



Temaområde Energiförsörjning

Avrapportering av 2024 års verksamhet

WILHELM SAHLÉN, NIKLAS ZETTERVALL,
ELIAS LALLO, MATTIAS ELFSBERG,
ANDERS ODELL, REBECKA STAPPE RENNER,
MOHAMED HADI HAIDARI, JOHANNA ENSTRÖM,
CHRISTIAN IBRON, MARTIN KARLSMO,
MATTIAS FORSLUND, TANJA HOLMNÄS

Wilhelm Sahlén, Niklas Zettervall, Elias Lallo,
Mattias Elfsberg, Anders Odell, Rebecka Stappe
Renner, Mohamed Hadi Haidari, Johanna
Enström, Christian Ibron, Martin Karlsmo, Mattias
Forslund, Tanja Holmnäs

Temaområde Energiförsörjning

Avrapportering av 2024 års verksamhet

Titel	Temaområde Energiförsörjning – Avrapportering av 2024 års verksamhet
Title	Theme Area Energy Supply
Rapportnr/Report no	FOI-R--5706--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	26
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnr/Project no	E20948
Godkänd av/Approved by	Pernilla Magnusson
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Inom ramen för Försvarmaktens FoT-program har temaområdet och projektet Energiförsörjning bedrivits under 2024. Projektet har varit starten för ett framtida FoT-område för hantering av kunskapsuppbyggnad och upprätthållande av kunskap om energiförsörjning. I år har projektet haft flera aktiviteter, inklusive en förstudie. Den sistnämnda levereras i separat rapport. Denna rapport redovisar all annan aktivitet kopplat till temaområdet och som bedrivits under 2024.

Nyckelord: energiförsörjning, energi, energisystem, termisk rusning, batterier, vätgas, alternativa bränslen, litiumjonbatterier, bränsleceller, logistik, civilsårbarhet, militärsårbarhet, mikronät.

Summary

As part of the Swedish Armed Forces R&D program, the new research area and project Energy Supply have been carried out during 2024. The project has been the starting point for an upcoming R&D area dedicated on knowledge growth and the maintenance of expertise regarding energy systems. This year, the project has involved several activities, including a feasibility study. The latter is delivered in a separate report. This report outlines all other activities within the new R&D area that have been carried out during 2024.

Keywords: energy supply, energy, energy systems, thermal runaway, batteries, hydrogen, alternative fuels, lithium-ion batteries, fuel cells, logistics, civil vulnerability, military vulnerability, microgrid.

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	CESTAP	7
2.1	FOI:s roll	7
2.2	Kunskap ger möjligheter	7
3	Modellering av brännkammare i turbojet	8
3.1	Motivering till studien	8
3.2	Experimentella uppställningar	8
3.3	Sektormodell	8
4	Drivkrafter för energiomställning inom svenskt försvar	10
4.1	Bakgrund och syfte	10
4.2	Metod	10
4.3	Preliminära resultat	11
5	Åldringsmekanismer av batterier	15
5.1	Prestanda	15
5.2	Säkerhet	15
6	Pulsad laddning och urladdning av batterier	16
6.1	Kartläggning av batteriutformningar	16
6.2	Alternativa laddningsstrategier	17
7	Metallförbränning	18
7.1	Bakgrund	18
7.2	Verksamhet	18
8	Konferenser och samarbeten	20
8.1	ICE-PPR	20
8.2	f3 innovationskluster för hållbara biodrivmedel	21
8.3	Powerful Innovation days Energy Island Conference	22
8.4	FORTE	22
8.5	CESTAP	23
8.6	Strömförsörjning	24
9	Referenser	25

1 Inledning

Under 2024 har Försvarsmakten startat upp ett nytt temaområde Energiförsörjning. Beställningen till Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) innehöll en förstudie som utreder hur det nya temaområdet ska komplettera befintlig FoT beställning, vilket presenteras i en separat rapport [1]. Utöver förstudien ska även annan energirelaterad verksamhet genomföras inom ramen för temaområdet, dessa verksamheter presenteras mer ingående i denna rapport;

- Medverkan i CESTAP
- Modellering av TRI-60
- Utredning av drivkrafter för energiomställningen inom svenskt försvar
- Åldringsmekanismer för batterier
- Pulsad laddning och urladdning av batterier
- Metallförbränning

Inom FoT finns ett fokus på samverkan med relevanta aktörer samt genomförande av omvärldsbevakning, såväl nationellt som internationellt inom respektive forskningsområde. Även detta har genomförts inom årets verksamhet kopplat till energiförsörjning och dessa beskrivs sammanfattningsvis i denna rapport.

Forskningsområdet Energiförsörjning ska analysera, utvärdera teknik, system och metoder inom produktion, distribution, lagring och konsumtion av energi, den förstudie som utreder det nya området går närmre in på innehållet [1].

Projektets verksamhet sker i samverkan med andra FoT projekt som FoT Marksystem, FoT Energilagring och luftflöde i befästningar, FoT Ammunitions och energilagringssäkerhet samt med Försvarets materielverk (FMV) och Fortifikationsverket (FortV).

Den här rapporten avser att rapportera verksamhet som bedrivits under år 2024.

Den här rapporten är disponerad enligt följande:

- Kapitel 2-7 innehåller information från respektive delområde som bedrivits under året.
- Kapitel 8 beskriver de möten och konferenser som FOI deltagit på under året och inom temaområdet.

2 CESTAP

CESTAP, eller *Competence cEntre in Sustainable Turbine fuels for Aviation and Power*, är ett kompetenscenter med 29 akademiska och industriella partners. Målet med centret är att öka förståelsen för produktionen och användningen av alternativa turbinbränslen, med fokus på bränslen vars råvaror är inhemska. Centret, som styrs från Lunds Tekniska Högskola, (LTH), är ett femårigt projekt med option på ytterligare fem år, där forskningsfokus ligger på alltifrån produktionsråvara till slutanvändning av nya alternativa bränslen. Majoriteten av deltagarna är svenska, och centret erbjuder en helt unik möjlighet att utveckla och ta del av den senaste forskningen inom alternativa, mestadels flytande bränslen för turbinmotorer. Nationella partners såsom SAAB, GKN Aerospace och Svensk Kraftreserv (ett dotterbolag till Svenska Kraftnät) varvat med internationella partners som von Karman Institute for Fluid Dynamics samt Topsoe är högvärdiga för FOI och Försvarmakten och bidrar med utökad förståelse kring bränsletekniska frågor, motorprestanda samt totalförsvarsaspekter.

2.1 FOI:s roll

FOI:s roll inom CESTAP är tvådelad – första uppgiften är övergripande där FOI ska ta del av de senaste forskningsresultaten och öka förståelsen för nya alternativa bränslen och hur dessa kan och bör nyttjas inom totalförsvaret. FOI har medverkat på de två halvårsmöten som anordnats, men även en lång rad möten med enskilda aktörer inom centret. Allt för att diskutera och planera forskningsresultat, samt för att skapa ett kontaktnät.

FOI:s andra uppgift är att bidra med kemikinetisk modellering, där utveckling av nya uppdaterade modeller utgör en kärna till mycket av det simuleringsarbete som sedan används av FOI men även av flera övriga partners, såsom LTH, Siemens Energy och GKN Aerospace. Just detta samarbete har tillsammans med LTH resulterat i en vetenskaplig artikel [2] där genom modellering- och simuleringsarbete prestanda och flamkaraktistik hos flera fossila och alternativa bränslen jämförts i en akademisk brännarkonfiguration. Innan årets slut planeras även en vidareutvecklad version av denna artikel, samt en vetenskaplig artikel kring ett nytt, mer komplext och utarbetat sätt att modellera flerkomponentsbränslen. Båda dessa artiklar görs i samarbete med LTH men dess resultat kommer att användas både internt och av andra partners inom centret framöver.

2.2 Kunskap ger möjligheter

Genom utökad kunskap om nya bränslens egenskaper öppnas inte bara möjligheter att utvärdera möjligheterna till inhemsk produktion, men även bedömningar till mer tekniska aspekter såsom påverkan på motorprestanda, lagringsmöjligheter samt signaturfrågor. Nya bränslen, med annan komposition av ingående bränslemolekyler, öppnar för förbränning med mindre mängd producerad sot, och således en mer fördelaktig signaturkaraktistik. Inhemsk produktion (där centret har en viktning mot inhemska råvaror) är av yttersta intresse sett ur ett totalförsvarsperspektiv. Med partners inom centret såsom Svensk Kraftreserv, Uniper, Göteborgs Energi och Gotlands Energi AB berättar det om det stora intresset kring alternativa bränslen hos aktörer centrala för elproduktion i Sverige.

3 Modellering av brännkammare i turbojet

3.1 Motivering till studien

Fossila bränslen kan komma att utgöra en logistisk risk för Sveriges motståndskraft och försvarskapacitet, beroende på politisk utveckling i omvärlden. Privata och offentliga organisationer, i Sverige och många andra västländer, utvecklar därför en uppsjö av förnybara bränslen med låga eller obefintliga anpassningskrav på existerande generatorer och motorer [3]. Dessa ersättningsbränslen framställs i ett stort antal olika processer, med flera olika typer av råmaterial som grund. Som följd av denna spridning i tillverkningsmetoder kan de producerade bränslenas egenskaper variera. Valet av råvara och processväg, med medföljande kemiska egenskaper hos bränslet, kommer att påverka prestanda och förbränningskaraktäristik i motorn. För att kunna säkerställa prestanda vid nyttjande av förnybara bränslen krävs därför en god utvärderingsprocess. FOI:s förmåga att utvärdera och karakterisera fysikaliska egenskaper i sådana bränslen kan således bli ett viktigt stöd till andra myndigheter för att kvantifiera bränsleegenskaper och säkerställa kvalitet, exempelvis vid inköp eller utvärdering av materiel.

Arbetet som beskrivs i detta kapitel avser endast att utvärdera de egenskaper i bränslet som påverkar förbränning. På grund av verksamhetens relativt ringa omfattning har arbetet fokuserats på att skapa en tredimensionell reaktiv strömningsmodell (reaktiv CFD) som ska efterlikna en brännkammare i en turbojetmotor av typen Microturbo TRI-60.

3.2 Experimentella uppställningar

FOI har tidigare gjort experimentella studier av prestanda och förbränningskaraktäristik med olika bränsle i denna motortyp [4]. Motoruppställning, med tillhörande omfattande diagnostik, används idag regelbundet och dess flexibla uppställningsdesign gör den relevant för framtida studier med befintliga och kommande alternativa bränslen.

I angränsande projekt pågår design av en spray-rigg baserad på TRI-60 geometrin, vilken kommer kunna ge information om hur bränslets mekaniska egenskaper påverkar droppbildningen i olika typer av injektorer. Dessa experiment kommer ge underlag till empiriska modeller för hur bränslesprayen ska se ut. Kombinationsstudier av gasturbin-experiment, spray-experiment och reaktiva CFD-simuleringar är tänkta att fungera som en testbädd för nya bränslen.

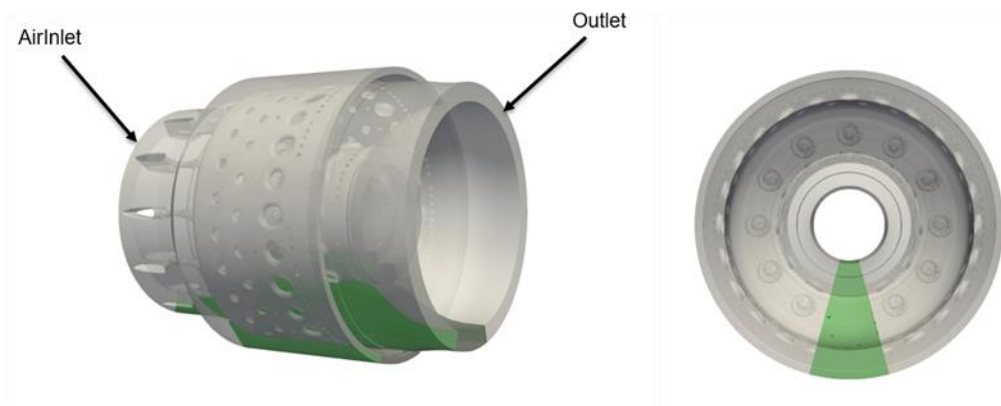
3.3 Sektormodell

Modellen är en så kallad reaktiv Large Eddy Simulation (LES), vilken kombinerar turbulensmodellen LES med en förenklad beskrivning av gasens kemiska beståndsdelar och reaktionshastigheter för dessa. Beräkningsmodellen innefattar därför en på FOI tidigare utvecklad reaktionsmekanism för bränsle av typen JP-5 [2] det bränsle i vilken modellen är tänkt att valideras.

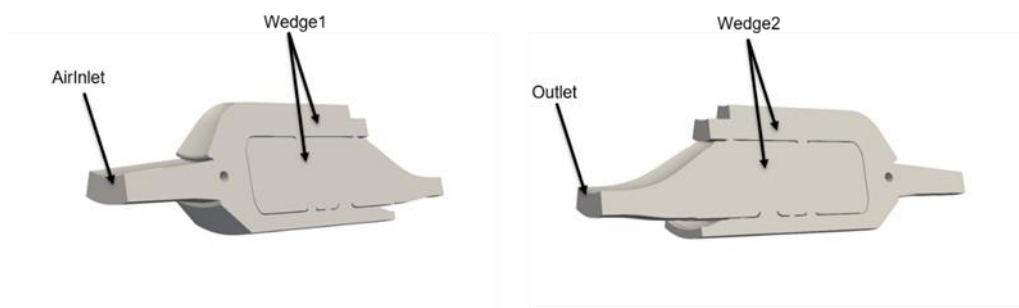
Bränsle i vätskefas beskrivs med så kallad Lagrangian Particle Tracking (LPT), en förenklande statistisk modell ämnad att beskriva transporten, sönderdelning och förångning i ett stort antal bränsledroppar.

Modellen som är framtagen i det öppna CFD kod-biblioteket OpenFOAM bortser från kompressorsteget och turbinsteget genom att tillämpa lämpligt valda randvillkor. Istället fokuserar modellen på den fysik som förekommer i brännkammaren. Geometrin som har använts i simuleringen är en cirkelsymmetrisk 30 graders sektor av den annulära brännkammaren i en TRI60, som kan ses i Figur 1, och innehåller därmed en av de 12 injektorerna. Sektormodellen, som kan ses i Figur 2, använder sig av periodiska

randvillkor på Wedge1 och Wedge2. Beräkningsnätet för sektorn består av totalt 9053245 celler. 1146706 av dessa är hexaeder, 142428 pyramider och 7764108 tetraeder.



Figur 1. Till vänster isovyn på den annulära brännkammaren i en TRI60. Till höger frontvyn på den annulära brännkammaren i en TRI60. Sektorn som har använts i simuleringen visas i grönt.



Figur 2. TRI60-sektor med ränder som har använts i simuleringen.

Simuleringsarbetet startades med en kallflödessimulering av brännkammaren. Efter att luften hunnit blåsa igenom hela brännkammaren och flödet har stabiliserats startades bränsleinjektionen. Bränsle injicerades i brännkammaren med 40 miljoner LPT-parcels per sekund. I början simulerades brännkammaren utan någon kemisk reaktion. Efter några tidssteg när det fanns tillräckligt bränsle i systemet startades kemiska reaktioner och förbränningen. För att kunna starta förbränningen skapades ett fält i brännkammaren som hade en temperatur på 2600K. Det varma fältet ska likna energin som skapas av ett tändstift i brännkammaren.

Modellen simuleras fortfarande och ambitionen är att kunna validera denna modell mot experimentell data. I ett första steg skulle detta innebära att man kör modellen i ett antal fall med valideringsdata, exempelvis med olika ekvivalenstal och luftflöden. Man skulle även kunna validera spraymodellen genom att flöda JP-5 bränsle genom spridaren i atmosfäriska förhållanden och studera droppbildning.

4 Drivkrafter för energiomställning inom svenskt försvar

4.1 Bakgrund och syfte

Omställningen till ett klimatneutralt samhälle är något som beslutats, på både europeisk och nationell nivå, vilket innebär stora förändringar inom alla samhällssektorer. Det gäller inte minst för Försvarsmakten som, för att uppfylla sitt syfte, även i framtiden måste kunna mäta sig mot länder och regimer som fortsätter att nyttja fossil energi. Samtidigt för ny energiteknik också med sig nya möjligheter för Försvarsmakten inom flera områden.

I denna studie har begreppet ”försvarsmaktens energiomställning”, låtits inrymma två principiellt olika målsättningar. Dels att dra maximal nytta av teknikutvecklingen för att bygga militär förmåga, vilket alltid varit en väsentlig del av militär strategi, dels att minska, och i förlängningen fasa ut, användningen av fossil energi. Dessa målsättningar kan vid en första anblick tyckas allt för skilda för att samsas inom ett begrepp, men i praktiken blir det ofta tydligt att målsättningarna är nära sammanflätade och förhåller sig till varandra med en god grund.

Eftersom energiomställning innebär omfattande förändringar inom många områden är det väsentligt att förstå organisationens drivkrafter och förutsättningar på djupet. Detta ökar sannolikheten att förändringsarbetet på ett effektivt sätt ska leda fram till sina mål. Förståelsen behöver också täcka vilka risker som energiomställningen för med sig på kort och lång sikt. Syftet med studien är att på ett strukturerat sätt visa hur olika drivkrafter för den militära energiomställningen riktar fokus mot olika typer av lösningar, inom olika verksamhetsgrenar. Ett delsyfte är också att pröva PESTLE¹-modellens användbarhet och behovet av anpassningar för analysen.

4.2 Metod

4.2.1 Ramverk för analys och förståelse:

SWOT-analyser (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) är en klassisk modell som ofta använts för att analysera förutsättningar för en organisation att genomföra ett förändringsarbete. Den fångar både inre organisatoriska faktorer och påverkansfaktorer från den yttre miljön, men ger begränsad ledning och struktur åt analysen. Ett annat sätt att söka förståelse för komplexa områden är ramverket PESTLE. Ramverket har ofta använts för att studera drivkrafter och hinder inom områdena energiomställning, cirkulär ekonomi och grön innovation [5, 6, 7]. De övergripande dimensionerna delas då in i mer specifika underområden. Genom att kombinera dimensionerna i SWOT och PESTLE, ges en god struktur för att en mer inkluderande analys som fångar in både interna och externa aspekter [8, 9].

SWOT-analysens styrkor och möjlighet kan betraktas som drivkrafter för energiomställning, och det som utgör svagheter och hot är att betrakta som hinder, vilka betecknats med plus respektive minus i Tabell 1. Att en faktor utgör en drivkraft för Försvarsmaktens energiomställning kan dock samtidigt innebära att det är en utmaning eller rent av ett hot mot Försvarsmaktens operativa utveckling.

¹ Political, Economical, Social, Technological, Legal and Environmental.

Tabell 1. De sex kategorierna i ramverket PESTLE kan användas tillsammans med SWOT-analysens fyra dimensioner för att öka förståelsen för vad som påverkar vägen mot önskade mål [6]. Drivkrafter och hinder för energiomställningen betecknas med plus respektive minus i tabellen.

Impact	SWOT/PESTLE	Political	Economic	Social	Technological	Legal	Environmental
Internal	Strengths	+	+	+	+	+	+
	Weaknesses	-	-	-	-	-	-
External	Opportunities	+	+	+	+	+	+
	Threats	-	-	-	-	-	-

Kategorierna i PESTLE-ramverket är framtagna för att analysera utveckling, ofta kopplat till energiomställning, inom olika delar av civil sektor. Det kan därför finnas behov av att anpassa modellen så att den bättre passar drivkrafter och hinder för en militär energiomställning. Huruvida det finns behov av sådana anpassningar utgör en forskningsfråga för nuvarande projekt.

4.2.2 Datainsamling:

Det finns redan en stor mängd akademiska studier som berör energiomställning inom civila verksamheter, men mycket lite som rör den militära sektorn. Några undantag är Samaras [10] som beskriver hur energi och säkerhet kopplas samman ur ett militärt perspektiv, Bell m.fl. [11] som studerat attityder till energiomställning hos anställda inom försvarssektorn i Storbritannien och Depledge [12] som introducerar termen low-carbon warfare och utifrån detta lyfter viktiga frågeställningar kopplade till hur militär verksamhet påverkas av samhällets krav på minskat koldioxidavtryck. Perspektivet i ovan nämnda publikationer är ett insatsförsvar där ett avvägande, som särskilt lyfts av Depledge, är huruvida man bör välja bort vissa militära insatser till följd av begränsningar i koldioxid-budget.

Eftersom tillgänglig litteratur inte bedömts vara tillräcklig för förståelsen av den militära energiomställningen, i synnerhet inte ur ett svenskt perspektiv, inkluderar studien datainsamling baserat på intervjuer med anställda inom den svenska Försvarsmakten, FMV och FortV. Intervjuerna syftar till att kvalitativt täcka in många olika aspekter och perspektiv på den militära energiomställningen. De syftar inte till att ge någon representativ bild av attityder eller åsikter inom organisationerna. Inte heller innehåller de officiella ställningstaganden.

Respondenterna valdes ut för att representera olika försvarsgrenar och olika nivåer inom organisationerna. Tillämpningsområden som inkluderats är anläggningar, fartygsteknik, batteriteknik, logistik, flyg och markfordon. Totalt 12 personer har intervjuats i studien. Intervjupersonerna tillfrågades om sitt perspektiv på energiomställning och teknisk utveckling inom den egna verksamheten. Tematisk analys användes som metod för att bearbeta data från intervjuerna. Detta innebär ett iterativt arbete där destillat av olika ämnen delas in i teman och sub-teman [13]. Dessa har i sin tur använts för att bilda underkategorierna i PESTLE-strukturen.

4.3 Preliminära resultat

Studien är pågående fram till december 2024 och viss bearbetning av data återstår. Resultaten kommer därför att justeras och kompletteras. Ett urval drivkrafter och hinder inom varje temaområde presenteras ändå här, indelade enligt PESTLE-strukturen, se Tabell 2. Justeringar i strukturen har dock gjorts så att politisk och juridisk dimension slagits samman, likaså har den sociala dimensionen även fått inrymma organisatoriska teman. Resultaten kommer att bearbetas vidare och presenteras i sin helhet i form av en vetenskaplig artikel. Några resultat har dock redan inspirerat till förslag på verksamhetsområden i den förstudierapport som projektet levererat.

4.3.1 Operativa möjligheter och begränsningar

De flesta respondenter uttryckte, på olika sätt, att ökad prestanda (ökad förmåga) är den stora drivkraften för att engagera sig i utveckling och innovation avseende energiförsörjning. Detta ställdes i många fall mot det egna miljöansvaret, som beskrevs som en betydligt svagare drivkraft. Respondenterna ansåg dock att den nödvändiga utvecklingen av förmågor i stor utsträckning också ger miljövinster, främst via energieffektivisering men också möjligheten till lokalt producerad förnybar energi.

Områden som specifikt nämndes var robusthet inom anläggningar, möjligheter med elektrifierade fordon som ger tyst drift och ökat vridmoment men också möjligheten till ökad uthållighet och autonomi till följd av energieffektivisering och lokal energiproduktion.

Robusta försörjningskedjor togs upp av samtliga respondenter, främst som en drivkraft för inhemskt producerade bränslen. Några tog även upp problematiken med sårbarheter i försörjningskedjor för batterier och komponenter till energisystem. Det framkom också idéer kring hur Försvarsmakten skulle kunna påverka utvecklingen exempelvis genom att ingå i samarbeten och kanske i förlängningen via avtal.

Det nämndes också operativa krav som begränsar möjligheterna att implementera vissa lösningar för fossilfrihet, exempelvis att man inte kan göra avkall på operativ förmåga, att man har användningsmönster som inte liknar den civila sektorn så som magasinering av material och att kraven på batterisäkerhet är högre än för de flesta civila tillämpningar. Anpassningar till Nato kan begränsa möjligheten att enskilt implementera fossilfria lösningar i Sverige samtidigt som samverkan där kan leda till att man sprider kunskap och går framåt gemensamt.

4.3.2 Anpassning till civilsamhället

Nästan samtliga intervjuade tog upp anpassning till civilsamhällets energiomställning som ett betydande skäl för Försvarsmakten att se över energiförsörjningsområdet. Det skiljer sig dock mycket mellan hur starkt olika individer poängterar behovet av anpassning och vad man tror om takten på den civila omställningen. "Anpassning" kan ses som en negativ drivkraft som tvingar till förändringar man annars inte hade önskat sig. Denna drivkraft framträder också tydligt i de tidigare utredningar på temat klimatomställning som Försvarsmakten genomfört [14, 15, 16]. Gällande samhällsutvecklingen ser man dock en viss osäkerhet både gällande politik och teknikutveckling.

4.3.3 Organisatoriska frågor

Organisatoriska frågor berördes under de flesta av intervjuerna och täcker en bred palett av ämnen. Det framgick bland annat att de intervjuade från FMV och FortV gärna skulle se en tydligare efterfrågan från Försvarsmakten på att arbeta med energieffektivisering och nya energilösningar. Ett sådant uppdrag, ansåg man, skulle skapa större möjligheter för den egna myndigheten att ta fram sådana lösningar. Det togs också upp organisatoriska hinder så som att investeringar i energieffektiviseringsåtgärder bekostas lokalt medan de besparingar som åtgärderna resulterar i slås ut på hela organisationen, vilket inte skapar rätt incitament.

Glappet från forskning och utveckling till investering och implementering togs upp av flera respondenter. Detta är ett problem man känner till och har tagit vissa initiativ för att överbrygga, men där det ändå tycks krävas mer arbete. Man pekade på vikten av att föra in ny teknik på ett förtroendeingivande sätt i organisationen som ett centralt område. Om nya lösningar förs in i för stor skala innan man säkerställt att de fungerar i verksamheten, kan det skapa en rekyleffekt med misstro inom organisationen. Först när tester i forskningsmiljö och sedan småskaliga verksamhetstester visat att tekniken fungerar är den redo för mer storskaliga försök.

Till skillnad från ett flertal europeiska länder, finns ännu ingen uttalad strategi för hur den svenska Försvarmakten ska ställa om sin energiförsörjning mot fossilfrihet. Däremot har det genomförts ett antal studier inom området och det pågår också forskning inom FOI på uppdrag av Försvarmakten, inom området energiförsörjning, där även denna studie ingår. Tidigare försvarmaktsstudier har pekat på stora osäkerheter i fråga om vilka tekniker som kommer att vara ledande på längre sikt [14, 17] och kanske är detta en anledning till att man hittills inte velat slå fast en tydlig inriktning. Det togs även upp under en av intervjuerna, att den kraftiga tillväxttakten inom FM, integrationen med Nato samt stödet till Ukraina sammantaget gör att det helt enkelt är svårt att också sätta energiomställningen högst upp på dagordningen. Samtidigt uttryckte flera av de intervjuade att frågor som rör energiomställning och energieffektivisering är prioriterat. Försvarmakten är en toppstyrd organisation och det är rimligt att anta att en beslutad strategi för energiomställning skulle kunna vara ett stöd i arbetet inom organisationen. En sådan kan dock behöva utformas med en hög grad av öppenhet för nya lösningar och förändringar som drivs av alla de yttre faktorer som framkommit i analysen.

Tabell 2. Ett urval av faktorer inom respektive dimension i PESTLE-strukturen. Justeringar i strukturen har gjorts så att politisk och juridisk dimension slagits samman, likaså har den sociala dimensionen även fått inrymma organisatoriska teman.

Dimensioner	Faktorer	Drivkraft / hinder	Intern / extern
Politisk - juridisk	Förväntan från politiken och från samhället, att Försvarmakten ska göra vad man kan inom klimat- och miljöområdet (beaktat operativa krav).	+	E
	Kvantitativa klimatmål för Försvarmakten saknas.	-	E
	Avsaknad av en långsiktig stabil svensk miljöpolitik skapar osäkerhet kring takten och inriktning för samhällets omställning.	-	E
	Ny lagstiftning kan komma med hårdare krav. Långlivade system byggda för fossila bränslen utgör en risk.	+	E
	Klimatlagstiftningen inom EU ger långsiktig inriktning.	+	E
	Samverkan inom Nato kan stärka arbetet genom kunskapsspridning och gemensamma lösningar.	+	E
	Synkronisering inom Nato kan försvåra för länder att gå före.	-	E
Ekonomisk	Det kan bli kostsamt att stanna i fossilbaserade speciallösningar när civilsamhället ställer om.	+	E
	Energieffektiviseringar till följd av ny teknik kan ge besparingar.	+	I
	Omställning till bio- eller elektrobränslen medför kostnader.	-	E
	Elektrifiering och hybridisering medför kostnader.	-	E
Social - organisatorisk	Attraktionskraft som arbetsgivare.	+	I
	Acceptans i samhället.	+	I
	Behov av utbildning kring nya system.	-	I
	Organisatoriska hinder så som incitamentsstruktur och överbelastning.	-	I
	Gapet mellan forskning, prov och försök och implementering.	-	I
	Strategi för framtida energiförsörjning saknas inom FM.	-	I
	Medvetenhet inom organisationerna att energiomställning är viktig.	+	I
Teknologisk	Ökad robusthet med lokala nät, biobränslen och diversifiering av energikällor.	+	I
	Energieffektivisering till följd av hybridisering minskar logistiska beroenden.	+	I
	Nya förmågor som tyst drift med låg signatur.	+	I
	Särskilda utmaningar inom militär sektor (energitäthet, lagringsbarhet, köldtålighet).	-	I

	Lösningar finns redan inom många områden.	+	E/I
	Begränsningar i infrastruktur hindrar elektrifiering.	-	E/I
	Försvarmakten är beroende av civil infrastruktur, civila försörjningskedjor och fordon. Det krävs att man kan fungera i den strukturen.	+	I
	Osäkerhet om hur begynnande teknik kommer att utvecklas.	-	I
Miljö	Försvarmakten är en del av samhället och en del av omställningen.	+	I
	Operativa krav måste prioriteras, därför krävs ibland undantag.	-	I

4.3.4 Inspiration till fortsatt arbete

Utöver att bidra med övergripande förståelse för den energiomställningsprocess som pågår och som Försvarmakten är en del av, har studien pekat på ett antal konkreta områden att arbeta vidare med. Dessa områden har inkluderats bland förslagen på fortsatt verksamhet i Förstudien inom FoT temaområde Energiförsörjning [1].

Bland annat har provning av energisystem i operativ miljö lyfts fram som ett prioriterat område, som bör utvecklas i samverkan mellan FOI, FMV och Försvarmakten. FOI erbjuder sig också att lämna stöd till Försvarmakten i det fall man önskar ta fram en strategi för sin framtida energiförsörjning, ett arbete som även bör inspireras av andra länders erfarenheter. Försvarmaktens beroenden till civila försörjningskedjor har också lyfts upp tydligt under intervjuerna och är ett område som föreslås för vidare studier. Både i utformningen av en framtida strategi och i arbetet med att hantera militära beroenden till civila försörjningskedjor, finns ett tema som handlar om att lyfta medvetenheten om försvarsaspekterna på energiförsörjning för Sverige som helhet. Också detta är ett område som har lyfts fram inom studien om drivkrafter.

5 Åldringsmekanismer av batterier

Åldringsmekanismer omfattar nedbrytande processer som sker i ett batteri över tid. FOI:s inriktning är huvudsakligen på cellnivå, vilket innebär att vissa åldringsmekanismer som kan uppstå i ett system eller en modul, som exempelvis korrosion i kontaktdon, eller nedbrytning av polymera material, ej behandlas.

På cellnivå utgörs åldringen framför allt av reaktioner i och emellan olika delkomponenter i batteriet som på ett eller annat vis kan förändra batteriets prestanda eller säkerhet. I ett elektrokemiskt system som ej befinner sig i jämvikt, exempelvis ett fulladdat batteri, finns dessutom ytterligare en drivande kraft som kan agera pådrivande för sådana reaktioner.

Givet att battericeller till stor del är slutna, och att de i system som exempelvis elbilar kan förekomma i tusentals, innebär det en utmaning att bygga in sensorer och övervaka celler enskilt under drift. Mot bakgrund av detta kommer den typ av celler som skall användas i ett större eller strategiskt viktigt system behöva testas på förhand för att kunna ge rekommendationer avseende exempelvis utbytesintervall, optimala laddningsförlopp och hantering.

Här fokuseras på framtagning av metoder för att utvärdera och karakterisera batteriåldring och dess inverkan på prestanda och säkerhet.

5.1 Prestanda

En av de tydligaste indikationerna på att ett batteri har åldrats ur ett prestandahänseende är permanent förlust av tillgänglig batterikapacitet. Mekanismerna som orsakar detta varierar och det är därför viktigt att förstå vilka yttre faktorer (exempelvis temperatur, laddning/urladdning) som påverkar det inre (exempelvis litiumplätering) åldringsförloppet. Att kunna kvantifiera batteriets hälsa, och bestämma så kallad *State of Health* (SoH) forskas intensivt på inom civil sektor, vilket gör samarbeten med akademien nödvändiga.

FOI:s forskning kommer initialt inriktas på framtagning av metoder för att utvärdera effekterna av åldring i battericeller givet en militär tillämpning. Det innebär exempelvis cyklingsförlopp mot en driftprofil för att orsaka och studera samma typ av åldring i cellen som förväntas i en militär tillämpning.

Åldring genom cykling är emellertid tidskrävande och därför kommer inriktning även ske mot att utveckla metoder för att accelerera åldringsförlopp, där kalorimetriska metoder bland annat kommer att studeras för att prediktera och karakterisera åldring.

5.2 Säkerhet

Förutom hur åldring påverkar batterier ur ett prestandaperspektiv, behövs det även studeras hur de påverkas ur ett säkerhetsperspektiv. Säkerhetsperspektivet i detta fall är inriktat på brandsäkerhet och specifikt det termiska rusnings² förlopp som kan ske hos moderna batterikemier. Även detta är önskvärt att kvantifiera i ett så kallat *State of Safety* och utreda hur det korrelerar till det mer allmänt vedertagna begreppet SoH.

Här kommer fokus vara på metodutveckling för att undersöka hur åldring påverkar säkerheten i ett batterisystem, vilket innebär en vidareutveckling av de metoder som används för att undersöka termisk rusning i battericeller på FOI idag: initiering och studier av det termiska rusningsförloppet och *Accelerated Rate Calorimetry* (ARC). Hur prestandamått från metoderna som nämns i stycket ovan korrelerar till säkerhet kommer också att utredas.

² Termisk rusning är det explosivliknande händelseförloppet när batterier börjar brinna hejdlöst.

6 Pulsad laddning och urladdning av batterier

Kommersiella litiumjonbatterier är huvudsakligen optimerade för drift vid rumstemperatur, inom ett temperaturområde mellan 15 och 35 °C. Batteriernas förväntade livslängd påverkas negativt om upp- eller urladdning sker utanför detta temperaturintervall. Detta sker både vid kallare och varmare temperaturer, men mekanismerna för degradering skiljer sig åt.

Vid låga temperaturer påverkas batteriet av förändringar av elektrolytens fysikalkemiska egenskaper, vilket begränsar litiumjonens rörelse och kinetiken hos de elektrokemiska reaktionerna [18]. Denna försämring i mobiliteten kan även leda till att icke önskansvärda sidoreaktioner sker, så som att litium beläggs i metallisk form på elektrodytan och bildar *dendrit*er, som kan leda till kortslutning och termisk rusning.

Vid höga temperaturer ökar den kemiska nedbrytningen av batterier. Detta inkluderar nedbrytning och kontinuerligt återskapande av SEI³-lagret med produkter som i längden skadar batteriet, termisk nedbrytning av elektrolyten och förluster av aktivt material vid katoden [19]. Ökade temperaturdifferenser förstärker degraderingen: ju exceptionellare omgivningsförhållanden desto snabbare degradering.

I praktiska tillämpningar med extrema termiska förhållanden används ofta värmesystem (Thermal Management) för att hålla batterierna vid prestandamässigt mer fördelaktiga temperaturer. Detta är ofta tillräckligt, så länge vikt, energikostnad, investering och volymökningen inte skapar ytterligare utmaningar. För vikt känsliga tillämpningar utan värmesystem skulle säkerhet och tillförlitlighet kunna förbättras genom alternativa batteridesigner, särskilt vid användning i kalla klimat. Detta är en aspekt som bedöms som mycket relevant för militära tillämpningar (se stycke 8.1).

Forskning om battericeller för kalla klimat har inte samma prioritet som ökat energiinnehåll, detta gäller både i den kommersiella och akademiska sfären.

Detta delområde syftar till att undersöka problematiken kring litiumjonbatterier i kalla klimat. Arbetet kommer att genomföras enligt följande två huvudområden:

1. Kartläggning av batteriutformningar som är mer lämpligt anpassade för kalla klimat.
2. Undersökning av alternativa batteriladdningsstrategier.

6.1 Kartläggning av batteriutformningar

Denna del av arbetet kommer att inriktas på battericeller, till exempel val av katodmaterial och elektrolyt, som är lämpade för drift vid låga temperaturer. En teoretisk undersökning av battericellskemier, som är bättre anpassade för kalla förhållanden, kommer att genomföras på FOI:s avdelning Vapen, skydd och säkerhet. Fokus kommer att ligga på metoder för att utvärdera energilagersäkerheten och prestanda i kalla klimat.

När det gäller elektrolyter, kommer ett examensarbete på masternivå på Uppsala universitet att genomföras Q1–Q2 2025. Arbetet kommer att undersöka elektrolyter som är anpassade för låga temperaturer.

³ Solid-electrolyte interphase.

6.2 Alternativa laddningsstrategier

En annan del av arbetet fokuserar på alternativa batteriladdningsstrategier, där initialt pulsad laddning och laddning i närvaro av ett externt magnetfält kommer undersökas. Fördelarna med pulsad laddning är omdiskuterade, men en hypotes är att laddning vid optimal frekvens kan minska batteriets interna impedans. Detta kan leda till högre laddningsströmmar och kortare laddningstider utan att främja degraderingsmekanismer som normalt uppstår vid höga laddningsströmmar.

Nuvarande laddningsprotokoll i litiumjonbatterier baseras oftast på CC-CV⁴. Ett alternativ som kommer studeras är att använda PC-CV⁵ vid rumstemperatur för att undersöka potentiella fördelar som snabbare uppladdningstider. Vid låga temperaturer syftar studien till att undersöka hur pulsad laddning påverkar litiumjonernas mobilitet i elektrolyten.

Laddning av litiumjonbatterier i ett externt magnetfält har visat sig ha fördelar för både laddningstid och batteriets livslängd. De fysikaliska effekterna av magnetfält vid laddning är väldokumenterade [20], men i detta delområde skall det undersökas ifall dessa positiva effekter kan motverka de negativa effekterna av att ladda batterier i kalla miljöer. Denna undersökning är planerad att genomföras som en del av ett materialvetenskapligt kandidatprojekt på Uppsala universitet under Q2 2025. Projektet kommer att involvera fem tredjeårsstudenter.

⁴ CC-CV = Constant Current Constant Voltage.

⁵ PC-CV = Pulsed Current Constant Voltage.

7 Metallförbränning

7.1 Bakgrund

Metaller och vissa halvmetaller kan användas som energilagringssystem för generatorer. Genom att utvinna energin via exoterm oxidering av sagda ämne och tillsätta energin i endoterm katalytisk reduktion av resulterande oxider kan både metall och syre återanvänds i cykliska förlopp. Det enda tillskott som krävs är energi vid reduktionen, vilken med fördel kan tas från förnybara källor med ostadig produktionstakt, då det ju handlar om lagring.

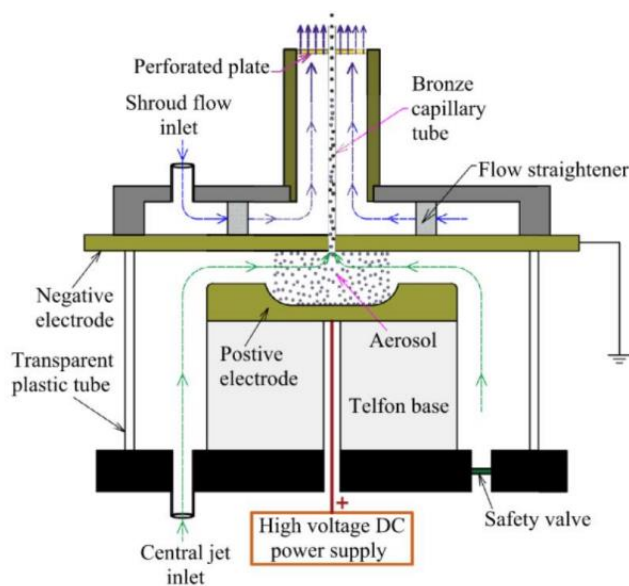
Genom att effektivisera dessa processer kan man konstruera energilagringssystem med relativt låga materialinvesteringar och nära obefintliga lagringsförluster, men med energiåtervinst i paritet med klassiska förbränningsprocesser såsom kolmotorer, gasturbiner och liknande system [21, 22]. Oxidationsprocessen för metaller kan ske direkt i syrgas/luft, så kallad "torr cykel", eller i vattenånga, kallad "blöt cykel". Blöt cykel genererar vätgas från vattnet, vilken kan brännas direkt eller kombineras med bränsleceller, för ännu högre energiåtervinst [23].

Förbränningscykeln har små växthusgasutsläpp, då grundämnet kol inte förekommer i processen. Tekniken är ett avsteg från befintliga fossil-baserade förbränningsmotorer, och kräver anpassning av existerande teknik. I dagsläget är oxideringsprocessen av metaller en av de stora utmaningarna för att göra tekniken ekonomiskt gångbar.

I syfte att utforska hur aluminiumkorn oxideras i en blöt cykel har detta projekt utfört planering och påbörjat beställning av en testuppställning för att studera hur aluminiumkorn brinner i överhettad vattenånga.

7.2 Verksamhet

En experimentell uppställning har utformats för att därifrån kunna mäta på hur enskilda korn brinner och växelverkar med ett samflöde av vattenånga överhettad till ca 800 °C. Uppställningen är inspirerad av arbetet inom järnkorns-oxidering på Eindhovens Teknologiska Universitet, och är planerad att byggas ungefär enligt Figur 3 nedan.



Figur 3. En experimentell uppställning för att på ett kontrollerat vis distribuera metallkorn i ett samflöde. Mätsektionen är ej synlig och skulle ligga ovanför denna bild. Bilden är hämtad ur [17, 19].

Likspänning över två elektroder används för att få partiklar (aerosol) att lyfta, där ett oxidatorflöde plockar upp dem och för dem genom ett tunt rör med Poiseuille-flöde⁶. Detta rör distribuerar partiklarna i mitten av en mätkanal med ett annulärt oxidator-samflöde runt sig. Metallkornen tänds med laser och avbildas med höghastighetskamera. Position och ljusstyrka som funktion av tid kommer kunna svara på hur länge partikeln brann, samt hur mycket den bromsade/accelererade den omgivande gasen.

I skrivande stund pågår fortfarande designarbete för partikel/aerosol generator, samt test för konstruktion av överhettare till vattenånga. Offert på ånggenerator har inkommit och ett första översiktligt beräkningsunderlag på effekter och massflöden har tagits fram.

⁶ Poiseuille-flöde syftar till flödet av en Newtonskt viskös vätska genom ett rör där flödet beror på tryckdifferens, rörradie, vätskans viskositet och rörlängd.

8 Konferenser och samarbeten

8.1 ICE-PPR

Under året har FOI deltagit i det multilaterala samarbetet *International Cooperation Engagement Program for Polar Research* (ICE-PPR). Samarbetet har ett militärt fokus och tanken är att militärer ska få direkt kontakt med forskare för att kunna lyfta problem och utmaningar med system som används operativt. FOI:s deltagande inom detta samarbete har varit kopplat till grupperna *Power and Energy*⁷, som hanterar energirelaterade forskning- och teknikutvecklingsfrågor kopplat mot kallt klimat, samt *Terrestrial Platforms*⁸ som hanterar fordonsrelaterade frågor kopplat mot kallt klimat. Det sker samverkan mellan grupperna då flera av frågeställningarna berör båda, såsom hybridisering, batterier, elproduktion med flera. Från 2025 och framåt är planen är att FoT Markfordon kommer finansiera deltagandet i Terrestrial Platforms. Aktiviteter under året har varit digitala möten en gång i månaden samt fysiska workshops, en som hölls i Stockholm 23–25:e april 2024 där endast gruppen Power and Energy möttes, samt en i Ottawa, Kanada, 12–14:e november 2024 där flera grupper var representerade, däribland Power and Energy samt Terrestrial platforms;

- **Stockholm 23–25:e april**

Workshopen anordnades av gruppen Power and Energy och hade deltagare från USA, Kanada, Norge och Sverige. Syftet med workshopen var att lära känna varandra och förstå varandras utmaningar och möjligheter av forskning, teknikutveckling och nyttjandet av energisystem för kallt klimat. Ett mål var att identifiera fokusområden inom gruppen som flera länder och organisationer är intresserade av, vilket resulterade i dessa tre områden:

- Batterier
- Mikrogrids
- SMR⁹

- **Ottawa 12–14:e november**

Även denna workshop anordnades av gruppen Power and Energy men även deltagare från grupperna Terrestrial platforms, *Sensors*¹⁰ och *Human Performance*¹¹ deltog. Under dagarna gavs föreläsningar från olika militära organisationer från främst USA och Kanada men även en föreläsning från MIT¹². En panel bestående av militärer från USA, Kanada, Sverige, Norge och Finland där militärerna diskuterade hur olika uppdrag och problem, under arktiska operationer, hanteras. Olika subgrupper arbetade även enskilt för att rikta fokus inom grupperna. Dagarna avslutades med rundturer på olika laboratorier inom NRC¹³ runt om Ottawa, bland annat batteritestanläggningen och fordonslabbet.

Utöver de fysiska mötena planeras det även för en övning som ska genomföras i norra Kanada under februari och mars 2025. Syftet med övningen är att öva på taktiska moment, överlevnad samt att testa utrustning i kallt klimat. Övningen kommer att genomföras under en månad och deltagarna kommer att förflytta sig ca 1200 km och ambitionen är att ha deltagare från USA, Kanada, Norge, Finland och Sverige närvarande. Övningen ger möjlighet att testa både befintlig utrustning samt även materiel som myndigheter och

⁷ Effekt och Energi

⁸ Markplattformar

⁹ Små Modulära Reaktorer

¹⁰ Sensorer

¹¹ Mänsklig förmåga

¹² Massachusetts Institute of Technology, föreläsare: Dr. Yoel Fink på ämnet Computing Fabrics for Arctic Operations.

¹³ National Research Council Canada,

industri inom svensk försvarsutveckling är intresserade av att prova i kallt klimat. Genom samarbetet får Sverige även tillgång till information om utrustning som andra länder testat samt hur den har presterat under övningen. Enligt samarbetsavtalen kan informationsutbyte ske upp till Hemlig/Secret.

8.2 f3 innovationskluster för hållbara biodrivmedel

Samverkan med branschaktörer inom förnybar energi bidrar till att höja kunskapsnivån genom att snabbt få del av nya projekt och strömningar inom berörda branscher, men är också en möjlighet att påverka genom att föra fram både det militära och det civila försvarets perspektiv och behov.

8.2.1 Former för samverkan

Under perioden 2022-2024 har Försvarsmakten varit medlemmar i f3 – Innovationskluster för hållbara biodrivmedel. FOI har, på Försvarsmaktens initiativ bjudits in att delta vid möten och har vid några tillfällen varit ersättare för Försvarsmaktens representant. Det har möjliggjort för FOI att inom ramen för FoT temaområde Energiförsörjning, ta del av forskning och kunskapsspridning av hög kvalitet samt ett omfattande kontaktnätverk. FOI har deltagit vid två fysiska samt tre web-baserade möten.

Nuvarande anslagsperiod för f3 slutar 2024, men en ansökan om en fortsättning 2025 - 2027 har nyligen lämnats in till Energimyndigheten. FOI ämnar att inom ramen för FoT Energiförsörjning delta på eget mandat i det nya projektet. Detta eftersom den forskning och de kunskapssammanställningar som spridits inom f3 har varit av hög klass och till stor nytta för FOI:s omvärldsbevakning. FOI ser också möjligheten att påverka utvecklingen inom drivmedelsområdet i en riktning som gagnar försvaret av Sverige. Inhemska försörjningskedjor för högkvalitativa förnybara bränslen, baserade på svensk råvara är ett prioriterat område att bevaka och driva.

8.2.2 Om f3 och verksamheten som bedrivits

Innovationsklustret f3 koordineras av Stiftelsen Chalmers Industriteknik och har ett 20-tal medlemmar inom näringsliv, myndigheter och akademi.¹⁴ Dess övergripande mål är att bidra till en faktisk och snabb omställning till hållbara förnybara drivmedel, samt öka transportsektorns förutsättningar att nå klimat- och andra hållbarhetsmål till 2030 och 2045. Det sker genom samverkan och kunskapsspridning. Ett antal kunskaps-sammanställningar inom relevanta områden har tagits fram.¹⁵ De fysiska och digitala medlemsträffarna har bland annat belyst följande områden:

- EUs klimatpolitik och dess konsekvenser för biodrivmedelsutvecklingen.
- Energisystemmodellering och energisystemanalys.
- Styrmedel för biodrivmedelsproduktion i Sverige och dess påverkan på industrins investeringsvilja.
- Biodrivmedelsutvecklingen i USA och Brasilien, dagens och framtidens produktion och användning, olika biodrivmedel, klimatmål och styrmedel.
- Tillgång till biomassa för biodrivmedelsproduktion i Europa.
- Möjligheter för avancerade biodrivmedel i EU. Utvecklingen av elektrobränslen, forskningsbehov, produktionsplaner/investeringar och hur de hanteras inom RED III.

¹⁴ <https://f3centre.se/sv/>

¹⁵ <https://f3centre.se/sv/fakta/>

8.3 Powerful Innovation days Energy Island Conference

FOI har deltagit i Powerful Innovation Days Energy Island Conference 2024 i Ludvika 17–18:e oktober 2024. Det var en kort konferens med fokus på elnät och ö-drift samt cybersäkerhet för dessa. Presentationer hölls av kommunala energibolag, privata bolag, forskningsinstitut och aktörer från akademien. Innehållet var varierande och fokus låg till stor del på visioner och mål då presentationer med empirisk data saknades.

De utförda projekt inom ö-drift som presenterades var Vattenfalls mikronät på Arholma och Ludvikas Krafttanken. På Arholma nyttjar Vattenfall solceller och batterienergilagrar som ger en uthållighet på 1–4 timmar vid el-bortfall för permanent boende på ön. Krafttanken i Ludvika är ett batterienergilagrar som kan förse de viktigaste lasterna i Ludvika kommun med energi på upp till 6 timmar, som exempelvis brandstationen. Ludvikas strategi är att under den tiden ta beslut om vattenkraftverket bör tas i bruk. Från dessa två projekt finns kunskap om reglering mellan ordinarie nätdrift och ö-drift att inhämta. I Arholma-projektet har en sömlös övergång mellan de två olika driftsätten arbetats fram.

Dödnätsstartförmåga togs upp som en utmaning, det vill säga problematiken kring att starta upp en ö-drift i ett läge där nätet är helt utan energi. Ellevio energy solutions presenterade sitt batteri vid vindkraftparken ”Åskälen” som klarar dödnätsstart. Batteriet används i dagsläget för att vrida vindkraftverk vid el-bortfall. Lars Nordström, professor inom *Information Systems for Power System Control* på KTH, beskrev ett projekt där de med hjälp av maskininläring optimerar omkopplingen för att säkerställa energiförsörjning av viktiga laster vid haverier i elnätet.

De olika aktörerna var samstämmiga om att ett mer sammankopplat elnät var framtiden, att man bör ta vara på och utnyttja synergier, samt att den ökande mängden uppkopplade enheter medför en ökande hotbild mot elnätet som få verkar ha tagit höjd för, men som man vill börja arbeta mer med. All uppkopplad utrustning som kan styras på distans kan också utnyttjas av illvilliga parter och destabilisera elnätet genom att simultant ansluta eller koppla bort betydande last. Därav belystes IT-säkerhet i privata anläggningar och hårdvara från främmande makt som sårbarheter.

8.4 FORTE

FOI deltog i oktober 2024 på konferensen *Future Operations – Resilience in Transitioning Energy* (FORTE) som arrangerades av NATO Energy Security Centre of Excellence (ENSEC) i Vilnius. Konferensen sträckte sig över tre dagar med inledande talare och paneler på kvällen den första dagen, följt av två heldagar. Talare på konferensen var en blandning av energiexperter från både privat och offentlig sektor samt från olika länders försvarsmakter. Här återges övergripande vad som presenterades och diskuterades under konferensen.

Talare från alla parter förespråkade en utökad samverkan då energiinfrastuktur ofta ägs och drivs av privat sektor, vilket innebär att privata företag spelar en viktig roll för samhällets motståndskraft under kris eller krig. Ingen talare presenterade en tydlig metod för hur detta ska åstadkommas på ett säkert och effektivt sätt men förespråkade att undersöka möjligheter till att utöka samverkan och utbyte.

Vidare beskrev ett antal talare att energisäkerhet bör integreras som en del i den nationella säkerheten. Energisäkerhet menas då både som tillgänglighet genom fysisk infrastruktur och tillgång till energi för en låg kostnad. Olika länder, där ibland Litauen, Frankrike och Australien presenterade sina nationella strategier för att säkra militär energiförsörjning på ett övergripande plan. Det framgick under presentationerna att dessa länders strategier är relativt samstämmiga med hänsyn till ländernas olika förutsättningar.

Utöver detta betonades av många talare att beroenden till andra länder är en viktig aspekt när det gäller energisäkerhet. Exempelvis har många länder tidigare varit beroende av rysk olja och gas. I och med Rysslands anfallskrig mot Ukraina har många länder antingen frigjort sig eller tagit steg mot ett frigörande från dessa beroenden. Samtidigt innebär omställningen till förnybar energi att väst håller på att göra sig allt mer beroende av Kina, då en stor del av de mineraler och metaller som behövs i energiomställningen kommer därifrån. Under konferensen uttrycktes starka uppmaningar om att ta kontroll över produktionen av dessa mineraler och metaller för att stärka de allierades roll i energiomställningen. Detta innebär att EU och NATO måste skapa ett starkare samarbete för att etablera fungerande leverantörskedjor. För att stärka dessa leverantörskedjor gavs exempel på att upphandlingsregler bör innehålla säkerhetsklausuler.

Vidare beskrevs metoder för att effektivisera energianvändning inom försvarsverksamheter. Detta görs genom teknik som övervakar energianvändningen och estimerar hur mycket energi som faktiskt behövs för att uppnå ett visst ändamål. Ett av dessa projekt heter *Energy Management Project* och drivs av kanadensiska forskare.

Utöver detta förespråkades det av ett antal talare att öka det politiska inflytandet över både energisäkerhet för, och energiomställning inom försvarsverksamhet. Exempelvis bör politiken ställa krav på riskanalyser och förberedelser för att skapa en redundans inom hela energisystemet. Under konferensen diskuterades avvägningen mellan informationsutbyte och informationssäkerhet, även mellan Natoländer. Under konferensen nämndes det att i framtiden kommer beslut behöva tas kring vilken typ av information som kan delas mellan länder för att optimera samarbetsförmågan utan att ta risker med sekretessbelagda uppgifter. Ett antal talare resonerade även om hur AI spelar in i frågan om informationsdelning. AI kan medföra stora möjligheter men även en mängd risker. Resonemangen kretsade här kring hur AI ökar effektiviteten inom energisystem, samtidigt som sårbarheten och penetrationsrisken ökar.

Oleksander Sukhodolia från *National Institute for Strategic Studies* i Ukraina presenterade Ukrainas hantering av kritisk infrastruktur under det pågående kriget. Sukhodolia beskrev hur reservdelar till elstationer och ställverk har varit en avgörande del i arbetet för att kunna återställa eltillförseln till stora områden. Dock tog reservdelarna slut på två månader vilket gjorde att Ukraina senare importerade dessa från omvärlden. Sukhodolia beskrev vidare att privata ägare av infrastruktursystem inte kan hantera attacker på egen hand, vilket betyder att Försvarsmakten måste prioritera skyddet av kritisk infrastruktur under väpnade angrepp. Avslutningsvis beskrev Sukhodolia hur han, baserat på erfarenhet, anser att alla länder måste gå från att enbart skydda energisystem till att snarare bygga resiliens i systemet.

8.5 CESTAP

Som nämns i kapitel 2 utgör CESTAP en ovärderlig kontaktyta till relevanta partners. Två år in i projektet har flera nya kontakter kunna etableras och planerna framåt tyder på ytterligare utökade kontakter. Flera av de partners som ingår i CESTAP återfinns numera även inom andra samarbeten kring alternativa bränslen, där NATO STO:s AVT-panel är en av de mer omfattande, där nu inte bara FOI finns representerade utan även GKN Aerospace och SAAB.

FOI hade tillsammans med LTH ett bidrag till AIAA-konferensen i Orlando, USA, i form av ett arbete där både fossila och alternativa bränslen simulerats och jämförts i en akademisk brännarkonfiguration. Arbetet med simulering av dessa bränslen i denna geometri, kommer framöver utvecklas ytterligare. Utöver detta planeras ett omfattande arbete där en av FOI nyutvecklad kemimodell, kapabel att modellera en rad olika fossila och alternativa bränslen, kommer användas i ett flertal olika brännarkonfigurationer. Detta sker i samarbete med LTH och GKN Aerospace. Flera vetenskapliga artiklar med dessa arbeten som utgångspunkt är planerade.

8.6 Strömförsörjning

FOI har deltagit på en strömförsörjningskurs i Halmstad som hölls av Försvarmaktens tekniska skola. Kursen ägde rum 28–30 oktober 2024 och syftade till att sprida kunskap om elverk; dess uppbyggnad, funktion och praktisk användning i olika driftfall. En överblick gavs bland annat av följande:

- Elverk i Försvarmakten
- Hur man planerar och drar kabel för effektiv strömförsörjning
- Tekniska kunskaper: ellära, VA vs Watt, 1-fas & 3-fas, bränslen & hållbarhet, dieselmotorns och generatorns uppbyggnad och funktion
- Drift av elverk
- Framtida lösningar: Hybriddrift med batterier? Vätgas?

9 Referenser

- [1] W. Sahlén, M. Elfsberg, J. Enström, M. Karlsmo, M. Karlsson Hagnell, E. Lallo, A. Odell, R. Stappe Renner och N. Zettervall, "Förstudie för FoT område Energiförsörjning," FOI-R--5705--SE, 2024.
- [2] A. Åkerblom, N. Zettervall och C. Fureby, "Comparing Chemical Reaction Mechanisms for Jet Fuel Combustion in Simulations of a Turbulent Premixed Bluff-Body Burner," *AIAA SCITECH 2024 Forum*, p. 0179, 2024.
- [3] CESTAP, "Annual Report 2023," 2023.
- [4] K. Danél och B. Fallenius, "Prov med biobränslen i turbojetmotor Microturbo TRI-60," FOI-R--5101--SE, 2020.
- [5] S. Achinas, J. Horjus, V. Achinas och G. J. W. Euverink, "A PESTLE Analysis of Biofuels Energy Industry in Europe," *Sustainability*, vol. 11, nr 21, p. 5981, 2019.
- [6] A. Tsvetkova, M. Hellström, H. Schwartz, R. Rabetino och H. Syed, "A transition towards clean propulsion in shipping: The role of PESTLE drivers and implications for policy," *Marine Policy*, vol. 161, p. 106002, 2024.
- [7] C. Müller, "Transition to battery-electric and fuel cell heavy-duty trucks: A multi-level, multi-dimensional approach," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 127, p. 104052, 2024.
- [8] K. Amega, Y. Moumouni, Y. Laré, R. Bhandari, P. Takouda och S. Madougou, "Power system transformation in emerging countries: A SWOT/PESTLE analysis approach towards resiliency and reliability," *Heliyon*, vol. 10, nr 12, 2024.
- [9] M. Mokhtar, W. M. Zuri, M. Rasid, A. Asmadi och A. Manaf, "Decision Making on the Renewable Energy Penetration in Malaysia via SWOT-PESTLE Analysis: Hydrogen Fuel Cell and Solar Photovoltaic Thermal Technology," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1257, p. 012009, 2022.
- [10] C. Samaras, W. J. Nuttall och M. Bazilian, "Energy and the military: Convergence of security, economic, and environmental decision-making," *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100409, 2019.
- [11] K. Bell, V. Price, K. McLoughin, M. Cha, L. Skinner, K. Simpson, R. Jones, A. Raman och Z. Cunningham, "Decarbonising and Diversifying Defence in the United Kingdom and United States - A workers' enquiry for a just transition," The British Academy, 2022.
- [12] D. Depledge, "Low-carbon warfare: climate change, net zero and military operations," *International Affairs*, vol. 99, nr 2, pp. 667-685, 2023.
- [13] V. Braun och V. Clarke, "Using thematic analysis in psychology," *Qualitative Research in Psychology*, vol. 3, pp. 77-101, 2006.
- [14] B. Nykvist och T. Mårtensson, "Klimatneutral Försvarsmakt - Analys av fossilfria vägval för försvarsgrenarna. Möjliga åtgärder på kort sikt.," FOI-R-5201--SE, 2021.
- [15] A. Andersson, H. Andersson, L. Simonsson och T. Mårtensson, "Försvarsförmåga och klimatneutralitet - Strategisk planering för en värld som ställer om," FOI Memo 8104, 2023.

- [16] Försvarsmakten, "Slutrapport av Studie GEM182004 Klimatneutral Försvarsmakt FM2023-3555:2," Försvarsmakten, 2023.
- [17] B. Nykvist, "Klimatneutral Försvarsmakt - Frågeställningar för Armén och sammanställning av förslag på inriktning för fortsatt arbete mot minskat fossilberoende inom FM," FOI Memo 7433, 2021.
- [18] A. Belgibayeva, A. Rakhmetova, M. Rakhmatkyzy, M. Kairova, I. Mukushev, N. Issatayev, G. Kalimuldina, A. Nurpeissova, Y.-K. Sun och Z. Bakenov, "Lithium-ion batteries for low-temperature applications: Limiting factors and solutions," *Journal of Power Sources*, vol. 557, p. 232550, 2023.
- [19] Y. Zhao, Y. Patel, I. A. Hunt, K. M. Kareh, A. A. Holland, C. Korte, J. P. Dear, Y. Yue och G. J. Offer, "Preventing lithium ion battery failure during high temperature by externally applied compression," *Journal of Energy Storage*, vol. 13, pp. 296-303, 2017.
- [20] K. Shen, X. Xu och Y. Tang, "Recent progress of magnetic field application in lithium-based batteries," *Nano Energy*, vol. 92, p. 106703, 2022.
- [21] J. M. Bergthorson, "Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 68, pp. 169-196, 2018.
- [22] Y. L. Shoshyn, D. Ning, M. Abdallah, G. Finotello, H. Prime, M. Baigmohammadi, W. Prasadha, T. Spee, R. Hermanns, M. R. Hulsbos, R. J. M. Bastiaans, J. Hameete, N. J. Dam, T. A. M. Homan, N. E. van Rooij, M. van Genderen och P. de Goey, "Experimental Research On Iron Combustion At Eindhoven University of Technology," i *International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment*, Lisbon, Portugal, 2023.
- [23] Y. Yavor, S. Goroshin, J. M. Bergthorson, D. L. Frost, R. Stowe och S. Ringuette, "Enhanced hydrogen generation from aluminum–water reactions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, nr 35, pp. 14992-15002, 2013.
- [24] N. Zettervall, "Reduced reaction mechanisms for aviation fuels – Reduced reaction mechanisms for Jet A1, JP-5 and C1," Totalförsvarets Forskningsinstitut, 2022.
- [25] D. Ning, S. Y. J. van Oijen, G. Finotello och L. de Goey, "Burn time and combustion regime of laser-ignited single iron particle," *Combustion and Flame*, vol. 230, p. 111424, 2021.

