



# Temaområde Energiförsörjning

Avrapportering av 2025 års verksamhet

WILHELM SAHLÉN, EMMA ALENIUS, MATTIAS ELFSBERG, MATTIAS FORSLUND,  
MARTIN KARLSMO, ELIAS LALLO, SARA MUNKTELL, REBECCA STAPPE RENNER,  
NIKLAS ZETTERVALL

Wilhelm Sahlén, Emma Alenius, Mattias Elfsberg,  
Mattias Forslund, Martin Karlsmo, Elias Lallo,  
Sara Munktell, Rebecka Stappe Renner, Niklas  
Zettervall

# Temaområde Energiförsörjning

Avrapportering av 2025 års verksamhet

Titel	Temaområde Energiförsörjning – Avrapportering av 2025 års verksamhet
Title	Focus Area Energy Supply – 2025 Activity Report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5896--SE
Månad/Month	Januari
Utgivningsår/Year	2026
Antal sidor/Pages	21
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnr/Project no	E20963
Godkänd av/Approved by	Malin Kölhed
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet

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

Denna årliga rapport sammanfattar verksamhet utförd inom FoT Energiförsörjning 2025. Verksamheten har omfattat uppbyggnad av ny laboratorieinfrastruktur. Därutöver har inledande studier genomförts kopplat till batterier och åldring, kallt klimat och laddning, modellering och simulering kopplat till förbränning av flytande bränslen samt områdesbevakning inom civila beroende och civil-militär samverkan.

Nyckelord: energiförsörjning, energi, energisystem, batterier, alternativa bränslen, bränslen, vätgas, litiumjonbatterier, bränsleceller, civil-militär samverkan, civila beroenden, metallförbränning, mikronät, ödrift

## **Summary**

This annual report summarizes activities carried out within FoT Energy Supply 2025. The activities have included the establishment of new laboratory infrastructure. Furthermore initial studies have been conducted related to batteries and aging, cold climate and charging, modelling and simulation connected to combustion of liquid fuels, as well as a mapping of civilian dependencies and civil-military cooperation.

Keywords: energy supply, energy, energy systems, batteries, alternative fuels, fuels, hydrogen, lithium-ion batteries, fuel cells, civil-military cooperation, civilian dependencies, metal combustion, microgrids, islanding

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Energilagring</b> .....	<b>8</b>
	2.1 Åldring .....	8
	2.2 Kallt klimat .....	8
	2.3 Laddningstekniker .....	9
<b>3</b>	<b>Energiomvandling</b> .....	<b>10</b>
	3.1 Grindsjöns energitestanläggning (GRETA) .....	10
	3.2 Elektrolys .....	11
	3.3 Bränsleceller .....	11
<b>4</b>	<b>Bränslen</b> .....	<b>14</b>
	4.1 Flytande bränslen .....	14
	4.2 Metallförbränning .....	16
<b>5</b>	<b>Strategisk inriktning energiförsörjning</b> .....	<b>17</b>
	5.1 Civil-militär samverkan .....	17
	5.2 Samarbeten och konferenser .....	18
<b>6</b>	<b>Slutkommentar</b> .....	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Referenser</b> .....	<b>20</b>



# 1 Inledning

Denna årsrapport sammanfattar den verksamhet som bedrivits under 2025 inom FoT Temaområde Energiförsörjning, uppdrag AT.9228081, och utgör årets leverans. Verksamheten har bedrivits på FOI:s avdelningar Vapen, Skydd och Säkerhet (VSS) och Försvarsanalys (FA). Arbetet har innefattat bland annat uppbyggnad av laboratorieinfrastruktur, studier relaterat till batterier och kallt klimat, laddningstekniker för batterier, modellering och simulering kopplat till förbränning av flytande bränslen samt områdesbevakning inom civila beroende och civil-militär samverkan.

Verksamheten inom temaområdet syftar till att lägga grund för det kommande FoT-området vars mål är att förvalta och utveckla kunskap inom energiförsörjningens relevanta delar för Försvarsmakten. Detta spänner från Försvarsmaktens förmåga vid utveckling och anskaffning av materiel till att skapa förståelse för energiförsörjningsområdet i stort inklusive områdets utmaningar och möjligheter.

Energiförsörjning inom Försvarsmakten utgör en fundamental förutsättning och är direkt förknippad med Försvarsmaktens förmågor. Forskningsområdet relaterat till Temaområde Energiförsörjning, vilket är ett kommande FoT-området, träffar alla existerande energisystem oavsett storlek. Detta gör området komplext och omfattande. Inom produktion omvandlas energi, som med hjälp av en energibärare, i sin tur distribuerar energi till en användare vilken därefter konsumerar energin. Om det finns en diskrepans inom plats eller tid mellan produktion och konsumtion behövs lagring som ett hjälpmedel. Området har en militär inriktning med gränssytor mot det civila försvarets energiberedskap och tillåts hitta effektiva sätt att samarbeta med civila aktörer.

Verksamheten är uppdelad i fyra delområden:

- **Energilagring**  
Syftar till att utveckla kunskap kring energilagringsfrågor med fokus på batterier.
- **Energiomvandling**  
Syftar till att utveckla kunskap kring energiomvandlingsfrågor med fokus på bränsleceller och elektrolysörer.
- **Bränslen**  
Omfattar studier av alla relevanta aspekter av alternativa bränslen, inklusive metaller, samt teknik för att utvinna energi ur sådana.
- **Strategisk inriktning energiförsörjning**  
Syftar till att utveckla kunskap kring energiförsörjningsfrågor genom att täcka kunskapsområden som inte ingår i övriga deluppdrag, som till exempel civil-militär samverkan och civila beroenden, samt skapa förutsättningar för internationell samverkan.

## 2 Energilagring

Under 2025 har en förnyelse av experimentella resurser för energiverksamheten påbörjats, där bland annat ett nytt laboratorium för batterirelaterad verksamhet har byggts upp. FoT-Energiförsörjning har under året bidragit till denna förnyelse. Verksamhet har inletts inom åldring, kallt klimat och laddningstekniker kopplat till batterier, vilket beskrivs närmare i detta kapitel.

### 2.1 Åldring

Åldring av batterier, och framförallt möjligheten att förhållandevis enkelt kunna karakterisera och skatta åldringsgraden hos dessa, är ett mycket viktigt verktyg för att avgöra säkerhet och prestandan hos ett batteri. En konventionell metod för att bestämma åldringen (eng. *State of Health*) hos ett batteri är att mäta batterikapaciteten vid en given tidpunkt och jämföra denna med dess kapacitet då batteriet var nytt. Metoden svarar emellertid inte på åldringsmekanismernas karaktär och i vilken grad dessa påverkar batteriets säkerhet. För att svara på dessa frågor krävs ytterligare analyser, men även utveckling av nya karakteriseringsmetoder.

Arbetet har initialt fokuserat på kunskapsuppbyggnad kring befintliga åldringsanalysmetoder och tillämpning av dessa på batterier som genomgått åldring typisk för militära tillämpningar, exempelvis användning i mycket kalla temperaturer (-40 °C), eller laddning och urladdning enligt driftprofiler för olika militära system. Metoderna kommer därmed att utgöra ett viktigt analysverktyg när slutsatser kring åldring skall dras inom FoT Energiförsörjning, men även för andra projekt som pågår kring hantering av batterier. Ett exempel är arbetet som pågår med kalenderåldring av batterier i FoT Skydds- och anläggningsteknik [3] [4] och framtida materielutvecklingsprojekt från Försvarsmakten eller Försvarets materielverk (FMV).

### 2.2 Kallt klimat

Försämrade batteriprestanda vid kalla klimat är ett faktum som gäller i stort sett alla konventionella batteritekniker. För Försvarsmakten, som verkar i temperaturer långt under den normala arbetstemperaturen för batterier, innebär detta en utmaning. Tidigare genomfört arbete hos FOI inom projektet Demo UCAV [5] påvisar detta genom försök där olika battericeller har belastats med en driftprofil som motsvarat en elektriskt driven patrullrobot. Slutsatser som dras i det arbetet är att prestandan varierar beroende på vilka battericeller som används och att det inte bara är energikapacitet hos battericellerna som är avgörande.

I syfte att ta fram batterier med bättre prestanda i kalla klimat har ett examensarbete [6] genomförts i samarbete med Uppsala Universitet inom ramen för FoT Energiförsörjning. Examensarbetet syftade till att byta ut en nyckelkomponent för litiumjonbatteriers prestanda i kallt klimat, den konventionellt använda elektrolyten bestående av LiPF<sub>6</sub>/EC/DEC, mot andra elektrolyter som teoretiskt sett är mer lämpade för lägre temperaturer samt jämföra prestandan hos dessa. Examensarbetet fann intressanta kandidater att ersätta den konventionella elektrolyten med, som vid urladdning i -20 °C kunde leverera mer energi än LiPF<sub>6</sub>/EC/DEC. Det krävs dock fler mätningar och ytterligare statistik för att med mer säkert kunna fastställa fördelarna och eventuella nackdelar. Ytterligare examensarbeten på området är därför planerade att genomföras under 2026 i fortsatt samarbete med Uppsala Universitet.

Inom FoT Energiförsörjning har ett arbete med att cykla (ladda upp och ladda ur) kommersiella battericeller i kalla temperaturer påbörjats. Detta kommer genomföras med olika batterikemier där laddning och urladdning sker med olika effekter samt i olika temperaturer. Laddning och urladdning kan även ske vid olika temperaturer med samma battericell för att till exempel simulera fall där batterierna laddas inomhus i rumstemperatur

(20–25 °C) och nyttjas utomhus i minusgrader. Under experimentens gång kommer de framtagna metoderna för åldringsanalys att tillämpas för att utvärdera battericellernas säkerhet och prestanda.

## 2.3 Laddningstekniker

Hur ett batteri laddas kan påverka batteriets åldring och säkerhet avsevärt, vilket gör det viktigt att förstå olika laddningstekniker och laddningsstrategier för en säker, snabb och effektiv laddning.

Att ladda batterier i magnetfält är en metod som fått alltmer uppmärksamhet de senaste åren. Idén bygger på att magnetfältet inducerar en kraft som rör om jonerna i elektrolyten, vilket underlättar masstransporten och motverkar koncentrationsgradienter. Detta har visat sig kunna förlänga batteriets livslängd, korta ner laddningstiden och för litium-metallbatterier göra litiumpläteringen mer jämn [7] [8] [9]. Teoretiskt kan den förbättrade masstransporten även öka batteriets laddningseffektivitet i kalla klimat, där traditionella batterier ofta presterar sämre eller inte fungerar alls.

En annan teknik är pulsad laddning, där batteriet laddas med korta intermittenta strömpulser istället för en kontinuerlig ström. Genom att snabbt växla mellan hög ström och korta viloperioder minskar värmeuppbyggnaden och interna ojämnvikter i batteriet. Viloperioderna mellan pulserna bidrar till att minska kemisk nedbrytning och att förhindra flaskhalsar kopplade till masstransport. Pulsningen har tidigare gjorts på många olika sätt och resultatet har i en del fall varit ökad energieffektivitet, längre livslängd och möjlighet till snabbare laddning, men i andra fall inte, vilket gör tekniken intressant att utvärdera [10].

Både pulsad laddning och laddning i magnetfält har möjligheten att förbättra snabbbladdningsförmågan samt att göra laddningen mer energieffektiv vid låga temperaturer. Detta skulle ge en ökad förmåga jämfört med dagens situation, där battericeller fortfarande är begränsade av de förhållanden under vilka de kan laddas. Båda teknikerna kräver mer avancerade laddare, vilket kan vara en utmaning för storskalig användning. Däremot är deras värde för specifika tillämpningar är stor.

### 3 Energiomvandling

Som beskrivet i inledningen syftar arbetet till att utveckla kunskap kring frågeställningar som rör hur energi omvandlas mellan olika energibärare. Fokus ligger i första hand på bränsleceller och elektrolysörer. Vid tillgång till energi i form av el kan man genom elektrolys producera vätgas från vatten. Vätgasen kan lagras i gasfas eller omvandlas till andra bränslen. Vid tillfällen då det inte finns tillgång till el kan vätgasen nyttjas i en bränslecell till att generera el (likt konventionella generatorer). En av de främsta fördelarna med vätgas är att det är en energibärare som relativt enkelt kan produceras lokalt, till skillnad från till exempel diesel. Vidare är vid drift av bränslecell med vätgas den enda avgasen vatten. I dagsläget finns begränsad kunskap och erfarenhet om hur bränsleceller och elektrolysörer fungerar i försvarstillämpningar. Faktorer som behöver utredas är robusthet, säkerhet, ö-drift, elkvalitet, effektivitet med flera.

Inom Temaområde Energiförsörjning har fokus varit på de fortsatta frågeställningarna och att planera vilka studier och försök som behöver genomföras från och med 2026. Under 2026 och 2027 planeras uppbyggnad av ett labb för småskalig provning av bränsleceller och elektrolysörer, där bland annat systemen kan bli utsatta för robusthetstester i form av förgiftning och annan förstörande provning. Framtida studier avser att utvärdera metoder för prestanda- och robusthetsbedömningar hos bränsleceller och elektrolysörer för olika militära tillämpningar och därmed utsätta systemen för relevanta scenarion. Resultat från dessa studier kan komma att ge effekt vid utveckling och kravställning vid anskaffning av liknande system för försvarstillämpningar.

Arbetet avser slutförandet av arbetet rörande Grindsjöns energitestanläggning (GRETA) och uppbyggnaden av testlabbet som fokuserar på bränsleceller och elektrolysörer.

#### 3.1 Grindsjöns energitestanläggning (GRETA)

FOI har sedan tidigare arbetat med att bygga upp en anläggning för att kunna testa bränsleceller och elektrolysörer. Under 2025 har en majoritet av verksamheten drivits inom demonstratorprojektet GRETA. Från 2026 kommer finansiering för detta uppdrag ske genom FoT Energiförsörjning. Målet med GRETA är att implementera och utvärdera en vätgasdriven reservkraftsanläggning, för att förse militär infrastruktur med ström vid eventuella strömavbrott [11]. Projektet har även som ambition att ta fram underlag för kravspecifikation för reservkraftanläggning med vätgas som energibärare. För att säkert och effektivt kunna implementera tekniken i en operativ anläggning måste förståelse för hur den fungerar, svarar på olika lastfall och hur den interagerar med sin omgivning utvecklas.

Uppstarten av GRETA skedde 2023 genom identifiering av lämplig försöksplats, projektering och grundritningar. Under 2024 genomfördes majoriteten av markarbetet, anskaffning av utrustning och omvärldsbevakning. Vidare pågår även kontinuerlig riskutvärdering av de olika delarna i anläggningen. Arbetet så här långt är sammanfattat i memon [9], [12].

Anläggningen innefattar en ny provplats hos FOI VSS vid Grindsjön. Den består av ett antal containrar med bland annat två 100 kW bränsleceller, en elektrolysör med tanklager, ett batterisystem och laster. I det fortsatta arbetet kommer el, gasledningar och styrning installeras. Till våren 2026 kommer systemet testas med olika definierade lastfall. Fokus för testerna kommer vara att demonstrera konceptets funktion och utvärdera hur systemet svarar på kritiska lastfall.

## 3.2 Elektrolys

En del av det som gör vätgas till en högtintressant energibärare är att den går att tillverka lokalt på ett rättframt sätt genom elektrolys. Elektrolys beskriver den process där vatten spjälkas till vätgas och syrgas genom tillförsel av energi i form av elektricitet. Vätgas från elektrolys har vanligtvis hög renhet, vilket är väl lämpat för exempelvis protonmembranelektrolys (PEM)-bränsleceller. Även syrgasen från elektrolys har hög renhet och kan nyttjas i bland annat andra system eller till andningsluft. Det finns flera olika typer av elektrolysörer, där de vanligaste är alkaliskelektrolys (AE), PEM, anjonmembranelektrolys (AEM) och fastoxidelektrolys (SOFC). AE är en väletablerad teknik inom industrin vars ingående komponenter är förhållandevis billiga med lång livslängd. Några utmaningar med metoden är att den kräver en alkalisk (basisk) elektrolyt som är kraftigt frätande och att de har en jämförelsevis lägre effektivitet (<70%). PEM har högre effektivitet (upp till 80%) och snabbare responstid än AE. Däremot innehåller den ädelmetallkatalysatorer och kräver hög renhet på ingående vatten, vilket ger ett dyrare och känsligare system. AEM är en relativt ny teknik i sammanhanget som har demonstrerat lovande resultat. Likt AE använder AEM billigare material än PEM, och kan dessutom uppnå motsvarande strömtätheter och effektivitet som PEM. AE-, PEM- och AEM-system ligger vanligtvis mellan 50 och 100 °C i arbetstemperatur. SOFC-system nyttjar ledande keramiska material och verkar vid höga temperaturer (typiskt över 500 °C) samt har möjlighet till en högre effektivitet (upp till ~85%). SOFC har dessutom potential att använda andra reaktanter än vatten. Tekniken står dock fortfarande inför flera utmaningar, såsom höga materialkostnader och låg hållbarhet jämfört med AE, PEM och AEM [13] [14].

Som beskrivet ovan har teknikerna för- och nackdelar. En viktig del är därför att fastställa metoder för att utvärdera dem utifrån scenarion för försvarstillämpningar. Utöver grundläggande faktorer som effektivitet och hållbarhet måste även teknikens robusthet utredas. Detsamma gäller dess påverkan på omgivningen, såsom krav på underhåll, kylning, tilluft och eventuella restprodukter. Arbetet syftar till att kartlägga de olika elektrolysrörsteknikerna ur ett försvarsperspektiv genom omvärldsbevakning och tester av valda tekniker. Metoderna kommer innefatta påverkan på renhet hos vattnet/reaktanten, temperaturkänsligheten och säkerheten.

Ett AE-system har anskaffats för de initiala försöken till GRETA då tekniken bedöms vara mest industriellt lämpad i dagsläget. Dessutom har ett AEM-system anskaffats för utvärdering så snart labbet är färdigställt. Forskning och utveckling kring elektrolys går snabbt framåt och har potential att avsevärt förbättra tillgängligheten på vätgas. Sådana framsteg kan öka leveranssäkerheten av bränsle för såväl Försvarsmakten som Totalförsvaret. Verksamheten bedriver därför fortlöpande omvärldsbevakning för att identifiera relevanta tekniker och utvärderingsmetoder.

## 3.3 Bränsleceller

Grundprincipen för bränsleceller är deras förmåga att omvandla kemisk energi till elektricitet genom elektrokemisk energiomvandling. Skillnaden mellan en kemisk energiomvandling (exempelvis antändning av vätgas i luft) och en elektrokemisk energiomvandling är att vid en kemisk energiomvandling sker oxidation och reduktion på samma ställe, medan oxidations- och reduktionsreaktioner är fysiskt separerade vid en elektrokemisk energiomvandling. Separationen mellan reaktionerna ger möjligheten att utvinna elektriskt arbete, vilket är det som användas i bränsleceller. Den kemiska energin som frigörs i en bränslecell är lagrad i ett bränsle som kontinuerligt tillförs. Vid anoden genomgår bränslet oxidation. Samtidigt tillförs oxidationsmedel vid katoden, där reduktionen sker. Bränslecellerna som har anskaffats till GRETA är av typen PEM, vilket är en väletablerad teknik med många aktörer på marknaden. En PEM-bränslecell drivs normalt med vätgas som bränsle ( $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ ) och syret i luft som oxidationsmedel ( $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ). Protonerna ( $\text{H}^+$ ) som bildas vid anoden färdas genom ett protonledande men elektronisolerade membran (t.ex. Nafion) till katoden och elektronerna

(e<sup>-</sup>) som genereras flödar via en extern krets. Väl vid katoden reduceras syrgasen (genom att ta upp elektronerna från den externa kretsen och protonerna från membranet) och bildar vatten (H<sub>2</sub>O) som sedan släpps ut som den enda ”avgasen”. Vid anslutning av en elektrisk belastning till den externa kretsen, som drivs av elektronflödet genom cellspänningen, omvandlas den frigjorda energin till elektriskt arbete. Det elektriska arbetet kan användas för att driva en elektromekanisk enhet, exempelvis en elmotor.

En av utmaningarna är att hög renhet på både bränslet (H<sub>2</sub>) och oxidationsmedlet (luften, O<sub>2</sub>) är kritiskt för PEM-bränsleceller. Föroreningar, även i mycket låga koncentrationer, kan leda till drastiskt reducerad prestanda och livslängd. För att motverka minsta föroreningar så är anoden och katoden beklädda med nanostrukturerade platinapartiklar som fungerar som katalysatorer för att öka hastigheten och sänka aktiveringsenergin för de elektrokemiska halvreaktionernas kinetik. Denna katalytiska aktivitet kan försämrans genom absorption av specifika föroreningar (förgiftning). Vid anoden kan starkt bindande kemiadsorbenter som kolmonoxid eller svavelväte irreversibelt blockera de aktiva platserna för oxidation för vätgas, medan svaveloxider och kväveoxider tillsammans med partikulära föroreningar, kan leda till katalysatorinhibering. Utvärdering av kvarstående katalysatoraktivitet kan ske med hjälp av den elektrokemiska analysmetoden CV (cyklisk voltammetri) genom att beräkna den elektrokemiskt aktiva arean hos bränslecellen ECSA<sup>1</sup>. Ett minskat värde på ECSA indikerar katalysförgiftning.

Med planerad start under 2026 kommer ett bränslecellslaboratorium att etableras vid GRETA. Laboratoriets primära fokus är att forma en forskningsinfrastruktur inriktad på att karaktärisera samt riskminimera katalysatorförgiftningsfenomen i bränsleceller. Experimentell verifiering kommer initialt att utföras på både enskilda celler och stackar i pilot- och kommersiell skala (maximal uteffekt <5 kW). En central del av detta forskningsområde är utveckling av regenerativa protokoll avsedda att reversera katalysatornedbrytning efter kortvarig exponering för föroreningar, innan irreversibel skada inträffar. Denna etablering kommer att kräva investeringar i avancerad teknisk och elektrokemisk analysutrustning. Syftet med denna forskning är att etablera ett robust underlag för validering avseende vilka militära tillämpningar som kommersiella PEM-bränsleceller är lämpade för.

Införandet av PEM-bränsleceller i stor skala är primärt beroende av en systemövergång till vätgas som energiväktare. Denna omställning kräver massiva och koordinerade investeringar för att etablera en robust och säker infrastruktur för hela värdekedjan, specifikt för lagring och logistik. Som nämntes under avsnittet om elektrolysörer kan vätgas produceras lokalt. Elnätet kan dock vara en begränsande faktor vid produktion av större mängder på kort tid. Istället för endast vätgasdrivna bränsleceller kan SOFC (fastoxidbränslecell) vara ett intressant alternativ. SOFC kan nyttja en mängd olika bränslen, inklusive logistikbränslen (diesel, bensin, fotogen) och gaser (metan, gasol och biogas). SOFC kan även använda alkoholer (etanol och metanol) samt, efter viss anpassning, syntetiska bränslen (ammoniak). Genom att använda JP-8, som är ett väletablerat bränsle, uppfyller SOFC det gemensamma kravet på ett gemensamt NATO-bränsle för samtliga tillämpningar (eng. *single fuel concept*).

En generell fördel med SOFC är dess höga verkningsgrad jämfört med PEM-bränsleceller. Eftersom SOFC:s drifttemperatur är flera hundra grader högre än PEM-bränsleceller, blir oxidations- och reduktionsreaktionerna mer gynnsamma utan krav på att involvera platina som katalysator. En nackdel är att SOFC är konstruerad av ett keramiskt material som tenderar att spricka av temperaturvariationerna vid återkommande uppstarter. Dessa för- och nackdelar med flera kommer att undersökas de nästkommande åren.

Forskningsplan för bränsleceller:

1. Uppbyggnad av bränslecellslaboratorium med relevanta analystekniker.
2. Undersöka katalysatorförgiftningsfenomen och dess riskminimering.

<sup>1</sup> Engelska: *electrochemically active surface area*

3. Utvärdera metoder för validering av kommersiella PEM-bränsleceller för militära tillämpningar.
4. Kvantifiera för- och nackdelar med SOFC.
5. Utvärdera SOFCs förmåga att generera elektriskt arbete med andra bränslen än ren vätgas, exempelvis JP-8.

## 4 Bränslen

Verksamheten som bedrivs inom området fokuserar främst på flytande bränslen och metallförbränning för utvinning av energi. Arbetet bedrivs teoretiskt och experimentellt, där FOI VSS besitter mångårig expertis inom förbränningsmodellering.

### 4.1 Flytande bränslen

Arbetet med flytande bränslen under 2024 och 2025 kan delas in i två delar:

1. Vidareutveckling och slutförande av tidigare förbränningsmodelleringsarbeten.
2. Vidareutveckling av en ny, flexiblare och mer detaljerad modellering kring förbränning.

Modellering av större bränslemolekyler för användning i strömningsmekaniska simuleringar, så kallade CFD-simuleringar (Computational Fluid Dynamics), kräver betydande beräkningskapacitet. Detta resulterar ofta i alltför resurskrävande simuleringar. Under de senaste tio åren har det internationellt (och på FOI) spenderats signifikanta resurser på att utveckla modeller med minimerad beräkningskostnad utan att göra alltför stor avkastning på modelleringsresultaten [15] [16] [17] [18] [19]. När modelleringen med så kallade *detaljerade modeller* beskrivit förbränningsprocessen med mellan 5000 och 20 000 reaktioner har de *reducerade modellerna* istället använt mellan 60 och 300 reaktioner. Trots den till synes markanta skillnaden i modellstorlek har flera av de reducerade modellerna presterat utmärkt, ofta i nivå med de detaljerade modellerna.

Bränslen, såsom Jet A, JP-8 och JP-5, består av en blandning av molekyler med varierande storlekar. De tillhör olika så kallade *funktionella grupper* (n-alkaner, iso-alkaner, cykloalkaner och aromater), med tiotals bränslemolekyler i varje funktionell grupp. Varje enskilt bränsle har en unik fördelning av molekylerstorlekar och molekyler tillhörandes de funktionella grupperna. JP-8 har till exempel en signifikant högre andel n-alkaner än JP-5, medan JP-5 har en högre andel cykloalkaner. Dessa skillnader kommer att påverka bränslenas förbränningsegenskaper såsom antändningstid eller tendens att producera sotpartiklar.

Historiskt sett har det varit alltför komplicerat att med en *reducerad modell* beskriva alla de ingående bränslemolekyler i jetbränslen. För att lösa detta problem har man skapat en genomsnittsmolekyl från bränslets ingående bränslemolekyler, en så kallad *singelkomponentsmolekyl*. JP-8 brukar till exempel beskrivas med den kemiska formeln  $C_{11}H_{22}$  och JP-5 med  $C_{12}H_{23}$ . Den relativt stora skillnaden mellan dessa två bränslen kompositioner kan dock inte fångas fullt ut med denna typ av förenkling. Trots detta har angreppssättet tills nyligen varit det enda sättet att hålla beräkningssättet på en acceptabel nivå.

FOI har länge utvecklat jetbränslemodeller baserat på en modelleringsmetodik på komponentnivå [16] [19] [20]. Detta arbete har under 2024 och 2025 vidareutvecklats och bedöms nu ha nått en nivå där det är svårt att förbättra modellerna nämnvärt. En sammanfattande journalartikel har skrivits där singelkomponentsmodeller för Jet A, JP-8, JP-5, JP-10 samt biobränslena C1 [21] och C5 presenterats. Dessutom har en vetenskaplig artikel publicerats där flertalet av dessa bränslen simulerats i en förblandad singelbrännare [19].

Parallellt med modelleringen av enskilda komponenter har även utvecklingen av så kallade *flerkomponentsmodeller* utförts. Dessa modeller använder inte en genomsnittsmolekyl för att beskriva ett bränsle, utan istället flera karakteristiska bränslemolekyler som representerar alla fyra funktionella grupper. Detta skapar möjligheten att komponera så kallade *surrogatbränslen*, vilka är bränslesammansättningar som ska efterlikna riktiga bränslen. På så sätt kan alla funktionella grupper i ett bränsle vara representerade och modelleras, och de unika förbränningsegenskaperna för varje funktionell grupp blir närvarande i

modelleringen. Detta står i skarp kontrast till singelkomponentsmodelleringen, där ingen specifik funktionell grupp särskiljs, utan all modellering flätas samman i en enda bränslemolekyl. Flerkomponentsmodeller gör det möjligt att med en enda modell skapa ett flertal surrogatbränslen, och därmed representera flera olika bränslen.

Arbetet med utveckling av en flerkomponentsmodell för jetbränslen presenterades tidigare under året [22]. För närvarande pågår implementation av denna modell i flertalet CFD-simuleringar.

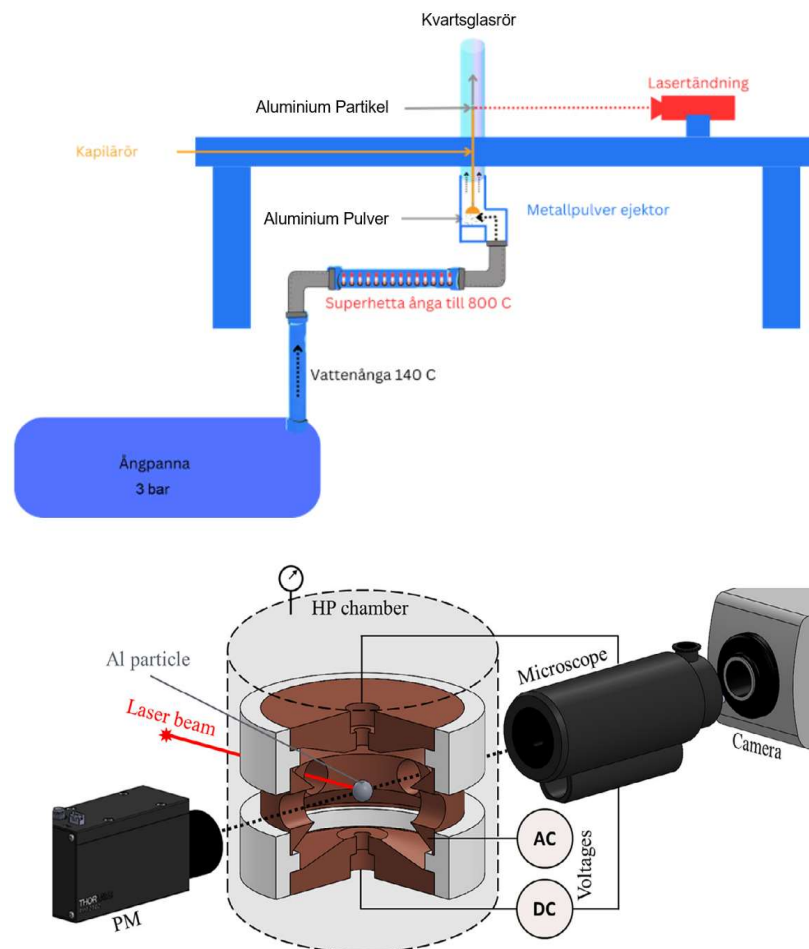
Flerkomponentsmodellen gör det möjligt att med mycket hög noggrannhet simulera olika exakt simulera olika konventionella och alternativa bränslen i verkliga tillämpningar såsom gasturbiner, pulsjetmotorer, roterande detonationsmotorer och ram/scramjet-motorer. Dessa simuleringar, uppbackade av experiment, möjliggör utveckling och utökad förståelse för hur olika motorer hanterar såväl nuvarande som kommande bränslen och bränsleblandningar. Det går även att simulera och i detalj uppskatta hur ett nytt bränsle fungerar i olika motorer, även om data från experiment saknas, eller till och med innan motorn ens körts med det nya bränslet. Detta innebär att man snabbare kan uppskatta om nya bränslen är bruksbara i olika motorer.

## 4.2 Metallförbränning

Arbetet med metallförbränning har under 2025 bedrivits i samverkan med andra projekt på FOI. Det har bestått av två delar: den ena fokuserad på framtagandet av mätriggarna, den andra på modellering. Under året har dessutom en insats lagts på planering inför 2026, där arbetet med mätriggarna kommer drivas framöver. Årets verksamhet har även omfattat inköp av komponenter för projektets genomförande.

Två mätriggarna för metallförbränning är under utveckling:

- **Tombolariggen** byggs för att studera förbränning av metallpartiklar i ett omgivande lågt flöde av luft eller upphettad vattenånga i atmosfäriskt tryck, se övre bilden i Figur 1 för en schematisk skiss. Tillverkningen av riggen har påbörjats med målsättningen att den ska färdigställas och testas under 2026.
- **Levitationsriggen** är baserad på den rigg som presenteras i [23] och består av en högtryckskammare där man kan kontrollera miljön och isolera en ensam metallpartikel med en elektrodynamisk levitator (EDL), se nedre bilden i Figur 1. För att möjliggöra lasertändning av partiklar samt optiska mätningar har kammaren utformats med tre fönster. Riggen är i slutskedet av designfasen. Målet för 2026 är att slutföra konstruktionen och beställa de större komponenterna.

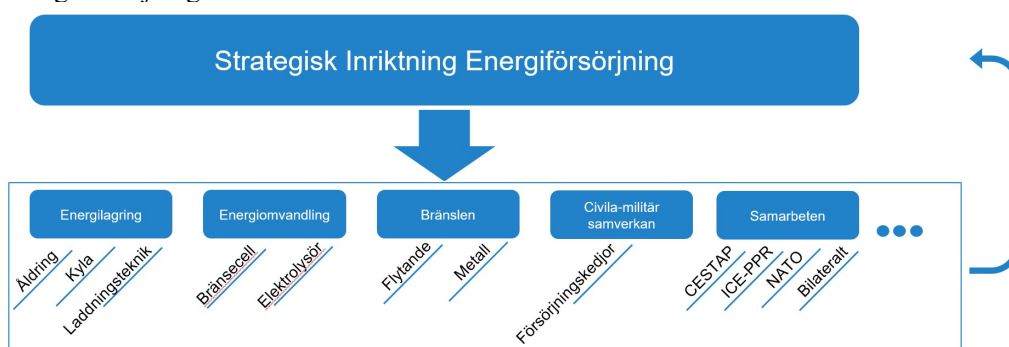


Figur 1: Tombolariggen (övre) och levitationsriggen (nedre).

## 5 Strategisk inriktning energiförsörjning

För att kunna identifiera relevanta områden som ännu inte hanteras inom FoT Energiförsörjning har man inom Strategisk inriktning energiförsörjning beslutat att anlägga ett helhetsperspektiv på energiförsörjningsområdet. Arbetet bedrivs som en iterativ process i samverkan med de övriga delområdena, i kombination med en kontinuerlig omvärldsanalys inom området, Figur 2. Områden som redan identifierats och där verksamhet har påbörjats är civil-militär samverkan och civila beroenden. Detta redovisas i nästa avsnitt. Vidare finns ett behov av metoder och verktyg för att värdera olika tekniska lösningar, där så kallad designrymskartläggning [24] (eng. *Trade Space Exporation*) är en intressant metod som redan används för exempelvis markfordonrelaterade lösningar.

En kontinuerlig översyn av delområdena krävs för att säkerställa att verksamheten inom energiförsörjningsområdet förblir relevant.



Figur 2: Schematisk skiss över informationsflödet inom FoT Energiförsörjning.

### 5.1 Civil-militär samverkan

Inom ramen för FoT Energiförsörjning har verksamheten under 2025 fokuserat på civil-militär samverkan. Utöver arbetet med omvärldsbevakning har även en större aktivitet genomförts. Detta innefattade en resa till NATO *Center of Excellence* för energi<sup>2</sup> och deltagande på konferensen FORTE<sup>3</sup> 2025. Konferensens tema i år var civil-militär samverkan samt fokus på klimatförändringar. Talarna fokuserade bland annat på interoperabilitet mellan NATO-länderna. Ett exempel som diskuterades var hur olika mikronätlösningar kan utformas för att försörja förband med energi. Vidare diskuterades olika logistiska för- och nackdelar med olika typer av energislag. Meningarna gick isär kring huruvida statistiska försörjningskedjor av energi (i form av gas- och elledningar) är att föredra. En fördel med dessa är att ingen personal nödvändigtvis utsätts för risk vid ett angrepp mot anläggningen.

Detta vägdes mot mer mobila energilogistiska lösningar som kräver transport mellan lager och användare. Även om mobila lösningar erbjuder större flexibilitet innebär transportmomentet en ökad sårbarhet för personalen.

<sup>2</sup> NATO Energy Security Centre of Excellence (ENSEC COE), lokaliserat i Vilnius, Litauen.

<sup>3</sup> Future Operations – Resilience in Transitioning Energy

Vid ett antal tillfällen lyftes även förslaget att göra energi till den sjätte operationella domän inom NATO. Om detta implementeras behöver domänerna en egen samverkansstruktur, vilket i sin tur skapar nya möjligheter för FoT Energiförsörjning.

Avslutningsvis diskuterades energibehovet inom såväl civil som militär verksamhet. Fokus låg på hur alliansen och enskilda medlemsländer kan möta den ökande energifterfrågan. Särskild vikt lades vid behovet av energieffektivisering samt utveckling och optimering av nya energilösningar för att stärka effektiviteten och logistiken inom energiförsörjningen.

Förhoppningen är att FoT Energiförsörjning ska kunna ha användning av lärdomar och kontakter från FORTE i det framtida arbetet. Målsättningen framåt är att området civil-militär samverkan, i tät kontakt med resterande områden inom FoT Energiförsörjning, ska kunna undersöka hur leverantörskedjor, logistiska fördelar och hinder möjliggör användningen av nya teknologier.

## 5.2 Samarbeten och konferenser

FoT Energiförsörjning har under året deltagit i olika samarbetsforum, exempelvis konsortier, arbetsgrupper och konferenser. Fokus har legat på omvärldsbevakning, men även på att identifiera gemensamma intresseområden och framtida samverkansmöjligheter med andra aktörer.

Inom delområdet för bränslen har deltagande genomförts inom CESTAP, eller *Competence Centre in Sustainable Turbine fuels for Aviation and Power*, som är ett kompetenscenter med 29 akademiska och industriella partners. Centret styrs från Lunds Tekniska Högskola (LTH) och är ett femårigt projekt med option på ytterligare fem år. FOI:s deltagande möjliggör att ta del av de senaste forskningsresultaten samt ger ökad förståelse för nya alternativa bränslen och hur dessa kan och bör användas inom totalförsvaret. FOI bidrar till centrumet med kompetens kring kemikinetisk modellering. Mer om centrumet och FOI:s roll kan läsas i [2].

*International Cooperation Engagement Program for Polar Research (ICE-PPR)* är ett multilateralt samarbete som FOI deltagit i under året. Samarbetet är indelat i flera arbetsgrupper, och inom FoT Energiförsörjning har FOI deltagit i arbetsgruppen *Power and Energy*. Deltagandet har under året bestått av månatliga digitala möten där forskare och forskargrupper från olika länder har presenterat intressanta arbeten med fokus på energiförsörjning i kalla klimat. Under året har även Sverige, genom Försvarmakten, visat intresse för ett projekt inom ICE-PPR (SEAL<sup>4</sup>). Fokus kommer ligga på bärbara batterier, små modulära kärnreaktorer och mikronät. SEAL-projektet är i startgroparna och förväntas starta inom kort. Exakt vad FOI och Sverige kommer att bidra med är fortfarande inte klarlagt, men förväntas fastställas under 2026. Insatser inom batteritestning och batterier för kallt klimat kan bli aktuella.

FOI har under året besökt LTH för att diskutera möjligt samarbete inom batterier och metallförbränning. Det framkom att parterna har tydliga gemensamma intressen inom områdena, och att en samverkan bedöms kunna stärka svensk försvarsforskning [25].

Under året har FOI fört diskussioner med norska *Forsvarets Forskningsinstitut* (FFI). Detta har inkluderat ett besök till FFI:s anläggning i Norge [26], strax utanför Oslo, samt ett svarsbesök av FFI på FOI VSS [27]. FFI står inför liknande frågeställningar som FOI inom energiområdet och flera pågående verksamheter och projekt identifierades som potentiella samarbetsområden, till exempel batteritestning och batterisäkerhet.

---

<sup>4</sup> Engelska: *Scalable Energy in Arctic Locations* – skalbar energi för arktiska miljöer.

## 6 Slutkommentar

Energiförsörjning är, som tidigare nämnt, ett brett och komplext område som berör alla Försvarmaktens domäner. Forskning och metodutveckling inom energiförsörjning behövs för att effektivare kunna stötta vid utveckling, anskaffning och vidmakthållning av försvarsmateriel som producerar, distribuerar, lagrar eller konsumerar energi i någon form.

Genom samverkan mellan berörda områden och verksamheter skapas bättre förutsättningar för effektivare resursanvändning. Temaområde Energiförsörjning arbetar redan på detta sätt och kommer fortsätta främja kunskapsöverföring mellan verksamheter. Med hänvisning till flera av referenserna i denna rapport delar Temaområde Energiförsörjning tydliga gränssytor med andra FoT-områden och projekt. Bland annat samverkar temaområdet med FoT Vapen och Skydd genom projektet Ammunitions- och energilagringssäkerhet, med FoT Skydd och anläggningsteknik (FoT Militär infrastruktur, nytt namn från och med 2026) genom projektet Energilager och luftflöde i befästning, med FoT Marksystem genom projektet Markfordon, med FoT Sjösystem genom projektet Marina energisystem (nytt projekt från och med 2026). Uppdrag från Försvarmakten, FMV och FortV, vilka ligger utanför FoT, både bidrar till och stärks av verksamheten inom temaområdet framtida FoT Energiförsörjning.

Under 2026 kommer verksamheten att fortsätta i enlighet med vad som presenterats i denna rapport. Ambitionen är bland annat att den experimentella verksamheten rörande batterier utökas då det nya laboratoriet är uppbyggt, där utvärdering av prestanda och säkerhet vid kallt klimat, laddningstekniker och åldringsmekaniker ligger i fokus.

GRETA planeras att färdigställas under våren med målet att genomföra provning av anläggningen. Avrapportering planeras ske innan sommarsemestern. Om ytterligare resurser inom energiomvandling finns till hösten är planen att påbörja uppbyggnad av laboratorier och studier för småskalig provning av bränsleceller och elektrolysörer.

## 7 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] W. Sahlén, N. Zettervall, E. Lallo, M. Elfsberg, A. Odell, R. Stappe Renner, M. Hadi Haidari, J. Enström, C. Ibron, M. Karlsmo, M. Forslund och T. Holmnäs, "Temaområde Energiförsörjning, Avrapportering av 2024 års verksamhet," FOI-R--5706--SE, 2024.
- [3] W. Sahlén och E. Lallo, "Energilager och luftflöde i befästning," FOI-R--5712--SE, 2025.
- [4] W. Sahlén, M. Gard och M. Karlsmo, "Energilager och luftflöde i befästning, avrapportering av 2025 års verksamhet," FOI Memo 9060, 2025.
- [5] M. Elfsberg, T. Holmnäs och E. Lallo, "Batterisystem för generisk patrullrobot och förmåga i kallt klimat," FOI Memo 8986, 2025.
- [6] A. Hökfelt, "Ice, Ice Battery: Characterization of NMC532 Lithium-Ion Battery Electrolytes for Cold Climates: Electrochemical and Physicochemical Insights into Sub-Zero Battery Performance," 2025.
- [7] Y. Chen, J. Alder, T. Song, L. Chen, R. Sheridan, A. Davenport och E. Kendrick, "Influence of magnetic field upon electrode kinetics and ionic transport," *Journal of Power Sources*, vol. 602, 2024.
- [8] G. Ruan, J. Hue, X. Hu och C. Yu, "Study on the influence of magnetic field on the performance of lithium-ion batteries," *Energy Reports*, vol. 8, 2022.
- [9] K. Shen, Z. Wang, X. Bi, Y. Ying, D. Zhang, C. Jin, G. Hou, H. Cao, L. Wu, G. Zheng, Y. Tang, X. Tao och J. Lu, "Magnetic Field-Suppressed Lithium Dendrite Growth for Stable Lithium-Metal Batteries," *Advanced Energy Materials*, vol. 9, nr 20, 2019.
- [10] W. Vermeer, M. Stecca, G. R. C. Mouli och P. Bauer, "A Critical Review on The Effects of Pulse Charging of Li-ion Batteries," i *IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Gliwice, Poland, 2021.
- [11] S. Munktel och M. Forslund, "Demonstrator för vätgasdriven och självförsörjande befästning – Grindsjöns energitestanläggning (GRETA)," FOI Memo 8418, 2024.
- [12] S. Da Alesandro, S. Munktel och M. Forslund, "Sammanfattning aktiviteter och omvärldsbevakning 2024 - Grindsjöns energitestanläggning (GRETA)," FOI Memo 9103, 2025.
- [13] E. Lallo, R. Fridsén Skogsberg, H. Ellis och M. Skarstind, "Vätagasdrivna reservkraftsystem - En förstudie av vätagasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar," FOI-R--5444--SE, 2023.
- [14] A. Lahrichi, Y. El Issmaeli, S. S. Kalanur och B. G. Pollet, "Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 94, pp. 688-715, 2024.
- [15] X. Rui, W. Kun, S. Banerjee, S. Jiankun, T. Parise, Z. Yangye, W. Shengkai, A. Movaghar, L. D. Joon, Z. Runhua, H. Xu, G. Yang, L. Tianfeng, K. Brezinsky, F. N.

- Egolfopoulos, D. F. Davidson, R. K. Hanson, C. T. Bowman och W. Hai, "A physics-based approach to modeling real-fuel combustion chemistry – II. Reaction kinetic models of jet and rocket fuels," *Combustion and Flame*, vol. 193, pp. 520-537, 2018.
- [16] N. Zettervall, C. Fureby och E. J. K. Nilsson, "A reduced chemical kinetic reaction mechanism for kerosene-air combustion," *Fuel*, vol. 269, 2020.
- [17] N. Zettervall, "Methodology for developing reduced reaction mechanisms, and their use in combustion simulations," Department of Physics, Lund University, Lund, 2021.
- [18] Y. Chang, M. Jia, Y. Li, Y. Liu, M. Xie, H. Wang och R. D. Reitz, "Development of a skeletal mechanism for diesel surrogate fuel by using a decoupling methodology," *Combustion and Flame*, vol. 162, nr 10, pp. 3785-3802, 2015.
- [19] A. Åkerblom, N. Zettervall och C. Fureby, "Comparing Chemical Reaction Mechanisms for Jet Fuel in Turbulent Premixed Combustion Simulations," *AIAA Journal*, vol. 63, nr 9, 2025.
- [20] N. Zettervall, "Reduced Chemical Kinetic Reaction Mechanism for JP-10-Air Combustion," *Energy & Fuels*, vol. 34, nr 12, pp. 16624-16635, 2020.
- [21] W. Kun, X. Rui, t. Parise, J. Shao, A. Movaghar, L. D. Joon, P. Ji-Woong, G. Yang, L. Tianfeng, F. N. Egolfopoulos, D. F. Davidson, R. K. Hanson, C. T. Bowman och W. Hai, "A physics-based approach to modeling real-fuel combustion chemistry – IV. HyChem modeling of combustion kinetics of a bio-derived jet fuel and its blends with a conventional Jet A," *Combustion and Flame*, vol. 198, pp. 477-489, 2018.
- [22] N. Zettervall och E. J. K. Nilsson, "A Compact Chemical Kinetic Mechanism for Heavy Fuel Surrogates with n-, iso- and cyclo-Alkanes, and Aromatic Compounds," *ACS Omega*, vol. 10, nr 15, pp. 15471-15483, 2025.
- [23] A. Braconnier, C. Chauveau, F. Halter och S. Gallier, "Detailed analysis of combustion process of a single aluminum particle in air using an improved experimental approach," *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, vol. 17, nr 2, pp. 111-124, 2019.
- [24] M. Karlsson och A. Carlstedt, "Metoder och vertyg för designrymdskartläggning," FOI-R--5503--SE, 2023.
- [25] W. Sahlén, C. Ibron, M. Karlsmo och S. Munktell, "Reserapport Lunds Tekniska Högskola, fokus batterier och metallförbränning," FOI Memo 8989, 2025.
- [26] E. Lallo, "Avrapportering från möte med FFI, maj 2025," FOI Memo 8991, 2025.
- [27] M. Forslund och E. Lallo, "Avrapportering från möte med FFI, september 2025," FOI Memo 9047, 2025.



FOI  
Totalförsvarets forskningsinstitut  
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00  
Fax: 08-55 50 31 00

[www.foi.se](http://www.foi.se)