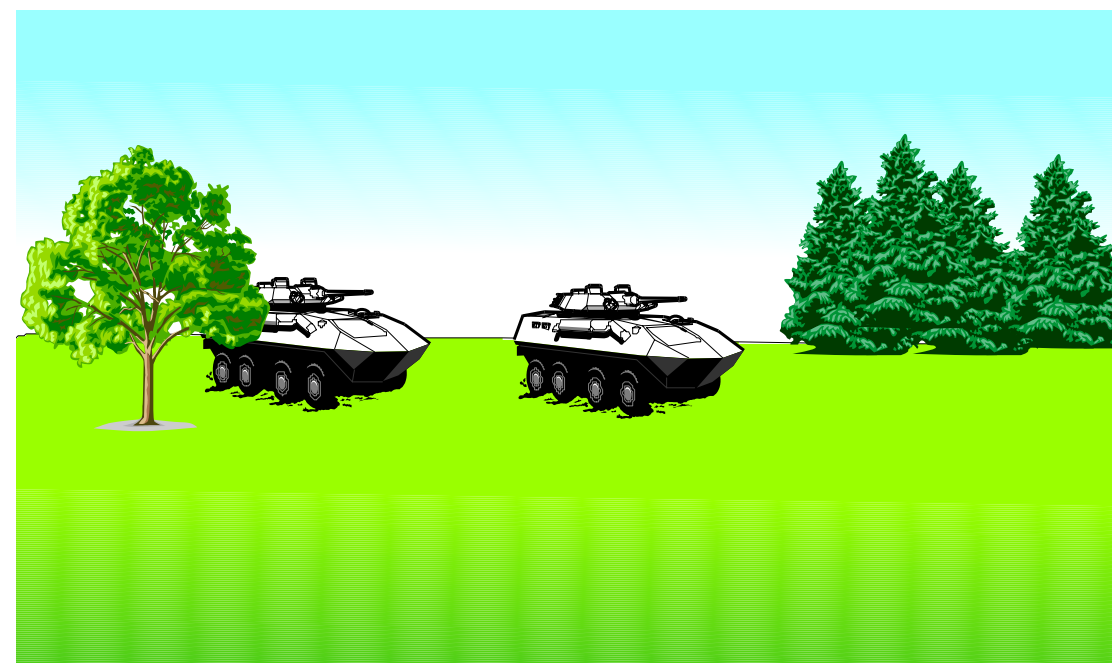


ELISABETH BEMM, STEN ANDREASSON,
MOSE AKYUZ, TOMAS HURTIG, ÅKE PETTERSSON



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Elisabeth Bemm, Sten Andreasson, Mose Akyuz, Tomas Hurtig, Åke Pettersson

Slutrapport - Utskjutningsteknik och ballistik

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2130--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år December 2006	Projektnummer E2005
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Elisabeth Bemm Sten Andreasson Mose Akyuz Tomas Hurtig Åke Pettersson	Projektledare Elisabeth Bemm	
	Godkänd av Helena Bergman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Slutrapport - Utskjutningsteknik och ballistik		
Sammanfattning I rapporten redovisas det arbete som bedrivits inom projektet Utskjutningsteknik och ballistik under åren 2004-2006. Forskningen har berört främst studier av elektrotermisk-kemisk utskjutning (ETK) med inriktning mot stimulering av krutförbränning genom CF-konceptet och elektrotermisk initiering (ETI). Studierna av CF-konceptet har avslutats och en experimentuppställning för att studera ETI håller på att byggas upp. En plasmagenerator har konstruerats för att kunna studera olika parametrars inverkan på plasmainitieringsförloppet och därmed kunna optimera tekniken. En datormodell av plasmageneratoren och initieringsförloppet har byggts upp som ett hjälpmedel för att ge lämpliga ingångsparametrar till ETI-experimenten. Även en innerballistisk modul kopplat till den FOI-utvecklade koden Grale2d har skapats för att användas vid optimering av eldrörsvapen och dess ammunition, haveriutredningar, mm. Viss forskning har även bedrivits kring utveckling av LOVA-krut baserade på det lågkänsliga explosivämnet FOX-7 samt utveckling av snabb-brinnande krut för att användas till t ex medföljande laddning eller progressiva krut.		
Nyckelord Utskjutning, ETK, ETI, plasmagenerator, innerballistik, FOX-7		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 40 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--2130--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year December 2006	Project no. E2005
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Elisabeth Bemm Sten Andreasson Mose Akyuz Tomas Hurtig Åke Pettersson	Project manager Elisabeth Bemm	
	Approved by Helena Bergman	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Final report - Launching and ballistics		
Abstract Results from the research performed within the project Launching and Ballistics during 2004-2006 are presented in this report. The research has mainly been aimed at ETC-studies concerning burning stimulation by the CF-concept and electrothermal initiation (ETI). Some final experiments concerning the CF-concept have been performed in parallel with preparations for ETI-experiments. A plasma generator has been constructed in order to study the impact of different parameters on the initiation process and thereby being able to optimize the technique. A computer model of the plasma generator and the initiation process have been formulated to give suitable input parameters for the ETI-experiments. An interior ballistics module coupled to the code Gracle2d developed at FOI has been made to be used for optimisation of gun systems and its ammunition. Some research has also been performed concerning development of LOVA-propellants based on the energetic material FOX-7 as well as development of VHBR-propellants (Very High Burning Rate) to be used in e. g. progressively burning propellants or travelling charges.		
Keywords Launching, ETC, ETI, plasma generator, interior ballistics, FOX-7		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 40 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	Inledning	5
2	ETK-forskning	6
2.1	Elektrotermisk initiering	7
2.1.1	Konstruktion av plasmagenerator vid FOI	8
2.1.2	Test av plasmagenerator	9
2.1.3	Modellering av plasmagenerator	11
2.2	CF-experiment	12
2.2.1	CF-konceptet	12
2.2.2	Försöksuppställning för CF-experiment	13
2.2.3	Resultat från CF-experiment	14
2.3	Ledande folier för krutinitiering	19
3	Innerballistik	20
3.1	Innerballistisk simulering i Grale2d	20
4	Forskning kring kanonkrut	22
4.1	Karaktärisering av FOX-7	23
4.1.1	Partikelstorlekens betydelse för brinnhastigheten	23
4.1.2	Brinnhastighetens temperaturberoende	24
4.2	Kanonkrutsformuleringar baserade på FOX-7	27
4.3	Framställning av snabb-brinnande krut	28
5	Slutsatser	30
6	Fortsatt arbete inom området utskjutningsteknik	32
7	Utvecklingstendenser inom området utskjutning	32
8	Referenser	36

1 Inledning

Syftet för projektet Utskjutningsteknik och ballistik har varit att utveckla och söka information om ny teknik som kan ge prestandaförbättringar i befintliga och framtida eldrörsvapensystem.

Många tekniska förbättringar har skett av och är under utveckling för konventionella eldrörsvapensystem och dess utrustning. Det pågår även forskning kring helt nya utskjutningstekniker. Den forskning som pågår kring nya utskjutningstekniker runt om i världen [1]-[4] är idag främst fokuserad på utveckling av rent elektromagnetisk (EM) utskjutning och till en något mindre del elektrotermisk kemisk utskjutningsteknik (ETK).

För EM-utskjutningsteknikerna är det i första hand rälskanoner som är aktuella men en viss forskningsverksamhet sker även inom utveckling av spolkanoner. Eftersom EM-utskjutningsteknikerna kräver mycket elektrisk energi är i dagsläget enheterna för kraftförsörjningen mycket utrymmeskrävande och implementering främst aktuell på stora stridsfartyg [6]. Intensiv forskning pågår dock parallellt med att ta fram kompaktare energilagringssystem.

ETK är en benämning för tekniker där elektrisk energi utnyttjas i kombination med kemisk energi från krutförbränning för att åstadkomma

- elektrotermisk initiering (ETI),
- stimulering av krutförbränning och
- kompensation för brinnhastighetens temperaturberoende

i eldrörsvapen [5]. ETK-teknikerna kräver inte lika mycket elektrisk energi som EM-utskjutningsteknikerna och avsikten är att konvertera befintliga eldrörsvapen för ETK-användning.

Forskning kring ETK har bedrivits vid FOI under ett antal år. Dessa forskningsinsatser har främst varit inriktade mot stimulering av krutförbränning genom ett ETK-koncept kallat ”ledande flamma” (CF, Conducting Flame) [7]-[14]. ETK-forskningen vid FOI har dock under 2005-2006 ominriktats mot ETI som börjar närma sig implementering i färdiga vapensystem och därmed förväntas ge färdiga tillämpningar i närtid. Parallellt med förberedelsearbetet för ETI-experiment [15] har ett antal avslutande CF-experiment utförts.

Stora forskningsinsatser koncentreras runt om i världen på att framställa lågkänsliga kanonkrutsformuleringar (LOVA-krut) [16], [17]-[19]. LOVA-krut skall kunna motstå stimuli som orsakar tändning av konventionella kanonkrut och vara svåra att initiera enbart genom värmeledning. ETI anses därför vara en möjlig teknik för att tända dessa krut. Tekniken ger också möjlighet till säker tändning av krutladdningar med hög laddningsdensitet, vilket inte är möjligt med konventionella initieringsmetoder. Den främsta fördelen med ETI jämfört med konventionella

initieringsmetoder är annars att den ger betydligt snabbare övertändning av krutladdningen och en högre repeterbarhet i tändningsprocessen från skott till skott, vilket innebär minskad spridning i mynningshastighet och därmed ökad träffsannolikhet.

Det vanligaste energetiska fyllmedlet i LOVA-krut är RDX. Vid FOI har det mycket lågkänsligt explosivämnet FOX-7 framställts som en tänkbar kandidat för LOVA-krutsframställning. Vid FOI har ett antal kanonkrutsformuleringar framställts och brinnegenskaperna för FOX-7 har studerats. Detta arbete redovisas i denna rapport.

Arbete pågår för närvarande på FOI med att bygga upp en experimentuppställning för att studera olika parametrars inverkan på plasmainitieringsförloppet [15]. En plasmagenerator har konstruerats och testats samt en datormodell av plasmageneratoren och initieringsförloppet har byggts upp. Datormodellen är ett hjälpmedel för att ge lämpliga ingångsparametrar till plasmainitieringsexperimenten. I denna rapport ges en sammanfattning av den forskning kring utskjutningstekniker och innerballistik som genomförts vid FOI under åren 2004-2006.

2 ETK-forskning

Gemensamt för de olika ETK-tillämpningarna är att ett plasma skapas genom en elektrisk urladdning i en plasmagenerator som antänder krutladdningen. Den vanligaste plasmainitieringsmetoden är plasmainjektion (PI), där plasmageneratoren är monterad i bakstycket och plasmat strömmar in axiellt mot krutbädden. Fram till slutet av 90-talet användes plasmageneratorer med en högenergetisk plasmajet (PJ) med avsikten att åstadkomma en ökning i mynningsenergi på upp till 30-40 % [20]-[22]. Eftersom dessa kräver mycket elektrisk energi och därmed utrymmeskrävande energilagringssystem, har de alltmer övergetts till förmån för PJ med lägre energi. Dessa PJ kan fortfarande ge de klassiska fördelarna med ETK som

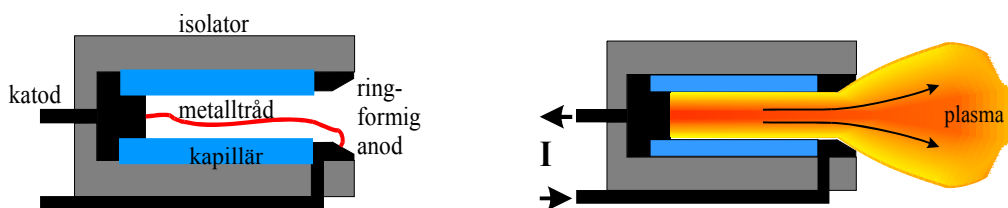
- snabbare övertändning av krutet,
- bättre repeterbarhet i tändningsprocessen,
- kompensation för krutförbränningens temperaturberoende,
- tändning av krutladdningar med hög laddningsdensitet och
- möjlig metod för tändning av LOVA-krut

men ger inte några stora ökningsenergi. Forskningen kring ETK är därför idag främst inriktad mot ETI.

2.1 Elektrotermisk initiering

Vid ETI skapas ett plasma genom en elektrisk urladdning i en plasmagenerator. Plasmaget har en temperatur på mellan 10 000 och 30 000 K och består av små och snabba partiklar som effektivt tar sig in i krutbädden. Det skapas vanligtvis genom plasmainjektion (PI) men även ströminjektion (CI, current injection) är möjligt [5], [23]. Vid PI är plasmageneratoren monterad i bakstycket och plasmaget strömmar in axiellt mot krutbädden (se figur 1). Vid CI genereras plasmaget direkt i laddningsrummet och strömmar istället radiellt mot krutet. Dessa två olika typer av plasmageneratorer benämns därför ofta som axiella respektive radiella plasmageneratorer.

Den axiella plasmageneratoren (se figur 1) består av ett yttre hölje i ett isolerande material med metallektroder placerade i ändarna. Den främre elektroden är ringformad för att plasmaget skall kunna strömma ut mot laddningsrummet. En tunn metalltråd ansluts mellan de båda elektroderna för att sluta strömkretsen. När ström leds genom metalltråden förångas den och ett plasma av metallånga bildas [24]. Insidan av plasmageneratoren är vanligtvis täckt av ett inert plastmaterial som t ex polyeten (Lexan). Detta plaströr brukar benämnas kapillär varför denna typ av plasmagenerator ofta kallas för kapillär plasmagenerator (CPG, capillary plasma generator). Det heta plasmaget orsakar erosion och förångning av kapillären som därmed bidrar till att mer material skapas till plasmaget. Den stora tryckgradienten mellan plasmageneratoren och laddningsrummet driver plasmaget mot krutet som antänds. Fortsatt strömmatning genom plasmaget ger bibehållen förångning av kapillärmaterial och fortsatt plasmabildning, vilket leder till att den elektriska urladdningen kan bibehållas längre. Utveckling och användning av både axiella och radiella plasmageneratorer förekommer. CPG är dock den mest använda varianten av plasmagenerator.



Figur 1. Funktion och uppbyggnad av en axiell plasmagenerator.

För att kunna optimera plasmageneratorns funktion och minimera energiåtgången, är det viktigt att öka förståelsen för de processer som sker då plasmaget växelverkar med krutet. Vid ETI sker en snabbare tryckstegring och kortare fördröjning än vid konventionell initiering [25]-[26]. I vissa fall har också en stimulering av krutförbränningen kunnat observeras under plasmapulsen som sedan upphör då plasmaget försvinner [27]-[28]. För närvarande finns det fyra huvudteorier för vilka

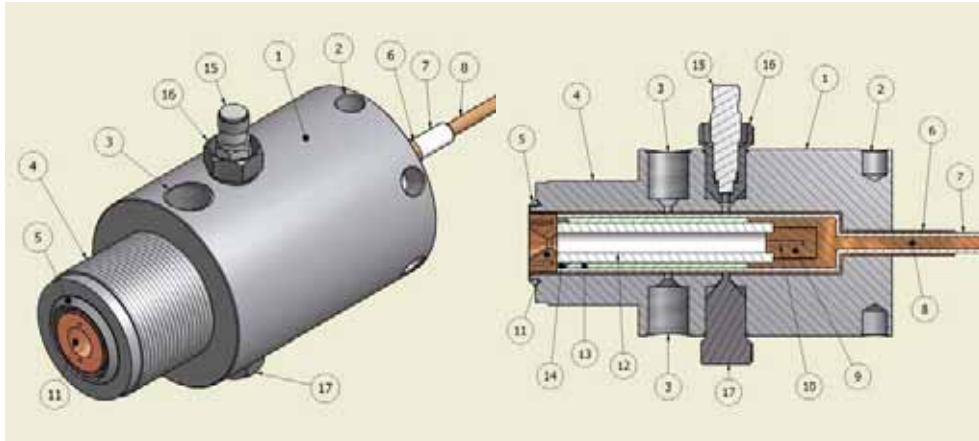
processer som styr växelverkan mellan plasmat och krutet (PPI, Plasma Propellant Interaction) vid plasmainitieringsförloppet:

1. Värmestrålning från plasmat absorberas av krutet. Uppvärmning sker då långt in i krutet och brinnhastigheten ökar [29].
2. Genom mekanisk påverkan orsakar plasmat sprickbildningar och andra förändringar av krutet som resulterar i en ökad brinnyta och därmed ökad gasgenereringshastighet [33].
3. Partiklarna i plasmat orsakar kemiska förändringar i krutytan som påverkar brinnförloppet.
4. Kondensation av metallånga på krutytorna [30]-[32].

Mycket av forskningen kring ETI är därför koncentrerad på att öka förståelsen för energiöverföringsprocessen från plasmat till krutet.

2.1.1 Konstruktion av plasmagenerator vid FOI

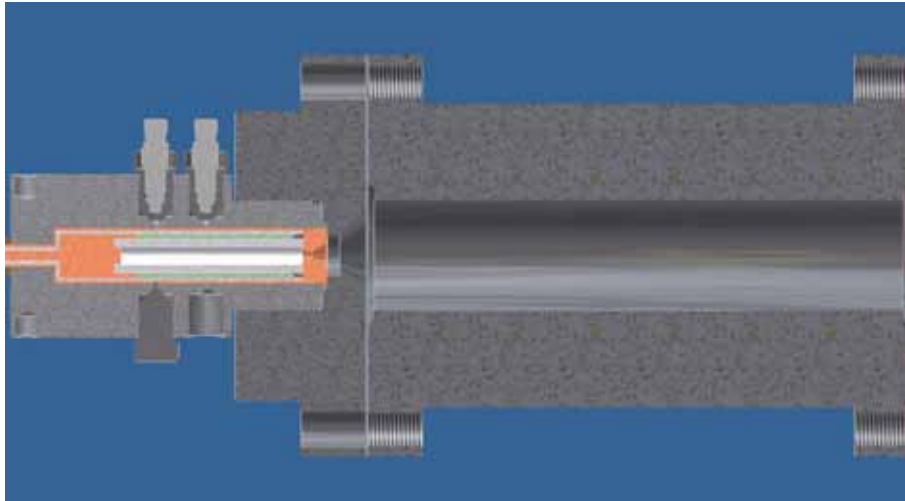
En försöksanordning med en axiell kapillär plasmagenerator för att utföra ETI-experiment i en sluten bomb har tagits fram vid FOI under 2006 [15]. Avsikten har varit att konstruera en plasmagenerator som är lämplig att användas i experiment där plasmageneratorns funktion samt växelverkan mellan plasmat och krutförbränningen studeras. Plasmageneratorn har därför utrustats med flera diagnosticeringsingångar för att samtidigt kunna mäta tryck och olika optiska signaler. Speciell hänsyn har tagits för att spänningen över själva plasmat skall kunna mätas så noggrant som möjligt. Den har också utformats med tanke på att underlätta modellering av plasmageneratorn och plasmainitieringsförloppet. Det är enkelt att ersätta delar som förbrukas vid experimenten som kapillärrör och metalltråd och därmed också enkelt att byta material och dimensioner för dessa komponenter. Kapillärens längd kan exempelvis varieras mellan 14 och 90 mm. Plasmageneratorns konstruktion är i detalj beskriven i referens [15]. En bild av plasmageneratorn från utsidan och i genomskärning med de olika delarnas benämning, visas i figur 2.



Figur 2. Plasmagenerator för forskningsändamål. 1) hölje, 2) nyckelgrepp för montering, 3) öppning för tryckgivare etc, 4) gänga för infästning i bomb, 5) deltarung för tätning mot bomb, 6) kopparhylsa för elektrisk anslutning av pulsaggregat till elektrod i öppna änden, 7) hylsa för isolering mellan elektroderna, 8) anslutning för pulsaggregat till elektrod i slutna änden, 9) elektrod i slutna änden, 10) hål för infästning av tråd, 11) elektrod i öppna änden, 12) kapillärrör, 13) distansrör med tätningsfunktion, 14) tätningsring, 15) tryckgivare, 16) hållare för tryckgivare, 17) blindplugg för stängning av oanvända öppningar.

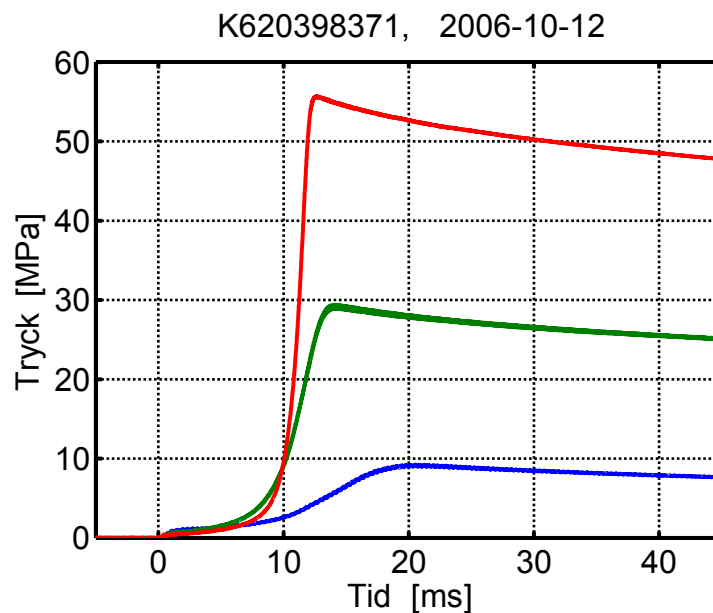
2.1.2 Test av plasmagenerator

För att säkerställa god funktion behöver den ny tillverkade plasmageneratoren provas med avseende på hållfasthet och täthet gentemot belastning av inre övertryck. Provningsen utförs på sådant sätt att krut som initieras med konventionell slagtändare, bränns i den slutna bomben med plasmageneratoren monterad (se figur 3). Gaserna strömmar in i plasmageneratoren varvid trycket belastar tätningssystemet och infästningen i bomben på väsentligen samma sätt som vid normal körning av plasmageneratoren. Trycket, som mäts i bombens kammare, kan för detta ändamål betraktas som identiskt med trycket i plasmageneratoren. Proven genomförs i en serie provbränningar med successivt ökande tryck. Efter varje provbränning demonteras plasmageneratoren och undersöks med avseende på läckor och andra skador.



Figur 3. *Plasmagenerator till vänster monterad i bomb. Slagtändare och bombens tryckgivare är ej utritade. Krutladdningen placeras i en tygpåse mitt i bombens kammare.*

I figur 4 visas tryckkurvor från prov vid ca 10, 30 och 55 MPa. Av tryckkurvorna att döma föreligger inga läckage, vilket även efterföljande inspektion bekräftade. Ett kontaktband för elektrisk kontakt mellan dysan och kopparhylsan brändes dock sönder av de heta krutgaserna. Kontaktbandet måste bytas mot en värmetåligare typ alternativt skyddas bättre mot krutgaserna. Det återstår att göra prov vid 100 och 150 MPa.



Figur 4. *Tryckkurvor från tryckprovning av plasmagenerator.*

Tryckgivarna för mätning av trycket i plasmageneratorns kapillär måste isoleras elektriskt från urladdningen genom plasmata. Vid normal tryckmätning går en kanal mellan tryckgivaren och den volym där trycket ska mätas. Den elektriska isoleringen erhålls här genom att ett skikt av rörväggen behålls så att kanalen inte går hela vägen fram till kapillären. Eftersom trycket nu kommer att mätas genom en del av rörväggen så måste givarna kalibreras på plats. Denna kalibrering går till på samma sätt som tryckprovningen: krut, som initieras med konventionell slagtändare, bränns i den slutna bomben med plasmageneratorn monterad. Nu mäts trycket samtidigt med tryckgivare i bomben och tryckgivare i plasmageneratorn. Genom att sedan jämföra trycknivåerna, kan kapillärväggens inverkan bestämmas.

2.1.3 Modellering av plasmagenerator

Vid FOI pågår arbete med att skapa en modell för simulering av plasmageneratorn och plasmainitieringsförloppet. Denna datormodell är nödvändig för att ge lämpliga startparametrar för ETI-experimenten men kan också användas som ett hjälpmedel vid optimering och studier av plasmageneratorns funktion. Modellen är uppbyggd av ett antal beräkningsmoduler för

- strömkälla (pulsaggregat),
- elektriskt exploderande trådar,
- strömning av plasma i kapillären,
- tillståndsekvation för plasmata och
- innerballistik

och finns detaljerat beskriven i exempelvis referenserna [14]-[15]. Strömningsmodellen och plasmata tillståndsekvationer tillsammans med modeller av pulsaggregat och exploderande tråd, utgör en komplett modell av en plasmagenerator. Innerballistikmodulen [34]-[35] utgörs av ett fristående beräkningsprogram som baseras på den FOI-utvecklade koden GRALE (GRindsjön Arbitrary Lagrangian-Eulerian) och är tänkt att kopplas ihop med plasmageneratormodellen i ett senare skede. Det kommer då att ges möjligheter att modellera även initiering och övertändning av krutladdningen i kammaren samt den fortsatta tryckutvecklingen i eldröret vid användning av ETI.

Fenomenet att en metalltråd elektriskt exploderar då den utsätts för en strömpuls är väl beskrivet i litteraturen. Detaljerade teoretiska modeller för totalurladdning genom det förångade materialet och hur själva explosionsfasen sker saknas dock. De flesta modeller som finns i litteraturen är mer eller mindre empiriska och bygger på kurvanpassning till experimentella data. Den modell som använts vid FOI är framtagen av Tucker [36] och grundas på en enkel fysikalisk modell samt på trådparametrar som är relativt enkla att bestämma experimentellt.

Underlaget till den strömningsmodell och den fysikaliska beskrivningen av plasmata inuti generatoren som används, är i huvudsak hämtade ur en rapport av Powell och Zielinski [37]. En begränsning för denna modell är att den endast behandlar kapillärer av polyeten. Strömningsmodulen kommer därför att kopplas ihop med termokemiprogrammet "Chemical Equilibrium with Applications" (CEA) [38] för att möjliggöra modellering av plasmageneratorer med kapillärer av många olika material.

Tillståndsekvationer ger det matematiska förhållandet mellan olika tillståndsfunktioner som tryck, volym och temperatur i plasmata. Dessa används för att beskriva tillståndet för gasen inuti plasmageneratoren. Förhållandet mellan olika partiklar i plasmata kan då bestämmas liksom jonisationsgraden. Plasmata strömning beskrivs av Eulers fluidekvationer kompletterade med källtermer som representerar ablaterat kapillärmaterial och tillförsel av elektrisk energi.

För att verifiera den implementerade modellen för exploderande trådar har simuleringar av en exploderande guldtråd genomförts [15]. Som referensfall för att verifiera strömningsmodulen har problemet Sods stötrör använts [15], [39].

2.2 CF-experiment

Vid plasmainitiering strävar man efter att generera ett plasma med låg medelatomvikt som lätt kan tränga in i krutkornens perforeringar och ge en snabb initiering med hög repeterbarhet. Det är dock även möjligt att stimulera krutförbränningen efter det att tändningen har skett genom att tillföra mera elektrisk energi till plasmata. Plasmata måste då kontinuerligt tillföras elektrisk energi för att bibehålla strömbanan och hela volymen av krutgaser måste värmas upp, vilket kräver mycket elektrisk energi. Vid CF-konceptet krävs endast en lokal uppvärmning av krutflamman nära det brinnande krutet, vilket ger en mera energieffektiv stimulans av krutförbränningen. Avsikten med de CF-experiment som utförts vid FOI har inledningsvis varit att åstadkomma stimulering av krutförbränningen i en sluten bomb där en elektrisk ström leds genom området kring krutflamman. Målsättningen har också varit att, i ett betydligt senare skede, kunna påverka tryckförloppet i en kanon på ett sådant sätt att en högre mynningsenergi kan erhållas. Avsikten med CF-konceptet är alltså att stimulera krutförbränningen och inte att användas för upptändning av krutet.

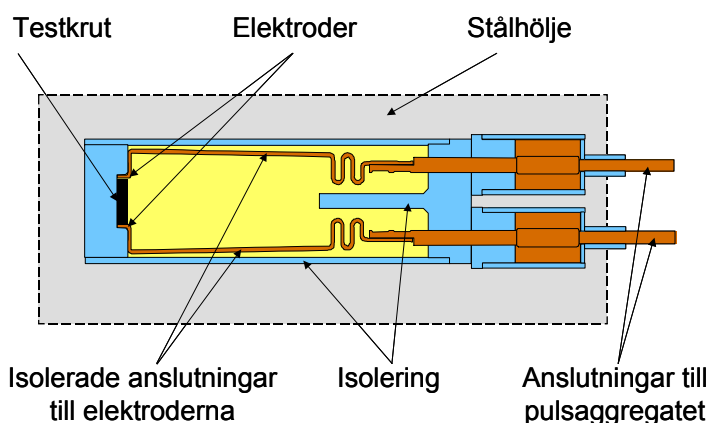
2.2.1 CF-konceptet

Vid CF-konceptet leds en elektrisk ström genom krutflamman efter det att krutförbränningen startats. Krutflamman antas då värmas upp genom resistiv uppvärmning och en förstärkning av värmeåterkopplingen från flamman till krutet antas leda till en ökad brinnhastighet. Avsikten är att tillföra den elektriska energin vid väl valda tillfällen under det innerballistiska förloppet så att tryckkurvan i eldröret påverkas på ett sådant sätt att en högre mynningsenergi kan erhållas. För att leda

ström genom flaman krävs att den har en förhöjd elektrisk ledningsförmåga jämfört med vad som erhålls vid förbränning av konventionella krut. Den förhöjda elektriska ledningsförmågan i flaman åstadkoms genom att dopa de krut som används med lättjoniserade alkalitillsatser (i de flesta fall 5 % kaliumnitrat). En mer utförlig beskrivning av CF-konceptet går exempelvis att finna i referenserna [8]-[10].

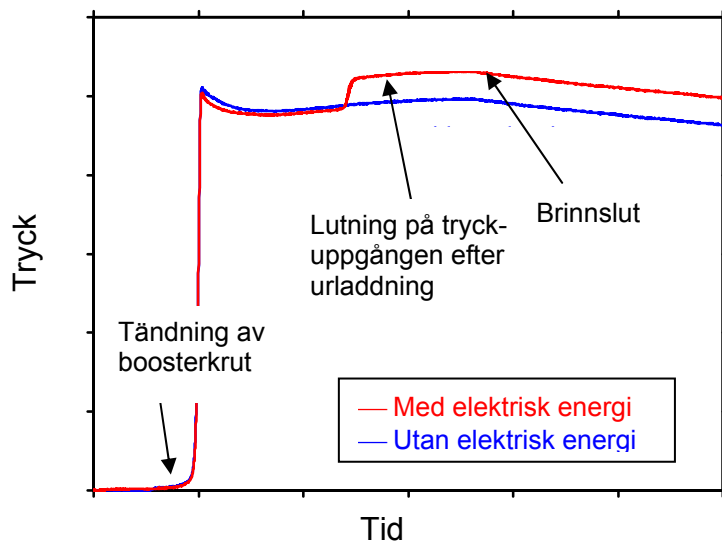
2.2.2 Försöksuppställning för CF-experiment

CF-experimenten har utförts i en sluten bomb (se figur 5). För att skapa ett lämpligt arbetstryck i kammaren antänds först en bestämd mängd snabb-brinnande boosterkrut. Testkrutbiten sitter fastklämd mellan två metallektroder som är anslutna till ett fyra modulers pulsaggregat. Krutet brinner därmed från en sida till den andra och brinnarean är konstant under hela förbränningsförloppet. Trycket i kammaren registreras kontinuerligt under hela brinnförloppet men eftersom den momentana brinnsträcken inte går att mäta går det heller inte att få uppgifter om hur brinnhastigheten varierar under förloppet.



Figur 5. Försöksuppställning för CF-experiment.

Genom att den totala brinnsträcken är känd kan däremot en medelbrinnhastighet bestämmas genom att det går att avläsa ett tydligt brinnslut ur tryckkurvan (se figur 6). Genom att jämföra tidpunkt för brinnslut samt lutningen på tryckuppgången (se figur 6) efter tillförsel av elektrisk energi för olika urladdningsparametrar eller krutsorter går det att dra slutsatser om den elektriska urladdningen har resulterat i stimulering av krutets brinnhastighet eller inte. Värdet på den tillförda elektriska energin erhålls från uppmätta värden på ström och spänning. En mera utförlig beskrivning av försöksuppställningen för CF-experimenten går att finna i exempelvis referenserna [8]-[10].



Figur 6. Tryckkurvor från CF-experiment.

2.2.3 Resultat från CF-experiment

Ett stort antal CF-experiment har utförts med varierande mängd tillförd elektrisk energi samt varierande krutsammansättning (se tabell 1). I figur 7 visas en sammanställning av medelbrinnhastigheten för testkrutet som funktion av medeltrycket i kammaren vid ett antal försök där ett dubbelbaskrut dopat med 5 % kaliumnitrat använts som testkrut.

Medelbrinnhastigheten i de flesta av de redovisade försöken i figur 7 ligger samlade längs linjen $r = a + b \cdot p$. Linjen motsvarar ett typiskt tryckberoende för krutets brinnhastighet (enligt Muraour-Aunis brinnekvation [41]) och är anpassad till aktuella mätdata samt brinnhastigheten 5 mm/s vid trycket 0.1 MPa (normalt atmosfärstryck). I dessa fall har den tillförda elektriska energin endast resulterat i en ökning av medelbrinnhastighet på grund av den elektrotermiska tryckökningen. Två prov (53 och 71) uppvisar dock medelbrinnhastigheter som ligger klart högre än den kring linjen. Dessa prov uppvisar också en brantare lutning på tryckkurvan efter tillförseln av den elektriska energin än övriga prov (se figur 8), vilket innebär att en stimulering av krutförbränningen har skett. Det är dock ännu inte helt klarlagt exakt under vilka förutsättningar och vilka mekanismer som ger denna ökade brinnhastighet. Det är också tre prov (41, 44 och 52) som ligger klart under den streckade linjen. I prov 44 har krutbiten med all säkerhet lossnat och den elektriska urladdningen har skett först efter att krutet brunnit slut. För proven 41 och 52 saknas det dock en rimlig förklaring till de låga medelbrinnhastigheterna.

Tabell 1. Sammanställning av krutsort, brinntid, uppmätt urladdad elektrisk energi, laddningsspänning och induktans för olika prov. Nzk5230 och Nk1287 är två olika dubbelbaskrut. GAP/HMX/Al är ett kompositkrut baserat på den energetiska polymeren glycidylazidpolymer (26 %) och oktogen som energetiskt fyllmedel (61 %). Aluminium (4 %) är tillsatt för att öka flammans ledningsförmåga. Beteckningen transp. betyder att inget kol är tillsatt och krutet därmed är transparent. I samtliga kruten är 5 % KNO₃ tillsatt.

Prov nr	Typ av testkrut	Brinntid [ms]	Elektrisk energi [kJ]	Spänning [kV]	Induktans [μH]
41	Nzk5230	57,1	-	-	-
42	Nzk5230	52,3	-	-	-
43	Nzk5230	51,3	9,1	4	172
44	Nzk5230	26,7	7,35	4	172
45	Nzk5230	52,4	8,0	4	172
46	Nzk5230	50,5	15,7	4 och 4	172
52	Nzk5230	53,3	16,5	4, 3, 2 och 1	320
53	Nzk5230	44,7	11,9	4, 1,5, 1,5 och 1,5	320
68	Nzk5230	49,2	13,8	4, 1,5, 1,5 och 2,5	320
71	Nzk5230	44,3	20,3	5, 2, 2 och 2	320
72	Nzk5230	45,6	-	-	-
73	GAP/HMX/Al	58,1	-	-	-
74	GAP/HMX/Al	58,2	7,7	5, 1,5 och 1,5	320
75	Nzk5230/transp.	26,5	14,2	5, 1,5 och 1,5	320
76	Nzk5230/transp.	22,4	-	-	-
77	Nzk5230/transp.	33,9	14,9	5, 1,5 och 1,5	320
78	Nzk5230/transp.	45,8	-	-	-
79	Nzk5230/transp.	43,3	15,4	5, 1,5 och 1,5	320
80	Nk1287	43,3	-	-	-
81	Nk1287	41,1	15,0	5, 1,5 och 1,5	320
82	Nk1287/transp.	31,5	15,8	5, 1,5 och 1,5	320

Vid plasmainitiering är det växelverkan mellan plasmat och krutet som leder till de positiva effekterna för tändningsprocessen. Det har visat sig att dessa fenomen blir mera uttalade eller i vissa fall endast uppträder då kruten är transparenta inom värmestrålningens våglängdsområde 400-1200 nm. Vid CF-experimenten används ingen plasmagenerator för att skapa ett plasma som kan växelverka med krutet. Det är ändå tänkbart att liknande processer som sker vid växelverkan mellan plasma och krut även kan ske vid de elektriska urladdningarna i den heta flammen i CF-experimenten. Ett antal experiment har därför gjorts där skillnaden i resultat vid CF-experiment jämförts då transparenta och opaka krut använts.

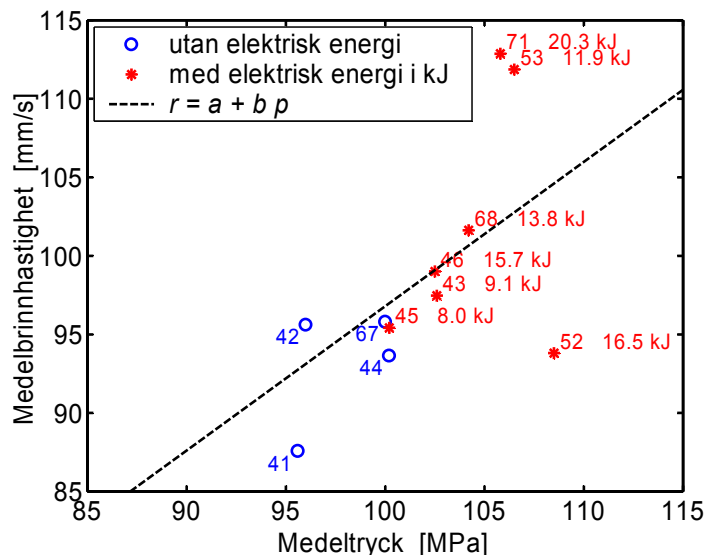


Figure 7. Medelbrinnhastigheten för testkrutet som funktion av medeltrycket i kammaren vid ett antal försök där ett dubbelbaskrut använts som testkrut. Två-siffrigt heltal anger löpnummer för provet, blå ringar är prov utan elektrisk energitillförsel och röda asterisker är prov med tillförd elektrisk energi, angiven i kJ. Linjen $r = a + b \cdot p$ är ett medelvärde för brinnhastigheten, som funktion av trycket.

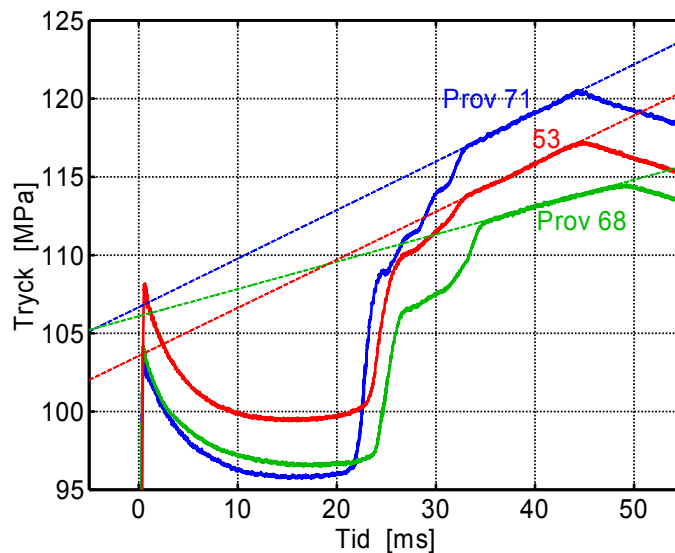
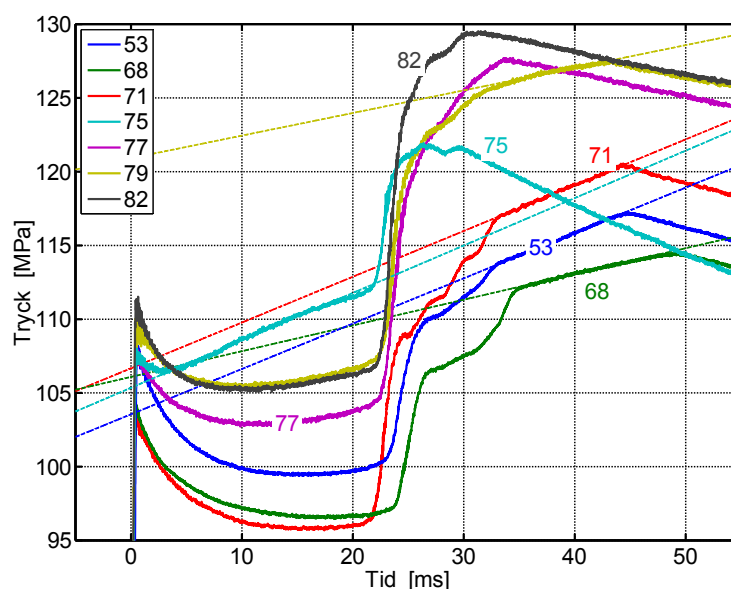


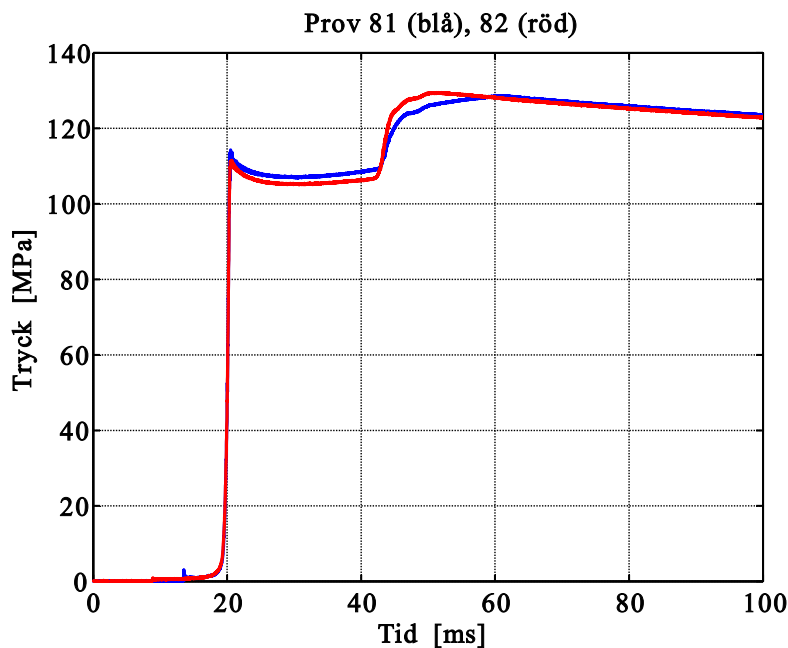
Figure 8 Prov nummer 53 och 71 uppvisar en brantare lutning på tryckkurva (snabbare förbränning) efter elektrisk urladdning än prov 68 som uppvisar en typisk lutning. Lutningen är ca 0,31 MPa/ms för prov 53 och 71 samt ca 0,17 MPa/ms för prov 68.

Fyra olika CF-experiment har gjorts där transparenta krut använts (se tabell 1). Tre av dessa experiment (prov 75, 77 och 82) resulterade i en högre medelbrinnhastighet än vad som erhållits vid experiment med de opaka kruten (se figur 9) medan ett av experimenten (prov 79) inte resulterade i en förhöjd medelbrinnhastighet. Vid prov 75 har förmodligen krutbiten lossnat från kruthållaren i ett tidigt skede av brinnförloppet eftersom lutningen på tryckkurvan efter den elektriska urladdningen är ovanligt stor redan före urladdningen (se figur 9). Om krutbiten lossnar från kruthållaren brinner den från båda ändarna vilket resulterar i att brinnytan och därmed gasgenereringshastigheten fördubblas medan brinntiden halveras. Det är dock oklart varför prov 77 och 82 men inte prov 79 ger en förhöjd medelbrinnhastighet. En förklaring kan vara att de transparenta kruten fäster sämre vid kruthållaren och att krutbiten lossnat ungefär vid tidpunkten för urladdningen även i prov 77 och 82. Denna förklaring går varken att bekräfta eller utesluta utgående från de experimentella resultat som erhållits.



Figur 9. Tryckkurvor för ett antal CF-experiment. Samtliga prov förutom prov 68 har resulterat i en förhöjd medelbrinnhastighet efter den elektriska urladdningen. Lutningen för tryckökningen efter den elektriska urladdningen markeras med en linje för prov 53, 68, 71 och 79. För prov 79 anger linjen lutningen på tryckökningen redan före den elektriska urladdningen.

I figur 10 jämförs tryckkurvorna från två olika CF-experiment där ett opakt respektive transparent krut med för övrigt exakt samma krutsammansättning använts. Det går att se både en kortare brinntid och brantare lutning på tryckökningen för prov 82 (transparent krut) än för prov 81 (opakt krut). En metod för att säkerställa att krutbiten inte lossnat under experimentet skulle behövas för att kunna dra några säkra slutsatser om vilken inverkan krutets transparens har på CF-experimenten.



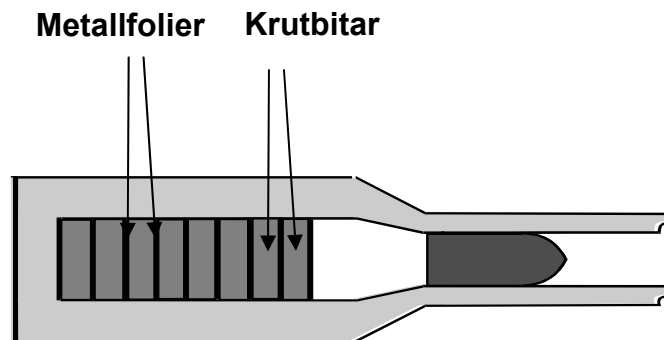
Figur 10. Tryckkurvor för två olika CF-experiment där ett opakt (prov 81) respektive transparent (prov 82) krut med för övrigt exakt samma krutsammansättning använts.

För samtliga krut som använts vid de CF-experiment som redovisas i denna rapport, har 5 % kaliumnitrat tillsatts för att öka den elektriska ledningsförmågan i flammans. Ett annat sätt att öka flammans ledningsförmåga är att öka flammans temperatur eftersom antalet fria laddningsbärare då ökar (termisk jonisation). Aluminium, som är en vanlig tillsats i raketkrut, frigör värme vid oxidationen och höjer därmed flamtemperaturen. I ett försök att ytterligare öka ledningsförmågan i krutflamman har aluminium tillsatts till ett kompositkrut baserat på den energetiska polymeren GAP (glycidylazidpolymer) och med HMX (oktogen) som energetiskt fyllmedel. Detta krut har använts vid två olika CF-experiment men gav ingen positiv effekt på stimulansen av krutförbränningen.

För att kunna förstå vilka parametrar och processer som styr hur stimuleringen av krutförbränningen sker, är det viktigt att förstå de fenomen som sker vid urladdningen av den elektriska energin. En utförlig analys har gjorts av de elektriska urladdningsfenomenen genom att studera ström- och spänningskurvorna från ett antal CF-experiment [12]. Urladdningsförloppet i flammans har karaktären av en gasurladdning. Inledningsvis sker en glimurladdning med låg strömtäthet som efter en fördröjning lavinartat övergår till en bågurladdning med hög strömtäthet. Bågurladdningen återgår sedan till en glimurladdning innan den elektriska urladdningen upphör. I CF-experimenten är det fördelaktigt med en bågurladdning eftersom strömtätheten då är hög. Nackdelen är att det är svårt att kontrollera läget på ljusbågen som helst skall gå genom flammans nära krutytan.

2.3 Ledande folier för krutinitiering

Ett koncept med ledande folier för krutinitiering har studerats vid FOI [14], [43]. Avsikten med konceptet är att kunna kontrollera den totala brinnytan för krutladdningen under brinnförloppet i eldröret för att påverka tryckkurvan och därmed öka mynningsenergin. Detta är tänkt att åstadkommas genom att stegvis antända delar av krutladdningen med hjälp av elektriskt ledande folier. Krutladdningen är då tänkt att vara uppdelad i ett antal hopklämda krutbitar med metallfolier emellan sig (se figur 11). Samtliga metallfolier är anslutna till en strömkälla och varje foliebit strömsätts vid separata tidpunkter. När metallfolien strömsätts värms den upp och krutet antänds via värmeledning. Genom att omsorgsfullt välja tidpunkter för när de olika metallfolierna strömsätts, är avsikten att erhålla en gynnsam form på tryckkurvan för att åstadkomma en ökning av mynningsenergin inom ramen för eldrörets trycktålighet.



Figur 11. Schematisk bild över foliekonceptet vid en tänkt implementering i ett eldrör.

Vid tidigare experiment som utförts vid FOI [43] konstaterades att krutet inte initierades homogent över krutytan. Den troliga orsaken till detta antogs vara att trycket var för lågt i förbränningskammaren på grund av att projektilen accelererades iväg för tidigt. Om fördämningen av projektilen hade varit kraftigare hade ett högre initialtryck erhållits som gett en snabbare upptändning av krutet.

För att ge svar på om det är möjligt att erhålla en homogen upptändning av krut genom värmeöverföring från ledande folier till krutet har förberedelser gjorts för att studera om det till en början går att erhålla en jämn uppvärmning av enbart metallfolien då den strömsätts [12]. Det är viktigt att metallfolien har egenskaper som gör att den värms upp snabbt och kontrollerat över hela ytan för att erhålla en jämn och kontrollerad övertändning av krutet.

Den aktuella försöksuppställningen som beskrivs i referens [12] är avpassad för en folie med bredden 50 mm och längden 62 mm. För en aluminiumfolie med tjockleken 25 μm som genomflyts av en konstant ström på 2 kA beräknas folien värmas upp 1 K på 36 μs . Den befintliga försöksuppställningen ger en urladdningstid på knappt 200 μs , vilket här skulle motsvara en temperaturökning på omkring 5 K. Detta är en alldeles för låg temperaturökning för att vara användbar för krutinitiering. Dessutom är den IR utrustning som finns att tillgå vid FOI för långsam för att studera de snabba uppvärmningsförloppen i folierna. De planerade försöken med att studera om det går att erhålla en homogen uppvärmning av metallfolier då de genomflyts av en ström, har därför inte kunnat genomföras.

3 Innerballistik

Kunskap inom innerballistik är viktig vid utveckling, användning, anskaffning, haveriutredningar, optimering, o.s.v. av eldrörsvapen och dess ammunition. Tillgång till tillförlitliga innerballistiska modeller för att optimera övertändnings- och förbränningsförloppen är viktig vid t ex utveckling av nya typer av ammunition. Teleskopladdningar där delar av projektilen befinner sig i drivladdningen och användning av modularladdningar medför t ex förändrade villkor för strömning av krutgaser och krutkorn/stavar i laddningsrummet under förbränningsfasen som skulle kunna simuleras för att optimera förbränningen. Även ny teknik som är i utvecklingsfasen som t ex ETI och medföljande laddning skulle kunna modelleras och modellerna användas som verktyg för optimering av teknikerna. Vid haveriutredningar då en olycka har inträffat med ett vapensystem eller dess ammunition är tillgång till innerballistiska beräkningsmodeller och kompetenta innerballistiker en stor hjälp. Det är också en ekonomisk fördel att kunna ersätta kostsamma skjutförsök med simuleringar. Arbete har därför påbörjats vid FOI med att utveckla en kod för innerballistiska beräkningar [34] - [35].

3.1 Innerballistisk simulering i Grale2d

Innerballistiken i en kanon kan, beroende på behov, modelleras i olika grad av detaljnivå. Modellerna kan variera från termokemiberäkning av krutprestanda och en ekvation på sluten form till modeller i noll, en, två eller tre rumsdimensioner. Drivgasens och krutets olika faser kan modelleras i varierande grad från kontinuum till enskilda krutkorn. Krutets förbränning och initiering, gasernas sammansättning och tillståndsekvation, kammarens och projektilens geometrier samt tändarens utformning och funktion är andra delar som kan beskrivas olika utförligt. Varje detaljeringsgrad är användbar för sitt ändamål.

I två rumsdimensioner och axiell symmetri kan en god beskrivning ges av de flesta kammare, laddningar, tändare och projektiler. Här kan utbredning av axiella och radiella vågor simuleras, speciellt initiering och flamspridning. Plasmageneratorer för elektrotermisk-kemiska (ETK) utskjutningstekniker är ofta axiellt symmetriska.

Förloppet vid initiering med hjälp av plasmagenerator kan därför med fördel simuleras i två dimensioner.

Grale2d [45], som är helt utvecklad vid FOI är en explicit finitelement-kod för tvådimensionella, plana eller axiellt symmetriska problem. Modulen för innerballistik för kanoner (Grale2d-IB) togs fram på kort tid under år 2005. Inledande test är mycket lovande men Grale2d-IB är till delar ofullständig och bör betraktas som en prototyp under utveckling. Det pågår även arbete med en modul för elpansar i Grale2d, vilket kan ge underlag för modellering av plasmagenerator och plasmainjektion i innerballistikmodulen.

I Grale2d-IB betraktas eldröret med kammaren som rotationssymmetriskt i längsled. Det innebär att endast förloppen som sker i ena halva delen simuleras och att den andra halvan antas vara en spegelbild av den första, vilket sparar beräkningsresurser. Kammaren delas in i ett tvådimensionellt rutnät (beräkningsnätet) där beräkningar av förlopp och fysikaliska egenskaper sker för varje ruta i beräkningsnätet. Storleken för kammarens beräkningsnät är fixt. Projektilen betraktas som en stel kolv med massa som rör sig framåt längs eldröret. Eldröret och dess beräkningsnät är töjbart och rutoras storlek i detta beräkningsnät ökar allteftersom projektilen rör sig.

Då krutet börjar brinna utgör krutgaserna en fas (gasfasen) och det oförbrända krutet en annan fas (solidfasen). För att kunna modellera dessa två olika faser med olika egenskaper samt växelverkan dem emellan, behandlas de två olika faserna som två tvillingdomäner. Modelleringen delas då upp i två identiska problemställningar, förutom fasskillnaden, som överlappar och växelverkar.

I Grale2d-IB ges indata för kammaren inklusive eldrör, projektil inklusive eldrör, krutet, krutgasen samt krut/gasinteraktionen. De storheter som definierar krutet är:

Energiinnehåll, e_c	Densitet, ρ_s
Initieringstemperatur, T_i	Elasticitetsmodul, E
Brinnhastighet, r	Tvärkontraktionstal, ν
Geometrisk formfunktion, z	Värmeöverföringstal, a
Total brinnsträcka, s_0	Begynnelsestemperatur, T_b

Förbränningen startar när krutets temperatur T_s uppnår initieringstemperaturen T_i och fortsätter tills krutet brunnit upp. För modellering av brinnhastigheten kan någon av följande tre ekvationer användas

$$r = c(p_0 + p) \quad (1)$$

$$r = c(p / p_0)^n \quad (2)$$

$$r = c \quad (3)$$

Krutgasen karaktäriseras av gasens specifika värme vid konstant tryck (c_p) respektive vid konstant volym (c_v) samt kovolymeren b . Gasen och krutet påverkar varandra dels genom att gasen värmer upp krutet och dels genom en kraftpåverkan på grund av strömningsfälten.

Den beskrivna modellen har tillämpats på ett fall motsvarande en 40 mm Bofors automatkanon m/70B med spårljus spränggranat M/90. Ett urval av utdata från fallet presenteras och diskuteras i referens [34].

De begränsningar som för närvarande finns i Grale2d-IB är att inte mer än en sorts krutgas kan simuleras samtidigt, att inte projektilens utsträckning i kammaren kan modelleras samt att varken värmeförluster eller värmeledning modelleras.

4 Forskning kring kanonkrut

Främst på grund av risken för oavsiktlig antändning av lagrad ammunition samt massdetonation vid beskjutning av stridsfordon och stridsfartyg, satsas stora forskningsinsatser runt om i världen på att framställa lågkänslig ammunition (IM, insensitive munition). Det ställs dessutom krav på att prestandan för denna ammunition skall förbättras eller åtminstone bibehållas. Ett sätt att förbättra ammunitionens IM-egenskaper är t ex att använda lågkänsliga explosivämnen i ammunitionens drivladdning och på så sätt erhålla ett LOVA-krut.

LOVA-krut baseras på ett energetiskt fyllmedel och flegmatiseras av en polymermatris på liknande sätt som vid tillverkning av plastbundna sprängämnen (PBX). Bindemedlet ökar krutets termiska antändningstemperatur och fungerar som en termisk sköld genom att sönderfalla endotermt vid en temperatur under sönderfallstemperaturen för det energetiska fyllmedlet. För att öka energiinnehållet i det färdiga krutet kan energetiska bindemedel och mjukgörare användas.

Nitrocellulosa (NC) har länge varit huvudbeståndsdelen i de krut som använts i drivladdningar för eldrörsvapen. Krut baserade på NC har hög värmekänslighet och dålig lagringsstabilitet som kan leda till vådatändning och kan därför inte klassas som IM. De LOVA-krut som finns tillgängliga idag är oftast baserade på RDX som energetiskt fyllmedel och ett inert eller energetiskt bindemedel som t ex CAB (cellulosaacetatbuturat) men innehåller även mindre mängder NC. Det är därför önskvärt att utveckla nya LOVA-krutsformuleringar som inte innehåller någon NC.

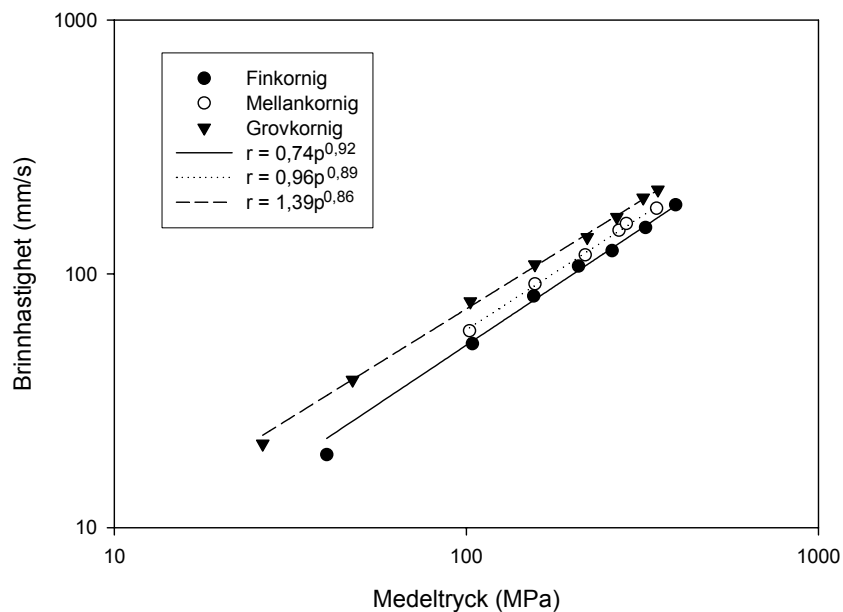
4.1 Karaktärisering av FOX-7

Vid FOI har två olika lågkänsliga explosivämnen framställts som benämns FOX-7 och FOX-12. Båda är tänkbara kandidater som energetiska fyllmedel i LOVA-krut. Ett antal formuleringar med FOX-7 har framställts och dess brinnegenskaper har karaktäriserats.

4.1.1 Partikelstorlekens betydelse för brinnhastigheten

Eftersom fyllnadsgraden av energetiskt fyllmedel har stor inverkan på energiinnehållet i det färdiga krutet, brukar bimodala partikelfraktioner av explosivämnet användas. Förhållandet mellan storleken av partiklarna i den bimodala blandningen är viktigt för att optimera fyllnadsgraden men kan också ha en stor påverkan på krutets brinnegenskaper. I ammoniumperkloratbaserade krut ökar brinnhastigheten kraftigt med minskande partikelstorlek på ammoniumperkloraten (AP) [46]. För krut som baseras på RDX eller HMX gäller det omvända, brinnhastigheten ökar med ökande partikelstorlek [47]-[49]. Detta förklaras med att RDX- och HMX-partiklarna smälter och diffunderar in i bindemedlet till en homogen energetisk blandning. Små RDX-partiklar ger tjockare smält lager än större partiklar och ger därmed låg respektive hög brinnhastighet. I referens [47]-[49] har brinnegenskaperna för unimodala och bimodala RDX-krut undersökts. Både brinnhastigheten, brinnkoefficienten och brinnexponenten ökade om andelen stora partiklar ökades. Syftet var här att framställa ett krut för stridsvagnskanoner med cellulosaaacetat som bindemedel och för detta ändamål var en unimodal fördelning av RDX-partiklar med en storlek av 5 μm optimalt.

Eftersom FOX-7 saknar smältpunkt [50] är det inte självklart att ämnet har liknande brinnegenskaper som RDX och HMX. Partikelstorlekens betydelse för FOX-7 brinnegenskaper har därför studerats vid FOI. Eftersom det visade sig att pressad FOX-7 med vaxtillsats gick sönder vid brinnhastighetsmätningarna och gav orimligt höga värden tillverkades en formulering av 70 % FOX-7 och 30 % GAP (polyglycidylazid). Unimodala formuleringar av tre olika partikelstorlekar framställdes och brinnhastigheten analyserades vid olika tryck i en EMBLA-bomb. De tre olika partikelstorlekarna som användes betecknades finkornig (20-40 μm), mellankornig (50-100 μm) och grovkornig (150-200 μm). Som kan ses i figur 14 så gäller för FOX-7 precis som för RDX och HMX att formuleringar med större partiklar uppvisar en högre brinnhastighet än dem med mindre partiklar. Dessa brinnegenskaper är viktigt att känna till vid optimering av krutformuleringar med avseende på t ex fyllnadsgrad där bimodal partikelfraktion används.



Figur 14. Brinnhastighetsmätningar av unimodala formuleringar med tre olika partikelstorlekar, finkornig (20-40 μm), mellankornig (50-100 μm) och grovkornig (150-200 μm) vid 20°C.

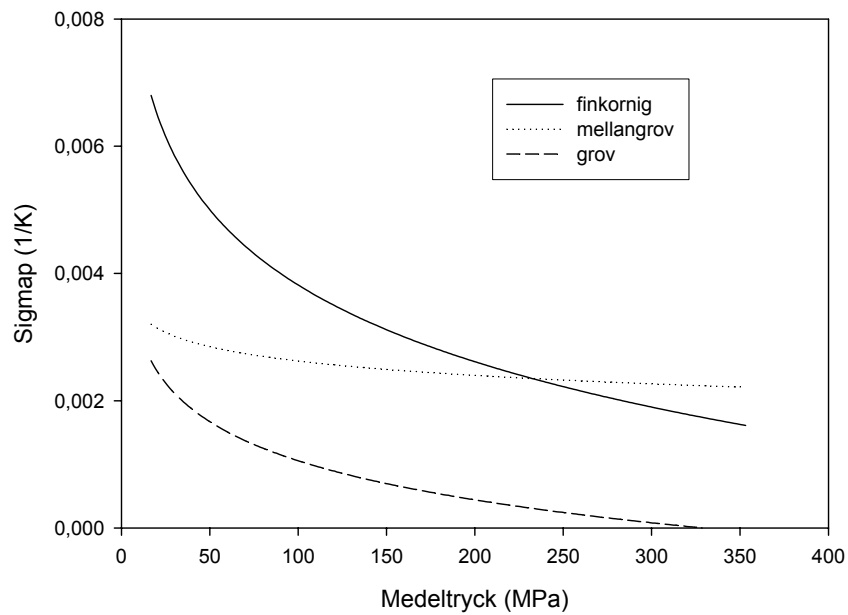
4.1.2 Brinnhastighetens temperaturberoende

Det finns ett generellt krav att krutladdningar skall vara funktionsdugliga och lagringsstabila inom temperaturintervallet -40°C till 70°C. Dessutom skall hela vapensystemet fungera tillfredsställande inom samma temperaturintervall. Med tanke på att ammunitionen idag även används vid internationella insatser, där klimatet kraftigt kan skilja sig från svenska förhållanden, är ett brett temperaturintervall extra viktigt. Detta innebär att drivladdningen för konventionella kanoner måste vara dimensionerad för att eldröret skall tåla de tryck och påfrestningar som uppstår vid skjutning då laddningen har den högsta temperaturen T_{dim} . Tryckmaximum vid projektilens bakplan ligger då nära det maximala tryck som kanonen är konstruerad att tåla. En kall vinterdag är energiåtgången för upptändning av krutet högre samt energiförlusterna till eldröret större än en varm sommardag. Dessutom varierar krutets linjära brinnhastighet med drivladdningens initiala temperatur vilket brukar benämnas som temperaturkänsligheten. Krutets temperaturkänslighet varierar beroende på krutsammansättning. Om krutet som används i drivladdningen har en brinnhastighet med ett stort temperaturberoende, kan alltså en stor spridning i mynningshastighet beroende på laddningens initiala temperatur uppkomma. Dessutom utnyttjas den tillåtna gränsen för eldrörets tryckhållfasthet sämre med ett lägre värde på laddningens initiala temperatur. För att minska spridningen i mynningshastighet och förbättra utnyttjandegraden av kanonens kapacitet vid lägre temperaturer är det därför viktigt att undersöka hur brinnhastigheten varierar med temperaturen för de ingredienser som är tänkt att ingå i det färdiga krutet.

Temperaturkänsligheten betecknas σ_p och kan uttryckas i tryck, temperatur och brinnhastighet enligt ekvation (4) [46].

$$\sigma_p = \left(\frac{\partial \ln r}{\partial T_0} \right)_p = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial T_0} \right)_p = \frac{1}{r} \frac{r_1 - r_0}{T_1 - T_0} = \frac{2}{r_1 + r_0} \frac{r_1 - r_0}{T_1 - T_0} \quad (4)$$

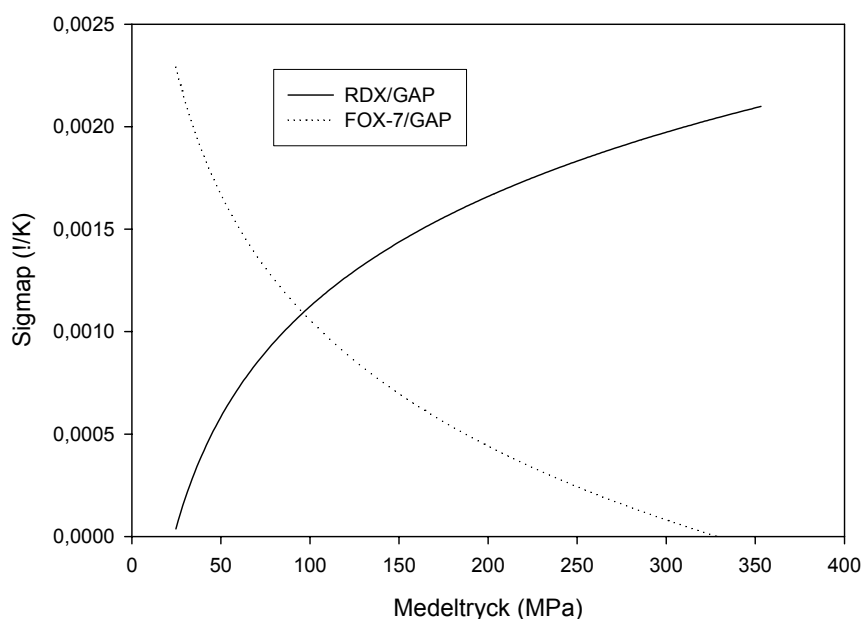
där r står för medelbrinnhastigheten, T_0 respektive T_1 står för två olika initialtemperaturer för laddningen. r_0 och r_1 står för brinnhastigheterna vid temperaturerna T_0 respektive T_1 .



Figur 15. Temperaturkänsligheten beräknad enligt ekvation (4) för temperaturer mellan -30°C och 60°C . Beräkningarna är baserade på de brinnparametrar som erhållits vid brinnhastighetsmätningar av FOX-7/GAP-formuleringar.

Samma FOX-7 formuleringar som användes för att studera partikelstorlekens betydelse för brinnhastigheten (se avsnitt 4.1.1) användes för att bestämma temperaturkänsligheten. Både krutet och bomben konditionerades till aktuell mättemperatur före varje mätning av brinnhastigheten i EMBLA-bomben. Temperaturkänsligheten beräknades sedan enligt ekvation (4) för temperaturer mellan -30°C och 60°C . Beräkningarna är baserade på de brinnparametrar som erhållits vid brinnhastighetsmätningar av FOX-7/GAP-formuleringar och resultaten redovisas i figur 15.

Den finkorniga blandningen ger alltså både högst brinnhastighet och högst temperaturkänslighet. Temperaturkänsligheten minskar också med ökande tryck för alla tre kornstorlekarna. Som jämförelse framställdes motsvarande RDX/GAP-formulering med grovkorniga partiklar och temperaturkänsligheten bestämdes. Resultaten från denna jämförelse kan ses i figur 16. Vid 100MPa är temperaturkänsligheten lika för de båda formuleringarna för att sedan minska med ökande tryck för FOX-7 formuleringen och öka med ökande tryck för RDX-formuleringen.



Figur 16. Temperaturkänsligheten beräknad enligt ekvation (4) för temperaturer mellan -30°C och 60°C . Beräkningarna är baserade på de brinnparametrar som erhållits vid brinnhastighetsmätningar av FOX-7/GAP samt RDX/GAP-formuleringar.

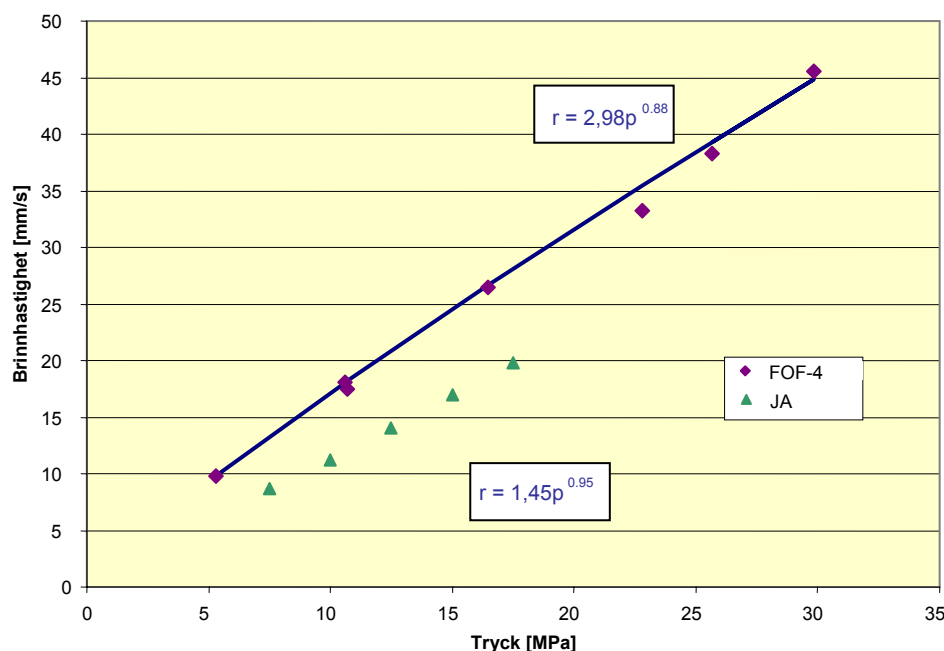
4.2 Kanonkrutsformuleringar baserade på FOX-7

Ett antal kanonkrutsformuleringar baserade på FOX-7 har framställts vid FOI. I de första formuleringarna användes endast polyGLYN som bindemedel, vilket gav krut med dåliga mekaniska egenskaper. PolyGLYN är en trifunktionell polymer som kan ge en hög grad av tvärbindingar och därmed ge ett hårt och oelastiskt material efter härdningen. För att minska tvärbindningsgraden användes en blandning av polymererna polyGLYN och GAP i de följande formuleringarna. GAP är en difunktionell prepolymer som ger färre tvärbindingar och därmed en mera elastisk slutprodukt. Brinnegenskaperna för en av dessa formuleringar FOF-4 (FOF = FOI formulation) har karaktäriserats [51]. Enligt termokemiberäkningar har FOF-4 ett arbetsvärde som är endast något lägre än för dubbelbaskrutet medan flamtemperaturen och medelmolekylvikten är väsentligt lägre (se tabell 2). Högt arbetsvärde är önskvärt för att kunna erhålla ett krut med bra prestanda samtidigt som en låg flamtemperatur är önskvärt eftersom det ger lägre eldrörserosion.

Tabell 2. Termokemisk beräkning av egenskaper hos olika kommersiella krut samt FOX-7 baserade krut framställda vid FOI.

	Force	Temperatur	Medel- molekylvikt
	[kJ/kg]	[K]	[g/mol]
Dubbelbaskrut [52] (NC/NG 61/38)	1168	3751	26.7
LOVA [52] (CAB/RDX/NC 12/76/4)		2688	20.6
FOF-2 [53] (FOX7/GLYN 70/21)	1054	2782	21.9
FOF-3 [54] (FOX7/GLYN/GAP 70/11/11)	1034	2630	21.1
FOF-4 [55] (FOX7/HMX/GLYN/GAP 65/14/7/7)	1129	2999	22.1

Brinnhastighetsmätningar av FOF-4 formuleringen har utförts i en EMBLA-bomb [51] och resultaten redovisas i figur 17 tillsammans med jämförande brinnegenskaper för JA2-kрутet [56]. JA2 är ett dubbelbaskrut som ofta används som referens. FOF-4 har alltså en något lägre brinnexponent och betydligt högre brinnkoefficient än jämförelsekrutet JA2. Värdena på brinnexponenten och brinnkoefficienten är avgörande för vilken tillämpning krutet är lämpligt eller vilken geometri som de färdiga krutkornen skall få.

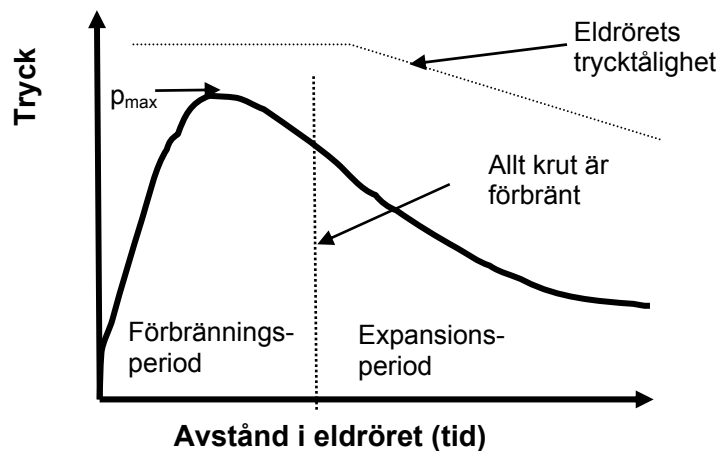


Figur 17. Brinnegenskaper för FOF-4. Som jämförelse redovisas även brinnegenskaper för JA2-krutet [56].

Känslighetstestning av andra FOX-7 formuleringar har visat på lågkänsliga egenskaper för dessa typer av formuleringar [53].

4.3 Framställning av snabb-brinnande krut

När krutet i en drivladdning börjar brinna, bildas varma krutgaser. De bildade krutgaserna utövar ett tryck på projektilens bakplan och projektilen börjar accelerera. Den tillgängliga volymen för de heta expanderande gaserna ökar allteftersom projektilen förflyttas. Vid en viss tidpunkt räcker inte gasgenereringshastigheten till för att kompensera för den ökade volymen och trycket sjunker igen. Hur trycket på projektilens bakplan varierar under det innerballistiska förloppet illustreras i figur 18. Tidsintegralen av denna tryckkurva är relaterad till det arbete som krutgaserna utför på projektilen, vilket betyder att storleken på mynningshastigheten är starkt beroende av tryckprofilens utseende. En möjlighet att öka mynningsenergin är alltså att försöka öka trycket efter det att tryckmaximum uppnåtts utan att överskrida eldrörets trycktålighet. Detta kan åstadkommas genom att använda progressivt brinnande krut som t ex 7-håls eller 19-hålskrut. Allteftersom ett multiperforerat krutkorn förbränns, ökar den brinnande ytan. Detta ger en ökande gasgenereringshastighet medan krutets linjära brinnhastighet hela tiden är oförändrad. Det är också möjligt att erhålla progressiv förbränning genom att kombinera två eller flera energetiska material med olika brinnhastigheter som förbränns under olika delar av brinnförloppet. Det snabbbrinnande krutet skall då helst börja förbrännas efter det att tryckmaximum uppnåtts.



Figur 18. Schematiskbild över trycket på projektilens bakplan under det innerballistiska förloppet.

Under det innerballistiska förloppet uppstår en tryckgradient längs eldröret med ett lägre tryck vid projektilens bakplan. Tryckgradienten förändras om förhållandet mellan projektilvikten och laddningsvikten ändras. Vid ett visst förhållande mellan laddningsvikt och projektilvikt har projektilen och krutgaserna samma hastighet. Det lönar sig sedan inte att öka laddningsvikten eller minska projektilvikten ytterligare eftersom hastigheten begränsas av ljudhastigheten i det accelererande mediet. Ett sätt att övervinna denna begränsning är tekniken med medföljande laddning [57]-[58]. Denna teknik går ut på att en krutladdning fästs på projektilens bakplan och följer med projektilen under accelerationen i eldröret. Denna medföljande laddning skall helst användas när krutgaserna från huvudladdningen nästan inte förmår att accelerera projektilen ytterligare. Gasen som produceras från en medföljande laddning kan få en betydligt högre hastighet än krutgaser från en statisk laddning och därmed ge en högre projektilacceleration. Den medföljande laddningen fungerar ungefär som en krutraketmotor som ger projektilen extra drivkraft mot slutet av det innerballistiska förloppet. För att den medföljande laddningen skall hinna brinna slut innan projektilen lämnar loppet måste krutet ha en mycket hög brinnhastighet.

Vid FOI har försök gjorts att framställa snabb-brinnande (VHBR, very high burning rate) krut [63]. Dessa VHBR-krut skulle t ex kunna användas som den snabb-brinnande komponenten i ett progressivt krut eller som en medföljande laddning. De ingredienser som ingår i krutet är ammoniumperklorat med en partikelstorlek på 3 μm (LUFAP), hydroxylterminerad polybutadien (HTPB), polydimetylsiloxangummi (MQ) och n-hexylkarboran (NHC). Ett stort antal VHBR-krutkompositioner har framställts med olika förhållanden mellan de olika komponenterna [51]. Vid mätning av brinnhastigheten i slutna bomb varierade brinnhastigheterna mellan 250 och 800 mm/s vid 100MPa för de olika krutkompositionerna [51].

Brinnhastigheten visade sig katalyseras kraftigt av NHC med ökande halt katalysator för MQ/NHC/LUFAP-kruten men även utan katalysator fås höga brinnhastigheter. Partikelstorleken på AP har också stor betydelse för brinnhastigheten. Det är dessutom viktigt att malningen av AP sker så kort tid innan gjutningen som möjligt för att undvika deaktivering. De MQ-baserade kruten härdade ofullständigt och visade dåliga hållfasthetsegenskaper. Fler härdningsstudier behövs, gärna med andra silikontyper. De krut där brinnhastighetsmätningarna utförts dagen efter gjutningen uppvisar de högsta brinnhastigheterna. Migrationen av katalysatorn har alltså en negativ effekt på brinnhastigheten. Termokemiberäkningarna visar att man med magnesiumtillsats kan minska saltsyrehalten betydligt, men inte till acceptabla nivåer för kanonkrut. Flamtemperaturen ökar samtidigt kraftigt vid tillsats av magnesium. Vidare studier behövs för att hitta ett lämpligt ersättningsämne.

5 Slutsatser

Den forskning kring ETK som har bedrivits vid FOI under ett antal år var till en början främst inriktad mot stimulering av krutförbränning genom CF-konceptet [7]-[14]. ETK-forskningen vid FOI har dock under 2005-2006 ominriktats mot ETI och parallellt med förberedelsearbetet för ETI-experiment [15] har ett antal avslutande CF-experiment utförts.

En plasmagenerator för laboratoriebruk har konstruerats. Denna plasmagenerator är förberedd för anslutning av diagnostik i form av tryckgivare och t ex optiska fibrer vid olika typer av experiment. Det är också möjligt att variera kapillärens diameter och längd samt dysöppningens geometri. Avsikten med denna konstruktion är att kunna utföra experiment för att öka förståelsen för en plasmagenerators funktion samt hur plasmat påverkar initieringsförloppet och krutförbränningen.

Arbete med att skapa en modell för simulering av plasmagenerator och plasmainitieringsförloppet har påbörjats men inte avslutats. Denna datormodell är nödvändig för att ge lämpliga startparametrar till ETI-experimenten men kan också användas som ett hjälpmedel vid optimering och studier av plasmageneratorns funktion. Den numeriska metod som valts för att modellera strömningen i plasmageneratorn har implementerats och testats mot det välkända typexemplet Sods störrör med gott resultat [15]. Arbetet med att implementera källtermer som beskriver effekterna av abladerat kapillärmaterial och Ohmsk upphettning är påbörjat. Innerballistikmodulen är fristående och kan kopplas ihop med plasmageneratormodellen i ett senare skede. Det skulle då ges möjligheter att modellera även initiering och övertändning av krutladdningen i kammaren samt den fortsatta tryckutvecklingen i eldröret vid användning av ETI.

Vid några CF-experiment har det gått att erhålla en stimulering av krutförbränningen. Det är dock ännu inte helt klarlagt exakt under vilka förutsättningar och vilka mekanismer som ger denna ökade brinnhastighet. Vid en mycket grov uppskattning av effekten av elektrisk energitillförsel vid CF-experiment där stimulering av

krutförbränningen har kunnat påvisas konstaterades att den elektriska urladdningen ger en ökning av medelbrinnhastigheten på minst 10 % [14]. Några CF-experiment tyder på att stimuleringen av krutförbränningen blir högre vid användning av transparent krut istället för opakt. En metod för att säkerställa att krutbiten inte lossnat under experimenten skulle dock behövas för att kunna dra några säkra slutsatser om vilken inverkan krutets transparens har på CF-experimenten. Det är kritiskt att veta hur och var bågurladdningen i flamman sker för att kunna optimera stimuleringen av krutförbränningen vid CF-experimenten. Det skulle dock vara nödvändigt att sätta in någon typ av fönster i bomben som används vid CF-experimenten för att kunna studera läget på ljusbågen vid bågurladdningen. Det finns fortfarande många möjliga förbättringar att införa i CF-konceptet. Det skulle dock krävas förhållandevis stora insatser för att möjliggöra en implementering av konceptet i ett vapensystem. Verkningsgraden av den tillförda elektriska energin skulle också behöva utredas vidare.

På kort tid under de senaste två åren har en tvådimensionell innerballistikkod tagits fram vid FOI som benämns Gracle2d-IB. Koden har baserats på den finitaelement-koden Gracle2d som tidigare utvecklats vid FOI. Koden är inte färdigutvecklad men resultaten från beräkningar utförda hittills ser lovande ut.

Viss forskning kring kanonkrut med inriktning på främst LOVA-krut har bedrivits. Några formuleringar med det lågkänsliga explosivämnet FOX-7 har framställts och dess brinnegenskaper har karaktäriserats. Då FOX-7 blandas med det energetiska bindemedlet GAP ökar brinnhastigheten och temperaturkänsligheten med ökande storlek av FOX-7 partiklarna. Motsvarande formuleringar med RDX studerades med avseende på temperaturkänslighet. Vid ett tryck på 100 MPa var temperaturkänsligheten för både FOX-7 och RDX formuleringarna desamma. Vid ökande tryck minskade sedan temperaturkänsligheten för FOX-7 blandningen medan den ökade för RDX-blandningen.

Vid FOI har försök gjorts att framställa snabb-brinnande (VHBR) krut [63] som t ex skulle kunna användas som den snabb-brinnande komponenten i ett progressivt krut eller som en medföljande laddning. Kruten är baserade på ammoniumperklorat med en partikelstorlek på 3 μm (LUFAP), hydroxylterminerad polybutadien (HTPB), polydimetylsiloxangummi (MQ) och n-hexylkarboran (NHC). Vid mätning av brinnhastigheten i slutna bomb varierade brinnhastigheterna mellan 250 och 800 mm/s vid 100 MPa för ett antal olika krutkompositioner [51], [63]. Brinnhastigheten katalyseras kraftigt av NHC med ökande halt katalysator för MQ/NHC/LUFAP-kruten men även utan katalysator fås höga brinnhastigheter. De MQ-baserade kruten härdade ofullständigt och visade dåliga hållfasthetsegenskaper. Det sker migrationen av katalysatorn vilket medför en negativ effekt på brinnhastigheten. Termokemiberäkningarna visar att man med magnesiumtillsats kan minska saltsyrehalten betydligt, dock inte till acceptabla nivåer för kanonkrut. Flamtemperaturen ökar dessutom samtidigt kraftigt vid tillsats av magnesium. Vidare studier behövs för att hitta ett lämpligt ersättningsämne.

6 Fortsatt arbete inom området utskjutningsteknik

Forskningen kring ETI kommer initialt att utgöras av experiment för att öka förståelsen för plasmageneratorns funktion och hur plasmat påverkar initieringsförloppet och krutförbränningen. Plasmageneratoren är konstruerad för att lätt kunna växla mellan olika kapillär- och trådmateriel och betydelsen av materialval för både tråd och kapillär kommer därför att studeras i de allra första experimenten.

Det råder delade meningar om vilka mekanismer det är som styr energiöverföringsprocessen från plasmat till krutet och hur plasmat växelverkar med krutet under krutförbränningen. De fyra huvudteorier som för närvarande är aktuella har redan presenterats i texten ovan. En av dessa teorier bygger på att det är värmestrålning från plasmat till krutet som har avgörande betydelse medan andra menar att det har mindre betydelse. En experimentell metod för att mäta hur mycket värmestrålning som tränger in i krutet under initiering och förbränning är därför av stor betydelse för att öka kunskapen om PPI. En sådan metod som baseras på spektroskopiska mätningar har utvecklats vid QinetiQ [40]. En person från FOI har under hösten besökt QinetiQ för att lära sig mera om denna metod och därmed kunna implementera den i FOIs utrustning [41]. Spektroskopiska mätningar av värmestrålningen in i krutet under plasmaintieringsförloppet planeras sedan. Det är även tänkbart att utföra experiment där sprängbleck används för att åstadkomma avbruten förbränning. Detta möjliggör en analys av det oförbrända krutet för att kunna se om det uppkommer strukturförändringar i krutet under initieringsförloppet. En beskrivning av den spektroskopiska metoden samt en redovisning av de kunskaper som inhämtats under detta besök finns väl beskrivna i referens [41].

I ett senare skede är förhoppningen att det kommer att finnas möjlighet att studera initiering av LOVA-krut genom ETI. ETI anses vara en möjlig teknik för att antända annars svårinitierade LOVA-krut. Det vore därför mycket intressant att framställa ett antal LOVA-krutsformuleringar baserade på de lågkänsliga energetiska materialen FOX-7 och FOX-12 för att sedan genomföra jämförande studier av dess tändning genom konventionell intitiering och ETI.

7 Utvecklingstendenser inom området utskjutning

Strider stat mot stat tenderar att inte längre vara lika vanliga utan tonvikten ligger snarare på strid i bebyggelse. Behovet av korträckviddiga vapensystem med hög precision ökar då på bekostnad av långräckviddiga. Det är också viktigt att minimera den kollaterala verkan. Behov av minskad logistik och flexibla system där samma utrustning kan användas för flera ändamål, tvingas fram av ständigt krympande budgetar och önskemål om snabba truppförflyttningar. Minskad storlek och tillverkningskostnad för navigeringssystem har lett till mer styrbar ammunition med målsökning. Gränsen mellan utskjutnings- och framdrivningstekniker suddas därmed ut. Ökade krav på säkerhet vid transporter, lagring, hantering och användning av

ammunition, har lett fram till en strävan efter IM (insensitive munition) ammunition [16].

Forskningen kring nya utskjutningstekniker runt om i världen [1] - [4] är idag främst fokuserad på utveckling av rälskanoner och till en något mindre del på ETK. En viss forskningsverksamhet finns även inom utveckling av spolkanoner. Speciellt för räls- och spolkanoner är det kritiskt att enheterna för kraftförsörjningen blir mera kompakta.

Forskningsinsatserna kring ETK är idag främst inriktade mot elektrotermisk initiering. Fram till slutet på 90-talet användes plasmageneratorer med en högenergetisk plasmajet (PJ) för att även åstadkomma en ökning i mynningsenergi. Eftersom dessa kräver mycket elektrisk energi och därmed blir svåra att implementera i vapensystem innan energilagringssystemen blivit kompaktare, har de övergetts alltmer till förmån för PJ av lägre energi. Dessa PJ kan fortfarande ge en snabbare övertändning av krutet, bättre repeterbarhet i tändningsprocessen, kompensation för krutförbränningsens temperaturberoende samt möjlighet till tändning av LOVA-krut och krutladdningar med hög laddningsdensitet.

Det är viktigt att förstå de processer som sker vid ETI för att kunna optimera funktionen av plasmageneratorerna och därmed minska energiförbrukningen. Mycket av forskningen om ETI är därför fokuserad på en ökad förståelse av hur plasmaväxelverkar med krutet under plasmainitieringsförloppet [59]-[61].

De allra flesta använder fast krut vid plasmainitiering. I Ryssland använder de dock även gelade krut och vätskekrut [3].

United Defense Systems Division (del av BAE Systems) har en stridsvagnsprototyp med en fullt fungerande 120 mm ETK-kanon för plasmainitiering [62]. Vid en provserie i oktober 2004 avfyrades 12 skott med hjälp av plasmainitiering med lyckat resultat.

Fördelen med rälskanoner är att projektilens acceleration inte begränsas av ljudhastigheten samt att explosivämnen helt kan undvikas både för drivladdning och för stridsdel. Projektilen förväntas få en så hög hastighet att dess kinetiska energi räcker för att orsaka nödvändig skada på målet. Eftersom rälskanoner utnyttjar en rent elektromagnetisk utskjutningsprincip krävs dock stora mängder elektrisk energi för utskjutning av projektilen. Det är därför långt kvar innan energilagringssystemen är så kompakta att det går att tillverka fältmässiga landbaserade rälskanoner. På stridsfartyg är det dock inte alls lika kritiskt med kompakta system för kraftförsörjningen. I USA har det initierats ett antal projekt för utveckling av marina rälskanoner. Målet är att åstadkomma mynningshastigheter på över 2000 m/s vid projektilvikter kring 16 kg med en skotthastighet på 6-12 skott per minut [6]. Tanken är att implementera systemet på t ex något av de nya DD(X) destroyer fartygen. Både BAE Armament Systems Division i Minneapolis [64] och General Atomics i San Diego [65] har fått i uppdrag av den amerikanska armén att bygga rälskanoner för marint bruk. Forskning kring rälskanoner i övrigt koncentreras mycket på att minska slitaget och uppvärmningen av rälsen.

Ett steg i riktning mot kompakta energilagringssystem är t ex elektriska generatorer med supraledande komponenter [66]. Dagens supraledande material, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, kan verka vid så höga temperaturer som 77 K. Utvecklingen av effektiva och kompakta kryokylare har också gått framåt. Generatorerna i dessa system består av en rotor lindad med supraledande material och en stator av antingen koppar eller supraledande material. Förutom den mindre storleken och den lägre vikten blir också verkningsgraden högre på grund av lägre elektriska förluster.

Energitätheten hos de kondensatorer som används för energilagring och urladdning ökas ständigt. För att åstadkomma en hög energitäthet är det önskvärt med en hög permittivitet med lågt temperaturberoende hos kondensatorns isolatormedium. Arbete som pågår med att söka nya material med dessa önskvärda egenskaper redovisades t ex vid EML-symposiet 2004 i Snowbird USA [67]-[68]

Ett helt nytt initieringskoncept som till funktionen påminner om ETI men där termitsatser utnyttjas utan tillsats av elektrisk energi har studerats [69]. Det har länge ansetts att det är värmestrålning från det heta plasmat till krutet som är det fenomen som orsakar tändningen av krutet vid ETI. Experiment som har gjorts vid QinetiQ har dock visat att den mängd värmestrålning som överförs till krutet under initieringsfasen är så liten att den kan försummas och att det istället är kondensation av metallånga på de oförbrända krutytorna som är den dominerande energiöverföringsmekanismen vid initieringen [70]-[72].

Vid en termitreaktion antänds en blandning av aluminium och metalloxid varvid aluminiumet oxideras och metalloxiden reduceras under mycket stark värmeutveckling. Den första termitsatsen som formulerades bestod av aluminiumpulver och järnoxid (Fe_2O_3) som vid reaktion ger en temperatur på 2400°C . Vid andra sammansättningar kan betydligt högre temperaturer uppnås. Termitreaktionen upptäcktes ursprungligen av den tyske kemisten Hans Goldschmidt 1893 och kom att användas för svetsning av järnvägsspår. Termitsatser som är en typ av pyroteknisk sats används också i brandbomber för att smälta metall och kan därmed snabbt förstöra olika typer av militär utrustning i metall, användas för att ta sig igenom metalldörrar mm.

De reaktionsprodukter som bildas vid termitreaktionerna består delvis av flytande metall som deponeras på kallare ytor. Om reaktionsprodukter från en termitreaktion tillåts strömma mot krutbädden i en drivladdning skulle alltså den process som anses vara den dominerande energiöverföringsmekanismen vid ETI efterliknas. En termittändares funktion bygger just på hypotesen att kondenserad metallånga på oförbrända krutytorna kan antända en krutladdning [69]. Tanken är att flytande metall från en termitreaktion tillåts deponeras på krutytorna i en drivladdning som då initieras. Målsättningen är att samma fördelar går att åstadkomma med en termittändare som genom ETI.

ETI är en mycket lovande initieringsmetod som kan ge många fördelar vid implementering i befintliga eldrörsvapensystem. En nackdel är dock att tekniken kräver mycket elektrisk energi. En termittändare skulle kunna ge många av fördelarna med ETI men har inget behov av att elektrisk energi tillförs. Detta budgetalternativ till ETI skulle innebära en helt ny initieringsmetod som om den kan fås att fungera antas bli billig och lätt att implementera i befintliga vapensystem och som jämfört med konventionell initieringsteknik antas ha högre användarsäkerhet, antas ge snabbare övertändning samt möjlighet till tändning av LOVA-krut och laddningar med högre laddningsdensitet. Dessutom undviks hantering av känsliga tändämnen.

Det pågår ett intensivt arbete med att utveckla IM-ammunition. Några nya IM-klassade produkter som är under utveckling samt vilka energetiska material de är baserade på finns redovisade i tabell 3.

Tabell 3. Nya IM-produkter under utveckling.

Utvecklare	Produkt	Ingående explosivämne
Rheinmetall	155 mm RH 30	RH-26 (I-RDX, HTPB)
TDA	120 mm granatkastarammun.	HBU 88B (I-RDX, HTPB)
GIAT	155 mm LU211-M	XF 13333 (NTO, TNT, Al, vax)
RUAG	60 mm MAPAM	PBX-110 (HMX, HTPB)
MBDA	Stridsdel för GMLRS raketer	B2214B (NTO, HMX, HTPB) och PBXN-110 (HMX, HTPB)
BAE Systems Bofors – EURENCO Bofors	Uniflex 2 modularladdningar	GUDN (FOX-12)
GIAT - EURENCO	TCM modularladdningar	HUX (TEGDN QB)

Utvecklingen går mot vapensystem och ammunition som ger ökad precision och flexibilitet samt minskad logistik och kostnad [73]. Excalibur, som är tänkt att användas på t ex det nya självgående artilleripjässystemet ARCHER, är ett exempel på sådan intelligent ammunition. GPS-navigering samt nära vertikal nedstigning ger hög precision (20 m) och liten kollateral verkan. Basflödesladdning och roterande bakre fenor bidrar till en räckvidd på 20-40 km. Excalibur kan också laddas med sensoraktiverade substridsdelar som BONUS. Utvecklingen av modularladdningssystem som MACS (Modular Artillery Charge System) och Uniflex 2 ger minskad logistik med runt 30 %. Modularladdningarna uppges också hålla en jämnare kvalitet [5] som ger en mindre variation i mynningshastighet mellan olika laddningar.

8 Referenser

- [1] Fair H.D., "Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era", Proceedings of the 12th EML Symposium **(2004)** 1-8.
- [2] Hinton M. and Gilbert S., "UK Electric Gun National Overview", Proceedings of the 12th EML Symposium **(2004)** 9-14.
- [3] Shvetsov G.A., "Overview of EML Research in Russia", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 15-20.
- [4] Wald S. et al, "ETC Research at Soreq NRC, Israel", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 20-26.
- [5] Bemm E., "Utvecklingsmöjligheter och trender inom området utskjutning", FOI-R—1324—SE **(2004)** 1-51.
- [6] Mc Nab I.R. et al. "Development of a Naval Railgun", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 76-80.
- [7] Andreasson S. and Carlsson M.U. "Results from Initial ETC Closed Vessel Experiments." IEEE Transactions on Magnetics 35 (1): **(1999)** 181-184.
- [8] Andreasson S., Bemm E. och Nyholm S.E., "Resultat och erfarenheter från forskningen inom ETK-området", FOI-R—0299—SE **(2001)** 1-18.
- [9] Andreasson S., Bemm E. och Skoglund M., "Stimulering av krutförbränning genom tillförsel av elektrisk energi i flaman", FOI-R—0640—SE **(2002)** 1-31.
- [10] Andreasson S., Larsson A., "Utvärdering av ett ETK-koncept där krutförbränningen stimuleras av elektrisk ström som leds genom flaman", FOI-R—0995—SE **(2003)** 1-25.
- [11] Andreasson S., Bemm E. and Nyholm S.E., "ETC Closed-Vessel Experiments with Alkali-Doped Propellants", IEEE Trans. Magn. 39 **(2003)** 202-206.
- [12] Menning D., Akyuz M., Andreasson S., Bemm E., Larsson A., Norrefeldt M., Skoglund M., "ETK-verksamheten vid FOI Vapen och skydd under 2004", FOI-R—1397—SE **(2004)** 1-57.
- [13] Andreasson S., Bemm E., Larsson A., Nyholm S.E., "Evaluation of an Electrothermal-Chemical Concept Where Propellant Combustion Is Stimulated by Conducting Electric Current Through the Flame", IEEE Trans. Magn. 41 **(2005)** 338-343.
- [14] Bemm E., Andreasson S., Akyuz M., Hurtig T., Larsson A., Redovisning av forskningsresultat från delstudier om ETK", FOI-R—1768 —SE **(2005)** 1-34.
- [15] Akyuz M., Andreasson S., Hurtig T., "Konstruktion och modellering av plasmagenerator för ETK", FOI-R—2068—SE **(2006)** 1-35.
- [16] Marchandin P., "New and Evolving IM Threats", NDIA, San Fransisco, CA, USA **(2004)** 1-17.
- [17] Karthaus W., Hordijk A.C., et al., "Development, production and Characterisation of LOVA Gun Propellants", 1st International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM), Tokyo, Japan **(2002)**.

- [18] Horst A., Baker P., et al., "Insensitive High Energy Propellants for Advanced Gun Concepts", 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland **(2001)**.
- [19] Peugeot F., Peters S., "IM Issues Related to Gun Propelling Charges Design", Report L94, NATO Insensitive Munitions Information Centre, NIMIC, NATO Hq, B-1110, Brussels, Belgium, **(2003)**.
- [20] Ogorkiewicz R.M. "In Search of Lighter, Smaller Electric Guns for Future Tanks." Jane's International Defence Review **2: (1999)** 26-31.
- [21] Asher S.H. and Bacon L.D., "The Future Combat System (FCS): Technology Evolution Review and Feasibility Assessment", *Armor*—September-October **(1997)** 29-33.
- [22] Oberle W.F. and Goodell B.D., "The Role of Electrothermal-Chemical (ETC) Gun Propulsion in Enhancing Direct-Fire Gun Lethality", 16th Int. Symp. Ballistics **(1996)** 59-68.
- [23] Baschung B. and Grune D. "Plasma Ignition Experiments with a Single-Base Propellant: Comparison between Plasma Jet and Current Injection Configuration", 32nd International Annual Conference of ICT, Karlsruhe **(2001)**.
- [24] Taylor M.J. and Dunnett J. "A Description of the Wire Explosion Processes for ETC Plasma Generators." IEEE Transactions on Magnetics **39(1): (2003)** 269-274.
- [25] Kappen K. and Bauder U.H. "Calculation of Plasma Radiation Transport for Description of Propellant Ignition and Stimulation of Interior Ballistics in ETC Guns." IEEE Transactions on Magnetics **37(1): (2001)** 169-172.
- [26] Koleczko A., Ehrhardt W., et al. "Plasma Ignition and Combustion." Propellants, Explosives, Pyrotechnics **26: (2001)** 75-83.
- [27] Kaste P., Kinkennon A., et al. "Chemical Characterization of Plasma-Treated Propellant Samples." Journal of Energetic Materials **19: (2001)** 119-154.
- [28] Mc Nab I.R., "Early Electric Gun Research", IEEE Transactions on Magnetics **35(1): (1999)** 250-261.
- [29] Beyer R.A., Pesce-Rodriguez R.A., "The Response of Propellants to Plasma Radiation", *IEEE Transactions on Magnetics* **41 (1): (2005)** 344-349.
- [30] Taylor M.J., "Consideration of the Energy Transfer Mechanisms Involved in SPETC Ignition Systems." IEEE Transactions on Magnetics **39(1): (2003)** 262-268.
- [31] Taylor M.J., "Evidence for the Hypothesis of Ignition of Propellants by Metallic Vapour Deposition." Propellants, Explosives, Pyrotechnics **27: (2002)** 327-335.
- [32] Taylor M.J., "Ignition of Propellants by Metallic Vapour Deposition for an ETC Gun System." Propellants, Explosives, Pyrotechnics **26: (2001)** 137-143.
- [33] Li J. et. al., "Study of Plasma-Propellant Interaction During Normal Impingement", *Journal of Propulsion and Power* **22 (2006)** 929-937.
- [34] Andreasson S., "Innerballistisk simulering i Gale2d", FOI-R—2001—SE (2006) 1-19.

- [35] Unosson M., Olovsson L. Andreasson S., "Two-dimensional finite element model for simulation of the interior ballistics of guns", FOI-R—1690—SE **(2005)** 1-28.
- [36] Tucker T.J., Toth R.P., "A Computer Code for the Prediction of the Behaviour of Electrical Circuits Containing Exploding Wire Elements, SAND-75-0041, Sandia Laboratories **(1975)**.
- [37] Powell J.D. and Zielinski A.E., "Theory and Experiment for an Ablating-Capillary Discharge and Application to Electrothermal- Chemical Guns", BRL: Aberdeen Proving Ground, MD USA **(1992)** 1-50.
- [38] McBride B.J., Gordon S., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications", in NASA Reference publication, Lewis Research Center, Cleveland **(1996)**.
- [39] Sod G.A., "A Survey of Several Finite Difference Methods for Systems of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws", Journal of Computational Physics **(1978)** 1-31.
- [40] Taylor M.J., "Plasma Propellant Interactions in an Electrothermal-Chemical Gun", PhD Thesis, Cranfield University, Royal Military College of Science, UK, September **(2002)**, 1-493.
- [41] Pettersson A., "Reserapport från besök på QinetiQ – Mätning av plasmatemperatur", FOI-D—0277—SE **(2006)** 1-9.
- [42] Corner J., "Theory of the interior ballistics of guns", Wiley, New York, **(1950)**.
- [43] Svensson A., "Ignition of Double Base Propellant Using Exploding Foils", FOA-R—99-01251-310—SE **(1999)** 1-16.
- [44] Bemm E., Borong M. och Wanhatalo M., "Framställning av ETK-anpassade krut samt polymermatris för ADN-baserade krut", FOI-R—0572—SE **(2002)** 1-28.
- [45] Olovsson L., Helte A., "GRALE2D - an explicit finite element code for twodimensional plane and axi-symmetric multi-material ALE simulations", in: V. Sanchez-Galvez, C. A. Brebbia, A. A. Motta, C. E. Anderson (Eds.), Computational Ballistics II, Vol. 40 of WIT Transactions on Engineering Sciences, Wessex Institute of Technology, UK, WIT Press, Cordoba, Spain, **(2005)** pp. 137–145.
- [46] Kubota N., "Propellants and Explosives", Wiley-VCH GmbH, Weinheim, Germany, **(2002)**.
- [47] Pillai A.G.S., Joshi M.M., Barve A.M., Velapure S.P. and Karir J.S., "Celulose Acetate Binder-Based LOVA Gun Propellant for Tank Guns", Def. Sci. J. 49 **(1999)** 141-149.
- [48] Joshi M.M., Dayanandan C.R., Pillai A.G.S., Gandhe B.R. and Karir J.S., "Role of Bimodal RDX in LOVA Gun Propellant Combustion", Def. Sci. J. 48 **(1998)** 317-321.
- [49] Pillai A.G.S., Dayanandan C.R., Joshi M.M., Patgaonkar S.S. and Karir J.S., "Studies on the Effects of RDX Particle Size on the Burning Rate of Gun Propellants", Def. Sci. J. 46 **(1996)** 83-86.
- [50] Östmark H., Bergman H., Bemm U., Goede P., Holmgren E., Johansson M., Langlet A, Latypov N. V., Pettersson A., Pettersson M.-L., Wingborg N., Vörde C., Stenmark H., Karlsson L. and Hihkiö M., "2,2-Dinitro-

- ethane-1,1-diamine (FOX-7) – Properties, Analysis and Scale-up”, 32nd Intern. Annual Conf. ICT, Karlsruhe, **(2001)**, 1-21
- [51] Bemm E., Menning D., Adolfsson R., Pettersson Å., ” Karaktärisering av kanonkrutsformuleringar baserade på FOX-7 samt framställning av snabbbrinnande krut och ETK-anpassade krut”, FOI-R—1269—SE **(2004)** 1-32.
- [52] Eldsäter C., Wingborg N., Sandén R., “Energetic binders for high performance propellants”, FOA-R—00-01610-310—SE **(2000)**.
- [53] Edvinsson H., Eldsäter C., Johansson M., Pettersson Å., ”Formulering och karakterisering av ett lågkänsligt sprängämne baserat på FOX-7”, FOI-R—0379—SE **(2002)**.
- [54] Adolfsson R., Bodin L., Eldsäter C., Pettersson Å., Roman N. och Wanhatalo M., ”Optimisation and characterization of compositions with low sensitivity based on FOX-7 and energetic binders. Large scale GAP test of pure FOX-7”, FOI-R—0668—SE **(2002)**.
- [55] Bemm E., Menning D. och Wanhatalo M., ”Kanonkrutsformuleringar med FOX-7 samt formulering av ETK-anpassade krut”, FOI-R—0945—SE, **(2003)** 1-20.
- [56] Eisenreich N., Eckl W., Fisher T., Weiser V., Kelzenberg S., Langer G. and Baier A., ”Burning Phenomena of the Gun Propellant JA2”, Propellants, Explosives, Pyrotechnics **(2000)** 143-148.
- [57] Tompkins R.E., White K.J., Oberle W.F., Juhasz A.A., “Traveling Charge Gun Firing Using Very High Burning Rate Propellants”, ARL ADA203307 **(1988)** 1-35
- [58] Boaz B. et al.,”Experimental Demonstration and Simulation of a Dual-Stage Solid Propellant Gun Concept”, Journal of Propulsion and Power **(1994)** 279.
- [59] Beyer R.A. et al, “The Response of Propellants to Plasma Radiation”, Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 273-278.
- [60] Schroeder M.A. et al, “Scanning Electron Microscope Examination of JA2 Propellant Samples Exposed to Plasma Radiation”, Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 289-294.
- [61] Taylor M.J., “Mechanisms Leading to the Enhancement of Gas Generation Rates in ETC Guns”, Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 318-323.
- [62] Ogorkiewicz R.M., “UD makes major ETC gun advance”, Jane’s International Defence Review, Aug 01 **(2005)**.
- [63] R. Sandén, “Kompositkrut med höga brinnhastigheter”, FOI-R—1205—SE, **(2004)** 1-15.
- [64] Defence Industry Daily , 10 Juli **(2006)**
- [65] Williams R.H., National Defense Oct. **(2006)**
- [66] Barnes P.N. et.al, “Compact, Lightweight, Superconducting Power Generators”, Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 158-163.
- [67] Dai et al., “Electrical Characteristics of High Energy Density MLC For Pulse Power Application”, Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 171-175.

- [68] Slens K.M. and Bragg L.E., “Compact Capacitor Technology for Future Electromagnetic Launch Applications” Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 243-247.
- [69] Taylor, M.J., “Initial study of thermite pyrotechnic mixtures for the ignition of large calibre gun charges”, International Annual Symposium of ICT **(2005)**.
- [70] Taylor, M. J., “Consideration of the Energy Transfer Mechanisms Involved in SPETC Ignition Systems”. IEEE Transactions on Magnetics, **(2003)**. **39**:s. 262-268.
- [71] Taylor, M. J., “Evidence for the Hypothesis of Ignition of Propellants by Metallic Vapour Deposition”. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, **(2002)**. **27**:s. 327-335.
- [72] Taylor, M. J., “Ignition of Propellants by Metallic Vapour Deposition for an ETC Gun System”. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, **(2001)**. 137-143.
- [73] Bemm E., ”Reserapport – Future Artillery 2006”, FOI-D—0254—SE **(2006)** 1-8.