

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab.

Mathematisk-fysiske Meddelelser **VI**, 4.

OM ELEKTRISKE GNISTER

II. EKSPERIMENTELLE UNDER-
SØGELSER OVER GNISTFORSINKELSE
OG GNISTDANNELSE

AF

P. O. PEDERSEN

MED 7 TAVLER



KØBENHAVN

HOVEDKOMMISSIONÆR: ANDR. FRED. HØST & SØN, KGL. HOF-BOGHANDEL
BIANCO LUNOS BOGTRYKKERI

1924

Indledning.

I El. Gn. I¹ var det forudsat, at El. Gn. II skulde bringe nogle teoretiske Betragtninger over Gnistens Dannelsesmaade. Det har imidlertid vist sig, at Opstillingen af en ny Gnistteori, af hvilken der paa andet Sted² er givet nogle foreløbige Antydninger, krævede yderligere Undersøgelser til Klarlæggelse af visse fundamentale Forhold vedrørende Gnistens Dannelsesmaade. Da disse Forsøg har antaget et ret stort Omfang, har vi fundet det rigtigst at samle Resultaterne af dem i en særlig Afhandling.

1. Gnistforsinkelse i inhomogene Felter.

Den minimale Forsinkelses Afhængighed af Feltets Fordeling langs Gnistvejen.

Det er i El. Gn. I vist, at Gnistforsinkelsen foruden af Luftartens Natur og Tryk i Hovedsagen kun afhænger af Feltstyrken og kun i ringe Grad eller slet ikke af Gnistlængden, i hvert Fald naar Feltintensiteten har omtrent samme Værdi langs hele Gnistvejen. Det næste Spørgsmaal er nu, om Feltets Styrke spiller samme Rolle overalt langs Gnistvejen, eller om det særlig er dens Værdi i visse Punkter af denne — f. Eks. ved Katoden eller Anoden — det

¹ Om elektriske Gnister I. Vid. Selsk Math.-fys. Medd. IV. Nr. 10. 1922. (Betegnes i det følgende El. Gn. I.)

² »Förhandlingar vid andre nordiska elektroteknikermötet i Göteborg 1923«. Teknisk Tidskrift. Häft. 40, p. 174—184. Stockholm 1923. (Betegnes El. Gn. 1923).

kommer an paa. De foregaaende Undersøgelser, der har vist den store Indflydelse af Beskaffenheden af Katodens og Anodens Overflader, kunde tyde paa, at det især var Feltstyrken ved enten Katode eller Anode eller begge Steder, der var afgørende. For at faa dette Spørgsmaal klarlagt, har vi anstillet de nedenfor beskrevne Forsøgsrækker, hvortil er anvendt det i Fig. 1. viste Elektrodepar.

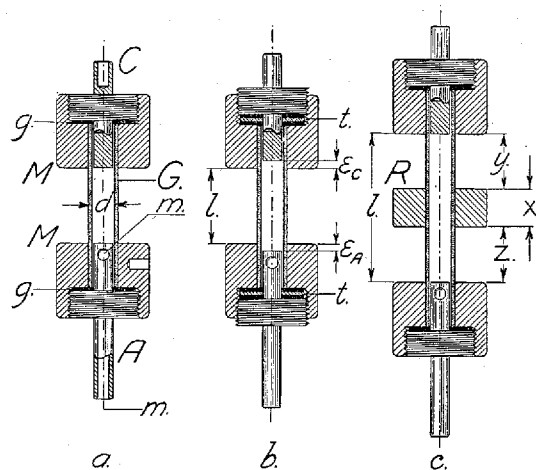


Fig. 1. Elektrodepar. C Katode. A Anode.
Gnistlængde $= l + (\epsilon_c + \epsilon_A)$. Rørets indre Diameter $d = 6$ mm.

Gnistudladningen foregaar i det viste Glasrør G (se Fig. 1 a), hvis Ender er fastkittede i de cylindriske Messingbøsninger M, i hvis yderste Ender selve Elektroderne, C og A, er fastskruede. Disse er ogsaa af Messing og ender i Cylindre, der med ganske ringe Spillerum passer ind i Glasrøret. De aktive Dele af disse Elektroder dannes af de mod hinanden vendende plane Endeflader inde i Røret, og Forholdene er saaledes afpassede, at disse Endeflader kan bringes til at falde nøjagtig i Plan med de mod hinanden vendende Endeflader af Cylindrene M (se Fig. 1 a).

Feltet bliver i saa Fald meget nær konstant langs hele Gnistvejen. Tætheden mellem Gnistrummet (Glasrørets Indre) og den omgivende Luft er tilvejebragt ved Hjælp af Gummiskiverne g , og Udpumpningen af Gnistrummet sker gennem Kanalen mm i Anoden,

Ved Hjælp af dette Apparat kan man bestemme Gnistforsinkelsen τ 's Afhængighed af Lufttrykket p i Gnistrummet, idet man holder Primærgnistens Længde L og den undersøgte Gnists Længde l konstant. Man faar dog kun regelmæssige, konstante Resultater, hvis man sørger for forud for hver ny Udladning omhyggelig at fjerne alle elektriske Ladninger fra Glasrørets Vægge, hvilket bedst sker ved Hjælp af et Stykke rent Gace, der er vædet i ren Æter. En saadan Rensning er foretaget ved de i det følgende omtalte Forsøg.

Holdes Katoden »ren« faas da $(\tau_{\min}, p)$ -Kurver, der ganske svarer til de i El. Gn. I, Fig. 14 viste. Ved ren forstås her, ganske i Overensstemmelse med El. Gn. I, § 4, at Elektrodens aktive Endeflade er omhyggelig afpudset med fuldstændig rent Karborundumpapir.

Ved disse Forsøg var, som nævnt, Feltintensiteten meget nær den samme over hele Gnistvejen. Den tilsvarende minimale Forsinkelse — altsaa Forsinkelsen for ren Katode — betegnes i det følgende ved $\tau_{\min}$. Vi gaar dernæst over til at undersøge Indflydelsen af en Inhomogenitet i Feltet, idet vi ved disse Ændringer i Feltfordelingen holder Lufttrykket p , Afstanden l mellem Cyldrene M og Primærgnistens Længde L konstante.

Den første af de Metoder, der er benyttet til Frembringelsen af Inhomogenitet i Feltfordelingen, er angivet i Fig. 1 b og bestaar i, at Katoden eller Anoden trækkes et Stykke, ε_c eller ε_A tilbage i Forhold til de plane Endeflader af Me-

talcylinerne M . Herigennem formindskes Feltintensiteten ved vedkommende Elektrodes Overflade, desto mere jo større ε er i Forhold til Rørdiametren d . Resultaterne af en Række saadanne Forsøg er angivet i Fig. 2 og 3.

I Fig. 2 viser den fuldt optrukne Kurve ab τ 's Afhængighed af Anodens Tilbagetrækning ε_A under Forudsætning af,

at Katoden er ren og ikke trukket tilbage ($\varepsilon_c = 0$). Man ser, at Gnistforsinkelsen i saa Fald er praktisk talt uafhængig af Anodens Tilbagetrækning, altsaa af Feltintensiteten ved Anodens Overflade.

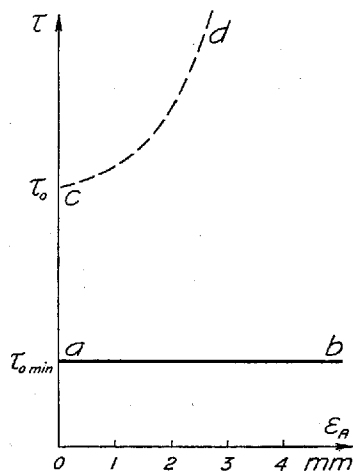


Fig. 2. Skematisk Fremstilling af Forsinkelsens Afhængighed af Anodens Tilbagetrækning ε_A . Kurve ab gælder for ren Katode i Normalstilling ($\varepsilon_c = 0$) ($l = 20$ mm). Kurve cd for Katode enten fedtet eller stærkt tilbagetrukket eller begge Dele.

Paa tilsvarende Maade viser den fuldt optrukne Kurve abc i Fig. 3 Forsinkelsens Afhængighed af Katodens Tilbagetrækning ε_c under Forudsætning af, at baade Katode og Anode er rene og den sidste ikke trukket tilbage ($\varepsilon_A = 0$). Det fremgaar heraf, at Gnistforsinkelsen vokser stærkt med tiltagende Tilbage-

trækning af Katoden, altsaa med aftagende Feltintensitet ved denne.

Ved de foregaaende Forsøg var Katoden ren og kun den ene Elektrode trukket tilbage; er dette ikke Tilfældet, stiller Forholdene sig en Del anderledes. Er Katoden saaledes enten fedtet eller stærkt tilbagetrukket — eller begge Dele — vil Forsinkelsen τ_0 for $\varepsilon_A = 0$ være langt større

end $\tau_{0\min}$ (se Fig. 2), og den vil desuden nu være i høj Grad afhængig af Anodens Stilling, idet den, saaledes som Kurve cd antyder, vokser meget stærkt med ϵ_A , altsaa med aftagende Feltintensitet ved Anoden.

Er Katoden derimod ren, saa har det ingen Indflydelse paa Forsinkelsen, om Anoden er ren, fedtet eller tilbagetrukket, saalænge Katodens Tilbagetrækning kun er ringe. For store Værdier af ϵ_c bliver τ derimod, som Fig. 3 Kurve bd viser, meget større, end den vilde være, hvis Anoden var ren og $\epsilon_A = 0$.

En Sammenligning mellem det her anførte og de i El. Gn. I § 6 meddelte Resultater viser, at Tilbagetrækning af Elektroderne har en lignende Indflydelse paa Gnistforsinkelsen som en Forurening af disse.

Disse Forsøg tyder stærkt paa, at det for ren Katode er Feltet ved denne, det

kommer an paa. Er Katoden derimod fedtet eller tilbagetrukket, er det særlig Feltet ved Anoden, der spiller en Rolle. For yderligere at belyse disse Forhold har vi anstillet følgende Forsøgsrække.

Over Glasrøret skydes en Messingring R med Længden x . Ringens Afstand fra henholdsvis Katode og Anode betegnes ved y og z ($x+y+z=l$, se Fig. 1 c). Baade Katode og

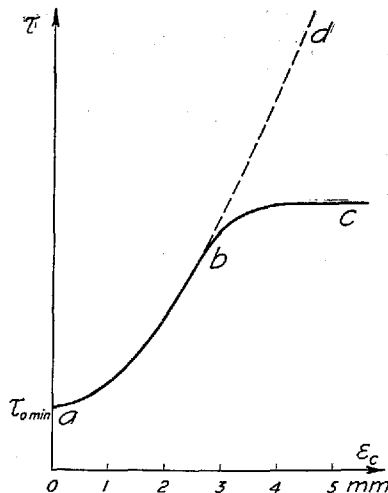


Fig. 3. Skematisk Fremstilling af Forsinkelsens Afhængighed af Katodens Tilbagetrækning ϵ_c . Kurve abc gælder for ren Katode og ren Anode i Normalstilling ($\epsilon_A = 0$) ($l = 20$ mm). Kurve abd for Anoden enten fedtet eller stærkt tilbagetrukket eller begge Dele.

Anode befinder sig i deres normale Stilling ($\epsilon_G = 0$, $\epsilon_A = 0$). Vi gaar nu over til at undersøge, hvilken Indflydelse Ringens Længde og Stilling har paa Gnistforsinkelsen. Vi holdt under disse Forsøg baade Lufttrykket p og Gnistlængden l konstante, og baade Katode og Anode var rene.

Vi undersøgte først Forholdene for Ringen anbragt midt paa Røret, altsaa for $y=z$, medens Ringens Længde varieredes. Resultatet af en saadan Forsøgsrække er angivet i

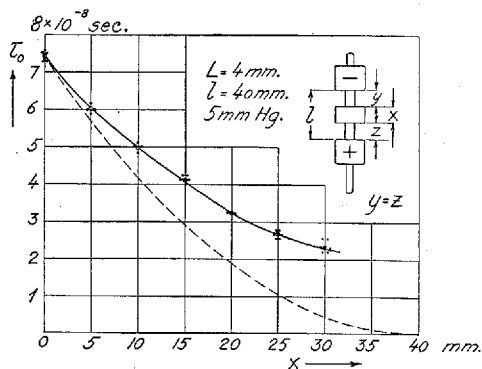


Fig. 4. Den fuldt optrukne Kurve giver Forsinkelsens Afhængighed af Ringens Længde x under Forudsætning af, at Ringen er anbragt midt mellem Katode og Anode.

Den punkterede Kurve viser Forsinkelsen under Forudsætning af, at Gnistlængden l formindskedes til $(l - x)$.

begge Ender, altsaa ved Katode og Anode. Det fremgaar af Fig. 4, at Forsinkelsen formindskes meget betydelig, idet den for $x = 0$ (uden Ring) udgjorde $\tau_0 = 7,4 \times 10^{-8}$ Sekund, medens den for $x = 30$ mm kun var $\tau_0 = 2,3 \times 10^{-8}$ Sekund. (De ved (τ_0, x) -Kurven indtegnede Punkter giver et Begreb om den Sikkerhed, hvormed Maalingerne kan udføres). Til Sammenligning viser den punkterede Kurve det omtrentlige Forløb af Gnistforsinkelsen under Forudsætning af, at Gnistlængden l formindskedes med Ringens Længde, altsaa til Værdien $(l - x)$. Man ser af Fig. 4, at denne sidste Kurve

den fuldt optrukne Kurve i Fig. 4. I dette Tilfælde var $l = 40$ mm og $p = 5$ mm Hg, medens Ringens Længde varieredes mellem 0 og 30 mm. Primærgnistlængden var 4 mm, Ved denne Opstilling formindskes Feltintensiteten meget stærkt ved Rørets Midte, medens den forøgedes paa samme Maade ved

— selvfølgelig — ligger lavere end den med Benyttelse af Ringen optagne (τ, x) -Kurve.

I det ovenfor beskrevne Forsøg formindskedes Feltintensiteten stærkt ved Rørets Midte og forøgedes ved Katode og Anode. Vi gik dernæst over til at undersøge Indflydelsen af Ringens Stilling, idet dennes Længde holdtes konstant. Det viste sig da, at τ er uafhængig af Ringens Stilling paa Røret, saalænge Afstanden y mellem Ring og Katode ikke er under 2 à 3 mm. Anbringes Ringen endnu tættere ved Katoden, stiger Gnistforsinkelsen ret stærkt, saaledes som antydtes ved den fuldt optrukne Kurve i Fig. 5. Er Anoden fedtet, vokser, som vist ved den punkterede Kurve i Figuren, Gnistforsinkelsen endnu stærkere, naar Ringen anbringes tilstrækkelig nær ved Katoden. Gnistforsin-

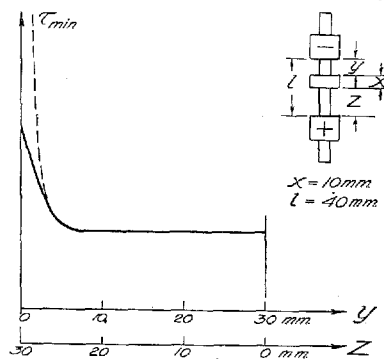


Fig. 5. Gnistforsinkelsens Afhængighed af Ringens Stilling. Den fuldt optrukne Kurve gælder for ren Anode, den punkterede for fedtet Anode

kelsens Forøgelse ved at Ringen anbringes ganske tæt ved Katoden, skyldes uden Tvivl, at Feltintensiteten ved denne gaar meget ned, naar Ringen kommer tæt til Katoden.

De ovenfor omtalte Forsøg er ikke alene foretaget ved forholdsvis lave Tryk, men der er udført Kontrolmaalinger for $p = 200$ mm Hg, og disse Maalinger viste, at Forløbet af Forsinkelsens Afhængighed af Feltets Fordeling i alt væsentligt er det samme ved højere Tryk.

Disse Forsøg viser tydelig, at Gnistforsinkelsen for plan eller svagt buet Katode og Anode i første Linie er afhængig af Feltintensiteten ved Elek-

troderne og kun i ringe Grad af Feltintensiteten langs Resten af Gnistvejen. Er Katoden ren, er det endda kun Feltintensiteten ved denne, der spiller en Rolle, medens Feltintensiteten ved Anoden er uden Betydning.

Det fremgaar endvidere heraf, at for ren — plan eller svagt buet — Katode er Forsinkelsen desto mindre, jo større Feltkraften er ved Katoden.

I de foregaaende Forsøg var Feltet ved Katoden og Anoden nogenlunde homogent, idet baade Katode og Anode var plane. Gaar vi over til Elektrodeformer med stærkt divergerende Felt, som f. Eks. Spidser eller tynde Traade, stiller Forholdet sig helt anderledes. Dette er allerede omtalt i El. Gn. I for Spidseres Vedkommende, men vi har fundet det ønskeligt ogsaa at ud-

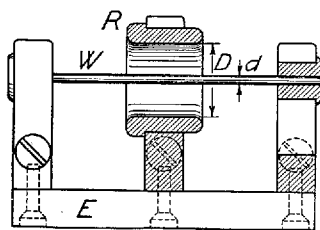


Fig. 6. Gnistbane med cylindriske Elektroder, nemlig Traaden W og Ringen R . E er en Ebonitplade

strække Undersøgelsen til cylindriske Gnistbaner med en forholdsvis tynd indre Cylinder. Det anvendte Apparat er vist i Fig. 6. Vi har her, ganske paa samme Maade som i El. Gn. I, bestemt de korresponderende Gnistlængder — d. v. s. Gnistlængder, der giver samme Forsinkelse — for denne Gnistbane (I_2) og for en homogen Gnistbane (I_1) bestaaende af to kugleformede Elektroder. Resultaterne af disse Forsøg er samlede i nedenstaaende Tabel, hvori vi for Oversigtens Skyld tillige har medtaget nogle af de allerede i El. Gn. I meddelte Resultater.

Det i El. Gn. I fundne Resultat, nemlig at Forsinkelsen er mindst, naar den Elektrode, der har den mindste Krumningsradius — hvor Feltet følgelig divergerer stærkest —

Tabel 1.

Forholdet mellem korresponderende Gnistlængder i homogène (l_1) og inhomogene Felter (l_2).

Homogent Felt		Inhomogent Felt		$\frac{l_2}{l_1}$	
Katode	Anode	Katode	Anode		
Kugle	Kugle	Naalespids	Naalespids	1,34	} Se El. Gn. I.
»	»	Kugle	Naalespids	1,33	
»	»	Konus	Konus	1,31	
»	»	Kugle	Konus	1,23	
»	»	Naalespids	Kugle	1,03	
»	»	Konus	Kugle	1,04	
»	»	Ring, 20 mm	Indre Cyl. 2 mm	1,32	
»	»	Ring, 20 mm	Indre Cyl. 5 mm	1,12	
»	»	Indre Cyl. 2,0 mm	Ring 20 mm	1,06	
»	»	Indre Cyl. 5,0 mm	Ring 20 mm	1,06	

gøres til Anode, bekræftes saaledes ogsaa af de med Cylindergnistbanen foretagne Forsøg. Forklaringen af dette Resultat, der synes at staa i saa skarp Modsætning til de Resultater, der foran fandtes for plane eller svagt buede Elektroder, vil først kunne gives sammen med Udviklingen af Teorien for Gnistdannelse i hurtig opvoksende Felter.

2. Gnistvej i homogene og inhomogene Felter ved højere Tryk.

Det er velkendt, at lange elektriske Gnister som Regel ikke følger en ret Linie, men kan have et ret uregelmæssigt Forløb. Det er i saa Henseende tilstrækkeligt at henvise til Lynet. Selv for meget kortere Gnister vil der ofte vise sig en vis Diskontinuitet i Gnistens Udseende, og saa-

danne Tilfælde findes da ogsaa beskrevne i den ældre Literatur.¹ De meddelte Oplysninger er dog ret ubestemte. Fotografiske Optagelser af relativt korte Gnister i omtrent homogene Felter, der viser tydelige Diskontinuiteter, foreligger os bekendt ikke.

Da vore Betragtninger over Gnistens Dannelsesmaade imidlertid førte os til det Resultat, at Gnisten maatte have en vis Tilbøjelighed til at foretage »Sidespring«, saaledes at Gnistvejen kommer til at bestaa af en Række omtrent parallelle Elementer, anbragte efter hverandre, men forskudt lidt i Forhold til hinanden, fandt vi det rigtigst at optage en Række Gnistbilleder til Belysning af dette og andre Forhold, idet vi i første Linie interesserede os for Gnistdannelse under Paavirkning af hurtigt opstaaende, stærke Felter, og derfor som Regel — hvor andet ikke udtrykkelig fremhæves — benyttede den i Fig. 7 viste Opstilling. *L* er Primærgnisten, *l* den undersøgte (fotograferede) Gnist. Hvor intet andet er bemærket, er Elektroderne rene, jfr. El. Gn. I, § 4.

Har Kondensatoren C_2 i Fig. 7 en Kapacitet paa nogle Hundrede cm eller derover, faar man meget lyskraftige Gnister af det paa Plan I, 14 viste Udseende, der vel

¹ Saaledes siger M. FARADAY: Experimental Researches in Electricity (1838) Nr. 1422: »... the sparks... often have faint or dark parts in their course, when the quantity of electricity passing is not great«. I denne Sammenhæng kan ogsaa nævnes A. TOEPLER: Optische Studien nach der Methode der Schlierenbeobachtung: Pogg. Ann. 134. p. 198 o. f. 1868, hvori det vises, at den af Gnisten opvarmede Luftkanal kort efter Gnistens Dannelse ikke har et regelmæssigt, glat Forløb. Sammenlign hosstaaende to Figurer A og B, af hvilke A svarer til Tilstanden 0,00012 Sekund og B til ca. 0,0002 Sekund efter Gnistens Dannelse.



Fig. A.



Fig. B.

ikke gaar helt retlinet over fra den ene Elektrode til den anden, men hvor alle Detailler imidlertid er udvidskede paa Grund af den relativt store Elektricitetsmængde, der er strømmet gennem Gnisten og i Virkeligheden har ført denne over i Buestadiet.

Man kan dog undtagelsesvis, saaledes som Pl. I, 15 viser det, ogsaa paa denne Maade faa Gnister, der giver et tydeligt Indtryk af, at Gnistvejen kan have et meget uregelmæssigt Forløb; men finere Detailler kan man der-

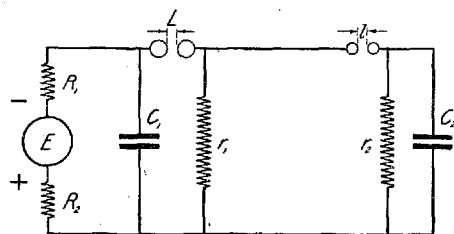


Fig. 7. Skematisk Diagram af den ved Optagelsen af Billederne paa Plan I-VI og VI-VII benyttede Forsøgsopstilling. R_1 , R_2 , r_1 og r_2 meget store Modstande paa flere Megohm (Grifler). C_1 's Kapacitet ca. 2000 cm; C_2 's som Regel kun nogle faa cm.

imod ikke faa fat i. Hertil er det nødvendigt, at man gør Kondensatoren C_2 meget lille, saaledes at dens Kapacitet kun bliver nogle faa cm. Herved begrænses den Elektricitetsmængde, der passerer Gnisten; man undgaar herved den af

Buedannelsen forårsagede Udviskning af Diskontinuiteterne, men Gnisten bliver samtidig ret lyssvag, saaledes at man maa benytte et meget lysstærkt Objektiv ved Foto-
graferingen.

Pl. I, 1—13 viser en Række af saadanne Optagelser for voksende Længde af den undersøgte Gnist. Det ses, at Gnistvejen baade kan have et meget regelmæssigt jævnt Forløb — som paa Pl. I, 1, 2, 10, 11 og 13 —, dels et udpræget uregelmæssigt og kroget Forløb, — som paa Pl. I, 4, 5, 6, 8 og tildels 12 —. Fælles for alle Billeder er, at Lysintensiteten er størst umiddelbart ved Katoden, ligesom Gnistens »Tykkelse« ofte er mindst ved denne;

dette er saaledes i udpræget Grad Tilfældet med Pl. I, 10 og 11.

Det er imidlertid muligt at opnaa endnu skarpere Diskontinuiteter i Gnistbilleder, og af saadanne er der paa Plan II er vist nogle.¹ Det fremgaar heraf, at Gnistvejen, baade hvad Forløb og Lysintensitet angaar, kan udvise meget skarpt begrænsede Diskontinuiteter, se saaledes Pl. II, 2—7, 9—10, 13—14 og 16. Men samtidig kan der ogsaa forekomme een eller flere samtidige ganske »bløde« og jævnt forløbende Udladninger, som f. Eks. Pl. II, 8. Er den undersøgte Gnists Længde i Nærheden af den maksimalt opnaaelige, vil Gnistvejen som Regel have et ret kontinuerligt Forløb og ofte være omgivet af en lysende Kappe, se saaledes Pl. II, 11. Ofte vil Gnistvejen frembyde en udpræget Diskontinuitet i Nærheden af Katoden, som paa Pl. II, 1 og 4. I næsten alle Tilfælde, hvor Gnisten gør Sidespring, vil Forbindelsen mellem de forskudte Dele være svagere lysende end disse, se f. Eks. Pl. II, 10 og 13.

Vi har undersøgt, hvorvidt Diskontinuiteterne i Gnisten er et Fænomen, der kun fremkommer ved Tryk, der ligger i Nærheden af Atmosfærens, idet vi dels har taget nogle Gnistfotografier ved Tryk, der var betydelig lavere, dels ved Tryk, der laa en Del over Atmosfærens. Det ser nærmest ud, som om Diskontinuiteten har et Maksimum i Nærheden af Atmosfæretryk; gaar man betydelig under, f. Eks. ned til $p = 400$ mm Hg, bliver Gnisterne bløde og uden skarpe Diskontinuiteter, se saaledes Pl. III, 1—6. Ogsaa ved højere Tryk bliver Gnistens Udseende ret kontinuerlig, hvad vistnok i nogen Grad skyldes, at Lysintensiteten bliver saa stor, at de i Udstrækning smaa Diskontinuiteter, der i dette Tilfælde kan være Tale om,

¹ En Del af de finere Detaljer er desværre gaaet tabt i Reproduktionen.

sløres. Eksempler paa Gnistbilleder ved højere Tryk er vist paa Pl. III, 18—25.

Vi har tillige undersøgt Gnistens Diskontinuitet i forskellige Luftarter, nemlig i Brint, Ilt, Kvælstof og Kulsyre. En Del af disse Optagelser er vist paa Pl. IV. Medens Brint ved Atmosfæretryk (Pl. IV, 1—5) ikke har nogen stor Tilbøjelighed til at give udprægede Diskontinuiteter, er dette derimod Tilfældet ved Tryk paa 1,5 à 2 at. (Pl. IV, 6—12). I Kulsyre faas meget uregelmæssigt forløbende Gnister (Pl. IV, 13—22), en lagttagelse, der allerede er gjort af FARADAY¹. Ilt forholder sig i Hovedsagen paa samme Maade som atmosfærisk Luft (Pl. IV, 23—26), medens Kvælstof (Pl. IV, 27—33) har en udpræget Tilbøjelighed til at give bløde udflydende Gnister.

De benyttede Luftarter var de i Handelen gaaende, der betegnes som teknisk rene.

De i det foregaaende omtalte Gnister er alle dannede under Paavirkning af en hurtig opvoksende Spænding. For Udformning af vor Opfattelse af Gnistens Dannelsesmaade kan det imidlertid ogsaa have nogen Interesse at undersøge, hvorledes Gnistens Udseende er, naar den dannes under Indflydelse af en langsomt opvoksende Spænding, idet der stadig sørges for, at den Elektricitetsmængde, der kommer til at passere Gnisten kun bliver ringe. Eksempler paa Billeder af saadanne Gnister er vist paa Pl. V, der tillige viser et Diagram af Forsøgsopstillinger. *E* er en Elektricermaskine, der er indskudt direkte i Serie med den undersøgte Gnistbane, idet der dog i Tilledningen er indskudt de meget store Modstande R_1 og R_2 . Elektricermaskinen drejes ganske langsomt, saaledes at en Gnist først fremkommer i Løbet af 0,5 til 1 Minut.

¹ L. c. Nr. 1422.

Ved Optagelsen af Pl. V, 1—3 var Kondensatoren C_1 udeladt, man kan derfor ikke være helt sikker paa, at Spændingen ikke vokser stødvis op. I alle andre Tilfælde var C_1 indskudt, og den havde for Pl. V, 4—10 og 13—17 Værdien 2000 cm, medens den for Pl. V, 11—12 kun var 15 cm. Under Optagelsen af de to sidste Billeder var Shunten r udeladt, saaledes at Strømmen hører fuldstændig op, saa snart Overslag har fundet Sted. I alle andre Tilfælde havde r en Værdi omkring 10^7 Ohm. For Billederne 1—12 var $R_1 + R_2 = \text{ca. } 2 \times 10^7$ Ohm, medens man for Billederne 13—17 havde $R_1 + R_2 = \text{ca. } 10^8$ Ohm.

En Betragtning af Billederne paa Plan V viser, at en langsom Opvoksen af Spændingen giver en jævnt forløbende Gnist uden skarpe Knæk og uden pludselige Intensitetsændringer. Dog er Gnisten heller ikke altid i dette Tilfælde helt uden uregelmæssige Krumninger, se saaledes Pl. V, 2, 6, 7 og 8, ligesom Lysintensiteten kan variere meget langs Gnisten, saaledes som det bl. a. fremgaar af Pl. V, 3, 6, 12 og 13. I de Tilfælde, hvor Kondensatoren C_1 havde den store Værdi af 2000 cm, var der en vis Tilbøjelighed til, at der dannede sig Lyskoste paa Katoden; dette er saaledes Tilfældet paa Pl. V, 8, 10 og 17. Under de samme Forhold finder man enkelte Tilfælde, hvor Gnistens »Tykkelse« vokser meget stærkt, efterhaanden som man nærmer sig til Anoden, se Pl. V, 9 og 10.

Alle i det foregaaende omtalte Gnistbilleder var optagne med rene Elektroder, men vi har desuden taget en Række Fotografier af Gnister mellem Elektroder, hvoraf den ene eller begge var urene. En Del af disse Billeder findes gengivet paa Plan III og VI, den første for $p = 400$ mm Hg, den sidste for $p = 760$ mm Hg. Urenheden bestaar i en ganske tynd Oliehinde og er paa Planerne markeret ved en sort

Prik til højre for Billedet af vedkommende Elektrode. Det fremgaar af Billederne, at man ogsaa i dette Tilfælde kan faa bløde, jævnt forløbende og noget udflydende Gnister, se saaledes Pl. III, 10, 12 og 17 samt Pl. VI, 15 og 28. Men i Almindelighed er Gnisten udpræget uregelmæssig og stærkt kroget. Af særlige Ejendommeligheder skal fremhæves, at Gnistvejen ofte forløber et Stykke langs med den urene Katodes Overflade. Dette er saaledes Tilfældet paa Pl. III, 8, 14 og 15 og Pl. VI, 1—3, 7 og 23. Noget tilsvarende finder ikke Sted ved Anoden. Selv om Gnistens Fodpunkt ligger en Del til Siden for Gnistlinien, tilvebringes Forbindelsen mellem de to ikke langs Anodens Overflade, men derimod ved Hjælp af en Linie, der gaar ret skraat ind imod Anoden, se saaledes Pl. III, 11 og 14 og Pl. VI, 9—11, 16 og 18.

En Del af de i dette Afsnit omtalte Ejendommeligheder i Gnistens Udseende vil blive behandlet mere indgaaende i El. Gn. III.

3. Gnistvej ved lave Tryk.

Ved Arbejdet paa Udformningen af en Teori for Gnistdannelse under Paavirkning af hurtig opvoksende Felter, en Teori, der lader sig bringe i Overensstemmelse med de eksperimentelle Resultater i El. Gn. I, kom vi ogsaa ind paa Spørgsmaalet om Gnistvejens Forløb og Gnistens Udseende ved lave Tryk. Den almindelige Opfattelse er formentlig den, at naar Trykket synker under en bestemt, af Forholdene afhængig Værdi, søger Gnisten en længere Vej og desto længere, jo lavere Trykket er. Ifølge PASCHEN¹ er nemlig Gnistspændingen V en Funktion af Produktet $(p \cdot d)$, hvor p er Lufttrykket og d Elektrodeafstanden. For smaa

¹ F. PASCHEN: Wied. Ann. 37, 69—96. 1889.

Værdier af $(p \cdot d)$ har $(V, [p \cdot d])$ -Kurven efter de af CARR¹ udførte Maalinger omtrent det i Fig. 8 viste Forløb. Gnistspændingen aftager med Produktet $(p \cdot d)$, indtil dette har naaet en vis Værdi, den kritiske $(p \cdot d)_x$; aftager $(p \cdot d)$ yderligere vokser Gnistspændingen meget stærkt. En Forudsætning er det dog, at Gnistdannelsen foregaar i et homogent Felt, saaledes at Gnistens virkelige Længde l og Elektrodeafstanden d er lige store (se Fig 8 II). Har Gnisten for Værdier af $(p \cdot d)$, der ligger under $(p \cdot d)_x$, Mulighed for at

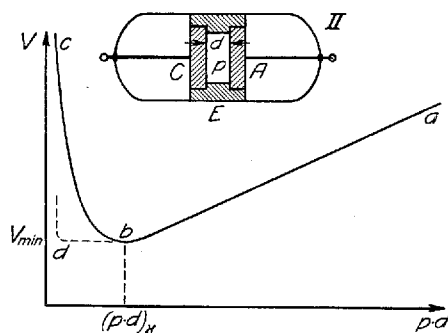


Fig. 8. Kurve abc angiver Gnistspændingens Afhængighed af $(p \cdot d)$ for smaa Værdier af denne Størrelse og for Gnistdannelse i et homogent elektrisk Felt, hvor Gnistlængden l er lig med Elektrodeafstanden d . (II angiver et tilsvarende Forsøgsapparat; C og A Metalelektroner, E Ebonitring).

gaa en anden Vej, viser det sig, at Gnistspændingen holder sig nede paa $V_{\min}$, selv om Produktet af Lufttryk og Elektrodeafstand ligger betydelig under $(p \cdot d)_x$. Det viser sig, at Gnisten da ikke længere følger den korteste Vej mellem Elektroderne, men at den virkelige Gnistlængde l bliver større end Elektrodeafstanden d .

Det ligger nær at forestille sig, saaledes som antydet i Fig. 9, at den virkelige Gnistlængde forøges saa stærkt med aftagende Tryk, at Produktet $(p \cdot l)$ holder sig konstant lig med $(p \cdot d)_x$ ², og at Gnistspændingen i Overensstemmelse hermed bliver nede paa $V_{\min}$.

¹ W. R. CARR: Phil. Trans. Vol. 201, p. 403—433. 1903.

² Saaledes udtaler W. KAUFMANN i Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik IV, (1914) p. 994, Anm. 2.: »Bei gekrümmten Elektroden fällt dieser Anstieg fort, indem bei Unterschreitung des kritischen $(p \cdot d)$ der Funke sich eine längere Bahn aussucht, für die $(p \cdot d)$ gerade den kritischen Wert hat«.

De hidtidige Forsøg er som Regel foretaget med langsom opvoksende Spænding, og i dette Tilfælde er det indlysende, at Gnisten forløber paa den Maade og følger den Vej, ad hvilken Gnistdannelsen under de foreliggende Forhold kan foregaa ved den mindst mulige Spænding. I vore Forsøg, hvor den paavirkende Spænding vokser hurtig op, vil Gnisten derimod dannes paa den Maade og paa det Sted, hvor Gnistdannelsen kan foregaa hurtigst. Det er derfor heller slet ikke givet, at Gnistdannelsen i de to Tilfælde foregaar paa

samme Maade. Der viste sig ogsaa allerede ved de Gnistbillede, der findes omtalt i El. Gn. I, Afsnit 5, nogen Afvigelse fra det paa Forhaand ventede Forløb af Gnister ved lavere Tryk, idet det saa

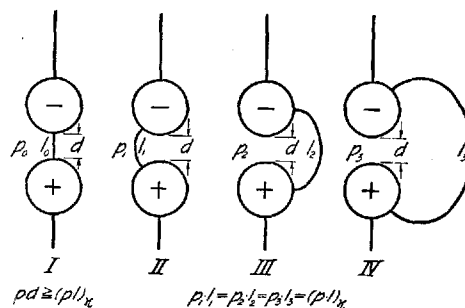


Fig. 9. Skematisk Fremstilling af Gnistdannelse ved lave Tryk efter den almindelige Opfattelse.

ud til, at det i Hovedsagen kun var Gnistens Udgangspunkt paa Katoden, der flyttede sig, medens dens Udgangspunkt eller Fodpunkt paa Anoden ret uafhængig af Lufttrykkets Størrelse laa vis à vis Katoden. Endelig syntes selve Gnistvejen ikke at følge det stærkt buede Forløb af de elektriske Kraftlinier i Feltet før Udladningens Begyndelse — saaledes som antaget i Fig. 9 —, men derimod i det store og hele at gaa langs Katodens Overflade ned til Anoden. Vi antog til at begynde med, at dette Forhold skyldtes elektriske Ladninger paa Glasset; det har imidlertid vist sig, at dette ikke er Tilfældet. Endelig var det Objektiv, vi benyttede ved de tidligere Optagelser, ikke tilstrækkelig lys-

stærkt til at fotografere en enkelt Gnistudladning ved Tryk under 7 mm Hg.¹ Efter i Mellemtiden at have faaet et lysstærkt Objektiv med stor Brændvidde² fandt vi det rigtigt at genoptage disse Forsøg.

Det viste sig da, at ved kugleformede Elektroder faar Gnisterne det i den skematiske Figur 10 antydede Forløb og Udseende. Selve Udgangspunktet *a* paa Katoden er stærkt lysende; ogsaa Fodpunktet *e* paa Anoden lyser hyppig ret kraftig, medens den mellemste Del *c* af Gnisten lyser ret

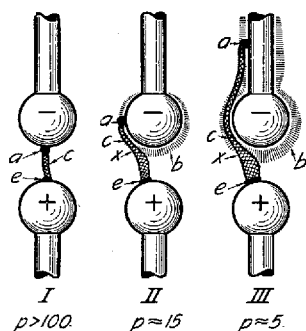


Fig. 10. Skematisk Fremstilling af Gnistvej ved lave Tryk. *a* Gnistkilde, *b* Katodelys, *e* Lysplet paa Anoden.

ensartet og svagt over hele Længden. Ved relativt høje Tryk gaar Gnisten over, hvor Afstanden mellem Elektroderne er mindst, Feltkraften derfor størst, som antydet ved Tegning I. Ved lavere Tryk — f. Eks. $p = 15$ mm Hg, $L = 15$ mm — ses Katoden omgivet af en Hætte *b* af Katodelys (Tegning II). Gnistens Udgangspunkt paa Katoden har da flyttet sig noget længere bort fra Anoden, og selve Gnistvejen for-

løber paa Strækningen *ax* i Katodelyshætten, medens den fra Punktet *x* søger direkte over til Anoden. Tegning III viser Forholdet ved endnu lavere Tryk. Udgangspunktet *a* har her flyttet sig helt op paa den cylindriske Del af Ka-

¹ Det maa erindres, at den Elektricitetsmængde, der udlades ved hver Gnist, er ganske ringe, idet der er indskudt en Kondensator med faa cm Kapacitet i Serie med Gnistbanen, se Fig. 7. Udelades Kondensatoren, vedbliver der i forholdsvis lang Tid at gaa en Strøm gennem Gnistrummet. Gnisten kommer da til at nærme sig til den stationære Strømgennemgang, og Gnistens Begyndelsestilstand sløres.

² $F: 50$ cm; $D: 10,4$ cm.

toden, og Gnistvejen følger paa det lange Stykke αx Katodelyshætten, for derefter som før at gaa lige over til Anoden. Da Potentialforskellen mellem Punkterne a og x i Tegning II og III ikke kan være ret stor, maa Katodelyshætten være i Besiddelse af en betydelig Ledningsevne. Af en Betragtning af Figuren fremgaar tillige, at det mellem Katodelyshætten og Katoden værende mørke Rum — det CROOKE'ske Rum —, der ikke er direkte iagttageligt ved de her omhandlede Tryk, maa lede meget daarlig.

Til Sammenligning med den skematiske Fig. 10 er paa Plan VII gengivet en Del fotografiske Optagelser af saadanne Gnister, der er dannet under Paavirkning af en meget hurtig opstaaende Spænding, og hvor der i Serie med Gnistbanen er indskudt en ganske lille Kondensator C_2 med nogle faa cm's Kapacitet, se Fig. 7. Det fremgaar heraf, at Gnistens Forløb ganske svarer til det i Fig. 10 viste.¹ (Sammenlignes saaledes Fig. I med Nr. 1 paa Pl. VII II med Nr. 2, III med 3 og 4).

Teoretiske Overvejelser, for hvilke der i en senere Afhandling vil blive gjort Rede, førte til det Resultat, at det maatte forudses, at Gnistens Udgangspunkt paa Katoden vil forskyde sig til Punkter af dennes Overflade, hvor Feltkraften har lavere og lavere Værdier, efterhaanden som Lufttrykket aftager. Denne Tendens til at søge et Udgangspunkt med lav Feltkraft, skulde desuden blive desto mere udpræget, jo højere den paavirkende Spænding er. Det er

¹ Da man kun har Interesse af at faa fotograferet de Gnister, der forløber langs Elektroderne Kontur, gik man for at spare Tid og Plader frem paa den Maade, at man fedtede Elektroderne For- og Bagsider ganske svagt, men omhyggelig holdt Elektroderne Konturlinier fri for Fedtning. Man opnaar paa den Maade, at praktisk talt alle Gnister forløber langs Konturen og derfor er synlige i hele deres Forløb. Uden Fedtning var det kun hver 10. eller 20. Gnistbillede, der var anvendeligt.

let ved Forsøg at vise, at dette virkelig kvalitativt er rigtigt. Derimod er det vanskeligt at vise nogen kvantitativ Overensstemmelse, hvad der hænger sammen med følgende Forhold. Er Trykket meget lavt eller Spændingen meget høj, saaledes at Udgangspunktet forskydes langt ud ad den Stang, der bærer Katodekuglen, viser det sig samtidig, at den tilsvarende Udladning bliver ret svag, se bl. a. Nr. 7, 9, 11 og 12 paa Pl. VII. Men under Udladningens Forløb falder Spændingen ned til Værdier, der vilde svare til, at Gnisten udgik fra et Punkt paa Katoden, der laa langt nærmere ved Anoden end det første Udgangspunkt. En saadan Gnist Nr. 2 dannes maaske og bliver kraftigere end den første, der eventuelt helt unddrager sig Opmærksomheden. Et Eksempel af denne Art er vist i Nr. 13 paa Pl. VII, hvor der dels findes et svagt første Udgangspunkt for en Gnist højt oppe paa Katoden (den er markeret ved en Pil), dels et kraftigere Udgangspunkt for en senere Gnist helt nede ved den skarpkantede Rand af Katoden. Lignende Forhold gør sig gældende ved Nr. 6, 7 og 11.

Man kan imidlertid paa anden Maade direkte vise, at det er Steder med lav Feltkraft, som Udgangspunktet paa Katoden under de nævnte Forhold fortrinsvis søger. For det første viser det sig, at Gnisten har en udpræget Tilbøjelighed til at udgaa fra det Sted paa Katoden, hvor Kugle og Skaft støder sammen, og hvor Feltkraften nødvendigvis er forholdsvis ringe; se saaledes Nr. 5 paa Pl. VII.

Endnu mere udpræget bliver Forholdet, naar man til Katode i Stedet for en Kugle vælger en Cylinder med plane Endeflader og skarpe Rande, saaledes som vist skematisk i Fig. 11. Det fremgaar med Sikkerhed af disse Billeder, at Udgangspunktet paa Katoden ved lave Tryk og høj Spænding netop fortrinsvis søger de Steder, hvor Feltkraften er

svag, medens dette aldeles ikke er Tilfældet med Gnistens Fodpunkt paa Anoden, idet dettes Beliggenhed udelukkende synes bestemt ved, at Gnisten søger den korteste Vej over til Anoden. Paa Pl. VII Nr. 8, 15, 16, 17, 18, 20 og 21 ligger Gnistens Udgangspunkt i den inddrejede Rille paa Katoden (sammenlign I, IV og V i Fig. 11), medens for

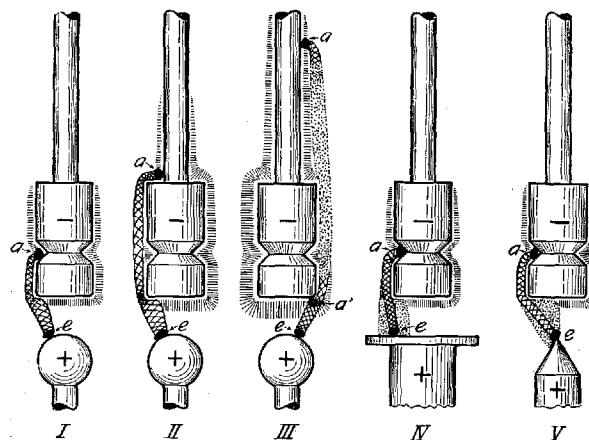


Fig. 11. Skematisk Fremstilling af Gnistvej ved lave Tryk og ved cylindrisk, skarpkantet Katode og forskellig formet Anode.

Nr. 9, 10, 12, 14 og 19 Gniskilden¹ ligger oppe paa den Messingstang, der bærer Katodecylindren, men saa nær ved dennes øverste Endeflade, at Udgangspunktet befinder sig i et relativt svagt Felt.

De fotografiske Optagelser viser, at Gnisten ogsaa ved skarpkantet cylindrisk Katode i Hovedsagen følger langs med dennes Overflade.

¹ Berettigelsen af denne Betegnelse for Gnistens Udgangspunkt paa Katoden vil fremgaa af El. Gn. III.

4. Skyldes Elektrodernes „Renhed“ eller „Aktivitet“ Tilstedeværelsen af Metalsalte paa Elektrodernes Overflade?

E. DUBOIS¹ har i en lige udkommen Afhandling paa-vist, at Gnistspændingen ved lave Lufttryk (0,1—20 mm Hg) nedsættes meget betydelig, naar Katoden forurenes med Metalsalte, f. Eks. med Klorcalcium. Forurening af Anoden har derimod ingen Indflydelse. Fjernes alle Metalsalte fra Katoden — ved Udglødning, gennem lang Tid fortsat Gnistudladning eller paa anden Maade — antager Gnistspændingen en højere, konstant Værdi, der er uafhængig af Katodemetallets Natur.

Det ligger herefter nær at tænke sig Muligheden af, at de med Karborundumpapir pudsede Elektroder, der i El. Gn. I, § 4 betegnedes som »rene« eller »aktive«, og som giver den mindst mulige Gnistforsinkelse, netop var særlig forurenede med Metalsalte, medens ved de »urene« eller »inaktive« Elektroder eventuelle Metalsalte var dækkede af — gjort inaktive af — et ganske vist meget tyndt Lag af Olie eller lignende.

For at afgøre hvilken af de to Opfattelser, der er den rigtige, den lige nævnte eller den tidligere fremsatte, at »Renheden« skyldes de karborundumpudsede Elektroders Skarpkantethed, anstilledes de i det følgende omtalte Forsøg.

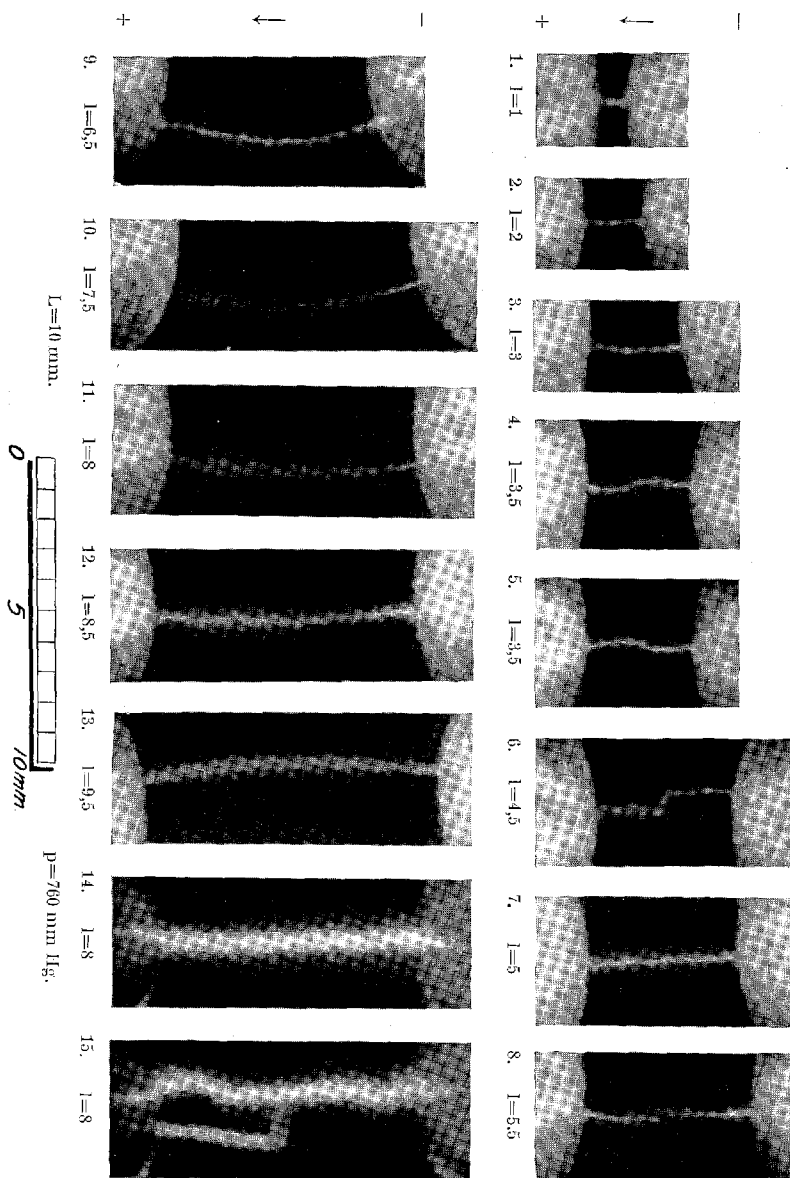
For en Længde af Primærgnisten paa 4 mm bestemtes Forsinkelsen i en 2 mm Maalegnistbane. Først pudsedes Katoden, hvorefter man fik den minimale Forsinkelse $\tau_{\min}$. Derefter gnedes Katoden med et Stykke Gaze, der var ganske svagt forurenat med Olie. Katoden afgnedes derefter kraftigt med et Stykke helt rent Gaze. Forsinkelsen var efter denne Behandling meget større end $\tau_{\min}$. Paa Katoden drys-

¹ E. DUBOIS: Recherches sur le potentiel disruptif dans les gaz raréfiés. Ann. de physique. T. 20, p. 113—240. Oct. 1923.

sede man derefter lidt fint Pulver af Klorcalcium eller Klor-natrium, men Gnistforsinkelsen var uforandret stor. Man kunde maaske tænke sig Muligheden af, at Pulveret ikke kom direkte i Berøring med Katodemetallet, men blot klæbde i den ganske vist overordentlig tynde Oliehinde paa dette. Forsøget blev derfor gentaget paa den Maade, at Pulveret spredtes paa en med Æter fuldstændig rensed Glasplade, hvorefter den inaktive Katodekugle trykkedes haardt ned mod den med Pulver belagte Del af Glaspladen. Der kunde herefter ikke være nogen Tvivl om, at Pulveret paa adskillige Steder af Katodens Overflade var i direkte Berøring med Metallet og ikke var dækket af nogen Oliehinde. Men heller ikke i dette Tilfælde bragte Pulverets Tilstedeværelse paa Katoden nogen Formindskelse i Gnistforsinkelsen. En fornyet Afpudsning med Karborundum bragte derimod altid Forsinkelsen ned til $\tau_{\min}$. Det kan herefter betragtes som godtgjort, at Elektroderne »Renhed« eller »Aktivitet« i den Betydning, hvori disse Begreber er anvendt i det foregaaende, ikke skyldes Tilstedeværelsen af Metalsalte.

Ved Udførelsen af de foran beskrevne Forsøg har jeg haft udmærket Hjælp af Ingeniørerne J. P. CHRISTENSEN, B. B. RUD, H. NØRGAARD og J. EGELUND-NIELSEN, medens jeg for Udførelsen af det fotografiske Arbejde er Laboratoriemester FOLMER NIELSEN Tak skyldig.

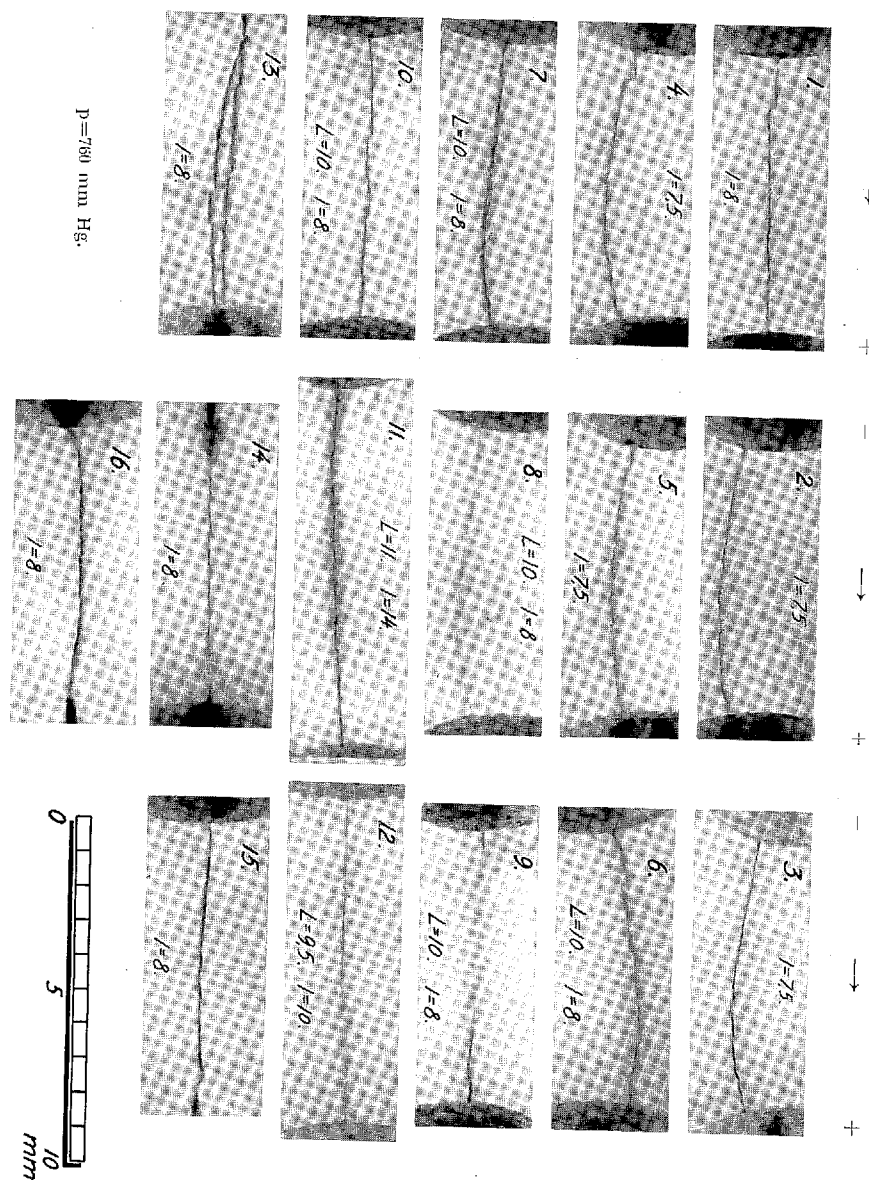
Undersøgelserne er udført med Understøttelse fra Carlsbergfondet.



Gnister i atmosfærisk Luft og mellem rene Elektroder.
Opstillingen den i Fig. 7 viste.

Nr. 1-13: $C_2=1$ a 2 cm.

Nr. 14-15: $C_2=\text{ca. } 300 \text{ cm.}$

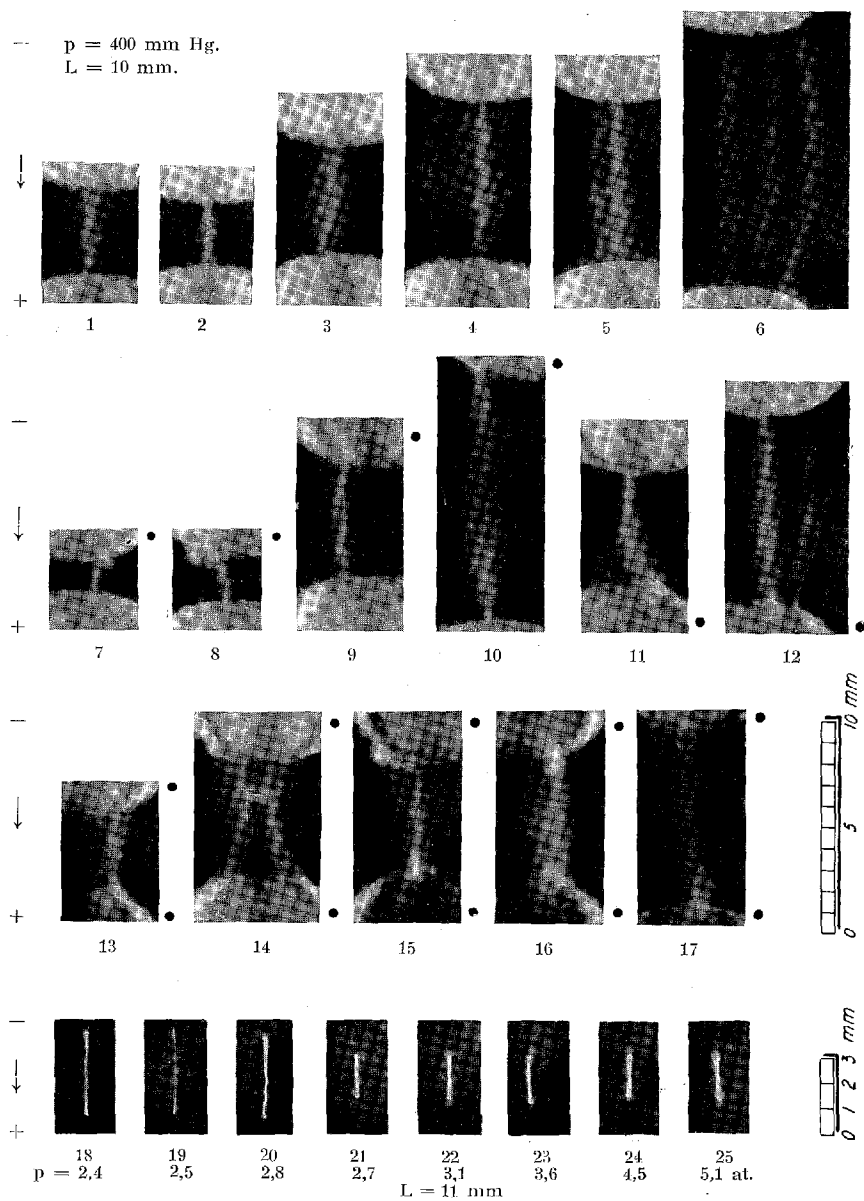


Gnister i atmosfærisk Luft og mellem rene Elektroder.
Opstilling den i Fig. 7 viste. $C_2 = \text{ca. } 4 \text{ cm}$.

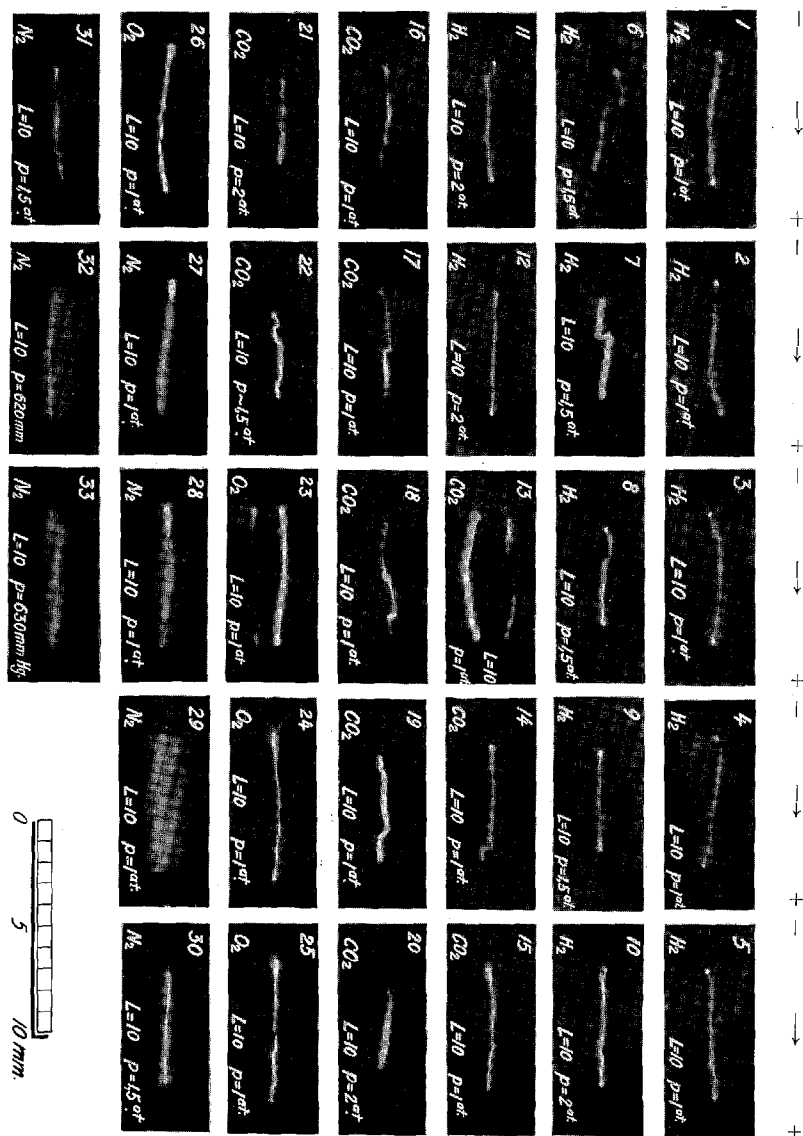
Nr. 1—12, Elektroder: Kugler.

Nr. 13—16, Elektroder: Kugle og Spids.

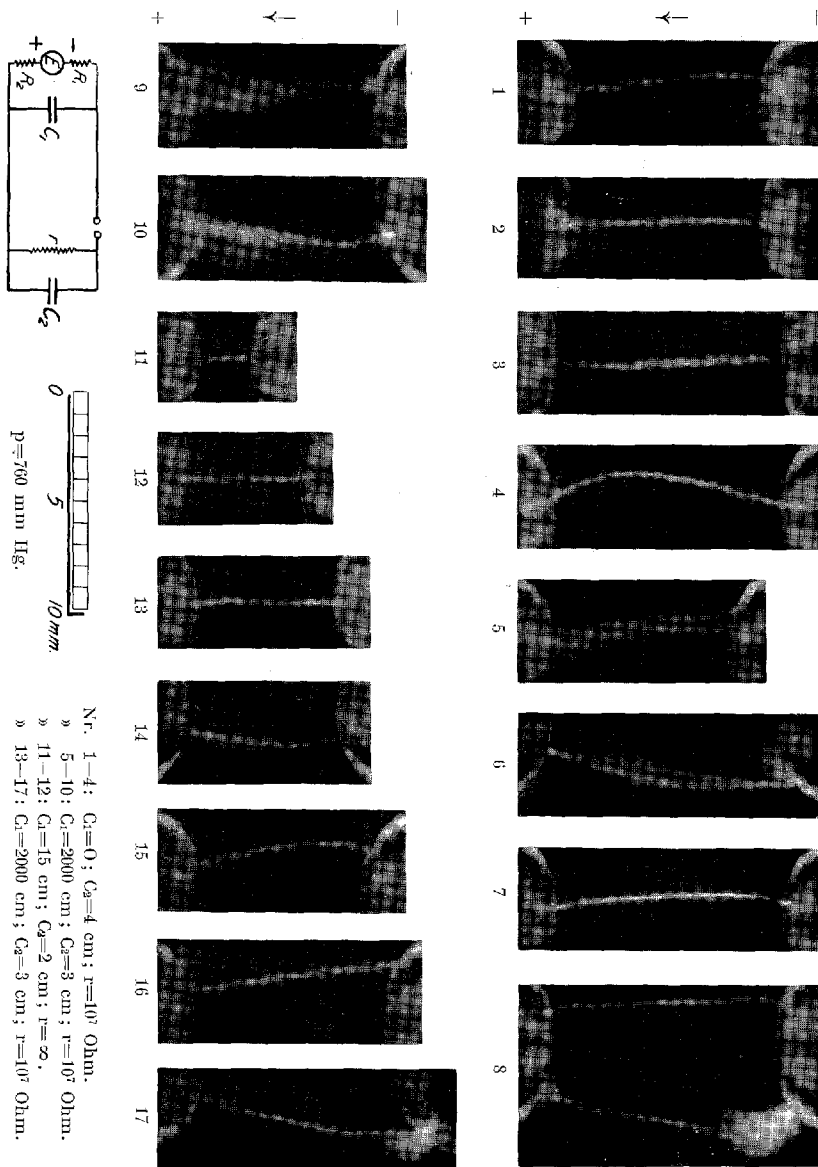
Nr. 13 viser 2 efter hinanden følgende Gnister.



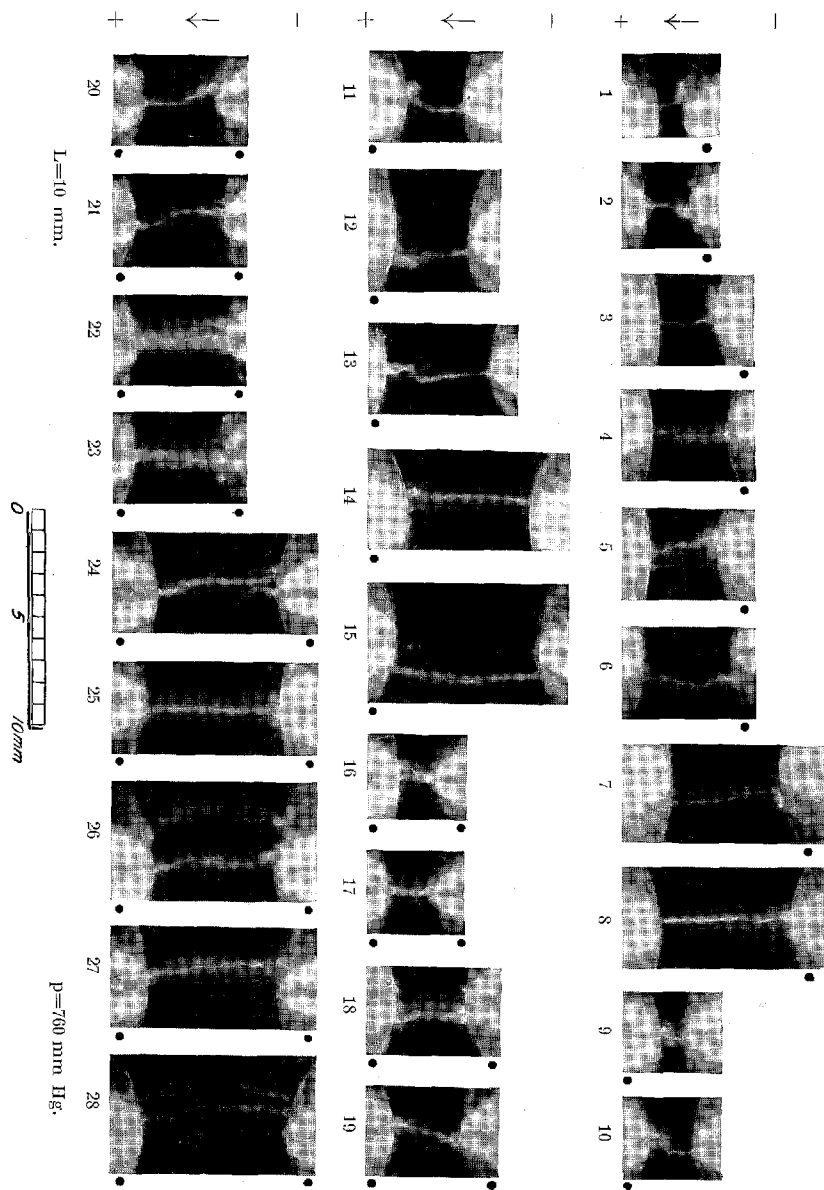
Gnister i atmosfærisk Luft. Nr. 1—17 ved et Tryk af $p=400 \text{ mm Hg.}$ Nr. 18—25 ved Tryk fra 2,4 til 5,1 at. I Nr. 1—6 og 18—25 er Elektroderne rene. I de øvrige angiver en sort Prik tilhøjre for Billedet af en Elektrode, at denne er forurenet ved en tynd Oliehinde.



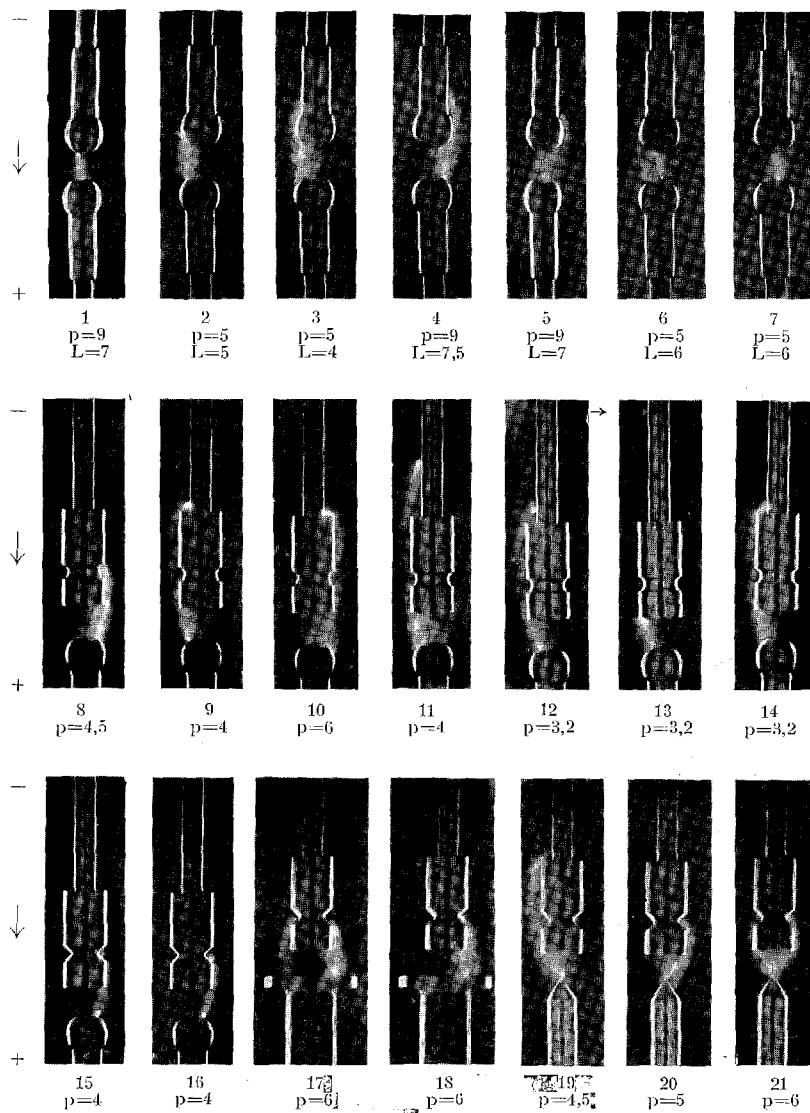
Fotografier af Gnister i forskellige Luftarter.



Fotografier af Gnister, dannet under langsomt opvoksende Spænding.
 $p = 760$ mm Hg. Rene Elektroder.



Fotografier af Gnister i atmosfærisk Luft. Den ene eller begge Elektroder forurenset med en tynd Oliehinde, markeret ved en sort Prik til højre for Elektrodebilledet



Nr. 8-21: $L=5$ mm.

0 10 20 30 40 50 mm.

p : mm Hg.

Fotografier af Gnister i atmosfærisk Luft ved lavere Tryk.