



# Omvärldsanalys – Energitekniker för ett framtida försvar

Johanna Enström, Kristoffer Danel, Elias Lallo,  
Sara Munktell, Wilhelm Sahlén, Marcus Tynnhammar

Johanna Enström, Kristoffer Danel, Elias Lallo, Sara Munktell, Wilhelm Sahlén, Marcus Tynnhammar

# Omvärldsanalys – Energitekniker för ett framtida försvar

Titel	Omvärldsanalys – Energitekniker för ett framtida försvar
Title	Analysis of energy technologies for a future defence
Rapportnr/Report no	FOI-R--6506--SE
Månad/Month	September
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	34
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Försvarsekonomi
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	E12459
Godkänd av/Approved by	Daniel Faria
Ansvarig avdelning	Försvarsanalys

Bild/Cover: Shutterstock

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 rapport ger en översikt och en analys av energibärare och teknologier relevanta för Försvarsmakten i ett framtida energisystem. Målet har varit att visa på bredden av möjligheter och därigenom bidra till ett hållbart, robust och anpassningsbart energisystem för Försvarsmakten, med sikte mot år 2045.

Rapporten beskriver utvecklingen inom respektive område och inkluderar så väl energi för framdrift av fordon och plattformar som anläggningar och reservkraft. Den utforskar tekniker och koncept på systemnivå, exempelvis lokala nät med möjlighet till ö-drift, elektrifiering och V2X-teknologi. Även energibärare för lagring och framdrift, såsom bio-baserade bränslen, batterier och vätgas granskas avseende potential att bidra till ett mer hållbart energisystem.

Resultatet visar på en stor bredd av tekniker som kan komma att bli viktiga inom olika delar av Försvarsmaktens verksamhet. En förhoppning är att denna tekniköversikt ska ligga till grund för fortsatta analyser av tillämpningar inom olika delområden, men också analyser av hur dessa delområden kan samverka inom ett framtida energisystem.

Nyckelord: Energiomställning, energiteknik, energibärare, drivmedel, biobränsle, elektrifiering, batteriteknik, vätgas, gasturbiner.

## Summary

This report provides a comprehensive analysis and overview of energy carriers and technologies relevant to the Swedish Armed Forces. The goal has been to exhibit the great variety of possibilities that may contribute to a sustainable, robust and adaptable energy system for the Armed Forces, by the year 2045.

The report describes development in each area and includes energy for propulsion of vehicles and platforms as well as for installations and power reserve. It explores system-level technologies and concepts including local networks with islanding capabilities, electrification and V2X technology. Energy carriers for storage and propulsion, such as bio-based fuels, batteries and hydrogen are examined for their potential to contribute to a more sustainable energy system.

The result shows a wide range of technologies that may become important in different applications within the Swedish Armed Forces' operations. It is our intention that this overview will form a knowledge base for further analyzes of applications in different sub-areas, but also analyzes of how sub-areas can work together within a future energy system.

Keywords: Energy transition, energy technology, energy carrier, fuel, propulsion, bio-fuel, electrification, hydrogen, turbines.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>6</b>
1.1	Bakgrund och syfte .....	6
1.2	Metod .....	7
1.3	Läsanvisning .....	8
<b>2</b>	<b>Tekniker och koncept på systemnivå .....</b>	<b>9</b>
2.1	Energieffektivisering .....	9
2.2	Lokala nät med möjlighet till ö-drift .....	9
2.3	Eldrift/Hybridrift .....	10
2.4	Bränsleceller .....	11
2.4.1	Väletablerade tekniker .....	11
2.4.2	Fastbränsleceller – en teknik på uppgång .....	11
2.5	Gasturbiner för elgenerering .....	12
2.6	V2X (Vehicle to Everything) .....	12
<b>3</b>	<b>Energibärare för lagring och framdrift .....</b>	<b>14</b>
3.1	Bio- och elektrobränslen .....	14
3.1.1	Generellt om biobränslen, HVO och SAF .....	14
3.1.2	Olika processvägar för biobaserade flygbränslen .....	14
3.1.3	Tillgången på biomassa .....	15
3.1.4	Elektrobränslen .....	16
3.1.5	Bio-elektrobränslen .....	16
3.2	Vätgas och andra kolfria bränslen .....	17
3.2.1	Vätgas .....	17
3.2.2	Ammoniak och vätgas .....	18
3.2.3	Metallförbränning .....	18
3.3	Batterier .....	20
3.3.1	Litium-jonbatterier .....	21
3.3.1	Fastfasbatterier (Solid State) .....	21
3.3.2	Natriumbatterier .....	22
3.3.3	Flödesbatterier .....	22
<b>4</b>	<b>Diskussion - Teknikernas roll i svenska försvaret .....</b>	<b>24</b>
4.1	Gemensamma lösningar för elektrifiering .....	24
4.2	Total bränsleflexibilitet genom vätgasomvandling .....	25
4.3	Biobränslen som en del av lösningen .....	25
4.4	Förslag på vidare forskning och utveckling .....	27
4.4.1	Forskning, omvärldsbevakning och tillämpning inom batteriteknik .....	27
4.4.2	Elektrifiering och V2X .....	27
4.4.3	Fortsatt implementering av biobränslen .....	28
<b>5</b>	<b>Summering och slutsatser .....</b>	<b>29</b>
	<b>Referenser .....</b>	<b>29</b>

# 1 Inledning

## 1.1 Syfte

I takt med den snabba utvecklingen inom energiteknikområdet, både civilt och inom försvarsindustrin, öppnas många möjligheter för Försvarsmakten att skapa nya förmågor, öka autonomin i energiförsörjningen och inte minst bidra till en hållbar framtid. Förståelsen för hur teknologiska framsteg och möjligheter påverkar Försvarsmaktens förmåga att operera är avgörande, särskilt i tider av kris eller konflikt.

Denna rapport syftar till att vägleda Försvarsmakten i val av framtida energisystem och tekniker relaterade till energiområdet genom att tillhandahålla en tekniköversikt baserad på omvärldsbevakning via litteraturstudier. Den utgör ett kunskapsbidrag på vägen mot en energiomställning och ger en aktuell översikt över energitekniker och energibärare av intresse för Försvarsmakten. Genom att definiera energiteknik som ett tekniskt koncept inom området energiförsörjning och energibärare som det medium som fysiskt bär energin, tar denna studie sig an en systematisk och teknisk genomgång av lösningar som kan föra oss mot ett mer hållbart, robust och anpassningsbart energisystem år 2045.

Målgruppen för studien är främst anställda inom försvarsmyndigheterna som har behov av att öka sin förståelse för framtida lösningar inom energiområdet. Detta inkluderar så väl beslutsfattare som teknisk personal och experter som önskar bredda sina perspektiv.

## 1.2 Bakgrund

Detta är den andra rapporten i studien LOG232405S - Energilösningar. Studiens första rapport, *Logistikperspektiv på framtida energiförsörjning för Försvarsmakten [1]*, beskriver grundläggande synsätt kring logistik och energi samt hur dessa kopplar samman. I denna andra rapport tas arbetet vidare, med sikte på 2045, genom en systematisk och teknisk genomgång av lösningar som kan leda Försvarsmakten mot ett mer hållbart, robust och anpassningsbart energisystem.

Arbetet bygger vidare på de utredningar som gjorts inom studien Klimatneutral Försvarsmakt, vilka presenterats i fyra delrapporter och en slutrapport [2-6]. I slutsatserna från dessa rapporter läggs stor vikt vid lösningar för dagens plattformar som kräver lite eller ingen anpassning av fordonen, så kallade drop-in-bränslen. Studien Klimatneutral Försvarsmakt pekar på vissa öppningar för andra möjligheter, exempelvis elhybridsystem i ett längre perspektiv, men fokus för rekommendationer om fortsatt arbete rör främst åren fram till 2030 och implementeringen av drop-in-bränslen. Utifrån denna bakgrund ser vi ett stort behov av att lyfta blicken mot det längre perspektivet då nya system kan implementeras i Försvarsmaktens verksamhet. På grund av den långa process det är att ersätta system inom Försvarsmakten utgår vi i första hand från de energilösningar som finns tillgängliga idag eller väntas få genomslag inom en nära framtid. Exempel på teknikområden där det idag sker en stark utveckling är batterier, bränsleceller och gasturbiner.

Denna studie inkluderar energiförsörjning av anläggningar, vilket inte ingått i studierna inom Klimatneutral Försvarsmakt. Genom att inkludera detta vill vi lyfta integrationen mellan energiförsörjning av anläggningar, fordon och andra plattformar, som blir allt viktigare i takt med att elektrifieringen fortgår. Vikten av att inte kategoriskt skilja på systemen för drivmedel, värme och el utan se energiförsörjningen som en helhet framhålls också i rapporten gällande logistikperspektiv [7]. I ljuset av den pågående diskussionen

kring lokala energiproduktionssystem, tar rapporten även upp konceptet mikro-nät, där energi produceras, lagras och distribueras lokalt för att öka robustheten i energitillgången under krissituationer och möjliggöra användningen av förnybara energikällor. Många av de teknologier som tas upp kommer att kunna användas som en del i ett sådant lokalt nät. Vidare inkluderas också en analys av framtida tillgång på hållbar bioråvara för drop-in-bränslen. Detta på grund av att råvarutillgången, i tidigare studier inom Försvarmakten [4, 5], bedömts vara en flaskhals för omställningen samt att biobränslen och elektrobränslen väntas spela en viktig roll även i det längre perspektivet.

### 1.3 Metod

Rapporten är resultatet av en övergripande omvärldsanalys inom aktuella teknikområden och bygger huvudsakligen på litteraturstudier. Sju sammanställningar av energiteknik för militära applikationer valdes ut för att säkerställa att aktuell forskning täcks in. Samtliga har getts ut de senaste fyra åren, vilket är betydelsefullt då utvecklingen sker snabbt inom de flesta av teknikområdena.

För att öka systematiken i genomgången av tekniska lösningar inom energiområdet har en indelning i två grupper gjorts. Energiteknik definieras här som ett tekniskt koncept inom området energiförsörjning, medan energibärare är det medium som fysiskt bär energin. Exempelvis är diesel, biodiesel och vätgas energibärare, medan bränsleceller, som kan omvandla vätgas till el, är en energiteknik. Batterier är förvisso en teknisk lösning, men också en bärare av energi varför vi här har valt att behandla batteriteknik under kapitlet Energibärare för lagring och framdrift.

Tabell 1. Omfång inom tidigare militära översiktsstudier.

	Energieffektivisering	Lokala nät	Eldrift/hybriddrift	Bränsleceller	Gasturbiner	V2X	Batteriteknik	Vätgas	Ammoniak	Alkoholer	Metallförbränning	Biobränslen (drop-in)	E-kolväten	Solenergi	Kärnkraft
Slutrapport - Klimatneutral Försvarmakt (FM)			X					X	X	X		X			
Energilagring för reservkraft (FOI)							X				X				
Energisystem för robust energiförsörjning (FOI)		X	X	X			X	X				X			
Powering the US army of the future (National Academies...)	X	X	X	X	X	X	X	X							X
Nullutslippsforsvaret (FFI)			X					X	X	X		X	X	X	X
Mission Net-Zero: Charting the path for E-fuels in the military (NATO ENSEC)			X				X	X	X	X			X		
Climate change mitigation in the Armed Forces (NATO ENSEC)	X	X	X	X		X		X	X	X		X	X	X	X

I Tabell 1 visas vilka teknikområden och vilka energibärare som tas upp inom varje översiktsstudie [6, 8-13]. Vi har bedömt att samtliga av områdena som presenteras i Tabell 1 är relevanta att beskriva, med undantag för kärnkraft där vi anser att tekniken med småskaliga reaktorer ligger för långt fram i tiden för att vara intressant för Försvarmakten 2045. Det finns heller ingen forskning idag som visar på hur Sverige skulle vilja använda kärnkraft för



lokal drift i liten skala i framtiden. Dock finns det försök i andra länder där syftet är att undersöka skalbarheten med mindre kärnkraftverk [10, 11, 13].

Elproduktion baserat på solceller behandlas inte som eget område i rapporten men berörs tillsammans med lokala elnät.

Flera av studierna tar upp specifika tillämpningar av teknikerna, vilket endast tas upp som diskussionsområde i denna rapport, eftersom tillämpningar inom olika militära områden är en omfattande forskningsfråga i sig. Även tekniker som kan appliceras inom energiområdet, men som inte är specifika för detta, exempelvis lätta och högteknologiska material eller artificiell intelligens, har exkluderats.

## **1.4 Läsanvisning**

Rapporten är uppdelad i ett avsnitt som rör tekniker och koncept på systemnivå (kapitel 2) och ett som rör energibärare för lagring och framdrift (kapitel 3). Naturligtvis är både energibäraren och tekniken som nyttjar den delar av ett energisystem. Uppdelningen syftar dock till att ge en strukturerad överblick. I kapitel 4 ges förslag på hur beskrivna tekniker och energibärare kan samverka inom det svenska försvaret, bland annat via lokala nät. Där ges också förslag på vilka steg som kan tas för att komma vidare i omställningen. Genom denna integrerade metodik strävar vi efter att ge Försvarmakten en aktuell överblick av möjligheterna inom energiteknikområdet.

## 2 Tekniker och koncept på systemnivå

### 2.1 Energieffektivisering

För att minska den logistiska problematiken samt öka överlevnadsgraden och måluppfyllelsen med tillgängliga system behöver systemen energieffektiviseras. Energieffektivisering är grunden till många av de civila tillämpningarna av elektrifiering och även något man bör eftersträva när den tillgängliga energin är begränsad. Energieffektivisering har blivit allt viktigare inom utvecklingen av militära system sedan det på 2010-talet blev spritt hur stora problemen var med energiförsörjning under de amerikanska och brittiska insatserna i Irak och Afghanistan, då kostnaderna kunde räknas både i monetära termer och i människoliv [14, 15]. Energieffektivitet bidrar också till att ekonomiskt möjliggöra omställning till fossilfria lösningar som är dyrare per megawattimme.

Energieffektiviteten kan exempelvis ökas genom att kombinera och optimera olika typer av energigenereringssystem exempelvis genom hybriddrift som gör att en förbränningsmotor kan arbeta närmare sin optimala arbetspunkt trots att lasten varierar. De tekniker som presenteras i detta kapitel är av intresse just för att öka energieffektiviteten. De är dock utvalda, inte främst för sin energibesparingspotential utan för att de också möjliggör en omställning till fossilfri energi.

### 2.2 Lokala nät med möjlighet till ö-drift

Energi har blivit ett vapen. Rysslands krigsföring i Ukraina visar hur infrastruktur blivit en måltavla i krig [16] och centraliserad elproduktion kommer i sådana lägen alltid att utgöra en sårbarhet. Transporter av bränsle är problematisk i en krigssituation och medför även sårbarhet genom risken för upptäckt vid leveranser till hemliga anläggningar. Med decentraliserad och autonom energiförsörjning möjliggörs ett starkare försvar. I USAs klimatstrategi från 2022 presenteras planen att samtliga av landets fler än 130 militäranläggningar ska ha installerat lokala mikronät med egen energiförsörjning år 2035 [17]. Vilka lösningar som lämpar sig bäst för lagring och energigenerering är beroende av anläggningens plats och funktion, och militära anläggningars behov skiljer sig ofta från civila. Att utreda hur mikronät anpassas, effektiviseras och försörjs utifrån Försvarets behov är därför en avgörande punkt för att implementera strategin. Kritiskt är även att utreda robustheten hos mikronätet och hur det hanterar de unika lastfall som innefattas i Försvarets tillämpningar.

Mikronät är lokala nät som innehåller distribuerade energikällor (så som bränsleceller, generatorer eller solceller), laster (energiförbrukare) och energilager (exempelvis batterier). Ett villkor är att detta sammankopplade system kan kopplas bort ifrån det centrala kraftnätet (så kallad ö-drift). Mikronätet behöver kunna styras lokalt för att flexibelt kunna producera och kontrollera energitillgång samt möjliggöra stabila övergångar vid till- och frånkoppling till det centrala nätet. Reservkraftsystem med ö-drift kan vara anpassade till att upprätthålla driften i allt ifrån ett par timmar till flera dygn beroende på tillämpningen. Uthålligheten är beroende av hela systemet, det vill säga valet och tillgången på energikällor och energilager, den övergripande effektiviteten hos systemet och vilka laster som tillkopplas. Mikronät delas typiskt in i tre olika kategorier AC (växelspänning), DC (likspänning), eller hybrid vilket är en kombination av AC och DC. I dagens läge är AC-mikronät den vanligaste typen då det centrala elnätet är AC-baserat, och majoriteten av tillgängliga generatorer genererar AC. Den generella kunskapsbasen rörande AC-nät är därav bredare. AC-nät är dock svårare att balansera i liten skala för att bibehålla en stabil frekvens vid 50 Hz. Utöver det arbetar många nya energikällor och energilager, så som bränsleceller och batterier, i DC och blir därmed lättare att koppla in till ett DC-nät. DC-nätverk har även fördelen att man inte behöver förhålla sig till fasstabilitet. Kunskapen kring dem är dock fortfarande begränsad gällande styrningen och tekniken som krävs för att driva mikronät med DC med hög

stabilitet. Alla övergångar AC/DC, AC/AC, DC/DC, i mikronätet ger energiförluster och en utmaning är att optimera topologin hos nätverket för att minimera dessa.[18-20]

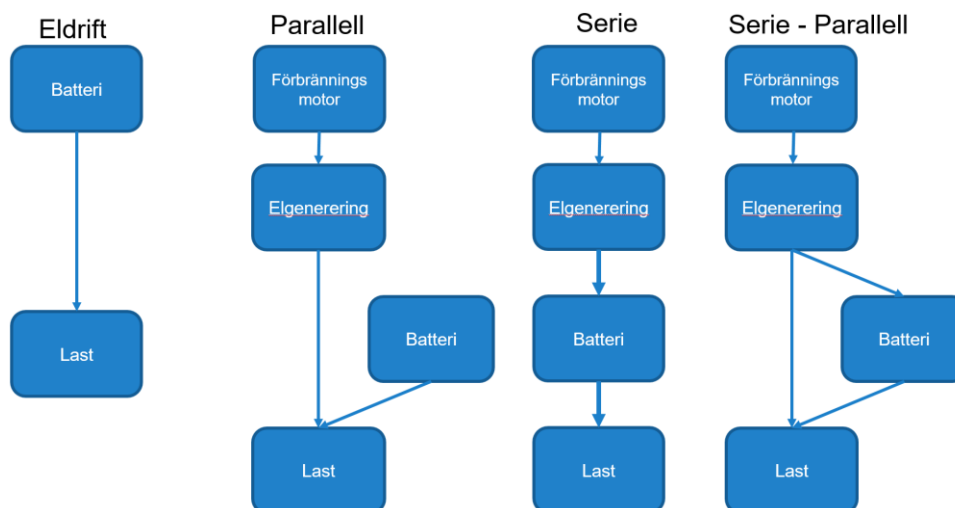
En frågeställning för Försvarsmaktens tillämpningar är utmaningen att växelriktare och likriktare kan generera elektromagnetiska störningar som kan orsaka problem hos känslig utrusning och ökad signatur. Problem kan även uppkomma vid till och frånkoppling till det centrala nätet.

## 2.3 Eldrift/Hybriddrift

Elektrifiering av fordon har framförallt drivits av krav på minskade utsläpp av koldioxid och andra växthusgaser från den civila fordonsflottan. Elektrifieringen medför generellt lägre energiförbrukning och kan därmed ge ekonomiska fördelar utöver klimatvinster. För militära tillämpningar och plattformar går det att, utöver klimatvinster och ekonomiska fördelar, se nya möjligheter med elektrifiering. De elektrifierade systemen ger både taktiska fördelar och underlättar införande av nya elförbrukande system. Till exempel kan en elektrisk framdrivning på ett fordon ge möjligheten att framföra fordonet med en lägre signatur än vid drift med en förbränningsmotor, det kan även ge möjligheten att integrera nya typer av verkansystem som laservapen eller HPM<sup>1</sup>-vapen, då ett elektrifierat fordons energisystem kan vara bättre anpassat för elektriska förbrukare.

Det finns olika typer av eldrift och hybriddrift. Figur 1 visar en sammanställning av fyra exempel på grundtyper av el- och hybriddrift:

- Ren eldrift, utan någon elgenerering, med ett energilager i form av batterier som levererar energi till lasten. Batterierna behöver laddas externt.
- Parallellhybrid, ett batteri och elgenerering med exempelvis en förbränningsmotor försedd med en generator som samverkar att leverera energi till lasten. Ofta kan ett mindre batteri nyttjas som laddas upp genom att pluggas in till en extern energikälla.
- Seriehybrid, all energi går via batteriet till lasten. Elgenereringen, exempelvis från en förbränningsmotor med generator laddar upp batteriet vid behov.
- Serie – Parallellhybrid, liksom en parallellhybrid kan energin till lasten komma från både batteriet och elgenereringen, vid detta alternativ kan även elgenereringen ladda upp batteriet vid behov.



Figur 1. Schematisk skiss över de olika drifttyperna.

<sup>1</sup> High Power Microwaves, elektromagnetiskt vapen som kan störa eller förstöra elektriska komponenter.

Det finns alltså flera olika varianter av hur hybriddrift är uppbyggd och vilka egenskaper systemen har.

Exempel på möjligheter som kan skapas vid elektrifiering av plattformar är minskad värme- och ljudsignatur vid drift när energin kan tas från ett energilager istället för från en förbränningsmotor. Andra fördelar är ökad framkomlighet för fordon där specifika elmotorer kan ge en betydligt bättre körbarhet. På fordon kan batterierna även laddas genom regenerativ bromsning vilket i sin tur ökar energieffektiviteten för systemet.

Utmaningar med elektrifierade fordon kan vara tillgång till laddningsinfrastruktur, logistiska utmaningar vid laddning (till följd av längre tidsåtgången och begränsningar i kapacitet) samt att säkerställa säker implementering av batterier och andra energilagringssystem, vilket kommer ställa nya typer av krav, exempelvis på verkstäder. Alternativet att behålla gamla lösningar, som fasas ut inom det civila samhället, innebär dock allt större utmaningar framöver. Riskanalyser och utredningar behöver göras kring hur tekniken påverkar på systemnivå och hur den kan implementeras på bästa sätt.

## 2.4 Bränsleceller

I bränsleceller genereras energi genom att ett bränsle omvandlas elektrokemiskt. De vanligaste typerna av bränslen är vätgas, ammoniak eller alkohol (exempelvis metanol), men det finns även tekniker som använder olika typer av kolväten eller syror. De består vanligtvis av tre huvudkomponenter, anoden och katoden där oxidationsreaktionen respektive reduktionsreaktionen sker, samt elektrolyten. Merparten av system kräver även ett separerande membran. Bränsleceller har generellt högre verkningsgrad än förbränningsmotorer, men systemet genererar fortfarande värme som behöver hanteras.

### 2.4.1 Väletablerade tekniker

Det finns flera olika typer av bränsleceller av vilka de mest etablerade är protonbyttarmembranbränsleceller (PEM) och alkaliska bränsleceller (AFC).

PEM bränsleceller är en väletablerad teknik inom både stationära reservkraftsystem och portabla system. System finns tillgängliga från flera olika leverantörer. Tekniken har snabb uppstart och verkar vid förhållandevis låga temperaturer. Utmaningar ligger i att flera av de ingående komponenterna, så som katalysatorerna och membranerna är dyra och tillgången kan vara begränsad. Systemet är även känsligt för föroreningar och studier som beskriver deras robusthet saknas.

Alkaliska bränsleceller är även det en väletablerad teknik inom ett flertal tillämpningar som reservkraft och transport. Likt PEM har alkaliska bränsleceller snabb uppstart och arbetar vid motsvarande temperaturer. Till teknikens fördel hör att ingående komponenter har lägre kostnader och högre tillgänglighet då dyra katalysatorer inte krävs i samma utsträckning. Svagheter ligger i att den är ännu känsligare för föroreningar, och att elektrolyten i systemet är alkalisk och kan innebära hälsorisker vid hantering.

### 2.4.2 Fastbränsleceller – en teknik på uppgång

Solid-Oxide Fuel Cell (SOFC) är en bränslecellsteknik som under de senaste åren börjat kommersialiseras. Samma teknik kan användas för den omvända processen elektrolys, men förkortas då SOEC. Tekniken SOFC skiljer sig från andra bränsleceller då den arbetar i intervallet 500 – 1000 °C och kan, förutom vätgas, försörjas med koldioxid och metangas (CH<sub>4</sub>) [21]. I förlängningen innebär detta att bränslecellen med relativt enkla reformeringsmetoder kan drivas av ett brett urval av kolväten, exempelvis diesel, bensin, metanol och etanol [22]. Tekniken har därför en intressant roll i en omvärld där en stor osäkerhet råder kring vilka typer av bränslen som kommer att ersätta de fossila alternativen.

Det förekommer även ”Reversible Solid Oxide Cells” (RSOC), som kombinerar bränslecell och elektrolysör i en enhet. Med denna teknik kan förutom ovan nämnda driftsfall även vätgas tillverkas från vatten. RSOC:en kan dessutom matas med koldioxid och vätgas och

generera syngas (vätgas och kolmonoxid) som kan användas till att framställa elektrobränslen [23].

## 2.5 Gasturbiner för elgenerering

Elgenerering med hjälp av gasturbiner är ett beprövat koncept då det används frekvent som reservkraft i Sverige. En fördel med gasturbiner är dessas robusthet för användandet av olika typer av bränslen [24]. En annan fördel är att effekt-viktförhållandet kan göras högt vilket maximeras i mobila/luftburna tillämpningar (jetmotorer). Även verkningsgraden är hög för gasturbiner och för vissa system kan siffran överstiga 60 %. Idag används främst fossila bränslen för att driva turbinerna, men det pågår arbete för att möjliggöra användning av alternativa bränslen, exempelvis vätgas. Siemens Industrial Turbomachinery i Finspång planerar att kunna använda 100 % vätgas i sina gasturbiner år 2030 [25]. Ett annat bränslealternativ som undersöks är ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), både vätgas och ammoniak kräver dock anpassning av brännkammaren (läs mer om väte och ammoniak som bränsle under avsnitt 3.2.1 & 3.2.2).

I de flesta fall är gasturbiner för elgenerering idag mycket stora, stationära och genererar energi på MW-skala. Relativt lite forskning och utveckling har genomförts på mindre och portabla system för elgenerering. Utvecklingen har främst drivits av entusiaster inom modellflyg och bedöms utgöra endast en bråkdel av de summor som historiskt satsats på utveckling av större gasturbiner, både stationära och inom flyg. En utmaning för små gasturbiner är att med en minskad storlek sjunker verkningsgraden. Det finns vissa fysikaliska begränsningar vid förbränningen som gör skalningen svår. Med nya kraftfulla beräkningsverktyg och tillverkningsprocesser kan möjligen nya typer av lösningar tas fram, till exempel kompressorblad, turbiner och olika flödeskanaler, vilka kan utmana de fysikaliska begränsningarna. [24]

Detta stycke utgör ett sammandrag av en längre beskrivning av mikro-gasturbiner från rapporten FOI-RH--2665--SE [26].

## 2.6 V2X (Vehicle to Everything)

Med ett elektrifierat fordon<sup>2</sup> skapas möjligheter att använda fordonets lagrade elektriska energi till andra tillämpningar. Jämfört med ett fordon med enbart förbränningsmotor, som genererar energi för framdrivning med stora värmeförluster, kan energin från ett elektrifierat fordon användas till mycket annat än bara framdrift. Tekniken V2X innebär att fordonens batteri inte bara nyttjas som energilager för fordonet utan också kan nyttjas av andra förbrukare av elektrisk energi. Det finns ett antal olika varianter av hur fordonets energi kan delas, där begreppet V2X innefattar V2G (Vehicle to Grid), V2H (Vehicle to Home), V2L (Vehicle to Load), V2V (Vehicle to Vehicle) med flera. [27]

Andra studier har utrett konceptet i syfte att underlätta logistiken då hybrida fordon, med förbränningsmotor och elgenerator, används för att strömförsörja en tillfällig militärbas. Grundprincipen är att vid uppförandet av tillfälliga militära baser kommer fordon ha en naturlig plats, de kommer att finnas vid basen och används vanligen inte hela tiden för transport. Under övrig tid kan fordonen stå och agera energikälla till basen. Koncept för V2X inom militära baser har bland annat studerats av Masrur & Skowronska m.fl. [28] och Lai & Zhang [29].

För det civila samhället anses V2H och V2G vara främst tillämpligt där fordonsägaren/hemägaren kan se fördelar som minskade elkostnader och redundans vid elavbrott [30]. För militära tillämpningar kan V2X anses vara mest tillämpligt då scenarier och strategier för hur den medhavda energin ska användas varierar mycket. En viktig aspekt är att det kräver

<sup>2</sup> Med elektrifierat fordon menas antingen hybridiserat fordon med batteri och någon form av energigenerering eller ett helelektriskt fordon med batteri.

att elektrifierade fordon finns tillgängliga, exempelvis ett elektrifierat stridsfordon. Stridsfordonet har en mindre dieselmotor med generator som genererar elektrisk energi samt ett batteri som energilagring och fordonet förbrukar energi för framdrift och andra system ombord. Stridsfordonet kan nyttjas för V2X vilket skulle kunna ge fördelar för till exempel ett soldatförband i fält som behöver ladda upp sina kroppsburna batterier. Stridsfordonet kan även nyttjas som reservkraft till en anläggning eller befästning då elnätet ligger nere. Förutom att kunna dela lagrad energi, kan den elektriska energin användas för nya verkanssystem som laser- eller HPM-vapen vilket resulterar i en V2L lösning.

Det är inte bara större stridsfordon som kan nyttja denna teknik utan den kan även tillämpas på mindre system som drönare. Drönaren kan till exempel flygas ut i fält för att dela sin uppladdade energi med ett förband. En utmaning med denna teknik, oavsett plattform eller system, är att det kommer behövas beslutsstöd som avgör hur och var den medhavda energin ska användas. Nya elektrifierade system behöver förberedas för att möjliggöra energiuttag, och på samma sätt behöver lasten ha möjlighet att ta emot energin på lämpligt sätt.

## 3 Energibärare för lagring och framdrift

### 3.1 Bio- och elektrobränslen

#### 3.1.1 Generellt om biobränslen, HVO och SAF

I vanlig diesel (MK1) som tankas på stationer i Sverige förekommer inblandning av två typer av biodrivmedel. Den ena typen betecknas FAME (Fatty Acid Methyl Esters), ibland nämns mer specifika varianter av FAME som exempelvis RME (Raps Methyl Esters). Dessa produkter är förknippade med vissa problem gällande lagringsbarhet beroende på att de är hygroskopiska<sup>3</sup> och innehåller syre, vilket gör att mikroorganismer kan växa till sig i tanken. Detta kan i sin tur orsaka igensättning av motorfilter [31]. Tillverkarna rekommenderar max 6 månaders lagring av ren RME [32] och max 12 månader av diesel med 7-procentig inblandning [33]. På grund av höga krav på lagringsbarhet måste Försvarmakten därför redan idag beställa en specialkvalitet, B0, även kallad blankdiesel, vilket är ren diesel utan inblandning [6].

Den andra biobaserade komponenten, HVO (Hydrotreated Vegetable Oils), har genomgått en avancerad förädlingsprocess där bland annat syret reducerats bort med hjälp av vätgas, vilket gjort produkten till ett fullvärdigt kolväte, mycket likt fossil diesel (dock utan aromater vilket kan ha viss påverkan på främst äldre motorer och gasturbiner). HVO har goda lagringsegenskaper, kan blandas fritt med fossil diesel och kräver ingen ytterligare tillsyn eller hantering vid lagring jämfört med ren fossil diesel [34]. I den allmänna diskussionen har det ibland skett en sammanblandning av begreppen då biodiesel har använts synonymt med FAME och skapat en negativ bild av biobaserade drivmedel trots att produkterna kemiskt sett är relativt olika [6]. Biodrivmedel, som liksom HVO genomgått en syntetiseringsprocess, klassas som syntetiska drivmedel. Alla syntetiska drivmedel är dock inte biobaserade.

Även biobaserade flygbränslen, SAF (Sustainable Aviation Fuel) är syntetiserade bränslen som kan användas i jet-motorer utan anpassning av motorn (dock är inte alla varianter tillåtna för hundra procentig inblandning och ett godkännande för civilt flyg innebär inte nödvändigtvis att de är godkända militärt). Termen drop-in-bränslen används för alla typer av alternativa flytande bränslen som kan användas med hög inblandning i bensin-, diesel- eller jetmotorer utan anpassning av motorerna.

Olika uppskattningar har gjorts av merkostnaden för att tillverka biobaserade jetbränslen och klart är att det finns en stor osäkerhet bland annat beroende på råvarupris på insatsvarorna, processeffektiviteten, tillgång och efterfrågan (även på råvarusidan). Ett forskningsprojekt vid Lunds Universitet uppskattade produktionskostnaden för SAF via ett flertal processer till omkring 10 – 20 kr/liter (några produktionskedjor låg dock över) vilket kan jämföras med marknadspriset på flygfotogen som då, 2021, antogs till 6 kr/liter [35]. I den statliga utredningen Biojet för flyget, från 2019, uppskattades priset på HEFA (Hydrotreated Esters and Fatty Acids) vara omkring 18 kr/liter, med potential att sjunka neremot 12 kr/liter på sikt [36]. Osäkerheten är alltså stor men en ökning av bränslekostnaden med 100 – 200%, på den andel av bränslet som ersätts, kan vara ett rimligt antagande utifrån nämnda källor.

#### 3.1.2 Olika processvägar för biobaserade flygbränslen

Flygbränsle kan tillverkas från bioråvara genom ett flertal olika processer. ASTM International är det ledande standardiseringsorgan som prövar bränslen för godkännande inom det civila flyget. I nuläget finns åtta godkända tillverkningsprocesser för biobaserade flygbränslen, men de flesta av dem är ännu inte kommersiellt tillgängliga. Det idag absolut vanligaste biobaserade flygbränslet kallas HEFA och utgår från fetter och oljor som

<sup>3</sup> Material som kan ta upp och avge vatten.

vätebehandlats och destillerats (i likhet med HVO). De långa raka kolväten som bildas bryts ner och isomerar till mer förgrenade varianter så att man når en önskad produkt (vätebehandling och destillering). Detta är slutsteget i alla processvägar men kan vara olika omfattande för olika processer. Maximal tillåten inblandning är 50 %.

Nyligen godkändes en process som kallas ATJ-SKA (Alcohol to Jet – synthesized kerosen with aromatics) för civilt flygbränsle enligt standarden ASTM D7566 [37]. Processen utgår från alkohol vilket kan produceras från många olika bioråvaror (enklast från sockerarter men även från cellulosa via olika processteg). Godkännandet ställer inga krav på ursprungsråvaran utan endast på processen. Ett sådant bränsle från Swedish Biofuels har också testats i JAS Gripen-motorn med goda resultat [6] samt i labbmiljö av FOI [38]. Maximal tillåten inblandning enligt standarden är 50 %.

En ytterligare processväg är den så kallade Fischer-Tropsch-processen, där råvaran är syntesgas (vätgas och kolmonoxid) som processas till långa kolvätekedjor som sedan bryts ner och isomerar. I princip alla typer av energirika kolväten kan omvandlas till syntesgas. Råvaran kan alltså vara fasta biobränslen, men det går även att använda naturgas.

### 3.1.3 Tillgången på biomassa

Tillgången på tillgänglig biomassa lyfts ofta fram som hinder för att biobaserade drivmedel ska kunna spela en betydande roll för omställningen [4, 6]. För vissa råvaror finns målkonflikter exempelvis gentemot livsmedelsproduktion och biologisk mångfald. Inom EU har det därför vuxit fram ett omfattande regelverk för vad som får klassas som förnybar råvara. En viktig del av regelverket utgörs av det så kallade REDII-direktivet (Renewable Energy Directive) [39]. Kriterier för hållbara bränslen finns också utanför EU, exempelvis via den amerikanska standarden RFS2 (Renewable Fuel Standard) [40]. Alla standarder tar dock inte samma hänsyn till ändrad markanvändning som de europeiska [41].

Hur mycket biomassa som finns tillgänglig är omtvistat och beror på vilka råvaror man tekniskt klarar av att nyttja samt vilka som får anses hållbara. I HVO och flygbränsle enligt HEFA-processen är råvaran fetter och oljor, exempelvis från tallolja, slakteriavfall, använd frityrolja eller palmolja. Även alger har börjat användas som råvara kommersiellt, vilket öppnar för nya möjligheter och potentiell skalbarhet [42]. Tillgången på oljor och fetter är dock begränsad, särskilt då hållbarhetskraven beaktas.

Som nämnts angående ATJ-processen, kan förnybart flygbränsle numera också baseras på alkoholer [35, 43]. Även etanol har begränsningar avseende tillgångar som uppfyller EUs hållbarhetskriterier, men ett tekniksprång som avsevärt kan öka råvarubasen tycks nu vara på gång. Nuvarande tillverkning av första generationens etanol är baserad på sockerarter, men forskning har länge bedrivits på andra generationens etanol från lignocellulosabaserade råvaror. Det skulle möjliggöra bruk av inte bara majs och socker, utan också bladen och bladen från grödorna. Även svenska skogsprodukter kan användas i en sådan process. Utmaningen har varit att få tekniken robust, storskalig och lönsam, men stora investeringar har gjorts de senaste åren och det finns demonstrationsanläggningar i drift i Indien och Brasilien. Det brasilianska företaget Raizen väntas komma igång med storskalig kommersiell produktion under 2024 [44]. I Sverige tillverkar SEKAB andra generationens etanol från skogsråvara, dock i liten skala [45]. Produktionen från skogsråvara, exempelvis avverkningsrester har stor potential att tillgodose de Svenska behoven av flygbränsle och även inom reservkraftsområdet finns behov av bränsle för gasturbiner. FOI engagerar sig därför i konsortiet CESTAP, vars målsättning är att ta fram förnybart bränsle för hundra procentig användning inom flyg och kraftgenerering, genom att samla svenska aktörer inom området [46].

En kraftig ökning av tillgången på avancerade biodrivmedel väntas alltså globalt. Ändå visar en studie över europeiska biobränsletillgångar att dessa är långt ifrån att täcka behovet för civilt flyg och sjöfart om hela dagens volym inom Europa ska ersättas. [47]

Produktionen av HVO har ökat i Sverige och Finland det senaste decenniet till följd av den ökade reduktionsplikten. Det är svårt att bedöma vilken påverkan som den nu beslutade



minskningen av den svenska reduktionsplikten kommer att få på tillgången av HVO framgent. Konkurrensen om råvaran har lättats genom det minskade kravet på inblandning samtidigt som framtida Svenska investeringar kan tänkas utebli om efterfrågan minskar [48]. Efterfrågan ska dock ses ur ett bredare perspektiv än det svenska och det är fastlagt genom EU:s förnybarhetsdirektiv, REDII, att dagens miniminivå (i hela EU) om 6 % reduktion av koldioxidutsläpp från drivmedel för landtransporter, ska trappas upp till 14 % år 2030 [39, 49].

### 3.1.4 Elektrobränslen

Elektrobränslen, eller e-bränslen, är olika benämningar på flytande syntetiska bränslen som reformerats från vätgas samt koldioxid (eller kväve i fallet ammoniak). Exempel på elektrobränslen är e-metanol och andra alkoholer, men också bränslen som ytterligare processats till färdiga drop-in-bränslen med liknande kemisk sammansättning som fossil diesel, exempelvis genom Fischer-Tropsch-processen.

Om vätgasen produceras genom elektrolys med hjälp av förnybar el (eller el från kärnkraftverk), och om den koldioxid som används har fångats in från en förnybar källa (exempelvis ett biokraftverk), kan e-bränslet anses som koldioxidneutralt eller i vart fall ha låg klimatpåverkan. Varje steg i omvandlingsprocessen från el till en annan form av drivmedel kostar dock energi och pengar. Det krävs stora mängder förnybar el för att skapa elektrobränslen och priset på elen är av stor betydelse för priset på slutprodukten. De uppskattningar som gjorts talar för att priset kommer att vara högre än för biobaserade drop-in-bränslen, eller i den övre skalan för dessa. Exempelvis prognostiseras produktionskostnaden för e-bränsle (SAF) år 2030 till mellan 160 – 210 Euro/MWh enligt 2015 års penningvärde [50], vilket motsvarar ca 21-28 kr/liter med 2024-års penningvärde och växelkurs. Att produktionen sker i samverkan med andra verksamheter för att ge synergieffekter anses viktigt för att kunna nå effektivitet och priser i nivå med ovanstående uppskattningar [51].

Det är nästan alltid energieffektivare att elektrifiera transporter där så är möjligt, ändå finns förhoppningar om att e-bränslen ska få en betydande roll för att ersätta drivmedel inom flyget eftersom det globalt sett handlar om så stora volymer att hållbara biobränslen inte väntas räcka. Tekniken som industriell process har en låg mognadsgrad även om de olika processtegen är kända. Demonstrationer sker ännu i forskningsskala och svårigheterna ligger i att skapa en effektiv värdekedja där processerna för elektrolys, koldioxidinfångning och förädling genom Fischer-Tropsch ingår [52].

Detta avsnitt har inriktats mot bränslen som kan ersätta diesel och flygbränslen men det finns också e-bränslen som kan användas i bensinmotorer (vissa anpassningar kan dock krävas). Ett sådant bränsle är biobutanol som möjliggör enklare produktionsprocesser jämfört med de diesellika bränslena och som har ett högre energiinnehåll än etanol samt egenskaper som passar en bensinmotor. Forskning har visat på stor potential inom området. [53]

### 3.1.5 Bio-elektrobränslen

I produktionen av biobränslen finns möjligheter att öka den så kallade kol-effektiviteten genom att elektrifiera processerna. Ur ett samhällsperspektiv är det viktigt att nyttja bioråvara så effektivt som möjligt och studier har visat att det finns stora möjligheter att öka utbytet genom att nyttja el som processenergi (i stället för delar av bioråvaran) samt genom att nyttja vätgas från elektrolys i förädlingen. Produkter från en sådan kombinerad process kan benämnas bio-elektrobränslen. Dagens drivmedel är valda för att vara lätta att framställa ur fossil olja, varför de är svåra att framställa ur bioråvara, vilket är en av anledningarna till att kol-utbytet idag ofta är lågt (25 - 50 %). [54, 55]

## 3.2 Vätgas och andra kolfria bränslen

Kolfria bränslen är bränslen som inte innehåller grundämnet kol och genererar följaktligen inga koldioxidutsläpp eller sot när de förbränns. Det innebär dock inte nödvändigtvis att bränslena har tagits fram utan att generera koldioxidutsläpp. Idag tillverkas huvuddelen av både vätgas och ammoniak som används inom industrin genom reformering från naturgas (mestadels CH<sub>4</sub>), men möjligheten till kolfri framställning genom elektrolys finns vilket gör dem intressanta för ett framtida fossilfritt energisystem (metoderna förklaras vidare i avsnitt 3.2.1). Det vanligast omnämnda kolfria bränslet är vätgas. Andra möjliga bränslen är ammoniak, kisel, järn och aluminium.

### 3.2.1 Vätgas

Vätgas har identifierats som högaktuellt både som drivmedel och för energilagring. Styrkorna ligger i flexibilitet och tillgänglighet där gasen kan utvinnas på flera sätt och från ett stort antal källor. Energiinnehållet per kilo är högt och vid användning i en bränslecellsmotor består utsläppen till största del av vatten. Vätgas kan användas både i förbränningsmotorer och för elgenerering i bränsleceller. Vid förbränning bildas dock kväveoxider (NO<sub>x</sub>), i likhet med förbränning av fossil diesel.

De egenskaper som särskiljer vätgas vid förbränning från majoriteten av andra kommersiella bränslen är en mycket snabbare antändning, mycket snabbare förbränningshastighet och ett mycket bredare spann för bränsle-luftblandning där förbränning kan ske. Trots att vätgas har ett högt energiinnehåll per kilo är lagringen mycket utrymmeskrävande vilket gör att energiinnehållet per volym blir lågt. I komprimerade kärl kan volymdensiteten dock vara högre än för batterier, vilket gör att tekniken kan vara intressant för tunga fossilfria fordon.

Om rätt råvaruströmmar nyttjas medför vätgasen en signifikant minskad miljöpåverkan jämfört med fossila energikällor. Utsläpp av kväveoxider vid förbränning är dock ett problem, i likhet med fossila bränslen. Om vätgasen tillverkas lokalt nära förbrukaren minimeras behovet av transporter och även beroendet av externa parter. På grund av sin låga volymdensitet är långa transporter annars en akilleshäla för vätgas och för trycksatt lagring i tankar krävs mycket energi för att komprimera gasen. Ytterligare problematik är att gasen mycket lätt läcker samt den låga densiteten i flytande form, jämfört med till exempel diesel. Trycksatta behållare gör systemet tungt, trots att vätgas i sig har låg densitet, vilket gör det nära på omöjligt för applikationer inom flyg. Vidare kan vätgas orsaka försprödning i stål och andra metaller vilket leder till snabb nerbrytning av material och gör att materialval till systemen är en utmaning i sig. En annan utmaning är säkerhetsaspekten då gasen är flyktig och explosiv i kombination med syre. Detta faktum blir än värre med vätgasens förmåga att brinna vid större spann av olika blandningsförhållanden än de flesta andra bränslen, samt att vätgas i luft/syra brinner med osynlig flamma på grund av bristen på kol (där exciterat kol ger upphov till mycket av det ljus vi ser i en flamma). Att tillverka vätgas nära förbrukning i både tid och rum är alltså fördelaktigt.

Vätgas kan utvinnas på flera sätt där elektrolys och reformering är identifierade som mest intressanta för mikronät i ö-driftstillämpningar. Vid elektrolys används elektrisk energi till att spjälka vatten till vätgas och syre i en elektrolysör. Syret som bildas kan utnyttjas i anläggningen vid behov. Systemet avger spillvärme som det finns möjligheter att ta tillvara på. Vid reformering omvandlas olika bränslen så som metan, biogas eller ammoniak till vätgas. Reformering kan även utföras i andra riktningen där vätgas omvandlas till bränslen vilket i sin tur kan främja ett minskat beroende av externa bränsleleverantörer.

I en tidigare FOI-rapport, FOI-R--5444--SE [22], redovisas en utförlig beskrivning av möjligheter för vätgasdrivna reservkraftsystem. I ett pågående FOI-projekt ska en demonstrationsanläggning för en självförsörjande befästning med vätgas som energibärare byggas. Projektet ämnar utreda frågor inom verifiering och anpassning av mikronät, Elkvalitet vid olika lastfall, energilagringssäkerhet (vätgas), robusthet och tillförlitlighet av

utrustning samt signaturer (ljud, temperatur, elektromagnetisk strålning etc.). Systemet kommer använda bränsleceller till el-produktion.

Inom FOI pågår det också studier om förbränningssystem med vätgas. Där undersöks hur befintliga system kan anpassas till de egenskaper som vätgas har vid förbränning. Den snabba förbränningen ställer krav på designen av brännkammare och insprutningsmunstycken där dessa måste kylas eftersom flammans är belägen betydligt närmare än i motsvarande konventionella system. Dessutom övergår vätgas-luftblandningar enkelt från att brinna med deflagration<sup>4</sup> till att förbrännas genom detonation, så kallad detonativ<sup>5</sup> förbränning. Denna typ av förbränning vill man i största möjliga mån undvika i befintliga förbränningssystem. Däremot finns det förbränningssystem och framdrivningssystem som nyttjar just detonativ förbränning, exempelvis PDE (Pulse Detonating Engine), pulsdetonationsmotorn [56, 57] och RDE (Rotating Detonation Engine) [58, 59]. Här är en detonativ förbränning en förutsättning och vätgas ett potentiellt lämpligt bränsle.

Förutom de tekniska frågorna är en generell utmaning för vätgasen de regelverk och riktlinjer som finns kring den. För närvarande pågår flera initiativ och forskningsprojekt i Sverige inom vätgasområdet och nya initieras kontinuerligt. Vätgas Sverige är en nationell organisation som syftar till att samordna initiativ och sprida kunskap kring vätgas och dess värdekedja.

### 3.2.2 Ammoniak och vätgas

Ett annat bränsle som inte innehåller kol är ammoniak, NH<sub>3</sub>. Ammoniak har diametralt omvända förbränningsegenskaper kontra vätgas. Det brinner långsamt, antänder långsamt och är känsligt för blandningsförhållande med oxidator (luft). Det skiljer flera storleksordningar i antändningstid mellan trycksatt ammoniak och vätgas, vilket kommer att påverka bränslenas inverkan på olika motorer markant.

Ammoniak har undersökts som bränsle[60, 61] men, bland annat på grund av dess relativt låga energiinnehåll per kilo och toxicitet, har det inte blivit vida använt. Förbränningssystem måste anpassas till den långsamma förbränningen vilket gör att brännkammare blir längre än motsvarande konventionella. Ammoniak ses i dagsläget mest som en vätebärare [62] eftersom det finns stora vinster att lagra vätet som ammoniak, framför allt volymmässigt, men även långtidslagring och den lägre risken för läckage är attraktiva egenskaper hos ammoniak.

Att extrahera (reformera) vätet från ammoniaken är dock en energikrävande process och verkningsgraden går snabbt ner om inte koncentrationen ammoniak är hög.

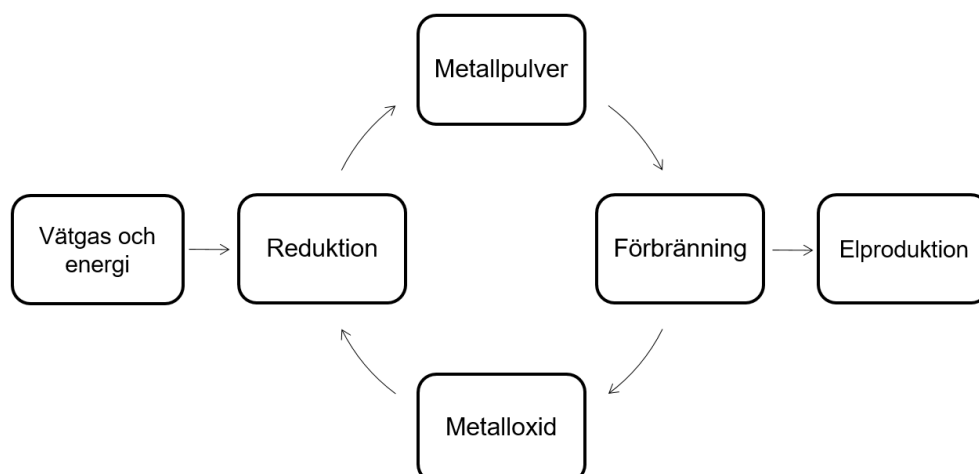
Ett möjligt sätt att använda ammoniak i befintliga motorer är genom blandning med vätgas. Då ges en möjlighet att skraddarsy förbränningsegenskaperna där olika blandningsförhållanden mellan dessa snabba och långsamma bränslen kan ge en bränslemix med önskad antändningstid. Man skulle endast behöva reformera en låg andel av ammoniaken och på så sätt behålla en högre verkningsgrad samt nyttja restvärme från förbränningen för att förse reformeringssteget med energi. Det specifika energiinnehållet skulle på så sätt kunna höjas avsevärt. Detta är dock teknik i ett tidigt utvecklingsstadium.[63-65]

### 3.2.3 Metallförbränning

Metallförbränning är ett koncept som bygger på att använda metall som ett uppladdningsbart bränsle. Stora mängder energi frigörs vid förbränning av metall (se Figur 3 för jämförelse av energidensiteter), energin som bildas är främst i form av värme och kan tas tillvara genom befintliga elproduktionsmetoder som Rankinecykel eller Stirlingmotor. De metaller som främst är lämpade för denna tillämpning är aluminium och järn. [66] Kretsloppet för hur bränslet kan nyttjas för elgenerering ses i Figur 2.

<sup>4</sup> Deflagration – flamfronten rör sig i underljudsart

<sup>5</sup> Detonativ förbränning – flamfronten rör sig i överljudsart



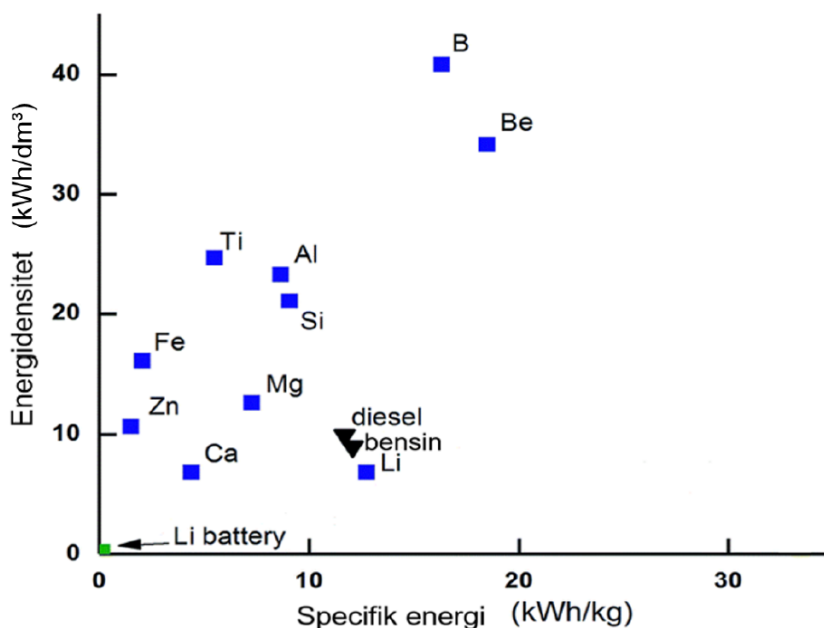
Figur 2 Schematisk skiss över kretsloppet för metallförbränning. [8]

Metallen behöver lagras i en relativ syrefattig och torr miljö för att minska risken för oxidation. Metallen förbränns sedan tillsammans med syre varvid stora mängder värme frigörs, som sedan kan omhändertas med hjälp av olika tekniker för att producera el. De olika teknikerna kan, som nämnts ovan, till exempel vara en Stirlingmotor eller Rankinecykel.

Restprodukten vid förbränningen blir en metalloxid, för aluminium bildas alltså aluminiumoxid och för järn järnoxid. Metalloxiden kan sedan genomgå ett reduktionssteg där man nyttjar vätgas, grön el eller kärnkraftsel, för att reducera tillbaka metallen till sin rena form. På så sätt kan man få ett helt grönt energilagrar.

Fördelar med metallförbränning är att metall har väldigt högt energiinnehåll per volym jämfört med andra befintliga bränslen, se Figur 3. Däremot kan metaller ha ett något lägre energiinnehåll per vikt jämfört med fossila bränslen vilket gör att tekniken lämpar sig bäst för tillämpningar där volymen är begränsad snarare än vikten för systemet.

Forskningen sker på låg TRL-nivå, 1-3, och i dagsläget saknas det nödvändig kunskap och förståelse gällande förbränningsprocessen. Det pågår forskning vid bland annat Max Planck institutet och Eindhoven University of Technology och ett projekt kring aluminiumförbränning planeras på FOI. Metalliska bränslen har ett högre specifikt energiinnehåll per volym än kolvätebränslen och vätgas (Figur 3), men kräver hög antändningstemperatur. Utmaningar med metallförbränning är att få till en stadig förbränning och att veta hur systemet ska konstrueras på bästa sätt. Förbränning av rena metaller är ett område som är komplext och behöver utredas mer. Forskning behöver tillämpas på små system för att förstå förbränningskinetiken, för att sedan kunna tillämpas på större system.



Figur 3. Energidensitet och specifik energi för olika metallbränslen kolvätebränslen, vätgas, och batterier (42).

### 3.3 Batterier

Kommersiella aktörer erbjuder i dagsläget ett brett urval av olika batterityper. Några av dessa är litium-jon, litium-metall, alkaliska, bly-syra och nickel-metallhydrid. Vid bedömningen av vilken tillämpning ett batteri passar kan nedanstående parametrar användas:

**Effekt:** Hur stort effektuttag batteritekniken tillåter per vikt- och volymenhet.

**Energi:** Hur högt energiinnehåll batteritekniken medför per vikt- och volymenhet.

**Snabbladdning:** Hur snabbt batteriet kan laddas.

**Tillgänglighet:** Batteriråvarornas tillgänglighet inom Europa.

**Temperaturområde:** Temperaturspannet som batteriet kan användas i.

**Säkerhet:** Hur motståndskraftig tekniken bedöms vara mot exempelvis termisk rusning<sup>6</sup>.

**Livslängd:** Hur många upp- och urladdningscykler batteriet tillgodoser, där en cykel är upp- och urladdning 0 - 100 %.

Litium-jonbatterier har med sitt höga energiinnehåll, jämfört andra batterikemier, möjliggjort för mobil strömförsörjning av många tillämpningar som tidigare inte var möjliga. Litium-jonbatterier är en grupp av olika uppladdningsbara litumbaserade kemier, där de två vanligaste är Litium-nickelmangankoboltoxid (NMC) och Litium-järnfosfat (LFP). Styrkan med NMC är främst att det erbjuder högt energiinnehåll (250 - 280 Wh/kg) och med LFP (100 - 160 Wh/kg) att det är billigare att tillverka och håller en högre säkerhetsnivå än NMC [67].

Många av Försvarmaktens batteribehov kan i nuläget tillgodoses med kommersiellt tillgängliga litium-jonbatterier. Vissa tillämpningar ställer dock andra krav på batterier som dessa har svårigheter att uppfylla, exempelvis gällande energiinnehåll, säkerhet, möjligheten att ladda snabbt och prestanda i kallt klimat. En av de stora utmaningarna relaterad till litium-jonbatterier är att tillgängligheten till flera av de ingående materialen är begränsade. Brytning och förädling sker i ett fåtal länder, vilket i sin tur driver upp priser och skapar

<sup>6</sup> Hastig temperaturökning som kan utmynna i ett kraftigt brandförlopp.

opålitliga råvarukedjor. Alternativa kemier som är baserade på mer lätt tillgängliga material är under utveckling. Nedan behandlas därför några nya tekniker, med och utan litium, som på relativt kort sikt (<5 år) förväntas kommersialiseras i större utsträckning.

### 3.3.1 Litium-jonbatterier

De kommersiella drivkrafterna inom litium-jonbatteriteknik återfinns främst inom fordonssektorn, och har i huvudsak fokus på utveckling mot högre energiinnehåll och snabbare laddning för att kunna tillgodose användarnas behov.

På forskningsfronten inom litium-jonbatterier ligger att ersätta den konventionella grafitanoden mot andra material i batteriet för att ändra dess prestanda. Detta har gett upphov till två nya tekniker som närmar sig kommersialisering i större skala: litium-metallanod- och litium-titanatoxidbatterier.

#### 3.3.1.1 Litium-metallanodbatterier

Utvecklingen av litium-metallanodbatterier har främst drivits av behovet av ökad energitäthet, vilket bland annat är intressant för tillämpningar som eldrivet flyg. Genom att byta ut grafiten mot en litiumbaserad anod kan energiinnehållet ökas markant i batteriet. Inom en kort tidshorisont bedömer FOI att tekniken kan nå energiinnehåll om ca 400 Wh/kg.

Utmaningar med tekniken är i dagsläget att uppnå samma cyklingsbarhet i batterierna som för konventionell litium-jonteknologi. Batterierna tenderar dessutom att ha lägre säkerhetsnivå, då de expanderar något mer vid användning och går i termisk rusning lättare än dagens teknik [67].

#### 3.3.1.2 Litium-titanatoxidbatterier (LTO)

LTO-batterier använder precis som Litium-metallanodbatterier ett konventionellt katodmaterial, vanligen NMC. Grafitanoden är dock utbytt mot en litium-titanoxidanod, vilket är en struktur som inhiberar litiumjonerna mycket väl jämfört med exempelvis grafit. Resultatet är ett litium-jonbatteri med mycket låg intern resistans, vilket ger exceptionell livslängd (10 – 20 000 cykler) och bättre prestanda vid höga och låga temperaturer, samt möjlighet att ladda batteriet mycket snabbt. Tester gjorda av FOI visar dessutom på en högre säkerhetsnivå för dessa batterier jämfört med konventionella NMC-batterier [67].

Anodbytet innebär dock att batteriet får en lägre energitäthet, där de bästa batterierna har ett energiinnehåll om cirka 110 Wh/kg [68]. För icke-utrymmeskritiska tillämpningar, eller användningsområden som ställer krav på mycket snabb laddning och hög effekttäthet, samt många laddningscykler är dock tekniken mycket intressant. Tekniken har i skrivande stund börjat kommersialiseras, där en populär tillämpning är elfärjor [69].

### 3.3.2 Fastfasbatterier (Solid State)

Den enklaste beskrivningen av fastfasbatterier är att elektrolyten, i vätskeform, som transporterar joner mellan de båda elektroderna, ersätts med ett fast material så som en gel eller en komposit. Avsaknaden av vätska gör att ingen separator krävs och avstånden mellan elektroderna kan minskas, vilket ger mindre celler och därmed högre energitäthet än jämförbara litium-jonbatterier. Fastfasbatterier är som regel även säkrare då elektrolyten är det som ger bränsle till batteribränder och orsakar bildandet av giftiga förbränningsgaser. En avgörande utmaning för fastfasbatterier är att identifiera fasta elektrolyter med motsvarande ledningsförmåga som flytande elektrolyter vid rumstemperatur. De har även betydligt kortare cykellivslängd i jämförelse med motsvarande batterier med elektrolyt. Förutom utmaningar kring tekniken som sådan är tillverkningsprocesser för fastfasbatterier mer komplexa. Råvarutillgångarna och värdekedjorna kring dem är också oetablerade [70-72]. Tillverkningen är fortfarande begränsad till labbskala och pilotprojekt. Northvolt har inlett samarbete med företaget Cuberg för tillverkning av fastfasbatterier [73].

Tekniken är väl värd att bevaka utifrån möjligheterna till signifikant ökad energitäthet och säkerhet, då den fortsätter utvecklas. Enligt batteritillverkaren SAFT, kommer de troligen finnas tillgängliga för nischade tillämpningar så snart som inom 3-4 år [74].

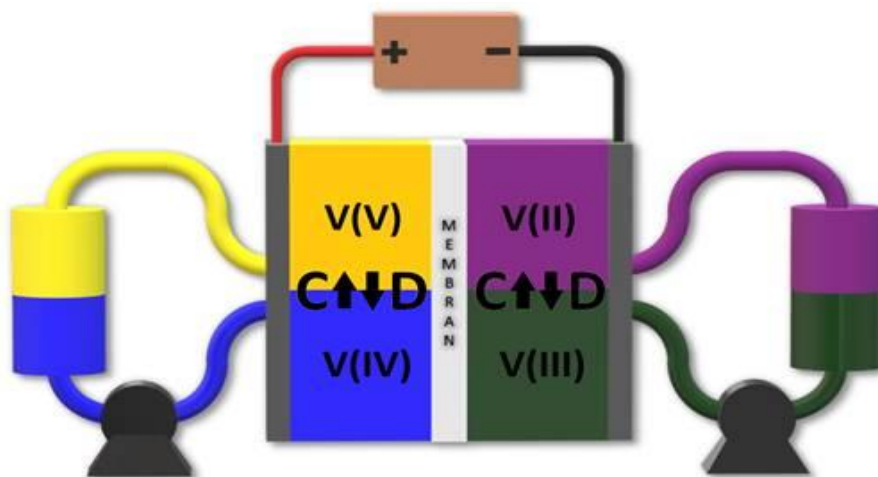
### 3.3.3 Natriumbatterier

Den stora fördelen med natrium-jonbatterier är den i stort sätt obegränsade tillgången på natrium. Ytterligare fördelar är att natrium-jonbatterier är mindre känslig vid överladdning och därmed säkrare. I natrium-jonbatterier agerar natriumjoner energibärare i systemet på motsvarande sätt som litium. Utvecklingen av natrium-jonbatterier startade redan på 70-talet men avstannade då forskningen fokuserade på litium-jonbatterier

I nuläget har industriell tillverkning av batterier åter börjat komma igång men kemin står fortfarande inför avgörande utmaningar för att kunna konkurrera fullt ut med litium. Natrium-jonbatterier har i dag lägre energiinnehåll och kortare cykellivslängd. Forskningen kring nya elektrodmaterial för att förbättra prestandan pågår kontinuerligt. Det svenska företaget Altris har tillsammans med Northvolt påbörjat prototypproduktion för energilagrar. [70, 72, 75, 76]

### 3.3.4 Flödesbatterier

Flödesbatterier är en typ av batteri som började utvecklas av NASA för mer än 40 år sedan. Tekniken har dock på senare tid återigen blivit aktuell, då den är lovande för att tillgodose storskaliga energilagringsbehov. Ett flödesbatteri, se skiss i Figur 24, bygger på att de energibärare som vanligtvis är lagrade i fasta metaller löses upp i vätska som utgör en energibärande elektrolyt, vilken pumpas till elektroderna i en cell-stack. Detta ger flödesbatteriet några intressanta egenskaper där energiinnehållet beror på tankarnas storlek och effektinnehållet ges av cellstackens storlek. Flödesbatteriet kan dessutom vid urladdning tankas likt en bränslecell eller bil med laddad elektrolyt för att användas igen.



Figur 4. Konceptuell skiss över ett flödesbatteri, med vanadinets oxidationstal vid laddning (C) respektive urladdning (D).

En av de mest kommersiellt mogna teknikerna i skrivande stund är vanadinflödesbatteriet. Det bygger på att metallen vanadin löses upp i vatten innehållandes lågkoncentrerad svavelsyra. Elektrolyten kan sedan användas både vid batteriets plus- och minuspol vilket ger ett robust system som inte är känsligt för kortslutning eller läckage.

Trots teknikens förhållandevis låga energiinnehåll (20-50 Wh/kg), är den mycket intressant för storskaliga tillämpningar, då elektrolyten har en teoretiskt oändlig livslängd och inte kräver några brandskyddsåtgärder då den är vattenbaserad. Därför innebär ett storskaligt system inte nödvändigtvis ett avsevärt lägre volymetriskt energiinnehåll än ett litium-

jonbatteribaserat system, där mer avancerade säkerhetsåtgärder resulterar i lägre energitäthet [77]. Det största flödesbatterisystemet som byggts i dagsläget återfinns i Kina och har en kapacitet om 100 MW och 400 MWh [78].

För Försvarsmaktens behov innebär, förutom robustheten, även batteriets råvaruanvändning en fördel. FOI bedömer att råmaterialen som krävs för ett vanadinflödesbatteri enkelt kan utvinnas inom Europa och möjligen även inom Sveriges gränser. Systemet är dessutom lätthanterat och kräver ingen specialistkompetens av användaren.



## 4 Diskussion - Teknikernas roll i det militära försvaret

I detta kapitel diskuteras hur beskrivna energitekniker och energibärare kan användas tillsammans för att effektivisera energianvändningen och lösa utmaningar inom olika delar av Försvarmaktens verksamhet. Här ges utrymme åt visionära tankar om hur bränsleflexibilitet via vätgasomvandling skulle kunna användas, men också åt biobränslets viktiga roll för att nå klimatneutralitet inom flyget och marinen.

Under arbetets gång har det blivit tydligt att det finns en stor bredd av områden som är viktiga för Försvarmakten att bevaka och driva utveckling inom. Eftersom Försvarmaktens verksamhet är mångfacetterad är det givet att många olika lösningar kommer att krävas för att klara energiomställningen, därför spretar också behovet av fortsatt forskning, utveckling och omvärldsbevakning. De viktigaste områdena som framkommit under studien beskrivs i avsnitt 4.4.

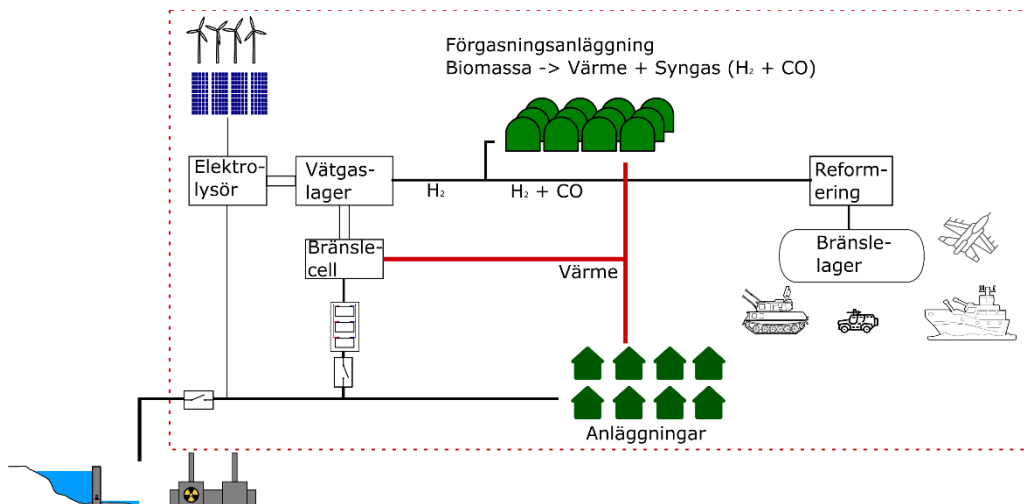
### 4.1 Gemensamma lösningar för elektrifiering

En elektrifiering inom Försvarmakten är en av flera pågående energiomställningar och drivs dels av de nya tekniska möjligheter som el- och hybriddrift ger och dels av samhällets elektrifiering. Att elektrifiera de personbilar och lastbilar som används för korta transporter inom den dagliga utbildningsverksamheten kan ses som ett första steg och utgör sannolikt inget hinder för verksamheten utan ger snarast en ökad bekvämlighet och förbättrad arbetsmiljö. För att genomföra elektrifieringen krävs dock att energiförsörjning av anläggningar och fordon kopplas samman på ett sätt som inte sker idag inom Försvarmakten. Infrastrukturen kring anläggningarna måste kunna hantera laddning med hög effekt, samtidigt måste robustheten i elförsörjningen garanteras genom effektiva reservkraftslösningar som också de på sikt ska ställas om till fossilfrihet. Även logistikorganisationen med verkstäder, liksom utbildningar och rutiner, måste anpassas för att kunna hantera elfordon i verksamheten.

Genom att kombinera olika energibärare och energitekniker går det att kombinera ett robust och effektivt system som kan förse, exempelvis ett regemente, med energi både i normalläget och i händelse av störningar på stamnätet. Tillgång till lokala energikällor, exempelvis en solcellspark eller ett vindkraftverk kan vara en tillgång som tillsammans med energilagring skapar möjlighet till redundans vid långvariga störningar. Figur 5 visar schematiskt ett sådant system. Vid tillgång till det centrala nätet drivs anläggningar direkt och batteri och lager kan hållas påfyllda. Vätgasen kan både lagras som gas eller reformeras till alternativa bränslen. Bryts tillgången kan vätgasen användas till att driva bränslecellen som i sin tur förser mikronätet med el. Idealt kan spillvärme, syrgasen och vattnet som bildas i de respektive processerna tillvaratas. Detta kan ske i form av ett vätgaslager som fylls upp så länge energitillgången är stabil och förbrukas kontinuerligt för att undvika problemen med långvarig lagring. Vätgasen, eller de alternativa bränslena som har sin grund i vätgasen, kan sedan användas för reservkraft exempelvis via förbränning i gasturbiner eller bränsleceller. Lager kan också hållas i form av batterier som utjämnar tillgång och efterfrågan i ett lokalt nät.

Batterier kan, utifrån deras möjlighet att strömförsörja med hög verkningsgrad i ett brett effektspann, tillföra prestandavinst i såväl nuvarande som framtida reservkraftssystem. Genom experiment och simuleringar har exempel på en sådan prestandavinst påvisats i rapporten Hybriddrivna reservkraftssystem [79]. Ett dieselmotorkraftverk, som ska försörja en tillämpning vid frånfall av det centrala elnätet, behöver dimensioneras för att kunna tillgodose toppeffektbehoven, exempelvis startströmmar från motorer eller andra kortvariga högeffektsbehov. Medeleffekten för många tillämpningar är emellertid mycket lägre vilket innebär att förbränningsmotorn behöver arbeta långt under sitt optimala varvtal. Studien

visade att tillkoppling av ett batterisystem kan spara upp till 25 % bränsle för det aktuella driftsfallet vilket innebär stora logistiska fördelar ur ett bränsletillförselperspektiv. Principen är sedan flera år tillbaka redan tillämpad i HEV:s (Hybrid Electric Vehicles), där förbränningsmotorn tillförs ett batterisystem i syfte att spara bränsle.



Figur 5. Schematisk översikt av ett reservkraftssystem med vätgas som huvudsaklig energibärare.

## 4.2 Bränsleflexibilitet genom vätgasomvandling

Väte utgör en grundkomponent i flytande bränslen. I en omvärld där ett nytt enhetsbränsle som skall komma att ersätta diesel och bensin inte är fastställt kan det vara intressant att angripa problemet från ett annat håll. Precis som reformering av vätgas till bränsle är möjlig, är reformering av flytande bränslen tillbaka till vätgas också en möjlighet. Det innebär att en vätgasdriven elförsörjning i form av exempelvis en bränslecell, om den så försörjer en befästning eller ett fordon, med en reformeringsprocess kan drivas av en variation av olika bränslen.

Genom forskning på sådana reformeringsenheter, som sannolikt kan konstrueras enkelt, kan redan i dagsläget tillgänglig teknik göras redo för att strömförsörja en tillämpning, oavsett vilket bränsle som blir ny standard framöver. Av 1 liter bensin med energiinnehåll 34 MJ/liter kan cirka 0,11 kilo vätgas teoretiskt utvinnas, vilket innehåller 15,4 MJ energi [80]. Energiförlusten i omvandlingen kompenseras till viss del genom att en bränslecell driven på vätgas har en högre verkningsgrad än förbränningsmotorer. Om dessutom en SOFC-bränslecell används, kan sannolikt mer av energin nyttgöras från kolmonoxiden som frigörs vid reformeringen.

Om tillräckligt hög verkningsgrad kan uppnås i reformeringssteget, ger ett bränslecellsdrivet system, med sin högre verkningsgrad relativt konventionella förbränningsmetoder, sannolikt god räckvidd och prestanda, med tillägget att en variation av bränslen kan användas för att försörja tillämpningen. Detta torde i förlängningen ge logistiska fördelar, med mindre transporter och minskad komplexitet i försörjningskedjan.

## 4.3 Biobränslen som en del av lösningen

Biobaserade bränslen som kan användas direkt i dagens militära plattformar utan modifikation av systemen har pekats ut som den viktigaste lösningen för att Försvarsmakten ska kunna ställa om i ett kortare perspektiv till följd av den långa livslängd som många militära plattformar har. I slutrapporten inom Klimatneutral Försvarsmakt konstateras att "flygvapnet står för majoriteten av utsläppen från Försvarsmaktens bränsleanvändning.

*Största delen av bränslet förbrukas av JAS 39-systemet varför frågan om vad Försvarsmakten kan göra på kort och lång sikt för att bidra till noll nettoutsläpp i Sverige, i mycket hög utsträckning avgörs av vilka bränslen och plattformar som används inom flyget.”[6]*

Sedan 2013 har projekt drivits i samverkan mellan United States Air Force, FMV och tillverkare där biobaserade jet-bränslen (SAF) prövats med goda resultat [81]. Att på bred front implementera SAF och därigenom drastiskt minska Försvarsmaktens växthusgasutsläpp kan därför anses vara en lågt hängande frukt vad gäller teknisk mognad. Att projektet genomförts i samarbete med USAF borgar också för att underlätta framtida samverkan och finna vägar som inte försvårar Sveriges möjligheter att ge världsstödet inom NATO. Så länge det traditionella flygfotogenbränslet JP8 används parallellt i flödet torde detta inte heller vara något problem. Länder inom NATO har gjort olika bedömningar angående vilka av de åtta processerna för SAF inom ASTM-standarden som också ska vara godkända för militärt flyg. Även om NATO fortfarande står fast vid enhetsbränslet JP8 så finns flera initiativ för en övergång till förnybara alternativ. Tydligast är Finlands beslutade ambition om att sänka växthusgasutsläppen från försvarets land och sjötransporter med 50 % till år 2030, baserat på nivån från 2020. Dock med förbehållet att förmågan inte får påverkas negativt. Den viktigaste åtgärden för att åstadkomma detta väntas vara en övergång till HVO. [82]

Med flytande förnybara drivmedel som kan lagras, blandas och substitueras med sin fossila motsvarighet utan tekniska problem, blir påverkan på Försvarsmaktens logistik relativt liten (gäller såväl flyg som fartyg och markfordon). Uppströms i logistikkedjan ökar dock robustheten genom att ett kompletterande flöde införs, i synnerhet om detta flöde har ett nationellt eller regionalt ursprung [6, 83]. Det är dock i nuläget bara en mindre del av den HVO som används i Sverige som baseras på svenska råvaror (7 % år 2021) [84]. För att gå mot en inhemsk försörjning skulle det troligen krävas någon form av politisk styrning.

En implementering förutsätter en vilja att bekosta den prisökning som SAF innebär jämfört med konventionellt flygbränsle. Likheten med det fossila bränslet skapar en enkel övergång, men det mervärde som ges, i form av robusthet uppströms i logistikkedjan, är svårt att värdera. Merkostnaden för HVO och SAF blir därför framträdande.

Vad gäller tillgången på råvaror så är det tydligt att det finns begränsningar på framför allt fetter och oljor som uppfyller hållbarhetsdirektiven. Men det är också tydligt att den pågående teknikutvecklingen för med sig både en utökning av möjliga (hållbara) råvaror och möjligheter till effektivare nyttjande av kolet från bioråvaran genom bio-elektrobränslen. Tillgången på etanol som kan användas i ATJ-processen väntas växa globalt till följd av att processer för att utvinna andra generationens etanol industrialiseras. Det finns en betydande mängd skogsrester bara i Sverige som klarar kriterierna enligt REDII, men som inte tas tillvara p.g.a. bristande ekonomisk lönsamhet (uppemot 15 TWh avverkningsrester årligen enligt Skogsstyrelsen [85]). Det kan jämföras med att Försvarsmaktens totala energianvändning år 2016 var ca 1,1 TWh. Samtidigt är det troligt att tekniska och ekonomiska restriktioner kommer att begränsa nyttjandet av andra råvaror än fetter och oljor även i framtiden och stor konkurrens om produkterna kan förväntas, vilket kan leda till att även e-bränslen får en marknad trots högre tillverkningskostnad. En sådan utveckling kräver dock att den politiska styrningen fortsätter i den riktning som pekats ut inom EU.

Utifrån den begränsade storleken på Svenska Försvarsmaktens behov kan råvarutillgången inte ses som ett reellt hinder utan det är snarast en fråga om ekonomiska prioriteringar samt ett visst behov av fortsatt teknisk prövning av olika varianter av bränslen i specifika motorer. Det krävs dock en utveckling av robusta försörjningskedjor som baseras på svensk bioråvara för att åstadkomma den försörjningstrygghet som efterfrågas. Gemensamma lösningar med militära samarbetspartners inom NATO har ett värde i sig och för större militärmakter blir tillgången på bioråvara än mer kritisk. Ökade tillgångar genom nya produktionsvägar kan därför vara betydelsefullt för intresset.

## 4.4 Förslag på vidare forskning och utveckling

### 4.4.1 Forskning, omvärldsbevakning och tillämpning inom batteriteknik

#### *Ökad samverkan med industri och akademi*

Eftersom forskningen inom nya batteritekniker är på stark frammarsch genom det arbete som sker hos kommersiella företag, behövs en ökad bevakning av området. Det är också angeläget att ta del av drivkraften hos den kommersiella sektorn genom att delta i gemensamma forskningsprojekt med batteriindustri och akademi för att nå högre forskningshöjd.

#### *Försörjningsstrategier för ingående råvaror*

Frågor kring var produktion och råvaruutvinning sker är viktiga, både för att riskbedöma och arbeta för ökad robusthet i logistikkedjorna. Då litium-jonbatterier återfinns i allt fler system, bör det också finnas en försörjningsstrategi tillgänglig för dessa, både ur försvarsmakts- och totalförsvarsperspektiv. Används batterityper där råvarorna kan anskaffas inom Sverige och EU, byggs ökad robusthet och resiliens.

#### *Rätt batterikemi för rätt tillämpning inom Försvarmakten*

Utifrån de parametrar som nämns i avsnitt 3.3 finns det anledning för Försvarmakten framgent att differentiera sitt batterisortiment utifrån tillämpningens krav, istället för att sträva efter en batterityp som används till alla system. Ett LTO-baserat system har exempelvis avsevärt lägre energiinnehåll än konventionella NMC-batterier, men kan höja prestandan betydligt jämfört ett NMC-system i en tillämpning, om det dimensionerande kravet är möjlighet att ladda snabbt och många gånger.

Differentiering innebär generellt ökad logistik, vilket kan avhjälpas något genom att batterier med standardiserad form kan väljas även om olika kemier används. Vinster med differentiering, exempelvis ökad livslängd och prestanda kan i sin tur minska logistikbehovet.

### 4.4.2 Elektrifiering och V2X

De senaste åren har intresset för militära farkoster med hybriddrift växt och utökats till nya områden. Det finns också ett ökat fokus på batterikapacitet för att möjliggöra framdrift enbart på el. Det ger ökade förmågor både i fråga om låg värmesignatur och högt vridmoment, vilket i sin tur kan öka framkomligheten i vissa situationer. Sänkt bränsleförbrukning och de logistiska fördelar det ger är också betydelsefullt för den militära förmågan.

#### *Bevaka och eventuellt driva utvecklingen inom hybrida lastbilar*

För transportfordon i den bakre logistiken är den stora fördelen med hybrida system den robusthet som kan uppnås genom att möjliggöra energiförsörjning både genom tankning av flytande drivmedel och via laddning av el. Robusthet efterfrågas inte lika starkt inom civila godstransporter, vilket kan innebära en risk för att de system som Försvarmakten önskar inte kommer att tillhandahållas av fordonstillverkarna. Skillnaden i grundläggande behov mellan civil och militär sektor är något som Försvarmakten behöver uppmärksamma då det kan leda till att man måste driva egen utveckling (eventuellt tillsammans med allierade) eller anpassa sig till situationen.

#### *Forskning inom tillämpningar av V2X inom militär verksamhet*

Vi har också sett exempel på hur el- och hybridfordon kan användas för att skapa flexibilitet i olika delar av Försvarmaktens energiförsörjning med V2X-teknologin. För att kunna nyttja denna flexibilitet har det också konstaterats att beslutsstöd kommer att behöva tas fram för att stödja avvägningar kring var tillgänglig energi ger bäst måluppfyllelse. Detta område kommer att kräva vidare studier och en viktig utgångspunkt är att se systemet med energiförbrukare och energiproducenter som en helhet och ta tillvara på de energiflöden som finns.

#### *Utredningsarbete kring praktiska förutsättningar*

Det krävs också att grundläggande praktiska frågor reds ut. Exempelvis att se över möjligheterna att tillhandahålla laddning vid Försvarmaktens olika anläggningar. Det kan behövas samråd med kraftbolag om vilka kapaciteter som kan tillhandahållas nu och i framtiden. Nya elektrifierade system behöver även förberedas för att möjliggöra energituttag (V2X), och på samma sätt behöver lasten (exempelvis en anläggning) ha möjlighet att ta emot energin på lämpligt sätt. Det är viktigt att kunskap byggs upp parallellt både kring praktiska baskrav här och nu och kring de något mer långsiktiga frågorna om hur den flexibilitet som elektrifieringen medför kan nyttjas för att ge operativ måluppfyllelse.

Sammantaget finns starka drivkrafter att accelerera utvecklingen av hybrida system, vilket kan stödjas av forskning inom dessa områden. Att sprida kunskapen om de förmågor som kan skapas tack vare ny energiteknik, kan också påverka inställningen till elektrifiering inom Försvarmakten och torde vara viktigt för att fortsätta utvecklingen.

#### **4.4.3 Fortsatt implementering av biobränslen**

Olika drivkrafter kommer att ligga bakom olika typer av omställningsprocesser. Nya förmågor är exempelvis drivande för utvecklingen av hybrida system i operativ verksamhet. Men om målet är att nå fossilfrihet, behöver man också adressera den stora utsläppskälla som stridsflyget utgör och för detta krävs en implementering av hållbara flygbränslen (SAF). Även marinen har en liknande situation i det att full elektrifiering inte kommer att vara möjlig med den teknikutveckling som kan väntas inom en nära framtid. Dock kan hybridisering i många fall öka energieffektiviteten.

#### *Fortsatt behov av testning och godkännande*

Implementeringen av biobränslen har kommit långt och de används i viss utsträckning idag, men fortfarande kvarstår vissa behov av tekniska utvärderingar för militära tillämpningar samt behov av internationell samsyn kring användningen. Det är alltså viktigt att testverksamhet fortgår för att Försvarmakten ska kunna ställa om till fossilfrihet.

#### *Omvärldsbevakning inom industri, marknad och politik rörande syntetiska bränslen*

Det är också av intresse att följa utvecklingen globalt gällande satsningar på andra generationens etanol och ATJ-bränslen samt bio-elektrobränslen. Även den politiska utvecklingen i frågor som rör biobränslen behöver bevakas. En utökad råvarubas skulle troligen öppna fler möjligheter och ytterligare öka intresset för SAF inom NATO. Det är dock det civila flyget som främst driver utvecklingen och som kommer att skapa en infrastruktur för bio-baserade bränslen och elektrobränslen, vilket militära organisationer kan välja att dra nytta av.

#### *Forskning kring bränsleflexibilitet och gasturbiner i samverkan*

Mycket forskning har lagts på drop-in-bränslen, men vägen till förnybarhet kan på sikt också gå genom att modifiera och utveckla motorer för att möjliggöra ett bredare spann av bränslen. Den optimala vägen framåt är sannolikt inte att föralltid anpassa förnybara syntetiska bränslen efter motorer som konstruerats för fossila bränslen, vilka en gång specificerats för att vara enkla att producera av fossil olja. Det nationella samarbetet med civil sektor inom CESTAP är därför mycket angeläget.

#### *Forskning till stöd för utvecklingen av robusta försörjningskedjor*

Frågan om möjligheter till robusta försörjningskedjor genom inhemsk produktion är fortsatt relevant. Sverige raffinerar idag nästan dubbla mängden drivmedel (idag till största del fossila) jämfört med nationell förbrukning och dessa industrier har på olika sätt påbörjat sin omställningsprocess mot produktion av biobaserade bränslen. Att bevaka och eventuellt påverka utvecklingen mot mer inhemska eller europeiska råvaror kan antas ha ett minst lika stort värde för det civila försvaret som för det militära, varför synergier och samverkan däremellan bör tas i beaktande. På samma sätt som för flygbränsle blir HVO för markfordon i stor utsträckning en kostnadsfråga (i takt med att motorer godkänns för högre inblandning), men till skillnad mot flyget finns för markfordon också andra möjligheter till flexibla energilösningar genom elektrifiering och hybridisering.

## 5 Summering och slutsatser

I denna rapport har vi beskrivit och analyserat energitekniker och energibärare som möjliggör framtidens energisystem, med betoning på deras relevans för det militära försvaret. Utvecklingen av Försvarmaktens energiförsörjning kommer dock att behöva ske i symbios med totalförsvaret, eftersom Försvarmakten är en relativt liten energianvändare sett till Sverige som helhet. Ett robust totalförsvaret skapar förutsättningar för robusthet inom det militära försvaret.

Vår genomgång belyser att det finns en stor bredd av lösningar som alla kan komma att bli viktiga inom olika delar av Försvarmaktens verksamhet. Det är tydligt att de olika energiteknikerna och energibärarna har styrkor och svagheter inom olika områden. Den bästa lösningen kommer därför att bero av tillämpningen. Detta kommer sannolikt att leda till en mer diversifierad energiportfölj, inkluderande både traditionella och innovativa lösningar för att säkerställa en robust och flexibel energiförsörjning som möjliggör nya förmågor.

Diskussionen kring energieffektivisering och utvecklingen av lokala nätverk med ö-driftskapacitet belyser möjligheterna att skapa självförsörjande och resilienta energisystem. Detta är särskilt relevant i ljuset av den ökade elektrifieringen och den potentiella sårbarheten i centraliserade elnät. Vidare belyses betydelsen av att utforska och implementera hybrid- och elektrifieringslösningar, inte bara för att minska beroendet av fossila bränslen utan även för att förbättra den operativa förmågan.

Analysen av olika energibärare, från bio-baserade bränslen till batterier och väte, visar på ett komplex landskap där varje alternativ bär med sig specifika fördelar och utmaningar. Det understryker behovet av fortsatt forskning och utveckling för att fullt ut förstå och utnyttja dessa energibärare i syfte att optimera Försvarmaktens energiförsörjning. Försvarmakten kommer i framtiden inte kunna räkna med att ha exklusiv tillgång till rent fossila bränslen, men det finns flertalet alternativ som tillsammans, kan fungera som ersättning och som även har potential att öka resiliens och robusthet hos Försvarmakten. Den stora osäkerhet som råder kring framtida tillgång och pris för olika bränslen gör att bränsleflexibla system är intressanta att utveckla.

Slutligen framhåller rapporten vikten av fortsatt forskning, utveckling och omvärldsbevakning inom ett stort antal områden som rör både enskilda tekniker och systemnivån inom energiförsörjningsområdet. En nära samverkan med användarna av tekniken är också kritiskt för att forskning och utveckling tas vidare till implementering. Vår prognos är att den palett av energilösningar som står till buds har potential att tillgodose Försvarmaktens behov av energiförsörjning även i framtiden, men att en sammanhållen insats över disciplin- och organisationsgränser kommer att behövas.

## Referenser

- [1] M. Tynnhammar & J. Enström, "Logistikperspektiv på Försvarsmaktens framtida energiförsörjning. Totalförsvarets Forskningsinstitut. FOI-R--5580--SE," 2024.
- [2] "Klimatneutralitet och alternativa drivmedel i Försvarsmakten - Armén. Delrapport 1 inom studien Klimatneutral FM. FM2023-3555:1," Försvarsmakten, 2023.
- [3] B. Nykvist, "Klimatneutral Försvarsmakt - Frågeställningar för Armén och sammanställning av förslag på inriktning för fortsatt arbete mot minskat fossilberoende inom FM. FOI Memo 7433. Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI, 2021.
- [4] B. Nykvist & T. Mårtensson, "Klimatneutral Försvarsmakt - Analys av fossilfria vägval förförsvarsgrenarna. Möjliga åtgärder på kort sikt. FOI-R-5201--SE. Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI, 2021.
- [5] A. Andersson, H. Andersson, L. Simonsson, & T. Mårtensson, "Försvarsförmåga och klimatneutralitet - strategisk planering för en värld som ställer om", Memo 8104, Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI 2023.
- [6] "Slutrapport av Studie GEM182004S Klimatneutral Försvarsmakt. FM2023-3555:2". Försvarsmakten 2023.
- [7] M. Tynnhammar & J. Enström, "Logistikperspektiv på Försvarsmaktens framtida energiförsörjning," FOI, 2024. <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R--5580--SE>
- [8] H. Ellis, W. Sahlén, M. Pastuhoff, & M. Skarstind, "Energilagring för reservkraft - Flödesbatterier och metallförbränning som energilagring för bergrum," Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI, 2022, vol. FOI-R--5259--SE. <https://www.foi.se/rapporter/rapportsammanfattning.html?reportNo=FOI-R--5259--SE>
- [9] H. Ellis & M. Pastuhoff, "Energisystem för robust energiförsörjning" FOI-R-5000. Swedish Defence Agency, 2021. . <https://www.foi.se/rapporter/rapportsammanfattning.html?reportNo=FOI-R--5000--SE>
- [10] E. National Academies of Sciences, and Medicine., *Powering the U.S. army of the future*. Washington, DC: The National Academies Press, 2021.
- [11] B. Arnfinnsson & E. K. Tønsberg, "Nullutslippsforsvaret – en mulighetsstudie av klimavenlig teknologi for Forsvaret," FFI Forsvarets forskningsinstitut, 2023, vol. 23/01418.
- [12] L. Trakimavičius, "Mission Net-Zero: Charting the path for E-fuels i the military," *NATO Energy Security Centre of Excellence*, 2023. <https://www.ensecce.org/publications/mission-net-zero-charting-the-path-for-e-fuels-in-the-military/>.
- [13] M. Kőrts, "Climate change mitigation in the Armed Forces," NATO Energy and Security Centre of Excellence, 2023. <https://www.ensecce.org/publications/>
- [14] C. Samaras, W. J. Nuttall, & M. Bazilian, "Energy and the military: Convergence of security, economic, and environmental decision-making," *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100409, 2019/11/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100409>.
- [15] P. Dvořák & J. Štoller, "Energy Efficiency in Military Camps," i *Challenges to National Defence in Contemporary Geopolitical Situation*, 2022, vol. 2022, 1 ed., pp. 209-213, doi: 10.47459/cndcgs.2022.26. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85148206970&doi=10.47459%2fcndcgs.2022.26&partnerID=40&md5=b4fa743c839ae1aedbb3e6e59ce86a00>

- [16] "Energy shutdowns hit Ukraine after Russian attacks target infrastructure," i *NBC News*, ed. <https://www.nbcnews.com/news/world/energy-shutdowns-hit-ukraine-russian-attacks-target-infrastructure-rcna155081>, 2024.
- [17] "United States Army Climate Strategy. Department of the Army, Office of the Assistant Secretary of the Army for Installations, Energy and Environment. 2022. Washington, DC."
- [18] Y. He, "Reliability analysis of microgrid. ," Report 2023:948. Energiforsk, 2023.
- [19] D. T. Ton & M. A. Smith, "The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative," *The Electricity Journal*, vol. 25, no. 8, pp. 84-94, 2012/10/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>.
- [20] A. Kumar, M. Z. U. Khan, & D. M. A. Hussain, "Microgrids technology: A review paper," *Gyancity Journal of Electronics & Computer Science*, vol. 3, no. 1, pp. 11-20, 2018, doi: <https://www.gjecs.gyancity.com/Vol3No1/Microgrids.pdf>.
- [21] D. S. Dhawale, G. Kaur, & S. Giddey, "Challenges and advancement in direct ammonia solid oxide fuel cells: a review," *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2023.
- [22] E. Lallo, R. Fridsén Skogsberg, H. Ellis, & M. Skarstind, "Vätgasdrivna reservkraftsystem - En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar," FOI-R--5444--SE 2023.
- [23] "Reversible Solid Oxide Technology," i *Elcogen*, ed, 2024.
- [24] M. Genrup & M. Thern, "Gasturbinteknik – Årsrapport 2020. Rapport 2020:669," Energiforsk, 2020.
- [25] Siemens. "Zero Emission Hydrogen Turbine Center – on the path to decarbonization." (besökt 2024-03-20).
- [26] A. Melbin, L. Almén, & M. Tulldahl, "Fjärrstyrd luftfartysförmåga. FOI-RH--2665--SE," 2024. Totalförsvarets Forskningsinstitut FOI.
- [27] J. Wickström. "Snart kan marknaden för V2X ta fart." Energiföretagen. <https://www.energi.se/artiklar/2023/september-2023/snart-kan-marknaden-for-v2x-ta-fart/>. (besökt 2024-03-20).
- [28] M. A. Masrur *et al.*, "Military-based vehicle-to-grid and vehicle-to-vehicle microgrid—System architecture and implementation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 157-171, 2017.
- [29] K. Lai & L. Zhang, "Sizing and Siting of Energy Storage Systems in a Military Based Vehicle-to- Grid Microgrid," i *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2020*, 2020, doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334881. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85101029629&doi=10.1109%2fIAS44978.2020.9334881&partnerID=40&md5=5f729e40ef1c5b9c6debd5e4fa6ffb30>
- [30] C. Timm, "Vehicle to Home and Vehicle to Grid: a study and modeling of the technical system when charging and discharging electric vehicles for households with PV systems," ed. Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology, 2023.
- [31] M. Hawrot-Paw, A. Koniuszy, P. Sędkak, & D. Seń, "Functional Properties and Microbiological Stability of Fatty Acid Methyl Esters (FAME) under Different Storage Conditions," *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5632, 2020. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5632>.
- [32] Qstar, "RME 100 - För dieselmotorer och uppvärmning," ed. Qstar Försäljning AB. <https://qstar.se/content/uploads/2022/06/RME-Produktblad.pdf>, 2022.
- [33] Preem, "Preem Evolution Diesel max 7% RME," ed. Preem AB. <https://www.preem.se/contentassets/63186d81c7f742d4860d02da8e8fd/preem-evolution-diesel.pdf>, 2022.



- [34] "Neste renewable diesel handbook. Neste.," 2020.
- [35] K. Ericsson, L. Björnsson, P. Börjesson, & M. Lantz, "Systemperspektiv på svensk produktion av biojetbränslen - Sammanfattning av ett forskningsprojekt vid Lunds tekniska högskola," i "EESS/IMES," 2021, vol. 125.  
<https://lup.lub.lu.se/search/publication?q=%22biojetbr%C3%A4nslen%22>
- [36] (2019). *Biojet för flyget. SOU 2019:11*. [Online] <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/statens-offentliga-utredningar/2019/03/sou-201911/>
- [37] *ASTM D7566-23b. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*, <https://www.astm.org/d7566-23b.html>, nov 2023 2023.  
<https://www.astm.org/d7566-23a.html>
- [38] K. Danél & B. Fallenius, "Prov med biobränslen i turbojetmotor Microturbo TRI-60 (Tests with biojet fuels in MicroTurbo TRI-60 Jet engine)," FOI Swedish Defence Research Agency, 2020, vol. FOI-R--5101--SE.
- [39] (2018). *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance.) (REDII)*. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>
- [40] "Renewable Fuel Standard (RFS2): Final Rule." United States Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-fuel-standard-rfs2-final-rule#additional-resources> (besökt nov. 2023).
- [41] M. Ebadian, J. Saddler, & J. D. McMillan, "Implementation Agendas: Compare-and-Contrast Transport Biofuels Policies (2019-2021 Update)," i "IEA Bioenergy: Task 39," IEA Bioenergy, 2022. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/04/Task-39-Implementation-Agendas-Report-2019-2021-Update.pdf>
- [42] Honeywell. "Honeywell Technology Enables Jet Flights With SAF From Algal Oil." (besökt 2024-03-22, 2021).
- [43] E. Furusjö & J. Mossberg, "Förnybar bensin - En kunskapssammanställning," f3:s rapportserie, publ. nr f3 01:2021, 2021. [https://f3centre.se/app/uploads/f3-01-2021\\_Fornybar-bensin\\_RISE-dec-2020.pdf](https://f3centre.se/app/uploads/f3-01-2021_Fornybar-bensin_RISE-dec-2020.pdf)
- [44] Raizen. "Projections <https://ri.raizen.com.br/en/e2g/>." <https://ri.raizen.com.br/en/e2g/> (besökt 2024-02-23).
- [45] Sekab. "Etanol som råvara." <https://www.sekab.com/sv/etanol-som-ravara/> (besökt 2024-03-22).
- [46] "CESTAP (Competence cEntre in Sustainable Turbine fuels for Aviation and Power) <https://cestap.se/>." (besökt 2024-04-29, 2024).
- [47] J. O'malley, N. Pavlenko, & S. Searle, "Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand," *International Council on Clean Transportation: Berlin, Germany*, 2021.  
<https://theicct.org/sites/default/files/publications/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf>.
- [48] *Drivkraft Sverige. Remissvar gällande Klimat- och näringslivsdepartementets PM – Sänkning av reduktionsplikten för bensin och diesel. KN2023/03617. 2023.*
- [49] f3. "EU:s hållbarhetskriterier för biodrivmedel." (besökt 2024-03-05).
- [50] S. Brynolf, M. Taljegard, M. Grahn, & J. Hansson, "Electrofuels for the transport sector: A review of production costs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1887-1905, 2018.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309358>.

- [51] A. Fagerström *et al.*, "Large scale bio electro jet fuel production integration at CHP-plant in Östersund, Sweden," IVL Swedish Environmental Research Institute, 2121, vol. Report number: B 2407.  
<https://www.ivl.se/download/18.2f05652c1775c6085c01a6/1612270805586/B2407.pdf>
- [52] Neste. "Co-creating a more sustainable future – producing e-fuels from CO2 and green hydrogen." Neste. (besökt 2024-03-04, 2024).
- [53] Y. Liu *et al.*, "A review on the promising fuel of the future – Biobutanol; the hindrances and future perspectives," *Fuel*, vol. 327, p. 125166, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125166>.
- [54] E. Furusjö, S. Mesfun, M. Samavati, A. Larsson, & G. Gustafsson, "Bio-elektrobränslen – hybriddrivmedel för förbättrad resurseffektivitet (i Samverkansprogrammet förnybara drivmedel och system - Sammanfattande projektresultat 2018-2021)," i "f3 - Svenskt kunskapscentrum för förnybara drivmedel," [https://f3centre.se/app/uploads/Sammanfattande-projektresultat\\_FDoS\\_2022\\_LR.pdf](https://f3centre.se/app/uploads/Sammanfattande-projektresultat_FDoS_2022_LR.pdf), 2022.
- [55] S. Mesfun, G. Gustafsson, A. Larsson, M. Samavati, & E. Furusjö, "Electrification of Biorefinery Concepts for Improved Productivity—Yield, Economic and GHG Performances," *Energies*, vol. 16, no. 21, p. 7436, 2023.  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7436>.
- [56] N. R. e. al, "Pulsdetonationsmotorn — Experiment och beräkningar," FOI, Tumba, 2001.
- [57] C. P. I. Agency, "Overview of puls detonation propulsion technology," The Johns Hopkins University, Columbia, 2001.
- [58] E. G. e. al., "Rotating detonation combustor research at the University of Cincinnati," *Flow Turbul. Combust*, vol. 26, pp. 1-25, 2018.
- [59] P. Wolanski, "Application of the continuous rotating detonation to gas turbine," *Applied Mechanics*, vol. 782, pp. 3-12, 2015.
- [60] B. W. e. al, "Effect of ammonia/hydrogen mixture ratio on engine combustion and emission performance at different inlet temperatures," *Energy*, vol. 272, 2023.
- [61] J. L. e. al, "A Review on Combustion Characteristics of Ammonia as a Carbon-Free Fuel," *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, 2021.
- [62] J. S. C. e. al, "Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines," *Journal of Cleaner Production*, vol. 296, 2021.
- [63] K. Bioche, L. Bricteux, A. Bertolino, A. Parente, & J. Blondeau, "Large Eddy Simulation of rich ammonia/hydrogen/air combustion in a gas turbine burner," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 79, pp. 39548-39562, 2021.
- [64] J. Li, H. Huang, N. Kobayashi, Z. He, & Y. Nagai, "Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NOx formation," *International journal of energy research*, vol. 38, no. 9, pp. 1214-1223, 2014.
- [65] Y. Qi, W. Liu, S. Liu, W. Wang, Y. Peng, & Z. Wang, "A review on ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines," *eTransportation*, p. 100288, 2023.
- [66] P. Julien & J. M. Bergthorson, "Enabling the metal fuel economy: green recycling of metal fuels," *Sustainable Energy & Fuels*, vol. 1, no. 3, pp. 615-625, 2017.
- [67] J. T. Warner, *Lithium-Ion Battery Chemistries*. Elsevier, 2019.
- [68] "SCiB rechargeable battery," i *Toshiba*, ed, 2024.
- [69] J. Snyder, "Batteries selected for world's largest fleet of electric ferries," i *Riviera*, ed, 2020.

- [70] J. T. Warner, "Chapter 10 - Next generation and beyond lithium chemistries," i *Lithium-Ion Battery Chemistries*, J. T. Warner Ed.: Elsevier, 2019, pp. 253-284.
- [71] F. Thomas, L. Mahdi, J. Lemaire, & D. M. F. Santos, "Technological Advances and Market Developments of Solid-State Batteries: A Review," *Materials*, vol. 17, no. 1, p. 239, 2024. <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/1/239>.
- [72] J.-Y. Hwang, S.-T. Myung, & Y.-K. Sun, "Sodium-ion batteries: present and future," *Chemical Society Reviews*, vol. 46, no. 12, pp. 3529-3614, 2017.
- [73] "Northvolt acquires Cuberg to commercialize next-generation battery cells." <https://northvolt.com/articles/cuberg-acquisition> (besökt 2024-08-05).
- [74] "Solid-state technology – the quest for the ‘Holy Grail’." (besökt 2024-03-22).
- [75] N. Aslfattahi *et al.*, "State-of-the-art review on electrolytes for sodium-ion batteries: Potential recent progress and technical challenges," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, p. 108781, 2023/11/30/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108781>.
- [76] "Sustainable. And attainable." (besökt 2024-03-27).
- [77] D. Reber, S. Jarvis, & M. Marshak, "The role of energy density for grid-scale batteries," Cambridge open engage, Cambridge, 2022.
- [78] B. Santos, "PV Magazine," i *China connects world's largest redox flow battery system to grid*, ed, 2022.
- [79] E. Lallo, M. Elfsberg, S. Munktel, H. Victorin, & S. Olsson, "Hybrid drivna reservkraftsystem," FOI-R--5590--SE, 2024.
- [80] K. T. Møller, T. R. Jensen, E. Akiba, & H.-w. Li, "Hydrogen - A sustainable energy carrier," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 27, no. 1, pp. 34-40, 2017.
- [81] FMV. "FMV testar svenskt biojetbränsle i Gripenmotorn (FMV testing Swedish bio-jet fuel in Gripen engine)." <https://www.fmv.se/om-fmv/miljoarbete/fmv-testar-svenskt-biojetbransle-i-gripenmotorn/> (besökt 2023-08-24).
- [82] (2022). *The Energy and Climate Program of the Defense Forces 2022–2025, goals and measures (in Finnish: Puolustusvoimien energia- ja ilmasto-ohjelman 2022–2025 tavoitteet ja toimenpiteet)*. [Online] [https://www.defmin.fi/en/topical/press\\_releases\\_and\\_news/press\\_releases\\_archive/2022/defence\\_forces\\_strive\\_for\\_significant\\_emission\\_reductions\\_and\\_prepare\\_for\\_energy\\_transition.12942.news#d3dcaef4](https://www.defmin.fi/en/topical/press_releases_and_news/press_releases_archive/2022/defence_forces_strive_for_significant_emission_reductions_and_prepare_for_energy_transition.12942.news#d3dcaef4)
- [83] (2023). *Förnybart i tanken - Ett styrmedelsförslag för en stärkt bioekonomi. Delbetänkande av Bioekonomiutredningen*. [Online] <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/statens-offentliga-utredningar/2023/03/sou-202315/>
- [84] Energimyndigheten, "Styrmedel för nya biodrivmedel – Behov och utformning av styrmedel för att främja produktion av biodriv-medel med nya tekniker. ER 2021:22," 2021.
- [85] Skogsstyrelsen. "Skogliga konsekvensanalyser." Skogsstyrelsen. <https://www.skogsstyrelsen.se/mer-om-skog/skogliga-konsekvensanalyser/> (besökt nov 3023, 2023).



ISSN 1650-1942

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