



Redovisning av forskningsresultat från delstudier om ETK

ELISABETH BEMM, STEN ANDREASSON,
MOSE AKYUZ, TOMAS HURTIG, ANDERS LARSSON

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Vapen och skydd
147 25 Tumba

Tel: 08-555 030 00
Fax: 08-555 031 00

www.foi.se

FOI-R--1768--SE **Vapen och skydd**
ISSN 1650-1942 Underlagsrapport

December 2005

Redovisning av forskningsresultat från delstudier om ETK

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Vapen och skydd 147 25 Tumba	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1768--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 5. Bekämpning och skydd	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E2005
	Delområde 51 VVS med styrda vapen	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Elisabeth Bemm Sten Andreasson Mose Akyuz Tomas Hurtig Anders Larsson	Projektledare Elisabeth Bemm	
	Godkänd av Torgny Carlsson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Redovisning av forskningsresultat från delstudier om ETK		
Sammanfattning <p>I rapporten redovisas det arbete som genomförts vid FOI Vapen och skydd under 2005 inom olika ETK-delstudier. ETK-forskningen har under 2005 ominriktats mot elektrotermisk initiering (ETI) som närmar sig implementering i färdiga vapensystem och därmed förväntas ge färdiga tillämpningar i närtid. Parallellt med förberedelsearbetet för ETI-experiment har ett antal avslutande CF-experiment utförts. En redovisning av betydelsen av krutets transparens för CF-experimenten samt en sammanfattning av forskningsresultaten hittills ges i denna rapport. Arbetet har påbörjats med att bygga upp en experimentuppställning för att studera olika parametrars inverkan på plasmaintieringsförloppet. För att kunna ge lämpliga ingångsparametrar för plasmaintieringsexperimenten är det nödvändigt att kunna modellera hela plasmaintieringsförloppet. En datormodell för plasmagenerators och initieringsförloppet byggs därför upp. Arbetet med både experimentuppställningen och plasmageneratormodellen redovisas i rapporten.</p>		
Nyckelord ETK, plasmaintiering, CF-konceptet, modellering av plasmagenerator		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 34 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Vapen och skydd 147 25 Tumba	Report number, ISRN FOI-R--1768--SE	Report type Base data report
	Programme Areas 5. Strike and protection	
	Month year December 2005	Project no. E2005
	Subcategories 51 Weapons and Protection	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Elisabeth Bemm Sten Andreasson Mose Akyuz Tomas Hurtig Anders Larsson	Project manager Elisabeth Bemm	
	Approved by Torgny Carlsson	
	Sponsoring agency FM	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Results from ETC-studies		
Abstract <p>Results from ETC-studies at FOI Weapons and Protection during 2005, are presented in this report. This ETC research has changed emphasis towards electrothermal initiation (ETI) during 2005. ETI is approaching implementation in weapon systems and is thereby expected to result in complete applications in the near future. Some final experiments concerning the ETC concept “the conducting flame” (CF) have been performed. A summary of the results from CF-experiments up to now is given in the report. In parallel with the CF-experiments, preparations for the ETI-experiments have been started. An experimental setup is under construction to be able to study the influence of different parameters on the initiation process. To be able to give adequate starting parameters for these ETI-experiments it is also necessary to be able to model the initiation process. Both the efforts in creating a computer model for the initiation process and the construction of the experimental setup is described in the report.</p>		
Keywords ETC, plasma initiation, CF-concept, modelling of a plasma generator		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 34 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	INLEDNING	7
2	SAMMANFATTNING AV RESULTAT FRÅN CF-EXPERIMENT	8
2.1	CF-konceptet	9
2.2	Försöksuppställning för CF-experimenten	9
2.3	Urladdningsfenomen	10
2.4	Resultat från CF-experiment	11
2.5	Betydelse av krutets sammansättning	13
2.6	Utvärdering av CF-konceptet	16
2.7	Slutsatser	17
3	KONCEPT MED LEDANDE FOLIER FÖR KRUTINITIERING	17
4	ELEKTROTERMISK INITIERING	19
4.1	Uppbyggnad och funktion av plasmagenerator	19
4.2	Modellering av plasmagenerator	20
5	FORTSATT ARBETE INOM ETK VID FOI	29
6	FORSKNING KRING NYA UTSKJUTNINGSTEKNIKER	30
7	REFERENSER	32

1 Inledning

Elektrotermisk kemisk utskjutning (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/eller kompensation för brinnhastighetens temperaturberoende i eldrörsvapen [1]. Befintliga eldrörsvapen kan i viss utsträckning konverteras för ETK. Forskning om ETK har bedrivits vid FOI Vapen och skydd under ett antal år [2] - [8]. Dessa forskningsinsatser har främst varit inriktade mot stimulering av krutförbränning genom ett ETK-koncept kallat ”ledande flamma” (CF, conducting flame) [2] - [8].

De krutgaser som bildas i eldröret utövar ett expansionstryck på projektilens bakplan som varierar under utskjutningsfasen. Tidsintegralen av denna tryckkurva utgör väsentligen det arbete som krutgaserna utför på projektilen, vilket betyder att storleken på mynningsenergin är starkt beroende av tryckkurvas utseende. Genom att stimulera krutförbränningen vid lämpligt valda tidpunkter skulle det därför vara möjligt att påverka tryckkurvan på ett sådant sätt att en högre mynningsenergi erhålls. ETK applicerat på stimulering av krutförbränning är den ETK-tillämpning som har potential att ge störst ökning av mynningsenergin men också den som kräver mest elektrisk energi.

Avsikten med CF-experimenten har inledningsvis varit att åstadkomma stimulering av krutförbränningen i en sluten bomb där en elektrisk ström leds genom området kring krutflamman. I ett senare skede är målsättningen att kunna påverka tryckförloppet i en kanon på ett sådant sätt att en högre mynningsenergi kan erhållas. Vid ett antal experiment i en sluten bomb har det gått att påvisa en stimulering av krutförbränningen vid elektrisk energitillförsel [3]-[8]. Detta visar att konceptet har potential för en framtida ETK-tillämpning. 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.

ETK-forskningen vid FOI har under 2005 omdirigerats mot ETI som börjar närma sig implementering i färdiga vapensystem och därmed förväntas ge färdiga tillämpningar i närtid. Parallellt med förberedelsearbetet för ETI-experiment har ett antal avslutande CF-experiment utförts. En redovisning av betydelsen av krutens transparens för CF-experimenten samt en sammanfattning av forskningsresultaten hittills ges i denna rapport.

Fördelen med ETI jämfört med konventionella initieringsmetoder är att den ger betydligt snabbare övertändning av krutladdningen och en mycket högre repeterbarhet i tändningsprocessen från skott till skott, vilket innebär minskad spridning i mynningshastighet och därmed ökad träffsannolikhet. För att fördelarna med ETI skall kunna utnyttjas optimalt krävs vidareutveckling av plasma-generatorerna samt en ökad förståelse för hur plasmat påverkar krutförbränningen. Arbetet pågår för närvarande på FOI med att bygga upp en experimentuppställning för att studera olika parametrars inverkan på plasmainitieringsförloppet. För att

kunna ge lämpliga ingångsparametrar för plasmainitieringsexperimenten och tolka de resultat som erhålls är det nödvändigt att kunna modellera hela plasmainitieringsförloppet. Det pågår därför även arbete med att bygga upp en datormodell för plasmageneratoren och initieringsförloppet [7]. Arbetet med både experimentuppställning och plasmageneratormodellering beskrivs i rapporten.

Stora forskningsinsatser koncentreras runt om i världen på att framställa lågkänsliga kanonkrutsformuleringar (LOVA-krut) [9]-[11]. 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. Kunskaperna om vilka egenskaper hos kruten som krävs för att de skall vara idealt anpassade för plasmainitiering skulle dock behöva förbättras. Nitrocellulosa (NC) som är en av huvudingredienserna i traditionella kanonkrut är inte attraktiv som ingrediens i LOVA-krut på grund av dess höga värmekänslighet och dåliga lagringsegenskaper. LOVA-krut utan NC blir hårdplastbaserade och tillverkningen av dessa kompositkrut har stor likhet med tekniken för att framställa plastbundna sprängämnen (PBX). Vid FOI finns lång erfarenhet av tillverkning av PBX och framställning av några formuleringar baserade på det lågkänsliga explosivämnet FOX-7 har redan startat. Detta arbete har redovisats utförligt i andra rapporter [12]-[14] och beskrivs därför inte vidare i denna rapport. Avsikten är att få fram ett LOVA-krut som har hög prestanda, är mycket lågkänsligt, har bra lagringsegenskaper och går att initiera med hjälp av ETI. Formuleringarna kommer att testas i plasmainitieringsexperiment vid FOI. ETI ger också möjlighet till snabb och homogen tändning av krutladdningar med hög laddningsdensitet, vilket inte är möjligt med konventionella initieringsmetoder.

Forskningen i omvärlden kring nya utskjutningstekniker som ETK, rälskanoner och spolkanoner har följts genom internationella kontakter via samarbeten, konferenser och möten samt genom artiklar i internationella tidskrifter. En sammanfattning och analys av dessa forskningsinsatser redovisas i denna rapport.

2 Sammanfattning av resultat från CF-experiment

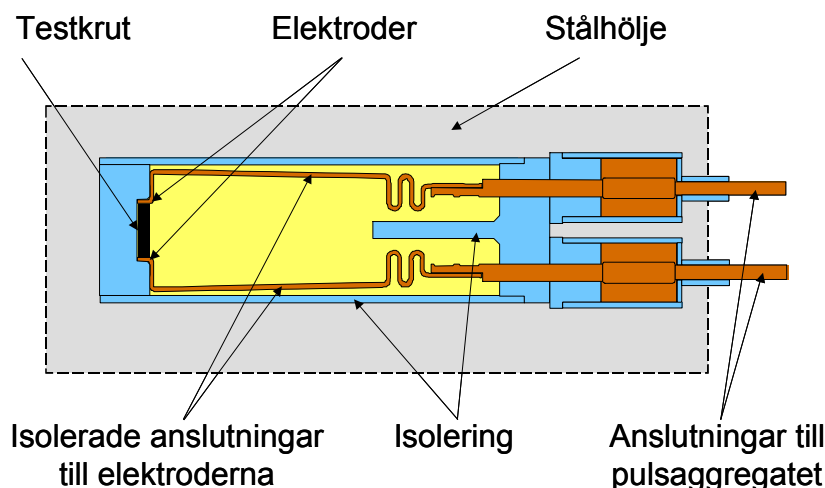
Vid plasmainitiering strävar man efter att generera ett plasma med låg medelatomvikt. Ett sådant plasma kan lätt penetrera in i krutkornens perforeringar och ge en snabb initiering med hög repeterbarhet. Plasmageneratorer kan dock även användas för att stimulera krutförbränningen efter det att tändningen skett. 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. På så sätt kan en mer energieffektiv stimulans av krutförbränningen åstadkommas.

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 flammen 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 flammen krävs att den har en förhöjd elektrisk ledningsförmåga jämfört vad som erhålls vid förbränning av konventionella krut. Den förhöjda elektriska ledningsförmågan i flammen åstadkoms genom att dopa kruten med lättjoniserade alkalitillsatser (i de flesta fall kaliumnitrat). En mer utförlig beskrivning av CF-konceptet går exempelvis att finna i referenserna [3]-[5].

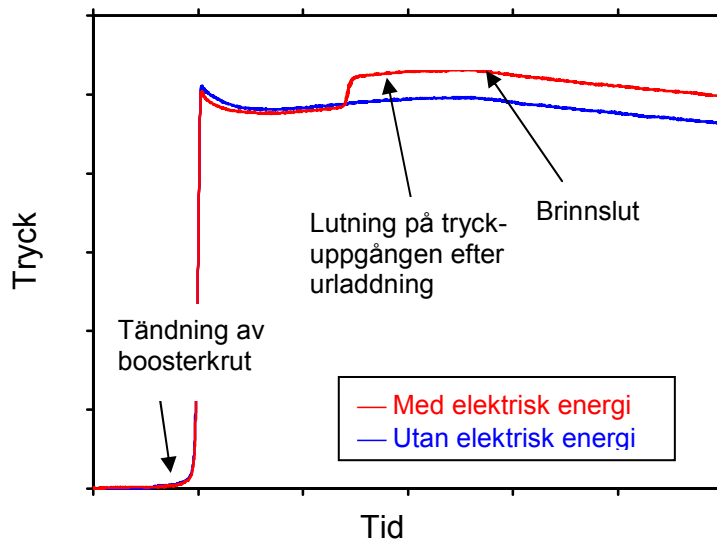
2.2 Försökuppställning för CF-experimenten

CF-experimenten har utförts i en sluten bomb (se figur 1). För att skapa ett lämpligt arbetstryck i kammaren används först en bestämd mängd snabbrinnande 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 brinnsträcka inte går att mäta går det heller inte att få uppgifter om hur brinnhastigheten varierar under förloppet.



Figur 1. Försökuppställning för CF-experiment.

Genom att den totala brinnsträckan är känd kan däremot en medelbrinnhastighet bestämmas genom att det går att avläsa ett tydligt brinnslut ur tryckkurvan (se figur 2). Genom att jämföra tidpunkt för brinnslut samt lutningen på tryckuppgången (se figur 2) 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 [3]-[5].



Figur 2. Tryckkurvor från CF-experiment.

2.3 Urladdningsfenomen

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. Urladdningsförloppet i flamman 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. Glimurladdningen är en volymsurladdning som påverkas av flammans elektriska ledningsförmåga och uppvisar ett kontrollerbart tidsförlopp. Volymsurladdningen ger en jämn spridning av energitillskottet över krutytan men effekten är låg på grund av den låga strömtätheten. Vid katoden är strömtätheten konstant och beror av temperaturen samt elektronernas utträdearbete ur katodmaterialet. Bågurladdning, som är en linjeurladdning, har hög effekt men är svårkontrollerad och ger en ojämn påverkan över krutytan. Var bågurladdningen

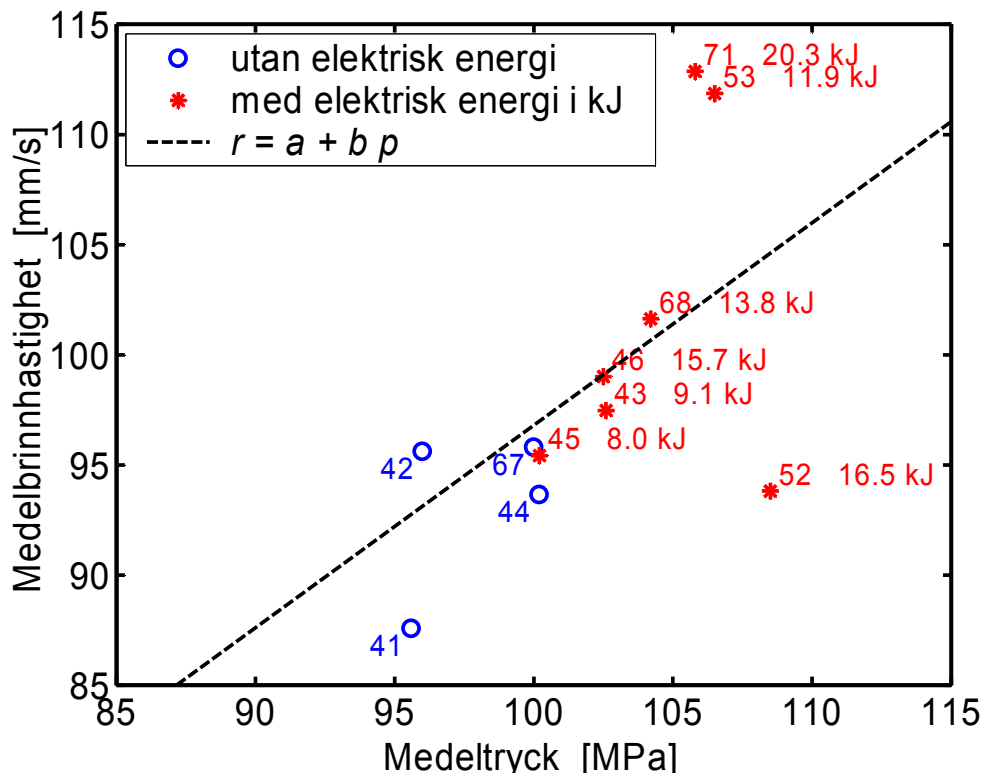
sker påverkas mycket lite av flammans ledningsförmåga eftersom strömmen i huvudsak går genom ljusbågen (som nödvändigtvis inte är där flammen är). I CF-experimenten är det fördelaktigt med en bågurladdning eftersom strömtätheten då är hög. Nackdelen är att det är svårt att kontrollera läget på ljusbågen som helst skall gå genom flammen nära krutytan. Med nuvarande experimentuppställning går det inte att studera var bågurladdningen sker och hur ljusbågen rör sig under förbränningsförloppet. I referens [7] ges en mera utförlig analys av de elektriska urladdningsfenomenen.

2.4 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 3 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.

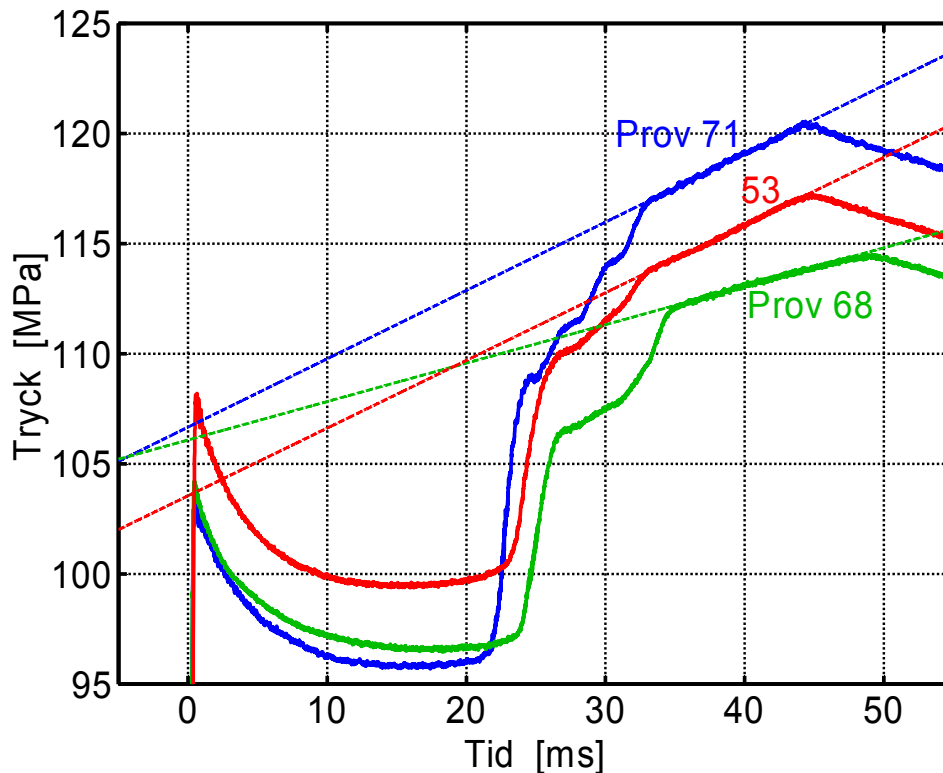
Tabell 1. Sammanställning av krutsort, brinntid, uppmätt urladdad elektrisk energi, laddnings-spänning och induktans för olika prov. NzK5230 och Nk1287 är två olika dubbelbaskrut. GAP/HMX/Al är ett kompositkrut baserat på den energetiska polymeren glycidylazidpolymer (26 %) och oktogen som energetiskt 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



Figur 3. 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.

Medelbrinnhastigheten i de flesta av de redovisade försöken i figur 3 ligger samlade längs linjen $r = a + b \cdot p$. Linjen motsvarar ett typiskt tryckberoende för krutets brinnhastighet (enligt Muraour-Aunis brinnekvation [15]) 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 dem kring linjen. Dessa prov uppvisar också en brantare lutning på tryckkurvan efter tillförseln av den elektriska energin än övriga prov (se figur 4), 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 det att krutet brunnit slut. För proven 41 och 52 saknas det dock en rimlig förklaring till de låga medelbrinnhastigheterna.



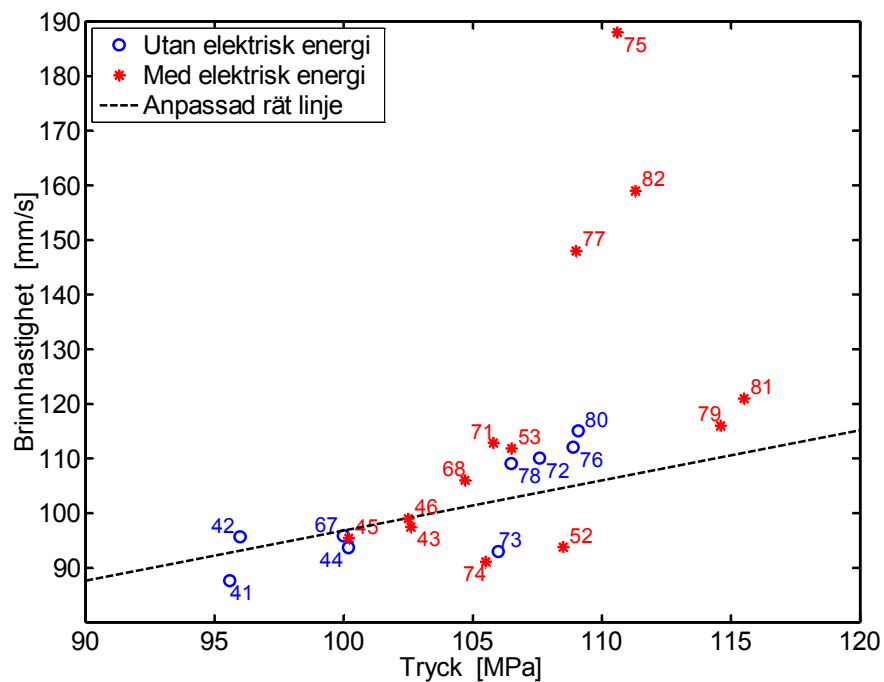
Figur 4 Prov nummer 53 och 71 uppvisar en brantare lutning på tryckkurva (snabbare förbränning) efter elektrisk urladdning än prov 68 som uppvisar en typisk lutning. Lutningen är ca 0,31 MPa/ms för prov 53 och 71 samt ca 0,17 MPa/ms för prov 68.

2.5 Betydelse av krutets sammansättning

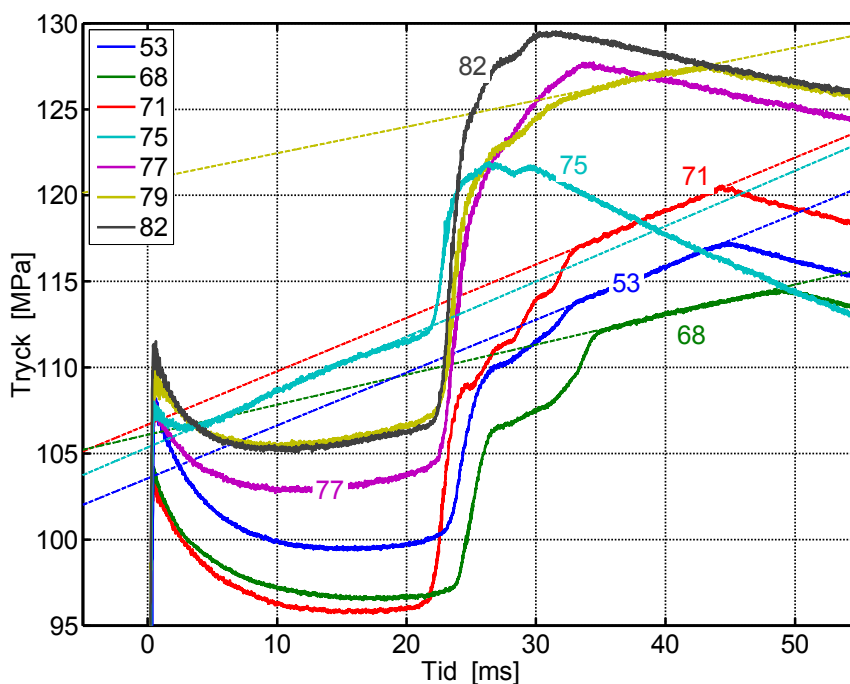
Vid de första inledande försöken användes konventionellt dubbelbaskrut för testladdningen. Dessa krut visade sig dock ge en krutflamma med alldeles för låg elektrisk ledningsförmåga [2]. Detta resulterade i långa och varierande fördröjningar av urladdningarna som dessutom var mycket svårkontrollerade. För att öka flammans ledningsförmåga har kruten därför dopats med en alkalitillsats som i de flesta fall utgörs av 5 % kaliumnitrat.

Vid plasmaintivering 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 flaman i CF-experimenten. Ett antal experiment har därför gjorts där skillnaden i resultat vid CF-experiment jämförts då transparenta och opaka krut använts.

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 klart högre medelbrinnhastighet än vad som erhållits vid experiment med de opaka kruten (se figur 5) 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 6). 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.



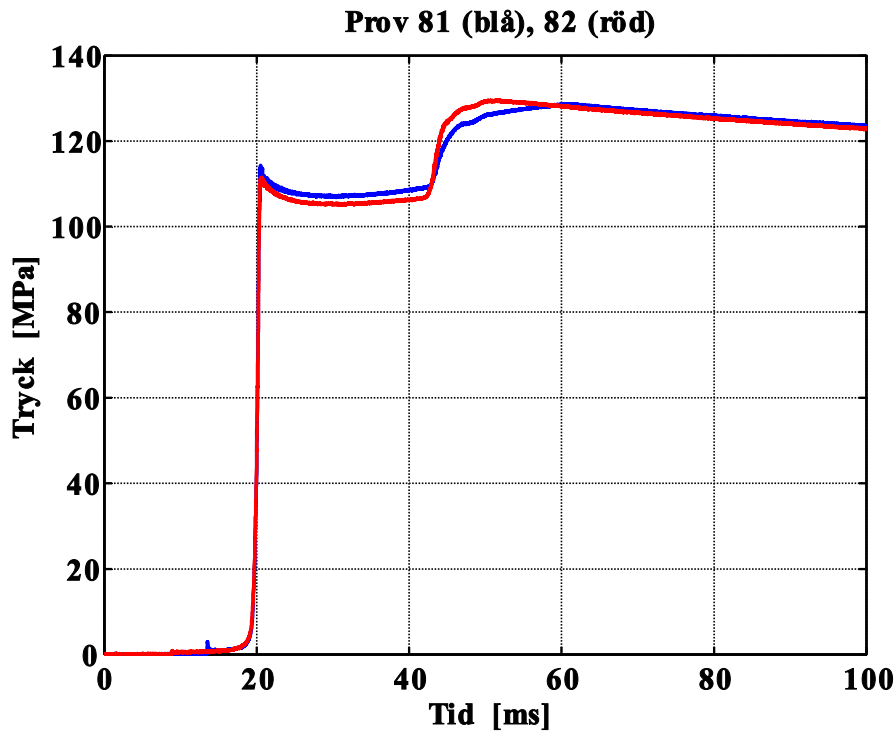
Figur 5. Medelbrinnhastigheten för testkrutet som funktion av medeltrycket i kammaren vid ett antal försök. Tvåsiffrigt heltal anger löpnummer för provet, blå ringar betecknar prov utan elektrisk energitillförsel och röda asterisker är prov med tillförd elektrisk energi, angiven i kJ. Linjen $r = a + b \cdot p$ är ett medelvärde för brinnhastigheten, som funktion av trycket. Observera att en ny limningsteknik har tillämpats från och med prov 72, vilket generellt har resulterat i något högre medelbrinnhastigheter än tidigare.



Figur 6. 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 7 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.

I samtliga krut som använts vid de CF-experiment som redovisas i denna rapport, har 5 % kaliumnitrat tillsats för att öka den elektriska ledningsförmågan i flammen. 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 krutflammen har därför 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 (prov 73 och 74). Men som framgår av figur 5, gav den elektriska urladdningen ingen extra stimulans av krutförbränningen vid experiment med dessa krut.



Figur 7. Tryckkurvor för två olika CF-experiment där ett opakt (prov 81) respektive transparent (prov 82) krut med för övrigt exakt samma krutsammansättning använts.

2.6 Utvärdering av CF-konceptet

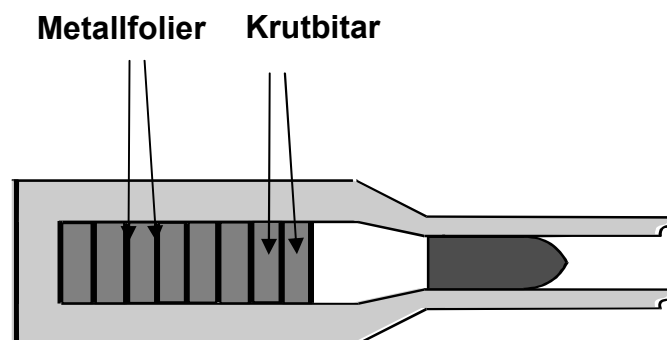
En mycket grov uppskattning har gjorts av effekten av elektrisk energitillförsel vid CF-experiment där stimulering av krutförbränningen har kunnat påvisas. För denna grova analys har tryckkurvor från två olika experiment använts, prov 68 och 71 (se figur 4). I prov 71 har stimulering av krutförbränningen inträffat medan ingen påverkan har skett i prov 68. De totala brinntiderna för prov 68 respektive prov 71 är 49 och 44 ms. Vid en total brinnsträcka på 5,20 respektive 5,04 mm blir de beräknade medelbrinnhastigheterna 106 mm/s och 113 mm/s. Detta motsvarar en ökning av medelbrinnhastigheten på ca 9 %. Eftersom det inte går att ta reda på hur stor del av krutet som brunnit slut vid tidpunkten för den elektriska urladdningen kan endast medelbrinnhastigheten och inte den verkliga brinnhastighetsökningen efter den elektriska urladdningen bestämmas. Det går dock att säga att den verkliga brinnhastighetsökningen efter den elektriska urladdningen är minst så stor som ökningen i medelbrinnhastighet d v s i det här fallet större än 9 %. Beräkningsarbete pågår för att göra en uppskattning av vad en ökning i brinnhastighet på 10 % efter tryckmaximum skulle innebära för mynningsenergi och tryckkurvornas utseende.

2.7 Slutsatser

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. Den elektriska urladdningen ger en ökning av medelbrinnhastigheten på minst 10 %. 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.

3 Koncept med ledande folier för krutinitiering

Detta koncept har tidigare studerats vid FOI [16]. Avsikten med konceptet är att kunna kontrollera den totala brinnytan för krutladdningen under brinnförloppet i eldröret för att påverka tryckkurvan. 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 8). 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 8. Schematisk bild över foliekonceptet vid en tänkt implementering i ett eldrör.

Vid de tidigare experimenten som redovisades i referens [16] 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 [7]. 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. Tiden det tar för folien att uppnå en viss temperaturökning på ΔT grader fås ur uttrycket

$$\Delta t = \frac{A^2 \rho C_p}{r I^2} \Delta T \quad (1)$$

där A = foliens tvärsnittsarea
 ρ = densiteten
 C_p = värmekapacitivitet vid konstant tryck
 r = elektriska resistiviteten
 I = konstant värde på den ström som flyter genom folien.

Ekvation (1) är en korrigerad av ekvation (D) som anges i referens [7]. Vid konstant tvärsnittsarea, strömstyrka och önskvärd temperatur kan därför val av foliematerial optimeras med så lågt värde på kvoten $C_p \rho / r$ som möjligt. Värdet på kvoten $C_p \rho / r$ för ett antal olika material finns tabellerat i tabell 2.

Den aktuella försöksuppställningen som beskrivs i referens [7] 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 så ger ekvation (1) ovan att folien värms upp 1 K på 36 μs då materialdata enligt tabell 2 används. 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. Enligt resonemanget ovan skulle en kolfolie vara det bästa materialvalet. Motsvarande värde för en kolfolie är dock endast 65 K, även det för lågt. 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.

Tabell 2 Olika material lämpliga för utprovning som foliematerial.

Ämne	Densitet [g/cm ³]	Elektrisk resistivitet [Ωμm]	Värmeledningsförmåga [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Värmekapacitivitet [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Emissivitet ¹ polerad/ opolerad	Smältpunkt [°C]	$\frac{C_p \rho}{r}$
Grafit	2,25	13,0	150	711	0,98	>3000 ₂	1,2
Titan	4,54	0,42	-	522	-	1948	56
Konstantan ³	8,9	0,52	19,5	410	0,09/	≈1250	70
Tantal	16,6	0,125	-	141	0,02/0,21	3269	187
Wolfram	19,3	0,0565	170	133	0,03/0,27	3410	454
Molybden	10,22	0,052	-	248	0,10/ -	2880	488
	2,7	0,0265	238	903	0,04/0,31	660	920
Aluminium							
Silver	10,5	0,0159	-	236	0,02/ -	1234	1558
Koppar	8,96	0,0167	400	385	0,02/0,78	1083	2065

¹Temperatur ej angiven.

²Sublimerar.

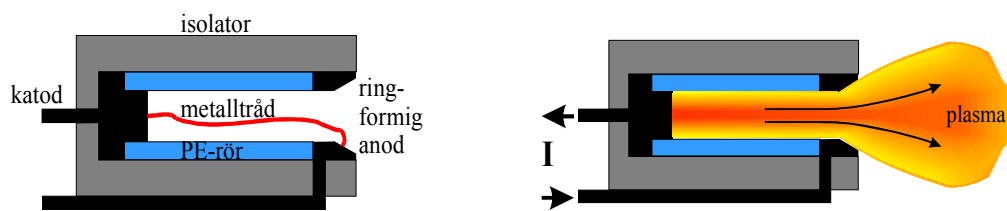
³Kopparlegering med 40-45 viktprocent nickel

4 Elektrotermisk initiering

Tekniken för elektrotermisk initiering finns utförligt beskriven i t ex referens [1], [7] och [17]. Mycket kortfattat sker ETI eller plasmainitiering genom att ett plasma, som bildas via en elektrisk urladdning i en plasmagenerator, antänder krutladdningen. Den vanligaste plasmainitieringsmetoden är plasmainjektion (PI), där plasmageneratoren är monterad i bakstycket och plasmat strömmar axiellt in mot krutbädden.

4.1 Uppbyggnad och funktion av plasmagenerator

Vid plasmainitieringsexperimenten som planeras vid FOI kommer en axiell plasmagenerator att användas (se figur 9). Denna typ av plasmagenerator består av ett yttre hölje av isolerande material med metallektroder placerade i ändarna. Den främre elektroden är alltid ringformad för att plasmat skall kunna strömma ut mot laddningsrummet. En tunn metalltråd ansluts mellan de båda elektroderna. Metalltråden förångas när den strömsätts och ett plasma av metallånga bildas. På insidan av plasmageneratoren placeras oftast ett plaströr av t ex polyeten som benämns kapillär. Denna typ av plasmagenerator kallas därför ofta för kapillär plasmagenerator (CPG, capillary plasma generator). Det heta plasmat orsakar erosion och förångning av kapillären som därmed bidrar till att mera material till plasmat skapas. Den stora tryckgradienten mellan plasmageneratoren och laddningsrummet driver plasmat mot krutet som antänds.

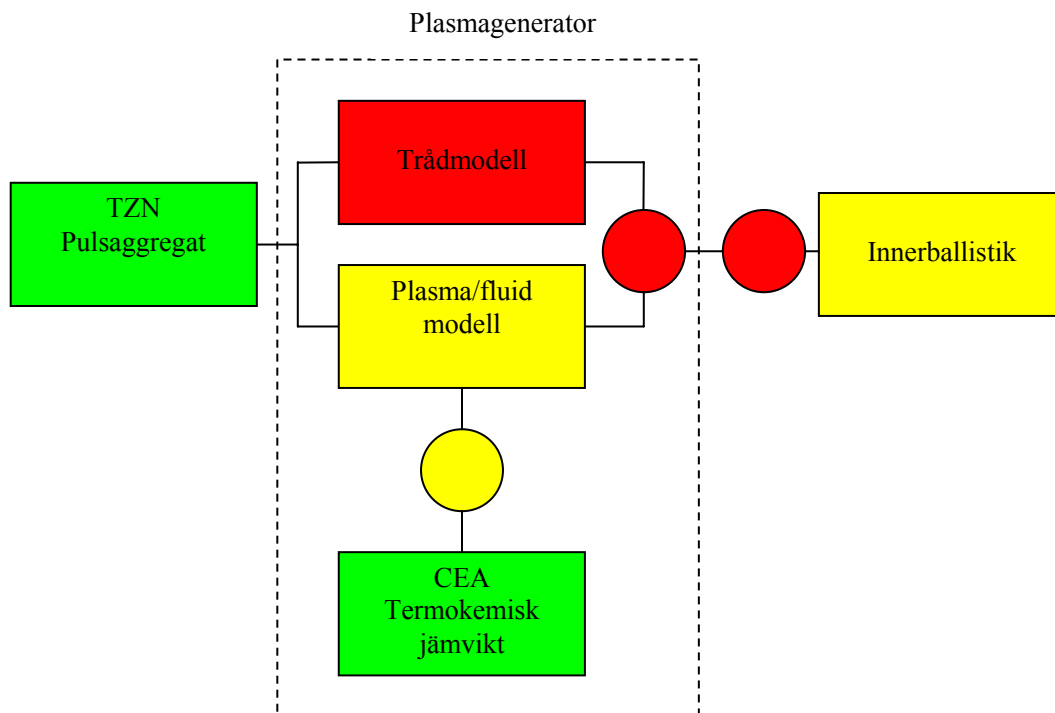


Figur 9. Funktion och uppbyggnad för en axiell plasmagenerator.

4.2 Modellering av plasmagenerator

Vid FOI har arbete påbörjats för att skapa en modell för simulering av plasmaintieringsförloppet. Denna datormodell är nödvändig för att ge lämpliga startparametrar för plasmaintieringsexperimenten. En schematisk bild över strukturen för denna beräkningsmodell ges i figur 10. Observera att detta inte är ett flödesschema utan en bild av vilka olika beräkningsmoduler som kommer att ingå i det färdiga simuleringssprogrammet. De rektangulära blocken representerar själva beräkningsmodulerna och de cirkulära blocken representerar gränssnitt mellan de olika modulerna. Grön färg indikerar att detta block är färdigt (sett som fristående beräkningsmodul), gul färg indikerar att arbetet med att söka/ta fram modeller samt att implementera dessa är påbörjat, slutligen indikerar den röda färgen att arbetet med denna modul ännu ej kommit igång på allvar.

Det bör poängteras att även om gränssnitten ser mindre ut i bilden kan de vara minst lika arbetskrävande att få färdiga som någon av de fristående modulerna. Det ännu ej påbörjade gränssnittet mellan plasma/trådmodellerna och innerballistikkoden kommer till exempel att vara mycket arbetskrävande. Ramverket för simuleringarna kommer att vara Matlab/Simulink/SimPowerSystems. En modell av pulsaggregatet finns redan implementerad i detta språk (Simulink/SimPowerSystems). Trådmodellen och plasma/fluid-beräkningarna kommer också att skrivas i form av Matlab/Simulink funktioner medan de termokemiska jämviktsberäkningarna kommer att utföras med den färdiga FORTRAN-koden CEA från NASA [18]-[19]. Innerballistiska beräkningar kommer att utföras med vår egenutvecklade GRALE (GRindsjön Arbitrary Lagrangian-Eulerian) kod, även den skriven i FORTRAN [20]. Att koppla denna kod till resten av programpaketet är dock inte något som kan ske under det närmaste året utan först i ett senare skede.



Figur 10. Schematisk bild av de olika beräkningsmoduler som kommer att ingå i den kompletta/färdiga simuleringskoden. Rektanglar indikerar beräkningsmoduler och cirklarna är gränssnitt mellan de moduler som är skrivna i andra programspråk än Matlab/Simulink/SimPowerSystems som är huvudspråk för detta programmeringsprojekt. Grön färg indikerar färdig modul, gul färg betyder att programmering påbörjats och röd färg betyder att programmeringsarbetet ännu ej startat.

Notera också att denna modul inte är nödvändig för att modellera experiment med enbart själva plasmageneratoren. Simulering av plasmainitiering av krutförbränning kan dessutom göras i två oberoende steg där plasmageneratoren simuleras separat och resultatet ges som indata till en innerballistisk simulering. Det arbete som återstår innan det är möjligt att börja göra inledande simuleringar av pulsaggregat och plasmagenerator är i huvudsak att ta fram och implementera en modell för den exploderande tråden (trådarna) samt att skriva en modul för plasma/fluid simuleringarna. Modellen för de exploderande trådarna är under utarbetande. När denna modell är färdig är det inte särskilt komplicerat att implementera den i Matlab/Simulink. Eftersom denna modul initialt styr ström/spänningskaraktäristiken för plasmageneratoren är den dock mycket viktig för att kunna testa simuleringskoden. När tråden brunnit av och kapillärmaterialet börjat ablateras och bilda plasma minskar inflytandet av denna modul och ström/spänningskaraktäristiken bestäms mera av plasma/fluidmodulen. Av denna anledning är dessa moduler ritade parallellt i figur 10.

Innehåll i respektive block:

- **TZN pulsaggregat:** Kretssimulering av kondensatorbank ger den elektriska effekten som plasmageneratoren tillförs.
- **Trådmodell:** Bidrar till bestämning av lastresistans i kretssimuleringen och kan bidra till sammansättning och tillstånd hos det utblåsta plasmat.
- **Plasma-/fluidmodell:** Interaktion mellan plasma och kapillärmaterial samt plasmats strömning i och ut ur generatoren. Bidrar till bestämning av lastresistans i kretssimuleringen och ger tillstånd och eventuellt sammansättning hos det utblåsta plasmat.
- **CEA:** Beräkning av sammansättning och tillstånd hos plasmat.
- **Innerballistik:** Krutförbränning som initieras/påverkas av det injicerade plasmat.

Ett problem med CEA-koden är att den är skriven som ett fristående program och därför måste skrivas om i form av en subrutin för att kunna användas som en del i den större simuleringskoden. Detta arbete är påbörjat men ännu ej klart. CEA-koden skall användas som hjälpmedel för att beräkna fördelningen av olika joner, neutraler och elektroner (termodynamiska jämvikten) i plasmat inuti generatoren. Dessa beräkningar skall fungera som en tillståndsekvation för de beräkningar som beskriver gasflödet inuti generatoren och även kunna ge information om jonisationsgraden hos plasmat. Tillståndsekvationen ger det matematiska förhållandet mellan olika tillståndsfunktioner som tryck, volym och temperatur i plasmat. Den allmänna gaslagen är den allra enklaste tillståndsekvationen för att beskriva tillståndet för en gas. Denna ekvation är dock inte tillämplig här eftersom den endast går att använda vid låga tryck och temperaturer.

Utifrån jonisationsgraden - alltså tätheten av fria elektroner - och information om fördelningen mellan olika neutraler, kan vi sedan beräkna en konduktivitet som ger förhållandet mellan spänning över, och ström genom, plasmageneratoren.

För att beräkna konduktiviteten hos plasmat i generatoren på ett korrekt sätt behövs information om kollisionstvårsnitt mellan neutraler och elektroner. Detta är information som kan vara mycket svårtillgänglig. För temperaturer under 5000 K antas det dock att tabellerade värden kan användas och sedan, vid högre temperaturer, försumma inverkan av kollisioner mellan elektroner och neutraler och endast ta hänsyn till jon-elektron kollisioner. Detta kommer att förenkla beräkningarna avsevärt.

Vid elektron-jon kollisioner styrs kollisionsprocessen av elektriska Coulombkrafter och kallas därför Coulombkollisioner. De uppvisar helt andra karakteristika än kollisioner mellan elektroner och neutralgaspartiklar. Exempelvis har Coulombkrafterna lång räckvidd och partikelrörelsen blir präglad av denna ständiga växelverkan mellan tunga joner och lätta elektroner. Vid de binära kollisioner som karakteriserar interaktionen mellan neutraler och elektroner kan rörelsen i stort sett ses som fri flykt avbruten av diskreta riktningsändringar.

Ytterligare en konsekvens är att kollisionfrekvenser blir starkt temperaturberoende och avtar snabbt då temperaturen ökar.

Coulombkraften mellan två laddade partiklar med laddningarna q_1 och q_2 på avståndet r_{12} är

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2}. \quad (2)$$

I tyngdpunktssystemet är vardera partikelns bana en hyperbelgren och avböjningsvinkeln kan uttryckas som

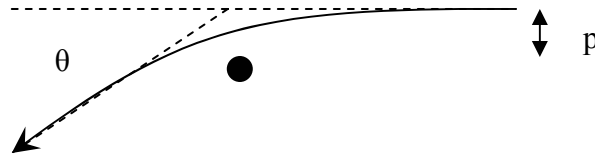
$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 M v^2 p}. \quad (3)$$

där p är stötparametern (se figur 10) och M är den reducerade massan, enligt

$$M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (4)$$

och v är den asymptotiska relativhastigheten före och efter kollisionen.

Man skiljer normalt på närkollisioner och fjärrkollisioner där de förstnämnda karakteriseras av en stor avböjningsvinkel ($\theta > \pi/2$) och kollisioner med en mindre avböjningsvinkel räknas till fjärrkollisioner. Det går att visa att även om varje närkollision ger ett stort bidrag till avböjningen så är fjärrkollisioner så mycket vanligare att det blir bidraget från dessa som totalt dominerar kollisionsprocesserna. Av denna anledning behandlas i fortsättningen bara fjärrkollisioner.



Figur 11. Exempel på partikelbana vid jon-elektron kollision

Med den tidigare definitionen av fjärrkollisioner och stötparametern p definierad enligt figur 11, ovan, kan ses att fjärrkollisioner definieras av stötparametrar större än den kritiska stötparametern, p_c , enligt

$$p > p_c = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 m_1 v_1^2}. \quad (5)$$

För den helt dominerande delen av dessa stötar kommer vinkeln θ att vara mycket liten och $\tan(\theta/2) \approx \theta/2$. Det följer då att varje kollision ger en vinkelavvikelse proportionell mot $1/p$. Då antalet fjärrkollisioner med parametervärdet p eller mindre är proportionellt mot πp skulle bidraget från dessa divergera om det inte vore så att elektrostatisk skärmning gör att man bara behöver räkna med kollisioner som har stötparametrar mindre än cirka en Debye-längd. Debye-längden definieras som

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (6)$$

där k_B är Boltzmanns konstant, e är elektronladdningen, n_e är elektrontätheten och T_e är elektrontemperaturen. Man kan visa att den effektiva kollisionsfrekvensen för fjärrkollisioner kan uttryckas som

$$f_f = \frac{q_1^2 q_2^2 \pi n_2}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_1^2 v_1^3} 8 \ln \Lambda \quad (7)$$

där $\ln \Lambda = \ln(\lambda_D / p_c)$ är den så kallade Coulomb-logaritmen, v_1 är elektronernas termiska hastighet, m_1 är elektronmassan och n_2 är jontätheten. Notera att Coulomb-logaritmen varierar mycket långsamt med både täthet och temperatur

och ofta är $8 \ln \Lambda \approx 100$ en tillräckligt god approximation över ett stort temperatur- och täthetsområde.

Utifrån kännedom om kollisionsfrekvensen går det att definiera ett effektivt kollisionstvårsnitt, S_f , för fjärrkollisioner enligt

$$f_f = v_1 n_2 S_f \quad (8)$$

så att

$$S_f = \frac{q_1^2 q_2^2 \pi}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_1^2 v_1^4} 8 \ln \Lambda. \quad (9)$$

Sätter man in värden för en elektron med termisk energi motsvarande temperaturen T_e , finner man att tvärsnittet kan uttryckas (numeriskt) som

$$S_f = \frac{2 \cdot 10^{-9} \ln \Lambda}{T_e^2}. \quad (10)$$

Detta värde kan nu jämföras med typiska kollisionstvårsnitt för elektron-neutral kollisioner. Dessa kollisionstvårsnitt är typiskt av storleksordningen 10^{-19} m^2 , även om t ex Cs och K kan ha tvärsnitt ända upp till 10^{-17} m^2 . Det går att se från ekvation (10) (med $\ln \Lambda = 10$) att vid en elektrontemperatur på 1000 K är tvärsnittet för elektron-jon kollisioner fem storleksordningar större ($S_f(T_e = 1000) = 2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$) än det typiska tvärsnittet för elektron-neutral kollisioner.

När temperaturen ökar minskar visserligen elektron-jon tvärsnittet men även vid en temperatur på 10 000 K är detta tvärsnitt tre storleksordningar större än elektron-neutral tvärsnittet och vid denna (och högre) temperaturer bör gasen vara mycket väljoniserad. Detta betyder att det inte finns så många neutraler kvar att kollidera med, vilket i sin tur gör att kollisionsfrekvensen (ekv. (8)) för kollisioner mellan neutraler och elektroner blir liten.

För arbetet med plasma/fluidmodellen har stora delar av ekvationerna härletts ur Powell-Zielinskis (PZ) rapport [21]. Det inledande arbetet med PZ-modellen har tidigare redovisats i referens [7]. Framförallt presenterades resultat från beräkningar av tillståndsekvationerna för plasmaintieringsförloppet. Modelleringsarbetet enligt PZ rapporten har fortsatt och fallet med ett isotermiskt tidsberoende flöde har implementerats. Denna enklare situation uppstår när temperaturen är konstant längs plasmakanalens längd och den elektriska strömmen ändras

långsamt jämfört med de olika hydrodynamiska processerna i plasmat. Enligt vad som presenterats i referens [7] gäller för detta fall följande algebraiska ekvationer:

$$\rho w = \dot{\rho}_a z \quad (11)$$

$$\rho w^2 + P = P_0 \quad (12)$$

$$\rho w E + P w = \frac{J^2 z}{\sigma} \quad (13)$$

där P_0 är trycket vid den slutna änden av kapillären. Enligt PZ rapporten kan dessa ekvationer förenklas och följande ekvationer skall lösas:

$$\rho = \frac{P_0}{2C_{s_0}^2} \left[1 + \left(1 - 4\dot{\rho}_a^2 C_{s_0}^2 z^2 / P_0^2 \right)^{1/2} \right] \quad (14)$$

$$w = \frac{2\dot{\rho}_a C_{s_0}^2 z}{P_0} \left[1 + \left(1 - 4\dot{\rho}_a^2 C_{s_0}^2 z^2 / P_0^2 \right)^{1/2} \right]^1 \quad (15)$$

$$P = C_{s_0}^2 \rho \quad (16)$$

där C_{s_0} är akustiska jonhastigheten i plasmat. Den ges explicit av uttrycket:

$$C_{s_0} = \left[\frac{(1 + x_{1C} + 2x_{2C})kT + 2(1 + x_{1H})kT}{m_{0C} + 2m_{0H}} \right]^{1/2} \quad (17)$$

Från ekvation (13) och (14) ser man att en tidsberoende lösning existerar om:

$$P_0 \geq 2L\dot{\rho}_a C_{s_0} \quad (18)$$

När likhetstecknet är uppfyllt så är plasmahastigheten vid mynningen maximum och den ges av isothermiska ljudhastigheten C_{s_0} .

För det isothermiska tidsberoende fallet kan temperaturen i plasmat beräknas enligt följande uttryck:

$$T = \left(\frac{J^2 r_b}{2\sigma\sigma_s} \right)^{1/4} \quad (19)$$

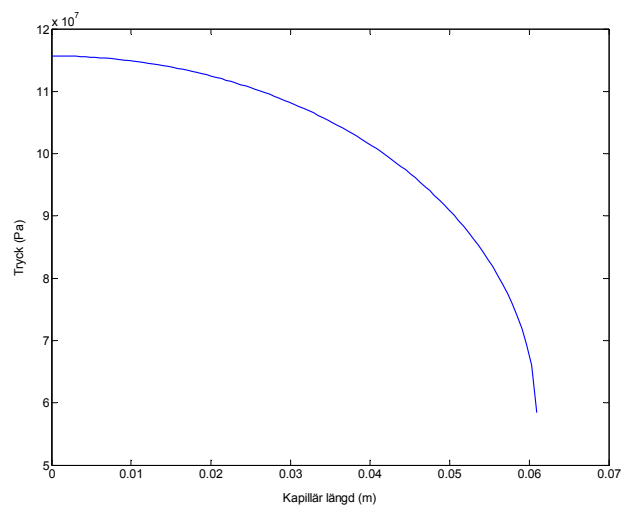
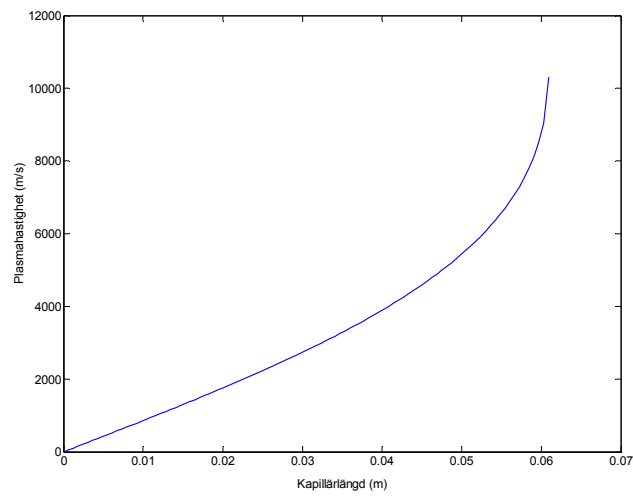
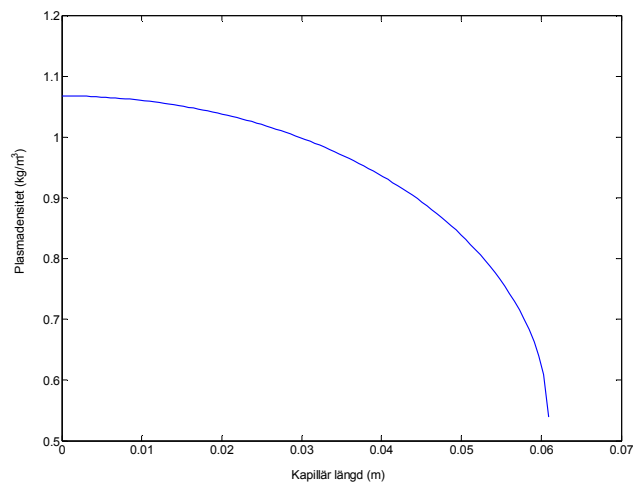
Det isothermiska tidsberoende fallet löses genom att ansätta en temperatur T och plasmadensitet ρ . För dessa antagna värden på temperatur och plasmadensitet itereras först tillståndsvariablerna x_{1C} , x_{2C} , x_{1H} och konduktivitet σ fram. Med hjälp av ekvation (14) och ekvation (20) räknas sedan en ny plasmadensitet ρ och temperatur T fram. Detta upprepas tills den korrekta plasmadensiteten och plasmatemperaturen hittats. I princip ska detta göras vid varje nod-punkt i z -led. Från dessa itererade värden kan sedan plasmahastighet och tryck beräknas enligt ekvationerna 15 och 16 ovan. Enligt PZ rapporten kan dock en avsevärd förenkling göras i lösningsproceduren som beskrivs ovan. I och med att jonisationsfaktorerna och konduktiviteten är positionsberoende, kan positionsberoende kvantiteter som elektrondensiteten n_e ersättas med lämpliga värden där det gjorts en medelvärdesbildning över längden på kapillären. Vid en noggrann analys av de implementerade ekvationerna (se referens [7]) ses att positionsberoende kvantiteter kan uttryckas som funktion av plasmadensiteten ρ och jonisationsfaktorerna. Den medelvärdesbildade plasmadensiteten ρ kan då uttryckas enligt följande:

$$\langle \rho \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L \rho dz = \frac{P_0}{2C_{s_0}^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2N} \left[(N^2 - 1)^{1/2} + N^2 \sin^{-1}(1/N) \right] \right\} \quad (20)$$

där $N = P_0 / (2L\dot{\rho}_a C_{s_0})$. Om ekvation (20) används för plasmadensiteten, förenklas beräkningen avsevärt då problemet inte längre behöver lösas för varje nod-punkt i z -led. De positionsberoende variablerna plasmadensitet, plasmahastighet och tryck fås slutligen direkt enligt ekvationerna 14-16.

Som ett exempel på resultat av simuleringar (för isothermiskt tidsberoende strömning) visas nedan i figur 12 plasmadensiteten, plasmahastigheten och trycket i kapillären som funktion av positionen z längs kapillärens längd, där $0 \leq z \leq L$; $L = 60.9$ mm är totala längden på kapillären. Den applicerade strömmen $I = 58.7$ kA och kapillärradien $r_b = 3.90$ mm. Beräkningarna är gjorda under förutsättningen att plasmahastigheten $w(z = L) = C_{s_0}$, och $P_0 = 2L\dot{\rho}_a C_{s_0}$.

Observera att följande samband för trycket gäller: $P_0 = P(z = 0) = 2P(z = L)$ (se figur 12). Detta samband gäller under antagandet att trycket $P_0 = 2L\dot{\rho}_a C_{s_0}$.



Figur 12. a) plasmadensitet, b) plasmahastighet, c) tryck som funktion av positionen z längs kapillärens längd.

För närvarande pågår arbete med att skapa en kretssimuleringsmodell i MATLAB/Simulink/SimPowerSystems av hela plasmaintieringsförloppet. Enligt referens [22] kan förbränningsförloppet i en plasmagenerator delas in i tre olika faser. Det ena är uppvärmning och explosion av tråden i kapillären. Det andra är när plasmat från den exploderande tråden börjar växelverka med kapillärmaterialet. Denna fas kännetecknas av att trycket i kapillären är högt och plasmahastigheten vid mynningen är noll. Den tredje fasen är när isotermiskt tidsberoende plasmaflöde har uppnåtts i kapillären. För tillfället har vi en fungerande modell för det tidsberoende flödet. Enligt referens [22] är den andra fasen bara ett specialfall av det isotermiska tidsberoende fallet och det återstår endast att lösa ekvationerna 4-6 ovan under antagandet att plasmahastigheten i kapillärmynningen är lika med noll. Detta problem verkar tämligen enkelt och kan ganska snabbt implementeras genom att använda befintliga modeller för isotermisk tidsberoende flöde. Vi har också för tillfället implementerat en beskrivning av TZN-aggregatet i MATLAB/Simulink/SimPowerSystems. Detta ger oss då möjligheten att koppla plasmageneratoren till pulsaggregatet. Vad vi saknar i detta skede av modelleringsarbetet, vilket är väldigt kritiskt, är en någorlunda korrekt fysikalisk beskrivning av en exploderande tråd. Slutligen, när vi väl har länkat ihop alla delar av plasmaintieringsförloppet kommer vi att ha ett användbart verktyg vid analys av experimentella data. Detta bör då bli nästa steg i arbetet att kalibrera och verifiera modellen mot experimentella data.

5 Fortsatt arbete inom ETK vid FOI

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. Forskningen inom ETK vid FOI Vapen och skydd kommer därför fortsättningsvis istället att inriktas mot ETI som har potential att ge färdiga tillämpningar i närtid.

Ett antal plasmageneratorer med två olika kapillärmaterial, har köpts in från BAE Systems Bofors AB. Då plasmageneratormodellen är färdig kommer plasmaintieringsexperiment att utföras med dessa plasmageneratorer för att ge stöd i utvecklingsarbetet av dessa. Vilken inverkan val av kapillärmaterial har för plasmageneratorns funktion och initieringsförloppet samt hur växelverkan mellan plasmat och krutet påverkas kommer då att studeras.

Arbete pågår även med konstruktion av en egen plasmagenerator som kommer att vara avpassad för forskningsändamål där t ex kapillär och trådmateriale lätt kan bytas ut.

I den internationella litteraturen råder två olika uppfattningar om vilka processer det är som styr växelverkan mellan plasmat och krutet vid plasmaintieringsförloppet. Det ena innebär att det uppkommer strukturförändringar i det oförbrända krutet genom överföring av värmestrålning från plasmat till krutet och det andra innebär att det är deposition av metallånga från trådmaterialet i plasmageneratoren

på krutytan som har betydelse. En bättre förståelse för dessa processer är nödvändig för optimering av plasmageneratorerna och plasmainitieringsförloppet. Spektroskopiska mätningar av värmestrålningen in i krutet under plasmainitieringsförloppet planeras därför. Eventuellt kommer även experiment att utföras 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.

Tillverkning av LOVA-krut utan NC för test i plasmainitieringsförsök planeras också. Avsikten är att få fram ett LOVA-krut som har hög prestanda, är mycket läggkänsligt, har bra lagringsegenskaper och går att initiera med hjälp av ETI.

Ett samarbetsprojekt har inletts med internationella kontakter inom plasmainitieringsområdet. Detta utbyte ger initialt möjlighet till snabbare och bättre uppbyggnad av experimentutrustningen för plasmainitieringsförsök och fortsättningsvis att forskningsresultat och användbara tillämpningar uppnås snabbare. Informationsutbyte enligt avtal sker även med andra internationella kontakter.

6 Forskning kring nya utskjutningstekniker

Forskningen kring nya utskjutningstekniker runt om i världen [23] - [26] 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 krutförbränningens 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 plasmat växelverkar med krutet under plasmainitieringsförloppet [27] - [29].

De allra flesta använder fast krut vid plasmainitiering. I Ryssland använder de dock även gelade krut och vätskekrut [25].

United Defense Systems Division (del av BAE Systems) har modifierat en 120 mm stridsvagnskanon och implementerat komplett utrustning för plasmainitiering

[30]. Totalt 12 skott har avfyrats med hjälp av plasmainitiering med lyckat resultat.

Det är långt kvar innan energilagringssystemen är så små att det går att tillverka fältmässiga rälskanoner. På stora stridsfartyg är det dock inte alls lika kritiskt med kompakta system för kraftförsörjningen och i USA har det initierats ett forskningsprogram för utveckling av marina rälskanoner [31]. Målet är att åstadkomma mynningshastigheter på över 2000 m/s vid projektilvikter kring 16 kg med en skotthastighet på 6-12 skott per minut [31]. Forskning kring rälskanoner i övrigt koncentreras mycket på att minska slitaget och uppvärmningen av rälsen.

En annan visionär idé är att använda rälskanoner för att skicka upp raketer. I första hand för att skicka upp sondraketer och i andra hand för satelliter i omloppsbanan. En förstudie har gjorts av DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), EADS Space Transportation (Tyskland) och ISL. En tänkbar placering av ett sådant system är i anslutning till Esrange, Kiruna [32] - [34].

Ett steg i riktning mot kompakta energilagringssystem är t ex elektriska generatorer med supraledande komponenter [35]. 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 [36] - [37].

7 Referenser

- [1] Bemm E., "Utvecklingsmöjligheter och trender inom området utskjutning", FOI-R—1324—SE (2004) 1-51.
- [2] Andreasson S. and Carlsson M.U. "Results from Initial ETC Closed Vessel Experiments." IEEE Transactions on Magnetics 35 (1): (1999) 181-184.
- [3] Andreasson S., Bemm E. och Nyholm S.E., "Resultat och erfarenheter från forskningen inom ETK-området", FOI-R—0299—SE (2001) 1-18.
- [4] Andreasson S., Bemm E. och Skoglund M., "Stimulering av krutförbränning genom tillförsel av elektrisk energi i flaman", FOI-R—0640—SE (2002) 1-31.
- [5] 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.
- [6] Andreasson S., Bemm E. and Nyholm S.E., "ETC Closed-Vessel Experiments with Alkali-Doped Propellants", IEEE Trans. Magn. 39 (2003) 202-206.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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).
- [10] Horst A., Baker P., et al., "Insensitive High Energy Propellants for Advanced Gun Concepts", 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland (2001).
- [11] 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).
- [12] Menning D., Pettersson Å., Adolfsson R. de Flon J., "Formulering och karakterisering av FOX-7/GAP-krut för brinnhastighetsmätningar vid olika tryck och temperaturer", FOI-R—1697—SE (2005) 1-33.
- [13] Bemm E., Menning D., Adolfsson R., Pettersson Å., "Karakterisering av kanonkrutsformuleringar baserade på FOX-7 samt framställning av snabbbrinnande krut och ETK-anpassade krut", FOI-R—1269—SE (2004) 1-32.
- [14] Bemm E., Menning D., Wanhatalo M., "Kanonkrutsformuleringar med FOX-7 samt formulering av ETK-anpassade krut", FOI-R—0945—SE, (2003) 1-20.

- [15] Corner J., "Theory of the interior ballistics of guns", Wiley, New York, **(1950)**.
- [16] Svensson A., "Ignition of Double Base Propellant Using Exploding Foils", FOA-R—99-01251-310—SE **(1999)** 1-16.
- [17] Nyholm S.E., "Elektrotermisk-kemisk utskjutning", FOA-R—99-01355-310—SE **(1999)** 1-21.
- [18] Flygar S.E., "INCEC93, input generator for the CEC93 thermochemical equilibrium code", FOA report C20973-2.1, Stockholm, Sweden, April **(1994)**.
- [19] Gordon S. and Bride B.J., "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)**.
- [20] 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.
- [21] Powell J.D. och Zielinski A.E., "Theory and Experiment for an Ablating-Capillary Discharge and Application to Electrothermal - Chemical Guns", BRL-TR-3355, Ballistic Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, USA, **(1992)** 1-50.
- [22] Shengyi S. et al, "Discharge of the Plasma Generator in Electrothermal-Chemical Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 1, Jan **(1997)**.
- [23] 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.
- [24] Hinton M. and Gilbert S., "UK Electric Gun National Overview", Proceedings of the 12th EML Symposium **(2004)** 9-14.
- [25] Shvetsov G.A., "Overview of EML Research in Russia", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 15-20.
- [26] Wald S. et al, "ETC Research at Soreq NRC, Israel", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 20-26.
- [27] Beyer R.A. et al, "The Response of Propellants to Plasma Radiation", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 273-278.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Ogorkiewicz R.M., "UD makes major ETC gun advance", Jane's International Defence Review, Aug 01 **(2005)**.
- [31] Mc Nab I.R. et al. "Development of a Naval Railgun", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 76-80.
- [32] Božić O., "DLR Technologies for future hypersonic flights", presentation vid 16th EEMLS Topical Meeting, Düsseldorf, Tyskland, 19-21 september **(2005)**.

- [33] Behrens J., "Development of innovative Hypersonic Projectiles & Electromagnetic Railgun Technology for Deployment of sub-/orbital Small Payloads", presentation vid 16th EEMLS Topical Meeting, Düsseldorf, Tyskland, 19-21 september **(2005)**.
- [34] Lehmann P., Reck B. och Behrens J., "Electromagnetic Railgun to Accelerate a Suborbital Payload". presentation vid 16th EEMLS Topical Meeting, Düsseldorf, Tyskland, 19-21 september **(2005)**.
- [35] Barnes P.N. et.al, "Compact, Lightweight, Superconducting Power Generators", Proceedings of the 12th EML Symposium, Snowbird, USA **(2004)** 158-163.
- [36] 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.
- [37] 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.

