

HANNA ELLIS OCH MARKUS PASTUHOFF

Hanna Ellis och Markus Pastuhoff

Energisystem för robust energiförsörjning

Titel	Energisystem för robust energiförsörjning
Title	Energy Systems for Robust Energy Supply
Rapportnr/Report no	FOI-R--5000--SE
Månad/Month	April
Utgivningsår/Year	2021
Antal sidor/Pages	25
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Vapen och skydd
Projektnr/Project no	E60977
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Försvars- och säkerhetssystem

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

Dagens centraliserade energiförsörjning är en sårbarhet då tillgången på energi är en förutsättning för att de moderna teknikintensiva system som används inom försvaret ska kunna brukas. Detta energiberoende förväntas också öka med tiden. För att minska riskerna detta medför vid energibortfall vid eventuella incidenter, och för att öka robustheten i elförsörjningen, finns goda möjligheter att skapa nya, och att anpassa befintliga, energiförsörjningssystem. I den processen finns flertalet parametrar att ta hänsyn till vid val av energisystem och mot bakgrund av detta sammanställs i denna rapport information om alternativa energiförsörjningssystem och energilagringssystem som grund för fortsatt forskning kring deras risker.

Nyckelord: energi, energetiska material, lokala nät, hybriddrift, biodiesel, vätgas, litium-jonbatterier, flödesbatterier, bränsleceller

Summary

The current centralized energy distribution method is a vulnerability since access to energy is a requisite for the use of modern technology intensive system used within the defence. This energy dependence is further expected to increase with time. In order to decrease the risk of energy loss in the event of possible incidents and to increase the robustness in the power supply system, there are several possibilities to adopt existing energy distribution systems. In this process, there are several parameters to take into consideration when choosing energy systems. With this background, this report gathers information regarding alternative energy supply systems as a foundation for continued research about their risks.

Keywords: energy, energetic materials, local power nets, hybrid drive, bio diesel, hydrogen gas, lithium-ion batteries, flow batteries, fuel cells

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Lokala nät med alternativa energikällor	8
3	Hybridfordon.....	10
4	El- och hybriddrift på fartyg	12
5	Litium-jonbatterier	14
6	Flödesbatterier	17
7	Bränsleceller.....	18
8	Dieselliknande bibränslen	21
9	Vätgas.....	22
10	Slutkommentarer.....	23
11	Referenser.....	24

1 Inledning

Försvarmakten belyser i "Slutredovisning av Försvarmaktens perspektivstudie 2016-2018" [1] försvar mot icke-linjär krigföring riktad mot samhället i stort som ett område där försvarsförmågan behöver stärkas. Det konstateras att dagens civilsamhälle har stora beroenden till elförsörjning och att även Försvarmakten i många fall är beroende av dessa system. Energilagring i olika former kommer sannolikt bli viktigare för Försvarmakten och i perspektivstudien listas ett antal teknikområden med särskild relevans för framtiden där flera är stora effektförbrukare, såsom sensorsystem och laservapen. Stora lager av energi kan innebära säkerhetsrisker, precis som stora lager av ammunition. För att kunna värdera dessa säkerhetsrisker och utveckla metoder för att minimera dem görs i denna rapport en översikt över olika energiförsörjningslösningar som grund för fortsatt forskning kring deras risker. I slutet av varje kapitel i denna rapport listas ett antal forskningsfrågor där de frågor som framförallt är relevanta ur säkerhetsperspektivet återfinns inom litiumjonbatteriområdet vilket redogörs för i kapitel 5.

Tekniker för hur energiförsörjningen ska säkras saknas inte och redan under kalla kriget och 1980-talets beredskapstid talades om lokal ö-drift och lokal produktion av flytande bränslen för att säkra energiförsörjningen till Försvarmakten och samhällsviktiga energikonsumenter [2]. Dessa tekniker lever i stort kvar med de nya benämningarna mikrogrids och biobränslen.

Vid valen av alternativa energikällor och tekniska lösningar finns flera faktorer att ta i beaktande utöver ren verkningsgrad. I Perspektivstudien föreslås ett antal områden där Försvarmakten bör omformas och stärkas inför år 2035 där en punkt är modernisering av stridsfordonsparken. Vid en sådan modernisering bör alternativa energikällor övervägas i beslutsprocessen, såsom hybriddrift med dieselliknande biobränslen vilket potentiellt skulle kunna ge fördelar i form av dels tillgång till lokal bränsleproduktion och även elenergilager i form av batterier för icke-stationära högeffektanvändare.

Syftet med denna rapport är att öka kunskapen om alternativa energisystem vilka ofta innehåller energirika material, exempelvis elektrolyter i batterier. Detta framförallt för att öka förmågan att göra bedömningar avseende transport-, hanterings- och lagrings säkerhet kring dessa. Utöver det är innehållet sammanställt med ett brett fokus i syfte att belysa flera aspekter av de olika teknologiernas egenskaper. Förhoppningen är att denna helhetsöversyn kan underlätta forskningsinriktningen i ett tidigt skede genom att flera aspekter av valt energisystem kan tas i beaktande.

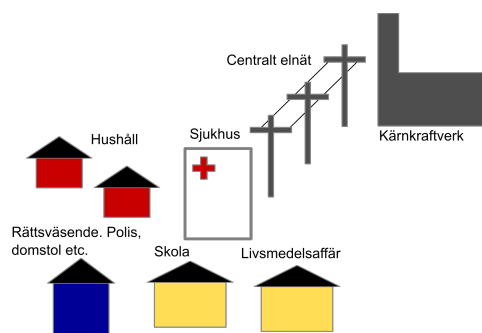
I rapporten ges en kort teknisk introduktion till flertalet tekniker som skulle kunna vara lämpliga för att säkra energiförsörjningen för Försvarmaktens behov vid ett eventuellt kraftnätbortfall. Systemlösningar såsom mikrogrids och hybriddrift behandlas såväl som energibärande tekniker såsom batterier och vätgas. Rapporten fokuserar på relativt mogna teknologier som redan idag är kommersiellt tillgängliga men där ytterligare forskning kan behövas innan integration kan ske i Försvarmaktens energisystem.

Under följande rubriker i rapporten ges respektive teknikområde en kort introduktion följt av en teknisk beskrivning, en diskussion kring dess relevans för Försvarmakten och avslutas med en listning av forskningsfrågor som kan vara i dess intresse. För att bevara bredden i förståelsen för energisystemen har forskningsfrågorna i viss utsträckning tillåtits sprida sig utanför rapportens huvudsakliga inriktning.

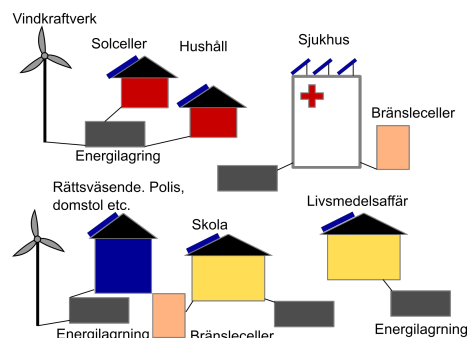
2 Lokala nät med alternativa energikällor

Sveriges centrala elnät är sårbart dels på grund av rikets stora ytor som binds ihop av ett fåtal stora kraftledningar som är relativt enkla mål för sabotage, dels genom möjligheter till sabotage genom cyberattacker [3]. Som ett exempel ges den hackerattack på det Ukrainska elnätet 2015 där flera hundra tusen personer blev strömlösa. Ett annat civilt exempel, denna gång från USA, är hur de återkommande stormarna har fått flera flygplatser att förlora strömförsörjningen. Som svar på detta har man t.ex. beslutat att utveckla ett lokalt elnät på Pittsburgh International Airport [4]. Man ser idag en ökning av så kallade mininät med solpaneler och batterisystem för lagring [5] [6]. Militära anläggningar har ofta reservkraft i form av dieselgeneratorer och ett sätt att ytterligare öka robustheten vore att minska på beroendet från bränsletransporter.

Lokala nät, vilka kan bestå av solpaneler med energilagring i form av batterier eller bränslen för generatorer, kan fungera som en resurs att sätta in vid fall av nedgång av det centrala elnätet. Se detta illustrerat i Figur 1 och Figur 2. Då de flesta källorna lämpliga att producera el i mindre skala genererar likström är ett alternativ till konventionella växelströmsnät lokala likströmsnät vilket undviker vissa transformatorförluster. En av de främsta övriga fördelarna med likströmsnät är att elkraften enkelt distribueras mellan de olika källorna och användarna genom att energin helt enkelt flödar åt det håll spänningen är lägst. För växelströmsnät krävs mer avancerad styrning för kraftdistributionen.

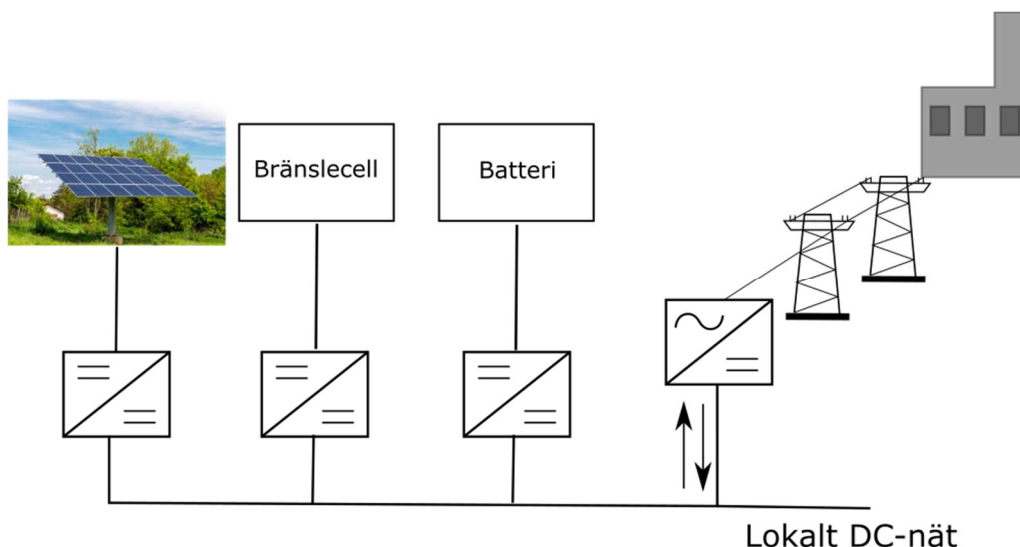


Figur 1. Schematisk bild av ett centralt elnät där samhället är beroende av den centrala energikällan och infrastruktur för distribution.



Figur 2. Schematisk bild av ett decentraliserat elnät där man skapat lokala mininät. De olika aktörerna är därmed inte beroende av en central källa samt infrastruktur. Man har därmed plockat bort två riskfaktorer och ökat robustheten.

Figur 3 visar en schematisk bild över hur ett lokalt likströmsnät kan byggas upp i sin enklaste form. Det lokala likströmsnätet är kopplat mot det centrala nätet med en växelriktare som både kan hämta el från nätet vid behov, och mata el till nätet vid överproduktion. Solcellerna och bränslecellerna kan producera likström med en viss spänning och genom omvandlare erhåller man en bestämd spänning anpassad för det lokala likströmsnätet. För att skapa ytterligare robusthet krävs lagringsförmåga vilket kan lösas med batterier. Även här används omvandlare för att anpassa spänningen.



Figur 3. Förslag på ett lokalt likströmsnät.

Man kan anpassa spänningen för det lokala likströmsnätet beroende på applikation. Det finns idag exempel på solpanelsinstallationer och andra typer av installationer med lokala nät, tex i Uppsala Science Park. I Uppsala Science Park har man även konstruerat ett lokalt likströmsnät för flera byggnader [7]. Värt att notera här är att man till skillnad från exemplet i Figur 3 valt att växla likströmmen från solpanelerna till växelström för att förbruka i byggnaderna, men att man sen växlar tillbaka till likström för transport och fördelning mellan byggnaderna. Här driver man ventilationsaggregaten med likström vilket minskar omvandlingsförlusterna för anläggningen genom att undvika transformering till växelström. I allmänhet är större effektförbrukare så som ventilation, värme, kyla, serverhallar och ev. fordonsbatteriladdning lämpliga kandidater att drivas direkt på likström. Många vanliga elektriska produkter (datorer, lampor) kan också användas på likström men är inte kontrollerade och godkända för detta.

Lokala nät med lagring och elproduktion bör vara av intresse för Försvarmakten för att försäkra anläggningsdrift vid bortfall av det centrala elnätet. Vidare skulle, om elproduktionen kan ske med lokala medel, ett minskat beroende till utländsk olja kunna erhållas. Lokalt producerad energi kan även användas för fordonsdrift eller transporteras till närliggande anläggningar. Överskottsel från exempelvis solceller och vindkraftverk skulle också kunna exporteras till elnätet och komma civilsamhället till godo.

2.1 Forskningsfrågor

- Skulle man kunna göra svenska förläggningar autonoma och fria från energitillförsel (elnätet och bränsletillförsel) genom att använda ett lokalt nät (även kallad ö-försörjning), bestående av t.ex. olika batterier, solceller, bränsleceller, vindkraftverk, generatorer och lokal produktion av biogas/biodiesel från närliggande industri, exempelvis skogs- och massaindustrin?
- Skulle man kunna driva sensorstationer helt autonomt? Hur kan man designa ett system bestående av solceller, bränsleceller och batterier för ändamålet?
- Vilka komponenter konstruerade för växelström skulle även kunna drivas av likström?
- Vad är en ett lämpligt energisystem för ett svenskt camp vid utlandsmission eller nationellt i ett gråzonsläge?

3 Hybridfordon

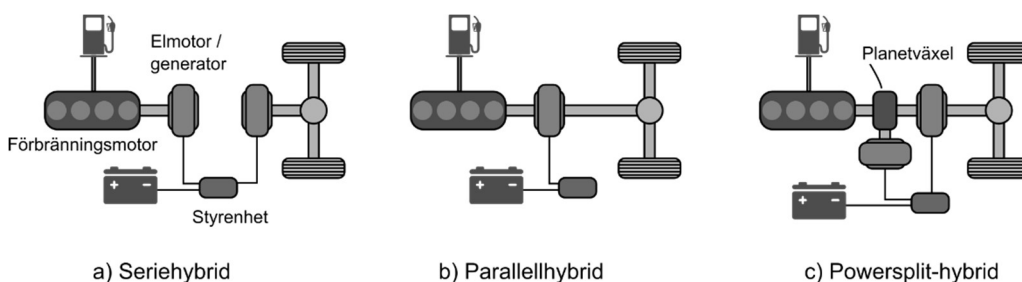
Hybriddrift är ett förhållandevis moget teknikområde som drivs främst inom det civila genom ökande utsläpps- och andra miljökrav. Vid konventionell förbränningsmotordrift måste motorn dimensioneras för de högsta effektuttag som fordonet konstruerats för. Om fordonet i normalfallet ligger på ett effektuttag långt lägre än det maximala, vilket är den normala situationen för landfordon, kan motorn inte optimeras med hänsyn till drivmedelsförbrukning i samma utsträckning som en motor som konstruerats för ett lägre maximalt lastuttag. I hybridfordonet kan en mindre förbränningsmotor användas vilken driver en generator som laddar ett batteri. Vid behov av högre effektuttag tas energi ur batteriet för att driva en elmotor som bistår förbränningsmotorn. Normalt återförs också energi som annars skulle förlorats i värme vid inbromsning till batteriet i hybridfordonet.

Hybriddrivlinor innehåller förutom förbränningsmotorn, en eller flera elmotorer, generatorer, batteri och styrning för dessa. Drivlinan kan konfigureras på några olika sätt, se Figur 4, beroende på vilka egenskaper som önskas.

I seriehybriden (se figur 4a) är förbränningsmotorn mekaniskt separerad från drivaxeln och genererar ström via direkt anslutning till generator. Strömmen fördelas därefter mellan batteriladdning och drift. Motorn kan konstrueras för att gå på konstant varvtal för maximal effektivitet. Stor frihet fås i komponentval och placering. T.ex. kan den drivande motorn och drivaxeln ersättas av en navmotor för varje hjul på fordonet.

I parallellhybriden (se figur 4b) sitter en kombinerad generator och elmotor på drivaxeln, antingen före eller efter växellådan. Detta är det enklaste hybridalternativet med minst antal komponentdelar. Konstruktionen kan göras genom att bilens vanliga generator ersätts av en kraftigare variant som används både som traditionell generator, startmotor och för att tillföra vridmoment vid låga varvtal.

I powersplit-hybriden (se figur 4c) distribueras kraft via en central planetväxel vilken också ersätter förbränningsmotorns växellåda. Denna konfiguration ger den mest effektiva framdrivningen sett över hela varvtals- och effektspannet, på bekostnad av ökad systemkomplexitet. Det är den hybridtyp som ofta används i kommersiella hybridbilar som går under benämningen starka hybrider (Toyota Prius, Ford Escape).



Figur 4. Olika hybriddrivlinor.

Hybridfordon har flera fördelar vilka skulle kunna vara gynnsamma för försvarsapplikationer:

- Tysta vid eldrift.
- Högt vridmoment även vid låga varvtal ger god acceleration från stillastående.
- Minskade bränsletransporter om elenergi kan produceras på plats.
- Lägre termiskt signalement vid framdrivning på eldrift.
- Man kan försörja sensorer på fordonet utan att behöva starta förbränningsmotorn.
- De är mer energieffektiva. En elmotor har en verkningsgrad på ca. 95%. Jämför med förbränningsmotorns 25-45% beroende på om det är en bensin- eller dieselmotor. Elmotorns färre transmissionssteg och återvinning av bromsenergi ger ytterligare vinster.
- Batterierna kan användas för att driva energivapen och skyddsutrustning om systemet konstrueras för att hantera de effekter detta kräver.

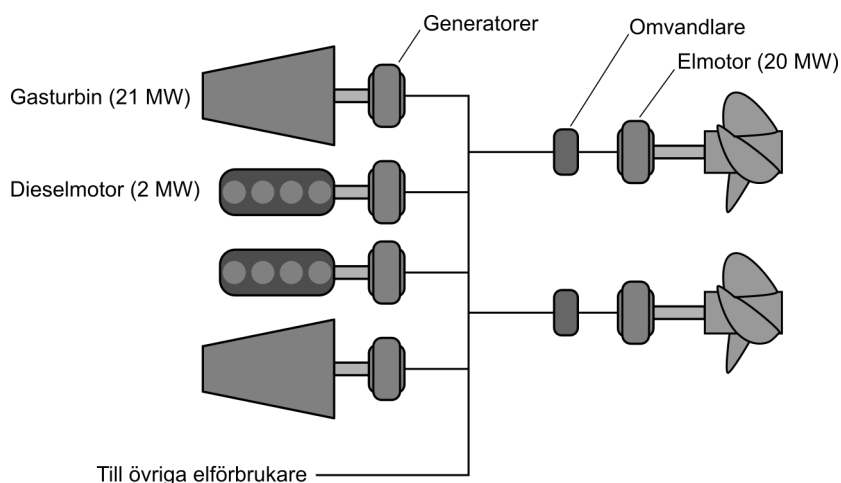
3.1 Forskningsfrågor

- Hur skulle man designa en hybriddrivlina för ett av svenska försvarets fordon? Skulle man kunna använda svensk biodiesel?
- Vilket bränsle (metanol/syngas/syntetisk diesel) passar bäst för det Svenska försvaret?

4 El- och hybriddrift på fartyg

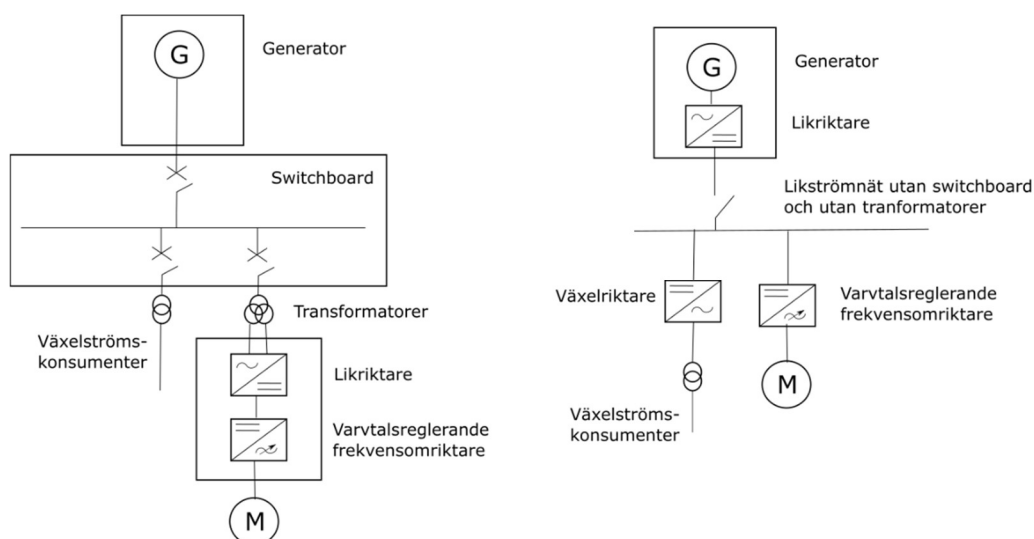
Perspektivstudien påvisar behov av att materielförnyelse även inom marinen. Man listar behov av nyanskaffningar av större ytstridsfartyg, korvetter, minröjningsfartyg och ubåtar tillsammans med utökad sjöoperativ helikopterförmåga. För att öka robustheten inom försvaret bör även energiförsörjningen vägas in. En utökad flotta med utökat behov av flödestransport från Västkusten leder till samma sårbarhet avseende bränsletransporter.

För fartyg är elmotorer av intresse då man skapar ett tyst och effektivt framdrivningssystem. Elmotorer för fartygsdrift används t.ex. i brittiska marinens jagare typ 45 [8] där två gasturbiner och två dieselgenerator driver generatorer som i sin tur driver två elmotorer á 20 MW, se principskiss i Figur 5. Fördelarna med direktelsystemet är större frihet avseende motorplacering inom skrovet och att skrov och motor kan vara akustiskt fränkopplade.



Figur 5. Principskiss över drivsystem i jagare typ 45.

Ett alternativ för fartyg skulle kunna vara hybriddrift, eventuellt med likströmsnät. Man skulle, till systemet i Figur 5, kunna införa batterier alternativt bränsleceller. Detta skulle kunna ge bränslebesparing, ett väldigt tystgående fartyg när man går på eldrift och möjliggöra snabb acceleration då batterier används. Ett lokalt likströmsnät ombord på fartyget skulle även medföra färre komponenter vilket medför mer fysiskt utrymme för annan utrustning. En illustrerande bild ges i Figur 6.



Figur 6. En schematisk bild av ett växelströmsnät på fartyg (vänster) och likströmsnät (höger).

Man kan även notera att ifall man implementerar komponenter i systemet ombord som går på likström, behövs inte växelriktaren och transformatorn för likströmsnätet. Man kan ansluta batterier på likströmsnätet för att skapa hybriddrift, men även andra framtida energikällor så som bränsleceller och solceller.

4.1 Forskningsfrågor

- Går det att designa en hybridlösning (generatorer och batterier), eventuellt med ett lokalt likströmsnät, för ett svenskt fartyg?

5 Litium-jonbatterier

I och med genombrottet av litium-jonbatterier, vilka är energitätare och väger mindre än t.ex. blysyrabatterierna, samt den ökande användningen av nya energikällor så som solceller och bränsleceller har batterier implementeras i diverse applikationer. Idag används litium-jonbatterier i handburen elektronik och i stor utsträckning i el- och hybridfordon, men även för energilagring för att t.ex. kapa topparna i energiförbrukningen på elnätet.

Litium-jonbatterier kan vid felhantering eller skada reagera exotermt under kraftig gasbildning och reaktionsförloppet kan liknas med en deflagration. Exempel på litium-jonbatteriincidenter som blivit uppmärksammade i media är elbilar som brunnit [9], Samsungs Galaxy Note 7 som började brinna, samt Boeing 787s batteriproblem vilket ledde till stående flygplan. Något som oroar är det kraftiga exoterma reaktionsförloppet, brand som är svår att släcka och gaserna som visat sig innehålla giftiga komponenter [10].

Litium-jonbatterier är ett samlingsnamn för flera olika kemisystem med elektrodmaterial bestående av olika litiumföreningar där fria litiumjoner kan lagras in (interkaleras). Vid laddning respektive urladdning vandrar litiumjonerna mellan elektroderna. Detta i kontrast till traditionella ackumulatorer där energi lagras genom redoxreaktioner. De vanligaste litiumelektrodmaterialen listas nedan (under sina engelska namn):

Litium Cobalt Oxide (LCO) – batteriet består av en koboltoxid katod och en grafitanod. Batterierna har hög energidensitet och är ett populärt val för bärbar elektronik som mobiltelefoner, bärbara datorer och kameror. Nackdelen för LCO är korta livstider, låg termisk stabilitet och jämförelsevis begränsade effektuttag. Litiumkobolttekniken mognar alltmer och nyare system inkluderar nickel, mangan och aluminium till att förbättra livslängd, effektuttag och kostnad.

Lithium Manganese Oxide (LMO) - katodmaterialet består av manganoxid och är ordnat i en tredimensionell struktur vilket förbättrar flödet av joner i elektroden som i sin tur bidrar till lägre intern resistans och bättre strömhantering. LMO-batterierna har god termisk stabilitet och säkerhet, men antalet laddningscykler är begränsat. Denna batterityp kan laddas och urladdas fort och används i kraftverktyg, medicinska instrument och även i hybrid- och el-fordon. Det har hög effekt men energikapaciteten är ungefär en tredjedel lägre jämfört LCO.

Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) har en katod som utgörs av nickel, mangan och kobolt. Nickel är känt för att bidra med hög energidensitet men låg stabilitet, mangan ger spinellstrukturen vilket ger låg intern resistans, dock är energidensiteten låg. Kombinationerna av metallerna förstärker varandras fördelar och cellens egenskaper kan styras genom de olika metallernas blandningsförhållande. Blandningen gör att koboltinnehållet inte behöver vara så stort vilket bidrar till bättre kostnadseffektivitet. Helt koboltfria varianter studeras också. NMC är ett bra val för kraftverktyg, el-cyklar och andra elektriska drivlinor. NMC-batterier har hög effekt och energidensitet.

Lithium Iron Phosphate (LFP) har en katod av järnfosfat, vilket ger den bra elektrokemisk prestanda och låg resistans. Fördelarna med denna batterikemi är ett stort antal laddningscykler samt bra termisk stabilitet. LFP är mer tolerant för att ladda till fullt och är mindre påverkat när det hålls vid en hög spänning under längre tid. LFP har en högre självurladdningstakt jämfört andra Li-jonbatterikemier.

Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (NCA) har en katod bestående av oxiderna av litium, nickel, kobolt och aluminium i olika proportioner. Batteriet har hög energidensitet och relativt bra effekt. Nackdelar med denna batterityp är dock säkerheten och till viss del kostnaden. Aluminium ger batteriet bättre stabilitet.

Lithium Sulfur Dioxide (Li-SO₂) är ett icke laddbart batteri med flytande svaveldioxidkatod under högt tryck. Typen karaktäriseras av dess goda lagringsstabilitet

och temperaturspann. Kan utveckla vätecyanid vid för höga temperaturer. Används främst i militära tillämpningar, t.ex. i marinens signalbojar.

När man vill implementera litium-jonbatterier i en applikation är det några punkter man ur säkerhetsaspekt bör tänka på:

- Välj rätt batterikemi för applikationen.
- Designa batterimodulen med material som minimerar propagering ifall termisk rusning skulle ske, minimerar risken för eskalering av brand, inte bidrar till giftiga gaser, fungerar som kylare/distribuerar värmen.
- Aktiv eller passiv kylning.
- Implementera ett battery management system (BMS) som även kan varna/minimera risken för termisk rusning av batterier.

Litium-jonbatterier bör för Försvarsmakten vara av intresse som ersättare till bly-syrabatterier i de applikationer där det är önskvärt att öka lagringskapaciteten för en given batterivolym eller minska volymen med bibehållen kapacitet. Rätt hanterade har litium-jonbatterier också god livslängd jämfört med bly-syrabatteriet. Laddningsbara enhetsbatterier för soldater i fält kan också det vara av potentiellt intresse.

5.1 Aktivitet på FOI inom litium-jonbatterier

FOI har sedan några år genomfört tester, utvärdering och design av litium-jonbatterier. Då litium-jonbatterier kan reagera med termisk rusning, ett reaktionsförlopp inte alltför olik det för krut och explosivämnen, kan samma analystekniker som används för att studera stabilitet och säkerhet för sådana material ofta användas även för litium-jonbatterier.

Exempel på instrument och mättekniker som finns på FOI och vilka har använts vid analys av litium-jonbatterier är:

- Accelerated Rate Calorimetry (ARC) – man mäter det termiska rusningsförloppet och erhåller temperatur och tryckkurvor som en funktion av tid och temperatur. Ur detta kan man analysera avgiven mängd energi, avgiven mängd gas etc.
- Materialutvärdering, dels med standard instrument så som Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermal Gravimetry Analysis (TGA) men även i modul försök så som att logga temperaturer, observera med IR-kameror.
- Propageringsförsök, genom överladdning/kortslutning/penetrering eller för försöket vald metod initiera termisk rusning av enskild cell. Man observerar sen hur värmen sprider sig, ifall kringliggande batterier i modulen kommer upp i kritiska temperaturer och ifall den termiska rusningen sprider sig.
- Då många applikationer kan utsättas för vatten på olika sätt har batterier utsatts för nedsänkning i vatten, av olika salthalter. Man har loggat spänning, temperatur, vätgasutveckling och observerat förlopp.
- Utvärdering av vilka gaser som bildas vid brand och i vilka koncentrationer. FOI kan även utvärdera resultatet toxikologiskt.

Värt att notera är att olika litium-jonbatteriers cellkemier inte beter sig lika och att det termiska rusningsförloppet skiljer sig markant. T.ex. är det stor skillnad på det termiska rusningsförloppet för NMC och LFP, vilket försök på FOI visat. Genom att designa ett litium-jonbatteripack på rätt sätt kan man minimera risken att termisk rusning sker och minimera konsekvenserna ifall det sker.

Förutom ovan kan FOI med befintlig infrastruktur genomföra falltest, beskjutningstest, brandförsök, överladdning, kortslutning, undersöka interna resistanser med mera.

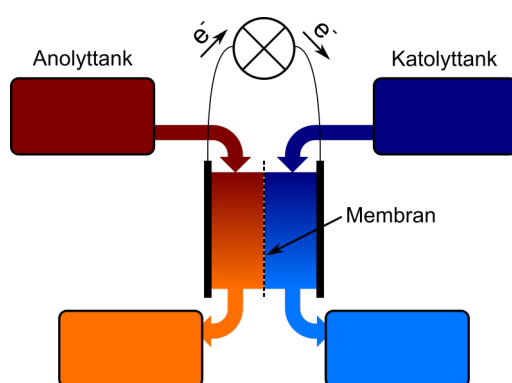
5.2 Forskningsfrågor

- Hur ska bedömningen göras gällande vilka typer av litium-jonbatterier som är lämpliga för olika applikationer med olika krav på säkerhet, effektuttag, vikt, volym, driftsäkerhet etc.?
- Hur ser det termiska rusningsförloppet för olika litium-jonbatterikemier ut? Sker termisk rusning i alla cellkemier? Vilka temperaturer karakteriserar rusningsförloppet? Hur mycket gas bildas vid det termiska rusningsförloppet? Hur beror detta av vilken grad av laddning batterierna har?
- Kan man designa ett säkert litium-jonbatteripack för det svenska försvaret, ett batteripack där termisk rusning av en battericell inte propagerar från cell till cell? Hur programmerar man ett batteriövervakningssystem som förhindrar termisk rusning genom att stänga av/koppla bort enskilda celler?
- Vilka gaser bildas vid en litium-jonbatteribrand? Vilka gaser bildas vid en brand av litium-jonbatterier i tex kombination med kolfiber och andra vanliga material som finns inom försvaret? Hur skadliga är gaserna för människor? Går det att inhibera gaserna? Vilka katalysatorer skulle kunna passa som inhibitorer?
- Hur bör en provningsstandard se ut för att identifiera de svagheter som kan finnas hos ett litium-jonbatteri.

6 Flödesbatterier

Flödesbatteriet fungerar enligt samma princip som konventionella batterier med skillnaden att anod och katod är i flytande form och benämns anolyt och katolyt. De två vätskorna fylls i varsin tank och tillåts flöda genom en battericell där de separeras av ett membran som endast tillåter jonpassage, se Figur 7. På detta sätt begränsas batteriets kapacitet inte av cellstorleken utan av tankvolymen.

Batterierna kan laddas genom att tillföra elektrisk energi och pumpa elektrolyterna i motsatt riktning. Alternativt kan ny elektrolyt fyllas på, och den förbrukade kan tas om hand och laddas på annan plats. På detta sätt har flödesbatteriet likheter med bränslecellen. Jämfört med vätgas kräver existerande kemier större tankvolym, men behöver å andra sidan inte trycksättas och är därför säkrare att hantera.



Figur 7. Flödesbatteri.

Det största tekniska problemet med flödesbatteriet är membranet som är känsligt för igensättning från föroreningar i elektrolyten och som med tiden slits och släpper igenom elektrolytvätska med förluster som följd. Utveckling pågår mot membranlösa celler där vätskorna inte blandas genom att bibehålla laminär strömning genom battericellen.

Flödesbatterier kan vara ett intressant alternativ vid sällan besökta obemannade plattformar, t.ex. sensorstationer, då tekniken har lågt underhållsbehov och kan lagra stora mängder energi.

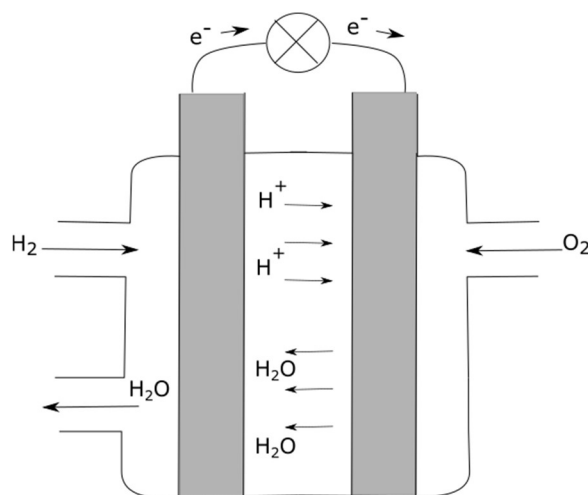
6.1 Forskningsfrågor

- Hur kan ett flödesbatteri konstrueras för det svenska försvaret? Kan systemet göras litet nog att använda som modullösning, t.ex. i container?

7 Bränsleceller

Bränsleceller är ett samlingsnamn på olika typer av tekniker där skillnaderna ligger i material av elektroderna och bränslet. En bränslecell består av tre huvudkomponenter, de två elektroderna, katoden (för reduktionsreaktionen) och anoden (för oxidationsreaktionen), samt elektrolyten i mellan de båda elektroderna. En fjärde viktig komponent är membranet mellan elektroderna.

En schematisk bild av en bränslecell illustreras i Figur 8. I bränslecellen genereras elektricitet och värme. Effektiviteten för en bränslecell är högre jämfört med en förbränningsmotor, den producerar dock värme som sidoprodukt (vilket även förbränningsmotorn gör). Denna värme kan tas tillvara i kombinerade system. För den alkaliska bränslecellen (AFC), polymerelektrolyt-bränslecellen (PEMFC), fosforsyra-bränslecellen (PAFC) och *molten carbonate*-bränslecellen (MCFC) är väte och syre i gasform bränsle. För *solid oxide*-bränslecellen (SOFC) och *direct methanol*-bränslecellen (DMFC) är kolväten bränsle. Ett problem med vätegasdrivna bränsleceller är att de behöver ren vätegas, annars förgiftas elektroden.



Figur 8. En schematisk bild av en bränslecell där bränslet är vätegas och avgaserna/produkterna är vatten.

För en mer detaljerad beskrivning av olika typer av bränsleceller se t.ex. referenser så som [11] och [12]. I denna rapport kommer endast fördelar och nackdelar med de olika typerna och potential för användning inom svenska försvaret bedömas. För en sammanställning av de olika bränslecellsteknikerna och deras för- och nackdelar se Tabell 1. De engelska namnen på bränslecellsteknikerna användas för att inte skapa missförstånd vid översättningar.

Tabell 1. Sammanfattning av de vanligaste förekommande bränslecellerna.

	Bränsle	Fördelar	Nackdelar
Alkaline fuel cell (AFC)	H ₂ (g) och luft	- Billig - Effektiv	- Känslig för föroreningar i bränslet (H₂)
Proton-exchange membrane fuel cells (PEMFC)	H ₂ (g) och luft	- Polymerbaserad elektrolyt (dock behövs en viss vätskenivå bibehållas i membranet) - Få materialproblem - Kompakt	- Känslig för föroreningar i bränslet (H₂) - Vattennivån i membranet är kritisk och behöver kontrolleras - Dyr polymerelektrolyt
Direct-methanol fuel cell (DMFC)	Metanol (CH ₃ OH)	- Enklare och mindre farligt bränsle jämfört med vätgas	- Höga halter av ädelmetalkatalysator som behövs på elektroderna. - Låg effektiviteten jämfört med andra bränslecellstekniker - Orienteringen av cellen är känslig
Phosphoric acid fuel cells (PAFC)	H ₂ (g) och luft	- Klarar viss mängd CO i bränsletillförseln (H₂) vid temperaturer ovan 150°C	- Låg energitäthet - Korrosiv elektrolyt
Molten-carbonate fuel cells (MCFC)	H ₂ (g), luft och CO ₂ (g)	- Hög effektivitet - CO/CH₄ kan användas som bränsle vid högre temperaturer pga. intern reformering av bränsle	- Materialproblem pga. aggressiv miljö i cellen
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	Kolväten och luft	- Snabba kinetik - Reformering av bränsle ej nödvändig - Elektrolyt i fast form - Hög effektivitet - Tolerans mot föroreningar	- Hög tillverkningskostnad - Höga operationstemperaturer begränsar materialvalen - Elektrolyten har hög ledningsförmåga vilket ökar kinetiken för rekombination

FOI har gjort en sammanställande studie där man jämfört olika energikällor för olika typer av soldater och olika längd på uppdrag i fält [13]. Enligt beräkningar från US Army behövde en soldat under ett 72 timmar långt uppdrag i Afghanistan, totalt 70 batterier, av sju olika typer och med en total vikt på 7,2 kg. Idag använder en soldat en mängd olika energikrävande hjälpmedel såsom IR-kameror, radio, laserpekare, GPS och dator etc. Man använder olika batterier för de olika hjälpmedlen, ofta engångsbatterier, vilket gör att man måste bära med sig reservbatterier av flera olika batterityper. Slutsatsen av studien är att vid uppdrag på över 72 h ger en bränslecellsenhet en viktninskning av soldaters packning. Dock poängteras det att bränslecellen som drivs med metanol inte kan vridas mer än 95°, vilket gör den olämplig att använda under rörelse. Men man säger också att den största vinsten för en soldat skulle kunna komma av ifall man skulle ha ett centralt, laddningsbart batteri, istället för som idag engångsbatterier.

Utöver uppdrag i fält ges här ytterligare exempel på befintlig och potentiell användning av bränsleceller för försvarapplikationer:

- PEMFC – Den tyska typ 212 ubåten och de italienska Todaro-klass ubåten.
- DMFC – Bärbar utrustning för soldater så som tex batteriladdare, autonom strömförsörjning.
- Bränsleceller kan vara ett alternativ på UAV:er då de väger mindre och är mindre platskrävande än förbränningsmotorer.

- För stationära applikationer så som sensorstationer på platser utan elnät skulle man kunna använda vätgasbränsleceller. Vätgasen kan produceras lokalt med t.ex. solceller. Ett annat alternativ är att man använder SOFC och med hjälp av egen produktionsanläggning tillverkar t.ex. naturgas.
- DMFC skulle kunna passa som strömförsörjning för soldater i fält.
- SOFC skulle kunna användas vid stationära lösningar. Eftersom man kan driva dem med biobränslen skulle man t.ex. med gasreforming kanske kunna använda JP8-bränsle eller enhetsbränsle som tillverkas från svensk skogsindustri.

7.1 Forskningsfrågor

- Skulle man kunna driva en bränslecell på restprodukter från svensk skogsindustri? Vilka katalysatorer behövs? Hur behöver man designa reformeringen?
- Kan bränsleceller användas i militära fordon och fartyg?
- Hur kan bränsleceller användas som elproducenter i militära anläggningar och i lokala nät? Är vätgasgenerering och -lagring en lämplig energibärare?

8 Dieselliknande bibränslen

Biodiesel är ett drivmedel framställt av vegetabiliskt olja eller animaliskt fett som kemiskt sammanslagits med en alkohol, vanligen metanol, vilket ger en fettsyrametylester (FAME). I princip kan alla biologiska fetter användas för framställningen men olika råvaror ger olika bränsleegenskaper. T.ex. börjar biodiesel gjord av talg eller palmolja härda redan vid temperaturer under omkring +15 °C medans linfrö- och rapsolja produkter börjar härda vid omkring -2 °C.

Blandningar med biodiesel och petrodiesel förekommer i hög utsträckning på marknaden och märks oftast med ett B följt av procentandelen biodiesel. T.ex. anger B5 att blandningen innehåller 5% biodiesel och 95% konventionell diesel. De flesta dieselmotorer kan använda denna blandning utan modifiering, och många kan användas med halter upp till B20.

För drift på ren biodiesel måste motorn vara anpassad för ändamålet då den i standardmotorer kan sätta igen filter, sota injektorer, skapa kolvvidhäftning och problem med packningar och smörjmedel. Anpassade motorer finns på marknaden. Bl.a. tillverkar Scania motorer som tillåter drift med ren biodiesel.

Vidare kan problem med alg tillväxt i tankar uppstå. Speciellt i fall då fordon står en längre tid utan bränslecirkulering.

För flera av de problem som kan uppstå med dieselliknande biobränslen används olika tillsatser för att ge bränslet önskvärda egenskaper. Exempelvis kan metanol tillsättas för att sänka fryspunkten.

HVO (Hydrogenated vegetable oil) är ett alternativ till FAME-drivmedel och baseras på samma råvaror. Skillnaden ligger i tillverkningsprocessen där man med hjälp av vätgas under höga tryck och temperaturer modifierar bioråvaran till ett bränsle som är mycket likt vanlig diesel. Dessa bränslen kan användas i dieselmotorer utan att de behöver modifieras.

Ytterligare en metod att framställa syntetisk diesel är direkt från koldioxid och vätgas. Dessa omvandlas i ett första steg till vatten och kolmonoxid för att sedan, med ytterligare vätgas, omvandlas till långa kolvätekedjor under moderat temperatur och tryck med hjälp av en metallkatalysator (Fischer–Tropschprocessen).

Det finns i Sverige förutsättningar för tillverkning av dieselliknande biobränslen och detta sker också kommersiellt. T.ex. tillverkas FAME från rapsolja (RME, rapsmetylester) i Karlshamn och från tallolja i Piteå som också raffineras vidare till HVO i Göteborg. Den senare är speciellt intressant då talloljan kan erhållas från pappersindustrins restprodukter.

8.1 Forskningsfrågor

- Vilka metoder för framställning av biobränslen är lämpliga under svenska förhållanden?
- Vilka typer av biobränsle är lämpliga för Försvarmakten?
- Kan biodiesel tillverkas lokalt och modulärt, t.ex. i container?

9 Vätgas

Vätgas är en tvåatomig gas av grundämnet väte. Väte finns naturligt i mycket stora mängder där det i förening med syre bildar vatten, och i form av kolväten i förening med kol. I form av ren vätgas finns dock inga betydande naturliga förekomster. Vätgas framställs i huvudsak genom sönderdelning av kolväten med vattenånga vid höga temperaturer. S.k. förnybar vätgas framställs genom elektrolys av vatten där detta sönderdelas till vätgas och syrgas med hjälp av ickefossil elektrisk energi. De två gaserna kan reageras i en bränslecell för att omvandlas till vatten och elektrisk energi igen. Vätgas använd på detta sätt kan ses som en energibärare, analogt med ett elektriskt batteri.

De flesta problem associerade med vätgas som energibärare är relaterade till dess lagrings- och transportproblem. Vätgas vid atmosfäriska lufttryck har lågt energiinnehåll per volymenhet och måste komprimeras (vilket ger energiförluster) för att betydelsefulla mängder ska kunna transporteras med fordon. Alternativet flytande väte kräver isolerade kärl i tjockt gods vilket ger betydande viktproblem. Trycksatt vätgas är också benäget att skapa försprödning av de flesta metaller vilket kräver höga och kostsamma krav på materialval. Utöver detta är vätgas explosivt i luft vid blandningar med 4-75% vätgas.

Alternativa sätt att lagra vätgas existerar men är inte väl utvecklade, t.ex. i form av natriumborhydrid (NaBH_4), ett metallsalt i fast form, som vid kontakt med vatten frigör väte i gasform. Utveckling av metoder för att använda flytande organiska föreningar som vätgasbärare pågår också. Exempelvis kan väte bindas med kväve till ammoniak som relativt enkelt kan lagras i flytande form. Vätgasen kan återfås ur ammoniaken genom katalytisk konvertering.

Inom EU:s vätgasstrategi har beslutats om investeringar, reglering och forskning med målet att vätgas skall bli en fullvärdig del av EU:s energisystem och kunna ersätta fossila bränslen i stor skala inom alla sektorer [14]. För att nå detta mål planeras investeringar för att möjliggöra en årlig förnybar vätgasproduktion å tio miljoner ton senast år 2030. Inom ramen för EU:s vätgassatsning har ett projekt (RESHUB, Defence RESilience Hub Network in Europe) inletts inom EDA där målet är att placera militära el- och vätgasproducerande noder utspridda över hela Europa [15]. Dessa noder ska vara självförsörjande avseende energi och också kunna transportera denna mellan olika noder. Detta skulle kunna ske över elnätet eller vid bortfall av detta via marktransport av vätgas.

Inom försvaret skulle lokal produktion och konsumtion av vätgas för stationära enheter kunna vara ett alternativ. På längre sikt skulle vätgasdrivning av fordon kunna vara attraktivt om lösningar på existerande transportproblem mildras. Intresset från EU att satsa på vätgas som stor fossil ersättare leder förhoppningsvis också till att problemen associerade med dess lagring reduceras och att vätgas i framtiden blir mer attraktivt som energibärare.

Vid insatser utomlands är transport av bränsle (diesel och bensin) problematiskt; det är riskfyllt, ger en utsatthet, fungerar som ett mål för fienden etc. [16]. Transport av vätgas skulle troligen vara mer komplicerat än dagens transporter av diesel.

9.1 Forskningsfrågor

- Hur ska väte lagras på ett säkert sätt? Kan man t.ex. binda in vätgas i fast form i ett metallkomplex och sen termiskt utvinna det, utan alltför stora förluster och risker?
- Vilka för- och nackdelar finns med att lagra väte i ren form jämfört med förädlad, t.ex. metanol?
- Kan vätgas produceras lokalt och modulärt, t.ex. i container?

10 Slutkommentarer

I denna rapport ges en översiktlig teknisk bakgrund för ett antal alternativa energisystem som grund för fortsatt forskning kring risker med olika energilagringssystem. Ambitionen har inte varit att ge fullständiga svar på givna frågor utan syftat till att ge en bred översikt över respektive område till stöd för framtida forskningsinriktning.

De beskrivna systemen varierar i mognadsgrad där somliga inte innebär några uppenbara säkerhetsrisker men möjligtvis tillförlitlighetsproblem, som bio-diesel, medan andra energitäta lagringstekniker som litium-jonbatterier kan innebära att säkerhetshöjande åtgärder måste vidtas. Vid val av framtida lagringstekniker bör avvägningar göras mellan de olika teknikernas för- och nackdelar tillsammans med vinst- och kostnadsanalyser

11 Referenser

- [1] Försvarsmakten, "Slutredovisning av försvarsmaktens perspektivstudie 2016-2018 - Tillväxt för ett starkare försvar," Stockholm, 2018.
- [2] E. Kock, C. Denward, B. Johansson, D. Jonsson och P. Larsson, "FOA-rapporter med eventuell relevans för nutida planering av civilt försvar inom energiområdet," FOI Memo 7044, FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm, 2020.
- [3] TT, "<https://www.svt.se/nyheter/inrikes/it-spioner-forbereder-attack-mot-elnetet>," SVT, 9:e Januari 2020. [Online]. [Accessed 18 05 2020].
- [4] N. Fiorilli, "<https://blueskypit.com/2019/10/18/pit-to-become-first-major-u-s-airport-powered-entirely-by-microgrid/>," 19:e Oktober 2019. [Online]. [Accessed 18 05 2020].
- [5] Deloitte LLP, "Energy security America's best defense," Deloitte, 2009.
- [6] A. Nordling, "Sweden's Future Electrical Grid - A project report," The Royal Swedish Academy of Engineering Sciences (IVA), Stockholm, 2017.
- [7] L. Nohrstedt, "Likström växlar upp ett steg till," *NyTeknik*, 08 05 2017.
- [8] Royal Navy, "HMS Daring Type 45 - The Anti-Air Warfare Destroyer," fleetgraphicscentre 08/489, 2008.
- [9] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium in battery for electric vehicles: A review," vol. 10, 2018.
- [10] U. Bergström, Å. Gustafsson, L. Häggglund, C. Lejon, D. Sturk och T. Tengell, "Vented gases and aerosols of automotive Li-ion LFP and NMC batteries in humidified nitrogen under thermal load," FOI-R--4166--SE, FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut, 2015.
- [11] C. S. Spiegel, *Designing & Building Fuel Cells*, Mc Graw Hill, 2007.
- [12] A. D. James Larminie, *Fuel Cell System Explained*, WILEY, 2003.
- [13] B. Levin, A. Pohl, H. Kariis, G. Kindström, P. Lundberg, A. Noren, F. Ringblom, M. Tunell och S. Savage, "Analysis of energy solutions for the soldier," FOI-R--3832--SE, FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm, 2013.
- [14] Europeiska kommissionen, "Drivkraft för en klimatneutral ekonomi: EU-kommissionen planerar för framtidens energisystem och förnybar vätgas," Bryssel, 2020.
- [15] European Defence Agency Fact Sheet, "Defence RESilience Hub Network in EUROPE - RESHUB," Bryssel, 2020.
- [16] Deloitte, "Energy Security - America's Best Defence," Deloitte Development LLT, 2009.
- [17] A. Diemer, "Riskanalys av vätgas och vätgasfabriken vid Ringhals," 2000.
- [18] S. Mapes, "Soldier Power to The Edge," 2012.
- [19] D. Blagoeva, C. Pavel, D. Wittmer, J. Huisman och F. Pasimeni, "Materials dependencies for dual-use technologies relevant to Europe's defence sector, EUR

29850 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-7911102-3,” doi:10, p. 2760/570491.

- [20] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia och X. He, ”Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review,” *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246-267, 2018.
- [21] National Transportation Safety Board, NTSB Recommends Process Improvements for Certifying Lithium-ion Batteries as it Concludes its Investigation of the 787 Boston Battery Fire Incident, National Transportation Safety Board Office of Public Affairs, Washington, DC, 2014.
- [22] OFFICE of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, “<https://www.energy.gov/eere/articles/4-ways-fuel-cells-power-us-military>,” [Online]. [Accessed 12 06 2020].

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se