

Sten Andreasson, Elisabeth Bemm och Melker Skoglund

Stimulering av krutförbränning genom tillförsel av elektrisk energi i flammen



Sten Andreasson, Elisabeth Bemm och Melker Skoglund

Stimulering av krutförbränning genom tillförsel av elektrisk energi i flamman

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R—0640--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning	
	Månad, år November 2002	Projektnummer E2005
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
Författare/redaktör Sten Andreasson, Elisabeth Bemm, Melker Skoglund	Projektledare Elisabeth Bemm	
	Godkänd av Torgny Carlsson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Stimulering av krutförbränning genom tillförsel av elektrisk energi i flamman		
Sammanfattning (högst 200 ord) <p>Avsikten med de experiment som presenteras i rapporten är att undersöka i vilken utsträckning det är möjligt att stimulera förbränningen av fasta krut genom tillförsel av elektrisk energi. Strömmen leds genom krutflamman som värms upp genom resistiv upphettning. En del av denna termiska energi kommer att överföras till det fasta oförbrända krutet och adderas till energin som frigörs via kemiska reaktioner i flamman.</p> <p>För att kunna leda ström genom flamman krävs det att den är elektriskt ledande och innehåller en stor mängd fria laddningsbärare som joner och elektroner. Kruten har därför dopats med små mängder av alkaliföreningar som kaliumnitrat.</p> <p>Experimenten har utförts i ett slutet reaktionskärl där testkrutet är fastklämt mellan två kopparplattor som är anslutna till ett pulsaggregat. Genom lämplig pulsformning med m h a pulsaggregatets fyra moduler har resultat erhållits som indikerar att det faktiskt är möjligt att påverka och kontrollera krutets brinnhastighet genom att leda ström genom flamman.</p>		
Nyckelord ETK, elektrotermisk-kemisk utskjutning, alkalidopat, krut, HMX, slutet reaktionskärl, pulsformning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 32 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R—0640--SE	Report type Methodology Report
	Research area code 5. Combat	
	Month year November 2002	Project no. E2005
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 51 Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Sten Andreasson, Elisabeth Bemm, Melker Skoglund	Project manager Elisabeth Bemm	
	Approved by Torgny Carlsson	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Stimulation of propellant burning by supplying electric energy in the flame		
Abstract (not more than 200 words) <p>Experiments with the objective to stimulate the combustion of solid propellants by conducting an electric current through the reaction zone are reported. The current is conducted through the flame and will supply energy via resistive heating, which is added to the chemical energy release of the flame and thus increases the heat feedback to the unburnt propellant.</p> <p>The electric conductivity of the flame needs to be increased in order to reduce random delay and to increase control of the electric discharge. Thermochemical calculations indicate that substantial increase in conductivity can be obtained by doping the propellants with alkali compounds, provided that the flame temperature is high enough.</p> <p>The experiments are performed in a closed vessel where a propellant slab is pinched between two copper plates connected to a pulsed power supply. By suitable pulse forming the experimental results indicate that it is possible to stimulate the propellant burn rate by conducting an electric current through the flame.</p>		
Keywords ETC, electrothermal-chemical, launch, alkali, gun propellant, HMX, closed vessel, pulse forming		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 32 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	Inledning	7
2	Stimulering av krutförbränning	8
3	ETK-anpassade krut	9
3.1	<i>Formuleringar</i>	9
3.2	<i>Karaktärisering</i>	11
3.2.1	Brinnhastighetsmätningar	11
3.2.2	Konduktansmätningar	12
3.2.3	Undersökning av fördelningen av KNO_3 i dubbelbaskrutet	14
4	ETK-experiment i slutna bomb	15
4.1	<i>ETK Försöksuppställning</i>	15
4.1.1	Slutna bomb	15
4.1.2	Pulsaggregat	19
4.1.3	Isolationsmätning	20
4.1.4	Montering	20
4.1.5	Strömmätning	20
4.1.6	Spänningsmätning	21
4.1.7	Tryckmätning	21
4.1.8	Datainsamling	21
4.2	<i>Resultat</i>	21
4.2.1	Pulsformning	21
4.2.2	Acetons inverkan på brinnhastigheten	26
5	Diskussion och slutsatser	28
6	Förslag till fortsatt arbete	29
7	Referenser	30

1 Inledning

Det maximala tryck en kanon är konstruerad för att tåla varierar längs dess längd. Kammaren är dimensionerad för ett mycket högt tryck, p_{\max} , medan eldrörets trycktålighet avtar mot mynningen. Högt mynningstryck är inte heller önskvärt eftersom gasutströmningen kan störa projektilflykten och tryckvågen kan ge upphov till påfrestningar på personal samt ge röjande ljudsignatur. När krutet börjar brinna stiger trycket snabbt på grund av de bildade förbränningsgaserna. Projektilen börjar också förflytta sig i eldröret på grund av det ökade trycket mot dess bakplan och volymen ökar. Till en början sker gasutvecklingen snabbare än volymtillväxten bakom projektilen vilket gör att trycket stiger. Allteftersom projektilens hastighet ökar kommer dock den genererade gasen inte att rätta till för att upprätthålla trycket som då sjunker. Tidsintegralen av trycket på projektilens bakplan ger den rörelsemängd som drivgasen överför till projektilen. Ju större tidsintegral som kan erhållas utan att eldrörets trycktålighet överskrids någon gång under brinnförloppet, desto större rörelsemängd kan överföras till projektilen. För att maximera projektilens acceleration är det önskvärt att trycket på projektilen ligger så nära eldrörets trycktålighet som möjligt. Det är därför viktigt att finna metoder för att modulera trycket på projektilens bakplan för att på så sätt kunna optimera mynningsenergin. En vanlig metod som används för att modulera trycket är att skapa en progressivitet i krutförbränningen dvs. mängden förbränt krut per tidsenhet ökas under brinnförloppet utan att krutets brinnhastighet i sig förändras. Progressivitet i förbränningen kan uppnås på flera olika sätt. Eftersom den förbrända krutmängden per tidsenhet ökar med krutets brinnarea går det att erhålla en progressiv förbränning genom att ändra krutets geometri [1] t. ex användning av flerhålskrut. Detta sätt att modulera krutförbränningen och därmed trycket i eldröret ger dock endast en begränsad möjlighet till optimering av mynningsenergin.

ETK (elektrotermisk kemisk utskjutning) [2][3] är en teknik där den kemiska energin från krutförbränning är den huvudsakliga energikällan för acceleration av projektilen ur eldröret medan en betydligt mindre mängd elektrisk energi används för att påverka hur och när denna energi frigörs. Det vanligaste sättet att utnyttja ETK är genom elektrotermisk tändning av en konventionell krutladdning genom att injicera ett plasma i laddningsrummet [2][4][5][6][7]. Plasmata skapas av en plasmagenerator som vanligtvis är monterad i bakstycket och ger en snabbare och säkrare initiering av krutet. Krutets brinnhastighet kan också ökas under den tidigare delen av förbränningsförloppet genom att det heta plasmata värmer upp det oförbrända krutet. Det görs också försök att påverka krutets förbränning genom elektrisk energitillförsel under den återstående delen av den innerballistiska cykeln [8][9][10][11]. Detta kan åstadkommas antingen genom att försöka stimulera krutets brinnhastighet eller genom termisk upphettning av krutgaserna. Stimulering av brinnhastigheten kräver god förståelse av växelverkan mellan krutflamma och tillförd elektrisk energi. Upphettning av krutgaserna har lägst verkningsgrad (kräver mest elektrisk energi) eftersom en stor mängd gas skall värmas upp och det ökade trycket måste transporteras genom en stor del av eldröret innan det når fram till projektilen. Målet är att använda tekniken för att ytterligare anpassa tryckprofilen på projektilens bakplan än vad som kan åstadkommas genom t. ex modifiering av krutets geometri, för att på så sätt erhålla en högre mynningsenergi.

En annan fördel med ETK är att tekniken erbjuder möjlighet att kompensera för krutets temperaturkänslighet [12]. En kall vinterdag är energiåtgången för upptändning av krutladdningen högre, brinnhastigheten lägre samt energiförlusterna till eldröret större än under en varm sommar dag. Detta medför en spridning i mynningshastighet beroende på omgivningens temperatur, vilket kan kompenseras genom att variera mängden tillförd elektrisk energi. Tekniken erbjuder också möjligheter att använda helt nya krutkompositioner med t. ex högre aktiveringsenergi som därmed minskar känsligheten eller med högre laddningsdensitet [13][14][15][16] som därmed ökar den tillgängliga mängden energi. Detta förutsätter att man lyckas stimulera krutets förbränning genom

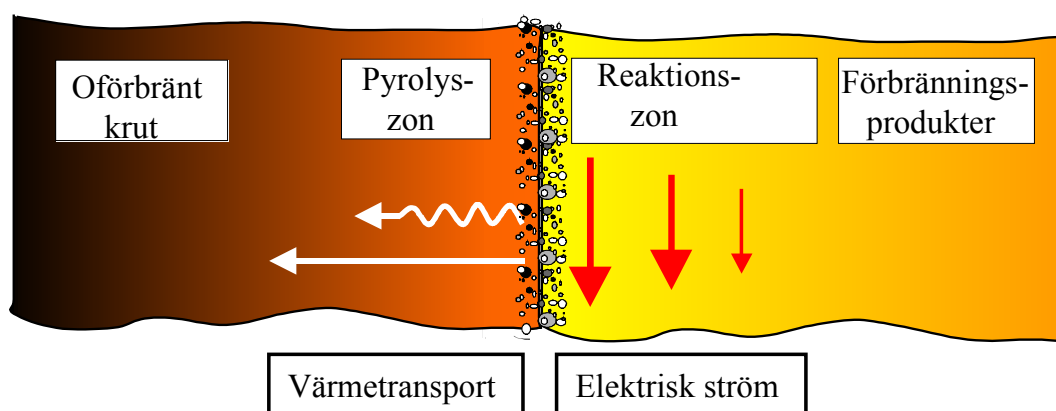
tillförsel av elektrisk energi under hela eller delar av brinnförloppet. Om laddningsdensiteten för krutet ökades i en konventionell kanon skulle man riskera att antingen överskrida p_{max} eller att krutet inte skulle hinna brinna färdigt innan projektilen lämnade eldröret. Det skulle också uppkomma svårigheter vid initieringen av en sådan laddning på konventionellt sätt, vilket kan ge trycksvängningar och krutsplittring.

Allmänt gäller att ETK erbjuder möjligheter att förbättra prestanda för konventionella eldrörsvapen genom att en högre mynningsenergi erhålls. Den högre mynningsenergin kan användas för att antingen öka projektilvikten eller erhålla en högre mynningshastighet med en lägre statistisk spridning för en given projektilvikt. Skottvidden och penetrationsförmågan kan därmed öka, vilket medför en ökad träffsannolikhet.

2 Stimulering av krutförbränning

Syftet med arbetet som presenteras i denna rapport är att undersöka i vilken utsträckning det är möjligt att stimulera förbränningen av en krutladdning genom tillförsel av elektrisk energi. De resultat från experiment som redovisas har utförts i en sluten bomb (ETK-bomb) [9] som är ett utmärkt sätt att studera hur krutförbränningen påverkas av tillförsel av elektrisk energi. Forskning som ger en ökad förståelse för denna process är nödvändig för att kunna utnyttja tillförd elektrisk energi på ett optimalt sätt i olika ETK-koncept.

Tillförseln av elektrisk energi vid krutförbränningen har här skett genom att en elektrisk ström har letts genom reaktionszonen som väsentligen är lika med krutflamman [8][9][10]. Syftet har varit att värma upp flamman genom resistiv (Ohmsk) upphettning. En del av denna termiska energi kommer att överföras till det fasta oförbrända krutet och adderas till energin som frigörs via kemiska reaktioner i flamman (se figur 1). En del av den värme som frigörs vid normal krutförbränning återkopplas från flamman till det oförbrända krutet som därmed förgasas och reagerar. Det är denna mekanism som upprätthåller krutförbränningen [17]. Genom att öka värmeåterkopplingen med elektrisk energitillförsel [11][18][19] förväntas förgasningen och därmed förbränningen att ske snabbare. Detta leder till en ökad mängd förbränt krut per tidsenhet genom en ökad brinnhastighet för själva krutet.



Figur 1. Ström leds genom krutets reaktionszon och ger där upphov till en resistiv uppvärmning. Delar av denna värmeenergi överförs till det oförbrända krutet, vilket leder till en snabbare förgasning och därmed snabbare förbränning, d v s högre brinnhastighet.

För att kunna leda ström genom flammen krävs det att den är elektriskt ledande och innehåller en stor mängd fria laddningsbärare som joner och elektroner. Antalet fria laddningsbärare ökar med ökande flamtemperatur genom termisk jonisation. Ett sätt att öka flammans elektriska ledningsförmåga kan därför vara att försöka öka flammans temperatur genom att ändra krutsammansättningen i form av olika tillsatser eller byte av oxidator. Detta ställer dock krav på förbättring av eldrörets förmåga att motstå höga flamtemperaturer för att dess livslängd inte skall bli för låg [20]. Det gäller också att ju närmare krutytan strömmen leds, desto effektivare blir värmeöverföringen till krutet. För att hålla strömbanorna nära krutytan, är det därför önskvärt att förbränningsgasernas elektriska ledningsförmåga avtar med avståndet från krutytan. Det fasta oförbrända krutet måste också i detta ETK-koncept ha en lägre ledningsförmåga än flammen för att undvika att strömmen istället leds in i det fasta krutet. Detta är normalt inget problem eftersom alla vanliga fasta krut är goda isolatorer, men måste beaktas vid val av kruttillsatser. För att erhålla en flamma med lämplig elektrisk ledningsförmåga är det således viktigt att försöka anpassa krutsammansättningen.

3 ETK-anpassade krut

För både konventionell utskjutning och ETK är krutets egenskaper av stor betydelse för kanonprestandan. För båda teknikerna är det t. ex. önskvärt med krutegenskaper som låg medelmolekylvikt hos förbränningsgaserna, högt arbetsvärde (force) och låg stötkänslighet. Olika ETK-koncept ställer speciella krav på olika krutegenskaper men ger också möjlighet att använda krutkompositioner med t ex högre aktiveringsenergi och högre laddningstäthet. För de ETK-experiment som för närvarande utförs på FOI är det viktigt med krutegenskaper som hög initial elektrisk ledningsförmåga i flammen samt god absorption av värmestrålning in i krutmassan. Aluminium som är en vanlig tillsats i raketkrut frigör värme vid oxidationen och höjer därmed flamtemperaturen [21]. En aluminiumtillsats innebär dock en minskad livslängd hos eldröret på grund av den högre temperaturen samt slitage från de hårda aluminiumoxider som bildas vilket gör att den inte är praktiskt användbar som tillsats i kanonkrut. Vi har därför istället valt att öka tätheten av fria elektroner i flammen genom att dopa kruten med lättjoniserade alkalimetallföreningar som KNO_3 . Eftersom elektroner har en högre mobilitet än joner, ger de ett större bidrag till flammans konduktivitet. För att kunna förstå och påverka effekten av krutets sammansättning på återkopplingen av elektrisk energi till det oförbrända krutet har ett antal krut med olika sammansättningar framställts för att testas i ETK-experiment.

3.1 Formuleringar

De krut som framställts och använts för ETK-experiment är dubbelbaskrutet Nzk5230 tillverkat av Nexplo Bofors samt krut med HMX (oktogen) som oxidator baserade på de energetiska polymererna GAP och polyNIMMO [22][23]. Dubbelbaskruten har dopats med 1-5 % KNO_3 och i HMX-kuten har 5% alkali tillsatts. Beteckningar för de krutsorter som använts i rapporten redovisas i tabell 1 tillsammans med sammansättningen av de ingående komponenterna.

Tabell 1. Beteckningar för olika krutsammansättningar som används i rapporten. Krutsammansättningarna anges i viktsprocent. De förkortningar som används i tabellen är DB (dubbelbaskrut), NC (nitrocellulosa med 13.15% nitregrad), NG (nitroglycerin) och PN (polyNIMMO). Den nedsänkta siffran längst till höger i förkortningen för krutsorten anger tillsatsen av kaliumnitrat.

Krutsort	Huvudkomponenter	KNO ₃ - tillsats
DB ₀	NC 50.0 %, NG 44.0 %	-
DB ₁	NC 49.5 %, NG 43.6 %	1 %
DB ₅	NC 47.6 %, NG 41.9 %	5 %
GAP/HMX55 ₅	GAP 40 %, HMX 55 %	5 %
GAP/HMX65 ₅	GAP 30 %, HMX 65 %	5 %
PN/HMX55 ₅	PN 40 %, HMX 55 %	5 %
PN/HMX65 ₅	PN 30 %, HMX 65 %	5 %

För att få en uppfattning om vilka krutsammansättningar som skulle kunna vara lämpliga för användning i ETK-experiment, har termokemiberäkningar av konduktivitet och termodynamiska tillståndstorheter för de olika krutsorterna vid jämvikt gjorts m h a koden CEC93 [24]. Eftersom komponenterna i flammen inte befinner sig i termokemisk jämvikt är det svårt att beräkna dess tillstånd men vi har bedömt det som rimligt att anta att den initiala elektriska konduktiviteten (före den elektriska urladdningen) i flammen är korrelerad till konduktiviteten för reaktionsprodukterna i jämviktstillståndet. Resultaten från beräkningarna redovisas i tabell 2 där det framgår att både prestandan och den elektriska ledningsförmågan i flammen kraftigt förbättras då halten oxidator i HMX-kruten ökas från 55 till 65 %. Detaljerad information om dessa termokemiberäkningar går att finna i exempelvis referens [8].

Tabell 2: Konduktivitet och termodynamiska tillståndstorheter för ett tryck på 100 MPa. Force (arbetsvärde) är det maximala tryck-/volymarbetet som gasen kan uträtta och används som prestandamått för krutet.

Krutsort	Konduktivitet [1/Ωm]	Temperatur [K]	Force [kJ/kg]	Medel- molekylvikt [g/mol]	Gastäthet [kg/m ³]
DB ₀	0.00098	3593	1162	25.7	79.2
DB ₁	0.42	3589	1153	25.9	79.8
DB ₅	0.84	3576	1115	26.7	82.4
GAP/HMX55 ₅	0.026	2387	1009	19.7	87.2
GAP/HMX65 ₅	0.42	2789	1134	20.5	79.1
PN/HMX55 ₅	0.015	2239	942	19.8	93.0
PN/HMX65 ₅	0.19	2693	1078	20.8	83.1

HMX-krut med en fyllnadsgrad av oktogen på 55 % har tidigare framställts och testats vid FOI [8]. Det visade sig dock att den elektriska ledningsförmågan i flammen var för låg för att dessa krut skulle kunna vara användbara för ETK-experiment. Vid FOI Grindsjön har under hösten 2001 en

1 liters knåd installerats som har gjort det möjligt att öka halten oktogen i krutsammansättningen från 55 % till 65 % [22]. Effekten på krutens brinnegenskaper samt flammans konduktivitet har studerats och resultaten från dessa mätningar redovisas nedan.

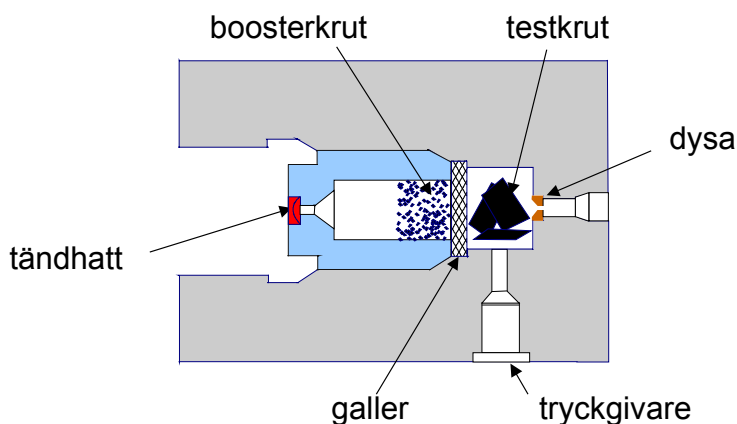
Om HMX byts ut mot oxidatorn ammoniumdinitramid (ADN) i kruten ovan förväntas prestandan öka avsevärt [25]. ADN har dock tyvärr visat sig vara inkompatibel med isocyanater som ingår i traditionella bindemedelssystem. Det går därför inte att framställa ett ADN-krut tillsammans med de energetiska polymererna GAP och polyNIMMO. När bättre bindemedelssystem [22][23][26] som är kompatibla med ADN har utvecklats kommer ADN att vara intressant att användas i formuleringar även för ETK-anpassade krut.

Även om ETK kräver betydligt mindre tillförsel av elektrisk energi än t ex rent elektromagnetiska eller elektrotermiska utskjutningstekniker är det fortfarande viktigt att minska behovet av elektrisk energi för att det elektriska energisystemet skall kunna bli fältmässigt och praktiskt användbart. Ett sätt att variera brinnhastigheten under brinnförloppet skulle kunna vara användandet av en ändförbrinnande laddning med skivor av krut med olika brinnhastigheter sammanfogade till ett stycke. Om brinnhastigheten för hela det använda krutet ökades skulle maximum i tryckkurvan öka och kanske överskrida p_{max} . För en ändförbrinnande krutladdning enligt ovan skulle dock en ökning i brinnhastighet kunna erhållas endast under den senare delen av brinnförloppet och därmed skulle det gå att undvika att p_{max} överskrids. Detta förutsätter tillgång till krut med väsentligt högre brinnhastighet än de som finns tillgängliga idag. Resultat från försök med framställning av snabbrinnande krut redovisas i referens [22] och [27].

3.2 Karaktärisering

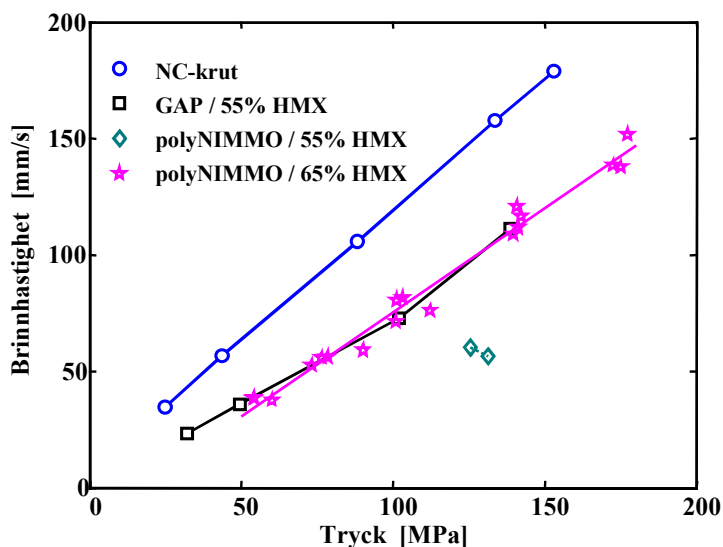
3.2.1 Brinnhastighetsmätningar

Brinnhastigheten för de ETK-anpassade kruten som framställts har mätts genom provbränningar i EMBLA-bomben [28] (se figur 2). Krutprovet som skall testas placeras i en liten förbränningskammare och förbränningsgaserna från tändkrut och krutprov leds ut från kammaren genom en liten dysa. Genom att variera mängden tändkrut erhålls ett lämpligt tryck i kammaren. Brinnhastigheten beräknas från uppmätta värden på brinntid och brinnsträcka för krutprovet.



Figur 2. Kanonkruts brinnhastighet kan bestämmas experimentellt i EMBLA-bomben.

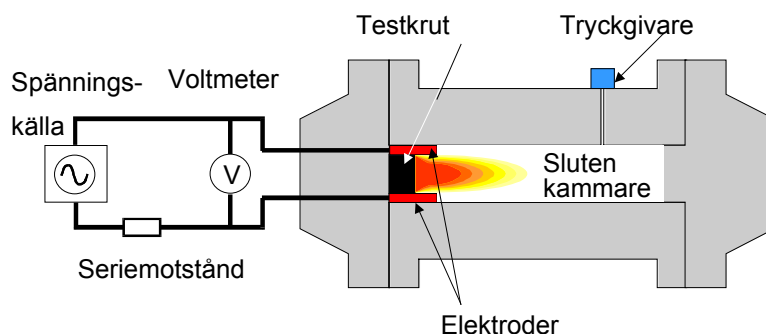
Resultaten från brinnhastighetsmätningarna visas i figur 2. Alla de krut som analyserats har dopats med 5 % kaliumnitrat. NC-krutet Nzk5230 har den högsta brinnhastigheten men brinnhastigheten har ökat avsevärt för HMX-krutet med polyNIMMO som bindemedel då halten oxidator ökats från 55 % till 65 %. Brinnhastigheten för HMX-krut med en fyllnadsgrad på 65 % och GAP som bindemedel har ännu inte analyserats fullständigt men enstaka mätningar tyder på en ökning av brinnhastigheten på 10 % för detta krut. För att nå upp till brinnegenskaper motsvarande dem för dubbelbaskrutet kan det bli aktuellt att tillsätta brinnkatalysatorer eller på annat sätt öka brinnhastigheten.



Figur 2. Uppmätta brinnhastigheter i EMBLA-bomben för de ETK-anpassade kruten. I alla kruten är kaliumnitrat tillsatsen 5%.

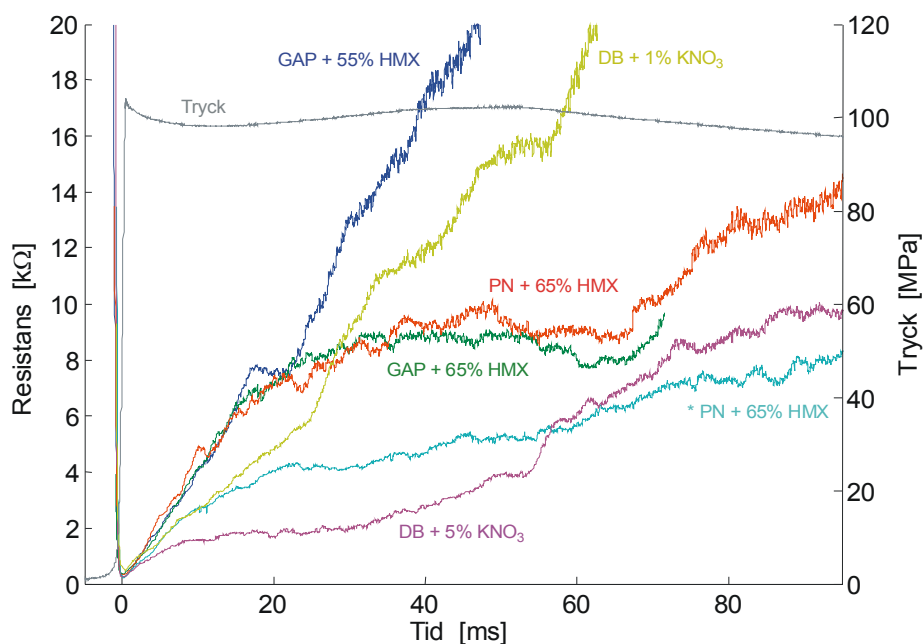
3.2.2 Konduktansmätningar

För att jämföra hur väl den beräknade konduktiviteten för jämviktsprodukterna stämmer med flammans verkliga konduktivitet och därmed kunna göra ett urval av lämpliga krut för fortsatta ETK-experiment görs kontinuerligt konduktansmätningar på alkalidopade krut. Dessa mätningar har gjorts i ETK-bomben med en försöksuppställning enligt den schematiska bilden i figur 3 (bombens fysiska utförande överensstämmer dock med den som beskrivs i avsnittet 4.1.1). Seriemotståndet används här för att mäta strömmen. Spänningskällan har haft en utsignal på 100 V DC och pulsaggregatet har ej varit inkopplat vid dessa mätningar. Bomben trycksätts som vid ETK-försöken till 100 MPa med hjälp av en tryckladdning och vid tryckuppgången övertänds testkrutet. Under testkrutets brinntid mäts resistansen mellan elektrodernas mellanliggande reaktionszon. Mätdata registreras på transientrecordern och konduktansen i reaktionszonen beräknas ur detta.



Figur 3. Uppkoppling för konduktansmätningar i ETK-bomben.

Resultatet från konduktansmätningarna visas i figur 4. För att göra resultaten mera lättåskådliga presenteras här resistansen istället för konduktansen. Resultaten bekräftar att flammans elektriska ledningsförmåga går att öka genom att dopa kruten med en liten mängd kaliumnitrat. Konduktansen blev också avsevärt högre då fyllnadsgraden av oktogen ökades från 55 till 65% i HMX-kruten med GAP och polyNIMMO som bindemedel. Detta antas bero på att temperaturen i flammen ökar med fyllnadsgraden (se tabell 2). Konduktansen för HMX-kruten med den högre fyllnadsgraden är något högre än den för DB-krutet med 1 % KNO_3 men fortfarande lägre än konduktansen för DB-krutet med 5 % KNO_3 . För HMX-krut med en fyllnadsgrad på 65 % verkar val av bindemedel också ha mindre betydelse för flammans elektriska ledningsförmåga. Det är dock anmärkningsvärt att resistansen för krutet med 65 % HMX och polyNIMMO som bindemedel minskar då medeltrycket ökas från ca 100 MPa till 121 MPa. Den förväntade effekten av en högre gastäthet skulle annars snarare vara en högre resistans. Analysdata från krutet med 55 % HMX och polyNIMMO som bindemedel saknas i figur 4. Eftersom brinnegenskaperna för krutet var dåliga samt att den förväntade konduktiviteten enligt termokemiberäkningarna var låg, gjordes helt enkelt ingen mätning på detta krut.

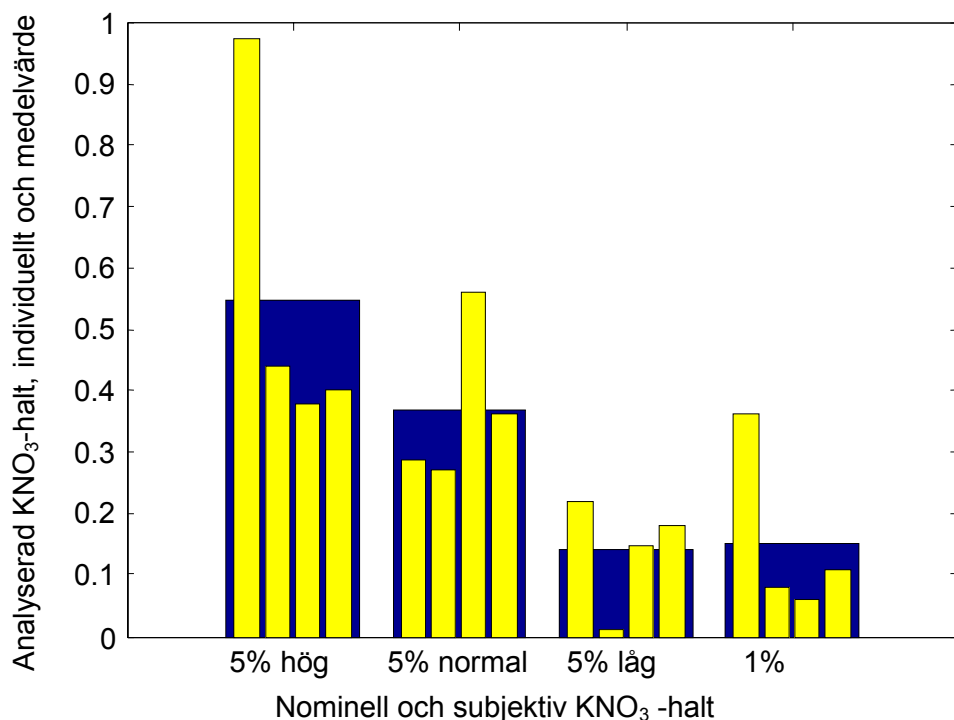


Figur4 Resultaten från konduktansmätningarna presenteras här istället som resistansen i flammen. I alla HMX-kruten är 5 % KNO_3 tillsatt. Grafen markerad tryck är en typisk tryckregistrering, som härrör från ett av försöken. Tryckregistreringar för de övriga fallen ser liknande ut men varierar i brinntid och något i trycknivå. Medeltrycknivån har varit ca 100 MPa i samtliga bränningar utom den i grafen markerad *PN + 65% HMX där medeltrycket var 121 MPa.

3.2.3 Undersökning av fördelningen av KNO_3 i dubbelbaskrutet

Vid en närmare inspektion av dubbelbaskrutet Nzk5230 går det att se små vita korn (upp till ca 0.5mm i diameter) av ihopklumpad KNO_3 lite här och var över krutytan. Eftersom en inhomogen inblandning av kaliumnitraten i krutmassan förväntas ha en negativ inverkan på flammans elektriska egenskaper har därför homogeniteten av kaliumnitrattillsatsen analyserats. Krutet är tillverkat i form av en lång rund stav med en diameter på ca 32 mm. Krutskivor har kapats i svarv till en tjocklek av 5 mm för användning i ETK-experimenten. Kaliumnitrathalten på olika delar av dessa skivor har sedan analyserats. De spillbitar som blir över när de rektangulära testladdningarna skärs till av de cirkulära skivorna har använts som provbitar. En tanke med att använda spillbitarna var att kunna korrelera nitrathalten i dessa till ett visst ETK-experiment där resten av krutskivan använts. Det skulle då vara möjligt att se hur experimenten eventuellt påverkades av om kaliumnitraten var inhomogent tillsatt.

Prover från fem krutskivor har analyserats. Tre skivor hade den nominella KNO_3 -halten 5 %, en skiva hade halten 1 % och en var utan tillsats. De tre skivorna med 5 % KNO_3 skiljer sig åt i den synbara halten av alkalitillsats som betecknats som hög, normal respektive låg. 0.1 g prov placerades i 10 ml vatten under 2 timmar. Nitrathalten analyserades sedan m h a Waters 2690 HPLC med UV-detektering. I proverna från skivan med nominellt 0 % KNO_3 kunde ingen nitrathalt detekteras



Figur 5. Analyserad KNO_3 -halt i dubbelbaskrutet Nzk5230.

Resultaten från homogenitetsundersökningen redovisas i figur 5. De gula staplarna representerar analysresultaten från de olika delproven och de blå staplarna är medelvärden av dessa resultat för varje krutskiva. Bortsett från enstaka avvikande analysresultat bekräftar mätningarna att kaliumnitrathalten är lägre i de krutskivor som har en lägre synbar nitrathalt. Genomgående är de uppmätta halterna lägre än vad som angivits vid tillverkningen. Det är dock omöjligt att kontrollera om de verkliga halterna är så låga eller om det beror på att allt kaliumnitrat inte lösts ut i vattnet.

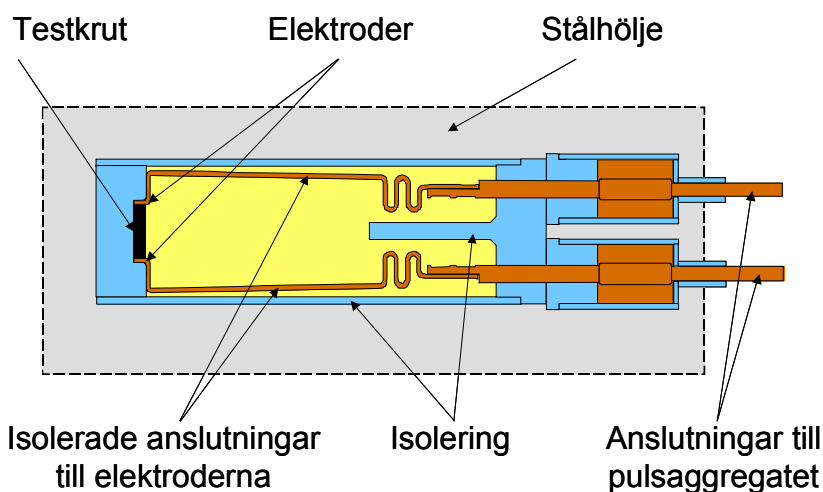
4 ETK-experiment i slutna bomb

Möjligheten att stimulera förbränningen av en krutladdning genom tillförsel av elektrisk energi har studerats i en speciellt tillverkad slutna bomb [9] (se figur 6 och 7). Förbränningen sker vid konstant volym och det går att ur tryckmätningen beräkna krutets brinnhastighet vid olika arbetstryck och vid olika mängd tillförd elektrisk energi.

4.1 ETK Försöksuppställning

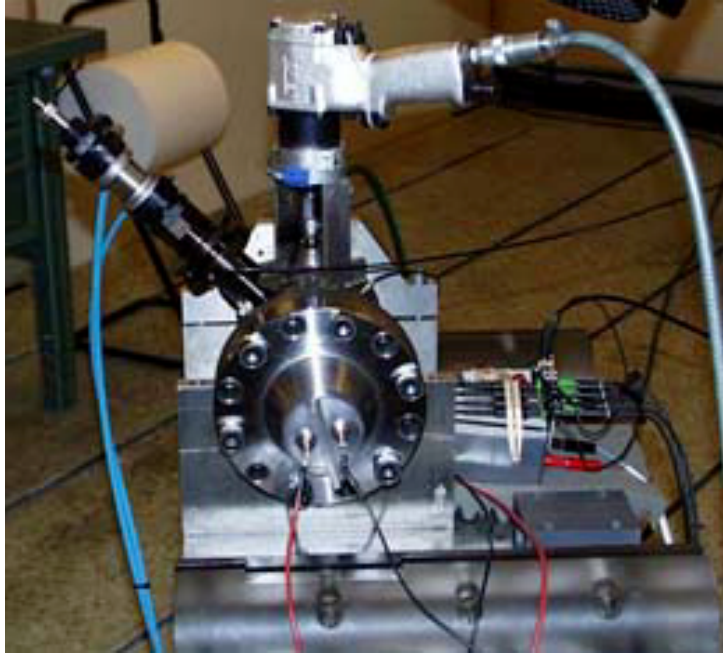
4.1.1 Slutna bomb

Vid ETK- experimenten har bomben en inre volym på ca 200 cm³ och klarar tryck upp till 150 MPa. Trycket som erhålls i experimenten beror främst på mängden förbränningsgaser från krutet och den tillförda mängden elektrisk energi. Förbränning av icke-energetiskt material, som t.ex. isoleringar, och värmeförluster till omgivande material i bomben, sänker trycket. Bombens gavel som är på motstående sida om testkrutet, är försedd med genomföringar för att leda in den elektriska energin genom tryckkammaren fram till testkrutet. Elektroden är tillverkade av wolfram-koppar. Till-edarna är belagda med ett tunt (ca 0.5 mm) lager av silikongummi för att undvika elektriskt över-slag.



Figur 6. Slutna bomb för FOIs ETK-experiment

Elektroden är anslutna till ett 300 kJ pulsslaggen som består av fyra moduler med kondensatorer som vardera kan laddas till individuell spänning, ha olika serieinduktanser och kan switchas med individuell tidsfördröjning. Värden på den tillförda elektriska energin erhålls från uppmätta värden på ström och spänning.

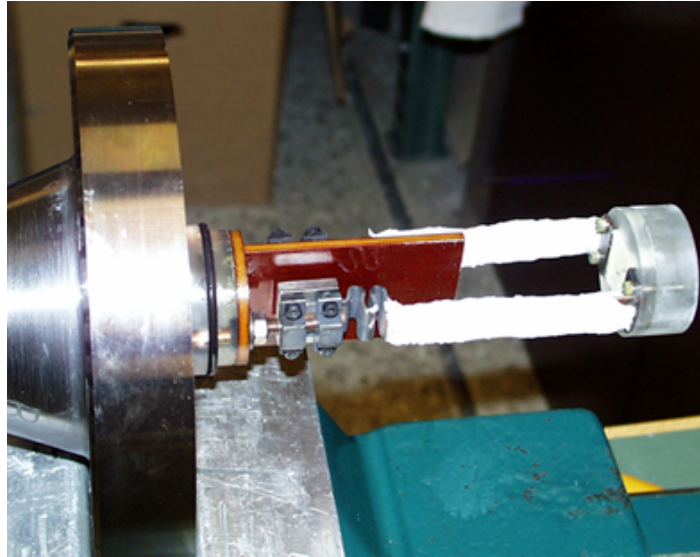


Figur 7. Bilden visar bomben slutmonterad och klar för konduktansmätning.



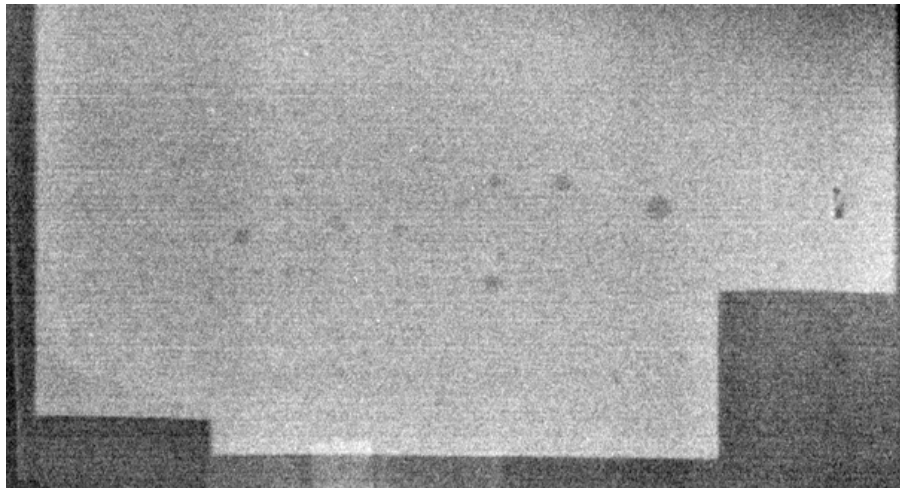
Figur8. Från vänster: hållare med limmad testladdning (svart) inklämd mellan elektroderna samt tillredare (utan silikonisolering), tygpåse med boosterkrut, tändladdning och tändhatt i hållare.

Den elektriska effekten kan därmed korreleras mot variationer i det uppmätta trycket. En tryckluftdriven slagvändare initierar en tändladdning och ett finkornigt boosterkrut (se figur 8). Boosterkrutet höjer snabbt trycket i bomben till lämplig arbetsnivå och tänder testkrutet. Arbetstrycket, som ges av mängden boosterkrut, har här valts till ca. 100 MPa. Testkrutet består av en homogen 5 mm tjock rektangulär krutbit (19 x 22mm) som sitter fastklämd mellan de två elektroderna (se figur 9).



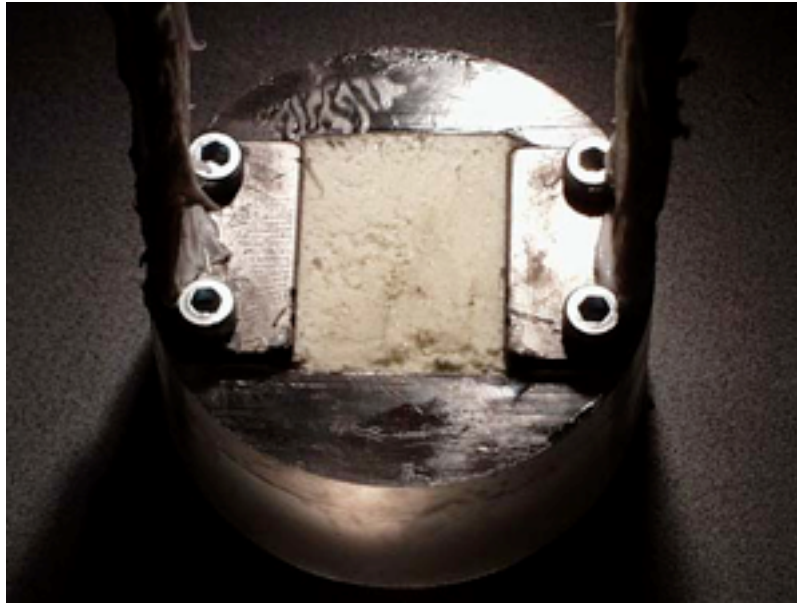
Figur 9. Hållare med testkrutladdningen klämd mellan elektroderna till höger.

Svårigheter vid tillverkning av HMX-kruten gör att krutskivona där krutproven tas ut innehåller en del mindre luftbubblor. I en röntgenbild av en sådan krutskiva kan luftbubblorna tydligt ses som mörka fläckar (se figur 10). Vid tillkapning av testkrutbitar kapas de bitar av krutskivan som har håligheter som kan påverka testresultatet bort.



Figur 10. Röntgenbild av skiva med krut med polyNIMMO + 65% HMX. De mörka fläckarna i krutskivan visar håligheter i krutet.

Krutbiten är fastlimmad i kruthållaren så att endast den yta som vetter ut mot kammaren är fri (se figur 11). Det betyder att krutet kommer att brinna från en sida till den andra och brinnarean kommer att vara konstant och väldefinierad under hela förbränningsförloppet. Testkrutet kommer därför att brinna under en mycket längre tidsperiod än de övriga inblandade kruten, vilket möjliggör att den elektriska energin kan tillföras när enbart testkrutet brinner.



Figur 11. Monterad testladdning. Här visas ett HMX-krut med polyNIMMO som bindemedel, den rektangulära ljusa biten i mitten. Krutbiten sitter fastklämd mellan elektroderna på vänster och höger sida, som är fästa med insexskruvar i kruthållaren. I detta fall skadades krutets ytskikt vid limningen.

Det uppmätta trycket i anslutning till urladdningen av den elektriska pulsen kan därför relateras till brinnhastigheten för testkrutet. Pulsaggregatet triggas när ett visst tryck i kammaren har uppnåtts men kopplas inte in förrän efter den förinställda fördröjningstiden då vakuumsitcharna till kondensatorerna sluts.

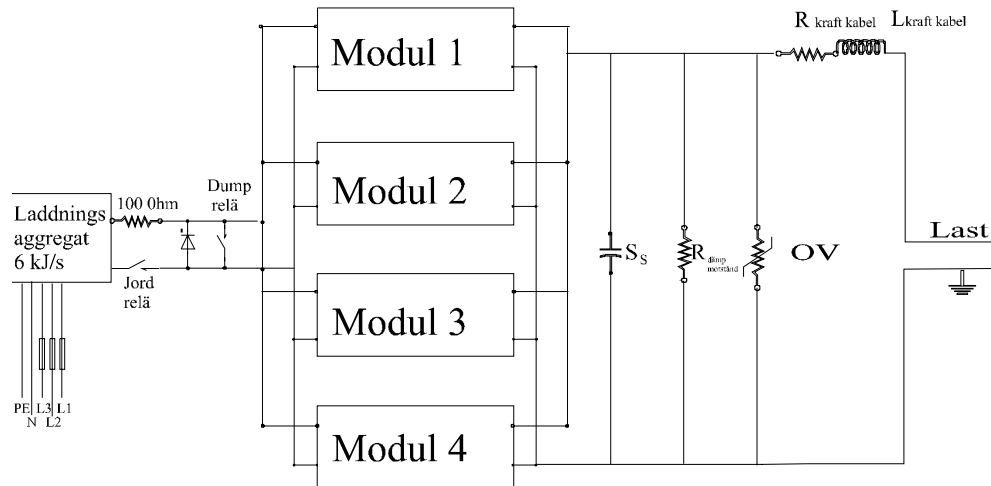


Figur 12. Bombens bakgavel med o-ringsförsedd utfyllnadskropp.

I den bombgavel som är på samma sida som testkrutet, finns en cylindrisk del monterad som passar till bombens tryckkammare (se figur 12). Den cylindriska delens längd avpassas till önskad volym i bomben. Bombens gavlar är försedda med flänsförband och tätningen till tryckkammaren består av koniska stältätningar. Innanför dessa finns dessutom O-ringar som effektivt tätar mot gas och sotpartiklar i utanförliggande spalter. Bombens insida isoleras med ett glasfiberepoxirör med en godstjocklek av ca 2 mm.

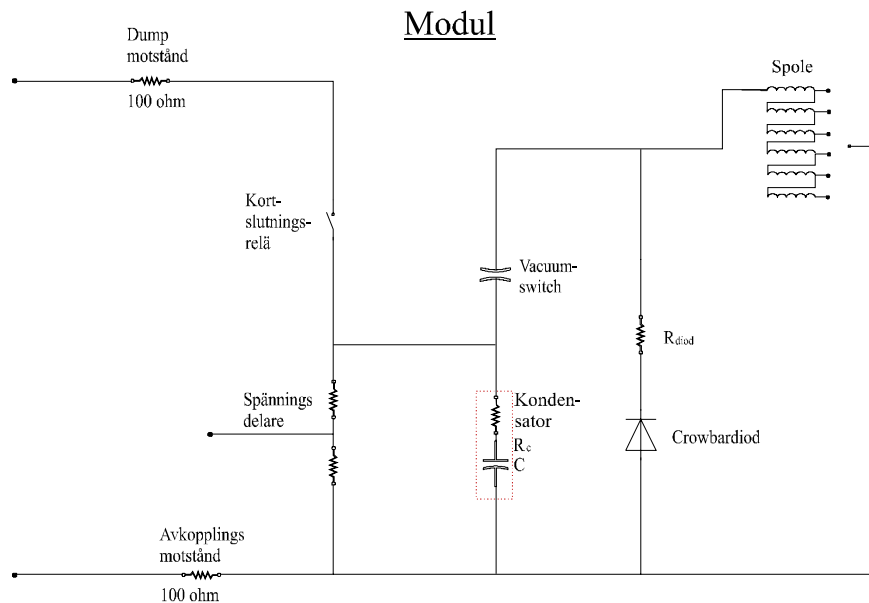
4.1.2 Pulsaggregat

Pulsaggregatet, som är placerat i en stålcontainer utanför försökshallen, består av fyra stycken moduler som vardera kan lagra en elektrisk energimängd på maximalt 75 kJ (se figur 13). Varje modul består av ett kondensatorpaket som är uppbyggt av två kondensatorer vardera med kapacitans 680 μF , en vakuumschwitch med tillhörande triggerenhet, en crowbardiod, en spole med induktans ställbar i sex lägen mellan 20 till 1240 μH och en spänningsdelare som mäter den uppladdade spänningen över kondensatorn (se figur 14). Beroende på om kondensatorerna parallell- (1370 μF) eller seriekopplas (340 μF) så kan dessa maximalt laddas upp till 11 kV eller 22kV. Vid aktuella försök parallellkopplades kondensatorerna och laddades maximalt upp till ca.5 kV. Upp och urladdningen av denna elektriska energi styrs av systemets styrdator. Vid urladdning sänder styrdatorn en triggpuls till triggergeneratorerna, vid för modulerna individuellt inställda fördröjningstider. Dessa aktiverar vakuumschwitcharna som sluts och leder ström. De fyra modulerna kan individuellt switchas tidsförskjutna i förhållande till varandra.



Figur 13. Principchema för pulsaggregatet

Laddnings och dumpförfarandet manövreras via högspänningsrelän som är placerade på den pneumatiska laddnings och dumppanelen. Denna styrs från aggregatets styrdator. Vid försöken triggas pulsaggregatet genom att en signal som genererats av datainsamlingsystemet kopplas till pulsaggregatets externa triggeringång. Triggervillkor är en vald trycknivå i bomben, normalt halva arbetstrycket. I ett typiskt experiment laddas pulsaggregatet till en spänning på upp till 4 kV (10-20 kJ).



Figur 14. Principschema för en modul.

4.1.3 Isolationsmätning

På grund av läckage av krutgaser genom tätningssringar samlar sig elektriskt ledande partiklar på elektriskt isolerande ytor mellan bombens gods och elgenomföringarna, vilket försämrar isolationen. Av den anledningen mäts isolationsresistansen mellan elektroderna före varje försök. Resistansen mäts med en isolationsmätare vid 250-1000 V likspänning.

4.1.4 Montering

Elektroderna isoleras med silikongummi. Krutladdningen formas för att passa i sin hållare. De sidor av krutladdningen som passas mot de elektriska ledarna fasas så att en spalt erhålls som är något smalare än elektrodens tjocklek. Krutbiten limmas på alla sidor utom på de sidor som ligger mot ledarna. Kruthållaren limmas på undersidan av de elektriska ledarna, trycks ner och paketet skruvas ihop med M3x12 rostfri skruv. Kruthållaren med de elektriska ledarna monteras till gavelns elektroder med klämförband. Tryckladdningen placeras på sin plats och isolerhylsan trycks över kruthållaren och ner mot gaveln med elektrodgenomföringar. Vid monteringen fylls alla spalter med högviskös silikonolja. Bombens tryckkammare hålls så fri som möjligt från främmande ämnen som olja och fett för att undvika påverkan av förbränningsgasernas sammansättning.

4.1.5 Strömmätning

Strömproben Pearson modell 2093 kan maximalt mäta en ström på 500 kA med bandbredd 0.15 Hz – 200 kHz och möjlig stigtid 2.0 mikrosekunder vid 3 dB gränshfrekvens. Strömproben har en nominell känslighet av 1 mV/A och utgångsimpedansen 1 Ω. Detta medför att det är nödvändigt att anpassa proben till en 50 Ω kabel och ingångsmodulen till datainsamlingssystemet. Dämp- och skyddskretsar har konstruerats och tillverkats vid FOI för användning vid ETK-lab där de kopplas via 15 m RG50 koaxialkabel. Genom att strömproben monteras långt från försöksobjektet elimineras risken för att strömprob eller tillhörande delar i mätkedjan skadas. Därmed elimineras också risken för höga spänningar och strömmar i mätkablar och strömmätning kan därför utföras utan optiska länkar.

4.1.6 Spänningsmätning

Vid spänningsmätning över lasten används Tektronix P6015A högspänningsprobe. Högspänningsproben består av en spänningsdelare som har galvanisk kontakt med mätobjektet. Mätobjektet kan genomströmmas av elektriska strömmar och spänningar som kan orsaka person- och materialskador. På grund av detta sker all signalöverföring med hjälp av optiska länkar, se referens [29]. Den optiska sändarmodulen, Tektronix A6905S, innehåller en differentiellt kopplad instrumentförstärkare med 10, 100 och 1000 ggr förstärkning. Proben har ingångsimpedansen 10 M Ω och 2.9 pF. CMRR anges till < 70 dB vid frekvenser upp till 1 MHz. Fabrikanten har angett 15 MHz som systemets analoga bandbredd.

4.1.7 Tryckmätning

Trycket mäts med en tryckgivare från antingen Kistler (typ 6203) eller PCB (typ 108A03). För PCB-givaren anges resonansfrekvensen 300 kHz och stigtiden till 2 μ s. Överföringen av trycksignalerna till insamlingssystemen sker via optisk länk av fabrikat DG Tyskland, detta för att minimera störningar samt för att eliminera risken för att höga elektriska spänningar och strömmar leds till mät och registreringsutrustning i utrymmen där personal befinner sig.

4.1.8 Datainsamling

Datainsamlingssystemet består av en W+W 800 transientrecorder. Instrumentet som är tillverkat i Tyskland har 4 st kanaler med differentiellt kopplade ingångsförstärkare. Ingångsmodulerna har A/D-omvandlare med 12 bitars upplösning och ett minsta samplingsintervall 40 μ s. Instrumentet är försett med ett omkopplingsbart fjärde ordningens lågpasfilter med Bessel-karaktäristik. Efter den lägre gränshfrekvensen anges filtrets branthet till -80 dB/decad. Den maximala filterfrekvensen är 5 MHz. Varje kanal innehåller ett minne med 1 Mords minnesdjup. Vid försöken registreras spänning och strömsignalen på kanal 1 resp. kanal 2 på transientrecorderen, trycksignalen kopplades till kanal 3 och kanal 4 parallellkopplades med strömkanalen. Kanal 4 överstyrdes så att mätområdet fokuserades runt den intressanta delen av strömkurvan. På detta sätt ökas den vertikala upplösningen i strömsignalen väsentligt. Alla mätdata överförs till ett databaserat signalanalysprogram där beräkningar och presentation av mätresultat utförs.

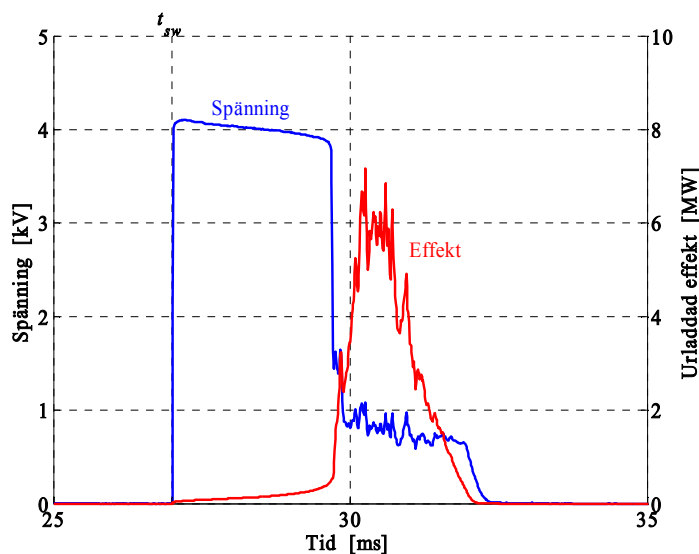
4.2 Resultat

4.2.1 Pulsformning

De första försöken att stimulera förbränningen genom att leda ström genom flammans kännetecknades av lång och slumpvis varierande fördröjning mellan slutning av pulsaggregatets switchar, vid t_{sw} , och den väsentliga delen av urladdningen [10]. Oftast kom urladdningen först efter testladdningens brinnslut. Ingen inverkan på förbränningen kunde märkas i de få fall där urladdningen inföll under testladdningens brinntid. Resultatet av urladdningen blev en termisk tryckökning, som väl motsvarade den urladdade elektriska energin.

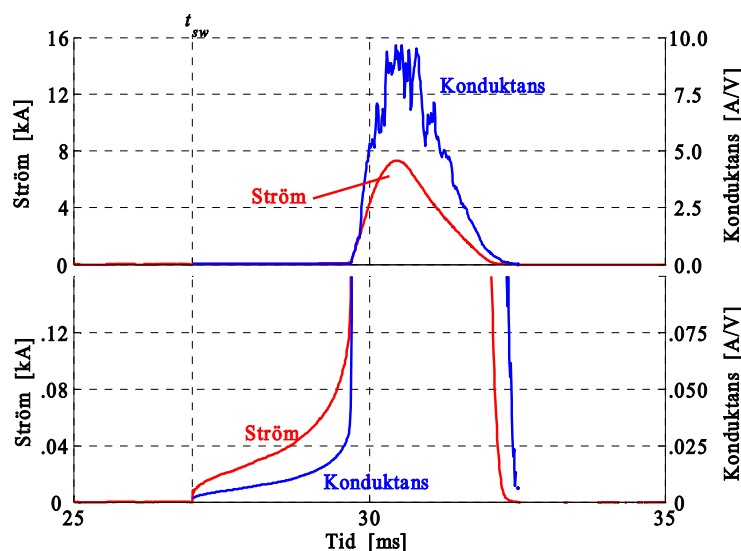
Under fördröjningstiden leds strömmen mha de laddningsbärare som initialt finns tillgängliga i flammans. Om den elektriska effektutvecklingen är större än förlusterna så höjs flammans temperatur, vilket ökar den termiska joniseringen. En högre jonisationsgrad ger en bättre ledningsförmåga, varvid effektutvecklingen ökar. Ett inledningsvis långsamt accelererande, men styrbart, förlopp övergår efter fördröjningstiden lavinartat i en svårkontrollerad skogsnisturladdning med hög effektutveckling, se figur 15. Kopplingen mellan flammans ledningsförmåga och strömmen/

effekten visas i figur 16. Den första åtgärden för att minska fördröjningen var att öka den elektriska fältstyrkan. Detta kan göras genom att antingen höja spänningen eller minska avståndet mellan elektroderna. Båda varianterna har prövats vid separata experiment. Högre elektrisk fältstyrka minskar fördröjningen men ökar också intensiteten i gnisturladdningen så att den blir kortare och effekten högre. Ökad dynamik i tillförd effekt leder till minskad styrbarhet, vilket är oönskade konsekvenser av den högre fältstyrkan. Högre spänningar ställer också större krav på den elektriska isoleringen. Gnisturladdningen har också egenskapen att dra ihop sig i rummet till en trådformig urladdningskanal. Effektvvecklingen blir koncentrerad kring urladdningskanalen med en ojämn effektfördelning över krutytan till följd.

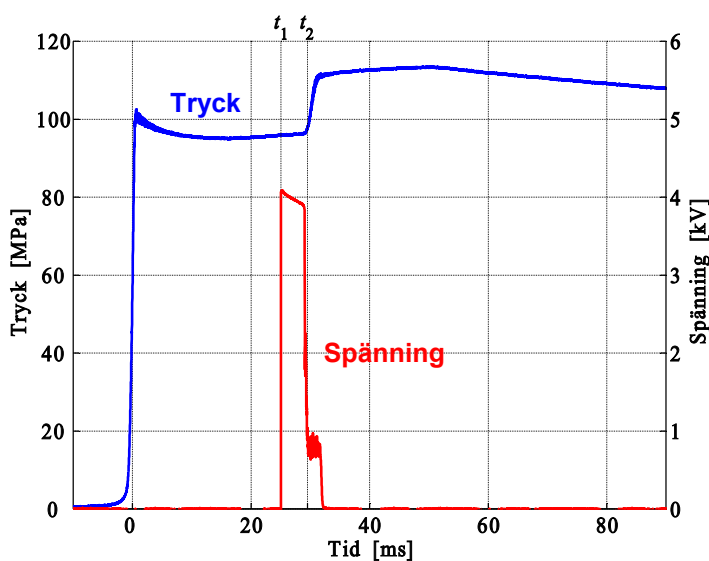


Figur 15. Spänning över elektroderna och urladdad effekt. Vid t_{sw} sluts switchen och en långsam effektuppgång inleds, som efter ca 2.7 ms lavinartat övergår i en gnisturladdning.

Dessa inledande försök förklarade varför att flamman hos ett normalt DB-krut har mycket låg naturlig elektrisk ledningsförmåga (den initiala ledningsförmågan före urladdningen), vilket senare verifierats genom både beräkningar och experiment. För att mer kontrollerat kunna leda en ström genom flamman är det nödvändigt att öka dess initiala ledningsförmåga. I avsnittet ETK-anpassade krut beskrivs hur ledningsförmågan förbättras genom modifiering av krutets kemiska sammansättning. Med hjälp av de förbättrade krutkompositionerna har fördröjningen mellan switchning och urladdning minskat från 8-90 ms till 2.7-4.1 ms (medelvärde 3.4 ms, standardavvikelse 0.6 ms). Den minskade variationen i fördröjning öppnar möjligheten till pulsformning genom sekventiell switchning av flera moduler i pulsaggregatet.



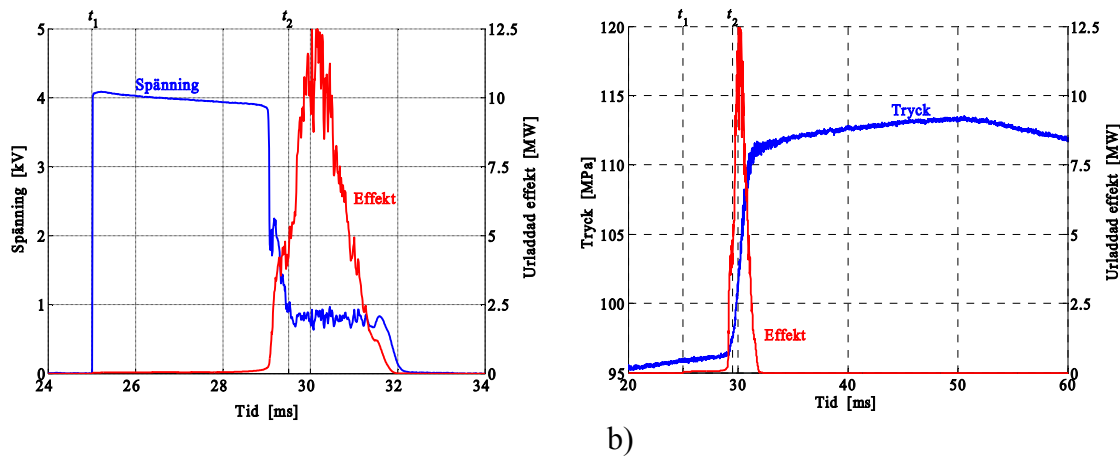
Figur 16. Urladdningsström och konduktans mellan elektroderna. Efter t_{sw} ökar strömmen och konduktansen först mycket långsamt och efter ca 2.7 ms mycket snabbt. Observera den expanderade skalan i undre delen av figuren.



Figur 17. Hela tryckförloppet från initiering till slutbrunnet och spänning över elektroderna. Två moduler laddade till 4 kV vardera, switchade vid $t_1 = 25.0$ ms respektive $t_2 = 29.5$ ms relativt trycknivån 50 MPa på den inledande tryckuppgången.

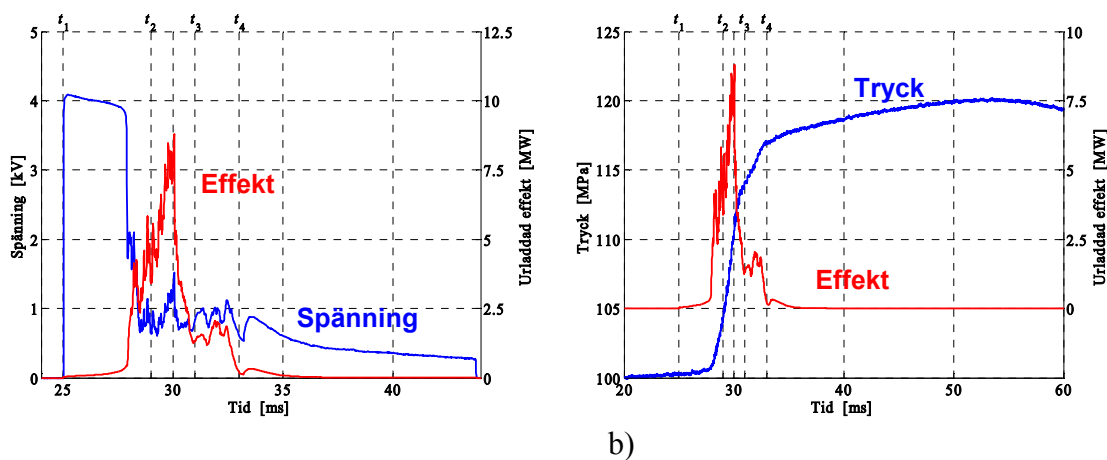
I ett första försök till pulsmodulering användes två av pulsaggregatets fyra kondensatormoduler laddade till vardera 4 kV och 11 kJ samt med serieinduktanser på 170 μH . Den första modulen switchades mitt i testintervallet vid tiden $t_1 = 25.0$ ms och den andra vid $t_2 = 29.5$ ms. Switchtiderna t_{sw} räknas från triggingen av registreringsinstrumentet, vilket sker när den inledande branta tryckuppgången passerar nivån 50 MPa, se figur 17. Tanken var att urladdningen av den första modulen skulle starta efter en fördröjning på drygt 3 ms och att den andra modulen skulle switchas under andra halvan av urladdningsförloppet. På så sätt skulle urladdningstiden, liksom den tillförda energin nära fördubblas, medan den elektriska effekten inte skulle ökas. Av figur 18 a) framgår dock att fördröjningen istället blev strax över 4 ms så att de båda modulerna snarare urladdades samtidigt. Pulstiden blev följdaktligen i huvudsak oförändrad medan effekten fördubblades. Den urladdade

energin om 15.7 kJ ger en tryckhöjning på 15 MPa enligt termokemiberäkningar, vilket stämmer väl med figur 18 b). Tryckderivatan beror av mängden gas, som genereras per tidsenhet.



Figur 18. Två moduler laddade till 4 kV vardera, switchade vid $t_1 = 25.0$ ms respektive $t_2 = 29.5$ ms. Pga lång fördröjning hinner den första modulen bara börja urladdas innan den andra switchas. a) Spänning över elektroderna och urladdad effekt. b) Tryck och effekt.

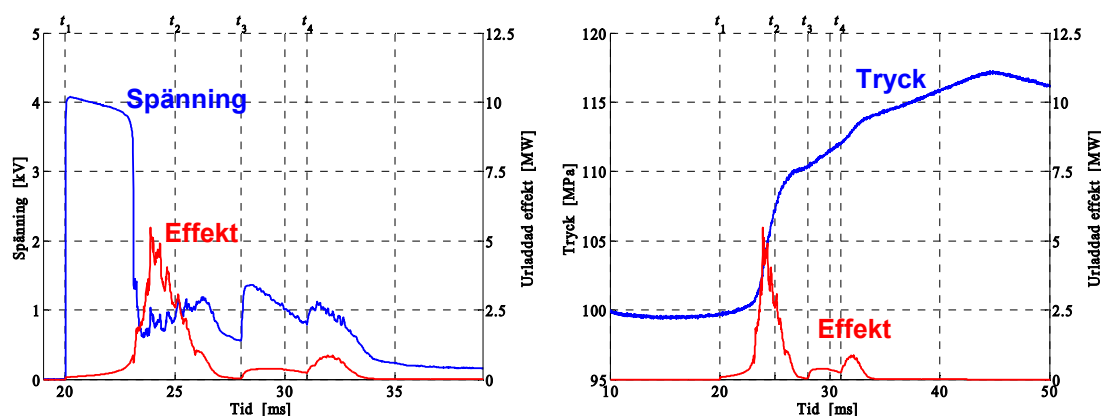
Den är alltså proportionell mot krutets momentana brinnhastighet och är ca 0.11 MPa/ms före urladdningen och ca 0.13 MPa/ms efter urladdningen. Den lilla skillnaden i tryckderivata i detta fall tyder på att det inte erhållits någon signifikant skillnad i brinnhastighet. Här beror tryckskillnaden snarare på att värmeförluster och energikonsumerande förbränning av ickeenergetiskt material (elektrisk isolering) är större under den tidigare delen av testladdningens brinnförlopp. Det inledande trycksteget från 0 till ca 100 MPa är resultatet av den snabbbrinnande boosterladdningen. Under tryckuppgången tänds testladdningen helt men här börjar även en förbränning av den elektriska isoleringen, som täcker en stor del av bombväggarna. Då isoleringen består av icke energetiskt material tar den förbränningen energi från krutgaserna. Vid brinnstart är allt material kallt varför värmeförlusterna blir störst då. Efter det inledande transienta skedet antar förlusterna efter ca 10-20 ms en förhållandevis stabil nivå, se exempelvis tryckkurvan i figur 17.



Figur 19. Fyra moduler laddade till 4, 3, 2 respektive 1 kV, switchade vid $t_1 = 25$, $t_2 = 29$, $t_3 = 31$ respektive $t_4 = 33$ ms. Jämfört med tidigare är urladdningen förlängd och den urladdade elektriska effekten lägre. a) Spänning över elektroderna och urladdad effekt. b) Tryck och effekt.

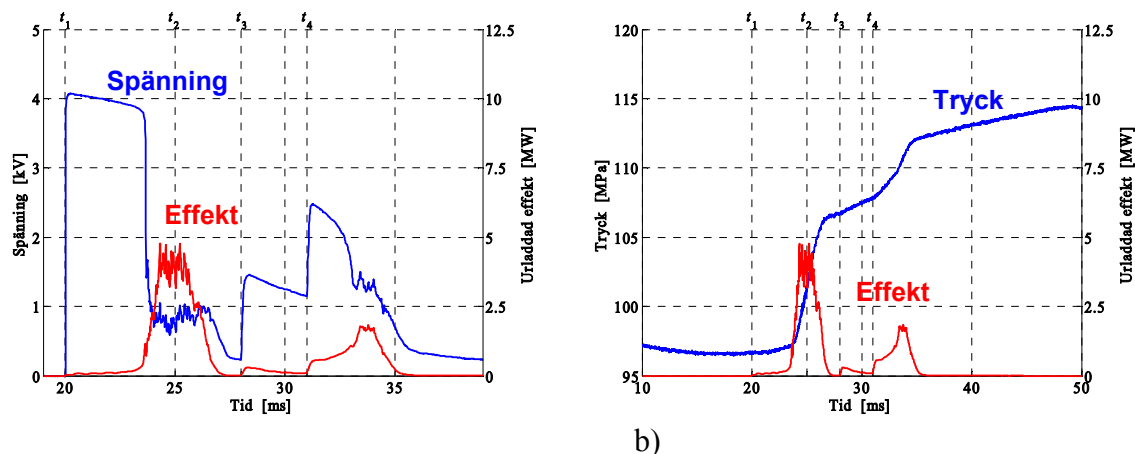
Figur 19 a) visar spänning och effekt från ett försök med fyra moduler laddade till 4, 3, 2 respektive 1 kV motsvarande 11, 6, 2.7 respektive 0.7 kJ. Denna gång ökades serieinduktanserna till 320 μH , vilket förlänger pulserna något och minskar effekten i motsvarande grad. Modulerna switchades vid tiderna $t_1=25$, $t_2=29$, $t_3=31$ respektive $t_4=33$ ms. Med en fördröjning av urladdningen på ca 3 ms kommer switchningen av den andra modulen i mitten av den första pulsen och förlänger den men höjer också effekten. Den tredje modulen switchas just som effekten i pulsen börjar avta och förlänger urladdningen ytterligare 1.5 ms men effektnivån är lägre. Gnisturladdningen upphör innan switchen till den fjärde modulen sluts. Dess låga spänning om 1 kV förklarar inte återstarta gnisturladdningen utan det resterande förloppet karaktäriseras av en långsam urladdning. Jämfört med det föregående försöket (se figurerna 18 a) och 18 b)) är urladdningen förlängd och den urladdade elektriska effekten lägre. I figur 19 b) syns tydligt hur de olika effektnivåerna påverkar tryckderivatan. Efter urladdning är tryckderivatan 0.18 MPa/ms. Före urladdningen verkar de initiala förlusterna fortfarande spela stor roll.

I provet i figurerna 20 a) och 20 b) var fyra moduler laddade till 4, 1.5, 1.5 respektive 1.5 kV motsvarande 11, 1.5, 1.5 respektive 1.5 kJ med serieinduktanser på 320 μH . Med switchtiderna 20, 25, 28 respektive 31 ms började modulerna alltså switchas 5 ms tidigare än i föregående prov men med 1 ms längre mellan t_2 och t_3 respektive t_3 och t_4 . Efter en normal fördröjning av urladdningen på ca 3 ms switchades den andra modulen i slutet av den första pulsen. Den andra modulen återstartade på grund av sin låga spänning inte gnisturladdningen, vilket ej heller den tredje och fjärde modulen gjorde. Efter den inledande fördröjningen pågår gnisturladdning i ca 2 ms, för att sedan övergå i en lugnare urladdning med väsentligt lägre effekt under ca 7 ms. Totala urladdningstiden är ca 10 ms. De olika nivåerna på den elektriska effekten under urladdningen återspeglas i tryckderivatan. Efter urladdningen är dock tryckderivatan i detta fall betydligt högre än normalt, 0.31 MPa/ms (se figur 20 b)), vilket motsvarar en signifikant högre brinnhastighet. Även den totala brinntiden blev i detta fall signifikant kortare, 44.7 ms, mot normalt ca 50 ms.



a) **Figur 20.** Fyra moduler laddade till 4, 1.5, 1.5 respektive 1.5 kV, switchade vid 20, 25, 28 respektive 31 ms. Jämfört med tidigare är urladdningen ytterligare förlängd och den urladdade effekten ännu lägre. a) Spänning över elektroderna och urladdad effekt. b) Tryck och effekt. Markant högre tryckderivata efter urladdningen och något tidigare brinnslut.

Figurerna 21 a) och 21 b) visar ett prov med fyra moduler laddade till 4, 1.5, 1.5 respektive 2.5 kV motsvarande 11, 1.5, 1.5 respektive 4.3 kJ med serieinduktanser på 320 μH . Switchtiderna var som i föregående prov 20, 25, 28 respektive 31 ms. Avsikten med den högre laddningsspänningen av modulen 4 var att undersöka hur och när gnisturladdningen återstartas.



a) b)
Figur 21. Fyra moduler laddade till 4, 1.5, 1.5 respektive 2.5 kV, switchade vid 20, 25, 28 respektive 31 ms. Gnisturladdningen återstartar vid 33 ms. Lång urladdningstid. a) Spänning över elektroderna och urladdad effekt. b) Tryck och effekt. Något förhöjd tryckderivata efter urladdningen.

Inledningen av förloppet blev likartat föregående försök. Gnisturladdningen upphör just före switchning av modul 3, som ökar effekten något men inte ger upphov till en ny gnisturladdning. När modul 4, med sin högre spänning, kopplas in accelererar effekten och efter en kort fördröjning återstartas här en gnisturladdning under någon millisekund. Det kan noteras att ledningsförmågan är betydligt högre under fördröjningen efter switchningen av modul 4 än under fördröjningen efter switchningen av modul 1, trots att laddningsspänningen endast uppgår till 2.5 kV mot 4 kV. Det antas vara fördelaktigt att undvika gnisturladdning men att annars behålla en hög effektutveckling. Den totala urladdningstiden blev här nära 12 ms varav 3 ms gnisturladdning.

Tryckderivatan efter urladdning är 0.20 MPa/ms (se figur 21 b)), vilket är högre än normalt och motsvarar en något förhöjd brinnhastighet. Brinntiden blev 49.2 ms.

4.2.2 Acetons inverkan på brinnhastigheten

Nitrocellulosa, som är en av komponenterna i dubbelbaskrut, är mycket lösligt i aceton. Det går därför på ett enkelt sätt att tillverka ett lim genom att lösa upp litet av testkrutet i aceton för att sedan limma fast det i kruthållaren. Eftersom kruthållaren är tillverkad i polykarbonat, som också är lite löslig i aceton, går det att erhålla bra limfogar. Dessutom görs både krutbitens och kruthållarens ytskikt mjukare genom att de penslas med ren aceton före sammanfogningen. Krutbiten kan då formas efter mindre ytojämnheter i kruthållaren så att eventuella luftspalter fylls ut. Denna limningsmetod fungerar dock endast då ett nitrocellulosakrut används som testkrut.

Tabell 3. Force, flamtemperatur och tryck vid 82.5 kg/m³ av NzK5230 med 5 % KNO₃ och olika halter av aceton.

Acetonhalt Viktprocent	Force kJ/kg	Temperatur K	Tryck MPa
0.0	1115	3576	100.1
0.5	1113	3543	100.0
1.0	1111	3510	99.8

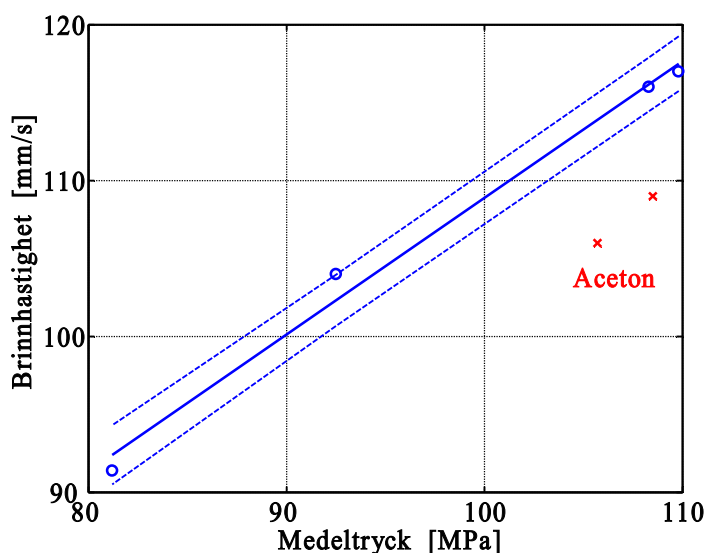
Limningsmetoden som beskrivs ovan ger dock den nackdelen att det blir rester av aceton kvar i testkrutbiten efter limningen. Detta innebär att krutprestandan försämras med avseende på arbetsvärde och brinnhastighet eftersom förbränningen av aceton konsumerar syre. Effekten på arbets-

värdet och andra tillståndsvariabler kan beräknas med hjälp av ett termokemiskt beräkningsprogram. Beräkningar vid konstant volym och inre energi för dubbelbaskrutet NzK5230 med 5 % KNO_3 vid laddningstätheten 82.5 kg/m^3 och olika acetonhalter, ger tillstånd enligt tabell 3.

Tabell 4. Uppmätt brinnhastighet för acetonbehandlat respektive obehandlat DB-krut.

Prov nr	Medeltryck MPa	Brinnhastighet mm/s
60	81.2	91
59	92.5	104
58	108.3	116
55	109.8	117
61 med aceton	105.7	106
56 med aceton	108.5	109

För att utröna inverkan av acetonen på brinnhastigheten gjordes en serie speciella prov där acetonbehandlat respektive obehandlat krut brändes under lika omständigheter. Proven förenklades genom att skivor med 32 mm diameter som kapades i en svarv till 5 mm tjocklek brändes fritt i bomben. Krutskivorna limmades alltså inte i någon kruthållare och den elektriska isoleringen togs också bort. Boosterladdningar anpassades för att ge trycknivåer från 80 till 110 MPa. Acetonbehandlingen gick till på liknande sätt som vid limningen. Krutytan penslades med aceton varefter krutbitarna förvarades ca 24 timmar i plastpåsar. Just före provbränningen kontrollvägdes krutet för att bestämma acetonhalten, som befanns vara ca 1 viktsprocent. Resultaten från provbränningarna visar på en minskning av brinnhastigheten med ca 6 %, se tabell 4 och figur 22. För ett normalt ETK-prov motsvarar minskningen i brinnhastighet en ökning i total brinntid för testladdningen på ca 3 ms, vilket är jämförbart med variationen från prov till prov. Det är alltså möjligt att en del av variationen i brinntid orsakas av acetonrester i testkrutet. Men dessa acetonrester antas inte ha någon betydande effekt på resultaten av ETK-experimenten.



Figur 22. Uppmätt brinnhastighet för acetonbehandlat DB-krut. Den heldragna linjen är en linjär skattning av brinnhastigheten för obehandlat DB-krut (markerat med ringar) och de streckade linjerna är skattningens osäkerhet (50 % av data). De två kryssmarkerade punkterna härör från acetonbehandlat krut innehållande ca 1 viktsprocent aceton. Brinnhastigheten för dessa är ca 6 % lägre.

5 Diskussion och slutsatser

De nya kruten med 65 % HMX och med GAP eller polyNIMMO, som bindemedel, har betydligt högre brinnhastighet än de tidigare, som endast innehöll 55 % HMX. Dock återstår en bit till dubbelbaskrutens brinnhastighet. Enligt termokemiberäkningar resulterar den högre HMX-halten i högre arbetsvärde och högre flamtemperatur, medan medelmolekylvikten är fortsatt låg. Högre flamtemperatur eftersträvas i detta fall, eftersom den höjer konduktiviteten i flammen. Även produktionstekniska förbättringar har gjorts vid tillverkningen av HMX-kruten. Detta har lett till jämnare skivtjocklek och minskad mängd håligheter (bubblor).

Den absoluta halten kaliumnitrat i dubbelbaskrutet NzK5230 har inte kunnat verifieras. En god jämförelse har dock kunnat göras av de relativa halterna mellan de olika delproven. Resultaten från dessa analyser styrker det synbara intrycket att KNO_3 är ojämnt fördelat i krutstaverna. Det går tydligt att se att KNO_3 klumpat ihop sig till vita korn i krutmattan. Analysen bekräftar också det subjektiva intrycket att krutbitar med många stora korn har högre KNO_3 -halt än krutbitar med mindre och färre korn. Även resultaten från konduktansmätningarna och ETK-proven tyder på samma sak. Ihopklumpningen i korn är dock ogynnsam för ETK-proven eftersom det tar längre tid för ett större korn att konsumeras i flammen. Detta innebär att alkalitillsatsens inverkan på konduktiviteten inte får full effekt förrän längre ut i flammen, en bit bort från den brinnande krutbiten. Eftersom värmeöverföringen till det oförbrända krutet blir högre ju närmare krutytan strömmen leds, är det ofördelaktigt att strömmen på detta sätt leds längre bort från krutytan.

Mätningarna av flammans konduktans bekräftar att HMX-kruten med högre halt av oktogen ger en klart bättre konduktivitet än de tidigare kruten med lägre fyllnadsgrad. Konduktansen för HMX-kruten med den högre fyllnadsgraden är även något högre än den för DB-krutet med 1 % KNO_3 men fortfarande lägre än konduktansen för DB-krutet med 5 % KNO_3 . Enligt termokemiberäkningarna (se tabell 2) skulle konduktiviteten för HMX-krutet med GAP som bindemedel och 65 % fyllnadsgrad motsvara den för DB-krutet med 1 % KNO_3 . Mätningarna av konduktans tyder därmed på att det kan finnas en positiv effekt av att KNO_3 -tillsatsen är mer finfördelad och jämnare distribuerad i krutmattan hos HMX-kruten. I motsats till termokemiberäkningarna är även den uppmätta konduktiviteten för HMX-krut med polyNIMMO som bindemedel i samma storleksordning som då GAP använts som bindemedel för kruten med den högre fyllnadsgraden. Det är också anmärkningsvärt att resistansen för krutet med 65 % HMX och polyNIMMO som bindemedel minskar då medeltrycket ökas från ca 100 MPa till 121 MPa. Den förväntade effekten av en högre gastäthet skulle annars snarare vara en högre resistans.

De KNO_3 -dopade krutens högre initiala konduktans minskar variationen i fördröjning av gnisturladdningens start. Detta möjliggör pulsformning genom sekventiell switchning av pulsaggregatets fyra kondensatormoduler. På så sätt kan antingen den intensiva gnisturladdningen förlängas eller få avklinga till en lugnare och mer styrbar urladdning. Den lugnare urladdningen har lägre effekt och kan därför pågå under längre tid. Den sker också fördelad i gasvolymen närmast utanför krutytan, vilket är fördelaktigt för likformig stimulans av krutytan, till skillnad mot den linjeformiga gnisturladdningen. I experiment med längre urladdningstid har också en viss kvarstående förhöjning av förbränningen erhållits. Detta indikerar att det faktiskt är möjligt att påverka och kontrollera krutets brinnhastighet genom att leda ström genom flammen.

Acetonrester från limningen av dubbelbaskrut har visats ha en liten men påvisbar inverkan på brinnhastigheten. Den uppskattade minskningen i brinnhastighet på 6 % motsvarar normala variationer i brinntid från prov till prov. Acetonresternas inverkan på brinnhastigheten är av samma storleksordning som övriga mätosäkerheter. Inverkan är dock klart mindre än intressanta stimulansnivåer varför den inte har någon avgörande betydelse för tolkningen av resultaten.

6 Förslag till fortsatt arbete

De ETK-anpassade kruten kan förbättras ytterligare genom att t ex.

- göra förändringar i tillverkningsprocessen för att minska mängden luftbubblor i HMX-kruten,
- försöka öka den initiala konduktiviteten i flamman genom förändrade formuleringar eller tillverkningsprocesser,
- tillsätta brinnkatalysatorer eller på annat sätt öka brinnhastigheten,
- fortsätta arbetet med att framställa snabbrinnande krut för tillverkning av ändförbrinnande progressiva krut,
- göra spektroskopiska studier av testkruten för att möjliggöra optimering av absorptionen av värmestrålningen in i krutmassan.

Det fortsatta ETK-arbetet bör inriktas mot

- fortsatt pulsformning för att förlänga urladdningstiden och öka kontrollerbarheten i förloppet,
- ”interrupted bomb” experiment för att studera hur testkrutet påverkas av tillförsel av elektrisk energi under förbränningen,
- ändra geometrin så att den blir mer lik en kanon.

7 Referenser

- [1] Försvarets materielverk, "Ammunitionslära för armén", M7730-850020, (1979).
- [2] S.E. Nyholm, "Elektrotermisk-kemisk utskjutning. En översikt samt preliminär bedömning av prestanda och realiserbarhet", FOA-R—99-01355-310—SE, 1-22.
- [3] K. Andersson och A. Berg, "Nu laddar man om – nya trender inom eldrörsvapenteknologin", *Militärteknisk Tidskrift* 4 (1995) 19.
- [4] W.G. Proud and N.K. Bourne, "The electrothermal Enhancement of Propellant Burning by Plasma Injection", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 22 (1997) 212-217.
- [5] L. Perelmutter et al, "Plasma Propagation and Ignition of Propellant in the Chamber of a SPETC Gun", *IEEE Trans. Magn.* 35 (1999) 213-217.
- [6] T.H.G.G. Weise, J. Kruse, P. Schaffers and H-K. Haak, "Status and Results of the German R&D Program on ETC Technologies", *IEEE Trans. Magn.* 37 (2001) 46-51.
- [7] S.T. Thynell, H. Zhou, J.-Q. Li and T.A. Litzinger, "Experimental Study on the Transient Interaction between a Plasma and a Propellant", *CPIA Publ. 691 JANNAF 36th Combustion Subcom. Meeting* (1999) 119-131.
- [8] S. Andreasson, E. Bemm och S.E. Nyholm, "Resultat och erfarenheter från forskningen inom ETK-området", FOI-R—0299—SE, 1-18.
- [9] S.Andreasson & S.E. Nyholm, "Alkalidopat krut för ETK: försök i slutna bomb", FOA-R—00-01691-310—SE (2000) 1-24.
- [10] S. Andreasson and M.U. Carlsson, "Results from Initial ETC Closed Vessel Experiments", *IEEE Trans. Magn.* 35 (1999) 181-184.
- [11] A.Voronov, A. Koleczko, H. Haak, T. Weise and N. Eisenreich, "Energy Criteria for Combustion Control in a Large Caliber Gun", *IEEE Trans. Magn.* 37 (2001) 199-202.
- [12] K.Kishore and K. Sridhara, "Effect of Temperature on the Burning Rate of Solid Propellants: A Review", *J. Propulsion* 2 (1986) 193-194.
- [13] G.P. Wren and W.F. Oberle, "Influence of High Loading Density Charge Configurations on Performance of Electrothermal-Chemical (ETC) Guns", *IEEE Trans. Magn.* 37 (2001) 211-215.
- [14] A.M. Voronov, H.K. Haak and Th.H.G.G. Weise, "The Interaction of Electrothermally Supplied Energy with Compact Solid Propellants", *IEEE Trans. Magn.* 35 (1999) 224-227.
- [15] A. Kay et al, "20 millimetre ETC Gun Experiments at ISL, Proc. European Forum on Ballistics of Projectiles, Saint-Louis, France 2000.
- [16] S. Johansson, "Pulsed Power in Weapon Applications", *Militärteknisk tidskrift*, årg. 67, nr 3, 1999
- [17] N. Kubota, "Survey of Rocket Propellants and Their Combustion Characteristics", K. Kuo And M. Summerfield (eds.), *Progress in Astronautics and Aeronautics: Fundamentals of Solid-Propellant Combustion*, Vol. 90, AIAA, New York, (1982), pp. 1- 52.
- [18] S.L. Howard, "Impact of Partial Heating of Solid Propellant as Elucidated by Simulation of Microwave Heating", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 26 (2001) 130-136.
- [19] C.R. Woodley and S.J. Billett, "Modeling Enhanced Gas Generation Rates in a 155-mm ETC Gun, *IEEE Trans. Magn.* 37 (2001) 207-210.
- [20] P. Magnusson, "Eldrörserosion och beläggning av eldrör-en litteraturstudie", FOI-R—606—SE, 1-17.
- [21] E.W. Price and R.K. Sigman, "Combustion of Aluminized Solid Propellants", *CPIA Publ. 691 JANNAF 36th Combustion Subcom. Meeting* (1999) 227-248.
- [22] E.Bemm, M. Borong och M. Wanhatalo, "Framställning av ETK-anpassade krut samt polymermatris för ADN-baserade krut", FOI-R—0572—SE, 1-28.
- [23] C. Eldsäter, N. Wingborg and R. Sandén, "Energetic Binders for High Performance Propellants", FOA-R—00-01610-310—SE, 1-24.
- [24] S.-E. Flygar, "INCEC93, input generator for the CEC93 thermochemical equilibrium code", FOA report C20973-2.1, Stockholm, Sweden, April 1994

- [25] R. Sandén, S. Andreasson, “ Kaliumföreningar som tillsats för att erhålla krut med elektriskt ledande reaktionsprodukter- tillverkning och termokemiska beräkningar”, FOA-R—99-01084-310, 612—SE , 1-26.
- [26] E.Bemm, C. Eldsäter, C. Sandberg and R. Sandén, “ Report on Possibilities of Preparing an ADN-based Gun Propellant and Results from Burning Experiments”, FOA-RH—01-037—SE (2001) 1-19.
- [27] R. Sandén och T. Rosenquist, “ *A very high burning rate (VHBR) composite propellant*”, 33th Intern. Annual Conference of ICT (2002) 108-1.
- [28] K.Kupzik, H. Niggemeyer, T. Barski, “The EMBLA-test-method for the determination of burning rate of gun propellants”, 30th Intern. Annual Conference of ICT (1999) p 25-1.
- [29] M. Skoglund, “Mätteknik och säkerhetssystem för TZN 300 kJ pulsaggregat”, FOA-R—00-01604-310—SE (2000) 1-19.