongeveer 80% veroorzaakt door elektrische inductie, zoals bleek uit metingen waarbij het compartiment voor de bekrachtiging verwijderd was.

De pieken in de resonantiekromme, speciaal die bij 300 Hz, zijn voor het gebruik eigenlijk ongewenst. Bij de gekozen constructie, die tevens gericht was op een zo klein mogelijke mechanische impedantie, waren deze echter niet weg te werken.

De zelfinductie van het bekrachtigingsspoeltje is namelijk zeer klein en het koperen busje, waarop dit spoeltje gewikkeld is, is te dun om goed als kortsluitwinding te kunnen fungeren. Wij berekenden, dat het busje 1 mm dik moet zijn om bij 320 Hz de kritische demping te geven en deze dikte komt natuurlijk niet in aanmerking, omdat de diameter van de spleet in de bekrachtigingsmagneet dan veel te groot moet zijn.

Het busje is 20 μ dik, zodat de kwaliteitsfactor (resonantiefrequentie gedeeld door halfwaardebreedte) bij 320 Hz 25 zou bedragen, indien er overigens geen demping was. Volgens de grafiek is de kwaliteitsfactor tengevolge van de totale demping 13.

Uit de berekening volgt verder, dat de vereiste dikte evenredig is met de wortel uit het product van de stijfheid van het

membraan en de totale massa van het trillende systeem, zodat de omstandigheden niet zo te kiezen zijn, dat de dikte accepteerbaar wordt.

4.2.3. Resonantiekromme en volumesnelheid.

Wij moeten ons nu de vraag stellen, of de snelheid van het midden van het membraan, op een constante factor na, waarvan wij de grootte niet nauwkeurig behoeven te kennen, de volumesnelheid van het gehele membraan kan weergeven. Hiervoor moet de resonantiekromme nader geanalyseerd worden en het zal blijken, dat dit slechts kwalitatief kan gebeuren.

Als eerste stap voor deze analyse vergelijken wij de resonantiekromme met de kromme, die in fig. 7 gestippeld is aangegeven. Dit is de resonantiekromme van een systeem met één vrijheidsgraad, met een resonantiefrequentie van 320 Hz en een kwaliteitsfactor van 13, waarbij de amplituden voor twee frequenties tussen 320 en 1000 Hz aangepast zijn aan de experimentele resonantiekromme. De aanpassing blijkt dan tevens goed te zijn voor alle frequenties tussen 200 en 1000 Hz.

De afwijkingen bij de lage frequenties laten zich eenvoudig verklaren. De bekrachtiging van de keel-luidspreker gebeurt namelijk met behulp van een toongenerator, versterker en aanpassings-transformator, zie fig. 8. Bij het onderzoek van de gehele apparatuur met behulp van een Wave Analyzer is nu gebleken, dat de gebruikte toongenerator praktisch vrij is van hogere harmonischen. De 2e heeft een amplitudo $\leq 5\%$ en de 3e $\leq 0,5\%$, uitgedrukt in die van de 1e harmonische. De bekrachtigungsstroom is echter niet

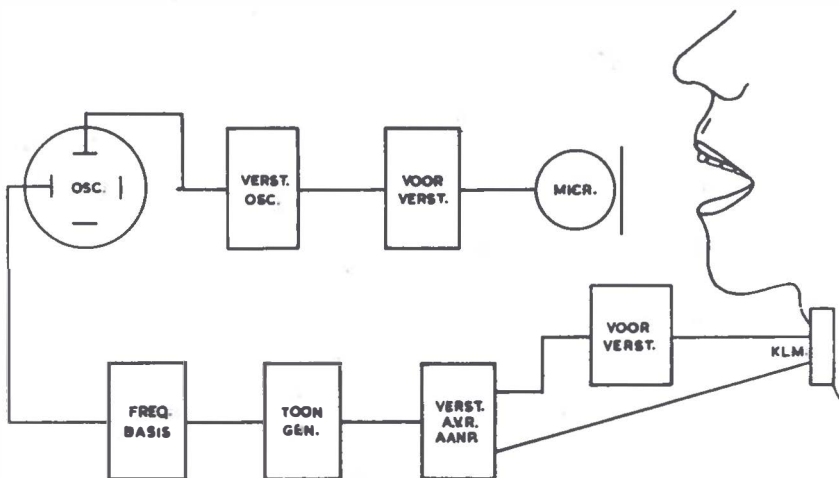


fig. 8. Blokschema voor de meting van de transmissiekromme

vrij van hogere harmonischen. De amplitudo van de 2e kan op 2%, die van de 3e op 1,5% gesteld worden.

De spanning aan de meetspoel is uitgezet in m V effectief. Deze waarden zijn echter verkregen door omrekening van de topspanning, die gemeten werd. Neemt men nu aan, dat de phase van de 2e resp. de 3e harmonische zo gunstig mogelijk lag ten opzichte van die van de 1e, dan kan de afwijking bij 160 Hz verklaard worden door de aanwezigheid van ruim 2% 2e harmonische en die bij 100 Hz door 2,5% 3e harmonische, wat in overeenstemming is met de gemeten niet-lineaire vervorming van de bekrachtigingsstroom.

Vanaf 1000 Hz tot 4000 Hz is er slechts een geringe afwijking, afgezien van het tweetal pieken, dat wij nog nader zullen bezien. Na 4000 Hz wordt de afwijking belangrijk.

Nadere gegevens hierover werden verkregen, door de trillingswijze van het membraan te onderzoeken met behulp van zeer fijn kopervijlsel, waarbij de luidspreker werd bekrachtigd met een zoekfrequentie, die door het hele spectrum liep. Van 100 tot 4500 Hz werden geen bijzonderheden gevonden. Na 4500 Hz ontstaan echter onregelmatige knooppijnen en knoopcirkels op het membraan, omdat de inhomogeniteiten van het membraan dan een rol gaan spelen. Na 4500 Hz is de spanning aan de meetspoel dus zeker geen betrouwbare maat voor de gemiddelde uitslag van het membraan.

Daar het membraan zich bij 1400 Hz en 3500 Hz volkomen homogeen gedroeg en er ook geen knoopcirkels verschenen, werd naar een andere oorzaak voor de pieken gezocht en het lijkt waarschijnlijk, dat deze veroorzaakt worden door de mechanische impedantie van het membraan voorzover deze het gevolg is van de ingesloten volumina lucht.

De totale mechanische impedantie van het trillende systeem is namelijk de som van de mechanische impedantie van het membraan zelf en van het er aan bevestigde staafje met de spoeltjes en van de mechanische impedantie, die het membraan krijgt door de ingesloten lucht.

Over deze laatste impedantie kan slechts een redelijke schatting gemaakt worden, onder verwaarlozing van de demping, omdat de begrenzendende vlakken een nauwkeurige berekening zeer gecompliceerd maken.

Wij moeten dan rekenen met 3 volumina, nl. 1e: het volume, dat ingesloten is tussen het membraan en het afschermdende plaatje, V_1 , 2e: het volume tussen dit plaatje en de bekrachtigingsmagneet, V_2 , 3e: het volume in het bekrachtigingscompartiment, V_3 . Tussen deze volumina is contact door middel van het gaatje in het afschermdende plaatje en door de overgebleven ruimte in de spleet.

De mechanische impedantie door de ingesloten lucht is dan: $O_{eff}^2 \times Z_{e1}$, waarbij O_{eff} de effectieve oppervlakte van het mem-

braan voorstelt en Z_{e1} de impedantie van het aequivalente elektrische circuit tussen de klemmen A en B van fig. 9 (zie MORSE, 1936, blz. 208 en 197).

De volumina V_1 , V_2 en V_3 zijn vrij nauwkeurig te bepalen, zodat de aequivalente capaciteiten C_1 , C_2 en C_3 te vinden zijn, nl. 5,4; 1,8; en $4,7 \times 10^{-1} \mu\text{F}$. De zelfinducties L_1 en L_2 , die overeenkomen met de doorgangen, zijn echter moeilijk te schatten. Wij hebben deze gelijk gesteld aan de impedantie van een cilindrische buis met dezelfde lengte als die van het betreffende verbindingskanaal, met dezelfde doorsnede als dit kanaal en gecorrigeerd voor twee open einden (zie MORSE, blz. 259 en 208 en RAYLEIGH § 307 en Appendix A § 307) en vinden $L_1=1,4 \cdot 10^{-2}\text{H}$ en $L_2=5,8 \cdot 10^{-3}\text{H}$.

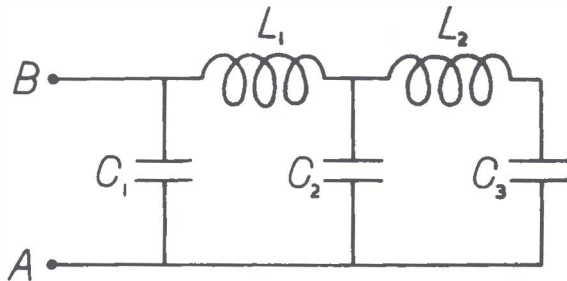


fig. 9. Aequivalent elektrisch circuit voor de ingesloten lucht.
 $C_1 = 0,54 \mu\text{F}$, $C_2 = 0,18 \mu\text{F}$, $C_3 = 0,47 \mu\text{F}$.
 $L_1 = 14 \text{ mH}$, $L_2 = 5,8 \text{ mH}$.

Stellen wij het effectieve oppervlak van het membraan op 1 cm^2 , dan geeft fig. 10 de serie impedantie tengevolge van de acoustische impedantie. De piek in de resonantiekromme bij 1400 Hz komt dan overeen met de geschatte piek bij 2100 Hz, terwijl de sterke piek bij 6800 Hz overeenkomt met de geschatte piek bij 6600 Hz. De resonantiepiek bij 3500 Hz wordt op deze wijze niet gevonden. Dit kan toegeschreven worden aan het feit, dat voor de acoustische impedanties van de onderdelen blokelementen gekozen zijn en aan het niet onderverdelen van het volume V_1 . Uit fig. 10 blijkt verder, dat de resonantiekromme van fig. 7 na de piek bij 1400 Hz boven de gestippelde kromme moet liggen.

Op grond van het bovenstaande is het zeer waarschijnlijk, dat het membraan van de luidspreker, tot tenminste 4000 Hz toe, beschouwd mag worden als een zuiger, zodat de snelheid van het midden de volumesnelheid kan aangeven.

Deze conclusie wordt gesteund door berekeningen over het membraan zelf. Zolang het membraan zich als een zuiger gedraagt is de volumesnelheid gelijk aan het product van de snelheid van het midden en een constante factor. Afwijkingen zullen slechts dan

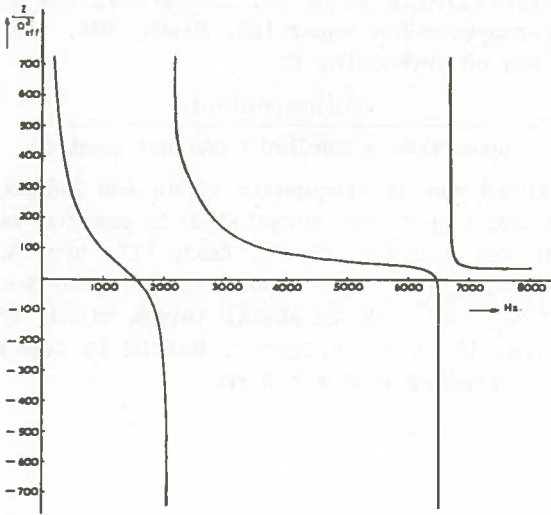


fig. 10. Impedantie van het membraan door de ingesloten lucht

kunnen ontstaan, wanneer de frequentie zo ver wordt opgevoerd, dat op het membraan knooppunten gaan optreden. De waarschijnlijkheid en het effect van dit optreden kan niet voor het membraan zelf berekend worden. Een cirkelvormige plaat van dezelfde samenstelling en dikte, aan de rand ingeklemd en met een straal van 5 mm, is echter een goed vergelijkingsobject.

De algemene vergelijking voor de uitwijking van een willekeurig punt van een cirkelvormige plaat is te vinden in handboeken, b.v. RAYLEIGH I § 218.

In ons geval wordt deze vergelijking sterk vereenvoudigd, omdat we ons kunnen beperken tot het symmetrische geval, knooppunten door het centrum zijn onmogelijk. In het geval, dat op de plaat een druk p met hoekfrequentie ω werkt, wordt de vergelijking voor de uitslag, zie MASON (1948), blz. 168:

$$u = \frac{p}{\omega^2 \rho l_t} \cdot \frac{I_1(ka) J_0(kr) + J_1(ka) I_0(kr)}{I_1(ka) J_0(ka) + J_1(ka) I_0(ka)} - 1 \quad (3)$$

waarbij a = straal van de plaat; ρ = dichtheid; l_t = dikte van de plaat; J_0 en J_1 zijn Besselfuncties van de 1e soort; I_0 en I_1 zijn hyperbolische Besselfuncties van de 1e soort en

$$k^4 = \frac{12 \omega^2 \cdot \rho (1 - \sigma^2)}{Y_0 l_t^2} \quad (4)$$

waarbij Y = elasticiteitsmodulus en σ = verhouding van Poisson.

De gemiddelde uitslag en de volumesnelheid worden gevonden door te integreren over het oppervlak, MASON, blz. 169.

Het gedrag van de verhouding r:

$$r = \frac{\text{volumesnelheid}}{\text{oppervlak} \times \text{snelheid van het centrum}} \quad (5)$$

in afhankelijkheid van de frequentie is nu een belangrijk gegeven. Daarom hebben wij r voor verschillende waarden van ka berekend met behulp van tabellen (MORSE, Table III, blz. 333 en Table IV, blz. 334), terwijl de waarde voor ka = 0 gevonden werd door limietovergang met een voldoende aantal termen van de reeksontwikkelingen. In fig. 11 is dit uitgezet. Daarin is tevens een frequentieschaal aangegeven voor a = 5 mm.

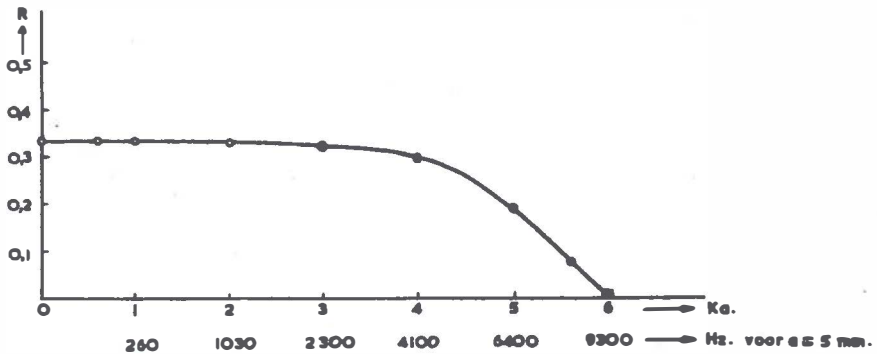


fig. 11. Volumesnelheid van een ingeklemde ronde plaat.
 r = gemiddelde snelheid, uitgedrukt in de snelheid van het midden. a = straal.
 De frequenties gelden voor een messing plaat van 40 μ dik en met een straal van 5 mm.

Hierbij valt nog op te merken, dat voor de grondtoon ka = 3,2 is, d.w.z. 2650 Hz voor a = 5 mm, terwijl de volgende eigenfrequentie bereikt wordt voor ka = 6,3. De resonantiefrequenties verhouden zich ruwweg als de kwadraten van hun rangnummers, RAYLEIGH I § 221^a, MASON, blz. 170. Wij zien, dat r tot ka = 4 toe practisch de waarde $\frac{1}{3}$ heeft en dat er zich, wat nog belangrijker is, geen sprongen voordoen. Bij toenemende frequentie is er eerst een langzame afname van r, die vanaf ka = 3,2 in versneld tempo doorgaat. Dit wordt veroorzaakt door het optreden van een knooppunt, die bij ka = 3,2 in het centrum ontstaat en bij toenemende frequentie naar de rand van de plaat loopt. Daardoor heeft het gedeelte binnen de knooppunt een faseverschil van 180° met dat buiten de cirkel. Bij ka = 6 is de resulterende volumesnelheid gelijk nul geworden.

Hoewel deze resultaten niet zonder meer op de keel-luidspreker overgedragen kunnen worden, omdat het membraan dank zij de groeven als een zuiger fungeert en de bekrachtiging vanuit het midden geschiedt, kunnen wij er toch zeker van zijn, dat het centrale gedeelte van het membraan, dat wel als een plaat reageert, beneden 4000 Hz geen moeilijkheden oplevert, in overeenstemming met de proeven met het kopervijlsel.

Op grond van algemene overwegingen, RAYLEIGH I § 211 en 213, geldig zowel voor membranen als platen, kan namelijk gezegd worden, dat de eigenfrequenties steeds hoger zullen worden naarmate een groter gedeelte ingeklemd wordt. Dit betekent, dat een gedeelte van het oppervlak, ingesloten b.v. tussen de rand en een knoopcirkel of tussen twee knoopcirkels, geen vrije trilling kan uitvoeren met een frequentie gelijk aan of lager dan de eigenfrequentie van het membraan of de plaat in zijn geheel. In ons geval wil dit zeggen, dat moeilijkheden, doordat de gemiddelde amplitudo nul dreigt te worden, pas zullen ontstaan bij frequenties belangrijk hoger dan 4000 Hz.

Samenvattend kan dus gezegd worden, dat de volumesnelheid in het interval van 100 tot 4000 Hz voorgesteld kan worden als het product van de snelheid van het centrum en een constante factor. Voor deze constante kiezen wij $\frac{1}{3}$ maal het oppervlak van het membraan.

Het gedrag van de verhouding r kon niet exact bepaald worden door een directe meting wegens de eigenschappen van de ruimte, zie 4.4. De resultaten waren daardoor wat afhankelijk van de groepering van luidspreker en microfoon.

De eisen e en f komen onder 4.3 ter sprake.

4.3. Electriche apparatuur

De transmissiekromme van het aanzetsstuk werd verkregen met behulp van de opstelling van fig. 8, blz. 70. Gedurende de proef werd een foto genomen van het scherm van de electronenstraalbuis en aan de hand hiervan kon de transmissiekromme berekend worden.

De frequentiebasis ontstaat door de afbuiging in horizontale richting en deze werd verkregen, door een zeer fijn verdeelde potentiometer aan de as van de toongenerator te koppelen. Deze leverde een gelijkspanning, waarvan het bedrag afhing van de instelling van de zoekfrequentie. Deze spanning werd versterkt door een gelijkstroomversterker en toegevoerd aan de platen voor de horizontale afbuiging. De frequentieschaal op het scherm van de oscillograaf was daardoor evenredig met de hoekverdeling op de frequentieschaal van de toongenerator.

De zoektoon van de toongenerator, die een constante amplitudo heeft, wordt toegevoerd aan een versterker met automatische volu-

mereregeling (A.V.R.) en aanpassingstransformator, die voor de bekrachtiging van de keel-luidspreker zorgt. De automatische volumeregeling komt tot stand met behulp van de spanning van het meetspoeltje, die door een voorversterker versterkt wordt.

Het acoustische signaal van het aanzetstuk wordt geregistreerd door een microfoon. Het signaal van de microfoon wordt versterkt door een voorversterker en dan naar de versterker van de electronstraaloscillograaf geleid, die de afbuiging in verticale richting verzorgt.

Technische gegevens: Electronenstraaloscillograaf: N.V. Philips, Type G.M. 3156. Voorversterker + versterker in de oscillograaf hebben een frequentie karakteristiek, die binnen 10% recht is tussen 100 en 6000 Hz. Microfoon: Electro-dynamisch, N.V. Philips, Type 9528. Frequentie karakteristiek binnen 3 db recht tussen 90 en 6500 Hz. Voorversterker voor de automatische volumeregeling: Frequentie karakteristiek binnen 20% recht tussen 100 en 6000 Hz. De voedingsspanningen voor de versterkers zijn gestabiliseerd.

De automatische volumeregeling, zie fig. 12, heeft een tweetal functies:

1. Onderdrukken van de resonantiepieken van de keel-luidspreker.
2. Vergroten van de inwendige weerstand van de keel-luidspreker.

Het onderdrukken van de resonantiepieken, eis f van blz. 64, speciaal van de piek bij 320 Hz, is noodzakelijk, omdat anders de bekrachtigingsstroom voor alle frequenties vastgelegd is door de wegens de pieken toe te laten stroom.

De volumesnelheid van het membraan tijdens de proef zou dan voorgesteld worden door een kromme evenredig aan die van fig. 7

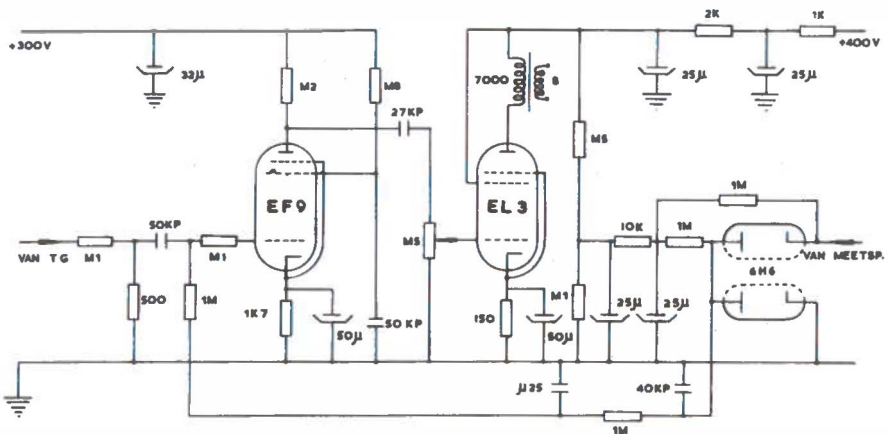


fig. 12. Versterker met uitgestelde automatische volumeregeling (A.V.R.) en aanpassing.

op blz. 68, indien afgezien wordt van het effect van de acoustische belasting. Daardoor zouden wij zonder dwingende reden afzien van een flink geluidsvolume bij de hogere frequenties, want bij de piek van 320 Hz mag slechts met 5,5 m A bekrachtigd worden, terwijl bij de hogere frequenties de stroom 200 mA mag be dragen,

De bekrachtigingsstroom kan wel met de hand geregeld worden, maar het is lastig om dit behoorlijk synchroon met de frequentie te doen en de inwendige weerstand houdt dan bovendien dezelfde waarde.

Daarom wordt bij de toegepaste schakeling de versterking van het constante signaal van de toongenerator automatisch aan de resonantiekromme van de keelluidspreker aangepast, volgens het principe van de uitgestelde automatische volumeregeling. De wisselspanning aan het meetspoeltje wordt namelijk versterkt en toegevoerd aan een helft van een dubbele gelijkrichtbuis (6H6), die deze spanning gelijkricht en dan een negatieve spanning afgeeft, die gebruikt wordt als negatieve voorspanning van een buis met een logaritmische karakteristiek (EF9). Neemt de spanning aan het meetspoeltje toe, b.v. doordat de frequentie de resonantiefrequentie nadert, dan neemt de negatieve voorspanning toe, waardoor de steilheid, en zo de versterkingsfactor, afneemt, zodat de bekrachtigingsstroom kleiner wordt. Dank zij de uitgestelde spanning, waarvoor de andere helft van de dubbele gelijkrichtbuis gebruikt wordt, is deze automatische volumeregeling zeer effectief.

De instelling van de volumeregeling gebeurde steeds bij 2500 Hz. Zonder regeling 240 m A, met regeling 200 m A bekrachtigingsstroom. Bij de resonantiepiek van 320 Hz loopt dan een stroom van 3,3 m A, zodat de versterkingsfactor van de EF 9 ruim $60 \times$ kleiner geworden is. De meetspanning is bij deze piek nu slechts ruim 40% groter dan bij 2500 Hz.

Bij het gebruik van de keel-luidspreker met automatische volumeregeling moet een nieuwe resonantiekromme opgenomen worden.

De vorige resonantiekromme, zie fig. 7, blz. 68, gaf de spanning aan de meetspoel in afhankelijkheid van de frequentie van de bekrachtigingsstroom, bij constant gehouden stroomsterkte, of, wat als hetzelfde gerekend mag worden, in afhankelijkheid van de frequentie van de bekrachtigingsspanning aan de ingang van de versterker zonder automatische volumeregeling, bij constant gehouden spanning.

De nieuwe resonantiekromme, zie fig. 13, is op dezelfde wijze opgenomen, maar nu met versterker en ingeschakelde automatische volumeregeling. Deze frequentiekarakteristiek is bijna vlak, waaruit blijkt, dat de mechanische impedantie van het luidsprekersysteem zeer weinig invloed heeft op de volumesnelheid.

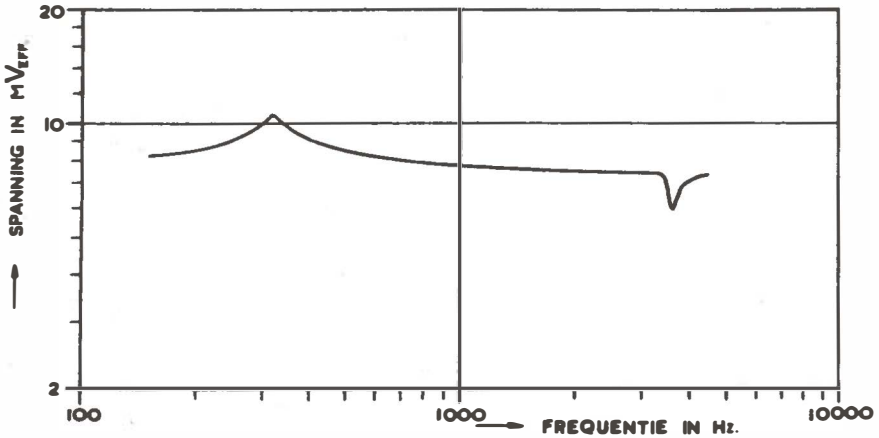


fig. 13. Frequentiearakteristiek van de keelluidspreker bij ingeschakelde automatische volumeregeling.

Daaruit volgt tevens, dat de extra impedantie door de terugwerking van het aanzetstuk zeer weinig invloed op de volumesnelheid heeft, wat betekent, dat het systeem een grote inwendige weerstand heeft gekregen.

Dit wordt veroorzaakt door de eigenschappen van de uitgestelde automatische volumeregeling. Wanneer de volumesnelheid van het membraan dreigt toe te nemen, b.v. doordat de frequentie de resonantiefrequentie van 320 Hz nadert, dan neemt de negatieve voorspanning aan de regelbuis toe en de versterking van het signaal van de toongenerator neemt af, zodat de bekrachtigingsstroom kleiner wordt. Hierdoor wordt de toename van de volumesnelheid echter tegengewerkt. Een verkleining van de volumesnelheid wordt eveneens tegengewerkt, omdat de negatieve voorspanning van de regelbuis dan afneemt, waardoor deze het signaal van de toongenerator meer versterkt. Door de uitstelspanning van de volumeregeling wordt bereikt, dat de factor waarmee veranderingen van de volumesnelheid worden tegengewerkt zeer groot is.

Door uit te gaan van de wijze van instellen van de automatische volumeregeling en van de oorspronkelijke resonantiekromme, fig. 7, blz. 68, blijkt, dat de inwendige weerstand praktisch gelijk is aan de impedantie van het luidsprekersysteem bij 4000 Hz (wanneer er na 2500 Hz een normale afname was zou de volumerege-

ling bij 4000 Hz niets meer doen), d.w.z. $2 \pi 4000 \cdot 0,53 \approx 300 \rho c$ waarbij ρc de impedantie per eenheid van oppervlakte is van de vrije lucht voor een vlakke golf ($\rho c \approx 40$).

Het onderling vergelijken van de beide resonantiekrommen leert, dat de inwendige weerstand bij 320 Hz, dank zij de automatische volumeregeling, ongeveer 90 keer zo groot is geworden. De meetspanning neemt namelijk slechts 40% toe wanneer de mechanische impedantie van het systeem met een factor 130 afneemt.

Dit was noodzakelijk, want bij proeven om de keel-luidspreker te testen was gevonden, dat de volumesnelheid vrij sterk afhing van de acoustische belasting.

Dit werd geconstateerd met als aanzetstuk voor de keel-luidspreker een aantal cilindrische koperen buizen, open en gesloten, met lengten van 34 en 42,5 cm. Door de terugwerking op de keel-luidspreker werd de resonantiefrequentie van 320 Hz naar hogere frequenties verschoven, omdat de effectieve stijfheid van het membraan toeneemt en bij de frequenties waarop de buizen resoneren nam de amplitudo van het membraan af. Dit effect is het sterkst bij die frequenties, waarbij de totale mechanische impedantie van de keel-luidspreker zonder acoustische belasting nog klein is.

(Bij de eerste uitvoering, zie hoofdstuk V, toen de keelluidspreker op rond 500 Hz was afgestemd, werd de amplitudo in het gebied van 1000 Hz b.v. 5 keer zo klein).

Hier moet nog opgemerkt worden, dat het trillende systeem met opzet zo licht mogelijk gehouden werd, omdat het oorspronkelijk in de bedoeling lag om de acoustische impedantie van het aanzetstuk te bepalen aan de hand van de terugwerking op de keelluidspreker. Bij de lage frequenties zou dit inderdaad zeer goed mogelijk zijn, maar vanaf 3000 Hz wordt de onnauwkeurigheid te groot, zodat hiervan werd afgezien.

Ook bij het natuurlijke aanzetstuk is er terugwerking op de luidspreker, hoewel minder uitgesproken, omdat de buizen een hardere wand hebben, waardoor de demping kleiner is en de resonantiepieken scherper zijn.

Toepassing van de keelluidspreker met lage inwendige weerstand, dus zonder automatische volumeregeling, brengt dan ook met zich mee, dat het bepalen van de transmissiekromme van het aanzetstuk zeer omslachtig wordt.

Hiervoor is dan een andere opstelling vereist, waarbij een electronenschakelaar gebruikt wordt om gelijktijdig het signaal van de microfoon en dat van de meetspoel op het scherm van de electronenstraalbuis te schrijven. Deze opstelling is bij voorlopige proeven inderdaad toegepast, maar de uitwerking van de krommen wordt zeer tijdrovend, terwijl de resultaten bovendien on-

naauwkeurig werden o.a. ook door de nulverbreiding tengevolge van de electronenschakelaar.

Door de automatische volumeregeling is de volumesnelheid praktisch constant en onafhankelijk van de acoustische belasting, zodat het door de microfoon opgenomen signaal praktisch gelijk is aan de transmissiekromme (druk), op een constante factor na, die onbelangrijk is.

Dank zij de automatische volumeregeling benadert de keelluidspreker het ideale geval voor een luidspreker nu zeer goed. Onder twee voorwaarden echter:

1. De bekrachtiging moet monofrequent zijn, wat bij de proeven voor het bepalen van de transmissiekromme steeds het geval was en
2. De impedantiewisselingen, dus de frequentiewisselingen, mogen niet te snel verlopen, omdat anders de automatische volumeregeling niet voldoende volgt. Dit komt er op neer, dat de proeven, waarbij het spectrum van 150 tot 4500 Hz doorlopen wordt, niet te kort mogen duren. De insteltijd van de automatische volumeregeling bedraagt namelijk rond 0,1 sec. Het opslingeren van het aanzetstuk, zie 4.1.2., stelt hier echter zwaardere eisen.

Onder 4.2.1., werd als eis *e* gesteld, dat de niet-lineaire vervorming klein moet zijn. Voldoet de apparatuur niet aan deze eis, zodat de hogere harmonischen vrij sterk aanwezig zijn in de volumesnelheid van het membraan, dan zal het aanzetstuk immers ook behoorlijk aanspreken wanneer de frequentie van een van deze harmonischen ongeveer gelijk is aan de frequentie van een formant, zodat de experimentele „transmissie”kromme een belangrijke correctie zou moeten ondergaan.

Analyse van de spanning aan het meetspoeltje met behulp van de Wave Analyzer, 6.2., wees uit, dat van 100 tot 320 Hz de vervorming zeer sterk was, namelijk: 2^e harmonische van 90 tot 6%, 3^e harmonische van 35% tot 3%, afhankelijk van de ligging van de betreffende harmonische ten opzichte van 320 Hz, bij 320 Hz was de 2^e harmonische 6% en de 3^e harmonische 3% en van 350 tot 4400 Hz was de 2^e harmonische 1% en de 3^e harmonische 3%.

In verband met de vrij sterke vervorming bij de frequenties beneden 350 Hz werd de transmissiekromme voor de verschillende klinkers dan ook alleen voor de frequenties van 350 tot 4000 Hz opgemaakt.

4.4. Echo-arme kamer

De proeven werden uitgevoerd in een echo-arme kamer. Het was noodzakelijk, om aandacht te besteden aan de acoustische eigenschappen van deze experimenteerruimte.

Het belang van dit onderzoek blijkt wel zeer duidelijk uit de beroemde paradox van W.C. SABINE. Deze bepaalde onder meer de eigenschappen van een ruimte met behulp van een geluidsbron en een microfoon, die vast opgesteld waren. In een bepaald geval bleek nu, dat het geluid, bij dezelfde bekrachtiging van de geluidsbron, $8 \times$ zo sterk werd, wanneer de vloer bedekt werd met geluidabsorberend materiaal.

Van te voren zal dus moeten vaststaan, hoe groot de invloed van de ruimte op de resultaten van de meting kan zijn. Dit is mogelijk, door hierover aparte metingen te verrichten, zie 4.4.2.

Wij hebben bovendien getracht om er een inzicht over te verkrijgen, door een geschikt vergelijkingsobject te beschouwen, zie 4.4.1. De invloed van het door de wanden teruggekaatste geluid zal namelijk zeker geringer zijn dan in het geval van een bolbron, die zich in het centrum bevindt van een bol, waarvan de wanden niet voor 100% absorberen, omdat het teruggekaatste geluid dan volledig en in phase naar de bron terugloopt. (Onder een bolbron verstaat men een geluidsbron met een bolvormig oppervlak, waarbij dit oppervlak een uniforme snelheid heeft.)

Dat een bolbron geschikt is om de straling van de mond te vertegenwoordigen blijkt uit verschillende berekeningen over eenvoudige stralers, zie MORSE, Ch.7, 27.

4.4.1. Bolbron in het centrum van een bol. Voorwaarden voor de metingen

Wij interesseren ons hier voor

1. de invloed van de reflexie op de impedantie van de bron en
2. de geluidsdruk op enige afstand van de bron, als functie van de frequentie en bij constante volumesnelheid van de bron. (Als impedantie Z kiezen wij in het algemeen het quotient van druk en volumesnelheid.)

1. Neem het geval van een bolbron met straal r_b , die zich in het centrum van een bol met een straal r_w bevindt, waarvan de bekleding een impedantie per oppervlakte eenheid heeft van $Z_w \cdot e^{j\alpha(w)}$.

Het geluid kan dan voorgesteld worden met behulp van een potentiaalfunctie

$$\psi = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} + \frac{B}{r} e^{j(\omega t + kr)} \quad (6)$$

$$p = \rho \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{en} \quad v = - \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (7)$$

waarbij p de druk en v de snelheid voorstelt. De volumesnelheid over een bol met straal r is dan $V = 4 \pi r^2 \cdot v$ en de impedantie $Z = \frac{p}{v}$, $k = 2 \pi / \lambda$ is het golfgetal, $\omega = kc$, c is de voortplan-

tingsnelheid van het geluid en A en B zijn constanten voor de heengaande en de teruggekaatste golf. Dan is

$$p = j \cdot \frac{\rho\omega}{r} e^{j\omega t} [A e^{-jkr} + B e^{+jkr}] \quad (8)$$

$$\text{en} \quad v = \frac{e^{j\omega t}}{r^2} [A(1 + jkr)e^{-jkr} + B(1 - jkr)e^{+jkr}] \quad (9)$$

$$Z = \frac{P}{V} = j \cdot \frac{\rho\omega}{4\pi r} \cdot \frac{A e^{-jkr} + B e^{+jkr}}{A(1+jkr)e^{-jkr} + B(1-jkr)e^{+jkr}} \quad (10)$$

uit de impedantie van de wand volgt een betrekking tussen A en B,

$$C = \frac{B}{A} = - \frac{\rho\omega r_w + j(1 + jkr_w)Z_w e^{j\alpha}}{\rho\omega r_w + j(1 - jkr_w)Z_w e^{j\alpha}} \cdot e^{-2jkr_w} \quad (11)$$

voor grote waarden van kr_w gaat dit over in:

$$C = \frac{B}{A} = \frac{Z_w e^{j\alpha} - \rho c}{Z_w e^{j\alpha} + \rho c} \cdot e^{-2jkr_w} \quad (11a)$$

ρc is de impedantie per oppervlakte eenheid voor een vlakke golf in de vrije ruimte.

De impedantie van de bolbron is dan:

$$Z_b = j \cdot \frac{\rho\omega}{4\pi r_b} \cdot \frac{e^{-jkr_b} + C e^{+jkr_b}}{(1 + jkr_b)e^{-jkr_b} + C(1 - jkr_b)e^{+jkr_b}} \quad (12)$$

Stel nu $1 + jkr_b = D e^{j\beta}$, dan is $1 - jkr_b = D e^{-j\beta}$.

$$Z_b = j \cdot \frac{\rho\omega}{4\pi r_b} \frac{1}{D e^{j\beta}} \frac{1 + C e^{2jkr_b}}{1 + C e^{2jkr_b} - 2j\beta} \quad (12a)$$

$$= Z_b^* \frac{1 + C e^{2jkr_b}}{1 + C e^{2jkr_b} - 2j\beta} \quad (12b)$$

waarbij Z_b^* de impedantie voorstelt in het geval van 100% absorptie door de wand.

Zonder nauwkeurige kennis van de impedantie van de wand kan de correctieterm niet exact berekend worden. Het is echter wel mogelijk om een schatting te maken voor een belangrijk geval en wel voor $|C| = \frac{1}{2}$ (75% absorptie, zie 4.4.2),

$$C = \frac{1}{2} e^{-j\delta} e^{-2jkr_w}$$

dan is de correctieterm

$$\frac{1 + \frac{1}{2} e^{j(2kr_b - 2kr_w - \delta)}}{1 + \frac{1}{2} e^{j(2kr_b - 2kr_w - \delta - 2\beta)}}$$

teller t en noemer n zijn aan elkaar gelijk op de factor $e^{-2j\beta}$ in de noemer na.

Het verloop van de correctieterm als functie van de frequentie kan geschat worden, door de voorstelling in het complexe vlak te gebruiken, zie fig. 14. De snelheid waarmee het argument van de e -machten kan veranderen hangt in hoofdzaak van de term $2jkr_w$ af, want δ verandert naar verhouding weinig met veranderende frequentie, zoals voor de gangbare materialen volgt uit de resultaten van ZWIKKER EN KOSTEN (1951).

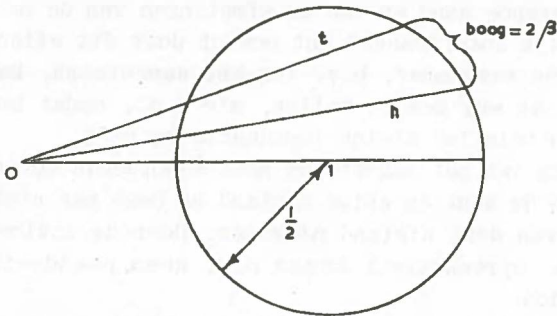


fig. 14. Correctieterm voor de impedantie van de bolbron.
Toelichting in de tekst.

Bij lage frequenties, wanneer $kr_b \ll 1$, zodat $\beta \approx kr_b$ is, varieert de correctieterm bij toenemende frequentie dan tussen de waarden:

$$e^{-2j\beta}; 1 - 1,2 kr_b; e^{+\frac{2}{3}j\beta}; 1 + 1,2 kr_b; e^{-2j\beta}; 1 - 1,2 kr_b$$

enz. zodat $Z_b \cdot 4 \pi r_b$ dan schommelt tussen de waarden:

$$3 \rho \omega kr_b + j\rho\omega; (1 - 1,2 kr_b)(\rho \omega kr_b + j\rho\omega); \frac{1}{3} \rho \omega kr_b + j\rho\omega;$$

$$(1 + 1,2 kr_b)(\rho \omega kr_b + j\rho\omega); 3\rho \omega kr_b + j\rho\omega; (1 - 1,2 kr_b)$$

$$(\rho \omega kr_b + j\rho\omega) \text{ enz.}$$

Hieruit blijkt, dat de absolute waarde van de impedantie weinig verandert, maar dat de weerstandsterm een factor 3 groter of kleiner kan worden. De snelheid van deze wisselingen hangt af van de straal r_w van de bol. Bij een straal $r_w = 2$ m en een voortplantingssnelheid van 350 m/sec. is b.v. telkens na 175 Hz een cyclus voltooid. Bij een grotere straal is de opeenvolging nog sneller.

De limiet voor de correctiefactor volgt uit de waarden bij zeer hoge frequenties, $kr_b \gg 1$. Deze ligt dan tussen $e^{-j}; \frac{1}{3}; e^{+j}; 3; e^{-j}; \frac{1}{3}$ enz. Dit komt bij de normale stenvorming niet

voor. De frequenties die voor de klinker van belang zijn lopen tot ca. 4000 Hz. en de maximale afmetingen van de mond corresponderen met een waarde r_b van ca 2 cm. De correctiefactor ligt dan tussen $e^{-\frac{1}{2}j}$; $\frac{1}{2}$; $e^{+\frac{1}{2}j}$; 2; $e^{-\frac{1}{2}j}$; $\frac{1}{2}$ enz.

De invloed op het karakter van de stralingsimpedantie is vrij groot. De weerstandsterm kan b.v. een factor 1,5 groter of kleiner worden door de phaseverschuiving.

De impedantie van de bolbron hangt dus af van de eigenschappen van de reflecterende wand en van de afmetingen van de bol.

In de praktijk interesseert het ons of door dit effect de afstemming van een resonator, b.v. van het aanzetstuk, kan veranderen. Dit blijkt erg mee te vallen, zie 4.6., omdat het schommelingen in een relatief kleine impedantie betreft,

2. De werking van het aanzetstuk moet beoordeeld worden uit de registratie van de druk op enige afstand en deze mag niet op specifieke wijze van deze afstand afhangen. Door de invloed van de reflexie in de spreekruimte mogen b.v. geen pseudo-formanten bijgevoegd worden.

De druk in een willekeurige plaats is gelijk aan het product van de volumesnelheid van de bron (frequentiemodulatie, transmissie- en stralingsimpedantie van de mond) en van de transmissie van de bron naar de beschouwde plaats. Deze laatste onderzoeken wij aan het vergelijkingsobject.

De volumesnelheid van de bron is volgens (9) gelijk

$$V = 4\pi \cdot e^{j\omega t} A \cdot [(1 + jkr_b)e^{-jkr_b} + C(1 - jkr_b)e^{jkr_b}] \quad (13)$$

Bij constante volumesnelheid is de druk op afstand r dan volgens (8) en (13)

$$p = \frac{V}{4\pi r} \cdot j\rho\omega \cdot e^{j\omega t} \cdot \frac{e^{-jkr} + C e^{+jkr}}{(1 + jkr_b)e^{-jkr_b} + C(1 - jkr_b)e^{jkr_b}} \quad (14)$$

en met de reeds eerder ingevoerde absorptie en afkortingen:

$$p = \frac{V}{4\pi r} \cdot j\rho\omega \cdot e^{j(\omega t - kr + kr_b)} \cdot \frac{1}{De^{j\beta}} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} e^{j(2kr - 2kr_w - \delta)}}{1 + \frac{1}{2} e^{j(2kr_b - 2kr_w - \delta - 2\beta)}} \quad (14a)$$

Het laatste quotient van (14a) is weer een correctiefactor en deze is uitsluitend van belang. Het gedrag is analoog aan dat van de eerder behandelde correctiefactor. Bij toenemende frequentie schommelt de waarde tussen zekere grenzen en bij kleine afstand r zijn deze grenzen nauw, terwijl bij grotere afstand r de grenzen steeds wijder worden, tot de limietwaarden e^{-j} ; $\frac{1}{3}$; e^{+j} ; 3; e^{-j} ; $\frac{1}{3}$ enz. De opeenvolging van de cycli wordt weer vrijwel uitsluitend door de afmetingen van de absorberende bol bepaald.

De correctiefactor is dus afhankelijk van de afstand waarop de microfoon is opgesteld en bij grotere afstand kan de druk daardoor in een opeenvolging, die overeenkomt met die bij de echte formanten, een factor 9 in amplitudo variëren. Dit zal aanleiding geven tot het waarnemen van pseudo-formanten en de sterkte en de frequentie van deze pseudo-formanten zal afhangen van de afstand r . Dit is een zeer ongewenste toestand.

Het spreekt vanzelf, dat de omstandigheden in het geval van een reflecterende bol zo ongunstig mogelijk zijn. De teruggekaatste golven komen immers met precies dezelfde fasen bij de bron aan en versterken elkaars effect. Ondanks de 75% absorptie, waarvoor al enige moeite gedaan moet worden, is de invloed van de terugkaatsing vrij groot.

Bij een andere vorm van de kamer, rechthoekig b.v., is bij bekleding met hetzelfde materiaal een beter resultaat te verwachten, omdat het teruggekaatste geluid de ruimte dan meer homogeen opvult en omdat de teruggekaatste golven met verschillende fasen bij de bron aankomen. Daardoor is de correctiefactor voor de stralingsimpedantie kleiner, evenals die voor de druk. Ook hier zal de invloed op de druk des te geringer zijn, naarmate de microfoon dichter bij de bron is opgesteld.

Behalve de absorptie-coëfficiënt van de bekleding van de wanden is dus ook de geometrie van de kamer en van de opstelling van proefpersoon en microfoon van belang. De eisen aan de echo-arme kamer en aan de proefopstelling zijn dan ook slechts zo te formuleren, dat het teruggekaatste geluid een zó kleine amplitudo moet hebben ten opzichte van het directe geluid, dat door interferentie geen „formanten” ontstaan.

Uit de correctie term van (14a) volgt, dat dit bij 95% absorptie (of meer) onafhankelijk van de geometrie steeds het geval zal zijn.

4.4.2. Metingen om de kamer te testen

De afmetingen van het inwendige van de gebruikte echo-arme kamer zijn $2,4 \times 1,85 \times 2$ m. De wanden zijn bekleed met verschillende lagen absorberend materiaal, die te zamen naar schatting 70% van de opvallende energie absorberen. De kamer is goed afgeschermd voor geluiden van buiten en maakt een dode indruk. Een dik gordijn verdeelt de kamer in twee gelijke stukken, in de ene helft bevindt zich de meetapparatuur, in de andere helft de proefpersoon.

Voor het bepalen van de acoustische eigenschappen van een ruimte zijn verschillende methoden in gebruik, zie b.v. BERANEK (Ch. 18). Wij pasten een drietal methoden toe, namelijk

1. Onderzoek naar de afwijkingen van de r^{-2} wet. Bij verwaarloos-

bare reflexie moet de geluidsenergie bij toenemende afstand van de microfoon tot de geluidsbron afnemen met het kwadraat van deze afstand, zie ook BERANEK en SLEEPER (1946). De geluidsdruk zal dus bij toenemende afstand afnemen met r^{-1} . Wij onderzochten dit door de keelluidspreker in het midden van de ruimte op te stellen en door de afstand van de microfoon tot de luidspreker te variëren. De microfoon (electro-dynamische, N.V. Philips, Type 9528) is richtingsgevoelig, drukken in het vlak van de microfoon worden minstens 13 db verzwakt ten opzichte van gelijke drukken loodrecht op het vlak van de microfoon. Bij afstanden van 5 cm tot maximaal 25 cm bleek de afwijking van de amplitudo tussen 200 en 4000 Hz maximaal 1,5 db te bedragen (energie: 3 db).

2. Vergelijken van de op verschillende afstanden opgenomen spectra van de keelluidspreker. Zonder aangesloten resonator is het geluidsvolume van de keelluidspreker klein. Evenals onder 1 bleek van 200 tot 4000 Hz en voor afstanden van 5 tot 25 cm de afwijking van de amplituden in de verschillende krommen maximaal $\pm 1,5$ db te zijn.

3. Aansluiten van de keelluidspreker op de reeds eerder genoemde koperen buizen, blz. 79. Het afgegeven volume komt dan overeen met dat van het aanzetstuk bij bekrachtiging met de keelluidspreker. Het spectrum bestaat uit discrete frequenties, aequidistant verspreid over het hele gebied. Tussen 200 en 4000 Hz en voor afstanden van 5 tot 25 cm bleek de afwijking van de amplituden nu binnen ± 1 db te blijven. De ligging der formanten bleek niet van de afstand van de microfoon tot de mond van de buis af te hangen.

Hieruit volgt, dat bij de proeven met het natuurlijke aanzetstuk de ligging der formanten niet zal afhangen van de plaats van de microfoon, mits deze binnen de genoemde grenzen geplaatst wordt en dit was steeds het geval. Verder volgt er uit, dat de onnauwkeurigheid van de gemeten amplituden ± 1 db zal bedragen.

4.5. Proeven met het natuurlijke aanzetstuk

4.5.1. Methode

Na het inbrengen van de keelluidspreker en het wennen van de proefpersoon aan de sensatie daarvan, werd de luidspreker bekrachtigd met een zoektoon, die door het hele spectrum liep. Dit gebeurde met de hand, in 15 tot 25 sec., wat niet te vlug is, zie 4.1.2.

Het scherm van de electronenstraalbuis, zie fig. 8, blz. 70, werd gefotografeerd met een kleinbeeldcamera, waarbij de buis niet met de volle intensiteit en zonder naversnelling werkte. Bij de tijdopname werd het licht tot enige tijd na het openen van

de sluiters met zwart papier onderschept, evenals vlak voor het sluiten.

In het gedeelte van de kamer waarin de proefpersoon zich bevond brandde een zwakke lamp, die voldoende indirect licht op het scherm van de buis wierp om de markering van het midden van het scherm, die voor de frequentiebasis gebruikt wordt, duidelijk te laten uitkomen.

De versterking werd zodanig geregeld, dat bij een afstand van de mond tot de microfoon van ongeveer 15 cm het scherm op toelaatbare wijze werd opgevuld. De microfoon was steeds recht voor de mond opgesteld. De opgenomen kromme werd dan later vergroot en overgetekend op grafiekenpapier.

De krommen voor de verschillende klinkers moeten dan gecorrigeerd worden voor de nulbreedte, bij signaalsterkte gelijk nul. Dit werd mogelijk, door opnamen met de mond dicht, met de neus dicht en met mond en neus dicht. Tevens kon hierdoor de transmissie van de neusholte onder deze omstandigheden vastgelegd worden. In de nulbreedte is opgenomen de aanmerkelijke dikte van de nullijn van de buis en een kleine 50 perioden storing. De afmetingen in horizontale richting worden eveneens beïnvloed door de dikte van de nullijn van de buis. Dit geeft o.a. een verbreding van de formanten. De apparaatfunctie voor de correctie is echter eenvoudig vast te stellen.

Tijdens het maken van een opname zijn er dan verder nog de mogelijke storingen door de ongewilde geluiden van de proefpersoon. Wanneer deze gehoord werden maakten wij steeds een nieuwe opname. Bij het begin van een serie proeven kwam er b.v. soms nog eens een hoestprikkel. De geluiden door het ademen waren relatief zwak, omdat de proefpersoon langzaam in en uit ademde en aan de onderkant van de keelluidspreker werd een ruimte van rond 1 cm^2 vrijgelaten.

Tijdens een serie werden, na de nodige voorbereidingen, van elke klinker een tweetal goede opnamen gemaakt, een met toenemende frequentie van de zoektoon en een met afnemende. Het criterium was daarbij, dat er geen storende geluiden mochten zijn en dat het scherm van de buis zo goed mogelijk opgevuld moest worden, door bij constante versterking de afstand van de proefpersoon tot de microfoon geschikt te kiezen. De eigenschappen van de formanten, zoals frequentie en halfwaardebreedte, bleven daarbij buiten beschouwing en er werden aan de proefpersoon, gezien onze ervaringen, geen aanwijzingen gegeven over het ongedwongen instellen van de mond op een bepaalde klinker. Integendeel, wij werkten een serie liefst zo snel mogelijk na het effectief worden van de plaatselijke verdoving af en lieten de luidspreker zo lang mogelijk in de keel (ruwweg om het kwartier moest bijgespoten worden

voor de verdoving). Dit beviel het beste, omdat de keel van de oroefpersoon dan zo weinig mogelijk geïrriteerd werd en het was het minst vermoeiend. Tussen de verschillende opnamen werd echter voldoende gelegenheid tot recreatie gegeven, om een kramptoestand te voorkomen. Desondanks waren de verschillende opnamen van eenzelfde klinker toch nooit geheel aan elkaar gelijk, ook niet, wanneer ze op dezelfde dag en vlak na elkaar opgenomen waren, met „onveranderde” stand van keelluidspreker en aanzetstuk.

De onderzochte klinkers zijn de Nederlandse vertegenwoordigers van de centra van de gebieden van de klinkervierhoek voor de primaire cardinale klinkers, zoals deze vastgelegd is door de International Phonetic Association (1949, blz. 6), met uitzondering van de \ddot{t} , waarvoor het Nederlands geen klinker heeft. Namelijk de i riet, e feest, ε bed, a raam, α bad, ɔ post, o boot, u hoed en de ə put. Verder de I (ɹ) pit, die het dichtst bij de \ddot{t} komt en de secundaire cardinale klinker y, fuut. Deze klinkers bestrijken het hele gebied van de klinkervierhoek en dit is ook uit theoretisch oogpunt belangrijk, in verband met de overgangen van de verschillende klinkers in elkaar.

4.5.2. Resultaten

Van de opgenomen krommen geeft fig. 15 een beeld. Dit betreft een redelijke opname van de I (ɹ), Pit.

In fig. 16 zijn de transmissiekrommen (druk) uitgezet als functie van de frequentie en uitgedrukt in willekeurige eenheden. Het betreft hier het quotient van de druk op enige afstand van de mond en de volumesnelheid aan de ingang.

Voor elke klinker is namelijk van een representatieve kromme de gecorrigeerde kromme opgemaakt, die het verband aangeeft tussen de door de microfoon gemeten druk en de volumesnelheid.

De eigenlijke transmissiekromme, snelheid aan de uitgang gedeeld door snelheid aan de ingang, hangt hier nauw mee samen, want de volumesnelheid van de mond, die in de definitie van de transmissiekromme voorkomt, hangt op eenvoudige wijze samen met de op de afstand r gemeten druk. De straling van de mond gedraagt zich namelijk op dezelfde wijze als die van een bolbron en volgens 14a is de samenhang in dit geval

$$p = \frac{V}{4\pi r} \cdot j\rho\omega \cdot e^{j(\omega t - kr + kr_b)} \cdot \frac{1}{De^{j\beta}}$$

wanneer de kamer voldoet aan de voorwaarde, dat de correctieterm verwaarloosd mag worden.

Voor de beschouwde frequenties hangt D nog weinig van ω af, want $|D| = |1 + jkr_b|$ en bij $\omega = 2\pi \cdot 4000$ en $r_b = 2$ cm is $|D|$ nog slechts 1,8 geworden.

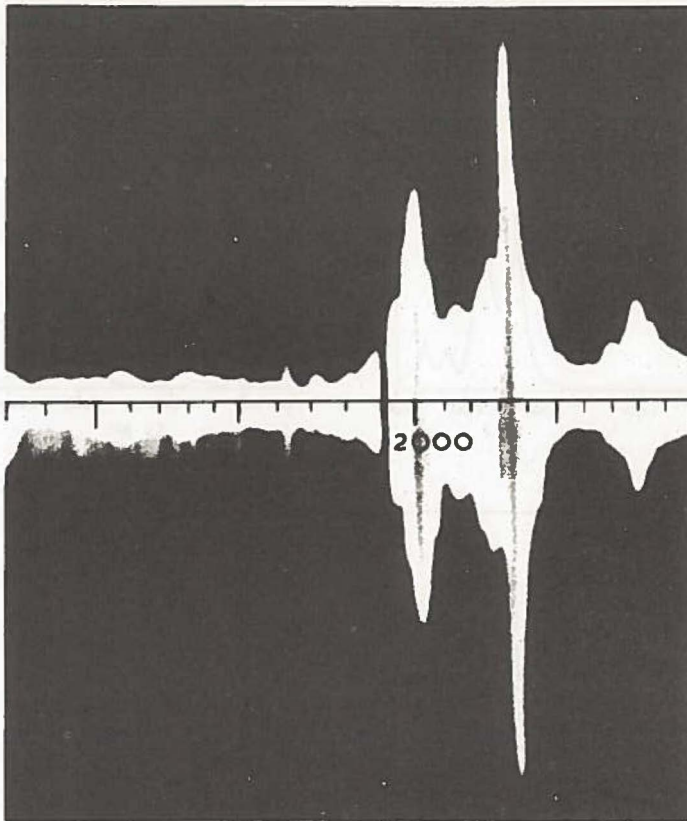


fig. 15. Opname van het scherm van de electronenstraalbuis voor de klinker I (↓), Pit. Frequentieschaal later toegevoegd.

Hieruit volgt dus, dat de gecorrigeerde kromme gelijk is aan het product van de transmissiekromme en de frequentie, uitgedrukt in willekeurige eenheden: transmissiekromme (druk) = transmissiekromme (snelheid) $\cdot \omega$.

De nauwkeurigheid van de bepaling is volgens 4.2.2. gelijk ± 1 db. In totaal werden rond 180 opnamen van klinkers gemaakt.

De resultaten, transmissiekromme (snelheid) \times frequentie, zijn ook uitgezet in tabel 1.

In de verschillende kolommen wordt daar voor de betreffende klinker vermeld:

- a. de frequentie f van de formant
- b. de halfwaardebreedte Δf voor de energie
- c. de demping, uitgedrukt in db per sec., waarbij deze gelijk is aan $2.10. \log e. \pi \Delta f = 27,3 \Delta f$, in de onderstelling, die ook bij de volgende twee kolommen gemaakt wordt, dat de formant zich gedraagt als een eenvoudige resonantietrilling.

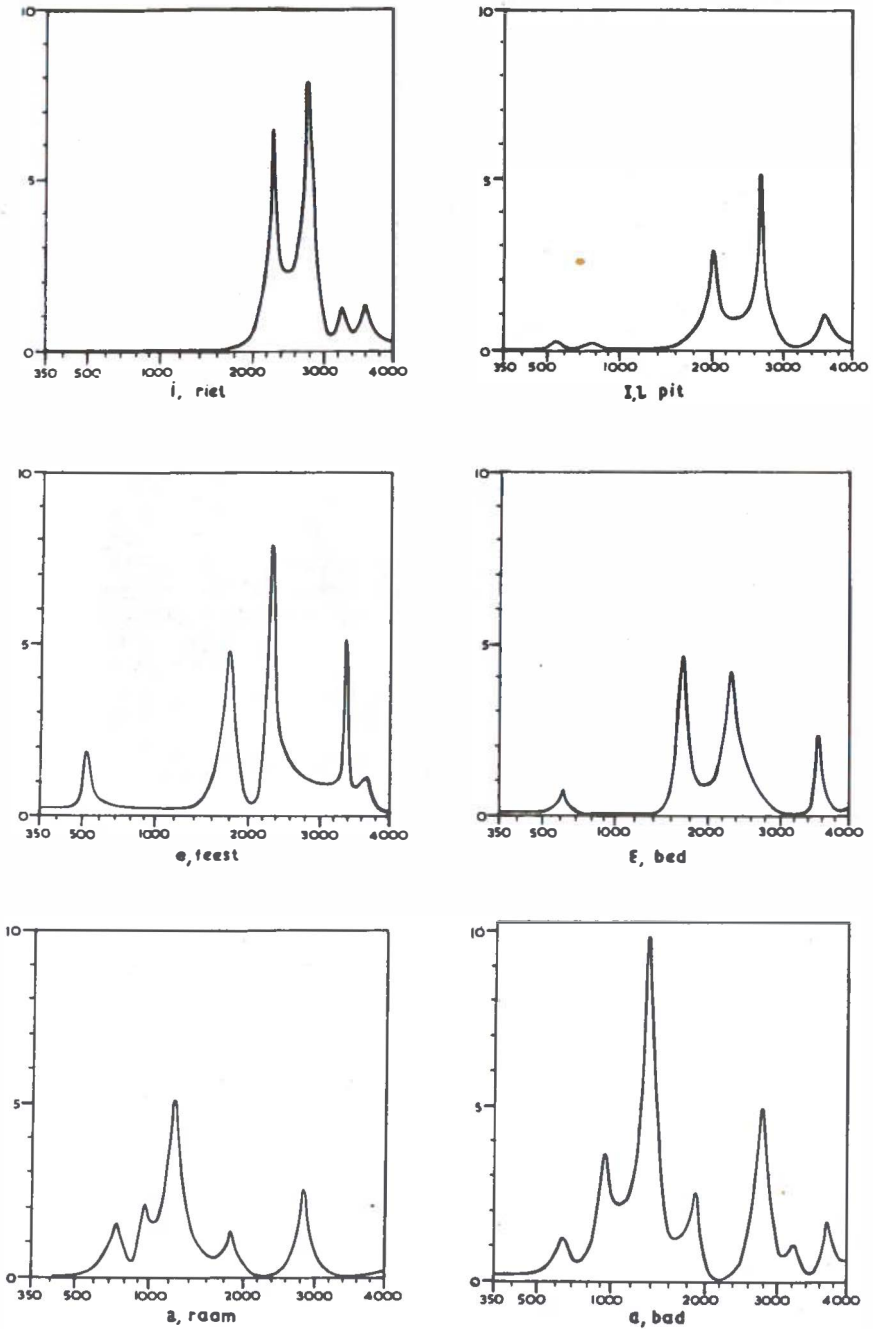
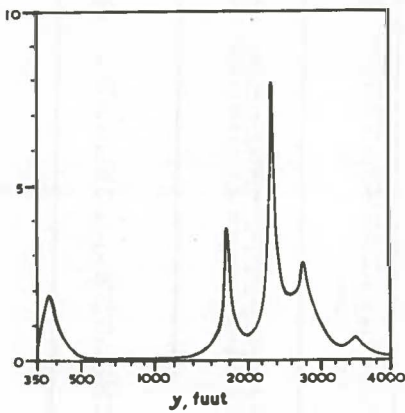
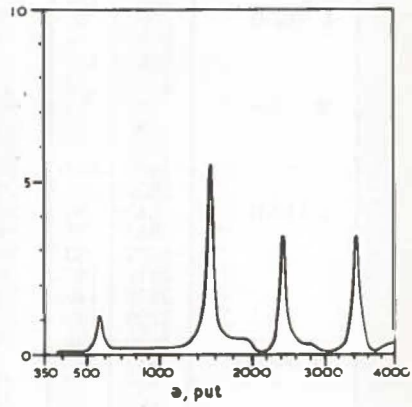
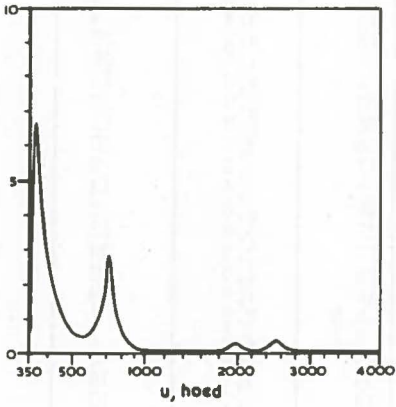
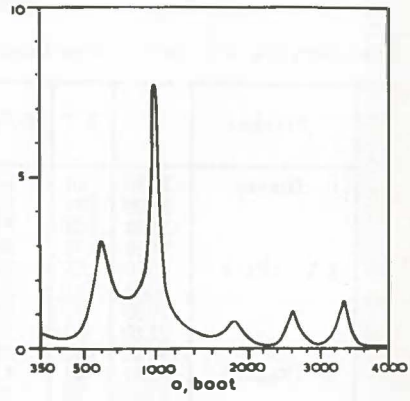
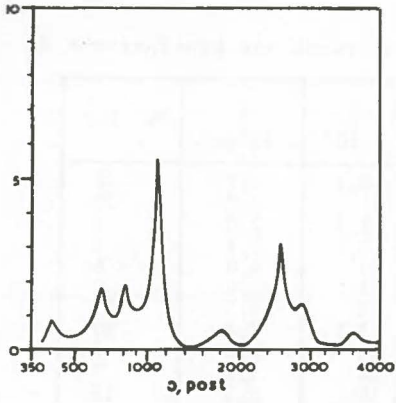


fig. 16. Transmissiekrommen, in willekeurige eenheden. Druk aan de uitgang gedeeld door snelheid aan de ingang.



Tabel I

Transmissie van het natuurlijke aanzetstuk van proefpersoon S.

Klinker		Δf	db/sec.	Λ · 10^2	T · 10^2 sec.	Rel. Int.
i (Riet)	2330	60	1650	8,1	3,7	18
	2820	100	2750	11	2,2	20
	3300	100	2750	9,5	2,2	4
I, l (Pit)	3660	105	2850	9,0	2,1	5
	570	55	1500	30	4,0	- 6
	800	85	2300	33	2,6	- 9
	2050	90	2450	14	2,5	15
	2740	50	1350	5,7	4,4	20
	3640	130	3550	11	1,7	6
e (Feest)	520	40	1100	24	5,5	7
	1780	90	2450	18	2,5	15
	2270	65	1800	9,0	3,4	20
	3330	40	1100	3,8	5,5	16
	3650	150	4100	13	1,5	3
ε (Bed)	600	35	950	18	6,3	4
	1720	70	1900	13	3,2	20
	2280	130	3550	18	1,7	19
	3520	50	1350	4,5	4,4	14
a (Raam)	740	75	2050	32	3,0	9
	950	80	2200	26	2,8	12
	1230	95	2600	24	2,3	20
	1860	100	2750	17	2,2	9
	2820	85	2300	9,5	2,6	14
	640	80	2200	39	2,8	2
q (Bad)	940	75	2050	25	3,0	11
	1400	90	2450	20	2,5	20
	1910	145	3950	24	1,5	8
	2810	140	3800	16	1,6	14
	3220	100	2750	9,8	2,2	1
	3680	95	2600	8,1	2,3	5
	410	25	700	19	8,8	3
	650	70	1900	34	3,2	10
	800	60	1650	24	3,7	10
o (Post)	1100	55	1500	14	4,0	20
	1820	120	3300	21	1,8	0
	2560	85	2300	10	2,6	15
	2900					7
	3600	150	4100	13	1,5	- 1
	600	105	2850	55	2,1	12
	1000	55	1500	17	4,0	20
	1830	120	3300	21	1,8	0
u (Hoed)	2600	100	2750	12	2,2	3
	3300	90	2450	8,6	2,5	5
	365	25	700	22	8,8	20
	720	45	1250	20	4,9	12
	2000	120	3300	19	1,8	- 8
ø (Put)	2550	90	2450	11	2,5	- 5
	565	25	700	14	8,8	6
	1570	40	1100	8,0	5,5	20
	2410	50	1350	6,5	4,4	15
y (Fuut)	3410	55	1500	5,1	4,0	16
	380	40	1100	33	5,5	7
	1790	40	1100	7,0	5,5	13
	2330	50	1350	6,7	4,4	20
	2760	150	4100	17	1,5	11
	3450	125	3400	11	1,8	- 2

d. het natuurlijke logarithmische decrement Λ , $\Lambda = \pi \cdot \Delta f / f$

e. de tijd T waarin de energie afneemt met 60 db, wanneer de bekrachtiging gestaakt wordt, $T = 6,91/\Delta f = 6,91/\pi \Delta f$.

f. de relatieve sterkte van de formanten van eenzelfde klinker, uitgedrukt in hun energie en in willekeurige eenheden, waarbij de sterkste op + 20 db gesteld wordt.

Deze kolommen hebben mede tot doel om een vergelijking met de resultaten van anderen, die in verschillende eenheden gepubliceerd zijn, mogelijk te maken.

De transmissie van deze klinkers is, voor wat de sterkte van de krachtigste formant betreft, ongeveer gelijk aan die van de koperen buizen van 34 en 42,5 cm lengte, behalve voor de a, e, ϵ , en α , waar de energie ongeveer 3 db groter is en voor de u, waar de energie ongeveer 5 db kleiner is.

Uit tabel 1 is af te lezen, dat de halfwaardebreedte Δf van de formanten over het algemeen groter is dan 50 Hz. Er zijn echter ook enige formanten met Δf gelijk 50 Hz of kleiner, tot enkele met 25 Hz toe. Bij een zoektijd van 15 sec. voor het traject van 150 Hz tot 4500 Hz is de bijbehorende Δf volgens (2a) gelijk 54 Hz en bij 25 sec. 42 Hz. Voorwaarde (2a) is blijkbaar aan de ruime kant, zie ook 4.1.2. over de insteltijd van een ideaal filter, want bij een zoeksnelheid die te groot is kan de gemeten halfwaardebreedte nooit kleiner zijn dan de werkelijke waarde.

Bij een eerste serie proeven werd tijdens het doormeten van de transmissiekromme ook een Röntgenfoto gemaakt, om de instelling van het aanzetstuk op deze wijze vast te leggen *). Dit gebeurde tevens, door afdrukken van boven- en ondergebit **).

Helaas was de acoustiek van de kamer niet op een dergelijke proef berekend, vooral door het op zeer geringe afstand passerende verkeer. Men kan echter vertrouwen, dat de vastgelegde instelling (voor de i, e, a, α , o, u, ϵ en de y) weinig zal afwijken van die, waarbij de transmissiekrommen (druk) van fig. 16 zijn opgenomen.

4.5.3. Bespreking van de resultaten

Er werden geen constante formanten gevonden, die aan speciale gedeelten van het aanzetstuk zouden toegeschreven kunnen worden. Dit is ook op theoretische gronden niet te verwachten, de „constante formanten” die Sovijärvi (1938) bij het onderzoek van de gefluisterde Finse klinkers meende op te merken, hebben nog een vrij groot toegestaan frequentie-gebied en zij zijn relatief zo klein, dat zij o.i. geen merkbare invloed kunnen hebben.

*) Hiervoor zeg ik Prof. Dr. S. Keyser hartelijk dank.

***) Hiervoor zeg ik Prof. Ir. J.N. Tekenbroek hartelijk dank.

Waarom sommige klinkers, b.v. de ɔ zoveel kleine nevenformanten hebben is ons niet duidelijk geworden.

De halfwaardebreedten variëren van 25 tot 150 Hz, met een gemiddelde van 85 Hz. In het algemeen worden de kleine halfwaardebreedten bij de lage formanten gevonden en de grote bij de hoge formanten. De dempingen lopen dus van 700 tot 4100 db/sec., met een gemiddelde van 2300 db/sec. Het logaritmisch decrement varieert van 0,038 tot 0,55 en de tijd voor het met 60 db afnemen van 0,015 tot 0,088 sec., met een gemiddelde van 0,026 sec.

De frequenties van de formanten komen goed overeen met de waarden, die daarvoor in de literatuur voor de overeenkomstige klinkers worden opgegeven.

Met de halfwaardebreedten en de dempingen is dit niet steeds het geval. STEWART (1922) vindt b.v. met zijn spreekmachine als gemiddelden voor de halfwaardebreedten zowel grotere als kleinere waarden, namelijk 430 tot 6900 db/sec. Zoals nog zal blijken zijn deze waarden niet waarschijnlijk. VON BÉKÉSY (1937) mat aan een model waarden, die binnen onze grenzen liggen en hij constateerde, dat de demping door de wand van deze modellen gering was. De veel te grote demping van de modellen van COTTON (1934) weet hij aan de poreuze structuur van de wanden. W. TRENDELENBURG (1936^a) bepaalde de frequentie en de demping van de formanten op verschillende manieren, door de mondholte, die op een bepaalde klinker was afgestemd, in trilling te brengen en deze te laten uitsterven. Hij vond logaritmische decrementen van 0,1 tot 0,4, dus binnen onze grenzen. VON TARNÓCZY (1943^a) bepaalde de eigenfrequentie, het logaritmisch decrement en de uitstëfftijd van de belangrijkste Hongaarse klinkers en vond voor het logaritmisch decrement waarden van 0,28 tot 1,4 dus belangrijk groter dan onze waarden. Wij schrijven dit toe aan de door hem gevolgde methode van het laten zingen volgens de trappen van een toonladder. Bij proeven met modellen vond VON TARNÓCZY (1943^b) waarden, die gemiddeld een factor 2 kleiner waren. PAGET (1932) en CRANDALL (1927) bepaalden slechts de frequenties van de eerste twee formanten. THIENHAUS (1934) en BARCZINSKI en THIENHAUS (1935) maten de frequenties van de vier belangrijkste formanten, maar zij geven geen waarden voor de demping op. STEINBERG (1934) bepaalde volgens een globale methode ook de demping en vond 1000 tot 4000 db/sec., in overeenstemming met onze waarden. De nauwkeurigste metingen zijn gedaan door LEWIS (1936) en LEWIS en TUTHILL (1940) voor enkele klinkers. LEWIS vond waarden van 35 tot 110 Hz, de kleinste zijn echter onnauwkeurig. LEWIS en TUTHILL vonden later voor enkele van dezelfde klinkers waarden voor de demping van 1100 tot 5500 db/sec., dus halfwaardebreedten van 40 tot 200 Hz, wat gemiddeld iets groter is dan onze waarden. TOKIZANE (1951)

onderzocht de 5 Japanse hoofdklinkers, zowel stemhebbend als gefluisterd, en voor twee klinkers geeft hij de demping op. Het logaritmisch decrement liep van 0,22 tot 0,39.

De waarden voor de demping, zoals deze in de literatuur worden opgegeven op grond van metingen over de totale modulatie, zijn steeds groter dan de onze. (400 Hz zoals MEIJER-EPPLER opgeeft, 1949 blz. 82 is wel het maximum.) De reden hiervan is eenvoudig in te zien. Bij de normale stemvorming zijn er namelijk verschillende oorzaken, die er voor zorgen, dat het aanzetstuk niet zo scherp op de formanten is afgestemd als dit bij onze proefpersoon het geval kon zijn.

In de eerste plaats is er de voortdurend veranderende instelling van het aanzetstuk. Bij de methode van LEWIS, die dicht opeenvolgende perioden uit een frequentie-vibrato onderzocht, is hierop nog de minste kans, vandaar, dat deze de kleinste halfwaardebreedten vermeldt.

In de tweede plaats gaat de stemspleet voortdurend open en dicht, zodat het aanzetstuk niet constant kan zijn en dit heeft een verbredende werking op de formanten.

In de derde plaats is de frequentie van de grondtoon nooit geheel constant en dit heeft tot gevolg, dat de hogere harmonischen op dezelfde wijze als onze zoektoon de hogere formanten aftasten. Dit zal echter pas dan moeilijkheden opleveren, wanneer de grondtoon te snel verandert. Bij een frequentievibrato van 6 per sec. en met een diepte (amplitudo) van niet meer dan 1 Hz verieert de 20^e harmonische bv. met 240 Hz per sec. en dit is nog juist toelaatbaar, wanneer de analysemethode er althans op ingericht is.

In de vierde plaats zouden de wanden van het aanzetstuk bij de normale stemvorming slapper kunnen zijn. Wij menen dat dit niet het geval is, omdat de proefpersoon steeds geheel ontspannen was. Aan de te meten halfwaardebreedten is overigens een onderste limiet gesteld, zie 4.6.

De resultaten van onze proeven worden overzichtelijker, wanneer wij deze uitzetten op de wijze zoals dit bij de Visible Speech methoden gebruikelijk is, zie fig. 17. Men ziet, dat er een behoorlijke overgang is tussen de klinkers, die in de volgorde van de klinkervierhoek genoteerd zijn. De intensiteit is weergegeven door verschillende zwartingen, namelijk van 20 tot 15 db, van 15 tot 10 db, van 10 tot 5 db, van 5 tot 0 db en voor ≤ 0 db. Deze figuur kan bv. vergeleken worden met fig. 1 van het interessante artikel van DUNN (1950), zie ook 4.6.3.

DUNN komt in dit artikel onder meer tot de conclusie, dat de sterkteverhouding van de opeenvolgende formanten, gemeten aan de intensiteiten in een druk-kromme (eigenlijk van de basislijn) en

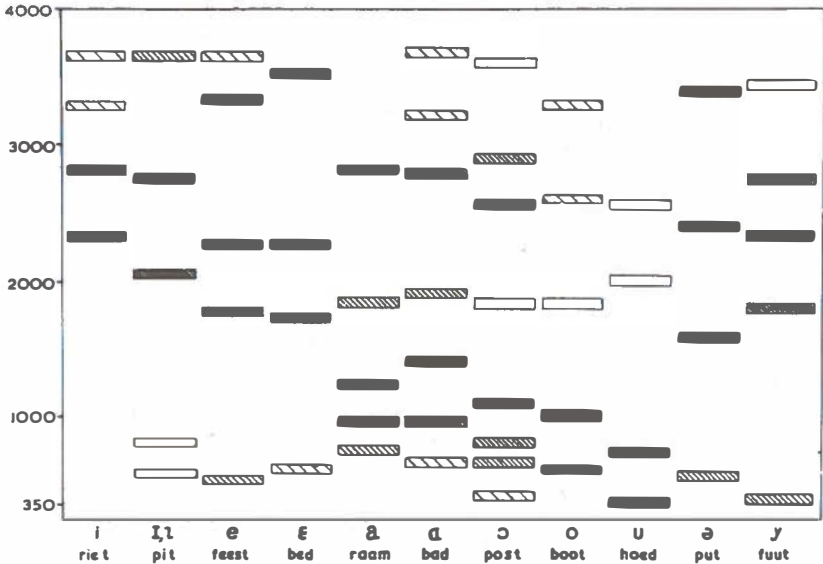


fig. 17. Transmissie in decibels.
Zwartingen in vijf trappen, 20 - 15, 15 - 10, 10 - 5,
5 - 0 en \leq 0 db.

gecorrigeerd voor de spectrale verdeling bij de stemspleet, zodanig moet zijn, dat elke formant verkregen wordt uit de voorgaande door een verzwakking van 20 db per decade (of 6 db per octaaf) toe te passen. Elke formant is dus zwakker dan zijn voorganger.

Hiervan blijkt niets bij onze krommen, integendeel. Ook in het werk van anderen, dat wij met het oog hierop nazagen, blijkt dit niet als regel te gelden en daarbij betrof het de totale modulatie, waarin het spectrum van de stemspleet nog verwerkt is, dat bij de hoge frequenties zeker een belangrijke afname zal geven. Zo niet bij LEWIS, ook niet bij TARNÓCZY, evenmin bij BARCZINSKI en THIENHAUS of TOKIZANE, integendeel. Ook niet bij opnamen van de werkgroep voor de Visible Speech, bv. KOPP en GREEN (1946) o van obey en m van me, waarbij rekening gehouden is met de extra versterking van de hogere frequenties, of POTTER c.s. in hun boek Visible Speech bv. i van eve, blz. 40, m van me, blz. 47, u van soon, blz. 182 en n van woman, blz. 208.

Wij menen, dat de reden van deze afwijking gelegen is in een onjuiste afleiding en interpretatie van de formule voor de basislijn, waardoor de theoretische conclusie zijn geldigheid verliest.

Met het oog op de demping hebben wij ook opnamen gemaakt van

de a en de e, waarbij deze de ene keer op de normale wijze werden ingesteld en de andere keer met de mond zo wijd mogelijk open. De verschillen zijn niet opvallend, mede door het feit, dat ook bij „dezelfde” instelling van de mond er toch steeds verschillen zijn. Dit was ook de oorzaak, dat wij niet konden uitmaken, wat de bijdrage van de transmissiekromme is aan het verschil tussen naburige klinkers, zoals o (boot) en o (oor) of ɔ (post) en ɔ (slot).

4.6. Berekeningen over de transmissie van modellen. Localisatie van de demping

4.6.0. Doel van de berekeningen

Om de karakteristieke eigenschappen van de transmissie beter te kunnen begrijpen en overzien was het nodig om berekeningen uit te voeren over de transmissie van modellen.

Deze kunnen vanzelfsprekend geen kwantitatieve resultaten opleveren over de transmissie van het natuurlijke aanzetstuk, maar het zal toch blijken, dat het mogelijk is om de orde van grootte van de verschillende impedanties te bepalen, waardoor belangrijke conclusies getrokken kunnen worden over de stemvorming.

Deze berekeningen werden uitgevoerd met behulp van de formules voor elektrische transmissielijnen, welke methode voor het eerst door DUNN is toegepast.

De berekeningen hebben in de eerste plaats betrekking op een cilindrische buis met een harde wand, 4.6.2., welk geval ook experimenteel bekeken werd en in de tweede plaats op een model van het aanzetstuk voor een bepaalde klinker, 4.6.3.

4.6.1. Oorzaak van de demping

De trillingen van de lucht in het aanzetstuk worden door een viertal oorzaken gedempt.

In de eerste plaats door het meetrillen van de wanden, waarvoor energie nodig is in verband met de visceuze weerstand, in de tweede plaats door de straling van de mond in de ruimte, in de derde plaats door vernauwingen in het aanzetstuk, b.v. tussen de tong en het gehemelte, maar wij hebben afgeleid dat dit pas een rol gaat spelen wanneer de diameter van de vernauwing kleiner dan 3 mm wordt en in de vierde plaats door demping in de lucht zelf, maar deze is zeer gering, namelijk maximaal ongeveer 2,1 db per m bij 4000 Hz (MASON, blz. 119). Het is volgens KNUDSEN (1946) wat afhankelijk van de vochtigheidstoestand.

In de literatuur wordt de sterke demping van de formanten

steeds aan de slappe wanden toegeschreven. Reeds HELMHOLTZ nam op grond hiervan aan, dat de terugwerking van het aanzetstuk op de stemplooiën te verwaarlozen is en in de laatste tijd legt vooral HUSSON (1950) nadruk op de belangrijkheid van het slap zijn der wanden.

De stralingseigenschappen van de mond bracht men wél in rekening voor wat het algemene verloop van de transmissie betreft, maar niet voor de demping.

De demping van de formanten is ook van belang voor het schatten van de inwendige weerstand van de geluidsbron, zie 4.7.2.

Naar aanleiding van de gemeten kleine halfwaardebreedten stelden wij ons daarom de vraag, of het mogelijk is om een onderste limiet aan te geven voor de demping.

Dit bleek door middel van berekeningen mogelijk te zijn en het resultaat was, dat de demping door het slap zijn van de wanden inderdaad verreweg de belangrijkste factor is zolang het lage frequenties betreft, maar dat de stralingsdemping bij de hogere formanten de belangrijkste is. Dit komt door de toename van de stralingsdemping met ω^2 bij toenemende frequentie en door de afname met ongeveer $\omega^{-2,5}$ van de wanddemping.

4.6.2. *Cylindrische buis met harde wand*

De transmissie van een cilindrische buis, in het geval dat de buis aan het ene einde bedreven wordt door een vlakke zuiger, kan berekend worden, door gebruik te maken van formules, die afgeleid zijn voor de transmissie van elektrische signalen langs een lijn met gedistribueerde elementen, b.v. langs een coaxiale kabel (MASON, blz. 60 e.v. en 111).

Het blijkt namelijk, dat de voortplanting van vlakke geluidsgolven in een buis met constante doorsnede (en waarvan de vorm eventueel langzaam verandert) beschreven kan worden met analoge formules. Dat slechts vlakke golven toegelaten worden is geen ernstige beperking, want men kan afleiden (MASON, blz. 109) dat beneden een zekere frequentie slechts vlakke golven zich praktisch ongedempt kunnen voortplanten in een buis met een harde wand en een constante doorsnede. Andere golfbewegingen worden sterk gedempt, zolang de golflengte groot is in vergelijking met de dwarsafmetingen van de buis, zodat na enige afstand uit een mengsel alleen de vlakke golven overblijven.

De transmissie valt te berekenen, door het vervangingsschema van fig. 18 te gebruiken, waarbij de impedanties betrokken worden op de volumesnelheid.

Een stuk ter lengte l van een transmissielijn, die per lengte eenheid een capaciteit C , zelfinductie L , weerstand R en lekweerstand G^{-1} heeft, kan namelijk onder meer vervangen worden door een T netwerk, waarbij

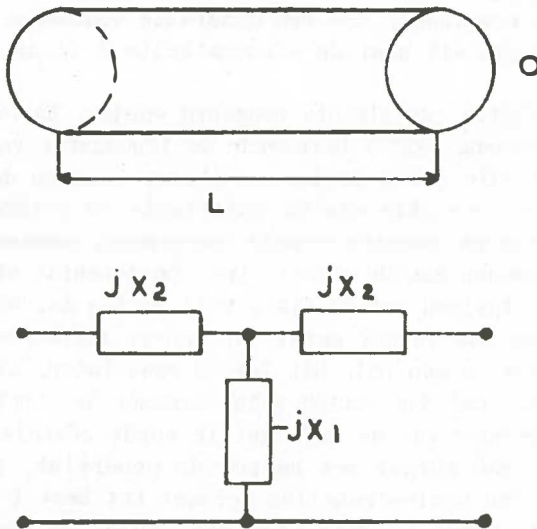


fig. 18. Cylindrische buis met vervangingschema

$$Z_1 = Z_0 \operatorname{csch} \Theta l, \quad Z_2 = Z_0 \operatorname{tgh} \Theta l/2, \quad (15)$$

waarin $Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$ en $\Theta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$

Z_1 staat dan op de plaats van $-jX_1$ en Z_2 op die van jX_2 .

In het acoustische geval is $C = 0/\rho c^2$ ($C = -\frac{dV}{d\eta}$ en uit de vergelijking voor de adiabatische toestandsveranderingen en de formule van LAPLACE voor de voortplantingsnelheid van het geluid volgt dan, $C = 0/\rho c^2$) en L is $\rho/0$ (de massa is $\rho 0$).

In het geval, dat de demping door de lucht in de buis en door de wanden verwaarloosd kan worden, is de karakteristieke impedantie Z_0 dan gelijk $\rho c/0$ (ρc is de impedantie per oppervlakte eenheid voor een vlakke golf in de vrije ruimte) en de voortplantingsconstante Θ is dan gelijk $j\omega/c$. Dit levert

$$X_1 = \frac{\rho c}{0} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\omega l}{c}} \quad \text{en} \quad X_2 = \frac{\rho c}{0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} \quad (15a)$$

waarbij l de lengte van de buis voorstelt. In dit T netwerk, wat hier het eenvoudigste is, stelt voor de lage frequenties X_1 een condensator en X_2 een zelfinductie voor.

Neem aan, dat de buis aan een kant wordt afgesloten door een zuiger, die aangesloten is op een generator met een oneindig grote inwendige weerstand, die een constante volumesnelheid I_0 aflevert en vragen wij naar de stroomsterkte I in de afsluitimpedantie.

Deze impedantie kan slechts benaderd worden. RAYLEIGH (zie ook MORSE en CRANDALL 1927^b) berekende de impedantie van een vlakke ronde zuiger, die gevat is in een flens, waarvan de afmetingen groot zijn ten opzichte van de golflengte en leidde af, dat de impedantie van de opening weinig verandert, wanneer deze zich vrij kan aanpassen aan de ruimte. Ook constateerde hij dat de karakteristieke invloed van de flens vrij gering is. MORSE berekende de straling ook in het geval van andere vormen van de flens, b.v. een zuiger in een bol. Dit levert resultaten, die weinig afwijken. De fout zal dus gering zijn, wanneer de stralingsimpedantie Z_s van de mond van de buis gelijk wordt gesteld aan die van een vlakke ronde zuiger met hetzelfde oppervlak, gevat in een grote flens. Een serieschakeling voldoet het best (zie ook BAUER 1944) en deze wordt volgens CRANDALL (1926) en MORSE geleverd door:

$$Z_s = R_s + j X_s = \rho c \frac{\omega^2}{2\pi c^2} + \rho c \cdot j \cdot \frac{8 \omega}{3\pi^2 r c} \quad (16)$$

De impedantie X_2 aan de kant van de zuiger kan, wegens de grote inwendige weerstand, verwaarloosd worden.

De impedantie Z_i van de parallelschakeling van $-j X_1$ en $j X_2$ en $R_s + j X_s$ is dan de belangrijke grootheid voor het berekenen van de uitgangsstroom I .

$$Z_i = \frac{-j X_1 \cdot [j(X_2 + X_s) + R_s]}{-j X_1 + j X_2 + j X_s + R_s} = X_1 \cdot \frac{X_2 + X_s - j R_s}{R_s + j(X_2 + X_s - X_1)} \quad (17)$$

Stel $X_a = X_2 + X_s - X_1$, dan geeft dit na enig rekenwerk

$$Z_i = X_1^2 \cdot \frac{R_s}{R_s^2 + X_a^2} - j X_1 \cdot \frac{R_s^2 + X_a(X_a + X_1)}{R_s^2 + X_a^2} = p(\omega) + jq(\omega) \quad (18)$$

Wanneer de weerstandsterm R_s verwaarloosd mag worden is de afstemming bereikt voor $X_a=0$. Nu is R_s voor de gangbare frequenties klein, $R_s \ll \rho c$ en $|X_1|$ is bij de afstemming ongeveer gelijk ρc , zodat bij de afstemming X_a en X_1 verschillend teken hebben en X_a ongeveer nul is, $|X_a| \ll R_s$ en

$$Z_{i, \text{Resonantie}} \approx X_1^2 \cdot \frac{1}{R_s} \quad (19)$$

In het geval, dat $l = 34,5 \text{ cm}$, $c = 3.45 \cdot 10^4 \text{ cm sec}^{-1}$ en $0 = \pi \cdot 0,7^2 \text{ cm}^2 = 1,57 \text{ cm}^2$, is $R_s = \rho c \cdot 5.27 \cdot 10^{-9} \text{ f}^2 \text{ dyne sec. cm}^{-5}$ en $X_s = \rho c \cdot 7.03 \cdot 10^{-5} \text{ f dyne sec cm}^{-5}$.

Berekening leert dan, dat de resonantiefrequenties iets verschoven zijn ten opzichte van de waarden $(2n + 1) \cdot 250 \text{ Hz}$ met $n = 0.1.2.3. \dots$ bij verwaarloosbare stralingsimpedantie. Echter slechts weinig, namelijk van $-2,8\%$ bij 250 Hz tot -2% bij 3750 Hz . De procentuele verstemming blijkt evenredig met de straal te zijn. De boventonen zijn dus geen zuivere harmonischen van de grondtoon, een bekend resultaat bij aangeblazen orgelpijpen!

Bij de resonanties is $X_1 \approx \frac{\rho c}{0} \cdot (-1)^n$, dus afwisselend het karakter van capaciteit en zelfinductie, juist omgekeerd als X_2 en X_1 verandert daar weinig (sinus bij 90° , 270° enz.) en $X_2 \approx \frac{\rho c}{0} \cdot (-1)^n$, maar X_2 verandert snel (tangens bij 45° , 135° enz.).

De stroom I door de stralingsimpedantie kan nu berekend worden door toepassing van vergelijking (24):

$$\frac{1}{2} I_o^2 \cdot p(\omega) = \frac{1}{2} I^2 R_s; I = I_o \cdot \frac{X_1}{\sqrt{R_x^2 + X_a^2}} \quad (20)$$

Hieruit is de versterkingsfactor te berekenen. In tabel 2 is dit uitgezet voor de formanten van de buis, waarbij afgezien is van de verstemming van de resonanties. Dan is $I_{Res} = I_o \cdot X_1 \cdot R_s^{-1}$. Door de betreffende waarden in te vullen blijkt, dat de versterkingsfactor omgekeerd evenredig is met ω^2 en met 0 .

De halfwaardebreedte Δf voor de energie kan eveneens berekend worden. De grenzen worden namelijk bepaald door $|X_a| = R_s$, en $X_a = X_2 + X_s - X_1$. In de omgeving van de resonanties verandert X_1 weinig en X_s is nog klein, zie tabel 2. De fout zal dus klein zijn, wanneer wij voor de veranderingen in deze omgeving alleen X_2 beschouwen. Voor de grondtoon geldt dan

$$\rho c \cdot \frac{1}{0} \cdot \frac{\frac{1}{2} \Delta f}{250} \approx R_s \quad (21)$$

Uit de berekening volgt, dat Δf evenredig is met ω^2 en met 0 , dus juist andersom als de versterkingsfactor. Dit betekent, dat, gesommeerd over het hele gebied van de formant, elke formant evenveel energie krijgt. Bij de hoogste frequenties is X_2 niet meer geheel te verwaarlozen zoals uit tabel 2 volgt. Hiervoor is gecorrigeerd.

Naarmate de doorsnede 0 groter wordt, gaat de zelfinductieterm van de straling belangrijker worden. De mechanische impedantie van de zuiger (kracht gedeeld door snelheid) tengevolge van de aangesloten kolom lucht is bij de resonanties onafhankelijk van de doorsnede van de buis en dus van het oppervlak van de zuiger.

Tabel 2

Transmissie, berekend en gemeten, van een cilindrische buis met harde wand

Frequentie (niet gecorr.)	.250 Hz	$X_s \cdot (\rho c)^{-1}$	$R_a \cdot (\rho c)^{-1}$.10 ²	$Z_{Res.}$ (ρc) ⁻¹	Versterking	Δf berekend	Gemeten	
							Δf	Ampl.
250	1	0,0176	0,0329	1230	3040	0,26		
750	3	0,053	0,296	137	340	2,1		100
1250	5	0,088	0,83	49	120	6	15	80
1750	7	0,123	1,61	25	62	11	25	80
2250	9	0,158	2,66	15	37	17	35	90
2750	11	0,193	3,98	10	25	24	40	90
3250	13	0,229	5,6	7	18	32	40	80
3750	15	0,264	7,4	5,5	13,5	41	40	50
evenredig met		ω $0^{-\frac{1}{2}}$	ω^2	ω^{-2} 0^{-2}	ω^{-2} 0^{-1}	ω^2 0 tot $0^{\frac{1}{2}} < k < 1$		

Tussen de resonantiefrequenties bereikt de transmissie voor $f = 2 m \cdot 250$, $m = 1, 2, 3$, — — — een minimum. De stralingsimpedantie van de mond wordt dan zonder meer naar de zuiger getransformeerd. De versterkingsfactor is dan 1, zodat de basislijn van de transmissie horizontaal is.

In tabel 2 is tevens opgenomen de gemeten waarde van Δf , bij bekrachtiging van een koperen buis van 34,5 lengte, binnendiameter van 14 mm en wanddikte 1 mm met de keelluidspreker. Ook de relatieve sterkten van de resonanties in de druk-kromme zijn uitgezet. Een afname is er vrijwel niet. Hierbij moet een factor ω in rekening gebracht worden, omdat de drukken en niet de stroomsterkten gemeten zijn. Dan blijft echter nog een niet geconstateerde afname met een factor ω over. Er valt nog op te merken, dat de zoeksnelheid bij 750 Hz te groot was, de krommen bezibten daardoor een gespleten top.

Wanneer in aanmerking genomen wordt, dat de nauwkeurigheid van de bepaling sterk afneemt bij halfwaardebreedten kleiner dan omstreeks 30 Hz en dat de stralingsimpedantie slechts een benadering is, dan mag de overeenstemming tussen de berekende en de gemeten Δf waarden goed heten.

Het is bovendien niet waarschijnlijk, dat met behulp van de keelluidspreker kleinere halfwaardebreedten gemeten kunnen worden. De mechanische impedantie van het luidsprekersysteem, bij bekrachtiging met de automatische volumeregeling, is namelijk ongeveer 300 ρc , zie 4.2.2., en gedeeld door O^2 , om met $Z_{R\epsilon s}$ vergelijkbare grootheden te krijgen, betekent dit, dat de inwendige impedantie rond 100 ρc bedraagt. Bij een acoustische belasting van deze orde van grootte zal de halfwaardebreedte niet goed gemeten worden. De halfwaardebreedte van het uitgaande signaal wordt groter en de piekwaarde wordt evenredig kleiner. Dit zien wij als de oorzaak van de afwijking tussen de gemeten en de berekende waarden voor de halfwaardebreedten van de resonanties van de koperen buis.

Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden:

1. De inwendige weerstand van de generator is, afgezien van de fasen, $\approx 100\rho c \cdot O^2$.
2. Bij frequenties boven 2000 Hz zal een halfwaardebreedte van minder dan 30 Hz slechts bij zeer kleine mondopening voorkomen.

De tweede conclusie hebben wij getoetst door berekeningen over een model voor een klinker.

4.6.3. Model voor een klinker

De theorie van de elektrische transmissielijnen is voor het eerst door DUNN op de holten van het aanzetstuk toegepast. Onder

verwaarlozing van iedere demping. Röntgenopnamen van RUSSELL waren daarbij de leidraad en met behulp van een trial and error methode kwam DUNN voor enkele klinkers tot een model, dat uit zo weinig mogelijk cilindrische gedeelten bestaat en waarbij deze delen corresponderen met de verschillende holten. Deze correspondentie is redelijk, wat vertrouwen geeft in de methode. Bij de berekening wordt dan afgezien van overgangseffecten tussen de segmenten, die bij het acoustisch systeem een bijzonder karakter zouden hebben. De impedantie van de mond wordt voorgesteld door die van een even grote ronde zuiger in een flens, onder verwaarlozing van het gereflecteerde geluid, waarbij de weerstandsterm verwaarloosd wordt (evenals alle andere weerstanden) omdat deze klein is in vergelijking met de zelfinductieterm.

Berekeningen van deze aard voeren tot de frequentie van de formanten en er volgen een aantal algemene conclusies uit, die ook op andere wijze, moeizaam, bereikt waren, namelijk:

1. De niet-gekoppelde frequenties van de afzonderlijke holten liggen tussen de eerste en de tweede formant.
2. De eerste twee formanten vallen nooit samen in een stationnaire klank.
3. Wanneer de tong het aanzetstuk in twee ongeveer gelijke holten verdeelt, u, o, ɔ, a, kan niet aangegeven worden hoe de formanten van elk van de holten afhangen.
4. De frequenties van de formanten zijn vrijwel omgekeerd evenredig met de lengten van de segmenten, mits deze op dezelfde wijze veranderen.
5. De frequenties van de formanten zijn practisch onafhankelijk van de doorsneden van de segmenten, mits deze op dezelfde wijze veranderen.
en tevens
6. De frequentie van de formanten is recht evenredig met de voortplantingssnelheid van het geluid.
7. De derde formant kan gewoonlijk beschreven worden als de eerste boventoon van de langste holte. Daarom kunnen de holten niet door blok-elementen voorgesteld worden.

Conclusie 4 is belangrijk met het oog op de formanten van de kinderstem. Het is op grond van deze voorstelling ook mogelijk om het verschuiven van de formanten, bij de overgang van de klinkers in elkaar, te begrijpen.

De relatieve belangrijkheid van de verschillende oorzaken van de demping kan slechts beoordeeld worden door berekeningen over een model.

Wij kozen daarvoor het model van DUNN voor de i (eat), waarvoor deze formanten bij 325, 2300 en 2770 Hz opgeeft, omdat dit

tevens de gelegenheid geeft om zijn conclusie over het verloop van de basislijn te toetsen, zie fig. 19.

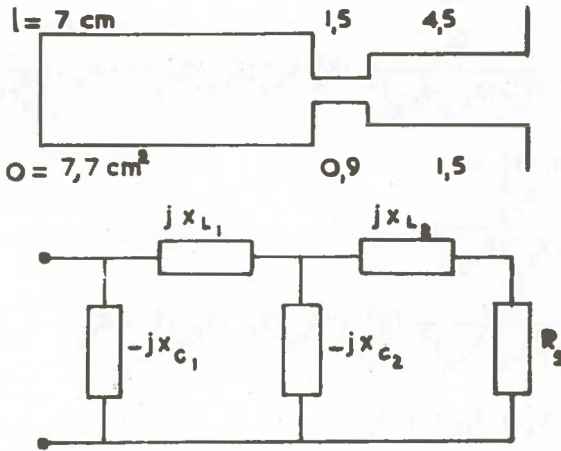


fig. 19. Model voor de klinker i (eat, DUNN 1950), met vervangingschema

Het vervangingschema van deze fig. geldt in het geval, dat de inwendige weerstand van de generator oneindig groot is. Slechts de demping door de straling R_s wordt in de berekening meegenomen. De elementen zijn dan:

$$X_{C_1} = \rho c \cdot \frac{1}{7,7} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\omega \cdot 7}{c}}, \quad X_{C_2} = \rho c \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\omega \cdot 4,5}{c}}$$

$$X_{L_1} = \rho c \cdot \frac{1}{7,7} \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot 7}{2c} + 2\rho c \frac{1}{0,9} \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot 1,5}{2c} + \rho \cdot c \frac{1}{1,5} \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot 4,5}{2c} \quad (22)$$

$$X_{L_2} = \rho c \cdot \frac{1}{1,5} \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot 4,5}{2c} + \rho \cdot c \frac{8 \omega}{3\pi^2 r c}$$

$$R_s = \rho c \cdot \frac{\omega^2}{2\pi c^2}$$

waarbij de zeer kleine capacatieve term van de vernauwing verwaarloosd is.

De impedantie van $j X_{L_1}$ plus de parallelschakeling van $-j X_{C_2}$, $j X_{L_2}$ en R_s is dan:

$$\begin{aligned}
 Z_2 &= j X_{L_1} + \frac{-j X_{C_2} (R_s + j X_{L_2})}{R_s + j(X_{L_2} - X_{C_2})} \\
 &= j X_{L_1} - j \frac{X_{C_2}}{R_s^2 + (X_{L_2} - X_{C_2})^2} \{R_s^2 + X_{L_2} (X_{L_2} - X_{C_2})\} + R_s \cdot \frac{X_{C_2}^2}{R_s^2 + (X_{L_2} - X_{C_2})^2}
 \end{aligned} \quad (23)$$

In (23) korten wij af:

$$\begin{aligned}
 R_a &= R_s \cdot \frac{X_{C_2}^2}{R_s^2 + (X_{L_2} - X_{C_2})^2} \\
 X_a &= X_{L_1} - \frac{X_{C_2}}{R_s^2 + (X_{L_2} - X_{C_2})^2} \{R_s^2 + X_{L_2} (X_{L_2} - X_{C_2})\} - X_{C_1}
 \end{aligned} \quad (24)$$

dan is $Z_2 = j(X_a + X_{C_1}) + R_a$.

De impedantie tussen de ingangsklemmen, Z_i , is dan:

$$\begin{aligned}
 Z_i &= \frac{-jX_{C_1} \{R_a + j(X_a + X_{C_1})\}}{R_a + jX_a} \\
 Z_i &= X_{C_1}^2 \cdot \frac{R_a}{R_a^2 + X_a^2} - jX_{C_1} \cdot \frac{R_a^2 + X_a (X_a + X_{C_1})}{R_a^2 + X_a^2} = p(\omega) + j q(\omega) \quad (25)
 \end{aligned}$$

Dank zij de afkortingen (24) is dit een vergelijking zoals (18) voor de cilindrische buis. De uitwerking is echter aanzienlijk omslachtiger, omdat nu de omgeving van elke formant numeriek moet worden doorgerekend. Bij alle formanten blijkt R_a langzaam te veranderen en X_a snel. X_{C_1} is nu niet praktisch constant. De frequentie van de formanten wordt weer bepaald door $|X_a| \ll R_a$, $X_a \approx 0$. De formantwaarden zijn vrijwel gelijk gebleven, 327 Hz, 2301 Hz en 2760 Hz. Bij de afstemming is de ingangsimpedantie, analoog aan (19):

$$Z_{Res} \approx X_{C_1}^2 \cdot \frac{1}{R_a} \quad (26)$$

en de versterking volgt, analoog aan (20), uit

$$\frac{1}{2} I_o^2 \cdot X_{C_1}^2 \cdot \frac{R_a}{R_a^2 + X_a^2} = \frac{1}{2} I^2 \cdot R_s; \quad I = I_o \cdot X_{C_1} \cdot \sqrt{\frac{R_a}{R_s} \cdot \frac{1}{R_a^2 + X_a^2}} \quad (27)$$

en bij de formant is

$$I_{Res} \approx I_o \cdot X_{C_1} \cdot \frac{I}{\sqrt{R_s \cdot R_a}}$$

Tabel 3

Transmissie van een model (DUNN, 1950) voor de klinker i (meat)

	100 Hz	327 Hz	1300 Hz	2301 Hz	2550 Hz	2760 Hz	4000 Hz
$R_s \cdot (\rho c)^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,324 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$3,88 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$
$R_a \cdot (\rho c)^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,808 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$5,63 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$
$R_a : R_s$	1	1,09	6,6	4,0	2,1	1,45	0,97
$X_{C1} \cdot (\rho c)^{-1}$	1,04	0,3296	0,13	0,477	- 3,6	- 0,426	- 0,14
$Z_{Res} \cdot (\rho c)^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	192	$2,4 \cdot 10^{-4}$	1,98	$7 \cdot 10^{-2}$	3,6	$4,1 \cdot 10^{-3}$
$I_{Res} : I_o$		600		9,1		9,7	
$I : I_o$	1,1		0,17		1,4		0,22
Δf		0,58		41		29	
$\Delta f \cdot (I : I_o)$		350		370		280	

De halfwaardebreedten volgen weer uit de grenzen, met $|X_a| = R_a$.

De resultaten van de berekeningen zijn voor enkele belangrijke frequenties in tabel 3 uitgezet ($c = 3,53 \cdot 10^4 \text{ cm sec}^{-1}$) en tevens in fig. 20, die de transmissie geeft in db, d.w.z. voor I^2 . Met een microfoon registreert men op enige afstand het product $I \cdot \omega$.

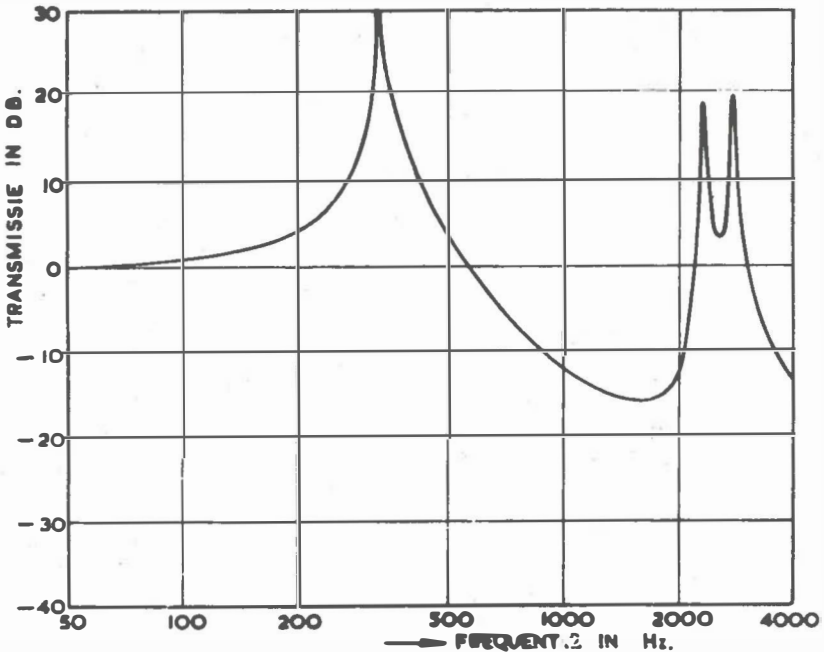


fig. 20. Transmissie in db van het model voor de i. Uitsluitend stralingsdemping.

Fig. 20 is te vergelijken met fig. 13 uit het artikel van DUNN, waarbij nog opgemerkt moet worden, dat bij berekening met uitsluitend de drie gevonden formanten de transmissie tussen de formanten 2300 en 2770 Hz - 6,5 db bedraagt, terwijl DUNN + 3 db noteert.

Uit deze berekeningen over het model met uitsluitend stralingsdemping, en met een generator die een oneindig grote inwendige weerstand bezit, volgen enkele belangrijke conclusies:

1. Vanaf 2000 Hz komt de berekende halfwaardebreedte overeen met de kleinste waarden, die door LEWIS aan de totale modulatie en door ons regelrecht aan de transmissiekromme gemeten zijn. Bij deze frequenties is de stralingsdemping dus overwegend.
2. Het is mogelijk, dat de halfwaardebreedte bij een hogere formant kleiner is dan bij een lagere. Dit opmerkelijke effect con-

stateerden wij ook bij de gemeten transmissiekrommen, zie tabel 1 en fig. 16, en LEWIS geeft ook een enkel voorbeeld.

3. Het product van halfwaardebreedte en versterkingsfactor $I:I_0$ is globaal genomen constant.

Dit voert tot de hypothese, dat de versterkingsfactor omgekeerd evenredig is met de halfwaardebreedte, zodat formanten met dezelfde halfwaardebreedte ook vrijwel dezelfde versterking zullen ontvangen.

Bij de hoogste frequenties (> 4000 Hz) zal dit, door het karakter van de stralingsimpedantie, niet meer opgaan. Met een microfoon wordt het product van versterkingsfactor en frequentie gemeten. De transmissiekromme voor de druk zal dus bij hoge frequenties kunnen oplopen (tot een maximum).

4. De ingangsimpedantie van het aanzetstuk is bij de afstemming op de formanten zeer groot, enkele malen ρc , terwijl tussen de formanten een lage waarde bereikt wordt.

5. De algemene overwegingen van DUNN over het verloop van de basislijn zijn onjuist en de conclusies zijn misleidend!

Tot slot merken wij nog op, dat de berekening van de eigenschappen van het aanzetstuk met behulp van de theorie van transmissielijnen o.i. de verklaring kan geven voor het feit, dat de modellen van PAGET gevoelig waren voor de frequentie van de grontoon.

4.6.4. Damping door vernauwingen en door de wand

De damping van de lage formanten van de cilindrische buis en van het model voor de i is veel kleiner dan die van de lage formanten van een klinker. Bij de lage frequenties zullen dus nog andere dempingen dan de straling van de mond een rol spelen.

Vernauwingen zullen slechts bij hoge uitzondering verantwoordelijk kunnen zijn. Wij berekenden dit voor het model van de i .

De damping in een nauw verbindingsstuk kan in rekening gebracht worden, door het vervangingsschema van fig. 18 volledig op te schrijven:

$$\begin{aligned} Z_1 &= -jX_1 = Z_0 \cdot \operatorname{csch} \Theta l, \\ Z_2 &= jX_2 = Z_0 \cdot \operatorname{tgh} \Theta \cdot l/2 \end{aligned} \quad (28)$$

waarbij Z_0 de karakteristieke impedantie van de buis is en Θ de voortplantingsconstante. Bij verwaarloosbare damping is $Z_0 = \rho c / 0$ en $\Theta = j\omega / c$.

Bij een nauwe buis veranderen deze grootheden iets, zie MASON, blz. 118.

$$\Theta \approx \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu^1 \omega}{2\rho c^2}} + j \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu^1}{2\omega\rho}}\right)$$

$$Z_o \approx Z_o^* \left[\left(1 + \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu^1}{2\omega\rho}}\right) - j \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu^1}{2\omega\rho}} \right] \quad (29)$$

De vergelijking voor de voortplantingsconstante Θ bevat nu ook een reële term, die de verzwakking in de lengterichting van de buis aangeeft. Deze is op zichzelf voor ons doel van geen belang en wordt daarom verwaarloosd. Z_o^* is de karakteristieke impedantie bij demping gelijk nul. μ^1 is de gecorrigeerde coëfficiënt voor de viscositeit en r is de straal van de buis.

De tweede term in X_{L_1} , zie (22) verandert daardoor, namelijk:

$$2 Z_o \cdot \operatorname{tgh} \cdot \frac{\Theta \cdot 1,5}{2} = 2 Z_o^* \left[\left(1 + \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu^1}{2\omega\rho}}\right) - j \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu^1}{2\omega\rho}} \right] \times$$

$$\times \left[j \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot 1,5}{2c} + \frac{1,5}{2r} \cdot \sqrt{\frac{\mu^1 \omega}{2\rho c^2}} \right] \quad (30)$$

Voor 300 Hz, $c = 3,53 \cdot 10^4$ cm/sec, $r = 0,544$ cm, $\mu^1 = 3,94 \cdot 10^{-4}$ gr/cm. sec en $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3}$ gr/cm³ wordt dit:

$$2 Z_o \cdot \operatorname{tgh} \cdot \frac{\Theta \cdot 1,5}{2} = 2 \frac{\rho c}{0} j \operatorname{tg} \frac{\omega \cdot 1,5}{2c} + \rho c \cdot 0,0029.$$

Daaruit volgt, dat de berekening van 4.6.3. in de omgeving van deze frequentie wel beïnvloed wordt, R_g moet met de waarde $\rho c \cdot 0,0030$ vermeerderd worden, waardoor het bedrag ongeveer $4 \times$ zo groot wordt, maar dit is niet voldoende voor het bereiken van de grote halfwaardebreedte Δf .

Wanneer de vernauwing een Δf van omstreeks 50 Hz zal moeten opleveren, dan moet de correctieterm $40 \times$ zo groot worden. Dan moet de straal van de vernauwing 1,6 mm worden, want het effect neemt toe met r^{-3} . De diameter van het nauwe stuk moet dan ongeveer $10 \times$ zo klein worden. Dat is misschien mogelijk, maar het zou een nieuw model vergen, want de afstemming verandert sterk door de toename van X_{L_1} .

De conclusie hieruit kan zijn, dat een nauw verbindingsstuk, met een diameter van 3 mm en een lengte van 1,5 cm in staat is om bij de lage frequenties halfwaardebreedten van omstreekt 50 Hz te laten ontstaan en verder, dat het effect van de vernauwing zeer sterk afhangt van de diameter, namelijk van r^{-3} . Bij hogere frequenties neemt de invloed van de vernauwing toe, echter slechts met $\omega^{+1/2}$, omdat de stilstaande laag langs de wand dan dunner wordt.

Wanneer een bepaalde formant in hoofdzaak door een vernauwing gedempt wordt, dan moet men verwachten, dat de halfwaardebreedte zeer sterk zal wisselen in de tijd, omdat de kleine diameter van de vernauwing niet goed gehandhaafd zal worden *). De lengte van de vernauwing heeft in verhouding weinig invloed.

De invloed van het meetrillen van de wand berekenden wij ook aan de hand van het model; in een eerste benadering.

Dit moet langs een omweg gebeuren. De formules voor de elektrische transmissielijn sluiten namelijk niet het geval in, dat in dwarse richting behalve een capaciteit ook een parallelgeschakelde keten met een zelfinductie en een weerstand bestaat, de formules zijn dan niet meer hanteerbaar.

Wij beschouwen het geval, dat de eerste holte van het model slappe wanden heeft, die onder invloed van de drukverschillen meegeven en door hun structuur dan energie verbruiken. Alleen de eerste holte, want hierin zijn de drukken bij de formanten groot, naar de mond toe nemen de drukken steeds meer af. Dit stellen wij voor, door een lekweerstand R over de lengte eenheid, of een geleiding G per lengte eenheid.

Volgens MASON, blz. 61 is dan voor kleine geleiding

$$\Theta = \frac{1}{2} G Z_0^* + j \frac{\omega}{c}, \quad Z_0 = Z_0^* \left[1 + j \frac{G}{2\omega C} \right] \quad (31)$$

waarbij C de capaciteit per lengte eenheid is, $C^{-1} = Z_0^* c$. De elementen van het T netwerk voor het eerste segment zijn dan:

$$Z_0 \cdot \frac{1}{\sinh \Theta l} \quad \text{en} \quad Z_0 \cdot \tanh \frac{\Theta l}{2}$$

$$\tanh \frac{\Theta l}{2} = \frac{\tanh \frac{1}{4} G Z_0^* l + j \tanh \frac{\omega l}{2c}}{1 + j \tanh \frac{1}{4} G Z_0^* l \cdot \tanh \frac{\omega l}{2c}}$$

voor $\frac{1}{4} G Z_0^* l \ll 1$ is dan

$$\tanh \frac{\Theta l}{2} = j \tanh \frac{\omega l}{2c} + \frac{1}{4} G Z_0^* l (1 + \tanh^2 \frac{\omega l}{2c}) + \dots \quad (32)$$

$$\sinh \Theta l = \sinh \left(\frac{1}{2} G Z_0^* l + j \frac{\omega l}{c} \right)$$

$$= \sinh \frac{1}{2} G Z_0^* l \cdot \cosh j \cdot \frac{\omega l}{c} + \cosh \frac{1}{2} G Z_0^* l \cdot \sinh j \cdot \frac{\omega l}{c}$$

$$\sinh \Theta l = \frac{1}{2} G Z_0^* l \cos \frac{\omega l}{c} + \cosh \frac{1}{2} G Z_0^* l \cdot j \sin \frac{\omega l}{c} \quad (33)$$

$$\text{en} \quad \cosh \frac{1}{2} G Z_0^* l \approx 1.$$

*) Op deze wijze zou men met de tong een vibrato kunnen laten ontstaan.

Dit levert:

$$\begin{aligned} Z_o \cdot \operatorname{tgh} \frac{\Theta}{2} &= Z_o \cdot \left[1 + j \frac{G}{2\omega C} \right] \cdot \left[j \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} + \frac{1}{4} G Z_o \cdot 1 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\omega l}{2c} \right) \right] \\ &= Z_o \cdot \left[j \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} + j \cdot \frac{1}{4} \cdot G Z_o \cdot 1 \cdot \frac{G}{2\omega C} \cdot \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\omega l}{2c} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} G Z_o \cdot 1 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\omega l}{2c} \right) - \frac{G}{2\omega C} \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} \right] \end{aligned}$$

en in eerste benadering, $\frac{\omega l}{2c} \ll 1$ voor de lage formant:

$$Z_o \operatorname{tgh} \frac{\Theta}{2} = Z_o \cdot \left[j \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} + \frac{1,03}{4} G Z_o \cdot 1 - \frac{G}{2\omega C} \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} \right] \quad (34)$$

$$\begin{aligned} Z_o \cdot \frac{1}{\sinh \Theta} &= Z_o \cdot \left(1 + j \frac{G}{2\omega C} \right) \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} G Z_o \cdot 1 + j \sin \frac{\omega l}{c}} \\ &= Z_o \cdot \left[\frac{1}{j \sin \frac{\omega l}{c}} + \frac{G}{2\omega C \sin \frac{\omega l}{c}} + \frac{\frac{1}{2} G Z_o \cdot 1}{\sin^2 \frac{\omega l}{c}} + \dots \right] \quad (35) \end{aligned}$$

De aequivalente impedanties veranderen hierdoor dus iets. Z_o komt nu voor $-j X_{C_1}$ van fig. 19 te staan: $-j X_{C_1} + R_1$ met

$$R_1 = Z_o \cdot \left[\frac{G}{2\omega C \sin \frac{\omega l}{c}} + \frac{\frac{1}{2} G \cdot Z_o \cdot 1}{\sin^2 \frac{\omega l}{c}} \right] \quad (36)$$

en de eerste term van X_{L_1} uit (22) moet vermeerderd worden met R_2 , met

$$R_2 = Z_o \cdot \left[\frac{1,03}{4} G Z_o \cdot 1 - \frac{G}{2\omega C} \operatorname{tg} \frac{\omega l}{2c} \right] \quad (37)$$

R_2 is bij de lage frequenties een orde kleiner dan R_1 .

De impedantie Z_i tussen de ingangsklemmen, zie (25), wordt dan:

$$Z_i = \frac{(-j X_{C_1} + R_1) [R_a + R_2 + j(X_a + X_{C_1})]}{R_a + R_2 + R_1 + j X_a}$$

Stel $R_a^* = R_a + R_1 + R_2$, dan blijkt na enig rekenwerk, dat in de omgeving van de resonantie

$$Z_i = X_{C_1}^2 \cdot \frac{R_a^*}{R_a^{*2} + X_a^2} + j q (\omega) \quad (25a)$$

waarbij q in de omgeving van de formant zeer klein is,

$$q(\omega) = - \frac{X_a [R_1(R_a + R_2) + X_{C1}(X_a + X_{C1}) - R_1 R_a^*] - X_{C1} R_a R_a^*}{R_a^{*2} + X_a^2}$$

R_a^* heeft dus de rol van R_a in (25) overgenomen.

Wij verlangen nu, dat bij 327 Hz R_a^* van de orde van grootte van de weerstandsterm van de stralingsimpedantie bij 4000 Hz is, bij hogere frequenties mag R_a^* dan wel afnemen met $\omega^{-2,5}$, omdat daar de stralingsdemping opkomt. R_a is bij 327 Hz te verwaarlozen, dus

$$R_a^* = R_1 + R_2 \approx 8G \cdot Z_o^* \cdot l = \rho c \frac{\omega^2}{2\pi c^2} = 0,084 \rho c.$$

voor $\omega = 2\pi \cdot 4000$. Daaruit volgt:

$$G = \frac{0,084 \rho c \cdot 0^2}{8 \cdot (\rho c)^2 \cdot l} \approx \frac{1}{10 \rho c} \quad (38)$$

(Voor de koperen buis wordt op dezelfde wijze $\approx 1/80 \rho c$ gevonden).

Met behulp van dit gegeven is nu de demping van de keelwand af te schatten. Stel het oppervlak van de keelwand $A \text{ cm}^2$, de massa m_o per cm^2 , de weerstand van een elementje van 1 cm^2 R_k en de stijfheid S . Dan is bij een druk $P e^{j\omega t}$ in de keelholte het energieverlies per sec. volgens (38)

$$W = \frac{\frac{1}{2} P^2}{10 \rho c / l} \quad (39)$$

De eigenfrequentie van de wand van de keelholte zal zo laag zijn, dat de trilling door de massa gecontroleerd wordt. Dan is het energieverlies per sec., zie ook MORSE blz. 27, wanneer K de totale kracht op de keelwand voorstelt:

$$W = \frac{1}{2} \frac{R_k}{A} \cdot \left(\frac{K}{\omega \cdot A m_o} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{R_k}{A} \cdot \left(\frac{P \cdot A}{\omega A m_o} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{R_k}{A} \cdot \frac{P^2}{\omega^2 m_o^2} \quad (40)$$

Uit (39) en (40) volgt, dat:

$$R_k = \frac{1}{10 \rho c} \cdot A \omega^2 \cdot m_o^2 \approx 5 \cdot 10^6 m_o^2 \text{ dyne. sec.}$$

want $l = 7 \text{ cm}$ en $A = 7 \cdot 10 \text{ cm}^2$

voor $m_o = 1$, wat een redelijke schatting is, bedraagt R_k dus $5 \cdot 10^6 \text{ dyne. sec.}$ Uit (40) volgt verder, dat het energieverlies bij constante weerstand en toenemende frequentie afneemt met ω^2 , wat volgens het voorgaande geoorloofd is.

Uit bovenstaande berekening zijn enkele belangrijke conclusies te trekken:

1. De lage formanten zullen een halfwaardebreedte van omstreeks 50 Hz krijgen, wanneer de keelwand voor deze frequenties per lengte eenheid een visceuse weerstand heeft van $\approx 10^4 \rho c$ ($5 \cdot 10^6 : 10$ ($\approx 2 \pi r$ van het model). ρc) en een mechanische impedantie, door de trage massa, van $\approx 500 \rho c$.

2. Uit tabel 3 volgt, dat de ingangs-impedantie van het aanzetstuk voor de formanten enkele malen ρc bedraagt. Hieruit volgt, dat de keelwand slechts weinig zal meetrillen omdat deze een veel grotere impedantie heeft.

3. Bij de lage formanten neemt de keelwand de meeste energie op en deze energie zal afhangen van de effectieve massa van de keelwand, d.w.z. van de mate van ontspanning van deze wand, en van de effectieve visceuse weerstand, die bij ontspanning groter zal worden.

Wij menen verder, dat de visceuse weerstand zal afnemen bij toenemende frequentie en gronden dit op resultaten van metingen aan rubber, waarbij bleek dat quasi-statische deformaties waarden konden opleveren, die tot $10^5 \times$ groter waren dan die bij snelle veranderingen (gecit. door CRANDALL, 1927^b, blz. 111) en op de theorie van KING en LAWTON over de verschijnselen bij deformatie van elastomeren (o.a. rubber).

De keelwand trilt mee en levert de beste plaats voor het aanleggen van een wandmicrofoon omdat de acoustische impedantie bij de stemspleet het grootst is. Niet, omdat de wand daar dunner zou zijn (J. en K. DE BOER, 1940). De dikte verschilt niet veel van die van de andere wanden van het aanzetstuk. Bij de mond is de acoustische impedantie echter zo gering, dat de wanden alleen al door hun trage massa een zeer veel grotere impedantie opleveren en waar geen trilling is, wordt ook geen energie opgenomen. De wand van de keelholte is in het beginstuk ook behoorlijk stevig, wat de impedantie ervan verhoogt.

De resultaten van J. en K. DE BOER achten wij een bevestiging voor onze opvatting. Zij constateerden namelijk, dat het quotient van de snelheid van de trillende luchtdeeltjes vóór de mond van de keel (voor wat het gemiddelde betreft) voorgesteld kan worden als een constante keer ω^2 . Dit was opgenomen met behulp van een serie filters, die elk een halve octaaf doorlaten. De snelheid vóór de mond is op enige afstand, volgens (14a), evenredig met $I_0 \omega$. De halfwaardebreedten van alle formanten zijn ongeveer even groot, de acoustische impedantie bij de stemspleet zal dus voor alle formanten practisch even groot zijn. De drukken in de keelholten zijn dan uitsluitend met I_0 evenredig. De snelheid van de keelwand volgt uit te drukken, door de factor ω^{-1} in rekening te brengen. Te zamen geeft dit de factor ω^2 . Alleen de formanten werden hier beschouwd, maar deze bepalen de energieën.

4.7. Conclusies

4.7.1. Transmissiekromme. Amplitudomodulatie

De eigenschappen van het aanzetstuk, uitgedrukt in de transmissiekromme, werden onderzocht bij een proefpersoon met een opening in het strottenhoofd.

Het aanzetstuk werd bekrachtigd door een speciaal geconstrueerde keelluidspreker, die met een te verwaarlozen lek in het strottenhoofd aangebracht kon worden en daar de rol van de generator overnam.

De valse stemplooiën waren daarbij uitgeschakeld, maar dit is geen bezwaar, omdat de ruimte van MORGAGNI, ingesloten tussen de ware en de valse stemplooiën, beter tot de frequentie-modulator gerekend kan worden.

Aan het aanzetstuk werd een zoektoon toegevoerd, die maximaal met 300 Hz per sec. varieerde, wat volgens een ingesteld onderzoek voldoet aan de voorwaarde, dat de holtten tijd krijgen om in te slingeren.

De proeven hadden plaats in een echo-arme kamer, waarvan de eigenschappen op verschillende wijzen onderzocht werden en de eisen voor de onderzoekruimte werden vastgesteld.

De resultaten zijn in fig. 16 en tabel 1 gebundeld. Deze gelden voor één opname van de betreffende klinker, die representatief geacht kan worden voor deze klinker. Het geldt hier een „gemiddelde” opname en niet een op speciale eisen uitgezocht exemplaar. De opnamen hebben betrekking op het quotient van de druk op een vaste afstand van de mond, gedeeld door de aan het aanzetstuk toegevoerde volumesnelheid, als functie van de frequentie. Ze stellen dus de transmissiekromme vermenigvuldigd met de frequentie voor.

Uit tabel 1 blijkt, dat 1 de frequenties van de formanten overeenstemmen met de in de literatuur opgegeven waarden en met de eigen waarnemingen onder hoofdstuk VI. 2. de halfwaardebreedten liggen tussen 25 en 150 Hz, met een gemiddelde van 85 Hz, en deze gegevens worden ook uitgedrukt in de demping als db per sec., het logaritmisch decrement en de tijd waarin de energie met 60 db afneemt na het beëindigen van de bekrachtiging. Deze waarden zijn gemiddeld kleiner dan de waarden, die in de literatuur opgegeven worden. De redenen daarvoor worden besproken. 3. de halfwaardebreedten zijn in het algemeen het kleinst bij de lage frequenties, maar ook bij de hoge formanten kunnen kleine halfwaardebreedten voorkomen. 4. de voor de mond gemeten drukken nemen, behalve in het bijzonder voor de *u* (hoed), eerst toe met toenemende frequentie en rangnummer van de formant, tot een maximum, dat afhangt van een klinker, om daarna weer af te nemen.

In deze resultaten werd inzicht verkregen, door de transmissie van een cilindrische buis en van een model voor een klinker te onderzoeken.

Dit gebeurde, door de theorie over elektrische transmissielijnen toe te passen op de holten van het aanzetstuk. Dit is een methode, waarbij voor de holten geen blok-elementen worden ingevoerd, maar waarbij de overeenkomstige groottheden continu gedistribueerd zijn langs het traject. De opvatting dat „Aan de ruimte van het aanzetstuk als geheel een algemene eigen toon toekomt, waarin alzo het stemgeluid in de eerste plaats weerklinkt. Voorts heeft elk van de holten haar bijzondere eigen toon.” leidt namelijk tot onjuiste waarden voor de hoge formanten, omdat de afmetingen van de holten dan niet klein zijn in vergelijking met de golflengten.

Uit deze berekeningen volgt met grote waarschijnlijkheid, dat de demping van de hoge formanten (hoger dan omstreeks 2000 Hz) in hoofdzaak stralingsdemping is, terwijl de lage formanten in hoofdzaak door het meetrillen van de visceuse wanden van de keel gedempt worden. Deze demping neemt af met toenemende frequentie 1e omdat de impedantie van de keelwand dan toeneemt en 2e omdat de visceuse weerstand dan afneemt en de demping neemt eveneens af, wanneer de wanden door spanningen stijver worden, zodat de effectieve massa groter wordt, onder gelijktijdige afname van de visceuse weerstand. Demping door een nauw verbindingsstuk blijkt slechts bij de sterkste vernauwingen, diameter van ongeveer 3 mm, belangrijk te worden, terwijl deze evenredig is met r^{-3} . Daardoor is de demping zeer gevoelig voor kleine veranderingen van de diameter, zodat verwacht moet worden, dat de halfwaardebreedte van een formant, die in hoofdzaak door een vernauwing gedempt wordt, sterk wisselt. Vernauwings-demping is b.v. belangrijk bij de U (hoed), waar de diameter van de mond zeer klein is.

De intensiteit van de formant blijkt nauw samen te hangen met zijn halfwaardebreedte en is daar, globaal genomen, omgekeerd evenredig mee. De gemeten halfwaardebreedten van de formanten lopen weinig uitéén, door de verschillende oorzaken voor de demping, en daarom is globaal in te zien, dat de transmissie van de formanten niet sterk van hun frequentie of rangnummer afhangt. Wordt de transmissie betrokken op de druk, dan moet er, in verband met de stralingseigenschappen van de mond, eerst een toename evenredig met ω zijn, tot een maximum en daarna weer een afname.

De transmissie hangt ook af van de diameter van de mond. Bij de cilindrische buis met harde wand is dit voor de formanten gemakkelijk af te leiden. De stroomsterkte is omgekeerd evenredig met 0, evenals de druk op enige afstand bij lage frequenties, bij de hogere frequenties is de afhankelijkheid sterker. De halfwaardebreedte is daarentegen evenredig met 0.

Bij het model voor de klinker is het niet zo eenvoudig in te zien. De veranderingen zijn wel in dezelfde zin, maar de maximale stroomsterkte en de halfwaardebreedte zijn in eerste benadering onafhankelijk van de diameter. Bij de U (hoed) geldt dit niet meer. De impedantie van de opening tussen de lippen is dan zo groot, dat de impedantie van de wangen niet meer praktisch oneindig groot is.

De acoustische impedantie bij de stemplooiën is bij alle formanten naar schatting enkele malen ρc . De impedantie van de keelwand per cm lengte werd aan de hand van het model en langs een omweg geschat en blijkt voor de lage frequenties van de orde van 100 ρc te zijn en toe te nemen met toenemende frequentie en met contractie van de wanden. De visceuze weerstand per lengte eenheid is bij de lage frequenties van de orde van $10^4 \rho c$.

In de literatuur worden voor de halfwaardebreedten van de formanten verschillende waarden opgegeven en ook bij onze proeven bleek, dat de waarde niet constant is. Behalve triviale en toevallige oorzaken zijn er ook systematische oorzaken voor deze afwijkingen, door de methode van waarnemen en analyseren en door verandering van de instelling van het aanzetstuk. De formant kan b.v. onderzocht worden, door de harmonischen er langs te laten trekken, door de toonhoogte in trapjes te variëren, terwijl dan met de toonhoogte ook de instelling van het aanzetstuk wat verandert, want dit heeft hetzelfde effect als het vergroten van de zoeksnelheid van de zoektoon en de hogere harmonischen zullen de hoge formanten dan te snel aftasten, waardoor deze te zwak en met een te grote halfwaardebreedte worden waargenomen. Ook is het mogelijk, dat men een klinker van de spreekstem analyseert, waarbij het aanzetstuk, zoals PAGET het uitdrukte, voortdurend op jacht is naar formanten. Daardoor zal de zoeksnelheid te groot worden, zowel door de veranderende instelling als door de veranderende toonhoogte. Tevens is het mogelijk, dat de demping wat anders uitvalt door een iets andere instelling van de mond, van een sterke vernauwing of van de effectieve massa van de keelwand, door verstijving of verslapping. Door al deze oorzaken wordt een grotere halfwaardebreedte geregistreerd.

Zangtechnisch heeft dit ook betekenis. In verband met de koppeling, 4.7.2., maar ook in verband met de kwaliteit van de stem.

Behalve de subjectieve waardering bestaat er geen criterium voor de sonoriteit van een stem. Het is echter eenvoudig, om de mogelijke oorzaken aan te geven.

Een klinker wordt bepaald door de grondtoon en de wisselingen daarvan, (de dynamiek van de stem) door de frequenties van de formanten, door hun demping en door hun sterkteverhouding.

Het is niet te verwachten, dat de dynamiek de enige factor is,

hoewel deze wel zeer belangrijk is, zoals b.v. BARTHOMOLEW (1934) constateerde, die als eerste kenmerk van een mooie stem het vibrato noemt. (De zo sterk naar voren gebrachte 3^e formant heeft echter weinig betekenis.)

Verder blijft dan nog over de gedragen klinker. Het is dan mogelijk, dat de verhouding van de frequenties van de formanten enige betekenis heeft, b.v. een verhouding volgens zo eenvoudig mogelijke getallen.

Dat de verhouding van de frequenties zeker belangrijk is voor de waarneming door het oor, blijkt uit het feit, dat de formanten van de gemiddelde mannen-, vrouwen- en kinderstem door transpositie uit elkaar gevonden kunnen worden (PETERSON, 1951) en uit proeven over de transpositie van eenzelfde stem door ademing van een ander gas, zie hoofdstuk VI.

De dempingen zullen zonder bewuste regeling inter-individueel weinig verschillen en bovendien leert de ervaring met spreekmachines, dat deze van gering belang is. De demping kan veranderd worden, en groter maken is wellicht het beste, door gemiddeld met een grotere diameter van de mond en met een volkomen ontspannen en slappe keelwand te spreken. Wij menen, dat de grotere diameter van de mond samenhangt met de gevonden correlatie tussen de wel-luidendheid van de stem en de hoogte van het gehemelte (KASIER).

Een andere oorzaak kan gelegen zijn in de door WINCKEL (1952) geconstateerde beperking in het aantal hogere harmonischen. De sonore klank zou dan mede bewerkt worden door een „bewuste” armoede aan hogere harmonischen, die onderling allerminst harmonisch zijn. Deze beperking hangt in hoofdzaak af van de frequentiemodulatie, d.w.z. van de trillingswijze van de ware stemplooiën en van de afmetingen van de ruimte van MORGAGNI met de valse stemplooiën, maar kan ook veroorzaakt worden door voortdurende wisseling van de toonhoogte, waardoor de hogere harmonischen zowel door de phaserelaties als door de te grote zoeksnelheid onderdrukt worden, zie ook hoofdstuk VII.

4.7.2. *Inwendige weerstand. Koppeling*

Behalve de transmissie van het aanzetstuk is ook de inwendige weerstand van de generator van belang voor de totale modulatie in het uitgangssignaal. De redenen daarvoor zijn in hoofdstuk II uiteengezet.

De term inwendige weerstand mag echter geen aanleiding geven tot misverstand. Men is geneigd, om van een inwendige weerstand te veronderstellen, dat deze onafhankelijk is van de frequentie en dat het een passief element betreft, dat niet in staat is om de generator te beïnvloeden, anders dan in de geleverde stroomsterkte. Dit is bij de stemvorming geenszins het geval.

In hoofdstuk II werd uiteengezet, dat men bij het borstregister slechts formeel van inwendige weerstand kan spreken, door het karakter van de generator. De stemplooien worden namelijk periodiek uit elkaar gedreven en sluiten zich daarna weer, zodat de stemspleet een wisselende doorsnede heeft. In het falsetregister is dit anders, daar is de doorsnede practisch constant, maar het effect van de terugwerking van het aanzetstuk op de generator, de koppeling, is daar zeer gering en niet van een bijzonder karakter. Wij betoogden verder 2.4., dat de hogere harmonischen, wanneer deze een formant aantreffen, slechts een geringe invloed op de trillingswijze van de stemplooien kunnen hebben, dat daardoor hoogstens de scherpe kantjes van de luchtstoot afgehaald kunnen worden (het is een losse koppeling) terwijl tevens verwacht kan worden, dat de formeel in te voeren inwendige weerstand sterk zal toenemen met de frequentie, door het karakter van de trillingen in de nauwe stemspleet.

Bij het borstregister kan de koppeling onder bijzondere omstandigheden aanleiding geven tot het veranderen van de trillingswijze van de stemplooien, terwijl dan verschuivingen, toonsprongen en andere moeilijkheden optreden, zoals ze door WIEN voor eenvoudige systemen afgeleid en door VOGEL onderzocht waren aan orgelpijpen. Wij toonden aan, 2.4., dat dit slechts het geval is, wanneer een formant samentreft met de grondtoon of met een van de eerste boventonen en dat de oorzaak gelegen is in de grote acoustische impedantie van de ingang van het aanzetstuk bij de frequentie van de formant en tevens in het feit, dat door kleine veranderingen in de onderlinge afstemming de phasebetrekkingen sterk veranderen.

De inwendige weerstand kan gedefinieerd worden als de effectieve acoustische impedantie van de frequentiemodulator, bestaande uit de stemspleet en de ruimte daar vlak onder als het primaire orgaan en de daarboven gelegen ruimte van MORGAGNI met de valse stemplooien als het secundaire orgaan, dat naar onze mening als een filter kan werken, zie hoofdstuk VII.

De volumesnelheid aan de ingang van het aanzetstuk wordt dan gevonden uit de druk, die door de generator geleverd wordt, en de serieschakeling van de inwendige weerstand en van de acoustische impedantie bij het begin van het aanzetstuk.

Deze inwendige weerstand kan niet direct gemeten worden, maar wij menen, dat een schatting gemaakt kan worden door de nauwkeurigste waarden voor de halfwaardebreedte in de totale modulatie die in de literatuur worden opgegeven, die van LEWIS en TUTHILL, te vergelijken met de waarden, die bij onze proefpersoon gemeten werden en met de waarden, die berekend werden voor de cilindrische buis en het model voor een klinker, uitgaande van het feit, dat

de op te meten halfwaardebreedte afhangt van de verhouding van de impedantie van het aanzetstuk en de inwendige weerstand.

Het blijkt dan, dat de waarden van LEWIS weinig van de onze afwijken. De afwijkingen die er zijn, zullen voor een deel nog aan toevallige omstandigheden te wijten zijn. Bij de lage formanten meten wij iets kleinere waarden dan LEWIS en TUTHILL. Voor de overeenkomstige klinker resp. 25 en 45 Hz (Θ), of 25 en 40 Hz (υ). De relatieve nauwkeurigheid van deze waarden van LEWIS en TUTHILL is gering, VON TARNÓCZY vindt voor de overeenkomstige klinkers b.v. 50 tot 150 Hz, i.p.v. 45 tot 40 Hz.

Wij trekken hieruit de conclusie, dat de inwendige weerstand van de orde van de acoustische impedantie van de ingang van het aanzetstuk voor een formant is, d.w.z. enkele malen ρc , omdat de gemeten halfwaardebreedte ongeveer 2 keer te groot is door de eindigheid van de inwendige weerstand.

Bij de hogere formanten is geen systematisch verschil aanwijsbaar. Daaruit volgt, dat de inwendige weerstand bij de hoge frequenties minstens enkele tientallen ρc moet bedragen.

Het is mogelijk, om op meer directe wijze een schatting te maken over de acoustische impedantie van de stemspleet. Door namelijk de formule voor de impedantie van een nauwe spleet toe te passen, MASON blz. 116.

$$Z = \left[\frac{12 \mu}{d^3} + j \cdot \frac{6 \omega \rho}{5 d} \right] \cdot dx \quad (41)$$

waarbij Z de impedantie is van een stuk ter breedte van 1 cm, d de dikte en dx de lengte van de spleet is en μ de viscositeit van de lucht voorstelt.

Deze formule geldt in het tussengebied. Bij zeer nauwe spleten wordt de stroming laminair en is de weerstandsterm evenredig met d^{-4} (POISEUILLE), vlak na het openen (dan zelfs nog sterker, namelijk met wervelvorming) en vlak voor het weer sluiten van de stemspleet zal dit geval zich voordoen. Bij een spleet met een breedte van 1,5 cm, een dikte van 0,5 mm en een lengte van 3 mm levert dit bij 300 Hz:

$$Z \approx \frac{1}{5} \rho c (1 + j).$$

De zelfinductieterm is van dezelfde orde als de weerstandsterm. Hier moet de correctie voor de einden nog bijgeteld worden en bovendien is de spleet gedurende een deel van de tijd zeer veel nauwer, waarbij de weerstandsterm zeer sterk toeneemt. De beide schattingen komen dus goed met elkaar overeen en uit de laatste blijkt, dat de inwendige weerstand evenredig met ω toeneemt.

Uit de berekening volgt tevens, dat het open en dicht gaan van

de stemplooiën geen grote invloed heeft op de ingangsimpedantie van het aanzetstuk. Buiten de formanten is deze zelfs geheel te verwaarlozen.

Het is nu ook mogelijk om de gebeurtenissen in het strottenhoofd beter te overzien. De stroomsnelheden zijn volgens 1.3 : 20 tot 200 cm³/sec. De gemiddelde druk onder de stemspleet is dan eenvoudig te schatten. Deze zal van de orde van 200 tot 200 × ρc zijn, d.w.z. 0,8 tot 8 cm water. Dit zijn inderdaad drukken, zoals men ze heeft aangetoond bij patienten met een larynxfistel.

Ook de volumesnelheid van de grondtoon is te bepalen. Deze zal eveneens vrijwel 20 tot 200 cm³/sec. bedragen (maximaal 2 × zo groot, als de stoot zeer kortdurend is). De volumesnelheid van de hogere harmonischen neemt dan verder af met een negatieve macht van hun rangnummer, waarbij de exponent - 2 tot - 1 bedraagt, zie 4.7.3.

Op de gemiddelde druk zijn wisselende drukken gesuperponeerd. Deze zijn het grootst, wanneer een formant samentreft met een zo laag mogelijke harmonische. Bij de grondtoon worden deze drukken in de keelholte 20 tot 200 × enkele malen ρc en onder de stemspleet nog ongeveer 2 × zo groot. De gesuperponeerde druk is dan ongeveer 2 × zo groot als de gemiddelde druk en het is niet wonderlijk, dat de koppeling in dit geval tot moeilijkheden leidt. Wanneer de formant met een hogere harmonische samentreft, rangnummer n, dan is de druk in de keelholte n⁻¹ tot n⁻² kleiner.

De volumesnelheid van de keelluidspreker bedraagt, bij ingeschakelde automatische volumeregeling, volgens de gegevens van 4.2, 4.3, $\frac{1}{1,4} \cdot \frac{3,3}{5,5} \cdot 2\pi \cdot 320 \cdot 14 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{3} = 0,4$ cm³/sec. voor frequenties, die groter zijn dan de resonantiefrequentie. Dit is dus een factor 50 tot 500 kleiner dan die van de grondtoon bij de normale stemvorming, maar van dezelfde grootte of 10 × groter dan die van de 20^e harmonische.

De mechanische impedantie van de trillende stemplooiën kan eveneens geschat worden. Bij een lengte van 1,5 cm kan de effectieve massa per plooi op 0,1 gram gesteld worden (zie ook fig.2). Bij een frequentie van 300 Hz (in verband met de vorige schattingen) is de mechanische impedantie tengevolge van de traagheid $j\omega m = j \cdot 188 \approx j \cdot 4,5$ ρc, waarbij aangenomen wordt, dat de trilling van de plooiën practisch sinusvormig is, wat geoorloofd is, omdat de plooiën doorveren tegen elkaar. De impedantie door de stijfheid moet hiervan afgetrokken worden en de impedantie door de visceuze weerstand moet er bij opgeteld worden. Deze laatste moet echter klein zijn, omdat anders de plooiën te warm zouden worden tijdens het trillen.

(Bij een dissipatie van 0,1 Watt in elke stemplooi zou de visceuze weerstand in het borstregister ongeveer 10 ρc bedragen, en

0,1 Watt is een groot vermogen voor het effectief trillende gedeelte van de plooien).

Er zijn nog twee andere argumenten voor een geringe demping van de stemplooien. In de eerste plaats moet de demping kleiner zijn dan die van het aanzetstuk, omdat anders, zie 2.4.1, de stemplooien meegesleept zouden worden door het aanzetstuk i.p.v. omgekeerd. In de tweede plaats is volgens de gegevens van 1.3.5 het totale vermogen bij de stemspleet rond 0,1 Watt en dit wordt zeker niet uitsluitend door de stemplooien opgenomen.

De conclusie is daarom, dat de mechanische impedantie van de trillende stemplooien bij de frequentie van de zeer lage formanten van de orde van ρc is.

Moeilijkheden door de koppeling kunnen slechts dan ontstaan, wanneer de acoustische impedantie van het gekoppelde aanzetstuk groter of minstens van dezelfde orde van grootte is als de mechanische impedantie van de trillende stemplooien en als de inwendige weerstand van de generator. Volgens de berekeningen en schattingen kan hieraan voldaan zijn bij een zeer lage formant en in dit geval zal de grondtoon zeer sterk overwegen in het uitgaande mengsel en in het spectrum van de generator.

Bij de normale stemvorming, zie ook hoofdstuk II, bemerkt men echter niets van de koppeling. De laagste formant ligt altijd boven de 300 Hz en grondtonen van deze frequentie worden zelden met het borstregister gemaakt. Is dit wel het geval, dan kan de formant gemakkelijk iets uit de buurt van deze frequentie wegluchten, zonder dat de kleur van de klinker merkbaar verandert.

Bij een in de mond genomen lange buis staat het anders, dan liggen de lage formanten in het gebied van het borstregister en de afstemming is vrij star geworden. Bij de volgende (hogere) formant is de mechanische impedantie van de stemplooien belangrijk toegenomen en de inwendige weerstand is eveneens groter geworden. vandaar, dat de moeilijkheden dan veel geringer zijn.

De geringe invloed van de koppeling in het normale geval is vanzelfsprekend van zeer groot belang uit spreek- en zangtechnisch oogpunt.

4.7.3. Spectrum van de generator. Frequentiemodulatie

Nu door de voorgaande beschouwingen gebleken is, dat de inwendige weerstand van de generator slechts bij de zeer lage formanten enige invloed kan hebben op de halfwaardebreedte en op de sterkteverhouding van de harmonischen in het uitgaande mengsel, is het mogelijk om een schatting te maken over het spectrum van de generator, dat bepaald wordt door de aard van de stoten lucht door de stemspleet.

Dit is mogelijk, door de totale modulatie in het uitgaande

signaal, zoals die in de literatuur gepubliceerd is en ook zelf gemeten werd, hoofdstuk VI, te vergelijken met de transmissiekrommen van fig. 16. Volkomen vergelijkbaar zijn deze natuurlijk nooit, de individualiteit zal teloor gaan, evenals de nuancering van de klinkers, en het hangt er ook van af hoe gezongen werd, hard of zacht, maar het zal toch mogelijk zijn om een gemiddelde aan te geven. Dat het een gemiddelde is wordt mede veroorzaakt door de verschillende meetmethoden. Het aanzetstuk van onze proefpersoon kon continu afgetast worden door de zoektoon, maar bij het registreren van de totale modulatie werkt men òf met een constante grondtoon en dan is niet precies te zeggen hoe goed de formanten benaderd worden, òf met een veranderlijke grondtoon, eventueel met de normale spreekstem, maar dan is het aanzetstuk niet constant, de hogere harmonischen worden onderdrukt door de phaserelaties bij de stemspleet en door het te snel langs de formant zwiepen.

Wanneer de grondtoon b.v. in 1 sec. 10 Hz varieert, dan loopt de 20^e harmonische met een snelheid van 200 Hz per sec. langs de formant. Bij een halfwaardebreedte van 100 Hz wordt de topwaarde dan wel bereikt, maar het gemiddelde komt lager te liggen, namelijk ongeveer 3 db in de energie. Bij een grondtoon van 100 Hz en een vibrato van 6 per sec. met een amplitudo van 1 Hz, is het phaseverschil van de trilling van de 20^e harmonische bij elke volgende periode ongeveer 20°. Het is evenredig met de frequentie en met de amplitudo.

De toelaatbare snelheid van spreken wordt door deze beide oorzaken beperkt.

Bij een halfwaardebreedte van 100 Hz is de geoorloofde snelheid van de grondtoon volgens 4.1.2., vergelijking 2^a, namelijk 50 Hz/sec., wanneer het goed doorkomen van de 20^e harmonische het criterium is (neemt men genoeg met een lagere harmonische, dan neemt de toelaatbare snelheid toe. Deze is omgekeerd evenredig met het rangnummer). Het phaseverschil bij elke volgende periode is dan ongeveer 45°.

Ook de verandering van de instelling van het aanzetstuk bij constante grondtoon mag niet te snel gebeuren. De overeenkomstige hogere formanten van de *ä* en de *e* liggen b.v. 500 Hz uit elkaar. Bij een halfwaardebreedte van 100 Hz mag de overgang van de *ä* in de *e* (of omgekeerd), dan volgens (2^a) in hoogstens ½ sec. gebeuren.

In hoofdstuk II werd uiteengezet, waarom het spectrum van de generator afhangt van de sterkte van de gezongen klinker en dat het waarschijnlijk is, dat bij een groot luchtverbruik sterke wervelvorming vlak boven de stemspleet voorkomt.

FLETCHER (1929, blz. 50) heeft eens ad hoc voorgesteld, dat de

amplitudo van de harmonischen afneemt met hun rangnummer n , en wel met $n^{-1.5}$, zodat de energie afneemt met n^{-3} . Joos (1948) neemt aan, eveneens ad hoc, dat de generator gelijk gesteld kan worden met een generator van rechthoekige stoten, met een duur van 0,2 msec, onafhankelijk van de frequentie.

Wij menen, dat een schatting te maken is op grond van de gemeten transmissiekrommen en een overweging van algemeen theoretische aard.

Het viel ons namelijk op, dat het algemene verloop van de omhullende van de harmonischen in het frequentiespectrum van een klinker onafhankelijk is van de frequentie van de grondtoon, wanneer de klinkers tenminste op overeenkomstige wijze geproduceerd worden. De sterkteverhouding van de formanten blijft vrijwel dezelfde en dit is uit spreek- en zangtechnisch oogpunt een zeer belangrijke eigenschap.

Dit stelt echter een voorwaarde aan het spectrum van de bron, zoals wij konden bewijzen. Wanneer de transmissiekromme voorgesteld wordt door $A(\omega)$ en het amplitudospectrum van de bron door $f(n)$, dan volgt de omhullende, bij een frequentie ω_0 van de grondtoon, uit $f(n) \cdot A(n\omega_0)$. Bij een grondtoon $a\omega_0$ is de modulatie dan $f(n') \cdot A(n'a\omega_0)$. De waarneming leert, dat deze twee modulaties aan elkaar gelijk zijn op een „constante” factor b na. Voor $n'a = n$ levert dit: $f(n) \cdot A(n\omega_0) = b \cdot f(\frac{n}{a}) A(n\omega_0)$ of $f(n) = b \cdot f(\frac{n}{a})$. Hieraan kan slechts voldaan worden door een functie $f = n^{-x}$, waarbij x in principe nog elke waarde mag hebben, maar in een bepaald geval vastgelegd is door de constanten a en b .

De afname moet dus gebeuren met een macht van het rangnummer, d.w.z. is logaritmisch.

De waarde van x kan nu afgeleid worden, door de omhullende van de op harmonischen geanalyseerde modulatie te vergelijken met de door ons gemeten transmissiekrommen.

Dit levert bij de door BARCZINSKI en THIENHAUS gemeten Duitse klinkers een gemiddelde voor x van 1,4, bij de door TARNÓCZY onderzochte Hongaarse klinkers is x gemiddelde iets groter, TIFFIN (1938) kwam op grond van een ruwe methode, waarbij hij uitging van verkeerde praemissen bij de analyse van stroboscopische waarnemingen, tot een gemiddelde van 1,5; bij LEWIS is het gemiddelde 2 en bij STEINBERG, die het middendeel van gesproken klinkers onderzocht, eveneens 2, beide voor Amerikaanse klinkers. Het is mogelijk, dat dit verschil iets zegt over een eventueel landelijk verschil in uitspraak van de klinkers. Het materiaal is echter te gering voor een dergelijke uitspraak en bovendien zou bekend moeten zijn, hoe hard de proefpersonen gezongen of gesproken hebben, omdat x zal afnemen bij toenemende sterkte van het geluid.

Ook de hoogte van de grondtoon is van belang, omdat verwacht moet worden, dat x toeneemt met toenemende frequentie, tenzij de spreker of zanger dit weet te compenseren, b.v. door dan iets luidere klinkers voort te brengen.

Wanneer het spectrum gelijk blijft wanneer de grondtoon verandert, dan neemt de intensiteit toe, om de eenvoudige reden, dat de formanten dan passen bij harmonischen met lagere rangnummers. Dit is de verklaring van proeven van LUCHSINGER (1951^b) over de samenhang tussen ademverbruik en register.

Het is eveneens de verklaring voor de door LUCHSINGER geconstateerde afname van het ademverbruik van geoefende zangers in de volgorde bas, bariton, alt, mezzo-sopraan, tenor, sopraan.

De afname van de amplitudo van de hogere harmonischen is ook de reden van de samenhang van ademverbruik, druk onder de stempleet en de specifieke klinker bij constante grondtoon.

Het is opmerkelijk, dat de open en heldere klinkers, zoals i , e , a , y de kleinste x hebben. Het is mogelijk, dat dit veroorzaakt wordt door een iets andere trillingswijze van de stemplooiën, maar de eenvoudigste methode bestaat in het anders instellen van de valse stemplooiën, waarbij deze een grotere opening vrij laten, zie ook hoofdstuk VII. Röntgenmateriaal over deze kwestie is ons niet bekend.

Met het bovenstaande is niets gezegd over de centrale invloed op de stemvorming, via het spraakcentrum. Deze is vanzelfsprekend zeer groot en zelfs allesbeheersend. Daarbij bedient het spraakcentrum zich echter van het spraakorgaan: longen, strottenhoofd en aanzetstuk, en dit gehoorzaamt geldende fysische wetten. De opvatting van HUSSON (1950, Chap. 5), die het zo voorstelt alsof het strottenhoofd zich, dank zij het voortdurend ingrijpen van het spraakcentrum, zonder pauze moet ontworstelen aan deze wetten achten wij niet gefundeerd, innerlijk tegenstrijdig en onjuist.

NABOOTSIING VAN KLINKERS EN MEDEKLINKERS

5.0 Doel van de proeven

Met dezelfde proefpersoon S. zijn ook proeven genomen over het nabootsen van klinkers en medeklinkers, door de keelluidspreker te bekrachtigen met een bekend mengsel van harmonischen, waarbij de proefpersoon de mond instelde op de klinker of de spraakbewegingen maakte, die normaal voor het vormen van bepaalde woorden nodig zijn, waarbij zowel stemhebbende als stemloze medeklinkers voorkwamen.

Het doel van deze proeven was om de in de hoofdstukken II en IV ontwikkelde theorie te toetsen. Zij zijn van beslissende betekenis voor de theorie van de stemvorming.

Aan het aanzetstuk wordt namelijk een mengsel aangeboden, dat in overeenstemming is met de analyse in hoofdstuk IV, die uitgevoerd werd met behulp van de gemeten transmissiekrommen en met de totale modulatie voor de betreffende klinkers. Wanneer de theorie juist is, dan moeten de stemhebbende klanken nu goed nagebootst worden (dit blijkt inderdaad het geval te zijn).

Verder was de bekrachtiging constant en dus onafhankelijk van de verlangde klinker. Een klinkerpatroon was dus niet aanwezig. Door de nagebootste klank te vergelijken met de natuurlijke klinkers kan de belangrijkheid van het klinkerpatroon dus beoordeeld worden (het blijkt weinig invloed te hebben).

5.1 Methode

De proeven werden in een gewone werkkamer genomen, omdat ze meer van kwalitatieve aard zijn. Bovendien was de afstand van de mond tot de microfoon klein en de microfoon is richtingsgevoelig. De klinkers werden geregistreerd met behulp van een electronenstraaaloscillograaf, die gesynchroniseerd werd met de constante grondtoon van het mengsel van harmonischen. Het scherm van de buis werd gefotografeerd en de verkregen krommen zijn door het Mathematisch Centrum te Amsterdam *) met behulp van rekenschema's geanalyseerd op harmonischen, evenals de kromme afkomstig van de

*) Hiervoor zeg ik Dr. Ir. A. van Wijngaarden hartelijk dank.

spanning aan de meetspoel tijdens de bekrachtiging. Uit het quotient van deze waarden volgt dan de relatieve transmissie van de betreffende harmonische.

De medeklinkers kunnen niet weergegeven worden op deze wijze. Zij werden slechts subjectief gewaardeerd, waarbij dit vergemakkelijkt werd door het vastleggen op een tape-recorder *) en het overspelen op een gramfoonplaat. De klinkers werden eveneens op deze wijze vastgelegd, om beoordeling door andere waarnemers mogelijk te maken.

5.2 Apparatuur

Bij de metingen werd de keelluidspreker in een eerste uitvoering gebruikt. De eigenfrequentie van het systeem was rond 500 Hz en ver buiten het resonantiegebied mocht de bekrachtigungsstroom 60 mA bedragen. De spleet was toen nog $2 \times 0,1$ mm nauwer, met een veldsterkte van 2700 Oersted. Bij de latere vorm van de keelluidspreker werd de eigenfrequentie rond 300 Hz gemaakt en de spleet werd iets opgeruimd, zodat de stroomsterkte ver buiten het resonantiegebied ruim 3 x zo groot mocht worden, namelijk 200 mA, wat een flinke winst aan geluidsvolume opleverde.

De keelluidspreker werd bekrachtigd met behulp van de piekgenerator van fig. 21. De neon-stabilisatorbuis 85 A 1 levert gedu-

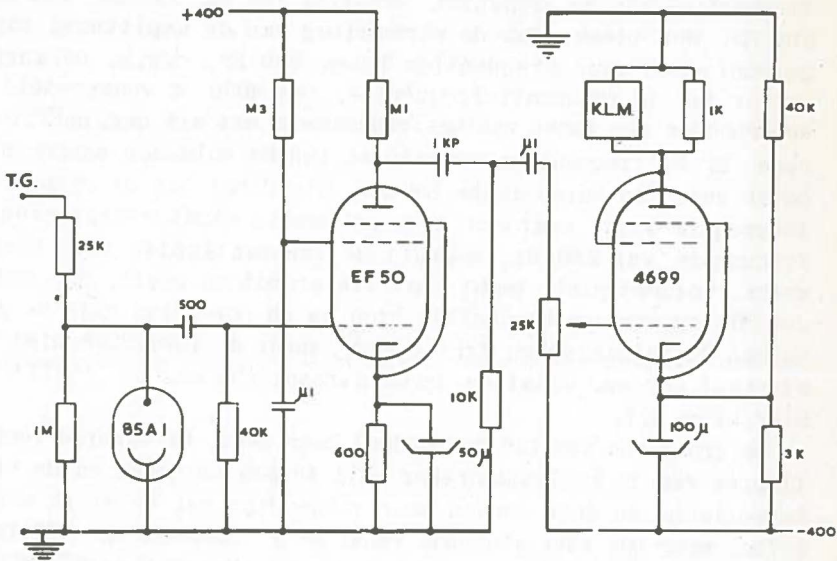


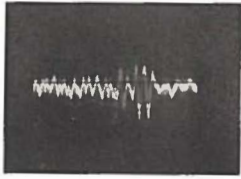
fig. 21. Piekgenerator voor de nabootsingsproeven

*) Hiervoor zeg ik Dr. H.C. Huizing en E.H. Huizing hartelijk dank.

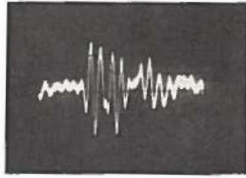
rende elke periode van de wisselspanning van de toongenerator één keer een spanningsstoot, die gedifferentieerd wordt door een R C element en daarna versterkt door een penthode, E F 50. De versterkte spanning wordt twee keer door R C elementen gedifferentieerd en daarna toegevoerd aan een eindpenthode, 4699, die als triode geschakeld is. De keelluidspreker werd opgenomen in de anodeketen en voor hoogspanning beveiligd door een parallel geschakelde weerstand. Door deze schakeling worden zeer kort durende stroomstoten afgeleverd, met een maximale piekwaarde van 200 mA.

De frequentiekaracteristiek van de apparatuur werd op verschillende wijzen onderzocht, met behulp van een Wave Analyzer, zie 6.2. De stroomstoten werden onderzocht, door de spanning over een weerstand van 50 Ω , die in de plaats van de keelluidspreker in de anodeketen werd opgenomen, te analyseren. Het bleek, dat de amplituden van de harmonischen slechts weinig afnemen met toenemend rangnummer. Zo was de 14^e harmonische nog 50% van de 1^e en de 40^e harmonische nog ruim 16%. De afname kan ook beschreven worden met de negatieve exponent x van het rangnummer n , waarbij n^{-x} de amplitude van de n^e harmonische uitdrukt in die van de eerste. Dan is tot $n = 10$ x ongeveer 0,2, tot $n = 20$ is x ongeveer 0,3 en tot $n = 40$ is $x = 0,5$, (bij de borststem liggen de waarden tussen 1 en 2, zie 4.7.3.). Verder werd de spanning aan de meetspoel op harmonischen geanalyseerd bij verschillende frequenties van de grondtoon, namelijk 120 Hz, 150 Hz, 180 Hz en 200 Hz. Het bleek, dat de verhouding van de amplituden van de harmonischen voor frequenties boven 600 Hz, d.w.z. belangrijk groter dan de resonantiefrequentie, tot 4000 Hz voorgesteld kan worden door een macht van het rangnummer, met als neg. coëfficiënt rond 2. De frequenties van 120 en 180 Hz voldeden echter niet, omdat deze een harmonische hebben, die dicht bij de resonantiefrequentie ligt, waardoor deze overmatig wordt weergegeven. De frequentie van 200 Hz, waarbij de resonantiepiek niet storend werkt, voldeed niet, omdat deze een grondtoon geeft, die voor de gemiddelde man ongebruikelijk hoog is en bovendien zijn de gaten tussen de harmonischen vrij breed, zodat de formanten niet goed afgetast worden. Vanaf de derde harmonische was de coëfficiënt hier bijna 2,5.

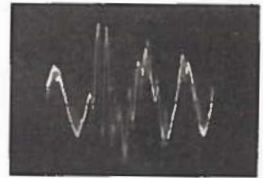
De grondtoon van 150 Hz voldeed zeer goed. De scherpe resonantiepiek van de keelluidspreker valt tussen de derde en de vierde harmonische en deze worden naar verhouding wel te sterk weergegeven, maar nog niet storend. Vanaf de 5^e harmonische (750 Hz) is de coëfficiënt x gelijk ruim 1,6. Gerekend vanaf de 3^e (450 Hz) is de coëfficiënt wat groter, rond 2. De 1^e en de 2^e harmonische worden naar verhouding veel te zwak weergegeven, maar dit is, vooral voor de 1^e, allerminst een bezwaar.



i, riet



ɪ, pit



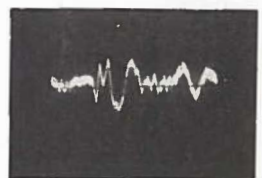
e, feest



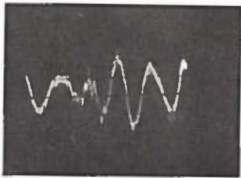
ɛ, bed



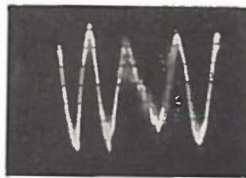
a, raam



ɔ, bad



o, post



o, boot



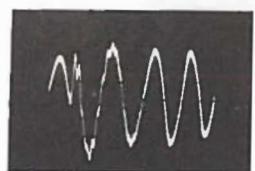
u, hoed



ə, put



y, fuut



membraan

Fig. 22 Nagebootste klinkers en volumesnelheid van de keelluidspreker

De verhouding van de amplituden was in overeenstemming met de betreffende frequentiekaracteristiek en met de bekrachtiging door de stroomstoten van de piekgenerator. Deze uitvoering was ook bij hogere frequenties dan 4000 Hz nog bruikbaar, ongeveer tot 5500 Hz.

De frequentie van de grondtoon, 150 Hz, mocht niet veel gevarieerd worden. Wanneer deze groter werd kwam de 3^e harmonische te dicht bij de resonantiepiek, waardoor deze toon ging overwegen, en wanneer de frequentie lager werd kwam de 4^e harmonische te dicht bij deze piek, met hetzelfde resultaat.

De geluidsdrukken op ongeveer 10 cm afstand van de mond werden geregistreerd met behulp van de reeds genoemde electro-dynamische microfoon, N.V. Philips, type 9528, frequentiekaracteristiek van 90 tot 6500 Hz recht binnen 3 db. In het geval van de klinkers werd deze spanning toegevoerd aan een electronenstraaloscillograaf, N.V. Philips, type G.M. 3156, terwijl de zaagtandspanning dan gesynchroniseerd werd met de wisselspanning van de toongenerator, die exact gelijk was aan de frequentie van de grondtoon van de keelluidspreker. Deze horizontale afbuiging was helaas niet geheel lineair, wat vooral te zien is aan de opname voor de y (fuut) van fig. 22.

De klinkers en de medeklinkers in nagebootste woorden werden tevens opgenomen met behulp van een tape-recorder en later ook overgespeeld op een grammofoonplaat. Dit gebeurde met de microfoon en de versterker van de tape-recorder.

5.3. Resultaten

Fig. 22 geeft een overzicht van de resultaten bij die klinkers, waarvoor ook de transmissiekromme bepaald werd, zie hoofdstuk IV, namelijk van de i (riet), I, ɪ (pit), e (feest), ε (bed), a (raam), α (bad), ɔ (post), o (boot), u (hoed), ə (put) en y (fuut), met een opname, waarbij in de plaats van de spanning aan de microfoon voor de mond de spanning aan de meetspoel werd gebruikt voor de afbuiging in verticale richting. Deze geeft dus de snelheid van het membraan aan, die gelijk is aan de volumesnelheid aan de ingang van het aanzetstuk. Deze was voor alle klinkers dezelfde, afgezien van het effect van de terugkoppeling van het aanzetstuk op het membraan. Deze is hier niet te verwaarlozen, zoals dit bij de proeven om de transmissiekromme te bepalen het geval was, omdat hier niet met één enkele zoekfrequentie gewerkt wordt, waardoor compensatie via een automatische volumeregeling mogelijk is, maar met een geheel spectrum van discrete zoekfrequenties.

Zoals aan de opname voor het membraan te zien is, evenals zeer

duidelijk aan die van de U (hoed), is de 4^e harmonische sterker aanwezig in de volumesnelheid aan de ingang dan de 3^e harmonische. Dit wordt veroorzaakt door het hoger worden van de resonantiefrequentie van het systeem door de toename van de temperatuur. Om de 3^e harmonische van de volumesnelheid aan de ingang groter te maken dan de 4^e zou de grondtoon iets hoger gemaakt moeten worden. Dit is niet gedaan, in de eerste plaats omdat daardoor de verhouding van de amplituden van alle harmonischen, die uit test-metingen bekend was, zou veranderen en in de tweede plaats, omdat de lage harmonischen toch weinig effect hebben voor de verstaanbaarheid en de waardering van de resultaten. Dit bleek b.v. ook uit het feit, dat het timbre van de op deze wijze voortgebrachte klinkers weinig veranderde wanneer de grondtoon iets veranderd werd, tenzij een van de harmonischen te dicht bij de resonantiefrequentie kwam en daardoor te sterk domineerde.

Het betreft hier tijdopnamen van het scherm van de electronenstraalbuis, de belichtingstijd was ongeveer 0,5 sec., een zwart papiertje voor de lens werd even verwijderd. Een momentopname was niet mogelijk, door het lawaai van de sluiters en bovendien zou dan naversnelling gebruikt moeten zijn, wat een geringere lijnscherpte en een afwijking van de lineariteit veroorzaakt. Het zijn dus opnamen van vele perioden, die over elkaar geprojecteerd zijn, en daardoor wordt tevens een indruk verkregen over de constantheid van het aanzetstuk tijdens de duur van de opname, want de plaats van de keelluidspreker, die door de proefpersoon vastgehouden werd, was goed gefixeerd. Het blijkt, dat, relatief genomen, de constantheid goed is bij de $i, I (\bar{i}), \varepsilon, \sigma, o, u$ en y en matig tot slecht bij de e, a, α en α . Wat de a en de α betreft verraste ons dit niet, omdat hier goed te zien is, dat de huig zeer gemakkelijk kleine bewegingen maakt.

De opnamen zijn door de Rekenafdeling van het Mathematisch Centrum te Amsterdam met behulp van schema's geanalyseerd op harmonischen, tot en met de 50^e. Door verschillende oorzaken konden deze uitkomsten niet zeer nauwkeurig zijn. In de eerste plaats door het grote aantal perioden tijdens het maken van een opname. In de tweede plaats door de vrij grote dikte van de lijn op het scherm van de oscillograaf, waardoor vooral de hoge frequenties onzeker worden. In de derde plaats door het niet geheel lineair zijn van de afbeelding op het scherm van de oscillograaf. Dit werd zo goed mogelijk in rekening gebracht met behulp van een correctieroster.

Voor elke ingestelde klinker volgt de transmissie van de diverse harmonischen dan direct uit het quotient van de waarde van de betreffende amplitudo in de met de microfoon geregistreeerde modulatie en de amplitudo van dezelfde harmonische in de spanning

aan de meetspoel, die op een constante factor na gelijk is aan de volumesnelheid aan de ingang van het aanzetstuk. De transmissie heeft dan betrekking op de druk, vóór of bij de mond, gedeeld door de snelheid aan de ingang en niet op het quotient van de snelheid tussen de lippen en die aan de ingang.

Dit is in tabel 4 voor alle klinkers uitgezet, tot en met de 27^e harmonische, met een frequentie van ruim 4000 Hz. Hierbij valt op te merken, dat de quotienten in gehele getallen zijn aangegeven en dat de nauwkeurigheid ervan afneemt met toenemend rangnummer.

De frequenties van de formanten, of die van formantgebieden, zijn, voorzover dit met enige nauwkeurigheid kon gebeuren, in de tabel aangegeven, door de betreffende getalwaarden dik te drukken. Deze waarden kunnen vergeleken worden met die van tabel 1, blz. 92. Het zijn namelijk formantwaarden van dezelfde proefpersoon en voor dezelfde klinkers. Dan blijkt, dat de formanten, globaal genomen, in dezelfde gebieden liggen.

In het algemeen worden niet dezelfde waarden gevonden, maar dit bleek bij de proeven over de transmissiekromme, die in hoofdstuk IV beschreven zijn, ook daar niet het geval te zijn, hoewel de opnamen voor dezelfde klinker met gering tijdsverschil gemaakt werden. Tussen de proeven over de nabootsing en die over de transmissiekromme liggen, in verband met het verbeteren van de keelluidspreker en het weer beschikbaar zijn van de proefpersoon, ruim zeven maanden. Ook bij de nabootsingsproeven was een klinker nooit geheel constant, zoals bleek uit analyses van tweetallen; in totaal werden 19 opnamen van klinkers onderzocht op het voorkomen van harmonischen.

Voor de interpretatie van een klank als een bepaalde klinker is het ook niet nodig, dat de formantwaarden binnen zeer engé grenzen liggen en dit zou ook te hoge eisen stellen aan het voeren van een normaal en vlot gesprek en aan de ruimte waarin dit plaats zou moeten vinden.

In tabel 4 zijn de harmonischen slechts tot 4000 Hz aangegeven, analoog aan de transmissiekrommen van hoofdstuk IV. Bij de opnamen van fig. 16 spelen echter ook hogere frequenties een rol. Met name bij de e (feest), rond 6000 Hz en met matige amplitudo, verhouding 2; bij de a (bad), rond 5100 Hz, en verhouding 4; bij de o (post), rond 5400 Hz en verhouding 2; bij de o (boot), rond 5550 Hz en verhouding 3; bij de u (hoed), van 5100 tot 6000 Hz, met een maximum voor de verhouding van 6, voor 5400 Hz; bij de e (put), rond 6000 Hz met verhouding van 3 en bij de y (fuut), rond 5400 Hz en verhouding 8 en rond 6000 Hz met verhouding 3.

Deze hogere frequenties worden door de keelluidspreker ook afgegeven en uit de analyse met behulp van de Wave-Analyzer bleek,

dat zij in het spectrum van de spanning aan de meetspoel belangrijk sterker voorkomen, dan uit de analyse met behulp van de renschema's kon volgen. De frequentiekaracteristiek van het prototype vertoonde bij de hoge frequenties namelijk ongeveer hetzelfde verloop als dat van fig. 7. Brengt men dit in rekening, dan worden de verhoudingsgetallen belangrijk kleiner.

Uit de waarnemingen over deze hogere frequenties volgen echter twee conclusies: in de eerste plaats is het membraan tot belangrijk hogere frequenties dan 40000 Hz redelijk bruikbaar (zie ook 4.2.) en in de tweede plaats heeft de betreffende klinker in het aangegeven gebied een versterkte transmissie, die op een formant wijst. Deze hoge frequenties hebben relatief minder invloed op de waardering van de klinker, omdat de drempelwaarde van het gehoor bij 6000 Hz al omstreeks 10 db (energie) hoger ligt dan bij de minimale drempelwaarden omstreeks 2000 Hz.

De resultaten van de nabootsing van de klinkers werden ook vastgelegd met een tape-recorder en op een gramfoonplaat en zij zijn daarna door talrijke luisteraars beoordeeld.

Dit was goed mogelijk, door eerst de nagebootste klinkers en medeklinkers zonder enige toelichting te laten horen en daarna met de toelichting, waardoor gehoord wordt welke klinker aangegeven wordt voor de nabootsing. In het laatste geval is het tevens mogelijk om te abstraheren van de eigenschappen van de klankregistratie.

Men is unaniem van oordeel, dat alle klinkers volkomen natuurlijk en normaal klinken en zij worden onmiddellijk als zodanig herkend, hoewel een enkele klinker soms met zijn genabuurde verwand wordt, namelijk de e met de i en b.v. de σ van post met die van bom. Een uitzondering vormt de ϵ (bed). Deze klinker heeft een blikachtige en schetterende klank, die lachwekkend aandoet. Er bestaat echter geen misverstand over de aard van de klinker en men hoort ook wel uit andere monden een dergelijke mekkerende ϵ , b.v. bij de kreet: hè, wanneer kinderen elkaar uitjouwen en bij huilende baby's. De oorzaak van deze afwijkende klankkleur is waarschijnlijk, dat de spectrale samenstelling van de generator een andere is dan bij de normale stemvorming. Het is namelijk niet waarschijnlijk, dat de speciale grondtoon van 150 Hz de schuldige zou zijn of dat de geringe verkorting van het aanzetstuk door het inbrengen van de keelluidspreker de verklaring zou zijn.

Beziet men het spectrum in tabel 4, dan blijkt, dat vanaf 1950 Hz alle harmonischen sterk aanwezig zijn. Wanneer het aantal hogere harmonischen van de generator bewust onderdrukt wordt, dan zal dit dus een sterke verandering van de klankkleur tot gevolg hebben. Wanneer men zelf van de zuivere ϵ overgaat naar deze

Tabel 4

Transmissie van de harmonischen bij de nabootsingsproeven.
 Uitgedrukt in willekeurige eenheden.

		i	I,ɹ	e	ɛ	a	ɑ	ɔ	o	u	ə	y
Frequentie	n	Riet	Pit	Feest	Bed	Raam	Bad	Post	Boot	Hoed	Put	Fruut
150	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
300	2	1	0	1	1	1	1	1	2	1	2	1
450	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
600	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
750	5	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
900	6	0	0	0	2	1	0	1	1	0	0	0
1050	7	0	0	0	1	2	1	2	1	0	0	0
1200	8	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
1350	9	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0
1500	10	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
1650	11	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1800	12	0	0	1	0	0	1	1	2	1	2	1
1950	13	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
2100	14	0	1	0	3	1	0	1	0	0	0	0
2250	15	1	3	0	6	1	0	1	1	1	1	1
2400	16	5	2	3	8	1	1	1	2	1	7	2
2550	17	1	5	6	6	1	1	2	1	1	12	2
2700	18	1	2	7	8	2	2	0	1	0	2	1
2850	19	2	6	9	11	5	1	1	0	0	2	0
3000	20	2	2	5	5	2	2	1	1	1	1	0
3150	21	2	2	4	3	1	2	1	1	1	2	1
3300	22	4	3	5	5	2	1	1	0	0	1	1
3450	23	7	4	4	5	2	2	2	1	1	3	1
3600	24	2	5	3	2	1	2	1	1	1	1	1
3750	25	3	4	6	1	2	1	1	0	1	1	1
3900	26	2	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1
4050	27	2	1	2	1	0	0	0	1	1	2	1

klankkleur, dan blijkt dit gepaard te gaan met aanspannen van het strottenhoofd. Zonder meer is echter niet uit te maken of dit een passieve verandering is, het gevolg van het wijzigen van het eerste deel van het aanzetstuk, of mede een actieve, door de noodzaak om de generator belangrijk te veranderen, zie ook hoofdstuk VII.

Er werden ook medeklinkers nagebootst, doordat de proefpersoon een aantal woorden navormde. De resultaten hiervan werden uitsluitend met de tape-recorder en op een gramfoonplaat vastgelegd.

Dit zijn de explosieve medeklinkers p, t, b en d, waarbij de laatste twee stemhebbend zijn, de nasale medeklinkers m en n en ŋ (ng in paling), die stemhebbend zijn, de laterale l, die eveneens stemhebbend is, de rollende r, de wrijvende medeklinkers f, v, s, z, waarvan de v en de z stemhebbend zijn en de medeklinker (g), die zwak stemhebbend is en als een semi-klinker beschouwd kan worden.

Deze kwamen voor in de woorden baard, goed, vlees, zeep, lam, neus, tossen, fietsen, sissen, daden, rammen, negen, paling, pap en verver.

De resultaten van dit experiment, die eveneens door verschillende waarnemers beluisterd en beoordeeld werden, lopen veel sterker uiteen dan die van de klinkers. Dit viel a priori te verwachten, omdat de keelluidspreker slechts de frequentiemodulatie bij de stemspleet kan vervangen en niet de modulatie op geheel andere plaatsen, b.v. door wrijving in vernauwingen langs het traject, zoals bij de s. Men zal verwachten, dat de stemhebbende medeklinkers het best na te bootsen zijn. Dit is inderdaad het geval, de stemloze medeklinkers worden niet goed weergegeven, al krijgt men bij de explosieven p en t de indruk, alsof dit wel het geval is. De keelluidspreker speelde hierbij echter geen enkele rol, de klank werd veroorzaakt door het plotseling openen of sluiten van de lippen en de mond bij de p en door het zich plotseling losmaken van de tanden en het gehemelte door de tong bij de t, in beide gevallen zonder enige overdruk of onderdruk in de mond.

De opnamen werden à bout portant gemaakt, de proefpersoon kreeg geen gelegenheid om zich te oefenen in het naspreken van de woorden, omdat hij dan wellicht een nieuwe spreektechniek zou ontwikkelen en het was de bedoeling om na te gaan, hoe goed de woorden worden weergegeven, wanneer de normale spreekbewegingen uitgevoerd worden. Hem werd verzocht om langzaam de spraakbewegingen uit te voeren, die nodig zijn voor het voorgezegde woord, zonder te letten op het geluid dat uit de mond kwam, dus zonder bij te regelen. Ondanks deze zware eis worden de meeste woorden als zodanig herkend.

5.4. Conclusies

Uit de beschreven proeven over de nabootsing van klinkers en medeklinkers zijn verschillende belangrijke conclusies te trekken:

1. De keelluidspreker kan ook therapeutisch gebruikt worden. Hoewel niet alle medeklinkers goed nagebootst worden zou dit in een te voeren gesprek niet hinderlijk zijn, omdat de luisteraar ze toch zou menen te horen. Bovendien zou de proefpersoon deze medeklinkers waarschijnlijk snel leren maken door middel van bewegingen met de tong en de lippen, door de zogenaamde klikken of door lucht tussen de wangen en de tong weg te knijpen. De resonantiepiek zou dan echter beneden de laagste van de verlangde grondtonen gebracht moeten worden (dit is beter dan hem boven b.v. 4000 Hz te leggen) omdat de keuze van de grondtonen anders te zeer beperkt wordt. Dit geeft (onder overigens dezelfde omstandigheden) een kleiner geluidsvolume, wat ongewenst is en gecompenseerd zou dienen te worden. Het plaatsen van de keelluidspreker in de luchtweg zou bezwaren opleveren, omdat de wanden van het strottenhoofd geprikkeld zouden worden en de keelluidspreker zou voortdurend met vocht in aanraking zijn. Dit zou voorkomen worden, door de opening in de keel af te sluiten met een zijbuisje, waarop de keelluidspreker aangesloten kan worden. De ademhaling zou dan normaal door kunnen gaan en het vormen van de medeklinkers zou geen enkele moeilijkheid meer opleveren. De afmetingen van de keelluidspreker zouden dan ook groter kunnen zijn, wat direct flinke winst in het geluidsvolume mogelijk maakt.

2. Een afname van de amplitudo van de harmonischen met de macht -2 van het rangnummer voldoet zeer goed, de nagebootste klanken maken een volkomen natuurlijke indruk. De afname met deze macht is in overeenstemming met de door ons in hoofdstuk IV op grond van de transmissiekrommen en de totale modulatie berekende.

3. Alle klinkers kunnen geproduceerd worden met hetzelfde spectrum van de generator. Dit betekent, dat het klinkerpatroon slechts op de tweede plaats komt. Zoals in hoofdstuk II werd uiteengezet verstaat men onder het klinkerpatroon het verschijnsel, dat zowel de trillingswijze van de ware stemplooiën als de instelling van de valse iets blijkt af te hangen van de bedoelde klinker, zie ook hoofdstuk VII. Blijkens onze proeven behoeft het effect hiervan op de samenstelling van het door het strottenhoofd afgegeven spectrum niet groot te zijn, want zonder deze specifieke bijregeling heeft de klinker reeds een accepteerbare en goede klank. Hieruit blijkt dus, dat voor een betrekkelijk geringe bijregeling van het spectrum reeds duidelijk waarneembare veranderingen in het strottenhoofd noodzakelijk zijn. Dat deze bijregeling wel degelijk een acoustische functie heeft menen wij o.a.

aangetoond te hebben bij de bespreking van de gewijzigde klankkleur van de ϵ (bed). Deze bijregeling zal van centrale oorsprong zijn. De grote en primaire betekenis daarvan moet hier echter buiten beschouwing blijven.

4. De frequenties van de formanten van de klinkers, zoals deze door de analyse van de nabootsing bepaald worden, stemmen globaal genomen overeen met de uit de transmissie bepaalde.

5. De omhullende van de harmonischen heeft, globaal genomen, hetzelfde verloop als de transmissiekromme van dezelfde klinker. Hieruit blijkt opnieuw, dat de algemene conclusie van DUNN over het verloop van de formanten (bij het passeren van elke formant krijgt de basislijn voor de energie opnieuw een benedenwaartse helling van 12 db per octaaf of 40 db per decade) onjuist is.

6. De keelluidspreker is ook voor hogere frequenties dan 4000 Hz bruikbaar.

7. De klinkers vertonen ook boven 4000 Hz formanten, die bij de normale stemvorming niet aangetoond kunnen worden in de modulatie. Dit wordt veroorzaakt door de afname van de hogere harmonischen in het spectrum, hetzij bewust, hetzij onbewust. Onder bijzondere omstandigheden, b.v. harde commandostem (metalen stem) kan het spectrum echter tot zulke hoge frequenties doorlopen (anders gezegd: duurt de stoot lucht door de stemspleet zo kort en heeft zulke scherpe flanken), dat deze zeer hoge formanten ook een bijdrage leveren.

8. De proeven kunnen geen positief antwoord geven op de vraag naar de oorzaak van de individuele verschillen van de stem. Er volgt slechts uit, dat er geen reden is voor het aannemen van gekunstelde individuele verschillen in het spectrum van de generator. Reeds eerder werd opgemerkt, dat deze individuele verschillen nog niet verklaard zijn. Mogelijke oorzaken zijn: a. Gunstige verhouding van de frequenties van de formanten, b.v. als eenvoudige natuurlijke getallen, b. Sterkteverhouding van de formanten, c. Constante formanten (onwaarschijnlijk), d. Bewuste en gecontroleerde armoede aan hogere harmonischen bij de sonore stem en e. Spreektechniek, waardoor de overgangsverschijnselen op karakteristieke en herkenbare wijze met de spreker verbonden zijn.

9. De proeven zijn een bevestiging van de regel van HELMHOLTZ over de onbelangrijkheid van de fasen in de samengestelde trilling.

V I

TRANSPOSITIE VAN DE KLINKERS

6.0. Doel van de proeven

Het doel van de proeven over de transpositie van de klinkers was in de eerste plaats om daardoor de theorie van SAVART en GUILLEMIN te onderzoeken (deze wordt verworpen). Daardoor zijn zij van beslissende betekenis voor de theorie van de stemvorming.

Toen dit vast stond werd het onderzoek in de tweede plaats gericht op het vaststellen van de eigenschappen van de frequentie-modulatie.

Inde derde plaats werden nog enkele praktische kwesties onderzocht.

6.1. Methode

Met normale personen zijn proeven genomen over de transpositie van klinkers. Deze transpositie is mogelijk, door de proefpersoon te laten ademen uit een gasmengsel met een andere voortplantingssnelheid dan de normale lucht.

Wanneer het in hoofdstuk II geschetste beeld van de stemvorming juist is, dan zal het gevolg van deze ademing zijn, dat de frequenties van alle formanten van een klinker anders komen te liggen, mits het aanzetstuk niet gecorrigeerd wordt. De verhouding van de frequenties van de overeenkomstige formanten moet gelijk zijn aan de verhouding van de voortplantingssnelheden in de uitgeademde mengsels.

Tenzij de proefpersoon schrikt van de zo andere klank en daardoor verschillende wijzigingen aanbrengt, b.v. ook in de wijze van uitademen of in de besturing van het strottenhoofd, zodat daardoor de frequentie van de grondtoon verandert, zal men immers verwachten, dat de grondtoon praktisch ongewijzigd blijft, omdat de drukken onder de stemspleet op dezelfde wijze als tevoren oplopen en de impedantie van de stemplooiën blijft dezelfde.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van waterstof om de voortplantingssnelheid op te voeren, dan neemt, onder overigens dezelfde omstandigheden, de impedantie van de lucht tussen de stemplooiën af, omdat de wrijvingscoëfficiënt van waterstof ongeveer 2 keer zo klein is als die van zuurstof, stikstof en koolzuur (en ook

als die van helium) en vrijwel even groot als die van waterdamp. Daardoor zal de frequentie van de grondtoon iets hoger kunnen zijn.

Wanneer de stem gevormd zou worden volgens de opvatting van SAVART en GUILLEMIN, dan zou de frequentie van de grondtoon echter evenredig met de voortplantingssnelheid moeten veranderen. Het resultaat van deze proeven levert dus een dwingende conclusie over de geldigheid van de gereleveerde opvattingen, zie 6.4.

TYNDALL heeft als eerste proeven genomen met een ander gas. Hij gebruikte waterstof en beschrijft het resultaat als „hollow, harsh, unearthy”. Nu heeft waterstof het voordeel, dat de dichtheid veel kleiner is dan die van lucht, zodat de voortplantingssnelheid veel groter wordt, maar een nadeel is, dat men een tekort aan zuurstof krijgt, wat uitloopt op een meer of minder ernstige ademnood. Dit maakt de proeven zeer onprettig. Behalve waterstof komt nog het kostbare helium in aanmerking voor het vergroten van de voortplantingssnelheid. Het effect is dan kleiner, maar er is geen gevaar meer voor een explosie. Voor het verkleinen van de voortplantingssnelheid komen slechts weinig gassen in aanmerking en deze zijn zeer kostbaar (Sulfurhexafluoride is zeer geschikt). BÁRÁNY (1936) blijkt waterstof gebruikt te hebben om het effect van de transpositie op de verstaanbaarheid van de klinkers en de medeklinkers te bestuderen. Hij constateerde, dat bij een transpositie over een octaaf de verstaanbaarheid nog ca 75% bedroeg. Ook bij onze eigen proeven bleek, dat een vrij grote transpositie (quint) toelaatbaar was met het oog op de verstaanbaarheid. Deze proeven zijn ook van groot belang in verband met een definitie voor de klinker.

Bij onze proeven hadden wij de medewerking van een aantal geroutineerde zangers, 5 mannen en 1 vrouw en deze ademden uit 2 mengsels van zuurstof en waterstof. Mengsel 1 met 15,5% zuurstof en 84,5% waterstof, en een 2 keer zo grote voortplantingssnelheid als lucht en mengsel 2 met 36,5% zuurstof en 63,5% waterstof en een 1,5 keer zo grote voortplantingssnelheid. Dit geeft het grote voordeel, dat nu geen ademnood meer ontstaat, de hoeveelheid zuurstof is ruim voldoende voor de behoefte. Daardoor verlopen de proeven rustig en ongedwongen. De mengsels leveren een groot gevaar voor explosie op, maar als men zich hiervan bewust blijft is dit sluimerend. Zij werden bewaard in gepraepareerde linnen zakken, met een soepele wijde slang.

De longen werden gevuld, door eerst maximaal uit te ademen en daarna maximaal in te ademen (met dichtgeknepen neus) uit de zak. Door de wijde slang ging dit zonder moeilijkheid. Daarna werd maximaal uitgeademd naar de buitenlucht en opnieuw maximaal ingeademd uit de zak. Ook deze tweede teug werd naar de buitenlucht

uitgeademd en pas na de derde maximaal diepe teug werd tot stemvorming overgegaan. Te veel diepe in- en uitademingen na elkaar leveren bezwaar op wegens de grote verlaging van het CO_2 gehalte in de longen.

De voortplantingssnelheid van het tijdens de stemvorming uitgeademde mengsel werd niet op directe wijze vastgesteld omdat de apparatuur daarvoor ontbrak en bovendien had dit voor onze proeven, die in hoofdzaak gericht waren op het beproeven van de opvatting van SAVART en GUILLEMIN, slechts een geringe betekenis.

De klinkers bij ademing van lucht en bij ademing van een van de gasmengsels werden geanalyseerd op het voorkomen van de harmonischen volgens de zoektoonmethode, WEGEL en MOORE (1924), MOORE en CURTIS (1927), GRÜTZMACHER (1927), met behulp van een Wave Analyzer, zie 6.2. Deze was zo ingericht, dat de halfwaardebreedte 45 Hz bedroeg, wat een compromis betekent tussen de gewenste zoeksnelheid, ongeveer 20 sec. voor het traject van 100 tot 4000 Hz, en het oplossend vermogen, zie ook 4.1.2.

Aan de as van de Wave-Analyzer was een zeer fijn verdeelde potentiometer gekoppeld, waardoor een variabele gelijkspanning ter beschikking kwam. Deze gelijkspanning werd versterkt door een balans-gelijkstroomversterker en toegevoerd aan de platen voor de horizontale afbuiging van een electronenstraaloscillograaf. De afbuiging in horizontale richting was daardoor evenredig met de verdeling op de frequentieschaal van de Wave-Analyzer, analoog aan de methode bij het bepalen van de transmissiekromme. Door de voorspanning van de versterker te regelen kon elk gedeelte van het frequentiespectrum met de gewenste grootte op het scherm gebracht worden. De spanning aan het filter van de Wave-Analyzer, die evenredig is met de amplitudo van een eventueel in de modulatie aanwezige component met een frequentie gelijk aan die waarop de Wave-Analyzer momentaan ingesteld is, werd versterkt en in balans toegevoerd aan de platen voor de verticale afbuiging.

De proeven werden genomen in de echo-arme kamer, die reeds in hoofdstuk IV beschreven is. In de helft voor de proefpersoon brandde ook toen een zwakke lamp, die een voldoende indirecte verlichting van het scherm van de electronenstraalbuis gaf, zodat een aangebrachte schaal voor het markeren van de frequenties goed uitkwam. Tijdens de opname werd het scherm van de buis gefotografeerd met een kleinbeeldcamera en de opname werd later vergroot overgetekend op grafiekenpapier. In totaal werden rond 350 opnamen gemaakt.

De proeven werden voorbereid, door met luchtademhaling eerst de grenzen van de registers vast te stellen. Daarna werden dan een aantal (1 tot 4) frequenties uit het midden van het boastre-gister uitgekozen als grondtonen voor de te zingen klinkers. In

verband met de zoektoonmethode is de constantheid van de grondtoon tijdens de ongeveer 20 sec. durende analyse van zeer groot belang, vooral voor de hogere harmonischen. Daarom werd eerst nagegaan, hoe goed de proefpersoon een toon kon treffen en handhaven. Dit gebeurde, door de toon aan te geven met een luidspreker of koptelefoon. Geringe afwijkingen, sterke kwamen niet voor, worden dan gehoord als zwevingen. Na enige oefening bleken alle proefpersonen in staat te zijn om gedurende 25 tot 30 sec. een strakke, gedragen toon vol te houden, met een gering vibrato, namelijk 1 tot 2 keer per sec. en met een amplitudo van maximaal 1 Hz.

Na enige series opnamen kwamen wij zo tot de onderstaande volgorde bij het opnemen van de klinkers:

1. Vaststellen van de grenzen van de registers en van de geschikte grondtoon (en) in het borstregister.
2. Onderzoek naar het treffen en het handhaven van een aangegeven toon en eventueel oefening in het onderdrukken van het vibrato.
3. Afspraak over de te zingen klinker.
4. Aangeven van de grondtoon met een koptelefoon, en zingen van de klinker in lucht, waarbij een opname werd gemaakt. Met een koptelefoon controleerden wij tijdens het zingen de constantheid van de toonhoogte. Wanneer het onderdrukken van het vibrato geen enkele moeilijkheid had opgeleverd werd de toon alleen voor het zingen aangegeven met een luidspreker. Meestal luisterden wij dan gedurende het zingen met één oor naar een koptelefoon.
5. Drie keer diep inademen uit mengsel 1 of 2 en zingen op dezelfde toonhoogte.
6. Zoals onder 4 en 5, met andere grondtoon.

Van elke klinker werd bij elke grondtoon minstens één goede opname gemaakt. Het enige criterium daarvoor was, dat de klinker gedurende de tijd van de opname niet gestoord mocht worden, b.v. door een kikkertje. De invloed daarvan is trouwens merkwaardig gering.

De afwisseling: een opname met lucht, dan een met een mengsel en dan weer een met lucht kost wel veel gas, maar heeft het grote voordeel, dat de opnamen dan niet geforceerd verlopen. Anders moet de proefpersoon er voortdurend aan denken, dat hij na de uitademing direct weer uit de zak moet inademen. Dit wordt bovendien toch telkens vergeten en leidt dan tot een nog groter gasverbruik.

6.2. Apparatuur

Voor het analyseren op harmonischen werd gebruik gemaakt van een General Radio Company Wave Analyzer, Type 636 - A, die het eigendom is van de Keel- Neus- en Oorheelkundige Kliniek te Groningen.

Dit instrument werkt volgens het heterodyne principe. Het te analyseren signaal wordt in een balanstrap gemengd met een draaggolf, waarvan de frequentie continu gevarieerd kan worden. De draaggolf wordt in phase aan beide buizen toegevoerd, het signaal in tegenphase. Het gemengde signaal, waaruit de sterke draaggolf door juiste instelling van de balanstrap verwijderd kan worden, bevat onder meer de som- en de verschilfrequenties van de draaggolf en de componenten van het te analyseren signaal. Dit gemengde signaal wordt toegevoerd aan een zeer selectief filter, dat bestaat uit twee trappen met elk een kwartskristal. Het filter is afgestemd op 50 kHz en het geeft een uitgangsspanning, wanneer een van de componenten met de momentane draaggolf een somfrequentie van 50 kHz oplevert. Deze spanning wordt versterkt en afgelezen op een meter. Het filter is zeer selectief: wanneer de frequentie 60 Hz van de resonantiefrequentie afwijkt is de amplitudo tot op 2% afgenomen. Het was voor ons doel veel te scherp, de zoeksnelheid zou dan te klein moeten worden, zie 4.1.2.

Daarom werd naar een andere oplossing gezocht. Het bleek mogelijk te zijn om tussen het eerste en het tweede kwartskristal een aftakking aan te brengen (die tevens een belasting is), zodanig, dat de halfwaardebreedte voor de energie 45 Hz bedraagt. Dit is een compromis tussen een accepteerbare zoeksnelheid (de proef mag niet te lang duren) en een redelijk oplossend vermogen van de apparatuur.

Dit bracht echter met zich mee, dat de grondtonen niet willekeurig laag mochten zijn. Wij zijn niet verder gegaan dan tot 120 Hz bij de eigenlijke opnamen, d.w.z. nog in het middengebied van het borstregister, en tot 70 Hz bij het onderzoek naar de registers.

Of de zoeksnelheid van 200 Hz per sec. (van 100 naar 4000 Hz in 20 sec.) toelaatbaar is werd onderzocht, door een wisselspanning van constante frequentie en amplitudo aan de Wave-Analyzer te leggen en deze dan met de bewuste zoeksnelheid het frequentiegebied te laten afzoeken. Hierbij bleek, dat de fout nog kleiner dan 7% bleef wanneer de zoeksnelheid 2 keer zo groot werd genomen, dus met een analyseduur van 10 sec.

Een zwakke component op de flank van een sterke component wordt niet juist weergegeven. Het is mogelijk, om hiervoor te corrigeren. Dit bleek, door gebruik te maken van twee wisselspanningen met constante amplitudo en verschillende frequenties. Een zwakke component kan nog tegen een ongeveer 10 keer zo sterke ondergrond waargenomen worden. Bij een grondtoon van 120 Hz is de amplitudo van de ondergrond tengevolge van de vorige harmonische kleiner dan 5% van de amplitudo van die harmonische.

Ook werd de invloed van vibrato onderzocht. Hierbij bleek, dat

de fout in de amplitudo bij een vibrato van 1 keer per sec. en met een amplitudo van 40 Hz kleiner van 10% blijft. Gezien het kwalitatieve karakter van de proeven kon met deze vrij geringe onnauwkeurigheid genoeg worden genomen.

De spanning aan de microfoon, N.V. Philips, Type 9528, frequentiekarakteristiek binnen 3 db recht van 90 tot 6500 Hz, werd versterkt met een twee-traps versterker, die aangepast werd aan de ingangsimpedantie van de Wave-Analyzer. De frequentiekarakteristiek van de versterker is recht binnen 10% van 80 tot 5000 Hz. De 2^e harmonische is kleiner dan 2%, de 3^e is kleiner dan 0,5%.

De tussen de kwartskristallen afgetakte spanning werd versterkt door een twee-traps versterker, waarvan de laatste trap in balans is uitgevoerd. Deze spanning heeft een frequentie van rond 50 k Hz en daarom konden R - C elementen met een kleine tijdsconstante gebruikt worden om daardoor stoorspanningen weg te filteren. Er bleef echter een niet te verwijderen stoorspanning van kleine amplitudo over, met de frequentie van de draaggolf, die een ondergrond veroorzaakt.

De versterkte spanning werd gebruikt voor de afbuiging in verticale richting van een electronenstraalbuis. Hiervoor hadden wij eerst de beschikking over een buis met een grote diameter, later moest het type G.M. 3156 van de N.V. Philips gebruikt worden.

De versterkingsfactor en de instelling van de versterker voor de afbuiging in horizontale richting konden zo geregeld worden, dat elk in aanmerking komend gedeelte van het spectrum de gehele breedte van het scherm opvulde.

6.3. Resultaten

Met het oog op het onderzoek naar de waarde van de theorie van SAVART en GUILLEMIN is de eerste reactie op het andere gasmengsel het belangrijkst. Daarom werd aan de proefpersoon gevraagd om rustig enkele malen uit de zak te ademen en dan de afgesproken klinker te zingen op de toonhoogte die tevoren aangegeven was, zonder zich iets aan te trekken van het feit, dat de klank anders is. Als beproeving van genoemde theorie hebben de experimenten immers slechts dan zin, wanneer aan deze voorwaarde voldaan is. De proefpersoon mag niet gaan proberen om de klank terug te voeren tot de vertrouwde, omdat er dan allerlei wijzigingen kunnen optreden. Niet slechts van het aanzetstuk, want dat zou in dit opzicht geen bezwaar zijn, maar ook van de toonhoogte. Nu is het een voordeel, dat de klank zo geheel anders is dan wat er van verwacht wordt, dat de neiging tot experimenteren met de klank en de klankkleur in de eerste seconden nog niet groot is. Men heeft

eerder de neiging om op te houden en eerst eens te luisteren naar de onbekende, die buikspreekt in de eigen keel. Dit is juist, wat verlangd wordt.

Noch bij de geroutineerde zangers, noch bij willekeurige proefpersonen werd enig verlopen van de toonhoogte tijdens de inzet van de klinker geconstateerd. Evenmin een gaan beheersen van de techniek, waardoor bij volgende proeven de toonhoogte anders gekozen zou worden. Hoewel de klinker geheel anders klinkt en door de in frequentie verhoogte formanten subjectief de indruk gewekt wordt van toonsverhoging, is de frequentie van de grondtoon dezelfde als die bij ademing van lucht, voor zover het mogelijk is om een aangegeven toon te treffen. Voorafgaande waarschuwingen aan de eigen stem leverden hetzelfde resultaat, er is niet de minste aanleiding om de toonhoogte te gaan veranderen.

Hiermede is naar onze mening het definitieve bewijs geleverd, dat de stem niet volgens de opvatting van SAVART en GUILLEMIN (zoals bij het jagersfluitje en bij het normale fluiten) gevormd wordt. Daarvoor zijn trouwens ook nog andere argumenten aan te voeren, zie 6.4.

Proeven met andere gasmengseis zijn ook in ander opzicht belangrijk. Met name voor de kennis van de transmissiekromme en van de frequentiemodulatie. Daarvoor is noodzakelijk, dat de modulatie onderzocht wordt op harmonischen en dit vergt het gedurende langere tijd op constante toonhoogte, met constant volume en met dezelfde klankkleur zingen van de klinker. Slechts geroutineerde zangers kunnen aan deze eisen voldoen en wij kregen de spontane medewerking van een aantal van hen.

Het constant houden van de toonhoogte werd onderzocht op de in 6.1. beschreven wijze, door het vibrato te bepalen. De constantheid van het geluidsvolume volgt direct uit de amplituden in het geregistreerde signaal.

Het handhaven van de klankkleur kan niet exact bepaald worden, hier moesten wij in hoofdzaak afgaan op de subjectieve indruk. Deze wordt bemoeilijkt, doordat de stem in de echo-arme kamer ook reeds bij ademing van lucht geheel anders klinkt. De nagalm is verdwenen en dit gaat vooral ten koste van de brillantheid van de stem en het onderscheid tussen de klinkers wordt geringer. Een controle bestond in het verschillende malen achter elkaar opnemen van dezelfde klinker. Dit geeft tevens een indruk over de reproduceerbaarheid van de klinker en deze werd eveneens gecontroleerd door van een bepaalde klinker bij het begin en bij het einde van een serie proeven een aantal opnamen te maken.

Om te voorkomen, dat er een systematisch verschil zou ontstaan doordat de proefpersoon b.v. gedurende het verloop van de lang aangehouden klinker vermoeid raakt, waardoor aan het eind, wan-

neer b.v. de hogere harmonischen bepaald worden, het spectrum van de generator een andere samenstelling heeft dan bij het begin, werden opnamen gemaakt met toenemende frequentie van de zoektoon, waarbij dus eerst de lage harmonischen gemeten worden en met afnemende frequentie van de zoektoon, waarbij eerst de hoge harmonischen gemeten worden. Hierbij bleek, dat de reproduceerbaarheid bij deze geroutineerde zangers goed was. Gedurende het verloop van een serie proeven op dezelfde dag was het verschil tussen de opnamen van een „zelfde” klinker gering. Dit is ook een noodzakelijke voorwaarde, want tussen de opname bij ademing van lucht en die bij ademing van een van de mengsels verloopt enige tijd. Het verschil tussen opnamen op verschillende dagen was veel groter. Zo werden in één geval, met een tussenruimte van 40 dagen, voor de a formanten gevonden bij 600, 1200, 2700 en 3700 Hz resp. 700, 1300, 1750 en 2800 Hz.

De frequenties van de formanten bij ademing van lucht zijn voor de onderzochte klinkers uitgezet in tabel 5. Het zijn dezelfde klinkers, als die, waarvoor bij de proefpersoon S. de transmissiekrommen bepaald zijn, zie hoofdstuk IV. Zoals uit deze tabel blijkt, zijn er bij alle klinkers vrij grote individuele verschillen. Toch worden al deze klanken als goede vertegenwoordigers van de standaardklinkers beschouwd. Neemt men deze individuele verschillen in aanmerking, dan stemmen de gevonden formanten overeen met de bij S. gevonden formanten, zie hoofdstuk IV en V.

Het resultaat van de ademing van de verschillende mengsels is voor de klinker a uitgezet in tabel 6. De andere klinkers gaven analoge resultaten. Hieruit blijkt, dat de formanten inderdaad getransponeerd worden, maar dat de verhoudingsgetallen bij ademing van het eerste mengsel (waarin de voortplantingssnelheid 2 keer zo groot is als in lucht) belangrijk kleiner zijn dan 2. Bij gebruik van het tweede mengsel (1,5 keer zo grote voortplantingssnelheid) liggen de verhoudingsgetallen q relatief dichter bij de waarde 1,5.

De oorzaak daarvan is gemakkelijk aan te geven. Alles hangt namelijk af van de vultechniek die de zanger zich eigen moet maken. Uit de tabel blijkt, dat K.v.D. dit onderdeel het best beheerste.

Het is overigens niet mogelijk, dat de longen door drie diepe ademhalingen volledig uitgewassen worden. Bij een restcapaciteit (residu) van 1,5 l en een maximale capaciteit (totale capaciteit) van 6 l (d.w.z. een verhouding van 1 op 4, wat normaal is voor gezonde en jonge personen) zou de afwijking van de samenstelling, aangenomen dat telkens volledige menging plaats vindt, $\sim 2\%$ bedragen. De geconstateerde afwijking is veel groter. Onvolledige

menging zal iets kunnen uitmaken, maar dan zou verwacht moeten worden, dat de verhouding q bij een experiment afhangt van de volgorde waarin de formanten doorgemeten worden en dit werd niet geconstateerd. Door de longen wordt echter behalve koolzuur, waarin geen verandering komt, nu ook stikstof afgestaan aan het mengsel, omdat dit geen stikstof bevat. Dit heeft relatief de grootste invloed op mengsel 1, omdat dit bestaat uit 15,5% zuurstof en 84,5% waterstof, terwijl mengsel 2 36,5% zuurstof en 63,5% waterstof bevat.

Met mengsel 2 komt zanger K.v.D. tot iets grotere verhoudingsgetallen dan 1,5. Waarschijnlijk is de gasanalyse (hoge zuurstofanalyse) niet geheel correct geweest. Bij zanger J.I. zijn de verhoudingsgetallen voor de laagste formant belangrijk groter dan die voor de volgende formant. Dit wordt waarschijnlijk veroor-

Tabel 5

Formanten van de klinkers, in lucht.

A.M.-O. is sopraan, K.v.D. en J.H.M. zijn tenor, R.O. is bariton, J.I. en A.V. zijn bas.

Klinker	Proefpersoon	Formanten			
		1	2	3	4
i	J.I.	320	1800	2500	
	J.H.M.	300	2000	3500	3900
e	K.v.D.	400	1900	2300	2950
	J.I.	400	1600	2500	
a	R.O.	320	1800	2600	
	A.V.	480	2200	2750	
	J.H.M.	300	1800	3300	
	K.v.D.	620	1200	2650	
	J.I.	480	960	2600	
	R.O.	640	1280	2200	
	A.V.	700	1300	1750	2800
	J.I.	480	800		
o	R.O.	520			
	A.V.	400	650		
	J.H.M.	600			
	A.M.-O.	550	800		
u	R.O.	350	700		
	A.V.	280	560	700	
	A.M.-O.	675	1250		
ə	J.I.	480	1100		
	R.O.	480	1100		
	A.V.	400	1600	2700	
	J.H.M.	300	1800	3900	

zaakt door een tussentijdse verandering van de klankkleur van de klinker, die ons ontgaan is gedurende het experiment. (Gezien de afwijkende formantwaarden, zie tabel 5, is dit niet onmogelijk. Met een verhouding van 1,3 resp. 1,55, zoals voor de tweede formant, zou de frequentie van de eerste formant in lucht, terugge-rekend vanaf de getransponeerde waarden 615 resp. 580 Hz bedragen. Deze frequentie komt overeen met die van de andere zangers). Een systematisch verschil tussen de transpositie van de eerste en die van de tweede formant bestaat er volgens tabel 6 niet.

De resultaten van de proeven met verschillende gasmengsels zijn dus in overeenstemming met wat er van verwacht wordt wanneer men de geldigheid van de in de voorgaande hoofdstukken beschreven opvatting over de bijdrage van het aanzetstuk tot de totale modulatie (uitsluitend bestaande in amplitudo-modulatie en te beschrijven met de transmissiekrommen) aanneemt.

Door de proeven over de transpositie van de klinkers worden tevens gegevens verkregen over de frequentiemodulatie.

De transmissiekromme bij ademing van een mengsel met een andere voortplantingssnelheid heeft namelijk een eenvoudig verband met die bij ademing van lucht. De frequenties van de correspon-

Tabel 6

Formanten van de a in lucht en in de gasmengsels 1 en 2.
K.v.D. is tenor, R.O. is bariton, J.I. en A.V. zijn bas.

Proefpersoon	Medium	Formanten			
K. v. D.	Lucht	620	1200	2650	
	M2:1,5x	960	1900		
	q	1,55	1,6		
	M1:2x	1050	2200		
	q	1,7	1,85		
R. O.	Lucht	640	1280	2200	
	M1:2x	800	1700		
	q	1,25	1,35		
J. I.	Lucht	480	960	2600	
	M2:1,5x	800	1250		
	q	1,65	1,3		
	M1:2x	900	1500		
	q	1,85	1,55		
A. V.	Lucht	700	1300	1750	2800
	M1:2x	1100	1650		
	q	1,55	1,25		

derende formanten verhouden zich als de voortplantingssnelheden. De dempingsfactoren zijn echter iets onzeker.

De stralingsdemping levert geen moeilijkheden op, zoals het gemakkelijkst te overzien is bij de cilindrische buis met harde wand, zie 4.6.2. De halfwaardebreedte Δf is volgens (21) evenredig met het product van de frequentie ω en $R_s / \rho c$. Nu is volgens (16) : $R_s = \rho c \cdot \omega^2 / 2\pi c^2$ en voor de overeenkomstige formanten is in beide mengsels is de verhouding ω/c dezelfde. Daaruit volgt dus, dat de halfwaardebreedte evenredig is met de frequentie van de formant, d.w.z. met de voortplantingssnelheid. De qualiteitsfactoren van de overeenkomstige formanten zijn dus dezelfde. Uit de berekening over het model van een klinker, zie 4.6.3. volgt hetzelfde resultaat, door de vergelijkingen (25) en (24) voor het reële deel van Z_1 en voor R_a en X_a te beschouwen.

De demping door een vernauwing neemt daarentegen niet evenredig met de frequentie toe. Dit volgt uit 4.6.4., vergelijking (30). De correctietermen in de factoren tussen de grote haken, die in dit geval de weerstandsterm opleveren (overeenkomend met R_s bij de straling), zijn namelijk alle evenredig met $\omega^{-1/2}$, dus met $c^{-1/2}$. Daardoor zijn de halfwaardebreedten Δf nu evenredig met $\omega^{+1/2}$, zodat de qualiteitsfactoren toenemen met $c^{+1/2}$.

De demping door het slap zijn van de wanden is wat lastiger te schatten, zie 4.6.4. Bij de lage formant van het model is de weerstandsterm practisch gelijk aan R_1 van vergelijking (40) en

$$R_1 \approx 8 G \cdot Z_0 \cdot \rho c \cdot l = 8 G \cdot \frac{\rho c}{0^2} \cdot l \cdot \rho c. \text{ Nu is } \rho c^2 = \gamma P_0, \text{ zodat}$$

$$R_1 \approx 8 G \cdot \frac{\gamma P_0}{0^2 c} \cdot l \cdot \rho c.$$

Wanneer G constant was zou de halfwaardebreedte dus niet veranderen. Dit is zeker niet het geval, wanneer de trilling door de massa gecontroleerd wordt is G evenredig met $\omega^{-2,5}$ en wanneer de trilling door de demping gecontroleerd wordt zal G eveneens afnemen, maar lang niet zo sterk. (Misschien met ca $\omega^{-1/2}$). De qualiteitsfactoren zouden dus sterk toenemen. De oorzaak van dit gedrag is gelegen in het feit, dat de karakteristieke impedanties langs het aanzetstuk kleiner worden, terwijl die van de wanden dezelfde blijven.

Terwijl de halfwaardebreedte van de getransponeerde formant dus zal afnemen of hoogstens constant zal zijn wanneer de demping in hoofdzaak van de wanden afkomstig is, zal er een toename evenredig met $\omega^{+1/2}$ te zien zijn wanneer een vernauwing de hoofdoorzaak is en een toename evenredig met ω wanneer practisch alles stralingsdemping is.

Bij het omhoog transponeren, zoals dat bij onze proeven het geval was, zal met de transpositie ook het karakter van de dem-

ping enigszins gewijzigd worden. Zo zal een oorspronkelijk lage formant bij transpositie relatief sterker door de straling gedempt worden en eveneens relatief sterker door wrijvings- of vernauwingsdemping. Dit is een complicerende factor, want het maximum van de transmissie van een formant hangt af van de halfwaardebreedte.

Neemt men aan, dat de sterkteverhouding van de formanten bij de getransponeerde klinker praktisch niet beïnvloed wordt door een andere verdeling van de halfwaardebreedten, dan moet de sterkteverhouding bij de getransponeerde klinker dezelfde zijn als die bij de niet-getransponeerde, wanneer de sterkteverhouding van de harmonischen althans weergegeven kan worden via een constante macht van hun rangnummer (zie hoofdstuk IV en V). De verhouding van de rangnummers van de harmonischen die een formant aantreffen is immers voor en na de transpositie dezelfde. Vóór de transpositie volgt het profiel van de totale modulatie, zie 4.7.3. uit $f(n)$. $A(\omega)$ en daarna uit $f(n)$. $A(a\omega) = b \cdot f\left(\frac{n}{a}\right)$. $A(\omega)$. In hoofdstuk IV gaat het om transpositie van de grondtoon, met behoud van de transmissiekromme en hier om transpositie van de transmissiekromme, met behoud van de grondtoon, waarvoor dezelfde theoretische overwegingen gelden.

Tot een scherp bepaalde conclusie op dit punt kunnen wij niet komen, omdat ons materiaal niet talrijk genoeg is. De analyse kostte te veel tijd. Met behulp van een simultaan analysator, zie ook 2.1.1., b.v. die van de A.G. Siemens en Halske, Freystedt (1935) of die van de N.V. Philips, Beljers (1942) zou een dergelijk statistisch onderzoek goed uitgevoerd kunnen worden, evenals met behulp van de Sound Spectrograph, KOENIG c.s. (1946).

Een algemene lijn valt echter wel te constateren. De verhouding van de amplituden van de hoge en de lage formanten is bij de getransponeerde klinkers kleiner dan bij de niet-getransponeerde, de hogere formanten nemen relatief sterker af bij de transpositie.

Dit kan wellicht voor een deel verklaard worden door de andere transmissiekromme. De lage formanten hebben geen of weinig neiging om sterker gedempt te worden, terwijl de hogere wel sterker gedempt zullen worden. Hier staat echter tegenover, dat een scherpe formant slecht te treffen is door een harmonische. Het afnemen van de amplitudo van een hogere harmonische door vibrato kan geen rol spelen, omdat het vibrato steeds zeer gering was.

Wanneer het spectrum van de generator weinig veranderd is, en er is geen reden om het tegendeel aan te nemen, hoewel in het algemeen bij ademing in lucht iets hogere formanten gemeten worden en de lagere inwendige weerstand van de generator kan bij deze frequenties praktisch geen rol spelen, dan blijft als enige conclusie, dat de afname van de harmonischen niet door een con-

stante macht van hun rangnummer voorgesteld kan worden, maar dat de absolute waarde van de exponent iets toeneemt met toenemend rangnummer. Veel behoeft dit echter niet te zijn, want de verhouding van de amplituden van de formanten week nooit sterker dan 40% af van die bij ademing in lucht.

Verder bleek bij ademing van lucht, dat de sterkteverhouding van de formanten niet voldoet aan de hypothese van DUNN, zie 4.6.3. Met name bij de e is er een zeer sterke hoge formant, bij omstreeks 2000 Hz.

Omdat de gelegenheid zich voordeed onderzochten wij ook nog enkele zangtechnische kwesties, hoewel de gebruikte methode van analyseren daarvoor zeer omslachtig is. Daarbij bleek, o.a., dat bij overgang van het borstregister naar het falsetregister de amplitudo van de hogere harmonischen zeer sterk afneemt en dat onervaren zangers zonder stemkwaliteiten meestal meer hogere harmonischen gebruiken dan ervaren zangers met een mooie stem. Vooral de sopraan A.M.-O., die een mooie warme stem heeft, vertoonde weinig hogere harmonischen.

6.4. Conclusies

1. Door de beschreven proeven is de opvatting van SAVART en GUILLEMIN, zie 2.2.4., over de stemvorming definitief weerlegd.

Andere argumenten tegen deze opvatting zijn a. De werkwijze van het strottenhoofd bij het belangrijkste register (borstregister) kan niet op ongedwongen wijze verklaard worden. b. De ruimte van Morgagni zou aangeblazen worden op de wijze van een lippenpijp. Deze pijpen spreken traag aan, zie F. TRENDELENBURG (1936), wat gemakkelijk te begrijpen is door het mechanisme van deze wrijvings- en spleettonen te beschouwen, zie KRUGER (1920), ANDERSON (1952), NYBORG c.s. (1953). Bij de stemvorming is het echter mogelijk, om een klinker practisch momentaan op te bouwen, zie BACKHAUS (1932), STEINBERG (1934) en W. TRENDELENBURG (1937).

2. De proeven over de transpositie van de klinker met behoud van de grondtonen zijn in overeenstemming met de opvatting over de bijdrage van het aanzetstuk (amplitudomodulatie) tot de modulatie zoals die in hoofdstuk II beschreven is en in de hoofdstukken IV en V onderzocht werd.

3. De resultaten zijn in overeenstemming met de in de hoofdstukken IV en V beschreven opvatting over de afname van de hogere harmonischen volgens een macht van hun rangnummers. Deze macht is wellicht niet geheel constant, maar iets toenemend in absolute waarde bij toenemend rangnummer.

4. De frequentiemodulatie is bij de transpositie practisch

dezelfde gebleven. Dit wekt geen verwondering, want hoewel de stoten door de stemspleet in een waterstof-zuurstof mengsel scherper zullen zijn dan in lucht is de inwendige weerstand van de stemspleet in dit mengsel relatief kleiner.

5. De frequenties van de formanten, zie tabel 5, zijn in overeenstemming met de waarden, die bij in de hoofdstukken IV en V beschreven proeven met proefpersoon S. gevonden waren.

6. De sterkteverhouding van de formanten is in overeenstemming met de verwachtingen op grond van de resultaten van de proeven met proefpersoon S. en dus niet in overeenstemming met de conclusie van DUNN (1950).

7. Met de bestaande apparatuur werden ook orienterende proeven genomen over enkele zangtechnische kwesties (Simultaanalysatoren lenen zich beter voor een dergelijk statistisch onderzoek). Het bleek, dat *a.* Ervaren zangers met een mooie stem in het algemeen minder harmonischen gebruiken dan onervaren zangers zonder stemqualiteiten en *b.* Bij de overgang van het borstregister naar het falsetregister neemt het aantal hogere harmonischen sterk af.

VII

R U I M T E V A N M O R G A G N I

Welke betekenis de ruimte van Morgagni volgens onze opvatting voor de stemvorming heeft, hebben wij reeds in het overzicht van de stemvorming, hoofdstuk II, aangegeven, zonder dit in detail te analyseren, zie 2.2.2. (Wij menen, dat deze gelegen is in het beïnvloeden van de frequentiemodulatie door het wegfilteren van de hogere harmonischen. Het spectrum van de generator, zoals dit toegevoerd wordt aan het aanzetstuk, zal afhangen van de instelling van de ruimte van Morgagni).

Nu door het in hoofdstuk IV beschreven onderzoek over de transmissiekromme van het aanzetstuk de grootte-orde van de impedantie van het aanzetstuk voor de frequenties van de formanten bekend is, wordt het mogelijk om onze opvatting nader uit te werken, 7.1. Het is tevens mogelijk om verschillende praktische kwesties op te helderen door uit te gaan van onze opvatting. Met name die van de bijdrage van de generator aan de verschillen van stemkwaliteit, 7.2. en die van het zacht en daarna hard zingen zonder het timbre te sterk te wijzigen, 7.3.

7.1. Filter voor de hoge harmonischen

Het tussen de ware en de valse stemplooiën ingesloten volume, zie ook fig. 2, gedraagt zich als een buffer voor de stootjes lucht, die tussen de ware stemplooiën doorgedreven worden.

De holte kan voorgesteld worden door een condensator en wegens de kleine afmetingen (klein ten opzichte van de beschouwde golf-lengten) is het geoorloofd om een blokelement te nemen. Het volume wordt algemeen op rond 1 cm^3 gesteld en de capaciteit C is dan (volgens 4.6.2.) $C = V / \rho c^2 = 1 / \rho c^2$. Bij een frequentie van 4000 Hz is de impedantie dan

$$- j. \rho c^2 / \omega = - j. \rho c . c / \omega, \text{ of rond } - j. 1,5 \rho c.$$

Wanneer wij voor de doorgang tussen de valse stemplooiën de schatting maken, dat deze een doorsnede heeft van 1 cm^2 en een lengte van 5 mm, dan bedraagt de impedantie bij een frequentie van 4000 Hz (volgens 4.7.2.)

$$+ j. \rho c . l. \omega / 0 c \text{ of rond } + j. 0,3 \rho c.$$

De impedantie van de holte is dus van dezelfde orde van grootte als de ingangsimpedantie van het aanzetstuk bij de formanten

en die van de doorgang is bij deze graad van vernauwing ruwweg een factor 10 kleiner.

Wanneer wij aannemen, dat de wanden van de holte van Morgagni bij deze hoge frequentie practisch niet meetrillen, dan is het mogelijk om de filterwerking exact uit te drukken. Bij een impedantie van het aanzetstuk gelijk aan $p \cdot \rho c$ is de volume-snelheid I aan de ingang dan namelijk gelijk aan de volumesnelheid I_0 van generator vermenigvuldigd met een factor

$$\frac{-j \cdot 1,5 (+ j \cdot 0,3 + p) \rho c}{-j - 1,5 + j \cdot 0,3 + p} \cdot \frac{1}{(+ j \cdot 0,3 + p) \rho c} = \frac{-j \cdot 1,5}{-j \cdot 1,2 + p}$$

Voor $p = 3$ is dit ongeveer 0,5. I_0 , tegenover I_0 wanneer de holte niet bestond.

Wanneer het volume van de holte groter wordt, door het iets omhoog te trekken van de valse stemplooiën, eventueel gepaard met een verdere vernauwing van de doorgang, dan zal de filterwerking toenemen.

7.2. Kwaliteit van de stem

Het probleem van de oorzaken voor de verschillende stemkwaliteiten heeft ons al enkele malen bezig gehouden, zie hoofdstuk IV, V en VI.

Met het bovenstaande, 7.1., over de filterende werking van de ruimte van Morgagni, toonden wij o.i. aan, dat de afmetingen en de instelling van deze ruimte invloed hebben op het spectrum, dat aan het aanzetstuk wordt toegediend. Het verband met de stemkwaliteiten zien wij gelegen in de resultaten van WINCKEL (1952), die constateerde, dat de mooie stemmen in het algemeen slechts een gering aantal harmonischen gebruikten. Een ervaring, die in overeenstemming is met ons eigen (beperkte) materiaal.

Voor het onderdrukken van de hogere harmonischen zijn verschillende methoden toe te passen, zie hoofdstuk IV. Hier interesseert ons speciaal de bijdrage van de ruimte van Morgagni. Deze moet zeker in staat geacht worden, 7.1. om de ongewenste hogere harmonischen weg te werken. Door de filterwerking en tevens door het uitdoven van de wervels, die ontstaan bij het stootsgewijs uitdrijven van de lucht.

Een steun voor deze opvatting zien wij gelegen in een opmerking van ZIMMERMANN (1938), die een onderzoek uitvoerde naar de lengte van de ware stemplooiën bij zangers en zangeressen. Terloops zegt deze daarbij namelijk (blz. 130) „Hervorzuheben ist noch die Beobachtung, dasz bei guten Stimmen jeglicher Stimmgattung ein ausgeprägter, weit klaffender, Sinus Morgagni vorhanden war”.

Een dergelijke holte van grote afmetingen zal ideaal zijn, wanneer het onderdrukken van hogere harmonischen noodzakelijk wordt. Deze blijven dan een interne aangelegenheid van de holte. (Dat de valse stemplooiën wijd geopend waren zal samenhangen met het door ZIMMERMANN uitgevoerde onderzoek. De plooiën moesten goed zichtbaar zijn en de proefpersonen zullen daaraan voldaan hebben).

Het zal interessant zijn om onze opvatting over het effect van de ruimte van Morgagni nader te toetsen bij proefpersonen met goede en met lelijke stemmen. De Röntgen-beeldversterkers openen hier talrijke mogelijkheden.

De waarnemingen van LUCHSINGER (1951^b) wijzen er op, dat de ruimte van Morgagni van belang is bij de stemvorming.

Men kan ook verwachten, dat een zanger(es) met een mooie stem en een flinke dynamiek en expressie een ruim gebruik zal maken van de verschillende graden van vernauwing tussen de valse stemplooiën.

Onder pathologische omstandigheden kan de vernauwing zelfs zo sterk worden, dat de valse stemplooiën in trilling gebracht worden door de uitademingslucht. Deze plooiën zijn dan dikwijls sterk verdikt en de opening ertussen is zo klein, dat de ware stemplooiën bij het keelspiegelen niet gezien worden, OSWALD (1939).

Bij een dergelijke sterke vernauwing, ook wanneer deze iets hogerop wordt aangebracht, zal de weerstand voor de luchtstroming sterk toenemen en het gevolg is, dat de stoten meer afgevlakt worden. Daardoor neemt dan ook de kracht die de stemplooiën weer teruggedrijft af (Bernoulli-effect wordt kleiner). Dit zal invloed hebben op de trillingswijze van de plooiën en wij achten het mogelijk dat de zgn. paradox de Tarneaud, 2.4.2., voor het overgrote deel hieraan zijn ontstaan te danken heeft.

7.3. Geluidsvolume en timbre

Wanneer een klinker gezongen wordt op constante toonhoogte en met een geluidsvolume dat toeneemt van klein tot groot (zwelltoon), dan verandert het spectrum van de generator. Afgezien van individuele verschillen kan gezegd worden, dat de hogere harmonischen relatief sterker worden, zie 4.7.3.

Dit constateert men aan de modulatie van het uitgaande mengsel en het wordt veroorzaakt door het scherper worden van de stoten door de stemspleet.

De ruimte van Morgagni is nu bij uitstek geschikt om bij het toenemen van het geluidsvolume er voor te zorgen, dat het timbre

niet te sterk verandert. Door het wat extra onderdrukken van de hogere harmonischen wordt de sterkte van de lagere harmonischen (die via de lagere formanten de soort van de klinker bepalen) namelijk praktisch niet aangetast. Er kan door bereikt worden, dat de afname van de harmonischen (die mede de kwaliteit van de klinker bepaalt) eerst bij een harmonische met een wat hoger rangnummer inzet.

In het extreme geval wordt de harde, metalen stem gemaakt, die zeer rijk is aan hogere harmonischen. De omstandigheden waaronder dit gebeurt achten wij een bevestiging voor onze opvatting over de functie van de ruimte van Morgagni. De valse stemplooien worden dan namelijk naar beneden gedrukt en zij leggen zich daarbij tegen de wanden van de holte, tot ze op de buitenranden van de ware stemplooien drukken. De ruimte van Morgagni verdwijnt daarbij, zodat de hogere harmonischen niet meer weggefilterd worden.

Bij een normaal gesprek lopen de geluidsvolumina van de verschillende deelnemers gewoonlijk vrij sterk uiteen (zie 4.7.3. voor de afhankelijkheid van de grondtoon), terwijl de luide stemmen toch niet scherp behoeven te zijn. Ook hierbij zal de ruimte van Morgagni een rol spelen. Het is namelijk niet te verwachten, dat de verbruikte volumina lucht evenredig zijn met de geluidsamplituden, die de verschillende sprekers veroorzaken. Het grotere geluidsvolume moet dus verkregen worden, door een geschiktere frequentiemodulatie, d.w.z. door scherpere stoten lucht uit te drijven, maar dan leveren de hogere harmonischen weer gevaar op voor het timbre.

Het is onwaarschijnlijk, dat de verschillende geluidsvolumina gecorreleerd zouden zijn met gemiddeld verschillende halfwaardebreedten (evenredig met de demping). Bij een afname van de halfwaardebreedte zou de maximale amplitudo namelijk wel toenemen, maar 1^e de toelaatbare snelheid van spreken is recht evenredig met de gemiddelde halfwaardebreedte, 2^e de kans op het treffen van een formant wordt kleiner en gezien het altijd aanwezig vibrato zou de gemiddelde amplitudo daardoor toch weer afnemen en 3^e bij gemiddeld kleinere halfwaardebreedten zouden de amplituden in het uitgaande mengsel gedurende het uitspreken van b.v. een klinker sterker wisselen wanneer de grondtoon iets verandert en dit zou een zeer ongewenste dynamiek opleveren.

Behalve de andere frequentiemodulatie zien wij nog als een mogelijke verklaring voor de verschillende geluidsvolumina het spreken met gemiddeld wijder geopende mond, omdat daardoor een relatief groter gedeelte van de energie van de lage formanten (die de soort van de klinker bepalen) nuttig gebruikt wordt, zie ook 4.7.3.

7.4. Conclusies

1. Door de ruimte van MORGAGNI en de daarop volgende vernauwing door de valse stemplooien kunnen de hoogste harmonischen onderdrukt worden.
2. Dit is afhankelijk van de instelling van deze ruimte en daardoor continu variabel.
3. Er wordt verband gelegd met de kwaliteit van de stem en hiervoor zijn ook argumenten in de literatuur te vinden.
4. Er wordt verband gelegd met het handhaven van het timbre bij verandering van het geluidsvolume.

V I I I

THEORIE "NEURO-CHRONAXIQUE" VAN HUSSON

In Frankrijk is een nieuwe opvatting over de stemvorming gelanceerd, Husson (1950), die om verschillende redenen de aandacht verdient.

Niet, omdat deze een betere verklaring zou geven van de waargenomen verschijnselen, integendeel, maar de theorie, die voor velen aantrekkelijke kanten heeft, b.v. KAGEN en LUCHSINGER (1953), is afkomstig van een vooraanstaand lid van een tegenwoordig belangrijke en invloedrijke groep en het is zaak om deze theorie zo spoedig mogelijk op te geven, omdat er slechts verwarring door gesticht kan worden.

De bestrijding (waarbij gebruik wordt gemaakt van argumenten, die aan hoofdstuk II ontleend worden) verdelen wij over een aantal punten. In de eerste plaats releveren wij de bezwaren die Husson aanvoert tegen de in hoofdstuk II beschreven opvatting, dat het gaat om de wisselwerking tussen de door de longen geleverde druk onder de stemspleet en de elastische stemplooiën, welke opvatting daar nader werd uitgewerkt, 8.1. Deze bezwaren worden in extenso weergegeven, 1^e om Husson recht te doen, 2^e omdat het een welkome gelegenheid biedt om nader in te gaan op enkele praktische kwesties, en 3^e omdat de bezwaren ook los gedacht kunnen worden van de door Husson gepropageerde opvatting. In 8.2. worden deze argumenten van Husson dan ontzenuwd, waarbij wij tevens een nieuw type koppeling op het spoor komen. De theorie van Husson en de weerlegging daarvan volgt daarna in 8.3., gevolgd door de conclusies, 8.4.

8.1. Bezwaren van Husson tegen de globale theorie over de stemvorming

Les insuffisances et les incompatibilités de la théorie myoélastique actuelle.

§ 96. 1^o Les difficultés commencent dès que l'on veut, dans cette théorie, expliquer la possibilité d'émettre un son filé, c'est-à-dire un son passant du *piano* au *forte* et réciproquement, en faisant successivement croître et décroître la pression sous-glottique. Si l'on invoque un accroissement et une décroissance concomitantes de la contraction interne de la corde vocale conformes à l'observation, le son émis doit monter puis descendre.

NADOLECZNY admettait même que la contraction du thyro-aryténoïdien interne devait varier en sens contraire de la pression sous-glottique! D'autre part, si cette contraction ne varie pas, l'amplitude de la vibration, faible dans le *piano*, doit croître dans le *forte*: or l'observation directe montre le contraire (Obs. 1 et 2) en voix de poitrine.

2° Mêmes difficultés pour expliquer que l'on peut chanter, *piano* dans l'aigu, c'est-à-dire avec une pression sous-glottique relativement faible. L'observation montre que la contraction du sphincter glottique est considérable dans l'aigu. Une telle contraction nécessite, dans la théorie myoélastique, une pression sous-glottique proportionnée pour mouvoir les cordes vocales. Alors, comment peut-on chanter *piano* dans l'aigu, comme le réalisent tous les chanteurs exercés?

3° a. Difficultés de même nature pour expliquer comment un larynx peut émettre, en voix de poitrine, des sons de hauteurs différentes portant facilement sur deux octaves. La théorie myoélastique admet une „contraction progressive” des thyro-arténoïdiens internes. Mais que faut-il entendre par là, physiologiquement parlant? S'il s'agit du muscle dans sa totalité, la conciliation de ce fait avec la loi du „tout ou rien” risque d'offrir des difficultés. Si c'est le nombre des fibres intéressées par cette contraction qui croît du grave à l'aigu, on peut penser qu'une variabilité aussi rigoureusement échelonnée du grave à l'aigu cadre mal avec les conditions anatomiques connues de l'innervation de ce muscle.

b. Et enfin, en supposant cette difficulté vaincue, comment expliquer que le chanteur puisse réaliser couramment une attaque de son à une hauteur voulue avec une précision aussi constante? Lorsqu'il désire attaquer un *ré*³ par exemple, l'erreur tonale ne dépasse jamais 3 ou 4 vibrations en général, ce qui, dans la théorie myoélastique, supposerait la réalisation volontaire immédiate de contractions de thyroaryténoïdien interne extraordinairement nuancées en intensité. Et pourquoi une telle réalisation, à supposer qu'elle soit, possible, serait elle sous la dépendance de la mémoire auditive du sujet (§ 92)?

4° L'observation montre que, en voix de fausset, le thyroaryténoïdien interne n'est pas contracté, ou que, s'il l'est, il ne saurait l'être que très-faiblement ou partiellement. Dans la théorie myoélastique, les sons émis dans ces conditions devraient être très-graves, beaucoup plus graves qu'en voix de poitrine. L'expérience montre le contraire.

5° Dans le même ordre d'idées, l'observation médicale courante montre que toute hypotonie, même forte, du thyro-aryténoïdien interne, - et j'ai indiqué qu'il fallait voir sous cette terminolo-

gie un *affaiblissement de la contractibilité volontaire* (§§ 72 et 73) -, s'accompagne d'une altération du timbre de la voix, mais pas de la hauteur. Pourquoi la hauteur du son ne baisse-t-elle pas dans de tels troubles?

6° a. J'ai montré que, pendant la phonation, le résonateur pharyngo-buccal exerce une réaction considérable sur la vibration des cordes vocales. L'observation stroboscopique directe la montre déjà (§§ 24 à 28), et des expériences diverses l'accusent (§§ 82, 83 et 88 à 91). TARNEAUD a même montré qu'elle pouvait être génératrice de troubles de motilité des cordes vocales, bien appréciables au laryngo-stroboscope.

b. Or, par les travaux de TRENDELENBOURG & WULLSTEIN, d'une remarquable qualité expérimentale, on voit que la réaction d'un résonateur sur des modèles mécaniques d'anches à bourrelets fonctionnant rigoureusement selon le schéma de la théorie myoélastique du larynx, était nulle.

c. Comme les expériences de TRENDELENBOURG & WULLSTEIN sont inattaquables du point de vue de la garantie scientifique, on est forcé de conclure que les cordes vocales, sur l'être vivant, obéissent à *une dynamique d'une nature différente* de celle des larynx artificiels de TRENDELENBOURG & WULLSTEIN, même constitués avec des préparations anatomiques tirées de larynx humains ou de veaux.

7° La théorie myoélastique a besoin, pour expliquer la *mise en vibration* des cordes vocales, d'une conclusion préalable de la glotte destinée à permettre une élévation suffisante de la pression sous-glottique. Or l'observation normale montre que les cordes vocales peuvent se mettre à vibrer sans qu'elles soient en position médiane d'accolement (§41), et l'observation des parésies de l'aryténoïdien le montre également.

8° Les expériences que j'ai réalisés avec le Dr GARDE (§§ 64 à 68) ont montré qu'une cocaïnisation poussée du thyro-aryténoïdien interne et du vestibule laryngé ne supprime pas la production vocale: si le timbre est très-altéré et l'émission des sons ouverts rendue difficile. Les cordes vibrent sur toute l'étendue du clavier vocal à la hauteur désirée par le sujet, ce qui prouve que le mécanisme intime de leur mise en vibration n'est pas encore sensiblement atteint.

Ce fait est incompatible avec la théorie myoélastique classique; car, dans son schéma explicatif, une cocaïnisation aussi poussée du thyro-aryténoïdien interne rendrait la vibration impossible au moins dans le grave, et possible seulement éventuellement dans l'aigu sous un excès de stimulation nerveuse. Or rien de tel n'apparaît, et c'est plutôt l'émission des son aigus qui est rendue plus difficile et qui est récupérée en dernier, encore qu'elle reste toujours possible.

9° Comment expliquer, dans la théorie myoélastique, que la hauteur du son se modifie sous l'assourdisseur, et surtout que l'attention et la mémoire *auditives* puissent empêcher cette modification en l'absence de tout contrôle sensoriel auriculaire?

10° Comment expliquer, dans le théorie myoélastique, qu'une corde vocale puisse être immobile pendant la phonation, et en position médiane, sans aucune modification de son aspect extérieur, tandis que sa congénère vibre normalement (§ 70)? Et comment expliquer que la vibration des deux cordes puisse être supprimée alors que, d'autre part, celles-ci se contractent normalement et viennent s'accoler en position d'adduction phonatoire normale?

11° Comment expliquer, dans la théorie myoélastique, que les cordes vocales puissent vibrer avec une différence de phase de l'ordre d'une demi-période (vibrations alternées d'OERTEL et de WEISS, § 49)?

Dans ce mode vibratoire, la corde vocale gauche s'écarte de la ligne glottique médiane, tandis que la droite s'en rapproche et, inversement, la corde droite s'en écarte lorsque la corde gauche s'en rapproche. Ce mode vibratoire est totalement inexplicable à l'aide de la thèse classique de la vibration des cordes vocales par un conflit d'ordre élastique au niveau de la glotte. Dans la thèse classique, en effet, on ne comprend nullement comment une corde vocale pourrait s'écarter de la ligne glottique médiane sous l'influence de la pression sous-glottique, alors que l'autre s'en rapprocherait.

8.2. Weerlegging van deze bezwaren.

1^e. Het zingen met klein of groot geluidsvolume bij dezelfde toonhoogte kan op verschillende manieren gebeuren. In de eerste plaats op de manier, die Husson verwerpt op grond van een enkele proef bij zichzelf. Dit is de manier, waarop onervaren zangers het doen. De spanning van de plooien blijft vrijwel dezelfde of wordt kleiner en de amplitudo neemt toe van klein naar groot geluidsvolume. Ervaren zangers doen het echter anders, de spanning neemt toe en men ziet, dat de amplitudo kleiner wordt bij groter geluidsvolume. De film van BELL (1940) geeft van beide gevallen een voorbeeld en in de literatuur worden ze ook beschreven.

Wij menen dit te kunnen verklaren door aan te nemen, dat met het toenemen van de spanning in de lengterichting de plooien ook steviger tegen elkaar gedrukt worden. Daardoor zal de druk onder de stemspleet eerst verder opgebouwd moeten worden voordat deze in staat zal zijn om de plooien uit elkaar te drukken. Deze opvatting wordt bevestigd door de beschrijving van het experiment

met Husson zelf, blz. 8. „Dans la phase de fermeture de la glotte, l'accolement des cordes, faibles dans le piano, devient plus marqué et plus long dans le son forte”.

Dat dit naar elkaar toe gaan een volkomen physiologisch verschijnsel is blijkt wel uit de gang van zaken bij een kuch. Dan worden zij zeer sterk tegen elkaar gedrukt, veel meer dan hier nodig is. (Bij Husson's eigen opvatting zou men moeten aannemen, dat een en hetzelfde vezeltje zowel voor het krachtig samentrekken als het krachtig strekken gebruikt wordt, wat physiologisch onmogelijk is.)

2^e. Het zacht zingen op hoge toon levert op grond van het bovenstaande geen moeilijkheden op. De plooiën zijn wel sterk gespannen in de lengterichting, maar zij worden haast niet tegen elkaar gedrukt in de ruststand.

3^a. De alles of niets wet geldt slechts voor de afzonderlijke spiervezels. Het zeer geleidelijk toenemen van de spanning in de lengterichting, wanneer men van de lage naar de hoge tonen overgaat, komt op rekening van hetaantal spiervezels dat bij de actie betrokken wordt. Bij andere spieren wordt dit steeds waargenomen en deze variabiliteit is niets bijzonders voor de spier van de plooiën (zie b.v. RUSSELL 1931^a). Husson zelf acht ze bovendien tot nog heel andere prestaties in staat, zie 8.3.

3^b. Dat een zanger in staat is om zo goed een voorgeschreven toon te treffen is inderdaad verbazingwekkend. Er blijkt duidelijk uit, dat de stem tenslotte van centrale oorsprong is en dat het stemapparaat een hulpmiddel is. De grootheid en almacht van den Schepper zien wij ook hierin bevestigd.

Het is allerminst noodzakelijk om met Husson, zie 8.3., het bestaan aan te nemen van „wisselspanningen” van centrale oorsprong met de frequentie van de grondtoon, die de stemplooiën in deze frequentie zouden open trekken. Waarom zouden deze overigens de verlangde frequentie zo goed treffen?

Waarom het verwondering zou wekken dat dit vermogen afhankelijk is van de goede functionering van het gehoororgaan ontgaat ons.

4. Haast iedere onderzoeker heeft zijn eigen definitie van het begrip falsetstem (wat mede veroorzaakt zal zijn door het geringe aantal proefpersonen) en Husson ontkomt daar niet aan. Gewoonlijk denkt men bij falset aan de stemvorming bij de hogere tonen, zie ook hoofdstuk II, waarbij de stemplooiën wel degelijk sterk gespannen moeten worden. Dit constateert Husson trouwens ook zelf, § 16.

De zogenaamde tegenspraak berust op een uitbreiding van de definitie, die gebaseerd zal zijn op gelijkblijven van het timbre. Bij enkele proeven met HUSSON als proefpersoon, § 16, werd name-

lijk geconstateerd, dat het bij de lage grondtonen ook mogelijk is om de plooiën te laten trillen terwijl de stemspleet steeds geopend blijft en met een amplitudo, die groter is dan bij de overeenkomstige grondtoon in het borstregister.

Het cardinale punt is echter, en HUSSON heeft dit niet gezien, dat het geluidsvolume dan bij het falset klein is en dat het niet mogelijk is om een zweltoon te maken, terwijl het geluidsvolume in het borstregister groot is. De overeenkomstige luchtdrukken bij de stemspleet verhouden zich op dezelfde wijze. De verklaring is dus dezelfde als die onder punt 1.

5. Wanneer de plooiën van een patient slapper zijn dan normaal blijkt het toch mogelijk te zijn om hoge grondtonen te bereiken. (Wat was normaal?) Gezien het bovenstaande, punt 1 en punt 4, is dit niet wonderlijk, wanneer men weet, dat de amplituden dan gemiddeld groter zijn en dat er geen dynamiek meer mogelijk is.

6^a. Het effect van de terugkoppeling van het aanzetstuk op de stemplooiën wordt door HUSSON overschat. De aangehaalde experimenten zijn niet overtuigend.

6^b. W. TRENDELENBURG en WULLSTEIN (1935) voerden geen proeven over de terugkoppeling uit. Zij onderzochten de trilling van de plooiën, de diameter van de stemspleet en de modulatie van het uitgangssignaal, zonder een aanzetstuk te maken met een lage formant, waarop een lagere harmonische afgestemd kon worden. Zij zeggen daarom wel, p. 418, dat „unter den vorliegenden Versuchsbedingungen die Rückkoppelung zwischen Luftschwingung und Stimmlippen fehlt oder verschwindend gering ist“, maar dit slaat eigenlijk op het zgn. klinkerpatroon in het strottenhoofd.

6^c. MÜLLER (1939), (een leerling van Trendelenburg), onderzocht met modellen het effect van de koppeling wanneer de omstandigheden goed gekozen werden en vond toen dezelfde resultaten als bij het natuurlijke aanzetstuk.

7. Het is onjuist, dat de in hoofdstuk II beschreven opvatting het sluiten van de stemspleet voor het inzetten van de toon nodig heeft. TRENDELENBURG en WULLSTEIN vonden bij hun proeven reeds dat een voorafgaande sluiting niet nodig was en WETHLO (1939) constateerde hetzelfde bij zijn model (stuk binnenband van fiets).

8. De verdoving van de stemplooiën door de cocaïne is waarschijnlijk niet voldoende geweest. Een controle werd er ook niet op uitgeoefend.

Als argument is het echter uiterst merkwaardig, omdat de theorie van HUSSON zelf, zie 8.3., er volkomen door weerlegd zou worden! Dat ziet hij zelf later ook wel in, § 112, „Enfin la cocaïnisation profonde du thyro-aryténoïdien interne ne supprime pas la stimulation“.

9. Het is vanzelfsprekend, dat stemvorming moeilijk wordt wan-

neer de grondtoon komt in een gebied, waarvoor het eigen gehoor slecht is, of wanneer een maskerend lawaai wordt toegevoerd, en dat door het speciaal aanleren van een zekere techniek dit gebied toch gebruikt kan worden, ook zonder de waarneming door het gehoor.

10. Het betreft hier (een tweetal) gevallen van personen, die aan één zijde zeer sterk verlamd waren door een aandoening van de hersenschors. De stemplooi aan die zijde trilde niet bij het vormen van de stem, maar bewoog zich evenmin bij de ademhaling. Tevens was er een hoogteverschil tussen de plooiën. De patiënten konden slechts één toonhoogte produceren.

Het resultaat van deze proeven wekt geen verwondering. De verlamming is blijkbaar zo sterk, dat de betreffende plooi niet gespannen kan worden en zijn impedantie is dus zeer veel groter dan die van de andere.

De laatste zin van het citaat wordt weerlegd door het onder 1 en 4 besprokene.

11. Het betreft hier zeldzame gevallen, waarvan het door WEISS geconstateerde nader wordt aangehaald. De patient leed aan een verouderde ontsteking van de slijmvliezen van het strottenhoofd, nog gecompliceerd door een gedeeltelijke verlamming van de spieren van de stemplooiën en die tussen de ary-kraakbeentjes.

Het merkwaardige phenomeen kan o.i. verklaard worden door aan te nemen, dat de stemplooiën niet geheel op dezelfde frequentie zijn afgestemd, en uiteenlopende dempingsfactoren bezitten, wat onder de genoemde omstandigheden zeer goed mogelijk is. In dit geval krijgt men namelijk te doen met 2 systemen met iets verschillende frequentie, die sterk aan elkaar gekoppeld zijn door de lucht in de stemspleet. Degene die het zwakst gedempt is, zie 2.4.1. moet dan beschouwd worden als de primaire, die de sterker gedempte met zich mee sleept, waarbij dan een faseverschil moet optreden, dat zal afhangen van de mate waarin de plooiën uiteenlopen. (OERTEL vond faseverschillen tot $\frac{1}{2}$ periode en ongelijke amplituden).

Wij beschouwen deze gevallen dan ook als een illustratie van een nieuw type koppeling, namelijk van de stemplooiën aan elkaar, die onder bijzondere omstandigheden aanleiding geeft tot karakteristieke effecten, juist zoals de koppeling van het aanzetstuk aan de stemplooiën.

(Bij de uitwerking van zijn eigen theorie komt HUSSON niet meer terug op dit geval. Hij is dan gedwongen om aan te nemen, dat de „wisselspanningen” naar de vlak bij elkaar gelegen plooiën dit faseverschil vertonen.)

8.3. Theorie van Husson.

De bezwaren van Husson, 8.1., zijn geen van alle steekhoudend, zoals wij aantoonen in 8.2., omdat zij terug te voeren zijn tot wanbegrip over de physica van de trillende plooiën.

Zij waren echter aanleiding voor hem tot het lanceren van een eigen theorie, de zogenaamde theorie „neuro-chronaxique”, waarbij een zeer onwaarschijnlijke en niet-physiologische besturing van de plooiën wordt aangenomen, zonder dat deze door experimenten getoetst wordt.

Husson neemt namelijk aan, dat de plooiën uit elkaar gaan, onder de invloed van de prikkeling van de zeer dunne spiervezeltjes, die zich loodrecht op de lengterichting in de plooiën bevinden. Deze zijn door verschillende anatomen en o.a. ook door RusSEL (1931^a) beschreven en hun functie is gelegen in het afronden of het scherp maken van de randen van de plooiën, waardoor ze een rol spelen bij het reeds eerder genoemde klinkerpatroon.

Husson neemt echter aan, dat deze spiervezeltjes geprikkeld worden en zich dan samentrekken met de frequentie van de grondtoon en dat, § 103, „Sous cette action, la phase s'ouverture doit au moins s'amorcer, et l'air qui pénètre sous pression dans cette fente ajoute sa propre pression pour achever la phase d'ouverture de la glotte et porter chaque corde à son élongation maximum”. De terugkeer van de plooiën laat Husson dan weer volledig door de elasticiteit en de spanning gebeuren.

Het enige verschil met de theorie van hoofdstuk II is dus, dat Husson de plooiën laat opengaan door een klein rukje (waarvoor echter grote krachten nodig zijn) in dwarse richting, door de prikkeling van de dwarse spiervezeltjes. De grote luchtdruk onder de stemspleet voor het opengaan zou dus n.b. niet in staat zijn om de plooiën uit elkaar te drukken, maar de dalende luchtdruk (wanneer de lucht ontsnapt) zou de plooiën wel maximaal uit elkaar kunnen drijven. Om in overeenstemming te komen met de waargenomen verschijnselen moet verder ook aangenomen worden, dat de luchtdruk en niet de samentrekking van de spiervezeltjes de amplitudo bepaalt.

De rhythmische prikkeling zou van centrale oorsprong zijn (neuro-) en mogelijk worden door een ad hoc aangenomen uiterst kleine chronaxie van de spiervezeltjes (-chronaxique). De waargenomen grondtonen lopen namelijk uiteen van omstreeks 45 tot 2000 Hz en Husson wil ook de hoogsten, die niet anders zijn dan wrijvings- of spleettonen, op deze wijze verklaren, hoewel met behulp van een stroboscoop geen trilling gezien wordt.

Dergelijke hoge frequenties zijn nooit waargenomen bij de prikkeling van spieren en zij moeten uitgesloten geacht worden.

HUSSON beroept zich op (voorlopige) experimenten van LINDEMANN (1930) met het strottenhoofd van honden, waarbij deze van een zenuw „oscillations régulières” afleidde, met de frequentie van de grondtoon van het geproduceerde geluid.

HUSSON onderneemt echter zelfs geen poging om te bewijzen, dat het omgekeerde opgaat, d.w.z. dat de stemplooiën bij prikkeling met een dergelijke uiterst hoge frequentie in dit rythme in dwarse richting gaat contraheren.

Aan de hand van de beknopte beschrijving (het betreft een voorlopige mededeling) achten wij het mogelijk, dat het hier ging om een nog nooit als zodanig beschreven microphonisch effect van de stemplooiën.

Bij HUSSON's theorie, die door geen enkel experiment noodzakelijk wordt gemaakt en die op geen enkel experiment gebaseerd is, wordt dus van de centrale functie verlangd, dat deze 1^e. Zorg draagt voor prikkeling van de spiervezels in de lengterichting, die een constante spanning moet opleveren en 2^e. De spiervezels in dwarse richting rhythmisch laat contraheren met de frequentie van de grondtoon.

De in hoofdstuk II beschreven opvatting verlangt slechts een gemiddelde spanning van de stemplooiën in de lengterichting, zonder dat de toegevoerde prikkels *exact* (wat niet-physiologisch is) in het rythme van de grondtoon behoeven te komen, wat men ook bij geen enkel ander orgaan heeft waargenomen. Bovendien zijn bij HUSSON's opvatting de dwarse spiervezeltjes niet meer beschikbaar voor het veranderen van het klinkerpatroon.

Het aanvaarden van de niet-physiologische hypothese van HUSSON zou ook een gekunstelde verklaring verlangen voor verschillende verschijnselen, b.v. de koppeling, het onderscheid van de stemligging van man en vrouw en dat men de stemplooiën niet „stil” kan laten zingen. Zonder lucht door te persen raken de stemplooiën namelijk niet in trilling.

8.4. Conclusies.

1. De bezwaren van HUSSON tegen de opvatting, dat de stem ontstaat door de samenwerking van luchtdruk en elastische stemplooiën, worden weerlegd door de nadere analyse en precisering van deze opvatting, uitgaande van de theorie in hoofdstuk II.
2. De hypothese van HUSSON is niet-physiologisch en verlangt een niet te realiseren frequentie en nauwkeurigheid van de prikkeling van de spiervezeltjes, die in dwarse richting in de stemplooiën verlopen.
3. De functie van deze spiervezeltjes is gelegen in het afronden

of het scherp maken van de randen van de stemplooiën, waardoor ze een rol spelen bij het zogenaamde klinkerpatroon.

4. De hypothese van HUSSON levert moeilijkheden op bij de verklaring van b.v. de koppeling, de stemligging en de onmogelijkheid van het „stil” zingen van de stemplooiën.

5. De hypothese van HUSSON is gevaarlijk, omdat deze bij pathologische afwijkingen in de functionering van het strottenhoofd de primaire oorzaak laat zoeken bij een afwijking in de strenge periodiciteit van de toegevoerde prikkels.

6. De experimenten van LINDEMANN (1930) openen de mogelijkheid van het bestaan van een microphonisch effect van de stemplooiën.

7. Het door OERTEL en WEISS in enkele gevallen geconstateerde faseverschil tussen de trillende stemplooiën moet verklaard worden als het gevolg van een nieuw type koppeling, namelijk van de stemplooiën aan elkaar.

S A M E N V A T T I N G

De beschreven onderzoeken hadden tot doel om te komen tot een uitgewerkte, sluitende en fysisch gefundeerde theorie over de stemvorming, uitgaande van de eigenschappen van het strottenhoofd en van het aanzetstuk. De bruikbaarheid van de theoretische resultaten is gebleken bij de verklaring van verschillende praktische problemen.

Het verslag richt zich niet uitsluitend en zelfs niet in de eerste plaats tot de physicus. Het was namelijk de bedoeling om in de eerste plaats de man van de praktijk, de geïnteresseerde phoneticus en clinicus, te bereiken. Verschillende resultaten zijn tevens van belang voor de communicatietechnicus.

Men kan dit een uiting achten van de tegenwoordig steeds groeiende belangstelling van de physicus voor de problemen van de medische wetenschap, wat reeds geleid heeft tot de algemeen aanvaarde term medische-physica. Gehoopt wordt, dat de inherente gevaren (zie het citaat op blz. 3) hierbij vermeden zijn.

De belangrijkste resultaten worden in systematische volgorde weergegeven in het „systematisch overzicht”, blz. 171 tot 176.

Het beoogde doel is nagestreefd door proeven, berekeningen en theoretische beschouwingen. Proeven met een patient met een hemilaryngectomie, fig. 4 en 5, en met normale zangers, die afwijkende gasmengsels ademden. Berekeningen over modellen, over het aanzetstuk en over het strottenhoofd. Theoretische beschouwingen, naar aanleiding van deze proeven en berekeningen en gegevens uit de literatuur en over verschillende bijzonderheden, die in de literatuur vermeld worden. Hiervan wordt verslag gegeven in de hoofdstukken I t/m VIII.

Hoofdstuk I geeft een inleiding. Na enige algemene beschouwingen, waarbij gewezen wordt op de oorzaken van de moeilijkheden bij de verklaring van de stemvorming, namelijk de ontoegankelijkheid van het strottenhoofd, de zeer uiteenlopende verhouding van de golflengten tot de afmetingen van het aanzetstuk en de aandrijving van het strottenhoofd met hetzelfde medium waarin ook het geluid ontstaat, wordt de anatomie en de functie van de bij de stemvorming betrokken organen in het kort besproken. Daarna volgen inleidende opmerkingen over de stemvorming, waarbij ter sprake komen de modulatie, de verschillen tussen de spraekstem en de zangstem, abnormale methoden voor het vormen van de stem, het horen van de eigen stem, wat zo belangrijk is in verband met de allesbeheersende centrale functie, de gebruikelijke energieën, de spectrale verdeling en de verdeling om het eigen hoofd, waardoor de orientatie van de microfoon t.o.v. de spreker belangrijk is.

Hierna wordt de probleemstelling aangegeven. Er wordt op gewezen, dat men bij het onderzoek naar het karakter van de stemvorming kan uitgaan van de lang aangehouden, gedragen klinkers, hoe belangrijk de medeklinkers en de snelle, gesproken klinkers ook mogen zijn in verband met de informatie, die gelegen is in de gemoduleerde luchtstroom. Een definitie van de klinker wordt niet gegeven, omdat dit (nog) niet mogelijk is.

Hoofdstuk II geeft een uitgewerkte en naar wij menen sluitende en fysisch gefundeerde theorie van de stemvorming. Wat de opzet betreft heeft dit hoofdstuk het karakter van een monografie. Bij de opbouw van de theorie wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de eigen onderzoekingen, die hoofdzakelijk in de volgende hoofdstukken beschreven worden en van de gegevens uit de Duitse, Angelsaksische, Japanse, Nederlandse en Franse literatuur, die kritisch besproken worden.

De waargenomen verschijnselen worden besproken aan de hand van een indeling, waarbij de uiteindelijke modulatie van de luchtstroom opgevat wordt als het product van de frequentiemodulatie (F.M.) door het strottenhoofd, de amplitudomodulatie (A.M.) door het aanzetstuk en de koppeling (K.) door de terugwerking van het aanzetstuk op het strottenhoofd. Deze factoren worden afzonderlijk behandeld, waarbij het blijkt, dat in het bijzonder de koppeling en de daarmee samenhangende verschijnselen nog nooit goed begrepen waren. In kwantitatief opzicht was echter ook over de amplitudomodulatie en de frequentiemodulatie vrijwel niets bekend. Ook wordt de functie van de ruimte van Morgagni in het licht gesteld en dit wordt in hoofdstuk VII nader uitgewerkt. Verder worden verschillende praktische en theoretische kwesties besproken, o.a. het beruchte misverstand waaraan men de namen van Helmholtz en Hermann verbindt. De verschillende theorieën over de stemvorming, die van de antieke wereld, die van Dodart (1700), die van Ferrein (1741), die van Savart en Guillemin (1897) en die van Husson (1950), worden besproken, de laatsten hoofdzakelijk in de hoofdstukken VI en VIII.

Hoofdstuk III geeft een inleiding op de onderzoekingen, die in de volgende experimentele hoofdstukken beschreven worden.

Hoofdstuk IV geeft verslag van het onderzoek naar de eigenschappen van het natuurlijke aanzetstuk, van aansluitende berekeningen over de demping van de formanten, de ingangsimpedantie van het aanzetstuk, het profiel van de transmissiekromme, de inwendige weerstand van het strottenhoofd, de impedantie van de stemplooiën, de visceuze weerstand van de keelwand, en van de conclusies, die hieruit te trekken zijn over de amplitudomodulatie, de koppeling en de frequentiemodulatie.

Er werden namelijk proeven genomen met een patient met een he-

milaryngectomie, fig. 4, 5 en 8, voor wie een passend keelluidsprekertje geconstrueerd werd, fig. 6, waarvan de eigenschappen nauwkeurig werden onderzocht, fig. 7, 9, 10 en 11. Volgens een zoektoonmethode werden de transmissiekrommen bepaald voor de cardinale klinkers van de I.P.A., de i , $I(\nu)$, e , ϵ , $\&$, α , ö , o , u en de ə en de y , fig. 15, 16 en 17 en tabel 1.

Het keelluidsprekertje was daartoe voorzien van een meetkop voor het vastleggen van de afgegeven volumesnelheid. Door middel van een elektrische versterker met uitgestelde automatische volumeregeling, fig. 12, werd er voor gezorgd, dat de resonantiepieken voldoende onderdrukt werden, fig. 13, en dat de inwendige weerstand groot was. De gehele apparatuur werd op niet-lineaire vervorming onderzocht met behulp van een Wave-Analyzer.

De voorwaarden waaraan deze metingen moeten voldoen, nl. de constantheid van het aanzetstuk, de toelaatbare zoeksnelheid en de absorptie van de kamer in verband met het vermijden van pseudoformanten, werden onderzocht.

De resultaten werden vergeleken met de nauwkeurigste metingen die in de literatuur bekend zijn over de totale modulatie. Uit de verhouding van de corresponderende dempingen volgt dan een conclusie over de verhouding van de inwendige weerstand van de generator tot die van de ingangsimpedantie van het aanzetstuk bij de frequentie van een formant. Tevens moet bekend zijn, of wij de kleinste dempingen die voorkomen juist konden meten. Dit is slechts te onderzoeken door berekeningen over modellen.

Deze hebben wij uitgevoerd voor een cilindrische buis met harde wand, fig. 18 en tabel 2, en voor een model voor de klinker i , fig. 19 en tabel 3, met behulp van de formules voor elektrische transmissielijnen, welke methode door Dunn geïntroduceerd was. Wij gingen echter aanzienlijk verder, door ook de demping mee te nemen. Door deze berekeningen kon tevens een conclusie van Dunn over de basislijn van de transmissie verworpen worden, fig. 20. De bijdragen van de wand- of meetrildemping, de vernauwings- of wrijvingsdemping en de stralingsdemping werden zo ook bepaald, evenals de orde van grootte van de visceuze weerstand van de keelwand.

Dank zij deze gegevens en de berekening van de orde van grootte van de impedantie van de stemspleet en van die van de stempluoiën kan ook de koppeling begrepen worden.

Het spectrum van de generator, de frequentiemodulatie, is dan te bepalen door de totale modulatie te vergelijken met de nu bekende transmissiekromme en inwendige weerstand.

Op grond van een theoretische overweging werd verder afgeleid, dat het spectrum van de formantbepalende hogere harmonischen bij benadering voorgesteld moet kunnen worden door een macht van hun rangnummer.

Tevens wordt verband gelegd tussen alle bekende verschijnselen in het strottenhoofd (b.v. tussen het luchtverbruik en de stemligging), terwijl aangetoond wordt, dat alle bereikte resultaten onderling overeenstemmen, waardoor een sluitend geheel verkregen wordt.

Hoofdstuk V geeft verslag van de proeven over de nabootsing van klinkers en medeklinkers met dezelfde patient. Deze proeven zijn van beslissende betekenis voor de theorie van de stemvorming, omdat onderzocht werd hoe de gehoorsindruk van de totale modulatie is wanneer de frequentiemodulatie nauwkeurig bekend is, bij gegeven amplitudomodulatie.

Het keelluidsprekertje (als pseudo-strottenhoofd) werd nu bekrachtigd met een bekend mengsel van harmonischen, fig. 21, en de proefpersoon vormde de mond naar een opgegeven klinker of woord. Alle klinkers en stemhebbende medeklinkers blijken zonder meer met dezelfde bekrachtiging goed gereproduceerd te worden, fig. 22 en tabel 4, waarbij de volumesnelheid van de toegediende harmonischen afnam met de macht - 2 van hun rangnummer. Het zogenaamde klinkerpatroon (van het strottenhoofd) blijkt wel van belang te zijn, al behoeft de correctie voor de speciale klinker niet groot te zijn.

De proeven zijn volkomen in overeenstemming met de theorie, dat het aanzetstuk louter amplitudomodulerend werkt bij de stemhebbende klanken en het spectrum van de generator is in overeenstemming met de conclusies daarover in hoofdstuk IV. De regel van Helmholtz over de onbelangrijkheid van de fasen in de samengestelde trilling wordt er nog eens weer door bevestigd.

Uit de proeven blijkt tevens, dat de geconstrueerde keelluidspreker ook therapeutisch te gebruiken is.

Hoofdstuk VI geeft verslag van de proeven met ervaren zangers over de transpositie van de klinkers door het ademen van gassen met een andere voortplantingssnelheid van het geluid dan lucht.

Deze proeven waren bedoeld om de theorie van Savart en Guillemin over het ontstaan van de klinkers te toetsen en zij zijn van beslissende betekenis voor de theorie van de stemvorming.

Het blijkt, dat bij de (niets-vermoedende) inzet van een klinker in het vreemde mengsel en op een tevoren gehoorde toonhoogte de frequentie van de grondtoon practisch niet verandert, allermintst in evenredigheid met de voortplantingssnelheden. De genoemde theorie is dus onjuist en daar worden ook andere argumenten voor aangevoerd.

De ervaren zangers hebben ook lang aangehouden klinkers gezongen in lucht en in de andere mengsels, tabel 5 en 6. Dit waren mengsels van zuurstof en waterstof. Zonder bijmenging van zuurstof verlopen de proeven namelijk zeer onprettig, daar al spoedig

ademnood ontstaat. Deze klinkers werden op harmonischen geanalyseerd volgens de zoektoonmethode. Het blijkt, dat de resultaten in overeenstemming zijn met de gegeven theorie over de amplitudomodulatie door het aanzetstuk en met die over de frequentiemodulatie door het strottenhoofd. De frequenties van de formanten in lucht stemden overeen met de resultaten van anderen en met die in de hoofdstukken IV en V.

Verder werd, in overeenstemming met anderen, een afname van de hogere harmonischen geconstateerd bij de overgang van het borstregister naar het falsetregister bij dezelfde grondtoon en een geringer aantal harmonischen bij ervaren zangers met een mooie stem dan bij onervaren zangers zonder stemkwaliteiten.

Hoofdstuk VII geeft een quantitative uitwerking van onze mening over het aandeel van de ruimte van Morgagni in de stemvorming.

Naast het doven van de ontstane wervels zien wij deze gelegen in het werken als een filter voor de hogere harmonischen, die daardoor onderdrukt kunnen worden.

Er wordt gewezen op de belangrijkheid hiervan in verband met de kwaliteit van de stem en met het klinkerpatroon, dat ook door de trillingswijze van de stemplooien gevarieerd kan worden. In de literatuur werd een aanwijzing voor de juistheid van deze opvatting gevonden en er wordt aangegeven, hoe dit in de praktijk getoetst zou kunnen worden. Verder wordt gewezen op de belangrijkheid van deze opvatting in verband met het niet te sterk veranderen van het timbre bij verandering van het geluidsvolume.

Hoofdstuk VIII geeft een weerlegging van de theorie „Neurochronaxique” van Husson over het wezen van de stemvorming.

In de eerste plaats worden de bezwaren van Husson tegen de globale theorie weerlegd met argumenten, die ontleend worden aan de door ons gepreciseerde theorie over de stemvorming. Dit gebeurt in extenso, wegens de belangrijkheid van de actieve werkgroep waarvan Husson een vooraanstaand lid is, wegens het gevaarlijke karakter van de theorie, omdat de bezwaren los gedacht kunnen worden van de gelanceerde theorie en omdat op deze wijze verschillende praktische kwesties toegelicht kunnen worden. De bezwaren zijn namelijk voor een belangrijk deel ontleend aan de waarneming van pathologische gevallen en een daarvan bracht ons op het spoor van een nieuw type koppeling en wel van de stemplooien aan elkaar, die aanleiding kan geven tot karakteristieke verschijnselen.

In de tweede plaats wordt dan aangetoond, dat de theorie van Husson: het uiteengaan van de stemplooien onder invloed van „wisselspanningen” van centrale oorsprong, die toegevoerd worden aan de spiervezeltjes die loodrecht op de lengterichting aanwezig zijn (om welke theorie geen enkel experiment vraagt en die verschillende van de eigen bezwaren niet opheffen) 1^e op geen enkele waarne-

ming gebaseerd is (de voorlopige proeven van Lindemann, 1930, openen slechts de mogelijkheid van het bestaan van een microphonisch effect van de stemplooien), 2^e zeer onwaarschijnlijk en niet-physiologisch is, omdat a. van de centrale functie te veel verlangd wordt en b. bij geen enkel ander orgaan iets dergelijks waargenomen is en 3^e slechts op gekunstelde wijze een verklaring gegeven kan worden van de effecten van de koppeling, van het verschil in stemligging van man en vrouw en van de onmogelijkheid van „stil” trillen van de stemplooien (zonder luchtstroom is geen trilling mogelijk).

SYSTEMATISCH OVERZICHT

De belangrijkste resultaten en conclusies van de onderzoeken over de *lang aangehouden klinkers* vatten wij nu systematisch samen onder de gemaakte indeling, waarbij de nummering verwijst naar de betreffende hoofdstukken en paragrafen.

Modulatie. M.

1. De theorie van Ferrein, gecorrigeerd door Helmholtz, kan gebruikt worden als startpunt voor een uitgewerkte, sluitende en fysisch gefundeerde theorie over de stemvorming, 2.1.2. e.v.
2. De totale modulatie kan doeltreffend opgevat worden als het product van de frequentiemodulatie (F.M.) door het gehele strottenhoofd, de amplitudomodulatie door het aanzetstuk (A.M.) en de koppeling (K.) door de terugwerking van het aanzetstuk op het strottenhoofd. II. e.v.

In sommige gevallen wordt dit gecompliceerd door een nieuw type koppeling, dat wij ontdekten, 8.2.

3. De theorie van Savart en Guillemin over de stemvorming, 2.2.4, is onjuist, 6.3 en 6.4.
4. De theorie van Husson over de stemvorming, 2.2.5, is onjuist, 8.3, ende bezwaren van Husson tegen de globale theorie, 8.1, worden weerlegd met argumenten, die ontleend worden aan de door ons gespecificeerde theorie, 8.2.
5. De historische strijd „Helmholtz” - Hermann berust op misverstanden van weerszijden, 2.1.2.
6. Alle bekende verschijnselen kunnen met elkaar gecorreleerd worden, 4.7.

Frequentiemodulatie. F.M.

1. *Werking van het strottenhoofd.*
 - a. Het strottenhoofd beheerst de frequentiemodulatie omdat het

effectief minder gedempt is dan het aanzetstuk, 2.4.1. Dit in tegenstelling tot vergelijkbare muziekinstrumenten als hobo en klarinet. Hieraan is de dynamiek van de stem te danken.

Een te grote demping van de stemplooiën veroorzaakt een verlies aan dynamiek, eventueel een totaal verlies. De samenhang met de grens van het falsetregister is nog niet onderzocht.

b. De stemplooiën komen in trilling door de wisselwerking tussen de luchtdruk onder de stemspleet en de elasticiteit, de massa en de demping van de stemplooiën, 2.1.2 en 2.2. Het trillen van de plooiën is essentieel bij de stemvorming, behalve bij het onbelangrijke pijpregister.

c. Bij de overgang van de lage naar de hoge grondtonen moeten men van het borstregister, waar de plooiën over hun volle lengte en breedte trillen geleidelijk overgaan naar het falsetregister, waarbij slechts een gedeelte van de randen trilt. De spanning van de plooiën neemt daarbij steeds toe. 2.2.2. en 2.2.3.

d. Een aanzwellende toon kan op twee manieren gemaakt worden. Door verslapping van de plooiën en toenemende amplitudo en door verstijving en nog meer naar elkaar toegaan van de plooiën, met kleinere amplitudo en kleiner openingsquotient. 2.2.3. en 8.2.

e. Het karakter van de interrupte van de luchtstroom door deze trillingen komt duidelijk uit bij experimenten met zeefkringen door anderen, 2.2.2.

2. *Spectrum van de generator (volumesnelheden).*

a. Op grond van theoretische overwegingen, 4.7.3 en 6.3, moet verwacht worden, dat het spectrum van de formantbepalende (hogere) harmonischen bij benadering voorgesteld kan worden door een negatieve macht van hun rangnummer, d.w.z. logarithmische afname.

b. In de praktijk blijkt dit een afname met een macht tussen - 1 en - 2 te zijn, 4.7.3 en ook 5.4. De orde van grootte van de volumesnelheden is 20-200 cm³/sec voor de laagste en 0,05-0,5 cm³/sec voor b.v. de 20^e harmonische, 4.7.2.

c. Het spectrum hangt af van het geluidsvolume, 2.2.2, 4.7.3, en wanneer een groter volume gemaakt wordt met een kleiner openingsquotient, dan worden de formantbepalende harmonischen relatief sterker.

d. Er zijn aanwijzingen, dat bij goede stemkwaliteit het aantal hogere harmonischen gering is, (Winckler), 6.3., zie ook 7.2.

3. *Invloed op het spectrum, los van de koppeling.*

a. Het spectrum hangt af van de constantheid van de grondtoon, Bij verandering, b.v. door vibrato, worden de harmonischen, in verband met de fasebetrekkingen, onderdrukt in evenredigheid met hun rangnummer, 4.7.3. In de totale modulatie worden deze dan nog

extra onderdrukt in verband met het toenemen van de zoeksnelheid 4.7.3. Dit heeft bij de 20^e harmonische echter pas effect bij een vibrato, dat overeenkomt met meer dan 50 Hz/sec.

b. Bij constante grondtoon hangt het spectrum nog af van de speciale trillingswijze van de stemplooiën, b.v. van het openingsquotient 2.2.2, en van het afronden van de randen door de spiervezeltjes loodrecht op de lengterichting 8.3. Eventuele differentiatie naar de klinker (klinkerpatroon) 2.2.2, hoeft slechts gering te zijn, maar is wel aanwezig, 5.3, 5.4 en 4.7.3.

c. De instelling van de ruimte van Morgagni, 2.2.2, via de valse stemplooiën, heeft vooral effect op de hoogste harmonischen, 2.2.2 en 7.1. Bij 4000 Hz is de impedantie van de orde ρc en die van de doorgang tussen de valse stemplooiën is dan van de orde $\frac{1}{2} \rho c$. Dit is van belang in verband met de kwaliteit van de stem, 7.2 en met het handhaven van het timbre, 7.3.

4. Invloed op het spectrum door de koppeling.

a. Onder pathologische omstandigheden kunnen de ware stemplooiën zoverschillend zijn, dat de minst gedempte de andere meesleept en dat zij een faseverschil vertonen 8.2. Dit type koppeling (interne) was niet eerder opgemerkt.

b. De inwendige weerstand (stemspleet) is bij de lage frequenties van de orde ρc , 4.7.2 en neemt globaal genomen evenredig met de frequentie toe, 4.7.2. De ingangsimpedantie van het aanzetstuk is bij de afstemming op een formant eveneens van de orde ρc , 4.6.3, 4.7.1. Daardoor worden de lage harmonischen sterker onderdrukt, 4.7.2. Bij de lage frequenties is de impedantie van de stemplooiën eveneens van de orde ρc , 4.7.2, (zie voor bijzondere effecten daardoor onder koppeling, externe).

5. De experimenten van Lindemann, 8.3, openen de mogelijkheid van het bestaan van een microphonisch effect van de stemplooiën.

6. De „Atemstütze“, het „staan“ van de stem, 2.2.2, 2.3.3 berust waarschijnlijk op een gunstig faseverschil tussen de drukschommelingen onder de stemspleet en de trilling van de stemplooiën 2.2.2.

Amplitudomodulatie. A. M.

1. Het aanzetstuk werkt louter amplitudomodulerend op het door het strottenhoofd afgegeven mengsel van harmonischen, 2.3 en nabootsingsproeven, 5.3 en 5.4. Hoogstens is er wat niet-lineaire vervorming, maar deze is zeker gering, 2.3.2, en ook dan blijven het harmonischen van de grondtoon.

Verschillende (nuttige) zangpaedagogische opvattingen missen elke grond, 2.3.3.

2. De transmissie van het natuurlijke aanzetstuk werd bepaald bij de cardinale klinkers i, I(ɪ), e, ε, a, α, ɔ, o, u en ə en voor de klinkers y, 4.5, fig. 15, 16, tabel 1.

a. De frequenties van de formanten stemmen overeen met de resultaten van de andere proeven, V en VI en met de resultaten van anderen.

b. De halfwaardebreedten van de formanten liggen tussen 25 en 150 Hz, met een gemiddelde van 85 Hz, 4.5.2; 4.5.3 en 4.7.1. De kleinste waarden en het gemiddelde liggen lager dan de waarden van anderen, 4.5.3. Dit hangt samen met de methode van waarnemen, 4.5.3.

c. In db/sec bedraagt de demping 700 tot 4100, met een gemiddelde van 2300, 4.5.3, 4.7.1. Het logaritmisch decrement ligt tussen 0,038 en 0,55, 4.5.3 en de tijd waarin de energie afneemt met 60 db, ligt tussen 15 en 88 msec, 4.5.3.

d. Het profiel van de transmissiekrommen (stroom aan de uitgang gedeeld door stroom aan de ingang) hangt af van de klinker. Gemiddeld is het globaal genomen recht tot omstreeks 3000 Hz, daarna is er een afname, 4.5.2 en 4.5.3.

Dit is niet in overeenstemming met een misleidende conclusie van Dunn, 4.5.2 en 4.5.3; 5.3 en 6.3. Ook resultaten van anderen zijn daar niet mee in overeenstemming, 4.5.3.

3. De transmissie van modellen kan berekend worden op de door Dunn (zonder demping) geïntroduceerde wijze, met behulp van de formules voor elektrische transmissielijnen, 4.6. Daaruit zijn conclusies te trekken over de stemvorming, 4.6.3. De proeven over de transpositie, VI, zijn hiermee in overeenstemming.

Op grond van het grote aantal vrijheidsgraden kan men verwachten, dat neusachtigheid ook zonder het meedoen van de neusholte kan ontstaan, 2.3.3. Ook de demping speelt hier waarschijnlijk een rol, 2.3.3; 2.5.

4. Onze berekeningen over modellen, 4.6, leren over de demping, dat deze op de volgende wijze verdeeld is over de frequenties.

a. De stralingsdemping is de belangrijkste factor bij de hoge formanten. Deze demping is evenredig met ω^2 (ω = hoekfrequentie) en met de doorsnede van de mond.

b. De vernauwings- of wrijvingsdemping is in het tussengebied van de frequenties de belangrijkste factor. Deze demping is evenredig met $\omega^{+1/2}$ en met d^{-3} (d = diameter). Bij ~ 300 Hz speelt dit pas een rol bij $d \leq 3$ mm.

c. De wand- of meetrildemping is bij de lage formanten de belangrijkste factor. Deze demping neemt naar schatting af met $\omega^{-2,5}$.

5. De toelaatbare snelheid en dynamiek van het spreken wordt mede

begrensd door de dempingsfactoren, 2.2.3 en 4.7.3. De zoeksnelheid van de hogere harmonischen mag niet te groot worden. De grondtoon mag b.v. niet sterker dan met 50 Hz/sec veranderen en de overgang van de a naar de e mag niet vlugger dan in $\frac{1}{2}$ sec. gebeuren, wanneer het goed doorkomen van de 20^e harmonische het criterium is.

6. De orde van grootte van de belangrijkste impedanties van het aanzetstuk kon bepaald worden door berekeningen over modellen, 4.6.

a. De ingangsimpedantie van het aanzetstuk bij de afstemming op een formant is van de orde ρ c. Die van de mond is enkele procenten van ρ c. Dit verklaart de plaats van de keel microfoon.

b. De impedantie van de keelwand is bij 300 Hz van de orde j. 500 ρ c/cm en verder $\sim \omega$ en de visceuze weerstand is van de orde $10^4 \rho$ c/cm (wellicht $\sim \omega^{-1/2}$).

7. Verschillende praktische kwesties, zoals de bijdrage van het aanzetstuk tot de kwaliteit van de stem, 4.7.1 en 5.4, de neusachtigheid 2.3.3 en de afmetingen van het gehemelte en de sonoriteit (van de Nederlandse) stem worden besproken, 4.7.1.

Koppeling. K.

1. *Interne koppeling*: zie frequentiemodulatie, conclusie 4^a.

2. *Externe koppeling*, 2.4, namelijk van het aanzetstuk aan het strottenhoofd. Deze kan aanleiding geven tot karakteristieke verschijnselen, Weiss. In principe te verklaren met de theorie van Wien en de experimenten van Vogel. Een afdoende verklaring ontbrak, 2.4.

a. *Wanneer moeilijkheden*, 2.4 en 4.7.2.

Slechts dan, wanneer de twee systemen op elkaar afgestemd worden en wanneer de impedanties van dezelfde orde van grootte worden.

Wanneer een lage formant afgestemd raakt op een zeer lage harmonische. Deze harmonische komt dan zeer sterk door en de trillingswijze van de plooiën kan veranderen.

Is een hogere harmonische afgestemd op een formant, dan zijn er geen moeilijkheden, omdat de bijbehorende impedantie van het strottenhoofd dan veel groter is dan die van het aanzetstuk.

Het falsetregister levert geen moeilijkheden, door de grote impedanties van het strottenhoofd. Van elke klinker is dan bij de juiste grondtoon praktisch een sinus te maken.

De moeilijkheden tijdens de puberteit kunnen voor een deel door de koppeling verklaard worden, zowel externe als interne.

De moeilijkheden bij de overgangen tussen de registers berusten niet op de koppeling, W. Trendelenburg.

b. Waarom moeilijkheden, 2.4.

Niet door de amplituden, want deze veranderen weinig bij geringe verstemming. De fasen veranderen dan echter zeer sterk en dit is de oorzaak.

c. Hoe ze te vermijden, 2.4.

Het dempingsverschil kan groot gemaakt worden, b.v. door de neusholte er bij te betrekken, door de keelwand te verslappen en door het zogenaamde dekken van de stem. Of door het triviale verstemmen van de systemen.

Diversen

1. De geconstrueerde keelluidspreker, 4.2, kan ook therapeutisch gebruikt worden, 5.4, al zijn daar bezwaren aan verbonden.
2. De formule van Salinger voor de toelaatbare zoeksnelheid, 4.1.2, is aan de veilige kant, 4.1.2, 4.5.2, 4.5.3.
3. Wanneer de wanden van een vertrek 95% absorberen is er ongeacht de geometrie geen kans op de waarneming van pseudoformanten, 4.4.

S U M M A R Y

The present investigation aims at giving an elaborate, balanced and physically based theory of voice production, starting from the physiology of the larynx and of the vocal cavities. The usefulness of the theoretical results became evident from the elucidation of various practical problems.

The report does not direct itself exclusively to the physicist, not even in the first place. It is aimed primarily to address the practicals, the interested phonetician and clinician. Various results will also be of interest to the communication-physicist.

One may consider this as a proof of the present-day continually growing interest of the physicist in the problems of medical science, which has led already to the commonly accepted term medical - physics. It is hoped that the inhaerent dangers (see the quotation on page 3) are avoided.

The most important results are given in systematical order in the "systematical survey" on the pages 181 to 187.

Our plan has been pursued by experiments, calculations and theoretical considerations. Experiments with a subject with a hemilaryngectomy, fig. 4 and 5, and with normal subjects, who breathed different gasmixtures. Calculations upon models, upon the vocal cavities and upon the larynx. Theoretical considerations referring to these experiments and calculations and data from literature and about various details to be found in the literature. Of these investigations a report is given in the Chapters I - VIII.

Chapter I gives an introduction. After some remarks about the cause of the difficulties in explaining voice production - namely the inaccessibility of the larynx, the widely divergent relation of the wave length to the dimensions of the vocal cavities and the driving of the larynx by the same medium in which the sound originates - the anatomy and function of the voice organs are briefly discussed. Thereupon follow preliminary remarks upon voice production, modulation, the differences between the speaking- and the singing voice, abnormal methods for production of voice, the hearing of one's own voice, which is important in relation to the predominating central function, the common energies, the spectral function and the orientation of the sound field around the own head, whereby the place of the microphone is important. Then the problem is framed. It is pointed out that an investigation of the essence of voice production can start from the sustained vowels, however important the consonants and the rapidly spoken vowels

may be in connection with the information, which is contained in the modulated air stream. A definition of the vowel is not given because this is (still) impossible.

Chapter II gives an elaborate and as we believe a balanced and physically founded theory of voice production. As to the framework this chapter has the character of a monography. In building up the theory we use the results of our own investigations which are mainly described in the following chapters, and data from the German, Anglo-saxon, Japanese, Dutch and French literature, which are critically discussed.

The observed phenomena are discussed, considering the resulting modulation of the air stream as the product of the frequency modulation (F.M.) by the larynx, the amplitudemodulation (A.M.) by the vocal cavities and the coupling (K.) by the reaction of these cavities upon the larynx. These factors are separately discussed, whereby it becomes clear that in particular the coupling and related events were never well understood. But in quantitative respect also hardly anything was known about the amplitude- and frequency modulation. The function of the sinus Morgagni is pointed out and this is worked out in Chapter VII. Furthermore various practical and theoretical questions are discussed, e.g. the notorious misunderstanding which is coupled with the names of Helmholtz and Hermann. The various theories of voice production, that of the ancients, of DODART (1700), of FERREIN (1741), of SAVART and GUILLEMIN (1897) and of HUSSON (1950), are discussed, the latter mainly in the chapters VI and VIII.

Chapter III gives an introduction to the investigations which are described in the following experimental Chapters.

Chapter IV gives an account of the investigation upon the properties of the natural vocal cavities, of affiliated calculations about the damping of the formants, the input impedance of the vocal cavities, the profile of the transmission curve, the internal resistance of the larynx, the impedance of the vocal folds, the viscous resistance of the throat wall and of the conclusions which are to be drawn concerning the amplitudemodulation, the coupling and the frequency modulation.

For we conducted experiments with a hemilaryngectomized subject, fig. 4, 5 and 8, for whom a fitting throat loudspeaker was constructed, fig. 6, the properties of which were analysed carefully, see for example fig. 7, 9, 10 and 11. After a searching tone method the transmission properties of the cardinal vowels from the I.P.A., the i, I (ɪ), e, ε, a, ɑ, ɔ, ɒ, u and ə and for the y were determined, see fig. 15, 16 and 17 and table 1.

The throat loudspeaker was equipped, for that reason, with a measuring element for the determination of the delivered volume-

velocity. By means of an audio-frequency amplifier with delayed automatic volume control, fig. 12, care was taken to suppress the resonances, fig. 13, and to make the internal resistance great. The whole apparatus was tested upon non-linear deformation by means of a Wave-Analyzer.

The conditions for these measurements, viz. the constancy of the vocal cavities, the permissible searching velocity and the absorption of the room in connection with the avoiding of pseudo-formants were analyzed.

The results were compared with the most accurate measurements of the total modulation known in literature. From the ratio between the corresponding damping fractions follows a conclusion about the ratio of the internal resistance of the generator to the input resistance of the vocal cavities for the frequency of a formant. At the same time we had to know if the smallest damping factors could be measured. This can only be analyzed by calculations upon a model.

These we have carried out upon a cylindrical tube with a hard wall, fig. 18 and table 2, and upon a model for the vowel i, fig. 19 and table 3, using the formulae for electrical transmission lines, which method has been introduced by Dunn. We, however, went much farther, by taking into account the damping too. By these calculations we could also reject a conclusion of Dunn about the base-line of the transmission, fig. 20. The contributions of the wall- or joined-vibration damping, the construction of friction damping and the radiation damping were also determined in this way, as well as the magnitude of the viscous resistance of the throat wall.

By these data and the calculation of the magnitude of the impedance of the vocal slit and of the vocal folds the reaction of the vocal cavities upon the larynx can be understood.

The spectrum of the generator, the frequency modulation, could then be determined by comparing the total modulation with the now known transmission curve and internal resistance.

By a general consideration of a theoretical nature we concluded that the spectrum of the formant-determining higher harmonics can be (approximately) represented by a power of their number.

At the same time we co-ordinate all known events in the larynx (e.g. the air consumption and the pitch) while it is demonstrated that all the attained results are in agreement with each other so that a balanced theory is obtained.

Chapter V gives an account of the experiments about the imitation of vowels and consonants with the same patient. These experiments are decisive for the theory of voice production, because we investigated the auditory effect of the total modulation if the frequency modulation is exactly known, and with a given amplitude-modulation.

The throat loudspeaker (as pseudo-larynx) was now driven by a known mixture of harmonics, fig. 21, and the testperson formed his mouth according to a proposed vowel or word. It happens that all vowels and voiced consonants are well reproduced, fig. 22 and tabel 4, by the same actuation of the loudspeaker. The volume-velocity of the delivered harmonics decayed with the power - 2 of their number. The so-called vowel pattern (of the larynx) appears to be important, but the correction for the specific vowel need not be great.

The experiments are in perfect agreement with the theory, that the vocal cavities are working only amplitude-modulating at the voiced sounds, and the spectrum of the generator is in agreement with the corresponding conclusions from Chapter IV. The rule of Helmholtz about the unimportance of the phases in the complex vibration gets a new confirmation by them.

From the experiments it is clear that the constructed throat loudspeaker can also be used therapeutically.

Chapter VI gives an account of the experiments with trained subjects about the transposition of the vowels by breathing gases with a different velocity of sound.

These experiments were intended to test the theory of Savart and Guillemin about the generation of the vowels and they are of decisive consequence for the theory of voice production.

It appears that at the (non-presuming) start of a vowel in the strange mixture and on a before-heard pitch the frequency of the fundamental tone does not change in practice, least of all directly proportional to the velocities. The before mentioned theory is therefore incorrect and we advance also other arguments for it.

The trained subjects also sung sustained vowels in air and in other mixtures, table 5 and 6. These were mixtures of oxygen and hydrogen. Without the adding of oxygen the experiments pass off very unpleasant, as very soon a gasp results. These vowels were analyzed upon harmonics by a searching tone method. It appears that the results are in agreement with the given theory about the amplitudemodulation by the vocal cavities and the frequency modulation by the larynx. The frequencies of the formants in air agree with the results of others and with those found in the Chapters IV and V.

Furthermore we stated, in agreement with others, a decay of the higher harmonics, when passing from the chest-register to the falset-register at the same pitch and a smaller number of harmonics for trained subjects with a good voice than for untrained subjects without voice-qualities.

Chapter VII gives a quantitative elaboration of our opinion about the part of the sinus Morgagni in voice-production.

Besides the quenching of the arising eddies we see this in the action as a filter for the highest harmonics, which can be suppressed by this means.

The importance of this suppression is pointed out in relation to the quality of the voice and to the vowel pattern, which can also be varied by the way of vibration of the vocal folds. In the literature an indication for the correctness of this idea is found and we suggested how this could be tested in practice. Furthermore the importance of this idea is pointed out in relation to the maintaining (nearly) of the timbre when changing the volume of sound.

Chapter VIII gives a contradiction of the theory "Neuro-chro-naxique" of Husson about the origin of voice-production.

In the first place the objections of Husson against the rough theory are contradicted with arguments which are taken from our specified theory of voice production. This we do in extenso, on account of the importance of the active team of which Husson is a prominent member, on account of the dangerous character of the theory, since the objections may be considered separately from the launched theory and because in this way we could clear up several practical questions. As a matter of fact the objections are, for an important part, derived from the observation of pathological cases and one of these led us to the track of a new type of coupling, viz. of the vocal folds on each other, which may lead to typical phenomena.

Secondly it is demonstrated that the theory of Husson: the opening of the vocal slit caused by regular action potentials of central origin, delivered to the muscle fibres in the vocal folds perpendicular to the longitudinal direction (for which theory no experiment is asking and which cannot nullify several of Husson's own objections). 1st is based upon no experiment (the tentative experiments of Lindemann, 1930, open only the possibility of the existence of a microphonical effect of the vocal folds) 2nd is very improbable and non-physiological, because a. too much is required from the central function. b. no other organ has shown up similar effects and 3rd only by mannered means an account can be given of the effects of coupling, of the difference of pitch between man and woman and of the impossibility for the vocal folds to vibrate silently (without air stream there is no vibration possible in situ).

SYSTEMATIC SURVEY

The most important results and conclusions of our investigation

upon the *sustained* vowels are now given in a systematic survey. The numbering refers to the corresponding chapters and sections.

Modulation. M.

1. The theory of Ferrein, corrected by Helmholtz can be used as a starting point for an elaborate, balanced and physically founded theory about voice production, 2.1.2 and following.
2. The total modulation can be effectively understood as the product of the frequencymodulation (F.M.) by the total larynx, the amplitude modulation by the vocal cavities (A.M.) and the coupling (K.) by the reaction of the vocal cavities upon the larynx, II and following.

In some cases this is complicated by a new type of coupling, which we discovered, 8.2.

3. The theory of Savart and Guillemin about voice production, 2.2.4, is false, 6.3 and 6.4.
4. The theory of Husson about voice production, 2.2.5, is false, 8.3, and the objections of Husson against the rough theory (which arise from misunderstanding about the physics and physiology of the larynx), 8.1, are contradicted with arguments, which are taken from our specified theory, 8.2.
5. The historical controversy "Helmholtz-Hermann is due to misunderstandings from both sides, 2.1.2.
6. All known events can be correlated with each other, 4.7.

Frequencymodulation. F.M.

1. Action of the larynx.

a. The larynx rules the frequencymodulation because it is effectively less damped than the vocal cavities, 2.4.1. This is in contrast with comparable musical instruments as hobo and clarinet.

To this we owe the dynamics of our voice.

A too big damping of the vocal folds causes a loss of dynamics, eventually a total loss 2.4.1. The connection with the limit of the falsetregister we have not examined as yet.

b. The vocal folds come into vibration by the interaction of the air pressure under the vocal slit and the elasticity, mass and damping of the folds, 2.1.2 and 2.2. The vibration of the folds is essential in our voice production, except at the unimportant pipe-register.

c. When passing from low to high pitches one has to go gradually

from the chest-register, where the folds vibrate along their whole length and width, to the falset-register, where only a part of the edges is vibrating. The tension of the folds then continually increases 2.2.2 and 2.2.3.

d. A swelling tone can be produced in two ways. By relaxation of the folds and growing amplitude and by stiffening and still more closing of the folds, with minor amplitudes and smaller opening-quotient, 2.2.3 and 8.2.

e. The character of the interruption of the air stream by these vibrations comes out clear in experiments with radiofilters by other investigators, 2.2.2.

2. *Spectrum of the generator (volume-velocities).*

a. On account of theoretical considerations, 4.7.3 and 6.3, it is to be expected that the spectrum of the formant-determining (higher) formants can be represented (nearly) by a (negative) power of their number, thus a logarithmic decay.

b. In practice this appears to be a power between -1 and -2, 4.7.3 also 5.4. The magnitude of the volume velocities is 20-200 cm³/sec. for the lowest and 0,05-0,5 cm³/sec. for the 20th harmonic, 4.7.2.

c. The spectrum depends upon sound volume, 2.2.2 and 4.7.3, and when a greater volume is made with a smaller opening quotient the formant determining harmonics will increase relatively.

d. There are indications that at good qualities of voice the number of higher harmonics is in general small, Winckler, 6.3, see also 7.2.

3. *Influence upon the spectrum, apart from coupling.*

a. The spectrum depends upon the constancy of the fundamental tone. At alterations, e.g. through vibrato, the harmonics are suppressed (in connection with the phase relations) in proportion to their number, 4.7.3. In the total modulation these are then extra suppressed in connection with the increasing of the searching velocity, 4.7.3. This has effect however for the 20th harmonic only when the vibrato corresponds with more than 50 c(sec).

b. At constant fundamental tone the spectrum depends yet upon the special type of vibration of the vocal folds, for instance upon the opening-quotient 2.2.2. and upon the rounding of the edges by the muscle fibres perpendicular to the longitudinal direction, 8.3. An eventual differentiation as to the vowel (vowel pattern, 2.2.2, need only be of minor importance, but is present, 5.3, 5.4 and 4.7.3.

c. The adjustment of the sinus Morgagni, 2.2.2, by the false vocal folds, has especially effect upon the highest harmonics,

2.2.2 and 7.1. At 4000 c/sec. the impedance is of the magnitude ρc and that of the passage between the false vocal folds is then of the magnitude $0,5 \rho c$. This is important in connection with the quality of the voice, 7.2 and with the maintaining of the timbre, 7.3.

4. *Influence upon the spectrum by the coupling.*

a. In pathological circumstances it may be that the vocal folds are so different that the least damped drags along the other and that they show up a phase difference 8.2. This type of coupling (internal) had not been detected before.

b. The internal resistance (vocal slit) is at the low frequencies of the order ρc , 4.7.2 and grows (roughly taken) in proportion to frequency, 4.7.2. The input resistance of the vocal cavities at the frequency of a formant is also of the magnitude ρc , 4.6.3 and 4.7.1. The lower harmonics are more suppressed by that, 4.7.2. At the low frequencies the impedance of the vocal folds is also of the magnitude ρc , 4.7.2 (see for typical effects under coupling, external).

5. The experiments of Lindemann, 8.3, open the possibility of the existence of a microphonical effect of the vocal folds.

6. The "Atemstütze", 2.2.2 and 2.3.3, is probably based upon a favourable phase difference between the vibrations of the air under the vocal slit and the vibration of the vocal folds, 2.2.2.

Amplitudemodulation. A.M.

1. The vocal cavities act pure amplitude modulating upon the mixture of harmonics delivered by the larynx, 2.3 and experiments upon imitation, 5.3 and 5.4. At the utmost there is some non-linear deformation, but this is certainly small, 2.3.2, and also then there remain harmonics of the fundamental tone.

Several (useful) singing-pedagogical conceptions miss every base, 2.3.3.

2. The transmission of the natural vocal cavities has been determined for the cardinal vowels i, I(l), e, ϵ , a, α , ɔ , o, u and for the vowel y, 4.5, fig. 15 and 16, table 1.

a. The frequencies of the formants agree with results of other experiments, V and VI and with the results of others.

b. The half-widths of the formants are between 25 and 150 c, with an average of 85 c, 4.5.2; 4.5.3 and 4.7.1. The smallest values and the average are lower than the values of others 4.5.3. This depends upon the method of observation, 4.5.3.

c. In db/sec. the damping amounts too 700 - 4100, with a mean

of 2300, 4.5.3 and 4.7.1. The logarithmic decrements lie between 0,038 and 0,55, 4.5.3., and the time for the decaying of the energy with 60 db is 15 - 88 msec., 4.5.3.

d. The profile of the transmission curves (stream at output divided by stream at input) depends upon the vowel. In mean it is, roughly taken, straight till 3000 c/sec., then there is a decay. 4.5.2 and 4.5.3.

This is not in agreement with a misleading conclusion of Dunn, 4.5.2; 4.5.3; 5.3 and 6.3, nor are several results of others, 4.5.3.

3. The transmission of models can be calculated in the manner introduced by Dunn (without damping), using the formulae of electric transmission-lines, 4.6. From this conclusions can be drawn as to the voice production, 4.6.3. The experiments upon the transposition, VI, agree with them.

On account of the great number of degrees of freedom one is led to expect that nasality can occur also without the nose taking part, 2.3.3. Probably the damping plays also a rôle here, 2.3.3, and 2.5.

4. Our calculations upon models, 4.6., teach about the damping that this is distributed over the frequencies in the following way:

a. The radiation impedance is the most important factor at the high formants. This damping is proportional to ω^2 ($\omega = 2 \pi f$) and to the surface of the mouth.

b. The constriction- or frictional damping is the most important factor in the intermediate region of frequencies. This damping is proportional to ω^4 and to d^{-3} ($d = \text{diameter}$). At about 300 c/sec. this is only important for $d \leq 3$ mm.

c. The wall- or joined-vibration damping is the most important factor for the low formants. This damping decays estimatedly by $\omega^{-2,5}$.

5. The permissible velocity and dynamics of speaking are also limited by the damping factors, 2.2.3 and 4.7.3. The searching velocity of the higher harmonics must not become too great. The fundamental tone e.g. is not permitted to change faster than with 50 c/sec. and the transition from the a to the e is not allowed to happen in less than $\frac{1}{2}$ sec., if the good passing of the 20th harmonic is the criterium.

6. The magnitude of the important impedancies of the vocal cavities could be determined by calculations upon models, 4.6.

a. The input resistance of the vocal cavities at the frequency of a formant is of the magnitude ρc . That of the mouth is some procents of ρc . This explains the place of the *throat-microphone*.

b. The impedance of the throatwall is at 300 Hz of the magnitude $j \cdot 500 \rho c/cm$ and further proportional to ω and the viscous resistance is then of the magnitude $10^4 c/cm$ (probably proportional to $\omega^{-1/2}$).

7. Several practical questions, as the share of the vocal cavities to voice-quality, 4.7.1 and 5.4, the nasality 2.2.3 and the dimensions of palate and the sonority (of the Dutch voice) are discussed, 4.7.1.

Coupling K.

1. *Internal coupling*: see frequencymodulation, conclusion 4^a.

2. *External coupling*, 2.4, from the vocal cavities to the larynx. This can give rise to characteristic events, Weiss. In principle to be explained with the theory of Wien and the experiments of Vogel. A conclusive explanation missed, 2,4.

a. *When difficulties*, 2.4 and 4.7.2.

Only when the two systems are tuned upon each other *and* when the impedances are of the same magnitude.

When a low formant is tuned upon a very low harmonic. This harmonic then presents itself very strong and the way of vibration of the vocal folds can change.

When a higher harmonic is tuned upon a formant there are no difficulties, because the corresponding impedance of the larynx is then much greater than that of the vocal cavities.

The falset-register gives no difficulties because impedances of the larynx are large. Practically of each vowel a sinus is to be made in this register by choosing the fundamental tone well.

The difficulties during puberty can be explained partly by coupling, external and internal.

The difficulties at the crossings between the registers do not arise from coupling, W. Trendelenburg.

b. *Why difficulties*, 2.4.

Not by the amplitudes, for these change little at minor detuning. The phases however do change very much then and this is the cause.

c. *How to avoid them*, 2.4.

The difference between the damping factors can be made large, e.g. by involving the nose cavity in the process, by relaxing the throat wall and by the so called "decken" or "couverture" of the voice. Also by the trivial detuning of the systems.

Various questions

1. The constructed throat-loudspeaker, 4.2, can be used therapeutically, 5.4, although that has drawbacks.
2. The formula of Salinger for the permissible searching velocity 4.1.2, is at the safe side, 4.1.2; 4.5.2 and 4.5.3.
3. When the walls of a room absorb 95% there is, notwithstanding the geometry, no chance upon the observation of a pseudo-formant, 4.4.

L I T E R A T U U R L I J S T

- Anderson, A.B.C.: J. Acoust. Soc. Am.: 24:675, 1952.
- Backhaus, H.: Zeitschr. f. techn. Phys. 13:31, 1932.
- Bárány, E. : J. Acoust. Soc. Am. 8:217, 1936.
- Barczinski, L. en Thienhaus, E. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 11:47, 1935. ook Thienhaus, E. Zeitschr. f. techn. Phys. 15:637, 1934.
- Beljers, H.G.: Ph. Techn. Tijdschr. 7:50, 1942.
- Barthomolew, W.T. : J. Acoust. Soc. Am. 6:25, 1934.
- Bauer, B.B.: J. Acoust. Soc. Am. 15:223, 1944.
- Békésy, G. von, : Akust. Zeitschr. 2:217, 1937.
J. Acoust. Soc. Am. 21:217, 1949.
J. Acoust. Soc. Am. 23:576, 1951 en 24:72, 1952.
- Beranek, L.L. en Sleeper Jr. H.P.: J. Acoust. Soc. Am. 18:140, 1946.
- Beranek, L.L.: Acoustic Measurements, New York and London, John Wiley & Sons, Chapman and Hall, 1949.
- Berger, W. : 1932, zelf geciteerd in: Arch. f. Sprach- u. Stimmheilk. u.s.w. 1:150, 1937.
- Boer, J. de : Ph. Techn. Tijdschr. 4:313, 1939.
- Boer, J. de, en Boer, K. de : Ph. Techn. Tijdschr. 5:6, 1940.
- Bouasse, H. : Tuyaux et Résonateurs, p. 117, Paris, Delagrave, 1929^a.
Instruments a Vent, Tome I, p.222 1929^b en Tome II, p.308, Paris, Delagrave, 1930.
- Broemser, Ph. : Die Bedeutung der Lehre von den erzwungenen Schwingungen in der Physiologie. Habilitationsschrift. München 1918. Geciteerd o.a. door Lullies, H., 1926.
- Bürck, W., Kotowski, P. en Lichte, H.: Ann. Phys. 5.F.25:433, 1936.
- Chiba, T. en Kajiyama, M.: The Vowel, its nature and structure, Tokyo, 1941, uitverkocht, geciteerd o.a. door Dunn (1950).
- Cotton, J.C. : J. Acoust. Soc. Am. 5:208, 1934.
- Crandall, I.B. en Mackenzie, D. : Phys. Rev. 19:221, 1922.
- Crandall, I.B. en Sacia, C.F.: Bell Syst. Techn. J. 3:232, 1924.
- Crandall, I.B.: Bell Syst. Tech. J. 6:100, 1927.
: Vibrating Systems and Sound. London, MacMillan and Co, 2e druk, 1927^b.
- Curry, R. : Arch. f. Sprach- u. Stimmphysiol. u.s.w. 2:1, 1938, ook J. Physiol. 91:254, 1937.
- Dodart : Hist. Acad. Roy. Sc. 1700, Mémoire, p. 244; 1706, Mémoire p. 136 en p. 388; 1707, Mémoire, p. 66.
- Donders, F.C.: Arch. f. Holl. Beitr. z. Natur- und Heilkunde I : 157, 1858 en III : 446, 1864.
- Dudley, H. : J. Acoust. Soc. Am. 11:169, 1939.
Riesz, R.R., en Watkins, S.S.A. : J. Frankl. Inst. 227: 739, 1939, geciteerd door Dudley en Tarnóczy, 1950 en Meyer-Eppler, 1949.

- Dudley, H. en Tarnóczy, T.H. : J. Acoust. Soc. Am. 22:151, 1950.
- Dunn, H.K. : J. Acoust. Soc. Am. 22:740, 1950.
- en Farnsworth, D.W. : J. Acoust. Soc. Am. 10:184, 1938.
- Ewald, J.R. : Pflüg. Arch. f.d. ges. Physiol. 152:171, 1913.
- Farnsworth, D.W. : Bell Lab. Rec. 18:203, 1940^a no. 7. Maart.
 Smith H.J., en Steinberg, J.C. 1940^b. filmver-
 slag, Bur. of Publ. Bell Teleph. Lab. New York.
- Ferrein : Hist. Acad. Roy. Sc. 1741, Mémoire, p.409,
- Fletcher, H. : Speech and Hearing, London, McMillan, 1929.
- Freystedt, E. : Zeitschr. f. techn. Phys. 16:533, 1935.
- Fröschels, E., Hajek, L. en Weiss, D. : in Handb. d. Biol. Arbeits-
 meth. Abt. V, Teil 7, II, 1937.
- Gemelli, A. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 14:126, 1938.
 en Pastori, G. : L'Analisi Elettroacustica del
 Linguaggio, Milaan 1934^a.
 en Pastori, G. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 10:1, 1934^b.
- Giesswein, M. : Beitr. z. Anat. u.s.w. des Ohres u.s.w. 22:82, 1925.
- Gilse, P.H.G. van. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 5:37, 1930.
 : Ned. Tijdschr. v. Geneesk. II 95:1792, 1951.
- Grützmacher, M. : Elektr. Nachr. Techn. 4:533, 1927.
- Guillemin A. : Sur la génération de la voix et de la timbre, Paris,
 1897. Geciteerd naar Husson (1936) en Morat en Doyon (1918).
- Hartmann, W. : Arch. f. Sprach- u. Stimmphysiol. u.s.w. 2:133, 1938.
- Hauser, P. : J. of Speech Disorders 12:8, 1947.
- Helmholtz, H. von: Die Lehre von den Tonempfindungen Braunschweig,
 Vieweg & Sohn, 1^e druk 1863, 6^e druk 1913 (na 4^e druk, in 1877,
 niet meer gewijzigd).
- Herriott, W. : Bell Lab. Rec. 16:279, 1938. no 8, April.
- Hermann, L. : Pflüg. Arch. f.d. ges. Physiol. 141:1, 1911.
- Hooykaas, W. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 12:51, 1936.
- Huggins, W.H. : A Theory of Hearing, Paper Symp. Communic. Theory
 Imp. Coll. London, 1952^a.
 : J. Acoust. Soc. Am. 24:582, 1952^b.
- Huizinga, E. en Moolenaar-Bijl, A. : Arch. Néerl. Phonét. Exp. 17:1
 1941.
 1953 : te verschijnen in Ned. Tijdschr.
 Geneesk. 1953.
- Husson, R. : Rev. franç. de phon. 1:106, 1933.
 : Rev. franç. de phon. 4:19, 1936.
 : Étude des phénomènes physiologiques et acoustiques
 fondamentaux de la voix chantée.
 Thèse, La revue scientifique, Paris, 1950.
 en Tarneaud, J. : Rev. franç. de phon. 1:251, 1933.
- International Phonetic Association: The Principles of the Internat-
 ional Phonetic Association, p.a. London, W.C.1, Department of
 Phonetics, University College.

- Jacobson, H. : J. Acoust. Soc. Am. 23:463, 1951.
- Jongbloed, J. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 16:39, 1940.
- Joos, M. : Language 24: nr 2, Suppl. 1948, Language Monograph no 23
- Kärgén, B., en Trendelenburg, W. : Arch. f. Sprach- u. Stimmheilkunde u.s.w. 1:129, 1937.
- en Luchsinger, R. : Folia Phoniatica 5:46, 1953.
- Kaiser, L. : Een inleiding tot de Phonetiek, Den Haag, Servire 1950.
- : Phonetiek, in Medische Physica, Amsterdam, N-H Uitg. Mij. 1949.
- : Arch. Néerl. Phon. Exp. 15:1, 1939; 16:77, 1940; 17:143, 1941; 18:1, 1942; 19:37, 1944.
- Katzenstein, J. : 1910 in Hdb.d.Biol.Arbeitsmeth. Abt.V. Teil 7, I, 1930, p. 382.
- Kempelen, W.von: 1791, geciteerd in: Dudley, H. en Tarnóczy, T.H. : J. Acoust. Soc. Am. 22:151, 1950.
- King, A.L., en Lawton, R.W. : Elasticity of Body Tissues, in Med. Phys. Vol.II, p.303, Chicago Year Book Publ. 1950.
- Knudsen, V.O. : J. Acoust. Soc. Am. 18:90, 1946.
- Koenig, W., Dunn, H.K. en Lacy, L.Y. : J. Acoust. Soc. Am. 18:19, 1946.
- Kopp, G.A. en Green, H.C. : J. Acoust. Soc. Am. 18:74, 1946.
- Kratzenstein, C.Th. : Acta Acad. Sc. Imp. Petropolitanae, 1780 P II, p.13 modellen in: Brewster, Sir D. : Letters on Natural Magic, London 1832, p. 206.
- Krüger, F. : Ann. d. Phys. (4 F) 62:673, 1920.
- Lastotchikine Pelsky, B. : Arch. Néerl. Phon. Exp. 17:122, 1941.
- Lindemann, E. : Proc. Soc. Exp. Biol. Med. 27:479, 1929-30.
- Lewis, D. : J. Acoust. Soc. Am. 8:91, 1936.
- en Tuthill, C. : J. Acoust. Soc. Am. 11:451, 1940.
- Lottermoser, W. : Akust. Zeitschr. 2:129, 1937.
- : Zeitschr. f. Phonetik, 4:369, 1950.
- Luchsinger, R. : Arch. f. Sprach- u. Stimmphysiol. u.s.w. 6:1, 1942.
- : Pract. Oto-Rhino-Laryng. 12:311, 1950^a.
- : Folia Phoniatica 2:61, 1950^b.
- : Folia Phoniatica 3:25, 1951^a.
- : Zeitschr. Phonetik 5, 224, 1951^b.
- en Arnold, G.E. : Lehrbuch der Stimm- und Sprachheilkunde, Wien, 1949.
- Lullies, H. : Pflüg. Arch. f. d. ges. Physiol. 211:373, 1926.
- Maatz, R. : Arch. f. Sprach- u. Stimmheilk. u.s.w. 1:110, 1937.
- Mason, W.P. : Electromechanical Transducers and Wave Filters, New York, D. van Nostrand Comp. 2^e druk, 1948.
- McGinnis, C.S., Elnick, M. en Kraichmann, M. : J. Acoust. Soc. Am. 23:440, 1951.
- Menzerath, P. : Der Diphtong, Bonn 1941. Geciteerd door W. Meyer-Eppler, 1949, p.25.

- Schott, L.O.: Bell Lab. Rec. 28: nr.12, Dec. 1950.
 Schouten, J.F.: Ph. Techn. Tijdschr. 4:176, 1939 en 5:298, 1940.
 , Jager, F. de, Greefkes, J.A.: Ph. Techn. Tijdschr.
 13:249, 1951.
- Scripture, E.W.: Zeitschr. f. Exp. Phon. 1:16 en 115, 1930-1932.
- Seashore, C.E.: Psychology of the Vibrato in Voice and Instrument,
 Studies in the Psychology of Music, Vol.III. Univ. Press Iowa
 City, Iowa 1936.
- Shannon, C.E.: Proc. Inst. Radio Engrs, 37:10, 1949.
- Sivian, L.J.: Bell Syst. Techn. J. 8:646, 1929.
- Sovijärvi, A.: Proc. 3 Int. Congr. Phon. Sc. Ghent 1938, p.407.
- Steinberg, J.C.: J. Acoust. Soc. Am. 6:16, 1934.
 en French, N.R.: J. Acoust. Soc. Am. 18:4, 1946.
- Stewart, J.Q.: Nature 110:311, 1922.
- Stout, B.: J. Acoust. Soc. Am. 10:137, 1938.
- Stumpf, C.: Die Sprachlaute. Berlin, Springer, 1926.
- Tarnóczy, T. von,: Akust. Zeitschr. 8:22, 1943^a.
 : Akust. Zeitschr. 8:169, 1943^b.
- Tarnóczy, T.H.: J. Acoust. Soc. Am. 23:42, 1951.
- Thooris van Borre, A. : Le Chant Humain, Paris, A. Legrand, 1927.
- Tiffin, J. Saetveit, J. en Snidecor, J.: Quart. J. Speech, 24:1,
 1938.
- Tozikane, T.: Japan. J. Physiol. 1:297, 1950-1951.
- Tomey, A.H.J.M.: Arch. Néerl. Phon. Exp. 19:1, 1944.
- Tonndorf, W.: Zeitschr. f. Hals- Nasen- und Ohrenheilk. 15:363,
 1926.
 : Zeitschr. f. Hals- Nasen- und Ohrenheilk. 18:490,
 1927.
- Trendelenburg, F.: in Hdb d. Phys. (Geiger u. Scheel) Bd.8: Kap.
 10. Ziff.11, 1927..
 : Klänge und Geräusche, Berlin, Springer, 1935.
 : Zeitschr.f.techn.Phys. 17:578, 1936.
 : Proc. 3 Int.Congr.Phon.Sc.Ghent, 1938, p. 128.
 : Akustik, Berlin, Springer, 1939.
 en Franz, E.: Zeitschr.f.techn.Phys.16:513,1935.
 en Trendelenburg, W.: Sitz.Ber. Preusz.Akad. d.
 Wissensch.Phys. Math.Kl. 265, 1937.
 en Thienhaus, E., Franz. E.: Akust. Zeitschr.
 3:7, 1938.
- Trendelenburg, W.: Sitz.Ber.Preusz.Akad.d.Wissensch.Phys.Math.Kl.
 525, 1935.
 : Sitz.Ber.Preusz.Akad.Wissensch.Phys.Math.Kl.
 308, 1936^a.
 : Sitz.Ber.Preusz.Akad.Wissensch.Phys.Math.Kl.
 338, 1936^b.

- Trendelenburg, W.: Sitzber. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 127, 1936.
 : Sitzber. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 5, 1938^a.
 : Sitzber. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 188, 1938^b.
 : Proc. 3 Int. Congr. Phon. Sc. Ghent, 1938^c. p. 188.
 : Abh. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 1940^a, nr 9.
 : Abh. Preusz. Akad. d. Wissensch. Phys. Math. Kl. 1940^b nr. 11.
 en Wullstein, H.: Sitz. Ber. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 399, 1935.
 en Hartmann, W.: Sitz. Ber. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 391, 1937.
 en Stahl, J.: Arch. f. Sprach. u. Stimmphysiol. u. s. w. 2:40, 1938.
- Urk, A. Th. van, en Vermeulen, R.: Ph. Techn. Tijdschr. 4:225, 1939.
- Vogel, H.: Ann. Phys. (4 F), 62:247, 1920^a.
 en Wien, M.: Ann. Phys. (4 F) 62:649, 1920^b.
- Vries, Hl. de: J. Acoust. Soc. Am. 24:527, 1952.
- Wagner, K. W.: Abh. Preusz. Akad. Wissensch. Phys. Math. Kl. 1936, nr 2.
- Wegel, R. L.: Bell Syst. Techn. J. 9:207, 1930 en Appendix van J. Acoust. Soc. Am. 1:1930.
 en Moore, C. R.: Bell Syst. Techn. J. 3:299, 1924.
- Weiss, D.: Monatschr. f. Ohrenheilk. u. Laryng. - Rhin. 66:964, 1932^a.
 : Zeitschr. f. Hals- Nasen- und Ohrenheilk. 22:353, 1932^b.
 : Zeitschr. f. Laryng. u. s. w. 22:391, 1932^c.
- Wethlo, F.: Beitr. z. Anat., Physiol., Pathol. und Therap. des Ohres u. s. w. 6:268, 1913.
 : Arch. f. Sprach- u. Stimmphysiol. u. s. w. 3:176, 1939.
 ; Zeitschr. f. Phon. 3:108, 1949.
- Wheatstone Cha.: London and Westminster Rev. no 11 Oct, 1837 ook in: The Scientific Papers of..... London 1879.
- Wien, M.: Ann. Phys. u. Chem. (N.F.) 61:151, 1897.
- Willis, Rev. R.: Trans. Cambr. Phil. Soc. 3:231, 1830, ook in Ann. Phys. u. Chem. 24:397, 1832.
- Winckel, F.: Folia Phoniatica, 4:93, 1952.
- Zimmermann, R.: Arch. f. Sprach- u. Stimmphysiol. 2:103, 1938.
- Zwaardemaker, Cz., H en Eykman, L. P. H.: Leerboek der Phonetiek, Haarlem, erven F. Bohn, 1928.
- Zwikker, C. en Kosten, C. W.: Sound absorbing materials, Elsevier Publ. Comp. 1949.

LIJST VAN FIGUREN EN TABELLEN

fig.	1. Overzicht van de stemorganen	blz. 4
	2. Strottenhoofd op ware grootte	56
	3. Invloed van de koppeling	46
	4. Proefpersoon S, met hemilaryngectomie	56
	5. Röntgenfoto van aanzetstuk en keelluidspreker met meetkop	57
	6. Keelluidspreker met meetkop.	66
	7. Frequentiekaracteristiek van de keelluidspreker	68
	8. Blokschema voor de meting van de transmissiekromme	70
	9. Aequivalent electrisch circuit voor de ingesloten lucht	72
	10. Impedantie van het membraan door de ingesloten lucht	73
	11. Volumesnelheid van een ingeklemde ronde plaat	74
	12. Versterker met uitgestelde automatische volumeregeling	76
	13. Frequentiekaracteristiek van de keelluidspreker bij ingeschakelde automatische volumeregeling	78
	14. Correctieterm voor de impedantie van een bolbron	83
	15. Opname voor de klinker I(ɿ), Pit.	89
	16. Transmissiekrommen voor 11 klinkers	90 en 91
	17. Transmissie in decibels	96
	18. Cylindrische buis met vervangingsschema	99
	19. Model voor de klinker i, met vervangingsschema	105
	20. Transmissie in db van het model voor de i	108
	21. Piekgenerator voor de nabootsingsproeven	127
	22. Nagebootste klinkers	128
tabel	1. Transmissie van het natuurlijke aanzetstuk	92
	2. Transmissie van een cilindrische buis	102
	3. Transmissie van een model voor de klinker i	107
	4. Transmissie van de harmonischen	133
	5. Formanten van de klinkers, in lucht	145
	6. Formanten van de a in lucht en in de gasmengsels 1 en 2	146