

Forsøg over Varmetoningen og Trykforholdene ved Forbrænding af Krudt i lukket Rum.

Af

V. H. O. Madsen og Haldor Topsøe.

Hertil Tavle III.

(Meddelt i Mødet den 9. December 1887.)

Det vil være bekjendt, at der for nogle Aar siden fra de i Forbindelse med det Kruppske Etablissement staaende store tyske Krudtfabriker blev indført en ny Krudtsort, efter sin Farve benævnet brunt Krudt, som vel indeholder Kul, Svovl og Salpeter, men hvor baade Bestanddelenes Blandingsforhold (nemlig c. 20 pCt. Kul og c. 3 pCt. Svovl) er et væsentlig andet end i de hidtil benyttede Krudtsorter (12.5—15 pCt. Kul og 8—15 pCt. Svovl) og tillige Kullet er af en fuldstændig anden Beskaffenhed end det almindelige Trækul, idet det, tilvejebragt ved en højst ufuldstændig Forkulning af Træet, indeholder Brint og Ilt i væsentlig større Mængder. Dette nye, brune Krudt har paa Grund af den Langsomhed, hvormed det forbrænder — efter en Række af os foretagne Forsøg er under lige Vilkaar dets Forbrændingshastighed i Luften 3 til 4 Gange mindre end det almindelige sorte Krudts — den Fordel, at det anvendt i langt Skyts er i Stand til at meddele Projektilen en større Begyndelseshastighed ledsaget af en mindre Maximumsspænding end den samme Vægt af sort Krudt ¹⁾).

¹⁾ Resultaterne af en stor Række Forsøg over de to Krudtsorters indbyrdes Forhold i denne Henseende findes i den af Artilleristaben udgivne «Oversigt over Artilleriets Forsøg X» 1887.

Efter at det var lykkedes at tilvejebringe en dansk Krudt-sort, som i sine væsentlige Egenskaber var overensstemmende med det tyske brune Krudt, hvis Tilberedning holdes hemmelig, have vi i indeværende Foraar foretaget en Del sammenlignende Forsøg med det i Frederiksværk Krudtværk tilvirkede brune Krudt og det tidligere til Skyts af stort Kaliber benyttede sorte prismatiske Krudt, ved hvilke disse to væsentlig forskjellige Krudt-sorters Forhold ved Forbrænding i lukket Rum tilsigtedes oplyst.

Det til disse Forsøg benyttede Forpufningsapparat var en langs Axen gjennemboret, svær Staalcyliner, hvis indvendige cylindriske Hulrum (af omtrent 3.3 Cub. Centimeters Rumindhold) kunde aflukkes gastæt for begge Ender ved Hjælp af to lange Staalskruer. Den ene af disse Bundskruer var paa langs gjennemboret svagt konisk, saaledes at Hullets største Diameter var iudad mod Hulrummet; i denne Gjennemboring var nøje indpasset en Staalprop, hvis tynde Ende fortsattes udenfor Bundskruen som en finskaaren Skrue, der ved Hjælp af en Møtrik tillod at spænde Proppen, som iforvejen blev omhyggeligt omgivet med et Lag stærkt limet, vel indfedtet Papir, absolut tæt ind i den koniske Gjennemboring, idet tillige et forøget Tryk inden i Cylinderen kun vilde virke til at drive Proppen fastere i dens koniske Leje og derved tilvejebringe yderligere Tætning. Da Proppen var omgivet med Papir og Spændemøtriken hvilede paa en Elfenbens Skive, var der altsaa tilvejebragt Isolation fra selve Bundskruen, saaledes at man ved med en tynd Platintraad at forbinde to Platinspidser anbragte den ene i den koniske Props den anden i Bundskruens mod Cylinderens Hulrum vendende Ende, ved en kraftig galvanisk Strøm ledet gennem Bundskrue og konisk Prop kunde fremkalde en Antændelse af Krudtcylindre anbragte inde i Hulrummet i umiddelbar Berøring med den tynde Platintraad.

Medens altsaa den ene af Forpufningscylinderens Bundskruer indeholdt Tændemekanismen, der benyttedes til alle Forsøgene, indesluttede den anden de Apparater, ved hvilke de ved

Krudtets Forbrænding frembragte Tryk bleve maalte. I denne Hensigt var Skruen i sin Længderetning cylindrisk gjennemboret, dog saaledes, at Gjennemboringen i den mod Cylinderens Hulrum vendende Del af Skruen i en Trediedel af dennes Længde havde et noget mindre Tversnit end den øvrige Del, som tillige var forsynet med en fin Skrueskæring. I den snevre Del af Gjennemboringen var lufttæt indslebet et med en lille udvendig Krave forsynet haardhædet Staalstempel («Hammer»), som sænket ned i Gjennemboringen gennem dennes vide Del, ved sin Krave blev holdt oppe, saaledes at dens Ende indvendig mod Hulrummet var i Plan med Bundskruens Ende. I den videre Del af Gjennemboringen var endelig indpasset en haardhædet Staal-skruer med plan Ende, saaledes at der inden i Bundskruen ovenpaa Hammeren blev Plads til Anbringelsen af en lille, ved Hjælp af en omlagt Gummiring centreret Kobbercylinder, som ved Indskruining af Slutskruen blev fastholdt mellem denne og det bevægelige Staalstempel. Naar altsaa Hammeren ved Trykket af den inde i Forpufningscylinderen udviklede Krudtgas blev bevæget ud ad mod Kobbercylinderen, tilvejebragtes derved en Stukning af denne, af hvis Størrelse man kan beregne Størrelsen af det Tryk, for hvilket Kobbercylinderen har været udsat.

I de Forsøg, der foretoges i Kalorimetret, blev der i Stedet for den Bundskruer, som indeholdt Trykmaalingsapparatet, anbragt en Fuldskrue for at formindske Muligheden for Utæthed af Apparatet, hvorved ikke alene Forsøgene vilde mislykkes, men tilmed Thermometrene kunde staa i Fare for at blive ødelagte.

Det Krudt, som anvendtes til Forsøgene, var som omtalt brunt og sort prismatisk Krudt, tilvirket i Frederiksværk Krudtværk — det første af Tæthed 1.80, det andet (med Sammensætningen 16 Kul, 10 Svovl, 74 Salpeter) af Tæthed 1.75. Af Krudtprismerne blev der ved Hjælp af Sav og Kniv udarbejdet cylindriske Legemer (af Tversnit afpasset efter Forpufningsapparatets Hulrum) og disse Krudtlegemer bleve da i den ene Ende forsynede med en Gjennemboring, gennem hvilken den tynde

Platintraad, ved hvis Glødning Antændelsen skulde frembringes, blev indført. Da det ved alle Forsøgene gjaldt en Sammenligning under saa vidt muligt ens Forhold, tilvejebragtes der ved hvert sammenhørende Par af Forsøg saa nær den samme Vægt af de to Krudtsorter som praktisk muligt ved forsigtig Afskræbning af Krudtlegemet under uafbrudt Kontrolvejning.

Til de kalorimetriske Forsøg benyttedes et os af Hr. Professor Julius Thomsen velvilligt overladt dobbelt Metalkalorimeter, hvis Røreapparat bevæges ved Hjælp af en lille magneto-elektrisk Maskine. Den ydre Metalkapsel, i hvilken Vandbeholderen (af c. 800 Kub. Centimeters Rumindhold) anbragtes paa en med en Porcellænsring belagt tynd Metal-Trefod, var overdækket med et tyndt Metallaag, forsynet med passende Aabninger, gennem hvilke Ledningstraaden fra det galvaniske Batteri, Thermometret samt Røreapparatets Stænger førtes ned i Beholderen, i hvilken Forpufningscylindern var opstillet lodret paa en tynd Metal-Trefod, saaledes at den overalt var omgivet af et Vandlag paa mindst 1 Centimeters Tykkelse. Kalorimetret var opstillet i et stort Lokale, saaledes at Lufttemperaturen ikke undergik nogen Forandring under de enkelte Forsøg. Efter at der ved Hjælp af Røreapparatet var tilvejebragt Temperaturligevægt i Vandmassen, fremkaldtes Antændelsen af den i Cylindern indesluttede Krudtladning ved Slutning af den til Forpufningsapparatet førende Ledning fra et Batteri paa fire Bunsenske Elementer.

De to Thermometre, som benyttedes, efter iforvejen at være omhyggeligt sammenlignede, vare inddelte i Tiendedels Grader, medens Hundrededele bleve skjønnede ved Aflæsningen gennem Kikkert. Ved de Temperaturstigninger, som opnaedes ved Forsøgene, viste en Række omhyggelige lagttagelser, foretagne dels uafhængig af Forsøgene, dels umiddelbart efter hvert enkelt af dem, at Afkølingen af Kalorimetret beløb sig til 0.01° pr. Minut, med hvilken Størrelse de aflæste Temperaturdifferentser umiddelbart bleve korrigerede, idet Temperaturstigningen allerede

efter $\frac{1}{2}$ Minuts Forløb beløb sig til henved Trefjerdedele af dens samlede Værdi.

Kalorimetrets og Forpufningscylindrens Vandværdi udgjorde ved alle Forsøgene 103.5 Gr. Ved Forsøgene erholdtes følgende Resultater:

	Brunt Krudt.		Sort Krudt.	
	I.	II.	I.	II.
Krudtvægt i Gram	1.984	1.650	1.9835	1.6495
Vandvægt i Gram	599.5	599.9	600.1	600.0
Lufttemperatur	14.70	15.20	14.60	15.05
Initialtemperatur	14.895	14.835	15.025	15.075
Maximumstemperatur	17.25	16.73	17.01	16.715
Tidsforløb	Min. 2.00	Min. 2.00	Min. 1.75	Min. 1.75
Varmeudvikling i Gram-Kalorier	841.6	816.5	710.5	707.0

altsaa en Middelværdi for det brune Krudt af 829 Kal., for det sorte Krudt af 709 Kal., der ere noget lavere end de af Noble og Abel tidligere for Pebble powder fra Waltham fundne 721 Kal. og senere for tysk brunt Krudt fundne 837 Kal., ved hvilke Bestemmelser det dog maa erindres, at de to engelske Forskere ved deres Forsøg anvendte saa store Krudtmasser og som Følge deraf saa kolossale Apparater, at Temperaturmaximum først blev naaet efter 20 Minutters Forløb, saaledes at altsaa Korrektionen for Varmeudstraalingen under selve Forsøget, der netop medfører den største Usikkerhed ved kalorimetriske Maa-linger, ved disse Forsøg var forholdsvis stor.

Trykmaalingsforsøgene foretoges i to Rækker, idet den til 1ste Serie benyttede Forpufningscylinder brast under et af Forsøgene, førend vi havde naaet de højeste Spændinger, som vi ønskede at tilvejebringe, saaledes at der maatte skaffes et nyt Apparat til Forsøgenes Afslutning. Ligeledes maatte Hammeren og Bundskruen, hvori den havde sit Leje, gjentagne Gange fornyes paa Grund af Beskadigelser, opstaaede under Forsøgene. Da det i den første Række Forsøg havde vist sig

vanskeligt ved de høje Spændinger at faa fuldstændig Tæthed selv ved en nok saa omhyggelig Indslibning af Hammeren, tilvejebragtes ved den anden Serie Tætning for Enden af Hammeren ved Hjælp af en tynd Tætskive, som var uddrejet af en Messingcylinder, saaledes at dens Rand nøje passede i Bundskruens Hammeraabning. Dens ene Endeflade, der skulde vende mod Hammeren, var holdt plan, medens der i dens anden Ende, der skulde vende indad mod Hulrummet, var neddrejet en Fordybning: i Midten plan, langs Omkredsen konisk, saaledes at der dannedes en tynd, skarp Kant langs Randen, hvorved opnaaedes Aflukning for Krudtgassen ved dennes eget Tryk efter samme Princip, som benyttes ved Bagladekanonernes Tætning.

Kobbercylindrene, der skulde tjene til at maale det af Krudtgassen paa Hammeren overførte Tryk, vare omhyggeligt udglødede og eftermaalte Cylindre af 6 Mm. Diameter og 8 Mm. Højde, der anvendes til lignende Bestemmelser af Artilleriet, hvor Relationen mellem de forskellige Stukninger og de tilsvarende Belastninger er funden ved at foretage en Række statiske Prøvebelastninger for hvert Parti. Man kjender altsaa for hver Stukning af Kobbercylinderen Størrelsen af det tilsvarende Totaltryk paa Hammerens Endeflade, og da dennes Areal er bekjendt, faar man saaledes bestemt Maximumsværdien af Krudtgassens Spænding pr. Fladeenhed under Forpufningen.

Størrelsen af begge Forpufningsapparaters Hulrum blev meget omhyggeligt bestemt ved en Række Vejninger af den Mængde Kviksølv, som det kan indeholde; til dette Rum maa imidlertid for at komme til selve «Explosionsrummet» i det Øjeblik, da Maximumsspændingen findes, lægges den for ethvert enkelt Forsøg bestemte Forøgelse paa Grund af Hammerens Vandring ud ad mod Kobbercylinderen. Forholdet mellem Krudtladningens Vægt i Gram og hele dette Hulrum i Kubikcentimetre giver den saakaldte «Ladningstæthed», som med de tilsvarende Værdier af Maximumsspændingen findes opførte i efterfølgende Oversigt over Resultaterne af vore Trykmaalingsforsøg.

1ste Serie.

Krudtsort.	Vægt. Gram.	Ladningstæthed.	Spænding. Atm.
{ brunt	0.7410	0.2143	520
{ sort	0.7418	0.2156	552
{ brunt	1.0085	0.2911	703
{ sort	1.0050	0.2895	823
{ brunt	1.2690	0.3633	1192
{ sort	1.2700	0.3668	1201
{ brunt	1.4220	0.4072	1494
{ sort	1.4220	0.4076	1462
{ brunt	1.5850	0.4496	1659
{ sort	1.5855	0.4560	1743
{ brunt	1.8360	0.5182	2173
{ sort	1.8360	0.5197	2276
brunt	2.1725	0.6144	2872

Ved alle Forsøgene var Apparatet fuldstændig tæt.

2den Serie.

Krudtsort.	Vægt. Gram.	Ladningstæthed.	Spænding. Atm.
{ brunt	0.6693	0.2033	406
{ sort	0.6695	0.2034	461
{ brunt	0.8810	0.2633	760
{ sort	0.8810	0.2664	726
{ brunt	1.2671	0.3789	1354
{ sort	1.2660	0.3785	1372
{ brunt	1.6105	0.4885	1865
{ sort	1.6095	0.4861	1949
{ brunt	1.9115	0.5728	2469
* { sort	1.9078	0.5575	2469
{ sort	1.9173	0.5606	2428
{ brunt	2.1905	0.6353	3255
* { sort	2.190	0.6355	3329
{ brunt	2.526	0.7373	4297
* { sort	2.525	0.7366	4236

Ved de 3 sidste Grupper af sammensvarende Forsøg var Apparatets Tæthed noget mindre fuldkommen end ved Resten af Forsøgsrækken, saaledes at altsaa i disse Tilfælde de til de angivne Ladningstætheder i Virkeligheden svarende Tryk muligens ere noget, dog sikkert ikke meget, større end fundet ved Maalingen.

Af Resultaterne af begge disse Rækker af Forsøg fremgaar, at naar man i fuldstændig lukket Rum forbrænder to Krudtsorter af selv saa forskjellig Sammensætning som brunt og sort Krudt, vil man for samme Ladningstæthed faa udviklet Spændinger, der praktisk taget maa opfattes som ens — et Resultat, der i øvrigt stemmer med Udfaldet af Noble og Abels nyeste Undersøgelser over lignende Krudtsorter.

Da Spændingerne ved Forbrænding i lukkede Rum altsaa ere ens ved de to omhandlede saa forskjelligt sammensatte Krudtsorter, og da det brune Krudt, som ovenfor vist, ved sin Forbrænding udvikler en væsentlig større Varmemængde end det sorte Krudt, maa den førstnævnte Krudtsort give et væsentligt ringere Gasvolumen ved Forbrændingen.

Resultaterne af Forsøgene over de ved de forskjellige Ladningstætheder frembragte Spændinger lade sig fremstille ved den paa høstølgende Tavle konstruerede Kurve, hvis Abscisser ere Ladningstæthederne, medens Ordinaterne ere de tilsvarende Spændinger; som det vil ses, ligge enkelte af de til hvert Forsøg svarende Punkter i kjendelig Afstand fra Kurven — noget, som ikke vil forundre, naar Hensyn tages til de Vanskeligheder, som slige Forsøg frembyde, og den Usikkerhed, som selve Trykmaalingsmethoden indeholder.

Den paa Tavlen konstruerede Kurve lader sig fremstille ved Ligningen

$$p = 7350 \cdot \delta^{1.8}$$

hvor δ er Ladningstætheden og p den tilsvarende Spænding i Atmosfærer. Ser man bort fra Ladningstæthederne c. 0.49 og c. 0.57, bliver Forskjellen mellem det maalte Tryk og det af

Formlen beregnede højst 117 Atmosfærer. Det fortjener at bemærkes, at ved de højere Værdier af Ladningstætheden kommer man herefter til større Spændinger end tidligere forudsat efter Noble og Abels Forsøg, hvorved man f. Ex. ved en Ladningstæthed af 1 fik en Spænding af 6554 Atmosfærer. Forskjellen kan sikkert forklares derved, at medens det lykkedes os ved vort mindre Explosionsapparat at opnaa saa at sige fuldstændig Tætning for Krudtgassen, har dette mulig ikke været Tilfældet ved Forbrændingen af de forholdsvis store Krudtmasser, hvorved de to engelske Experimentorer have arbejdet, saaledes at der derved er erholdt noget mindre Angivelser af Spændingen navnlig ved de højere Ladningstætheder.

