

Sten Andreasson, Elisabeth Bemm och Sten E. Nyholm

# Resultat och erfarenheter från forskningen inom ETK- området

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd 147 25 Tumba	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0299--SE	<b>Klassificering</b> Användarrapport	
	<b>Forskningsområde</b> 5. Bekämpning		
	<b>Månad, år</b> December 2001	<b>Projektnummer</b> E2005	
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet		
	<b>Delområde</b> 51 VVS med styrda vapen		
	<b>Författare/redaktör</b> Sten Andreasson, Elisabeth Bemm, Sten E. Nyholm		
<b>Projektledare</b> Elisabeth Bemm			
<b>Godkänd av</b> Torgny Carlsson			
<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM			
<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>			
<b>Rapportens titel</b> Resultat och erfarenheter från forskningen inom ETK-området			
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> <p>I rapporten presenteras experiment där avsikten är att stimulera förbränningen av fasta krut genom tillförsel av elektrisk energi. Strömmen leds genom flamman som värms upp genom resistiv uppvärmning. En del av denna termiska energi kommer att överföras till det 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. Termokemiska beräkningar indikerar att konduktiviteten kan ökas avsevärt om krutet dopas med alkaliföreningar. De krut som har använts i experimenten har därför dopats med en liten mängd kaliumnitrat. Experimenten har utförts i ett slutet reaktionskärl där testkrutet är fastklämt mellan två kopparplattor som är anslutna till ett pulsaggregat. Resultaten från experimenten redovisas som jämförelser av brinnhastigheter för olika krutkompositioner och mängd tillförd energi samt tryck-, spännings- och strömkurvor. Det uppmätta trycket jämförs också med mängden urladdad elektrisk energi.</p>			
<b>Nyckelord</b> ETK, elektrotermisk-kemisk, utskjutning, alkalidopat, krut, kanon, slutet reaktionskärl			
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska		
ISSN 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 18 s.		
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista		

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection SE-147 25 Tumba	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0299--SE	<b>Report type</b> User report
	<b>Research area code</b> 5. Combat	
	<b>Month year</b> December 2001	<b>Project no.</b> E2005
	<b>Customers code</b> 5. Commissioned Research	
	<b>Sub area code</b> 51 Weapons and Protection	
<b>Author/s (editor/s)</b> Sten Andreasson, Elisabeth Bemm, Sten E. Nyholm	<b>Project manager</b> Elisabeth Bemm	
	<b>Approved by</b> Torgny Carlsson	
	<b>Sponsoring agency</b> FM	
	<b>Scientifically and technically responsible</b>	
<b>Report title (In translation)</b> Results and experiences from research on ETC		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>Experiments with the objective to stimulate the combustion of solid propellants through addition of electric energy are reported. The current is conducted through the flame and will supply energy via resistive heating, which adds to the chemical energy release of the flame and thus increases the heat feedback to the unburnt propellant. 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. The experiments are performed in a closed vessel where a propellant slab is pinched between two copper plates connected to a pulsed power supply. The purpose of the present work is to determine whether the alkali doped propellants allow larger currents to be conducted through the reaction zone and if this substantially increases the burn rate. Presented results include comparisons of burn rates for different amounts of electric energy stimulation and for different propellant compositions as well as pressure, voltage and current recordings. The pressure measurements are compared with simulations based on the measured discharged electrical energy.</p>		
<b>Keywords</b> ETC, Electrothermal-chemical, launch, alkali, gun propellant, closed vessel		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 18 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

## **Innehåll**

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>FOI:S ETK-KONCEPT</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>KRUTEGENSKAPER</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>KARAKTÄRISERING AV OLIKA KRUTFORMULERINGAR</b>	<b>7</b>
4.1	Termokemiberäkningar	7
4.2	Brinnhastighet	10
4.3	Konduktansmätningar	11
<b>5</b>	<b>ETK-EXPERIMENT I SLUTEN BOMB</b>	<b>12</b>
5.1	Experimentuppställning	12
5.2	Resultat	13
<b>6</b>	<b>SLUTSATSER</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>REFERENSER</b>	<b>17</b>

# 1 Inledning

ETK (elektrotermisk-kemisk utskjutning) [1], [2] innebär att 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. Teknologin erbjuder möjligheter att förbättra prestanda för konventionella eldrörsvapen i flera avseenden. Detta kan åstadkommas genom att påverka krutets initiering, förbränning och/eller temperaturkänslighet.

Det vanligaste sättet att utnyttja ETK är genom elektrotermisk tändning av en konventionell krutladdning bestående av ett stort antal små krutkorn i en bestämd geometri (t.ex. cylindrar med sju hål), genom att injicera plasma i laddningsrummet [1], [3], [4]. Plasmata skapas av en plasma-generator som vanligtvis är monterad i bakstycket. Plasmatändning ger en snabbare och säkrare initiering av krutet. En viktig mekanism vid plasmatändning är att det heta plasmat (10000-30000 K) strömmar mycket snabbt längs krutyterna i laddningen. Krutets brinnhastighet kan också förstärkas under den tidigare delen av förbränningsförloppet, genom att det heta plasmat överför energi till det oförbrända krutet. Detta möjliggör användning av helt nya krutkompositioner med t.ex. högre laddningsdensitet [3], [5] eller högre aktiveringsenergi.

Det görs också försök att påverka krutets förbränning genom elektrisk energitillförsel under den återstående innerballistiska cykeln [6], [7], [8]. I detta fall resulterar dock energitillförseln huvudsakligen i ett termiskt trycktillskott, vilket ju också påverkar brinnhastigheten men mindre effektivt. Målet är i detta fall att anpassa tryckprofilen vid projektilens bakplan så att mynningsenergin kan optimeras.

Konventionella kanoner är konstruerade för att tåla de tryck och påfrestningar som uppstår vid skjutning med laddningar som har en temperatur på 60-70°C. Tryckmaximum vid projektilens bakplan ligger då nära det maximala tryck som kanonen är konstruerad att tåla. En kall vinterdag är energiåtgången för upptändning av krutladdning samt energiförlusterna till eldröret större än en varm sommardag. Detta medför en spridning i mynningshastighet beroende på omgivningens temperatur. Denna temperaturkänslighet kan man kompensera för genom att variera mängden tillförd elektrisk energi.

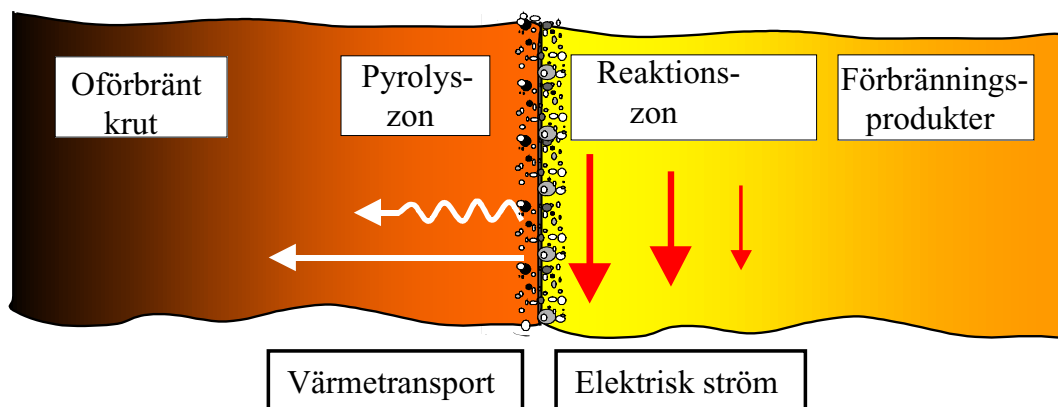
Gemensamt för de olika sätten att använda ETK är att en högre mynningshastighet med en lägre statistisk spridning kan erhållas för en given projektilvikt. Skottvidden och penetrationsförmågan kan därmed öka, vilket medför en ökad träffsannolikhet eller en högre projektilvikt.

Om mängden krut ökas i en konventionell kanon riskerar man att överskrida det maximala tryck som kanonen är konstruerad att tåla eller att krutet inte skulle hinna brinna färdigt innan projektilen lämnar eldröret. Om man lyckas stimulera krutets förbränning genom tillförsel av elektrisk energi under hela brinnförloppet skulle det vara möjligt att använda en avsevärt större mängd krut utan att något av detta inträffar. Istället för att öka volymen krut kan man öka laddningsdensiteten och därmed använda befintliga kanoner, dvs. inte öka volymen av laddningsrummet. Det går att öka laddningsdensiteten på en mängd olika sätt. Antingen kan man pressa samman krutkorn av konventionell geometri (konsoliderade laddningar) [9] eller gjuta kompakta laddningar som sedan perforeras (multiperforerade krutskivor) [10] för att skapa en progressiv förbränning genom att successivt öka brinnarean. Den högsta möjliga laddningsdensiteten som går att åstadkomma är krutets egen densitet. Vanliga kanonkrut har en densitet runt 1.6 g/cm<sup>3</sup> som kan jämföras med en typisk laddningsdensitet runt 0.8 g/cm<sup>3</sup> för konventionella kanonladdningar. En homogen laddning kräver en avsevärd ökning av krutets brinnhastighet för att hinna brinna slut under en normal innerballistisk cykel.

Syfte med arbetet som presenteras i denna rapport är att undersöka i vilken utsträckning förbränningen av en krutladdning kan stimuleras genom att leda elektrisk ström genom flammen. Vid hittills utförda experiment har en homogen krutbit använts, men en annan geometri kan komma i fråga vid fortsatt arbete.

## 2 FOI:s ETK-koncept

FOI:s ETK-koncept [6], [8] bygger på att en elektrisk ström leds genom reaktionszonen (väsentligen lika med flammen), som värms upp 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 flammen (se figur 1). Återkoppling av värmeenergi från flamma till oförbränt krut, som därigenom förgasas och reagerar, är den mekanism som upprätthåller en krutförbränning [11]. Genom att öka värmeåterkopplingen med elektrisk energitillförsel [7], [12], [13] sker förgasningen och därmed förbränningen snabbare, dvs. brinnhastigheten ökar. För att kunna leda ström genom flammen krävs det att den är elektriskt ledande, vilket den är om den är, åtminstone delvis, joniserad och därmed innehåller fria laddningsbärare. Det gäller också att ju närmare krutytan strömmen leds desto effektivare blir värmeöverföringen till krutet. För att hålla strömbanorna nära krutytan, bör därför den elektriska ledningsförmågan i förbränningsgaserna avta med avståndet från krutytan. Det fasta oförbrända krutet är också en relativt god elektrisk isolator. Krutsammansättningen behöver avpassas för att flammen ska få lämplig elektrisk ledningsförmåga.



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, dvs. högre brinnhastighet.

## 3 Krutegenskaper

Antalet fria laddningsbärare ökar med ökande flamtemperatur genom s.k. termisk jonisation. Traditionella kruttillsatser som t.ex. aluminium [14] frigör värme vid oxidationen och höjer därmed flamtemperaturen. En aluminiumtillsats innebär dock också en minskad livslängd hos eldröret på grund av den högre temperaturen och slitage från de hårda aluminiumoxider som bildas. Vi har

därför valt att istället dopa kruten med lättjoniserade alkalimetallföreningar för att på detta sätt öka tätheten av fria elektroner i flammen. Elektroner har en högre mobilitet än joner och ger därmed ett större bidrag till gasens konduktivitet.

Absorptionen av värmestrålning in i krutmassan kan optimeras genom att ta hänsyn till krutets optiska egenskaper [15]. Graden av påverkan på brinnhastigheten beror på strålningens inträngningsförmåga i krutet. Det har föreslagits, åtminstone för JA2-krut, att strålning inom det synliga och IR-området tränger in i krutet och orsakar strukturella förändringar i form av kornfragmentering [16]. Detta resulterar i en ökning av den brinnande ytan och därmed också en ökning av brinnhastigheten.

ETK, speciellt för tändning, kräver betydligt mindre elektriskt energitillskott än t.ex. rent elektromagnetiska eller elektrotermiska utskjutningstekniker men det är fortfarande viktigt att försöka minimera behovet av elektrisk energi för att utrustningen skall bli fältmässig. Progressiva krut kan därför vara bra att använda i kombination med ETK för att minska behovet av elektrisk energi. Progressivitet i förbränningen kan uppnås på flera sätt. Etablerade tekniker är geometrisk progressivitet, flerhålskrut, eller kemisk progressivitet med ytbehandling av krutet. Förutsatt att brinnhastigheten kan ökas väsentligt skulle en ändförbrinnande laddning med skivor av krut med olika brinnhastigheter sammanfogade till ett stycke kunna vara ett alternativ.

I de krutsammansättningar för ETK-experiment som FOI hittills har arbetat med, har vi ännu inte tagit hänsyn till krutets optiska egenskaper eller progressivitet. Det finns alltså stora möjligheter att ytterligare anpassa och förbättra krutsammansättningen för att den i ännu högre grad skall vara lämplig för användning inom ETK.

## **4 Karaktärisering av olika krutformuleringar**

Ett antal olika krutsammansättningar har studerats för att avgöra om de skulle vara lämpliga för användning i ETK-experiment. Innan kruten testades i ETK-experiment karaktäriserades de med avseende på brinnhastighet och elektrisk konduktivitet i förbränningsgaserna, både teoretiskt i form av termokemiska beräkningar och experimentellt genom EMBLA-bombexperiment respektive konduktansmätningar [8].

### **4.1 Termokemiberäkningar**

Genom termokemiberäkningar erhålls kemisk sammansättning, elektron- och jondensitet, samt olika termodynamiska tillståndstorheter för krutens förbränningsprodukter vid jämvikt. Eftersom partiklarna i flammen inte befinner sig i termokemisk jämvikt är det svårt att beräkna dess tillstånd och kemiska sammansättning. Vi har dock bedömt det som rimligt att anta att initiala elektriska konduktiviteten (dvs. före den elektriska urladdningen) i flammen är korrelerad till konduktiviteten för reaktionsprodukterna i jämviktstillståndet. För beräkningarna har koden CEC93 [17] använts. Detta är en FOI-version av en NASA-kod [18] som har utökats med bl.a. tillståndsekvationen för realgas. Eftersom experimenten utförs i en sluten bomb avpassad för ETK-experiment genomförs beräkningarna vid konstant volym och inre energi. Reaktantdata hämtas ur referens [19].

Ett samband för konduktiviteten  $\sigma$  för en gas, härlett ur Sahas ekvation, ges av Rosa [20]

$$\sigma = \frac{n_e q_e^2}{m_e c_e N_A \sum_k n_k Q_k}, \quad (1)$$

där

- $n_e$  - tätheten av fria elektroner
  - $q_e$  - elektronens laddning
  - $m_e$  - elektronens massa
  - $N_A$  - Avogadros tal
  - $n_k$  - tätheten av partikel k
  - $Q_k$  - tvärsnittet för överföring av rörelsemängd för partikel k
  - $c_e$  - elektronens termiska medelhastighet.
- $c_e$  fås ur

$$c_e = \sqrt{\frac{8 k_B T}{\pi m_e}}, \quad (2)$$

där

- $k_B$  - Boltzmanns konstant
- $T$  - absoluta temperaturen.

Från ekvation (1) går det att se att gasens konduktivitet ökar med relativa tätheten av fria elektroner  $n_e / \sum_k n_k$ , medan partiklar med stort  $Q_k$  som t.ex. halogener har motsatt effekt.

Konduktiviteten ökar också med ökande temperatur eftersom elektrontätheten då ökar på grund av termisk jonisation. En ökning av gastätheten (vilket är fallet vid högt tryck i en vanlig kanon) medför istället en minskning av konduktiviteten. Eftersom partiklarnas fria medelväglängd minskar med gastätheten, blir det svårare för laddningsbärarna att ta sig fram, dvs. mobiliteten minskar.

För att öka flammans konduktivitet bör man alltså inkludera lättjoniserade ämnen i krutsammansättningen som t.ex. alkalimetaller eller höja flamtemperaturen genom någon annan kruttillsats. Halogener bör undvikas, som t.ex. klor, som ingår i perklorat.

I tabell 1 ges sammansättningen för ett antal krutsorter med alkalitillsats i form av  $\text{KNO}_3$  som har övervägts för användning i ETK-experiment eller som tagits med för jämförelse.



Tabell 1. Krutsammansättningar i viktsprocent som använts i termokemiberäkningar. De förkortningar som används i tabellen är DB (dubbelbaskrut), NC (nitrocellulosa med 13.15% nitrergrad), NG (nitroglycerin), AP (ammoniumperklorat), PN (polyNIMMO) och HTPB (hydroxyterminerad polybutadien). Den nedsänkta siffran längst till höger i förkortningen för krutsorten anger tillsatsen av kaliumnitrat.

Krutsort	Huvudkomponenter	Tillsats
DB <sub>0</sub>	NC 50.0 %, NG 44.0 %	-
DB <sub>1</sub>	NC 49.5 %, NG 43.6 %	KNO <sub>3</sub> 1 %
DB <sub>5</sub>	NC 47.6 %, NG 41.9 %	KNO <sub>3</sub> 5 %
GAP/HMX55 <sub>5</sub>	GAP 40 %, HMX 55 %	KNO <sub>3</sub> 5 %
GAP/HMX65 <sub>5</sub>	GAP 30 %, HMX 65 %	KNO <sub>3</sub> 5 %
PN/HMX55 <sub>5</sub>	PN 40 %, HMX 55 %	KNO <sub>3</sub> 5 %
PN/HMX65 <sub>5</sub>	PN 30 %, HMX 65 %	KNO <sub>3</sub> 5 %
HA80 <sub>0</sub>	HTPB 20 %, AP 80 %	-
HA79 <sub>1</sub>	HTPB 20 %, AP 79 %	KNO <sub>3</sub> 1 %
HA75 <sub>5</sub>	HTPB 20 %, AP 75 %	KNO <sub>3</sub> 5 %

I tabell 2 ges värden på konduktivitet och termodynamiska tillståndstorheter för de olika krutsorterna. Force (arbetsvärde) är det maximala tryck-/volymarbetet som gasen kan uträtta och används som prestandamått för krutet.

Tabell 2: Konduktivitet och termodynamiska tillståndstorheter för ett tryck på 100 MPa.

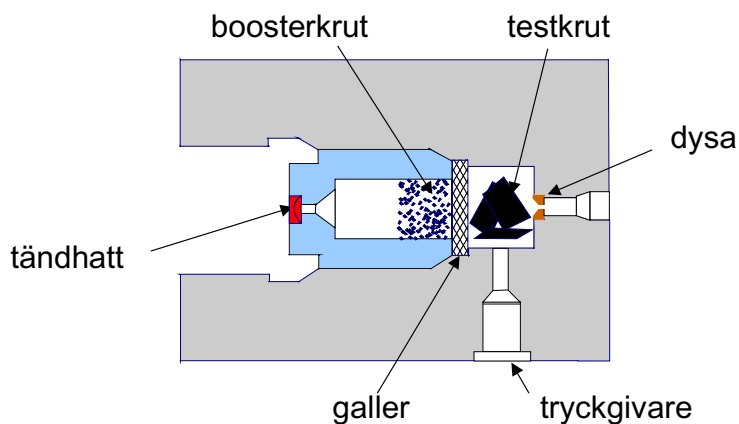
Krutsort	Konduktivitet [1/Ωm]	Temperatur [K]	Force [kJ/kg]	Medel- molekylvikt [g/mol]	Gastäthet [kg/m <sup>3</sup> ]
DB <sub>0</sub>	0.00098	3593	1162	25.7	79.2
DB <sub>1</sub>	0.42	3589	1153	25.9	79.8
DB <sub>5</sub>	0.84	3576	1115	26.7	82.4
GAP/HMX55 <sub>5</sub>	0.026	2387	1009	19.7	87.2
GAP/HMX65 <sub>5</sub>	0.42	2789	1134	20.5	79.1
PN/HMX55 <sub>5</sub>	0.015	2239	942	19.8	93.0
PN/HMX65 <sub>5</sub>	0.19	2693	1078	20.8	83.1
HA80 <sub>0</sub>	0.000006	2981	1125	22.0	82.1
HA79 <sub>1</sub>	0.0019	2969	1117	22.1	82.7
HA75 <sub>5</sub>	0.0036	2923	1083	22.4	85.1

En jämförelse mellan DB och HA visar att båda ger en hög force och flamtemperatur. Konduktiviteten är ca 200 gånger högre för DB för lika mängder alkalitillsats. Skillnaden i konduktivitet beror delvis på den högre flamtemperaturen för DB men främst av den höga klorhalten i HA. Krutsorterna GAP/PN/HMX55<sub>5</sub> har en förhållandevis låg force och konduktiviteten är låg på grund av den låga flamtemperaturen. Då oktogenhalten ökas till 65% i GAP/PN/HMX65<sub>5</sub> krutet, stiger flamtemperaturen och resulterar i både hög konduktivitet och force. HMX-kruten har dessutom en lägre medelmolekylvikt än övriga krutsorter vilket är fördelaktigt i kanonsammanhang.

Av de krut som presenteras i tabell 1 och 2 är det endast DB<sub>1</sub>, DB<sub>5</sub>, GAP/HMX55<sub>5</sub> och PN/HMX55<sub>5</sub> som hittills har framställts och testats. Blandningsmöjligheterna av oktogen och bindemedel har varit begränsande för halten explosivämne i krutsammansättningen. En knåd för små satsar har under hösten 2001 installerats vid FOI Grindsjön och förhoppningen är att halten oktogen i krutsammansättningen kan ökas och överskrida 55 % för att erhålla ett krut med de positiva egenskaper som beskrivits ovan. Ett motsvarande ADN-krut skulle ha höga prestanda [21] men det har hittills varit svårt att kombinera ADN med ett lämpligt bindemedel [22]. Olika förändringar i härdningsprocessens utförande har emellertid nu gjorts som medför att möjligheten att kunna tillverka ADN-krut har ökat väsentligt [23]. Termokemiska beräkningar på ett KDN-baserat krut med polyNIMMO som bindemedel har gjorts men det visade sig ha för låg force för att krutet skulle vara intressant för ETK-experiment.

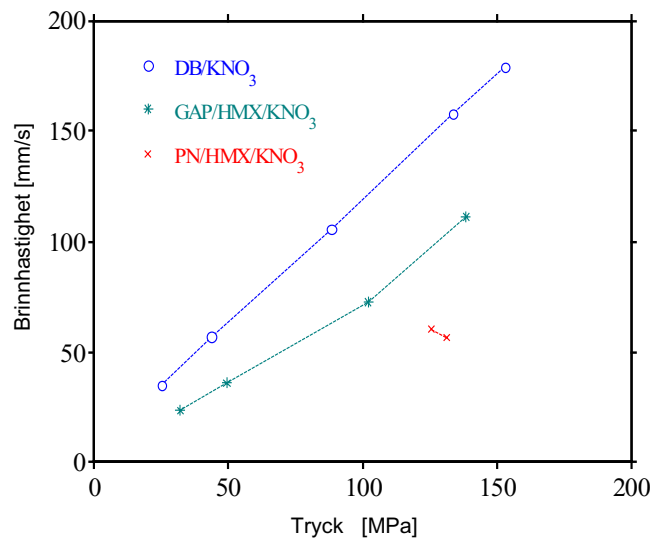
## 4.2 Brinnhastighet

Brinnhastigheter för de krut som framställts har bestämts genom provbränning i EMBLA-bomben [24] (se figur 2). Krutprovet som skall testas placeras i en liten förbränningskammare. Förbränningsgaserna från tändkrut och provkrut leds ut från kammaren genom en liten dysa. Ett lämpligt tryck i kammaren uppnås genom att variera mängden tändkrut. Brinnhastigheten beräknas från uppmätta värden på brinntid och brinnsträcka för provkrutet.



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

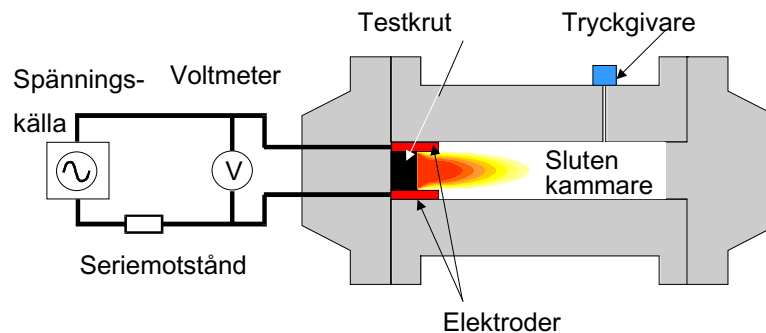
Resultaten från EMBLA-bombsmätningarna presenteras i figur 3. I båda HMX-baserade kruten är fyllnadsgraden av explosivämne 55% och kaliumnitrat-tillsatsen 5%. Brinnegenskaperna för krutet med polyNIMMO som bindemedel visade sig vara sämre och det är därför endast DB- och GAP-kruten som testats i ETK-experiment.



Figur 3. Uppmätta brinnhastigheter i EMBLA-bomben för några krutsorter.

### 4.3 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 har konduktansmätningar på några alkalidopade krut gjorts [8]. Dessa mätningar har gjorts i ETK-bomben med försökupställningen enligt figur 4.



Figur 4. Uppkoppling för konduktansmätningar i ETK-bomben.

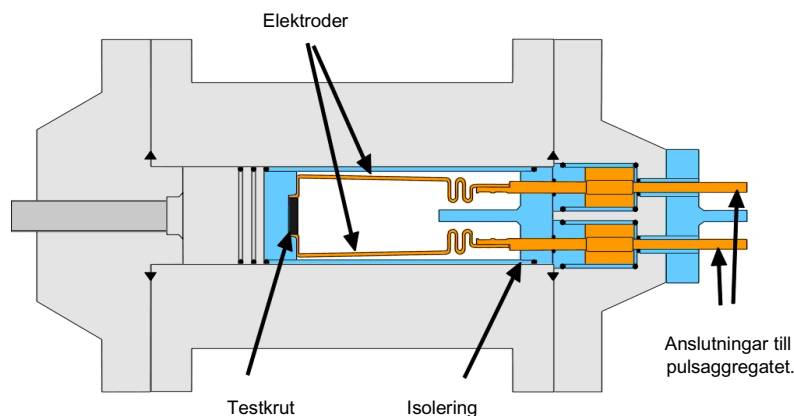
Resultaten från mätningarna bekräftar att det går att öka flammans konduktivitet genom att dopa krutet med en liten mängd kaliumnitrat.

## 5 ETK-experiment i slutna bomb

FOIs ETK-koncept har provats i en för ändamålet speciellt tillverkad slutna bomb (se figur 5). I en slutna bomb kan den elektriska energins inverkan på krutförbränningen studeras under något enklare förhållanden än i en kanon. Förbränningen sker vid konstant volym och det går att ur tryckmätningen beräkna krutets brinnhastighet vid olika arbetstryck och vid olika mängd tillförd elektrisk energi.

### 5.1 Experimentuppställning

Vid ETK-proven har bomben en inre volym på ca 200 cm<sup>3</sup> och håller för 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.



Figur 5. Slutna bomb för FOIs ETK-experiment. Hållare med testkrutladdningen klämd mellan elektroderna till vänster.

Trycket mäts med en tryckgivare från antingen Kistler eller PCB. Elektroderna är tillverkade av wolframkoppor och anslutna till ledare som förs in i kammaren genom motstående gavel. För att undvika elektriskt överslag mellan elektrodernas tilledere i bomben är dessa belagda med ett tunt (ca 0.5 mm) lager av silikongummi. Elektroderna är anslutna till ett 300 kJ pulsaggregat [25] som består av fyra moduler med kondensatorer som vardera kan laddas till individuell spänning, ha olika serieinduktanser och kan switchas med individuell tidsfördröjning. Detta ger en stor flexibilitet vid pulsformning. I ett typiskt experiment



Figur 6. Från vänster: hållare med limmad testladdning (svart) inklämd mellan elektroderna samt tilledere, tygpåse med boosterkrut, tändladdning och tändhatt i hållare.

laddas pulsaggregatet till en spänning på upp till 4 kV (10-25 kJ). Strömmen mäts med en Pearsonspole runt kablarna från pulsaggregatet och spänningen med en Tektronix spänningsprob just utanför bomben. Den elektriska energin som tillförs kammaren erhålls från uppmätta värden på ström och spänning. Den elektriska effekten kan därmed korreleras mot variationer i det uppmätta trycket.

En tryckluftsdreven slagtändare initierar en tändladdning och ett finkornigt boosterkrut. Boosterkrutet höjer snabbt trycket i bomben till lämplig arbetsnivå och tänder testkrutet. Arbetstrycket, som ges av mängden boosterkrut, har valts till runt 100 MPa i de experiment som presenteras här. Testkrutet består av en homogen 5 mm tjock rektangulär krutbit (19 x 22mm) som sitter fastklämd mellan de två elektroderna (se figur 5 och 6). Krutbiten är fastlimmad i kruthållaren så att endast den yta som vetter ut mot kammaren är fri. 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 endast testkrutet brinner. 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 den elektriska energin urladdas inte förrän efter den förinställda fördröjningstiden då vakuumschickarna till kondensatorerna sluts. Den elektriska urladdningen i flammen sker sedan efter ytterligare en tidsfördröjning som beror på de elektriska egenskaperna hos flammen.

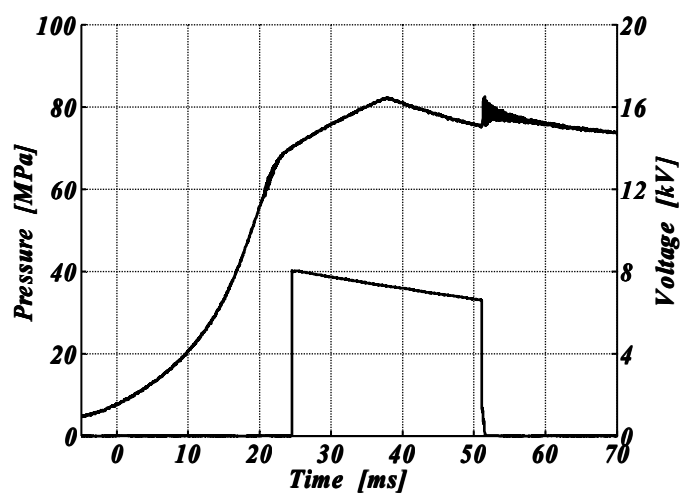
## 5.2 Resultat

I de inledande ETK-experimenten som presenterades i [6] användes ett standard dubbelbaskrut. I dessa experiment uppkom en snabb gasurladdning med en lång slumpmässig fördröjning på 8-90 ms efter det att pulsaggregatets switchar slutits. Figur 7 visar

uppmätt tryck och spänning med en gasurladdning som uppkommit efter det att testkrutet brunnit slut. Urladdningen resulterade i en termisk tryckuppgång som motsvarade den elektriska energin som urladdats i kammaren. Det kunde inte observeras någon

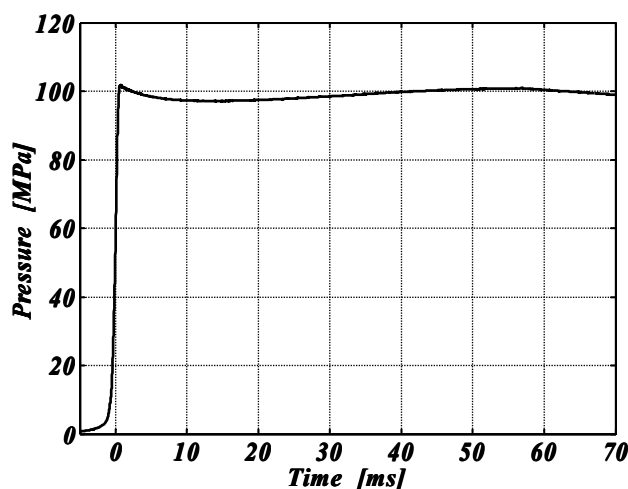
påverkan på förbränningen vid de fåtal tillfällen då urladdningen inträffade medan testkrutet fortfarande brann. Med ledning av resultat från senare experiment samt temokemiska beräkningar har man dragit slutsatsen att de stora fördröjningarna av gasurladdningarna berodde på den låga

initiala ledningsförmågan i flammen. I dessa inledande experiment användes en rörformig testladdning (35 mm i innerdiameter, 20 mm lång och 2 mm tjock) som endast brann från insidan och var ansluten till två ringelektroder i vardera änden. Skillnaden i geometri jämfört med försöksuppställningen i figur 5 påverkar inte de kvalitativa resultaten. I alla övriga experiment som presenteras här, har försöksuppställning enligt figur 5 använts.



Figur 7. Tryck (övre kurvan) och spänning (nedre kurvan) från experiment med odopat krut.

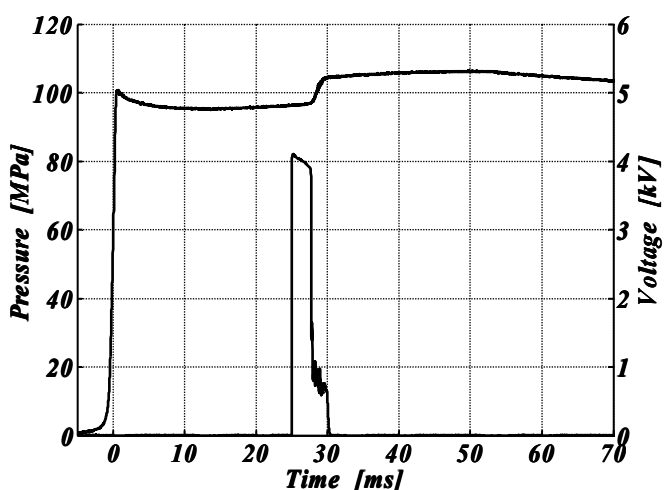
I de experiment där alkalidopat krut använts har de typiska fördröjningstiderna för gasurladdningen istället reducerats till ca 3 ms och med mycket lägre spridning än i de inledande experimenten med odopade krut. Detta visar att den ökade initiala ledningsförmågan i flammans har underlättat den elektriska urladdningen.



Figur 8. Typiska tryckkurvor från experiment utan tillförd elektrisk energi.

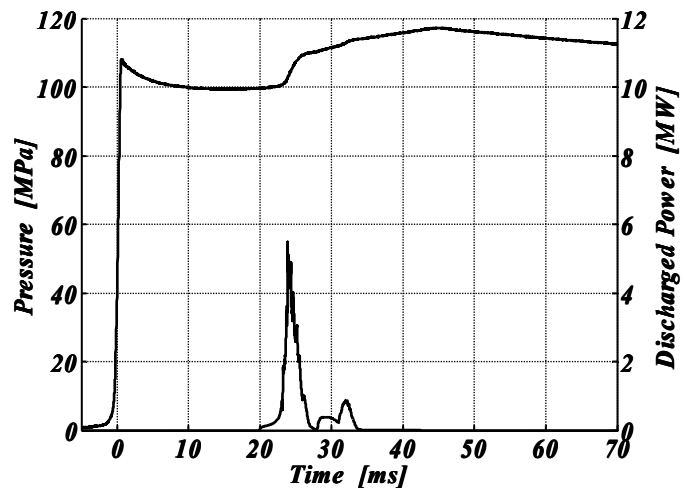
I figur 8 visas en typisk tryckkurva då ingen elektrisk energi tillförts. Den branta tryckökningen vid tiden 0 ms orsakas av förbränning av det finkorniga boosterkrutet och resulterar i ett arbetstryck runt 100 MPa. Testkrutet är då fullständigt övertänt och brinner under ca 56-57 ms. Då testkrutet brunnit slut, uppstår en knyck i tryckkurvan vid tryckmaximum och trycket sjunker sedan stadigt på grund av värmeförluster till inredningen i kammaren. Tryckkurvan har en konstant lutning under den större delen av teskrutets förbränning. I det första skedet efter det att boosterkrutet brunnit upp sjunker dock trycket under 5-10 ms. Detta antas bero på energiförbrukande förbränning av isolerande material i kammaren. Med undantag för detta initiala tryckfall, ges den momentana brinnhastigheten av lutningen på tryckkurvan medan den genomsnittliga brinnhastigheten erhålls ur den totala brinntiden för testladdningen. En brinntid på 50 ms för en 5 mm tjock krutbit ger en genomsnittlig brinnhastighet på runt 100 mm/s. Skillnaden i utseende på tryckkurvorna i figur 7 respektive figur 8 beror på att ett mer långsambriannande boosterkrut och en testladdning med större brinnarea och kortare brinnsträcka användes i de tidigare försöken.

I figur 9 visas tryck- och spänningskurvor för ett experiment där pulsaggregatet switchades med 25 ms fördröjning relativt tryckökningen vid 0 ms, d v s precis mitt i tidsintervallet för testkrutets förbränning. Återigen resulterar urladdningen i en termisk tryckökning som motsvarar mängden elektriskt urladdad energi till kammaren. Ingen påverkan på testkrutets förbränning observeras.



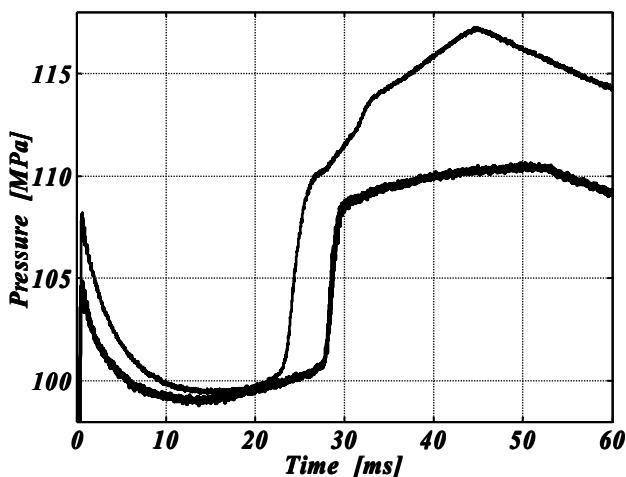
Figur 9. Tryck (övre kurvan) och spänning (nedre kurvan) från försök med alkalidopat krut där elektrisk energi tillförts.

I figur 10 visas uppmätt tryck och elektrisk effekt från ett försök där pulsaggregatets alla fyra moduler använts. De fyra modulerna har switchats efter varandra med en induktans på  $320\mu\text{H}$  med avsikten att göra urladdningen mer utdragen i tiden. Den första modulen laddades till 4 kV och switchades vid 20 ms, medan de övriga tre laddades till 1.5 kV och switchades vid 25, 28 respektive 31 ms. Den elektriska energin tillförs flammen under ca 14 ms med början vid 20 ms. Tryckstegringen uppträdde vid ca 23 ms, återigen efter ca 3 ms fördröjning. Den ökade gasalstringshastigheten kan dock tydligt ses i tryckkurvan både under tillförseln av elektrisk energi men även efter strömpulsen då testkrutet fortfarande brinner. Tryckkurvans lutning är till en början något lägre än i tidigare försök (jfr. figur 9) medan lutningen efter huvudurladdningen, dvs. mellan 34 och 45 ms, är stabil och klart brantare än före urladdningen. Den totala brinntiden på 45 ms är också kortare än i övriga försök.

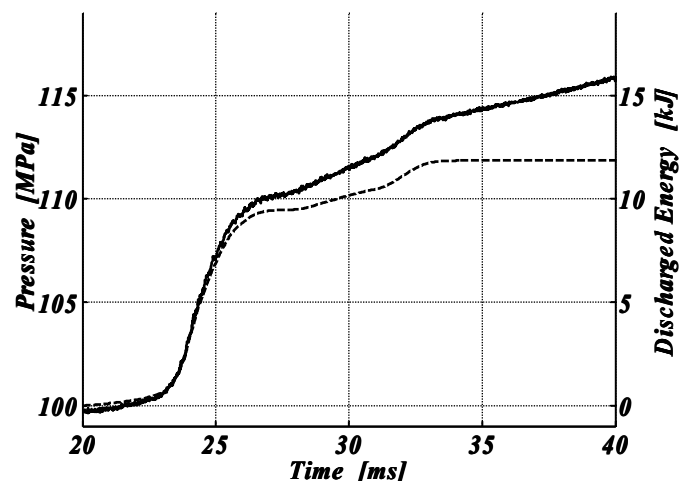


Figur 10. Tryck (övre kurvan) och effekt (nedre kurvan) från försök där 4 moduler i pulsaggregatet använts.

I figur 11 jämförs expanderade tryckkurvor från försök med 1 respektive 4 moduler för den elektriska urladdningen för att tydliggöra skillnaderna i utseende på tryckkurvorna i de bägge fallen. Förbränningen i övre kurvan går fortare efter urladdningen, vilket indikerar en ökning av brinnhastigheten. I figur 12 jämförs tryck och urladdad energi för försöket med 4 moduler. Den elektriska energitillförseln avspeglas direkt i tryckkurvan.



Figur 11. Jämförelse av expanderat tryck från försök med 4 moduler (tunn linje) och försök med 1 modul (kraftig linje).



Figur 12. Tryck (heldragen) och urladdad energi (streckad) i försök med 4 moduler.

## 6 Slutsatser

Genom att dopa krutet med alkaliföreningar påverkas den initiala elektriska ledningsförmågan i flamman som i sin tur starkt påverkar den tid som behövs för att etablera den elektriska urladdningen och den spänning som då krävs. Resultaten indikerar att då pulsaggregatet laddas till en lägre spänning blir urladdningsfasen långsammare och mera kontrollerad. Det har visat sig vara givande att förlänga strömpulsen genom att använda högre induktans i kretsen samt switcha in de olika modulerna med tidsfördröjningar relativt varandra.

Det mest intressanta resultatet är den ökade brinnhastigheten som kan avläsas ur tryckmätningarna i anslutning till den elektriska urladdningen. Detta indikerar att det faktiskt kan vara möjligt att kontrollera brinnhastigheten under hela den innerballistiska cykeln genom att leda en ström genom flamzonen. Viktiga faktorer att ta hänsyn till under arbetet med detta ETK-koncept är graden av homogenitet vid inblandningen av  $\text{KNO}_3$  i krutmatrisen samt amplitud och form på den elektriska pulsen.

Det fortsatta ETK-arbetet bör inriktas mot;

- fortsatt arbete med pulsformning för att förlänga urladdningstiden och öka kontrollerbarheten i förloppet
- jämnare inblandning av  $\text{KNO}_3$  i krutmatrisen för att optimera den initiala ledningsförmågan i flamman.
- ökning av oktogenhalten i GAP/HMX-kruten för att få ett krut med hög prestanda och ledningsförmåga i flamman samt låg medelmolekylvikt
- att studera krutets optiska egenskaper för att kunna optimera värmetransporten in i krutmatrisen
- arbete med progressiva krut i kombination med ETK för att minska behovet av elektrisk energi



## 7 Referenser

- [1] S.E. Nyholm, "Elektrotermisk-kemisk utskjutning. En översikt samt preliminär bedömning av prestanda och realiserbarhet", FOA-R—99-01355-310—SE , 1-22.
- [2] K. Andersson och A. Berg, "Nu laddar man om – nya trender inom elrörsvapenteknologin", *Militärteknisk Tidskrift* 4 (1995) 19.
- [3] 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.
- [4] 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 36<sup>th</sup> Combustion Subcom. Meeting* (1999) 119-131.
- [5] 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
- [6] S. Andreasson and M.U. Carlsson, "Results from Initial ETC Closed Vessel Experiments", *IEEE Trans. Magn.* 35 (1999) 181-184.
- [7] 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.
- [8] S.Andreasson & S.E. Nyholm, " Alkalidopat krut för ETK: försök i sluten bomb", FOA-R—00-01691-310—SE(2000) 1-24.
- [9] A. Kay et al, "20 millimetre ETC Gun Experiments at ISL, Proc. European Forum on Ballistics of Projectiles, Saint-Louis, France 2000.
- [10] S. Johansson, "Pulsed Power in Weapon Applications", *Militärteknisk tidskrift*, årg. 67, nr 3, 1999
- [11] 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.
- [12] S.L. Howard, "Impact of Partial Heating of Solid Propellant as Elucidated by Simulation of Microwave Heating", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 26 (2001) 130-136.
- [13] 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.
- [14] E.W. Price and R.K. Sigman, "Combustion of Aluminized Solid Propellants", *CPIA Publ. 691 JANNAF 36<sup>th</sup> Combustion Subcom. Meeting* (1999) 227-248.
- [15] K. Gruber, K. Kappen, A. Voronov and H. Haak, "Radiation Absorption of Propellant Gas", *IEEE Trans. Magn.* 37 (2001) 161-164.
- [16] A. Koleczko, W. Ehrhardt, S. Kelzenberg and N. Eisenreich, "Plasma Ignition and Combustion", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 26 (2001) 75-83.
- [17] S.-E. Flygar, "INCEC93, input generator for the CEC93 thermochemical equilibrium code", FOA report C20973-2.1, Stockholm, Sweden, April 1994
- [18] S. Gordon and B. J. McBride, "Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks, and Chapman-Jouget detonations", NASA report SP-273, Washington, 1971.
- [19] ICT Thermodynamic Database, version 1.0. Fraunhofer – Institut für Chemische Technologie, Fourth update, 1998
- [20] R. J. Rosa, McGraw-Hill, "Magnetohydrodynamic energy conversion", New York, 1968.
- [21] 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.
- [22] C. Eldsäter, N. Wingborg and R. Sandén, "Energetic Binders for High Performance Propellants", FOA-R—00-01610-310—SE , 1-24.

- [23] 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.
- [24] K.Kupzik, H. Niggemeyer, T. Barski,“The EMBLA-test-method for the determination of burning rate of gun propellants”, 30<sup>th</sup> Intern. Annual Conference of ICT (1999) p 25-1.
- [25] M. Skoglund, “Mätteknik och säkerhetssystem för TZN 300 kJ pulsaggregat”, FOA-R—00-01604-310—SE (2000) 1-19.