

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab.

Mathematisk-fysiske Meddelelser. I, 13.

OM EN NY METODE

TIL FREMBRINGELSE AF

LYDSVINGNINGER

AF

JUL. HARTMANN



KØBENHAVN

HØVEDKOMMISSIONÆR: ANDR. FRED. HØST & SØN, KGL. HOF-BOGHANDEL

BIANCO LUNOS BOGTRYKKERI

1919

1. Luftstraalen og dens Anvendelse til Frembringelse af Lydsvingninger.

Naar man lader Luft fra en Beholder, i hvilken det absolute Tryk er større end ca. 1.9 Atm., — Overtrykket altsaa større end 0.9 Atm., — strømme ud i den fri Atmosfære gennem et Hul eller en kort Boring, faar man, saa længe Overtrykket ligger under en vis Grænse, en Straale, i hvilken der optræder ejendommelige periodiske Variationer. Det var MACH og SALCHER¹, der først blev opmærksomme paa disse Variationer ved Fotografering af Straalen. MACH betegnede dem som stationære Lydbølger og antydede en Forklaring af, hvorledes de opstod. Senere studerede R. EMDEN² Straalen — ligeledes gennem Fotografering — og opstillede paa Grundlag af Energibetragtninger en Teori for Lydbølgerne. En direkte Undersøgelse af Trykfordelingen i Luftstraalen blev forsøgt af PARENTY³ ved Hjælp af Sonder, der førtes ind i Straalen, og efter principielt samme Metode, men med væsentlig fuldkomnere Apparater arbejdede STODOLA⁴. STODOLAS Forsøg har i høj Grad kastet Lys over Luftstraalens Bygning. Et meget betydningsfuldt Arbejde er endelig udført af PRANDTL⁵, hvem det lykkedes at løse Differentialligningen for Bølgebevægelsen i Straalen, og hvem en Række yderst instruktive fotografiske Optagelser af Straalen skyldes. Alt i alt hayes da nu en ret fuldstændig Indsigt i og Forstaaelse af

¹ E. MACH u. P. SALCHER. Wied. Ann. 41. pg. 144. 1890.

² R. EMDEN. Wied. Ann. 69. pg. 264 og 426. 1899.

³ H. PARENTY. Ann. chim. phys. 12. 289. 1897.

⁴ A. STODOLA. Die Dampfturbinen. Berlin 1910.

⁵ L. PRANDTL. Phys. Zs. 5. pg. 599. 1904 og 8. pg. 23. 1907.

Luftstraalen, selv om mange Detailundersøgelser maaske endnu kan være ønskelige.

Det foreliggende Arbejde vil indeholde en Del saadanne, men det handler iøvrigt i Hovedsagen om, hvorledes man kan benytte den ovenfor antydede Luftstraale til Frembringelse af Lydsvingninger. Jeg førtes til denne Anvendelse gennem

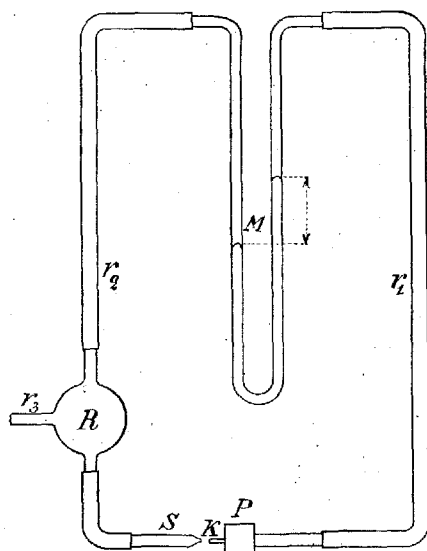


Fig. 1.

nogle Forsøg, ved hvilke jeg studerede Variationerne i det dynamiske plus det statiske Tryk ned gennem Straalen. Ved disse Forsøg benyttedes et Apparat som det, der skematisk er vist i Fig. 1. *S* er her det straaledannende Element, der i Figuren er antydet som et udtrukket Glasrør. Luftstraalen blev undersøgt ved et Pitotapparat med en Sonde dannet af et fint Kapillar *K* af Sølv eller Staal. Kapillaret stod gennem Slangen *r*₁ i Forbindelse med den ene Gren af det U-formede

Manometer *M*, medens den anden Gren gennem *r*₂ var forbunden med Beholderen *R*, hvorfra Luften strømmede til *S*. I *R* holdtes Luften paa et konstant Tryk ved en Kompressor, der kommunikerede med *R* gennem *r*₃. Ved Forsøgene var der mellem Beholderen *R* paa ca. ½ l og Kompressoren indskudt en Vindkedel paa ca. 15 l.

Manometret vil, som det forstaas, vise Forskellen mellem det statiske Tryk i *R* og Summen af det statiske og dynamiske Tryk paa det Sted af Straalen, hvor Kapillarets Munding er anbragt. Man aflæser altsaa direkte Undertrykket i Straalen. Afbildes Variationerne i dette Undertryk ud langs Straalens

Akse, finder man, naar Trykket i R ligger mellem det ovenfor antydede kritiske og en vis højere Værdi, Kurver af den i Fig. 2 viste Karakter. Trykket i Straalen svinger altsaa periodisk med regelmæssig aftagende Amplitude.

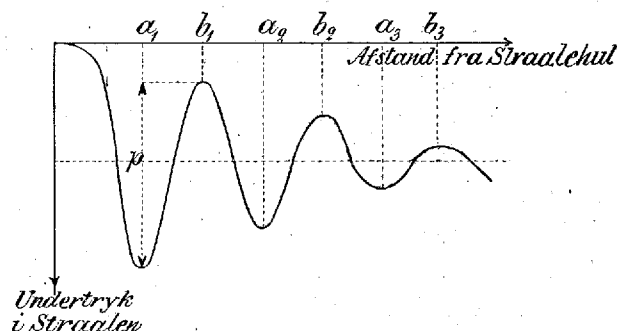


Fig. 2.

Nu fandt jeg, at de Partier $a_1 b_1$, $a_2 b_2$, $a_3 b_3$ o. s. v., hvor Trykket vokser (Undertrykket aftager), repræsenterer en Art Instabilitetsomraader, der kan benyttes ved Startning af Luftsvingninger paa de Maader, der nu skal forklares.

Dersom en vilkaarlig Beholder B Fig. 3 forbindes med Pitotapparatets Kapillar eller bedre med et Glasrør trukket ud i en Spids med Lysning mindre end Straalens Diameter, og Kapillar eller Spids føres ind i et af Omraaderne $a_1 b_1$, $a_2 b_2$. . . med Munden vendt mod Straalen, vil Beholderen periodisk fylde sig med Luft og atter udtømme denne Luft. Perioden afhænger af Beholderens Størrelse, det valgte Instabilitetsomraade, af Stedet i dette og af Trykket i det Reservoir, hvorfra Luften strømmer til Straalen. Perioden kan ved Ændring af Størrelsen af det Rum, der »lades op og udlades«, varieres f. Eks. fra 10 Sek. (eller mere) til $1/5000$ Sek. (eller mindre). De hurtige Svingninger af Luften høres naturligvis som en Tone. Vi vil i det efterfølgende betegne de anty-



Fig. 3.

dede Luftsvingninger som Pulsationssvingninger eller Pulsationer for at adskille dem fra de Resonanssvingninger, der ogsaa kan frembringes ved Hjælp af Luftstraalen.

Resonanssvingninger kan man faa frem ved at føre Munden af en Resonator som den, der i Fig. 4 a nedenfor er antydnet ved R , ind i et af Instabilitetsomraaderne og rette Munden mod Straalen. Luften i Resonatoren vil da svinge med Resonatorens Egenfrekvens, saaledes at de dannede Lydbølger faar en Bølgebredde paa godt 4 Gange Resonatorens Dybde. Frekvensen er altsaa nu i alt væsentligt uafhængig af Instabilitetsomraadet, Stedet i dette, den udstømmende Lufts Tryk m. m. Intensiteten af Svingningerne derimod vokser utvivlsomt med Trykstigningen p i Instabilitetsomraadet. (Se Fig. 2). Denne er vel endog i første Linie bestemmende for Trykvariationerne i Resonatoren. Da nu p kan beløbe sig til mange cm Kvægsølvtryk, saa forstaar man, at Lydsvingningerne kan blive yderst intensive. Hvad Frekvensen angaar, har jeg med Anvendelse af en Straale af atmosfærisk Luft frembragt Resonanssvingninger — altsaa rene akustiske Svingninger — med op til 130000 hele Perioder pr. Sek. Med en Brintstraale har jeg været i Stand til at fremstille intensive Lydsvingninger paa 340000 Perioder, og der vil næppe være noget i Vejen for at naa Svingningstal paa 1 Million eller derover. Jeg er da af den Anskuelse, at man i Luftstraalen i Forbindelse med en Resonator som den antydede har et Middel til at frembringe rene, akustiske Svingninger af større Intensitet, større Regelmæssighed og af højere Frekvens, end det hidtil har været muligt. Jeg har derfor fundet det Umagen værd nærmere at undersøge Betingelserne for Fremstillingen af Svingningerne for derved at fremskaffe det nødvendige Grundlag for den rationelle Konstruktion af en akustisk Generator efter det ovenfor antydede Princip. Nedenfor skal der gives en Oversigt over disse Undersøgelser.

Først vil der dog være Grund til at søge at opnaa et Indblik i Luftsvingningernes Mekanisme.

2. Luftsvingningernes Mekanisme.

I Fig. 4a er tegnet et Billede af, hvorledes man maa tænke sig Straalen ved den Trykfordeling, som er antydnet i Fig. 4b. Paa de Steder, hvor Undertrykket er størst, er Straalen tykkest; der, hvor det er mindst, er den tyndest. I de Dele af Straalen, hvor Undertrykket er aftagende, altsaa i Instabilitetsomraaderne, bevæger Luftdelene sig ind mod Straalens Akse, saaledes som det er antydnet ved Pile. Paa den modsatte Side af Trykminimum bevæger Delene sig udad. Vi vil nu først antage, at Munden af Beholderen som den i Fig. 3

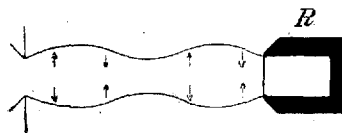


Fig. 4 a.

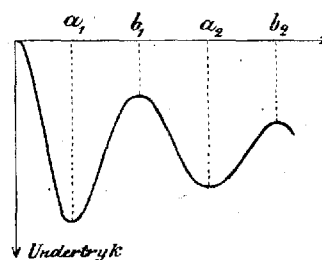


Fig. 4 b.

viste anbringes i et Instabilitetsomraade. Det ses da, at Luftdelene fra alle Sider søger ind imod Beholderens Munding. Beholderen faar altsaa tilført en vis Luftmasse, og Trykket vokser i den. Naar Beholderen er bleven fyldt til samme Tryk, som der hersker udenfor Munden i Straalen, vil der ske en Opstemning af Luft foran Munden. Denne Opstemning vil, tænker jeg mig, splitte Straalen, saaledes at dens Dele søger udenom Munden. Herved er Trykket mod denne fjærnet, og den indespærrede Luft vil udvide sig og strømme ud af Beholderen. Naar Luften er blæst ud, indtræder igen normale Forhold foran Munden. Luftstraalen rettes atter mod denne, og Spillet gentages. Ved en Resonator som den i Fig. 4a viste, vil man forklare Fremkomsten af Resonatorens Egensvingninger i det væsentlige som ved den almindelige Fløjte. Luftstraalen frembringer en Fortætningsbølge, der reflekteres fra Resonatorens Bund og splitter Straalen ved Tilbagekomsten til Munden.

Straalen genoprettes ved Tilbagekomsten til Mundingen af den efterfølgende Fortyndingsbølge. Naar Resonanssvingningerne trods Udstraaling og Tab kan vedligeholdes, ligger det i, at det Arbejde, Straalen udfører paa Luften i Resonatoren i den Del af Perioden, hvor Straalen er rettet ind imod Mundingen, er større og rimeligvis meget væsentlig

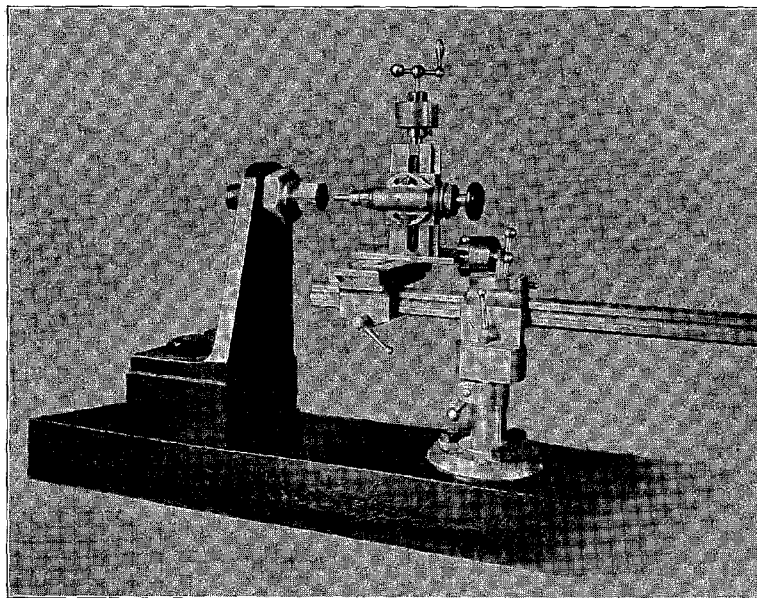


Fig. 5.

større end det Arbejde, Luften i Resonatoren har at udføre i den Del af Perioden, hvor Straalen gaar udenom Mundingen.

3. Experimentale Undersøgelser over Luftstraalens Trykvariationer.

Jeg skal herefter omtale en Række Forsøg, der blev foretaget som Grundlag for den nye akustiske Generator. Forsøgene falder i to Grupper: en første, der blev udført med tyndere

Luftstraaler og mindre Overtryk, og en anden, ved hvilken der arbejdedes med tykkere Straaler og i Almindelighed større Overtryk. Ved den første Gruppe Forsøg leveredes Tryklufften af en lille Kompressor med Vindkedel. Naar Kompressoren

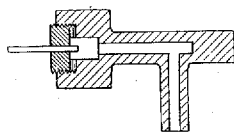


Fig. 6 a.



Fig. 6 b.

blev trukket af en Elektromotor paa $\frac{1}{6}$ H. K., kunde den opretholde et Overtryk i Vindkedlen paa indtil 2 à 2.5 Atm. ved et Straalehul paa ca. 0.7 mm. Ved den anden Forsøgsrække stod en større Kompressor til Raadighed, saaledes at man kunde arbejde med Overtryk paa indtil 8—10 Atm. og Straalehuller paa 1.5 mm eller derover. Ved Undersøgelsen af Straalen benyttedes iøvrigt det i Fig. 5 gængsne Apparat. Paa en svær Jærnbjælke er monteret en Opstander, gennem hvilken et kort Rør er ført. Røret ender i et Hoved, i hvilket det straaledannende Element kunde skrues. Foruden Straalerørets Opstander bærer Jærnbjælken en anden Opstander med en vandret Styreskinne. Paa denne kunde en tredobbelt Slæde forskydes

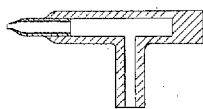


Fig. 7.

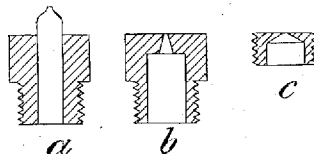


Fig. 8.

henimod eller bort fra Straalerøret. Den ene Slæde bærer en Patron, i hvilken Sonden til Undersøgelse af Luftstraalen kunde spændes fast. Ved Hjælp af de tre Slæder kunde Sonden anbringes paa et vilkaarligt Sted i Straalen, og dens Stilling kunde aflæses paa Slædeskruernes inddelte Hoveder. Slæderne med Styreskinne og Opstander var laant fra en Præcisionsdrejebænk, hvis Forsætter de udgjorde.

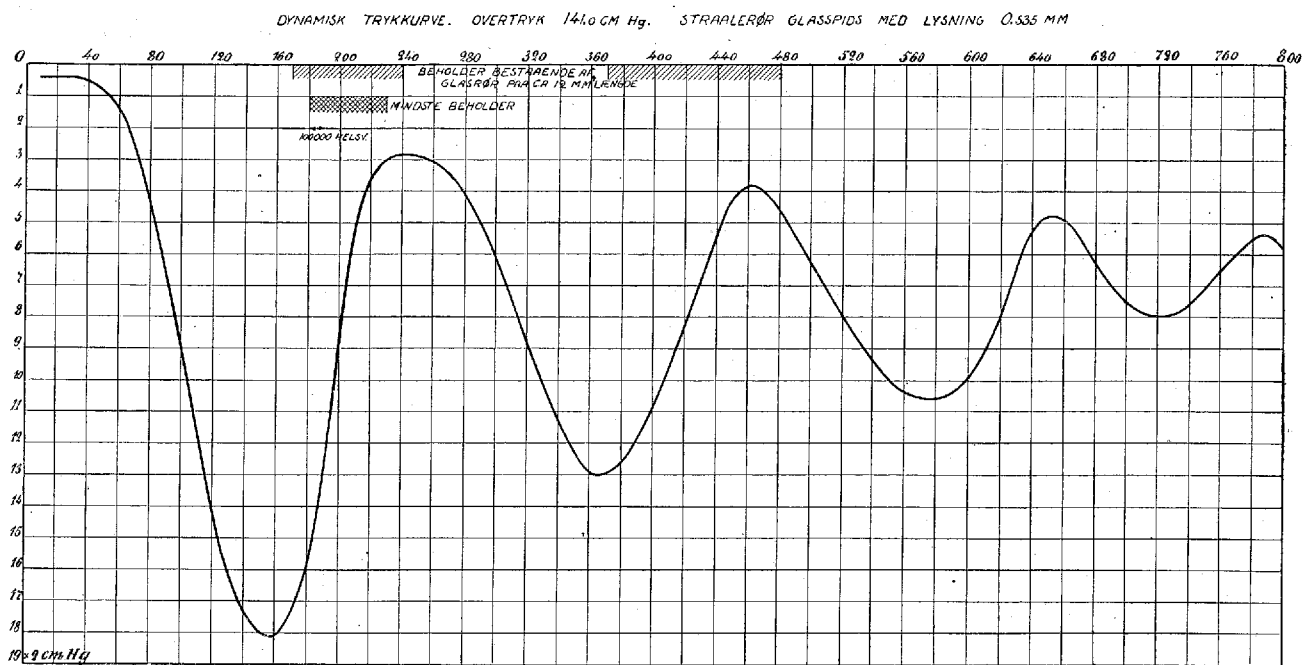


Fig. 9.

I Fig. 6—8 ses noget Tilbehør til Forsøgsapparatet. Fig. 6 a fremstiller Hovedet af Apparatet til Undersøgelse af Trykvariationerne i Straalen. I dette kunde der skrues en Plade, gennem hvilken Sonden var ført. Sonden bestod, naar Summen af det dynamiske og statiske Tryk skulde maa-

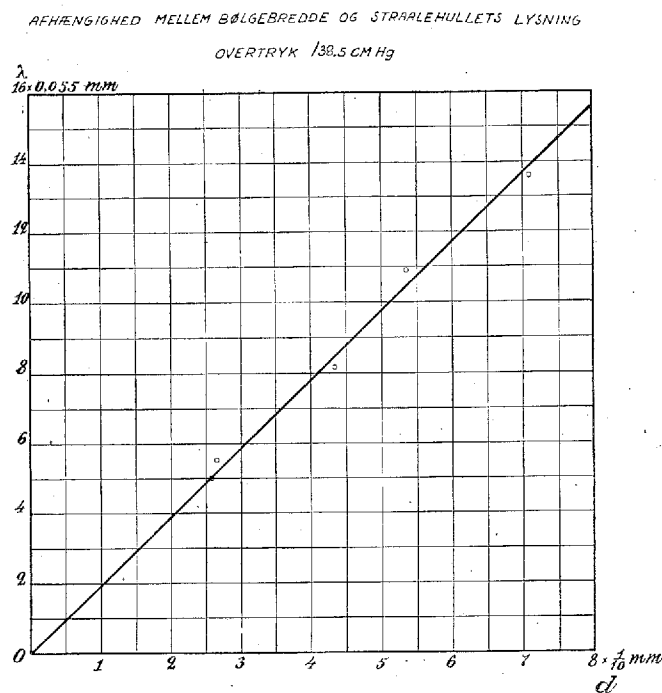


Fig. 10.

les, i Almindelighed af et fint for Enden aabent Staalkapillar ca. 10 mm langt og med en Lysning paa ca. 0,2 mm. Naar det drejede sig om at maale det statiske Tryk alene, benyttedes et lignende Kapillar; men dette var nu lukket for Enden og til Gengæld gennemboret paa tværs som antydnet i Fig. 6 b. Kapillarets ydre Diameter var ca. 0.6 mm. — Fig. 7 viser en indkapslet Glasspids, der benyttedes ved Studium af de ovenfor antydede Pulsationer. I Fig. 8 a—c ses endelig tre normale Former for det straaledannende Element, i a en Glasspids lakket

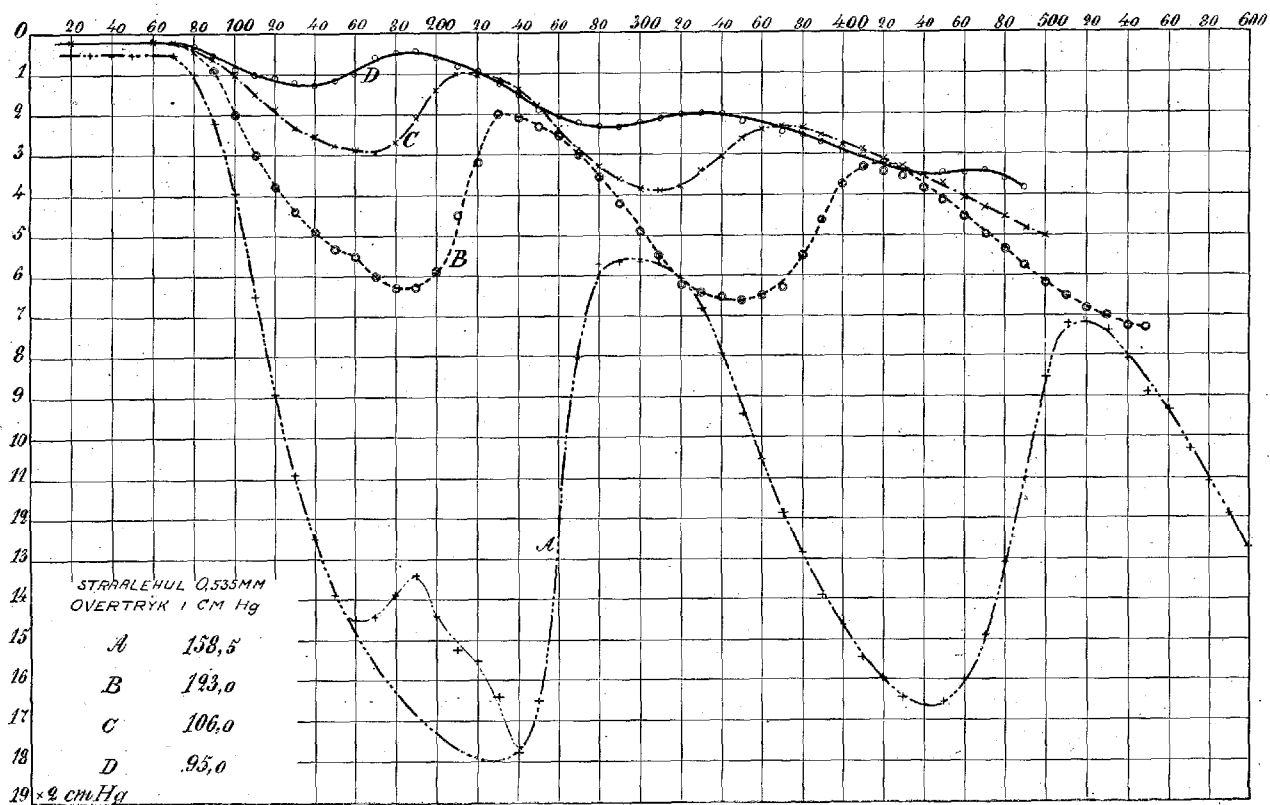


Fig. 11.

fast i en gennemboret Skrue, i *b* et i Metal boret svagt konisk Hul og i *c* en konisk Boring med større Topvinkel.

Til Maaling af Trykket benyttedes ved mindre Tryk i Almindelighed det allerede i Fig. 1 antydede Differens-Kvægsølvmanometer. Ved højere Tryk brugtes et Præcisionsmetelmanometer. I visse Tilfælde maalttes Trykkene ogsaa ved et simpelt U-formet Kvægsølvmanometer.

For Kortheds Skyld vil vi i det efterfølgende betegne Kurver, der er optagne ved det simple Pitotapparat, altsaa Kur-

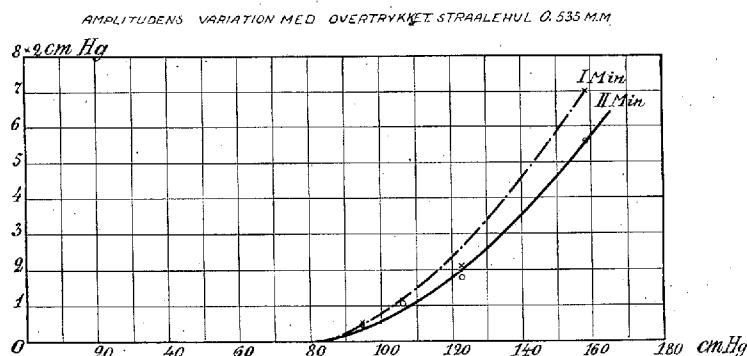


Fig. 12.

ver, der gengiver Summen af det dynamiske og det statiske Tryk, som dynamiske Kurver, medens vi vil betegne Kurver optagne ved en Sonde med Tværboring som statiske Kurver. Ved tynde Straaler kunde selvfølgelig kun de dynamiske Kurver optages. Nogle Kurver af denne Art skal først gives.

Fig. 9 viser en dynamisk Kurve for en Luftstraale fremstillet ved en Glasspids (Fig. 8 a) med en Lysning paa 0.535 mm ved et Overtryk i Vindkedlen paa 141 cm Hg. Abscissen giver Afstanden fra Straalehullet maalt paa en Skala, hvor 100 Inddelinger betød 0.275 mm. Ordinaten er Differensen mellem det af Pitotapparatet angivne Tryk og det hydrostatiske Tryk i Reservoiret *R* Fig. 1. Trykdifferensen er maalt i cm

Kvægsølv søjle og afsat nedad for derved at opnaa, at et stigende Tryk i Straalen afbildes ved en stigende Kurvegren. Det vil forstaaes, at Kurven tillader en sikker Udmaaling af Bølgebredden λ for de staaende Bølger. De to første Bølger giver for λ Værdien

$$\lambda = 0.605 \text{ mm.}$$

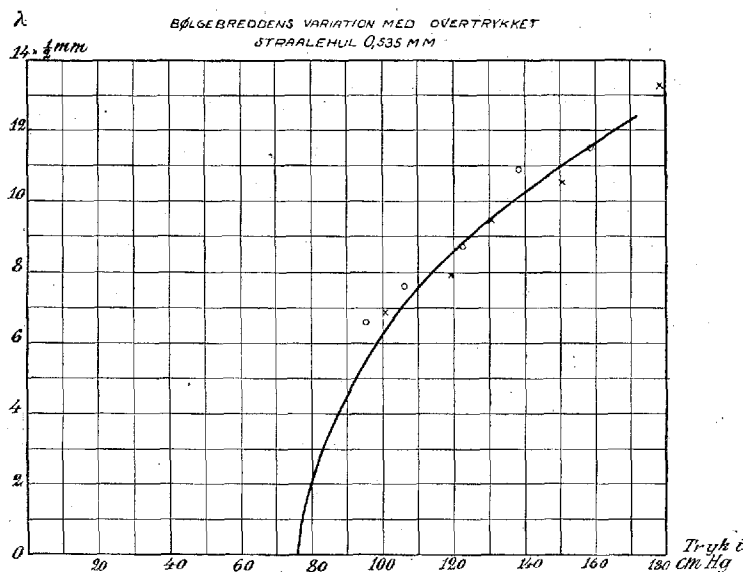


Fig. 13.

Denne Værdi stemmer ikke godt med den, der beregnes af den af EMDEN angivne Formel

$$\lambda = 0.88 d \sqrt{p - 0.9},$$

hvor d betegner Straalehullets Diameter maalt i mm og p Overtrykket i Reservoirret maalt i Atmosfærer. EMDENS Formel giver nemlig for λ i det ovenfor betragtede Tilfælde 0.46 mm, naar 141 cm Hg. sættes lig 1.85 Atm. Væsentlig bedre stemmer mine Maalinger med PRANDTL'S Formel, der i Stedet for EMDENS Faktor 0.88 har en Faktor paa ca. 1.2. Beregnes λ af denne, faaes 0.63 mm. Iøvrigt viser Fig. 10, at Bølgebredden som fordret er proportional med d . Kurven giver

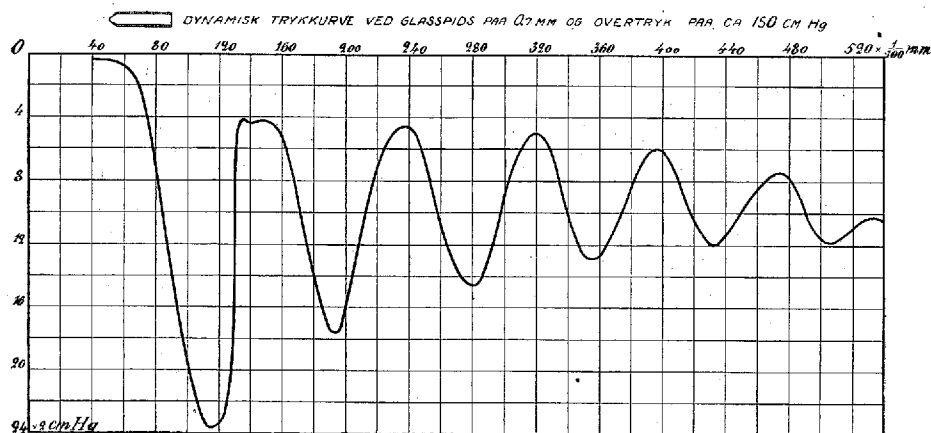


Fig. 14.

svarende til $d = 0.8$ mm og Forsøgstrykket $p = 1.82$ Atm. (138.5 cm Hg.) Værdien 0.858 mm for λ , medens EMDENS Udtryk giver 0.67 mm og PRANDTL'S 0.91. Det maa da formentlig sluttes, at Straalerne ved de her anstillede Forsøg har nærmet sig mere end EMDENS til den Tilstand, der forudsættes af PRANDTL'S Teori. Fig. 11, hvor 100 Inddelinger i Abscissen ogsaa betyder 0.275 mm, viser herefter, hvorledes den dynamiske Kurve ændres med Overtrykket. Ved Udmaaling paa Fig. 11 fandtes den Variation af Bølgeamplituden med Overtrykket, der er gengivet i Fig. 12 I og II, hvor I svarer til første, II til andet Minimum. Det vil ses, at Amplituden vokser med Overtrykket efter en Kurve af parabolisk Karakter. Amplituden bliver Nul for et Overtryk omkring 1 Atm. stemmen — naar Hensyn tages til Usikkerheden paa Bestemmelsen

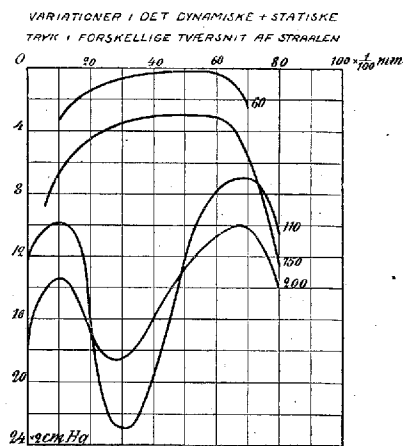


Fig. 14 a.

af Parablens Toppunkt — med EMDENS Formel. Af Fig. 11 ses det, hvorledes Bølgebredden aftager, naar Overtrykket sættes ned. I Fig. 13 er Bølgebreddens Variation med Overtrykket i Reservoiret indtegnet. Gennem de iagttagne Punkter kan man lægge en Parabel, der vil skære Abscisseaksen ved ca. 1 Atm. i god Overensstemmelse med det forrige Forsøg og nogenlunde stemmende med EMDENS Formel.

For den akustiske Generators Skyld syntes det af Vigtig-

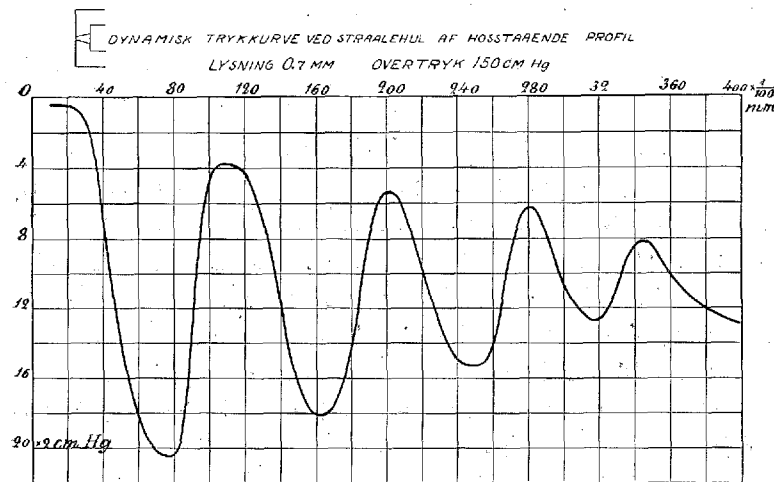


Fig. 15.

hed at faa afgjort, om Straalehullets Længdeprofil var af væsentlig Indflydelse paa Trykvariationerne. Der blev derfor udført en Række Forsøg med forskellige Straalehuller. Forsøgene er gengivne i Fig. 14—17. I hver af de grafiske Fremstillinger er Straalehullets Profil indtegnet. Alle Forsøg udførtes ved samme Overtryk paa ca. 150 cm Hg. Man vil bemærke, at Glasspidsen i Fig. 14 ubetinget giver det mest regelmæssige og kraftigst udviklede Sæt af Bølger. Ogsaa den svagt koniske Boring i Fig. 15 giver imidlertid intensive Svingninger. Den stærkt koniske Boring i Fig. 16 giver en højst uregelmæssig Trykvariation, og ved de cylindriske Boringer i Fig. 17 A og

B er der det ejendommelige, at der i selve Boringerne tabes et ikke ubetydeligt Tryk. Bølgekurven faar derved et Udseende svarende til et mindre Overtryk end det paa Reservoirets Manometer aflæste. Den uregelmæssige Bølgeform i Fig. 16 gav Anledning til en Undersøgelse af Variationen i Pitotap-

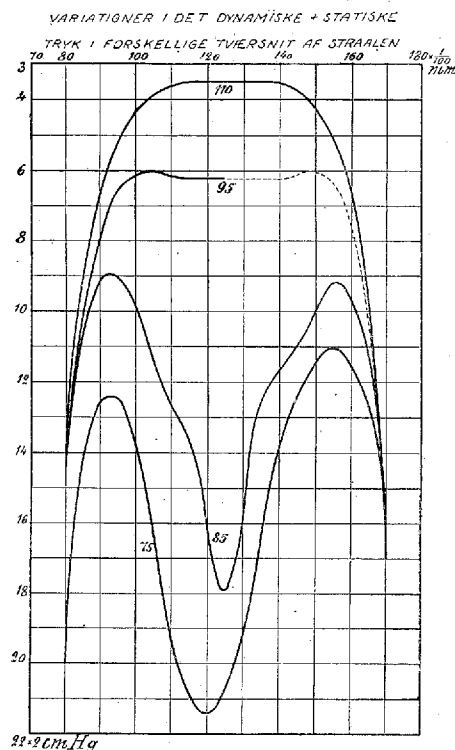


Fig. 15 a.

paratets Visning, naar Sonden førtes tværs igennem Straalen i en Diameter. Ved denne Undersøgelse opklaredes Aarsagen til Uregelmæssigheden fuldstændigt. Det viste sig nemlig, at Variationen over forskellige Diameter havde den i Fig. 16 a gengivne Karakter. Det vil ses af denne Figur, paa hvis enkelte Kurver Beliggenheden af den paagældende Diameter er angivet ved den tilsvarende Abscisse i Fig. 16, at Trykket

i Kurvens Maximumpunkter er konstant over den største Del af Tværsnittet, medens det i Minimumpunkterne har et Minimum inde i Straalen og Maximum ude ved Overfladen. Denne Struktur finder utvivlsomt sin Forklaring i den MACH-PRANDTL-ské Teori for de diagonale Bølger i Straalen. Ved normale Straaler, som de i Fig. 14 og 15 undersøgte, ligger Minimum som det fremgaar af Fig. 14 a og Fig. 15 a i Aksen, og Tværkurven

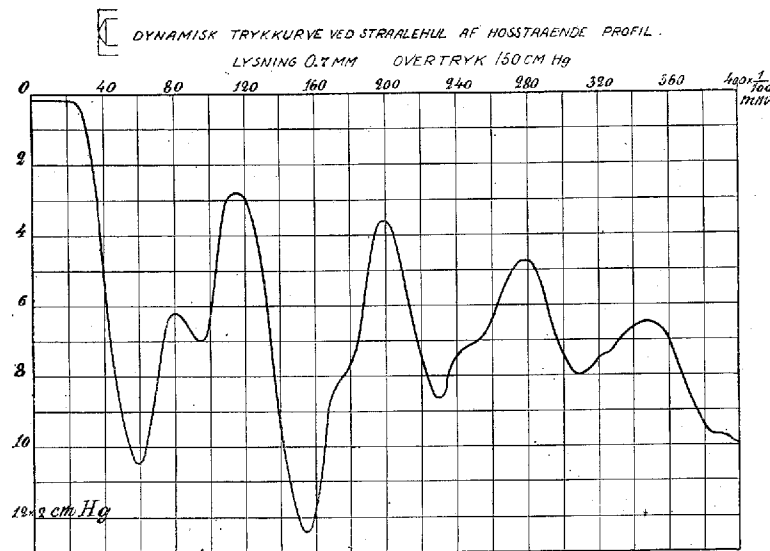


Fig. 16.

er symmetrisk med Hensyn til Midtpunktet. Er Straalen derimod af en eller anden Grund dissymmetrisk, bliver Tværkurven det ogsaa. Et Eksempel paa en saadan Straale havest netop i Fig. 16. Dissymmetrien berører ikke i væsentlig Grad Tværkurverne svarende til Rækken af Trykmaxima, men derimod i høj Grad Minimumstværkurverne. Det vil da forståes, at man, naar man følger Trykvariationen i Aksen, meget vel kan faa en Kurvetype frem som den i Fig. 16 viste.

Vi gaar herefter over til at betragte Forholdene i Luftstraalen ved større Overtryk. Fig. 18 viser tre dynamiske

Kurver for en Straale fremstillet ved den samme Glasspids paa 0.7 mm, der benyttedes i Forsøget. afbildet i Fig. 14. I Fig. 18 forestiller Ordinaten Straalens dynamiske plus statiske Tryk aflæst direkte paa et Metalmanometer i Atmosfærer. Ordinaten svarende til Abscissen Nul giver samtidig Overtrykket i Reservoiret. Ved et Overtryk paa 2.2 Atm.

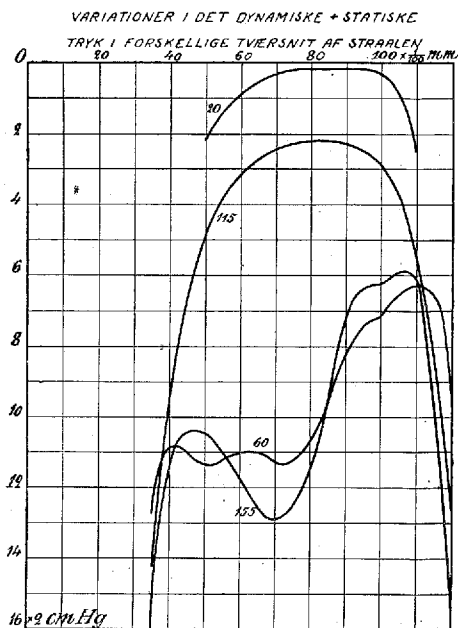


Fig. 16 a.

faaes atter i Hovedsagen en regelmæssig periodisk Kurve. Dog er Forholdene paa Straalens første Del ikke helt regelmæssige. Der iagttages her et Trykfald spændende over mere end én Bølgebredde. Dette Begyndelsesfald er endnu mere udpræget ved 5.2 Atm.' Overtryk. Samtidig er de paafølgende akustiske Bølger her mindre regelmæssig udviklede omend fuldkommen tydelige. Ved 8 Atm.' Overtryk faas derimod en næsten aperiodisk Variation i Trykket. Kun paa den allersidste Del af Straalen ses Spor af Bølger. Ganske lignende Trykvariationer

iagttoges, som det fremgaar af Fig. 19, ved en sværere Straale paa 1.5 mm fremstillet ved en Glasspids. Ved en svagt konisk Boring paa 1.5 mm fandtes endelig de Kurver, der er gengivne i Fig. 20. De akustiske Bølger er her enten udviskede eller højst uregelmæssige. Ved de sværere Straaler var det muligt at optage Kurver for det statiske Tryks Variation ved Hjælp af Sonden med Tværboring. Til Trykmaalingen anvendtes nu et aabent Kvægsølvmanometer. For de Straalehuller, der

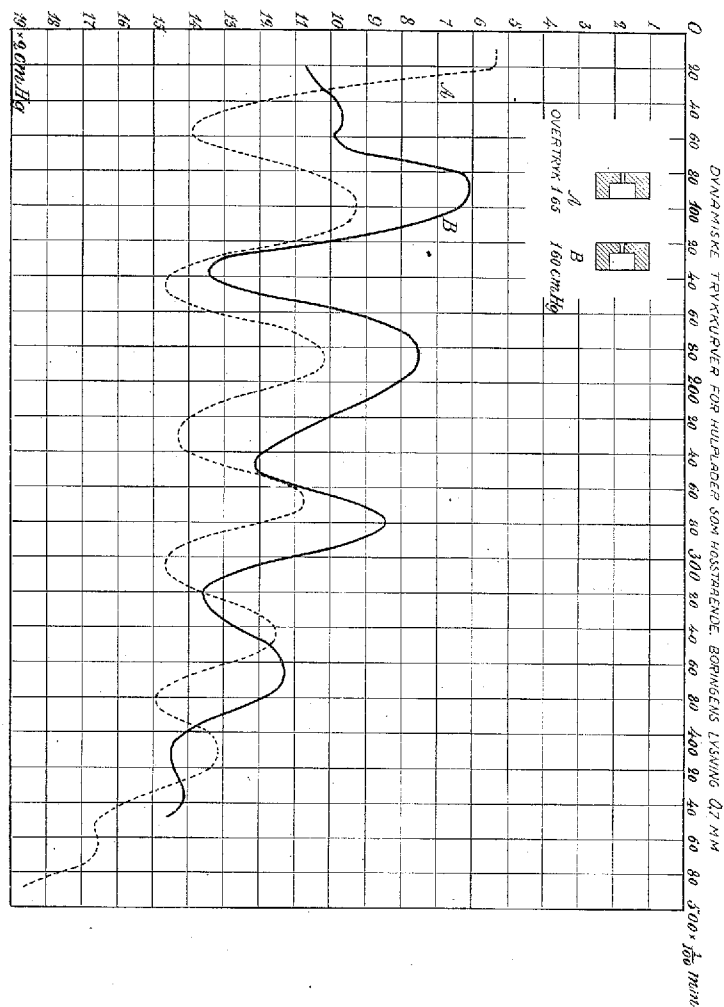


Fig. 17.

blev benyttede i Forsøgene Fig. 19 og 20, fandtes de to Kurver *A* og *B* Fig. 21. Man kunde tænke sig, at de uregelmæssige Bugter paa Kurverne repræsenterede Usikkerhed. Det er dog i Hovedsagen ikke Tilfældet, hvad der tydeligt ses af *B'*, der viser en Gentagelse af *B*. *B'* er forskudt lidt i Forhold til

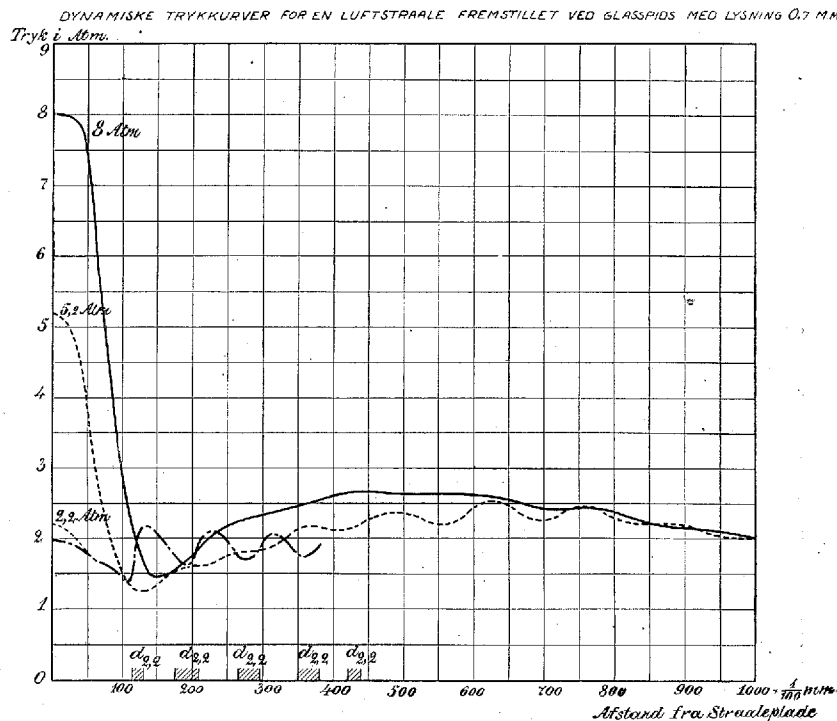


Fig. 18.

B, men har ellers i alt væsentligt dennes Karakter. Man vil lægge Mærke til, at det statiske Tryk lige udenfor Straalehullet synker under Nul; d. v. s. der optræder paa dette Sted i Straalen et Undertryk. Det genfindes i Fig. 22, i hvilken Figur der er indtegnet to sammenhørende Kurver for det statiske plus det dynamiske Tryk (Kurve *B*) og for det statiske alene (Kurve *A*). Overtrykket har her været saa lavt, at de periodiske Bølger i den første Kurve har været vel udviklede. I

DYNAMISKE TRYKKURVER VED GLASSPIDS PAA CA 1.5 MM

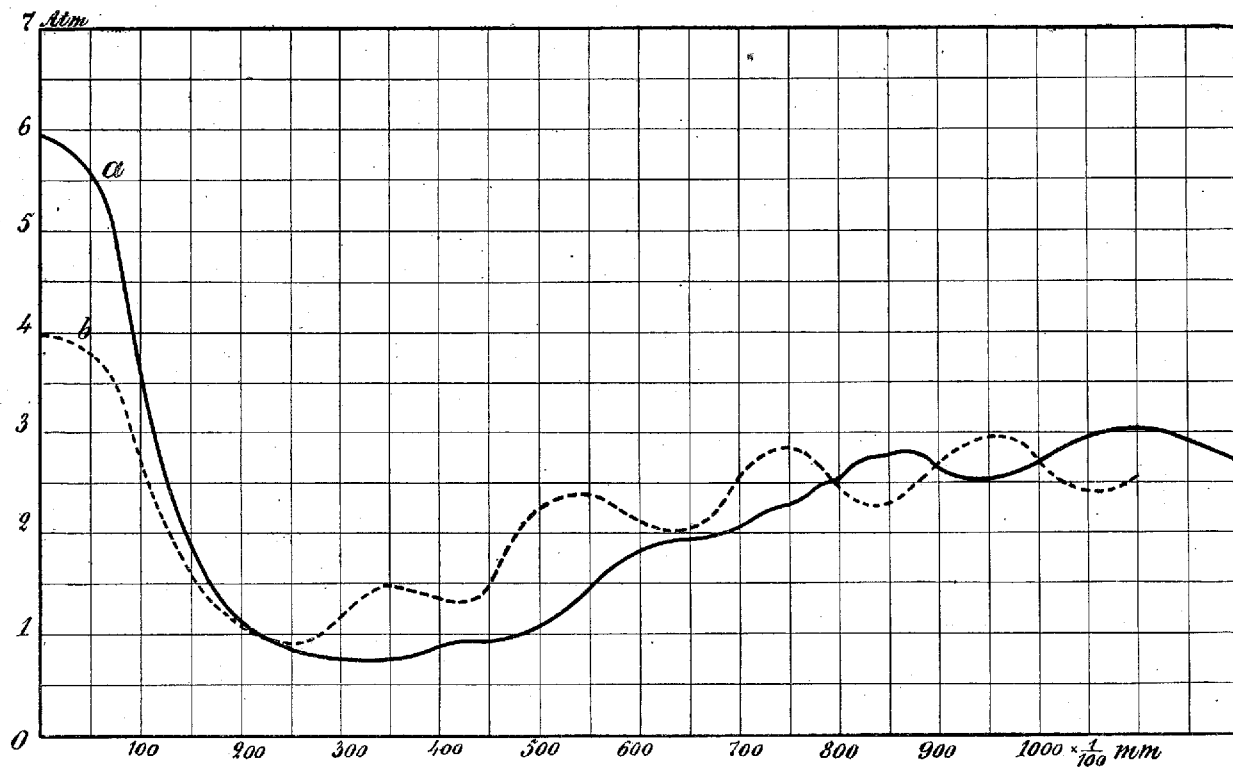


Fig. 19.

DYNAMISKE TRYKKURVER VED KONISK BORING PAA 1.5 MM AF HOSSTAARENDE PROFIL

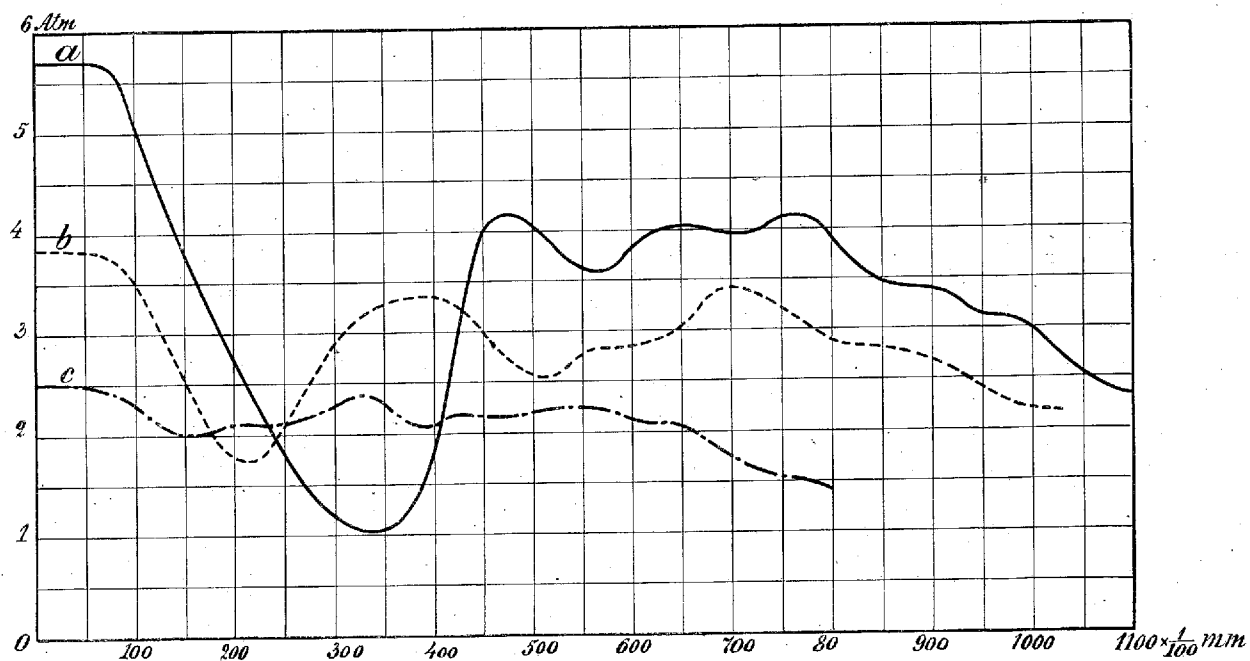


Fig. 20.

den statiske Kurve er Periodiciteten, som det vil ses, meget udvisket.

Vi har ovenfor sammenlignet vore Forsøg ved lavt Tryk med EMDENS. De sidst anførte Forsøg ved højt Tryk og specielt Forsøgene over det statiske Tryks Variation kan passende sammenlignes med de af STODOLA udførte Undersøgelser. STO-

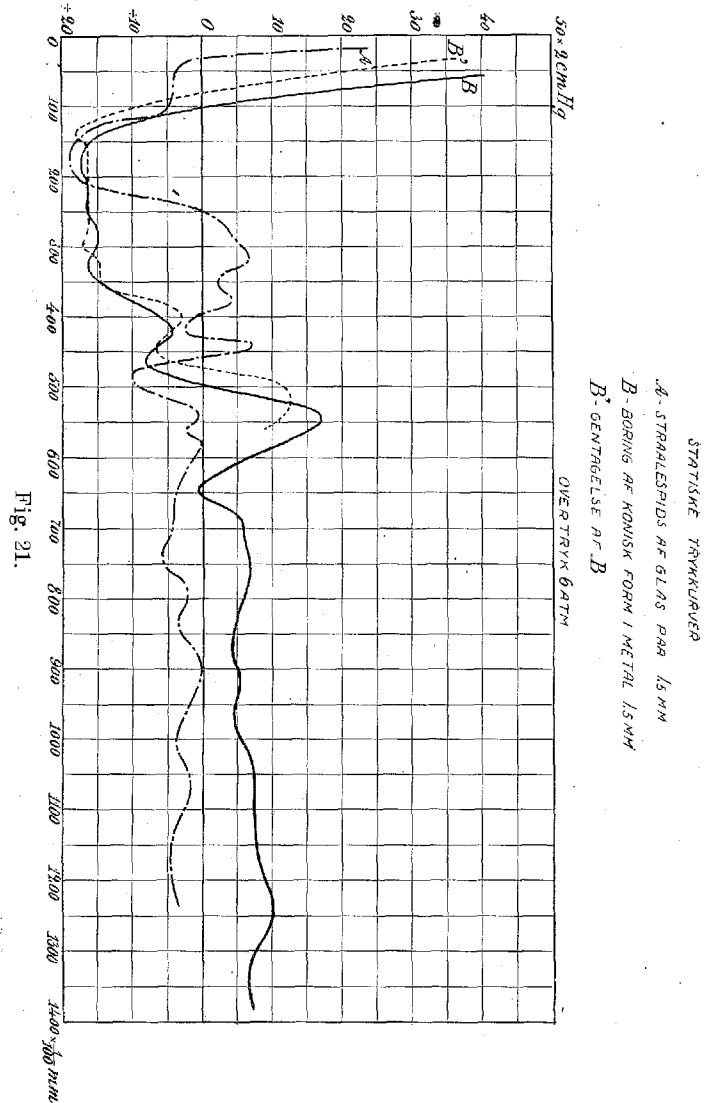


Fig. 21.

DOLA undersøgte de statiske Trykvariationer i en Straale, der under et Tryk paa ca. 7 Atm. traadte ud i et Rum, hvor Trykket kunde varieres. Fig. 23 gengiver en Række af hans Forsøg. Den lille Figur til højre viser Straalehullet og Sonden. Som det ses, finder STODOLA ved højt relativt Over-

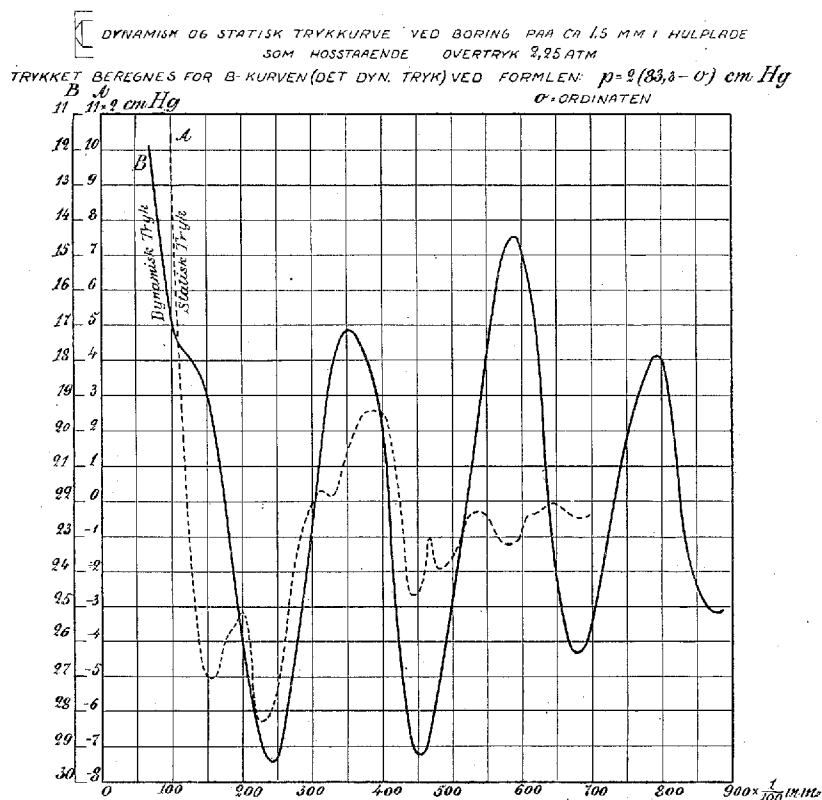


Fig. 22.

tryk Kurver, der i Hovedsagen har den samme aperiodiske Karakter som de ovenfor fremstillede. Ved et Overtryk ca. 2 Gange større end det ydre Tryk finder han udprægede periodiske Svingninger. Af disse Svingninger er der tydelige Spor i Fig. 22, omend Svingningerne er stærkt fortrukne. Ved det her afbildede Forsøg har Overtrykket netop været ca. det dobbelte

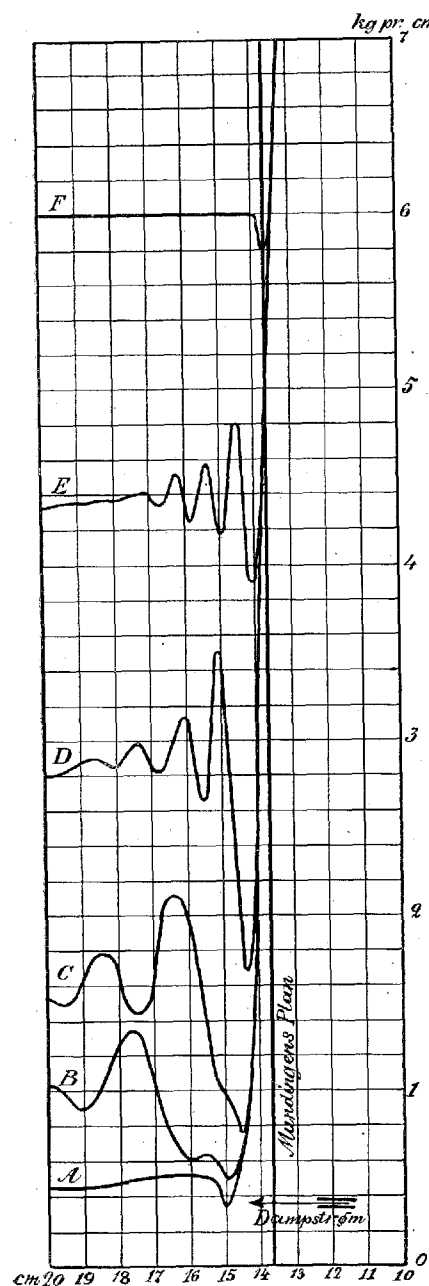
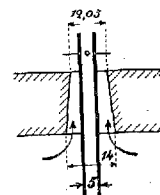


Fig. 23.

af det ydre Tryk, der i vore Forsøg ikke kunde varieres. Iøvrigt vil det bemærkes, at udpræget periodiske Svingninger i de dynamiske Kurver i Hovedsagen kun frem-

træder ved Overtryk paa omkring 2 Atmosfærer. Jeg drager da heraf og



af STODOLAS Forsøg den Slutning, at Udviklingen af udprægede periodiske Trykvariationer i Hovedsagen er bundet til et bestemt Forhold mellem Trykkene paa de to Sider af Straalehullet, et Forhold paa ca. 3 : 1.

4. Studier over Instabilitetsomraadernes Beliggenhed og de frembragte Svingninger.

Ved Optagelsen af de ovenfor gengivne Kurver over Variationen af det dynamiske Tryk fra Sted til Sted i Straalens Akse blev Grænserne for Instabilitetsomraaderne ofte bestemt

og indtegnede i de grafiske Fremstillinger. Bestemmelsen foretoges til at begynde med, efter at den dynamiske Kurve var optaget, idet Pitotsonden erstattedes med Resonatoren eller med den i Fig. 7 antydede Glasspids forbunden med et Hulrum af passende Størrelse. Paa denne Maade var det imidlertid

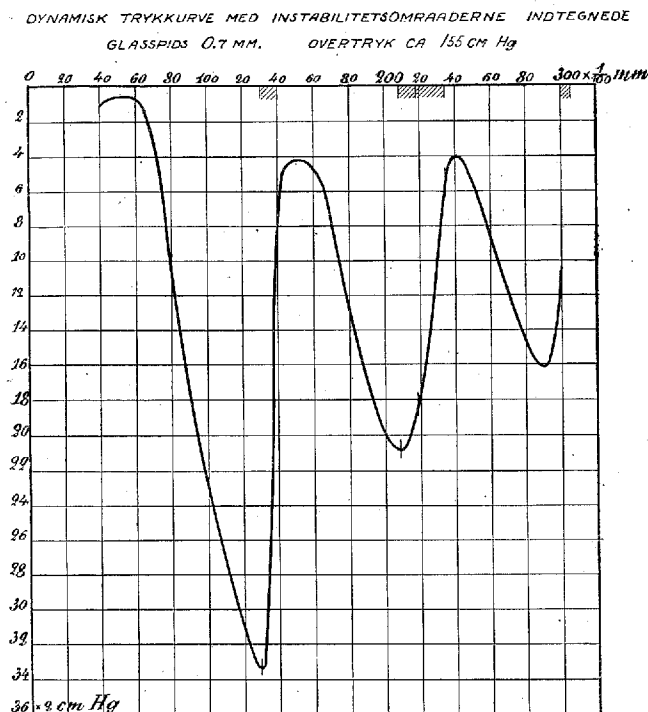


Fig. 24.

ret vanskeligt at faa Grænserne nøjagtig fastlagt. Overtrykket kunde nemlig let ændre sig noget mellem Optagelsen af Kurven og Bestemmelsen af Grænserne, og tillige var det svært med Sikkerhed at sige, hvor Nulstillingerne for Pitotsonden resp. Resonatoren eller Glasspidsen laa. Heri maa Grunden formentlig søges til, at man, som det fremgaar af Fig. 9, hvor Instabilitetsomraaderne er givne ved Skravering, kunde finde, at disse gik noget ud over Maximum af Trykkurven. I

Fig. 9 er der, som det ses, for det første Omraades Vedkommende udført Forsøg med to forskellige Luftbeholdere. De var fremstillede af ca. 3—4 mm vide Glasrør, der var lukkede i den ene Ende og i den anden trukket ud i en »Spids«. Den »mindste Beholder« var nogle faa mm³ stor. Den største af Beholderne var ikke større, end at dens Pulsationer var hørlige som Toner. Ved den mindste var der maaske overhovedet ikke Tale om

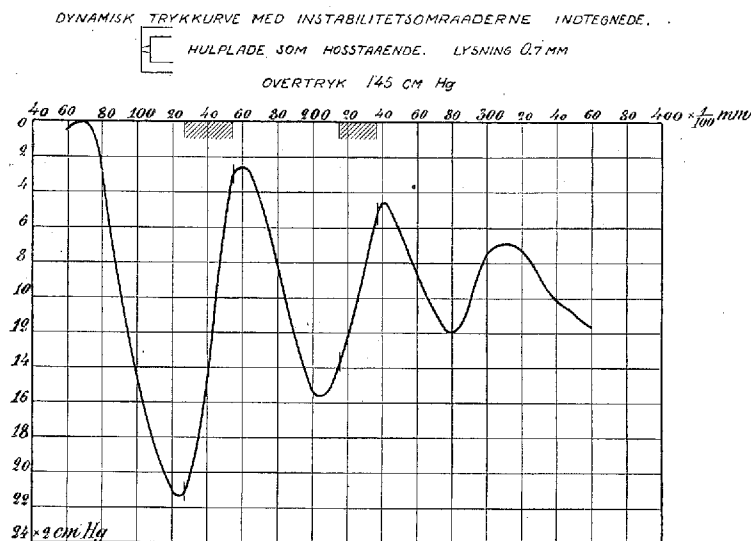


Fig. 25.

Pulsationer, men om Egensvingninger. Naar dens Glasspids anbragtes i Begyndelsen af første Interval (nærmest Straalehullet), gav den indenfor det lille Omraade, der er vist i Figuren, en ren Overtone paa ca. 100000 Helsingninger pr. Sek.

Senere bestemte jeg ved en Række Forsøg Instabilitetsomraaderne samtidig med, at Trykkurverne optoges. Det skete paa den Maade, at der paa Slangen fra Pitotsonden til Manometret anbragtes en Sideledning, der førte til en Luftbeholder af passende Størrelse. Ved Optagelsen af et Punkt af Trykkurven var der lukket for Sideledningen.

Naar det skulde undersøges, om Pitotsondens Munding be-
fandt sig indenfor Instabilitetsomraadet, aabnedes der for
Sideledningen, medens der lukkedes af for Manometret. Ved
Forsøgene maatte der anvendes en relativ vid Pitotsonde be-
staaende af en Glasspids. For at undgaa Pulsationer i Mano-
metret blev der mellem dette og den omtalte Sideledning ind-
skudt et Kapillarrør, hvis Modstand gjorde Svingningerne
aperiodiske. Fig. 24 og 25 viser Resultater af Bestemmelser
efter denne Metode. Som det ses, ligger Instabilitetsomraaderne
nu udelukkende indenfor de Dele af Kurven, hvor Trykket
— det dynamiske plus det statiske — vokser.

Mindre simpelt viste Forholdene sig at være ved Straaler
frembragt ved større Overtryk. Der skal her først henvises til
Fig. 18. Ved det laveste Overtryk paa 2.2 Atm. genfinder vi
den periodiske Fordeling af Instabilitetsomraaderne $d_{2.2}, d_{2.2} \dots$
Ialt er 5 Omraader iagttagne. (Der bør ikke lægges for stor
Vægt paa Omraadernes Grænser, da disse ikke er bestemt
direkte i Forbindelse med Kurven). Sættes nu Trykket op,
breder Omraaderne sig ud og flyder mere eller mindre over
i hinanden. Ved Trykket 5.2 Atm. kunde man dog endnu
meget tydelig skelne Variationer i Styrken af Egensvingnin-
gerne for den Resonator, ved hvilken Instabilitetsomraaderne
undersøgtes. Resonatoren begyndte at svinge ved Abscissen
270. Ved 530 var der et kendeligt Minimum svarende til den
affaldende Del af den akustiske Bølge. Derpaa steg Lydinten-
siteten atter for igen at faa et Minimum omkring 660. Endelig
iagttoges et næsten fulstændig isoleret Svingningsomraade
mellem 710 og 760. De to sidste Svingningsomraader svarer
ganske øjensynlig til de opstigende Dele af to Bølger. Ved
Trykket 8 Atm. var Variationerne i Resonatorens Svingnings-
intensitet næsten udvisket. Ved samme (hørlige) Resonator
som benyttedes ved Trykket 5.2 Atm. begyndte Svingnings-
omraadet ved 350 og gik til 620. Derefter fulgte atter et mindre,
isoleret Omraade fra 660 til 700. Ved en Resonator, der gav

en noget højere Tone, som konstateredes ved Støvfigurer, iagttoges Begyndelsen af Instabilitetsomraadet allerede ved 230, og det strakte sig til ca. 900. Maaske kunde der udenfor dette ubrudte Omraade spores et mindre mellem 950 og 1050.

Ved Forsøget i Fig. 19 begyndte Resonatoren, naar Overtrykket var 6 Atm., at give sin Overtone ved 175. Ved 240 slog den over i Grundtonen. Herefter iagttoges ved Kundts Støvfigurer regelmæssige Svingninger til 690. Mellem 690 og 750 var Svingningerne uregelmæssige (»Stød«). Fra 750 til op over 1100 iagttoges herefter atter regelmæssige Svingninger af Grundtonens Frekvens. Ejendommelig var den Variation, man iagttog i Længden af Lydbølger udmaalt ved Kundtrør. Mellem 340 og 640 varierede den iagttagne Bølgelængde paa følgende Maade:

340	$\lambda/2$	=	2.40	mm
440	-		2.60	-
540	-		2.65	-
640	-		2.80	-

Mellem 770 og 940 iagttoges for

770	$\lambda/2$	=	2.30	mm
820	-		2.40	-
940	-		2.40	-

Resonatorens Egensvingningstid er altsaa ikke ganske den samme overalt i Instabilitetsomraadet eller i to forskellige Omraader. Aarsagen hertil er sikkert at søge i Variationer i Tilstanden af Luften fra Sted til Sted i Straalen.

Ved et Overtryk paa 4 Atm. iagttoges to Svingningsomraader mellem 190 og 320 og mellem 420 og 480. De svarer øjensynlig til to opstigende Dele af Trykkurven. Atter iagttoges den karakteristiske Variation i Bølgebredden ved Kundts Rør. Saaledes fandtes for

200	$\lambda/2$	=	2.10	mm
210	-		2.15	-
220	-		2.15	-
270	-		2.50	-

Endelig studeredes Forholdene ved Straalen i Fig. 20.

Ved Kurven svarende til et Overtryk paa 5.7 Atm. begyndte Resonatoren at give sin Overtone ved 180. Grundtonen hørtes først ved 280, hvorefter den kunde iagttages til ca. 910. Fra 280 til 910 varierede Bølgebredden paa følgende Maade:

280	$\lambda/2$	=	2.20	mm
310	-		2.20	-
510	-		2.50	-
610	-		2.65	-
710	-		2.65	-
810	-		2.90	-
910	-		2.60	-

Ved en anden Resonator (Nr. 7) fandtes følgende Variation.

315	$\lambda/2$	=	4.30	mm
415	-		4.50	-
515	-		4.75	-
615	-		4.90	-
715	-		5.25	-
815	-		5.30	-
915	-		5.50	-

Ved 4 Atm.' Overtryk begyndte Resonatoren at give sin Overtone ved 170. Grundtonen begyndte omkring 230 og varede med visse Variationer i Renhed og Intensitet til op mod 820.

Det er som sagt vanskeligt at finde nogen helt simpel Regel for Beliggenheden af Instabilitetsomraaderne i Forhold til de dynamiske Kurver, naar disse ophører med at være rent periodiske. I Hovedsagen er Omraadet dog øjensynlig knyttet

til den opstigende Del af Kurven, der følger efter det første store Minimum tæt udenfor Straalehullet. Men rigtignok synes Omraadet at omfatte ogsaa dette Minimum, ja maaske at strække sig et Stykke op ad det stejle Affald før Minimum. Muligvis hænger dette sidste Forhold, der kun er iagttaget ved sværere Straaler og videre Resonatorer, sammen med, at Straalen kan trænge et Stykke ind i Resonatoren.

5. Undersøgelser over Resonatoren og dens Egensvingninger.

Til Forsøg over Resonanssvingninger blev der fremstillet et stort Antal Resonatorer af den i Fig. 4a viste Type. Ved et første Sæt var Diametren i Resonatorens Boring 0.7 mm svarende til, at den hyppigst benyttede Straale dannedes ved en Glasspids med denne Lysning. Resonatorerne blev nummererede og deres Dybder udmaalt. Det sidste skete ved en Synaal. Denne blev stukket ned i Resonatoren, idet den holdtes ved en Pincet, som blev ført saa langt ned paa Naalen, at den laa an mod Mundingen af Resonatoren. Naar man herefter tog Pincetten med Synaalen op, kunde Længden fra Pincetten til Spidsen let maales med $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{20}$ mm' Sikkerhed paa en Maalestok. Med den antydende Samling af Resonatorer udførte jeg flere Forsøg ved relativt lave Overtryk, og disse viste, at den frembragte Tone normalt havde en Bølgebredde paa godt 4 Gange Dybden. Heraf følger, at man har at gøre med Resonatorens Egensvingning og normalt altsaa Grundsvingningen. I hosstaaende Tabeller er fire Forsøgsrækker A, B, C og D anførte.

Under Kolonnerne mærkede $\lambda/2$ I, $\lambda/2$ II, og $\lambda/2$ III er anført den halve Bølgebredde for de Svingninger, Resonatoren gav, naar dens Munding anbragtes henholdsvis i første, andet og tredje Instabilitetsomraade. Bølgebredden udmaalt ved Kundts Støvfigurer. I Hovedsagen er Bølgebredden uaf-

Forsøgsrække	Resonator Nr.	Dybde i cm	Atmosfærisk Luft			Brint $\lambda/2$ cm	Anm.
			$\lambda/2$ cm I	$\lambda/2$ cm II	$\lambda/2$ cm III		
A	0	0.050	0.125	—	—	—	
	5	0.055	0.148	—	—	—	
	2	0.115	0.288	0.277	—	—	
	3	0.095	0.313	0.289	—	—	
	4	0.150	0.404	0.400	—	—	
	1	0.160	0.426	0.438	—	—	
	6	0.180	0.464	0.445	—	0.130	
B	0	0.050	0.150	—	—	—	
	8	0.050	0.145	—	—	0.050	
	3	0.100	0.271	—	—	—	
	12	0.202	0.525	—	—	—	
	7	0.300	0.660	—	—	0.154	
	11	0.410	0.890	—	—	—	ikke hørlig
	9	0.570	1.170	—	—	—	netop hørlig
	13	0.804	1.750	—	—	—	hørlig
C	19	1.980	4.80	4.18	4.20	—	
	14	1.420	3.47	3.20	3.20	0.925	
	10	1.020	2.18	2.25	—	0.655	
	13	0.804	1.93	1.88	—	—	
	9	0.570	1.31	1.23	1.22	0.362	
	15	0.540	1.26	1.19	1.15	—	
	18	0.435	0.99	1.01	0.97	—	hørlig
	11	0.410	1.00	0.95	—	—	lige netop hørlig
	7	0.300	0.74	0.70	—	—	ikke hørlig
	8	0.050	0.17	0.15	0.15	—	
D	19	1.980	4.15	—	—	—	
	13	0.804	1.80	—	—	—	
	9	0.570	1.20	—	—	—	
	18	0.455	1.00	—	—	—	

hængig af Instabilitetsområdet, dog spores en svag Formind-
kelse, naar man gaar over til et Omraade af højere Nummer.
At Bølgebredde og altsaa ogsaa Resonatorens Svingnings-
tal er uafhængig af Overtrykket i det Reservoir, hvorfra Luften
strømmer til Straalen, fremgaar af Iagttagelserne i *D* ved Sam-
menligning med tilsvarende Iagttagelser i *B*. Forsøget *B* blev

nemlig ved Straaler af atmosfærisk Luft udført ved et Overtryk paa ca. 174 cm Hg., medens D udførtes ved ca. 120 cm' Overtryk. At der er en ringe Forskel paa Svingningstallet i de forskellige Instabilitetsomraader maa sikkert som ovenfor forklares ved en Forskel i Luftens Tilstand i disse Omraader. Iøvrigt er Tabel A afbildet grafisk i Fig. 26, medens Iagttagelserne fra B , C (Kolonne II) og D er indtegnede i Fig. 27. Det

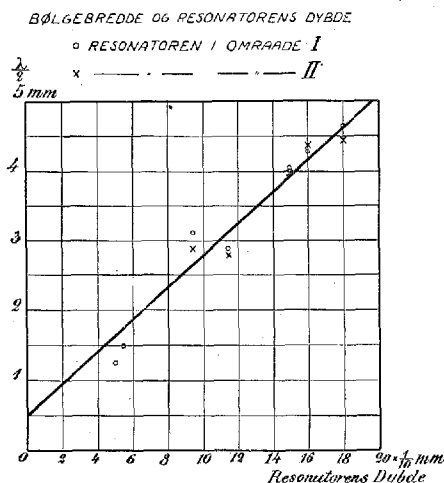


Fig. 26.

ses, med hvor høj Grad af Nøjagtighed $\lambda/2$ varierer retliniet med Resonatorens Dybde d . λ kan altsaa udtrykkes ved en Formel

$$\lambda = c \cdot d + c_0$$

hvor c og c_0 er Konstanter. Forsøg C giver med de i Figuren anførte Enheder $c = 4.43$ og $c_0 = 0.8$, medens Forsøg B giver $c = 4.14$ og $c_0 = 0.8$. Konstanten c ligger altsaa, som den skal ved cylindriske Resonatorer, nær ved 4. Leddet c_0 skyldes som bekendt den Omstændighed, at den svingende Luftsøjle strækker sig lidt ud over Resonatorens Munding. Forklaringen paa de lidt forskellige Linier ved Forsøgene B og C kan muligvis søges i en Forskel i Temperaturen af Luften i Kundtrørene ved de to Forsøg. Forklaringen er derimod ikke,

som det let ses, at Iagttagelser fra to forskellige Instabilitets-omraader er benyttet i de to Tilfælde.

For at undersøge, hvor store Variationer der opad kunde

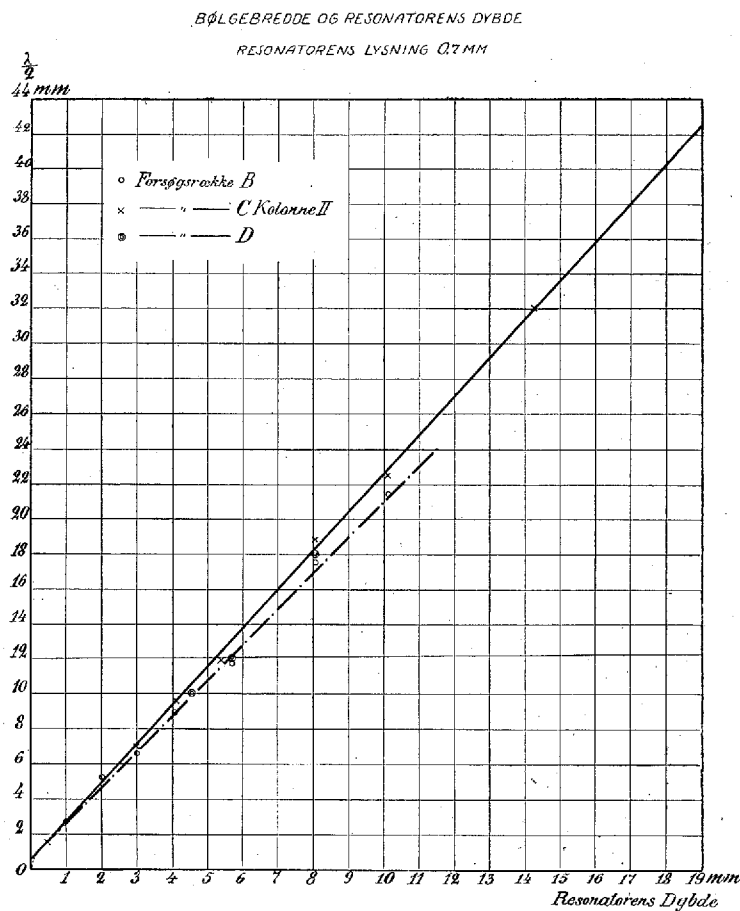


Fig. 27.

tillades i Resonatorens Lysning blev der fremstillet tre omtrent lige dybe Resonatorer med Lysninger 0.8, 0.9 og 1.0 mm. Med en Straale frembragt ved den ovenfor antydede Glasspids paa 0.7 mm fandtes følgende Værdier for Bølgebredden ved disse Resonatorer og ved Resonatoren Nr. 9.

Resonator Nr.	Lysning mm	Dybde mm	$\lambda/2$ cm
9	0.7	5.70	1.36
22	0.8	5.10	1.20
21	0.9	5.40	1.27
20	1.0	5.30	1.29

Som det ses, har Lysningen ingen kendelig Indflydelse paa Svingningstallet.

Det fremgaar af Forsøgene ovenfor, at det ved Formindskelse af Resonatorens Dybde er muligt at sætte Resonanssvingningernes Frekvens op til meget store Værdier. Det ligger i, at Virkningen af Mundingen, der finder sit Udtryk i Konstanten c_0 , ved de her benyttede meget snævre Resonatorer er saa ringe. I Forsøg A er saaledes iagttaget en Bølgebredde paa 0.25 cm. Sættes Lydens Hastighed lig 34000 cm/Sek., ses det, at Antallet af hele Perioder har været 136000 pr. Sek. Af Bevægelsen af Støvet i Kundtrøret kunde det sluttes, at de frembragte Svingninger er relativt meget intensive, og af Støvfigurerne skarpe Tegning synes det at fremgaa, at Svingningerne er meget rene. Svingningerne er fuldkommen stabile og kan erholdes i saa lang Tid, det skal være. For Indstillingen af Resonatoren er der endelig et ret betydeligt Spillerum. Extremt høje Frekvenser (f. Eks. over 100000) kan iøvrigt meget simpelt faaes som Overtoner ved Resonatorer af større Dybde. Her skal eksempelvis anføres et Par Iagttagelser over saadanne Overtoner. Iagttagelserne er samlede i hosstaaende Tabel, der indeholder Bølgebredderne for Grundtonen og Overtonen ved fire Resonatorer. Som det ses, er det første Overtone, der frembringes. Man faar Resonatoren til at give Overtonen ved at føre den tæt hen til den mod Straalehullet vendende Grænse af (første) Instabilitetsomraade. Af Forsøgene i Tabellen ses, at det højeste Svingningstal er ca. 120000 (hele Perioder). Overtonen synes fuldkommen ren, meget intensiv og absolut stabil.

Resonator Nr.	Dybde mm	$\lambda/2$ Grundtone	$\lambda/2$ Overtone	Grundtone: Overtone
22	5.10	1.20 cm	0.400 cm	3.0
7	3.00	0.65 -	0.205 -	3.2
12	2.02	0.490 -	0.142 -	3.4
3	1.00	0.260 -	ingen -	—

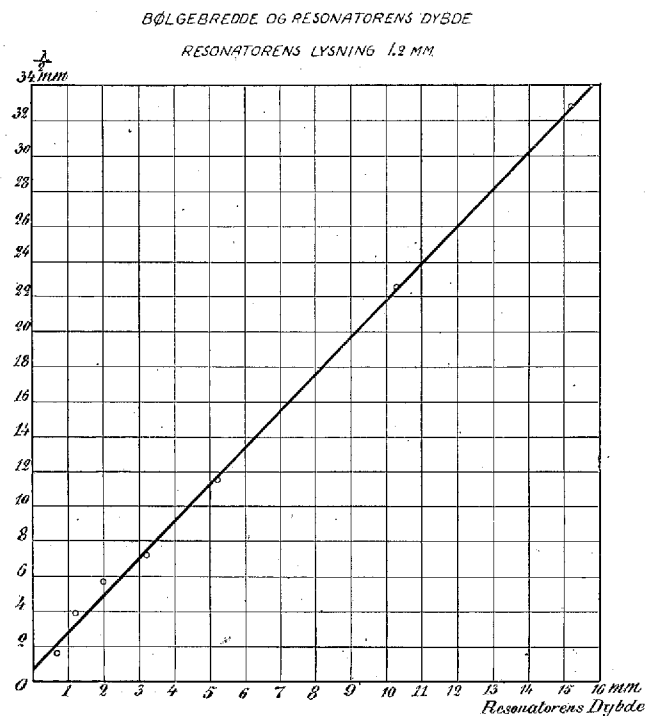


Fig. 28.

Naar man i Tabellen ovenfor ikke helt konstant faar Forholdet 3 mellem Grundtonens og Overtoneens Bølgebredder, kan det ligge i, at den Værdi, et Kundtrør giver for Bølgebredden, er noget afhængig af Frekvensen.

Som tidligere anført har jeg udført Forsøg over Resonatorens Svingninger i en Brintstraale. I Tabellen p. 33 er Resultaterne anført i sidste $\lambda/2$ -Kolonne. Forholdet mellem $\lambda/2$ ved Brintstraalen og $\lambda/2$ ved Luftstraalen synes at være ca.

3.5. Ved ren Brint skulde Forholdet have været lidt større, nemlig 3.8, men den i Handelen gaaende Brint, der benyttedes ved Forsøget, er næppe helt ren. Den mindste iagttagne Bølge, der vistnok er fundet lidt for stor, giver for Svingningstallet ca. 340000 pr. Sek.

Ovenfor er allerede omtalt en Række Maalinger med Kundtrør af Bølgebredden for Svingninger frembragt ved at anbringe en Resonator i de udstrakte Instabilitetsomraader, der kommer ved højere Overtryk. De fleste af disse Maalinger blev udført ved tykkere Straaler og med tilsvarende videte Resonatorer. Vi har set, hvorledes Bølgebredden resp. Frekvensen for de frembragte Svingninger ændredes, naar Resonatoren blev forskudt ned gennem Instabilitetsomraadet. Iøvrigt er Bølgebredden ganske som ved de snævre Resonatorer i Hovedsagen fire Gange Resonatorens Dybde, saaledes som det vil fremgaa af Fig. 28, der gengiver et Forsøg med et Sæt Resonatorer paa 1.2 mm' Lysning. Ved Udmaaling paa denne Kurve findes Formlen

$$\lambda = 4.22 d + 1.2$$

til Beregning af λ ved Resonatorens Dybde. Det konstante Led er noget større end før svarende til, at Resonatoren er videre.

Endnu skal der anføres et Par Bemærkninger om Intensiteten af de frembragte akustiske Svingninger. Som antydnet er disse relativt meget stærke. En iagttagelse vil give et Begreb om Intensiteten. En Resonator paa ca. 24000 Egen-svingninger og med en Lysning paa 1.7 mm blev ført ind i en Luftstraale frembragt ved en Boring paa 1.5 mm. Naar Overtrykket var mellem 4 og 5 Atmosfærer, gav et Kundtrør paa 30 cm' Længde og en Lysning paa 4 mm Støvfigurer, naar Mundingen af Røret var anbragt i en Afstand fra Resonatoren paa op imod $\frac{1}{2}$ m. Ved Resonatorer omkring 10000 Svingninger med en Lysning paa 1.5 mm var Tonen næsten uudholdelig stærk selv ved smaa Overtyk og gav hos iagttageren Anledning til en fysiologisk Eftervirkning, der kunde holde sig i Timer.

For at give en Forestilling om Udseendet af Kundtfigurerne vedføjes i Fig. 29 en fotografisk Gengivelse af en Række Støvfigurer. Til Sammenligning er paa samme Billede optaget en Millimetermaalestok.¹

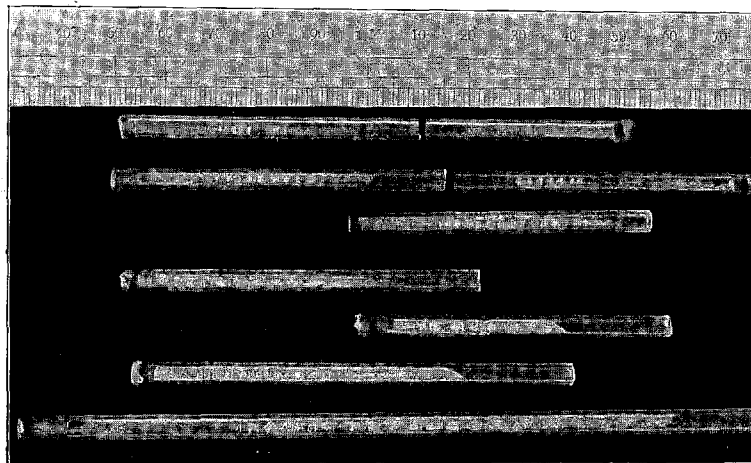


Fig. 29.

Det foreliggende Arbejde er i Hovedsagen udført for Midler stillet til Raadighed af Carlsbergfondet. For Understøttelsen bringer jeg herved Fondets Bestyrelse min Tak. Fremdeles takker jeg Hr. Professor K. PRYTZ for den Interesse, han som Bestyrer af det fysiske Laboratorium paa den polytekniske Lærestalt har vist mit Arbejde. Tak skylder jeg ogsaa Hr. Professor P. O. PEDERSEN for Laan af Hovedbestanddelene i det i Fig. 5 viste Apparat.

Den polytekniske Lærestalts fysiske Laboratorium, Juni 1919.

¹ Det meddelte Arbejde gaar, som det ses, ikke nærmere ind paa de ovenfor antydede Pulsationer. Over disse er der ganske vist allerede udført en Del Iagttagelser, men et systematisk Studium har jeg maattet opsætte paa Grund af den under Krigen herskende Mangel paa Kul.