

LIGHTHOUSE REPORTS

Elektrifiering av sjöfarten

en nulägesbeskrivning av teknik och marknadsläge inom maritim elektrifiering och analys av behov och möjligheter för elektrifiering inom sjöfarten



Bilder: Wärtsilä, HH Ferries Group, Stena, ABB

En förstudie initierad av Lighthouse

www.lighthouse.nu

Elektrifiering av sjöfarten

en nulägesbeskrivning av teknik och marknadsläge inom maritim elektrifiering och analys av behov och möjligheter för elektrifiering inom sjöfarten

Författare

RISE Viktoria:

Mikael Hägg
Stefan Pettersson¹
Robert Rylander
Johan Östling



SSPA:

Martin Borgh
Mathias Broman
Viktor Daun
Joanne Ellis
Olov Lundbäck
Vendela Santén (projektledare)
Magnus Wikander



Lighthouse partners:



¹ Utfört arbete även för Chalmers Tekniska Högskola, Electrical Engineering, i egenskap av adjungerad professor

Sammanfattning

Sverige har ambitionen att nå en fossiloberoende fordonsflotta 2030, och har sedan 1 januari 2018 ett nytt långsiktigt klimatmål som innebär att det år 2045 inte skall finnas några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären. Högre grad av elektrifiering är en möjlighet att minska utsläppen inom transportsektorn, inklusive sjöfarten. Vid ren eldrift minskar de lokala emissionerna helt, och om elen produceras förnybart fås heller inga, eller få, koldioxidutsläpp.

Målet med denna förstudie är dels att ge en tekniköversikt över dagens utveckling inom elektrifierad sjöfart, men även att analysera parametrar som påverkar prestanda och kostnader för maritim elektrifiering. Studien fångar även upp industriaktörernas perspektiv kring drivkrafter för elektrifierad sjöfart samt vilka utmaningar som finns, och baserat på dessa, har projektidéer formulerats. Rapporten är en syntes av studier och intervjuer med aktörer, inom eller nära angränsade, till sjöfarten.

Utvecklingshastigheten inom området maritim elektrifiering är hög, och nya innovativa projekt dyker upp kontinuerligt. Det finns olika grad av elektrifierade lösningar på fartyg - dieselektrisk, batterihybrid och helelektriskt. Inom de fartyg där batterier används är litiumjonbatterier den vanligast förekommande typen. I dagsläget finns olika grad av elektrifiering exemplifierade inom olika fartygssegment. Generellt syns elektrifiering inom de segment där fartyg opererar med mycket varierande effektbehov. En hög grad av elektrifiering syns inom passagerarfartyg, där flera exempel finns på helelektriska passagerarfartyg, framförallt i Norge, men även ett fåtal exempel i Sverige. Dessa trafikerar längs en definierad rutt på kortare sträckor. I Sverige finns även exempel på helt eldrivna linfärjor för ännu kortare sträckor. Ytterligare fartygssegment med elektrifiering är inom offshore-industrin samt specialfartyg såsom bogserbåtar, där batterihybrider gör operationen mer effektiv vid exempelvis dynamisk positionering. Det finns exempel på flera projekt som pågår och som breddar tillämpningen av elektrifiering inom sjöfarten, t.ex. RoPax-färjor, inlandssjöfart och i containertrafik.

En mängd olika aktörer är involverade i att elektrifiera sjöfarten - användare (hamnar, rederier), leverantörer (energilagring, fartygsdesign, varv, landanslutning, system och komponenter), reglerande aktörer (myndigheter, klassällskap) och forskningsenheter (institut, universitet, högskolor). Det finns incitament att elektrifiera fartyg som kan kopplas till klimat och miljö, ekonomi, marknad och säkerhet. Befintliga svenska initiativ adresserar elektrifiering inom kortväga färjetrafik och även RoPax (Göteborg-Fredrikshamn). Främst litiumjonbatterier används och systemen designas och utvecklas för varje enskilt fall. Detta gäller även laddningsmetod där flera olika tekniska lösningar används. Flera stora utmaningar har identifierats utifrån intervjuer med aktörerna: Det är i dagsläget ett stort ekonomiskt risktagande och svårt att få ihop affären i ett maritimt elektrifieringsinitiativ, där statliga medfinansierare ofta är nödvändiga. Teknikutmaningar som identifierats handlar bl.a. om hur tillräcklig batterieffekt och laddningshastighet kan uppnås samt att säkerställa en tillförlitlig laddningsmetod.

Även säkerheten kring batterianvändning är något som identifierats som en utmaning, där det finns begränsad erfarenhet från praktiken i hur olika säkerhetssystem fungerar vid farliga situationer. En fungerande laddningsinfrastruktur är en nödvändig förutsättning och här finns behov av att tydliggöra vilka krav på infrastrukturen som finns, utifrån möjliga tillämpningar av maritim elektrifiering.

Studien har identifierat flera breda ämnesområden där fortsatt forskning skulle kunna bidra till att öka kunskapen om, och användning av, maritim elektrifiering. Ett antal konkreta forskningsprojekt föreslås inom området maritim elektrifiering - "Aktörskonstellation för affärsmodeller", "Ekonomiska incitament", "Simuleringsmiljö för elektrifierad sjöfart", "Laddinfrastruktur och standardisering", "Praktiska erfarenheter från elektrifiering", "Elektrifiering som en del av transportsystemet" och "LETS - Electromobilitylabbet".

English Summary

Sweden has the ambition to have a fossil free vehicle fleet by 2030, and on January 1st 2018 a new long term climate goal was set - to have no net exhaust emissions of greenhouse gases by 2045. An increased use of electrification is a possibility to reduce the emissions from the transport sector, including sea transportation. With fully electric operation there are no emissions from the vessels, and if the electricity is renewable there are no, or few, greenhouse gas emissions from electricity production.

The aim with this pre-study was to give an overview of the technical development within electrification of sea transportation, and also to analyse parameters that influence the performance and costs of maritime electrification. The study also looked into the perspective of industry actors regarding their drivers for maritime electrification as well as existing challenges. Based on those insights, project ideas have been formulated. This report is a synthesis of previous projects and interviews with actors within the shipping industry and closely related areas.

The pace of development within the area of maritime electrification is high, and new, innovative projects are continually being started. There are different levels of electrification solutions for ships – diesel electric, battery hybrid and fully electric. The batteries most commonly used by vessels are lithium ion. Today, the level of electrification varies by vessel segment. Generally, electrification is more common within the vessel segments where there are large variations in engine power during operation. There are many examples of electrification within the passenger vessel segment, especially in Norway. There are also a few examples in Sweden. These passenger vessels operate on a defined route over shorter distances. In Sweden, there are examples of fully electric cable road ferries operating over very short distances. Other vessel segments adopting electrification are offshore industry vessels and special vessels such as tugs. In these segments, battery hybrid solutions result in higher efficiency for operations such as dynamic positioning. There are a number of ongoing projects, for example RoPax ferries, inland waterways vessels,

and container vessels, that are broadening the scope of application of maritime electrification.

A number of different actors are involved in maritime electrification - users (ports, shipping companies), suppliers (energy storage, vessel design, shipyards, shore power, system and components), regulatory authorities, class societies, and research organisations (institutes and universities). There are incentives for electrification of vessels that are related to climate and environment, economy, market and safety. Existing Swedish electrification initiatives are within the short-range ferry traffic segment, as well as a RoPax project (Gothenburg-Frederikshavn). Mostly lithium-ion batteries are used and the systems onboard the ships are designed for each unique case. The same applies for the charging method, where several technical solutions are applied. A number of large challenges have been identified based on interviews with different actors. Today, there is a big economic risk with electrification projects, and funding from governmental players often is necessary. Technical challenges identified include ensuring enough battery power and charging speed can be obtained, and implementation of a reliable charging method. The safety of battery usage was also identified as a challenge, where there is limited practical experience on how different safety systems perform in hazardous situations. A well-functioning charging infrastructure is necessary and there is a need for clarifying the requirements for such infrastructure, based on different applications of maritime electrification.

This study has identified several broad areas where further research could contribute to increasing the knowledge about, and the use of, maritime electrification. A number of concrete research projects are suggested within the area of maritime electrification – “Actor constellation for business models”, “Simulation environment for electrified sea transportation”, “Charging infrastructure and standardisation”, “Experiences of electrification from practice”, “Electrification as part of the transport system”, and “LETS – Laboratory for Electrified Transport Sweden”.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
English Summary	3
Begrepp och förkortningar	7
1. Inledning.....	8
2. Metod.....	10
3. Beskrivning av elektrifierade system	11
3.1 Historisk utveckling	11
3.2 Tekniköversikt	12
Maskineri	13
Energilagring	14
Elförbrukning ombord.....	14
Framdrivning	14
System	15
3.3 Fartygssegmentens olika grad av elektrifiering.....	15
3.4 Potential för elektrifiering i framtiden.....	18
3.5 Parametrar som påverkar prestanda och kostnader ur ett holistiskt perspektiv	19
Körprofil	20
Fartygsspecifika parametrar.....	20
Laddinfrastrukturen.....	21
Kostnadsberäkningar	21
4. Perspektiv från aktörerna	22
4.1 Aktörer som är involverade med att utveckla elektrifierade fartyg.....	22
4.2 Drivkrafter	22
Klimat- och miljöincitament.....	22
Ekonomiska incitament	23
Marknad.....	24
Säkerhet.....	25
4.3 Problem som adresseras i pågående projekt.....	25
Teknik.....	25
Laddinfrastruktur.....	26
Säkerhet.....	26
Miljöpåverkan från hybrid- och batterifartyg ur ett LCA-perspektiv	27

Pågående forskning i Sverige	28
4.4 Utmaningar	30
Teknik.....	30
Ladd- och landinfrastruktur	31
Ekonomi.....	33
Säkerhet.....	36
4.5 Den svenska marknaden	36
5. Forskning och projektidéer.....	38
5.1 Konkreta projektförslag	40
Aktörskonstellation för affärsmodeller inom maritim elektrifiering	40
Ekonomiska incitament för elektrifiering.....	40
Simuleringsmiljö elektrifierad sjöfart.....	41
Laddinfrastruktur & standardisering	42
Praktisk erfarenhet från elektrifierad sjöfart.....	42
Elektrifiering av sjöfarten som en del i transportsystemet	43
LETS - Electromobilitylabbet	43
6. Referenser	44
7. APPENDIX A - Elektrifiering bussystem.....	48

Begrepp och förkortningar

AHTS - Anchor handler and Tug supply vessel

Automoooring - System för automatisk förtöjning vid kaj

C-rate – Mått på laddningshastighet av ett batteri. 1 C motsvarar att batteriet laddas från 0% till 100% på en timme, 2 C motsvarar att batteriet laddas från 0% till 100% på 30 minuter.

Drivlina – De maskiner och komponenter som utgör fartygets framdrivningssystem

DP - Dynamisk positionering

EMS - Energy Management System eller energihanteringssystem

Generatoraggregat - Generator som drivs av förbränningsmotor

GWP - Global Warming Potential

HAZID - Hazard Identification Study

HAZOP - Hazard and Operability Study

Huvudtavla - Huvudsakliga kopplingstavlan för det elektriska systemet

LCA - Livscykelanalys (Life Cycle Assessment)

LCC - Livscykelkostnadsanalys (Life Cycle Cost)

MSB - Main Switch Board, se huvudtavla

POD - Roderpropeller med elmotor integrerad i enheten

Spinning Reserve - Motor som går på tomgång för att kunna sättas in vid snabba lastvariationer

PSV - Platform supply vessel

OSV - Offshore support vessel

1. Inledning

Sverige har som mål att nå en fossiloberoende fordonsflotta 2030, vilket innebär att utsläppen från inrikes transporter ska minska med minst 70 procent senast år 2030 jämfört med år 2010. Utsläppen i Sverige som inte omfattas av EU Emission Trading System (EU Emissions Trading System, 2018) ska senast år 2030 vara minst 63 procent lägre än utsläppen 1990 och senast år 2040 vara minst 75 procent lägre. Sverige har sedan 1 januari 2018 ett nytt långsiktigt klimatmål som innebär att det år 2045 inte skall finnas några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären (Regeringskansliet, 2018). Konkret betyder detta att utsläppen från verksamheter inom Sverige senast år 2045 ska vara minst 85 procent lägre än utsläppen år 1990.

Behovet av denna förstudie kring elektrifierad sjöfart identifierades bland annat efter Lighthouse seminarium [”Fartyg på el - en kraft att räkna med?”](#) som hölls i augusti 2017. Aktörer som Siemens, NorthVolt, Stena Teknik, Wallenius, Scandlines, SSPA, Västtrafik, Maritime Battery Forum m.fl. presenterade erfarenheter och visioner om hur sjöfarten kan göras mer miljövänlig genom högre grad av elektrifiering.

Sjöfarten, såväl handelsflottan, arbetsbåtar som fritidsbåtar står inför ett skifte från fossilt bränsle till alternativ som är bättre för miljön och klimatet. Andelen fartyg inom handelsflottan som drivs av till exempel LNG i stället för råoljebaserad energi ökar, men detta kommer inte vara tillräckligt för att nå de krav på koldioxidreduktion som kan komma att krävas av handelssjöfarten framöver. Det finns flera mer koldioxidneutrala alternativ till LNG som samverkansorganisationen Fossil Free Fuels (FF3) tydligt påvisar. Men dessa alternativ kommer troligen att behöva kompletteras med batteri-hybridlösningar för att nå ytterligare höga miljövinster. Regeringen har precis gett ett uppdrag till Trafikverket att analysera en övergång till fossilfria bränslen för statligt ägda fartyg (Mildén, M. 2018).

Elektrifiering är en möjlighet att minska utsläppen inom transportsektorn. Vid enbart eldrift minskar de lokala emissionerna helt och om elen produceras förnybart fås heller inga, eller få, koldioxidutsläpp. Det är viktigt att såväl befintlig som framtida sjöfart drivs av bränslen utan skadliga utsläpp. Elektrifiering är därför en möjlig lösning att minska eller eliminera utsläpp från fartyg, antingen genom helelektrifierad framdrift, eller hybridframdrift där elmotorer och förbränningsmotorer (helst med förnybart bränsle) tillsammans står för framdriften. Genom elektrifiering minskar också de lokala utsläppen av miljöskadliga ämnen och dessutom minskar bullernivåerna. Det har även en positiv inverkan på arbetsmiljön ombord.

Elektrifiering innebär annan drivline- och elsystemsarkitektur i fartygen och kan även ställa krav på laddningsinfrastruktur i hamnarna. Införandet av batterier och elmotorer i ett fartyg innebär potentiellt att en högre verkningsgrad kan erhållas genom att motorer och komponenter kan ligga i bättre arbetspunkter än motsvarande mekaniska drivlinelösningar.

För vägfordon har elektrifiering pågått under lång tid. Den första generationen av Toyota Prius gick in i massproduktion redan 1997. Även om det fortfarande finns relativt få helelektriska fordon på vägarna så börjar standarder och teknikutveckling mogna. Det finns stora möjligheter till synergier och lärdomar från det som skett inom vägfordon till sjöfarten, även om det också finns stora skillnader.

Det finns många utmaningar med eldrift. Utsläppsminskningen bygger på att den el som nyttjas producerats på ett förnybart och klimatvänligt sätt. Dessutom uppstår frågor om det finns tillräckligt med råvaror för t.ex. batteriproduktion och om dessa råvaror bryts och tas fram på ett miljövänligt sätt. Kobolt och sällsynta jordartsmetaller brukar nämnas i sammanhanget. Det finns även frågeställningar kring återvinning av t.ex. batterier. Dessa utmaningar hanteras inom olika forum och utvecklingsprojekt, och elektrifiering anses vara en bra väg framåt. Alla fartyg och båtar är dock inte lämpliga att elektrifiera, utan vissa är mer lämpade än andra, vilket berörs senare i denna rapport.

Rapporten skall ses som en syntes av studier och intervjuer med aktörer, inom eller nära angränsande till sjöfartsbranschen. Små som stora, privata som offentliga, industrier som akademier har intervjuats för att ge en bild av nuläget. Det sker mycket på området och nya innovativa projekt dyker upp frekvent. Tekniken utvecklas, affärsmodeller och beteenden förändras så det som är omöjligt idag behöver inte vara det i morgon. Det är därför av yttersta vikt att kontinuerligt arbeta med frågeställningarna och utmaningarna, för att i så snabb takt som möjligt nå en fossiloberoende transportsektor i allmänhet och sjöfart i synnerhet.

Målet med studien är att ge en tekniköversikt över dagens utveckling inom elektrifierad sjöfart men även att analysera parametrar som påverkar prestanda och kostnader för elektrifierade sjöfartssystem. Studien har även som mål att fånga upp aktörernas perspektiv kring drivkrafter för elektrifierad sjöfart samt vilka utmaningar som finns, och baserat på dessa, formulera projektidéer för framtiden.

Denna förstudie har genomförts inom Lighthouse som ett samverkansprojekt med deltagare från SSPA, RISE och Chalmers Tekniska Högskola. Ett speciellt tack också till Jim Sandqvist på Lindholmen Science Park för delaktighet i såväl genomförande som att initiera arbetet. Åsa Burman, Lighthouse, har ingått i projektgruppen och har tillsammans med Andreas Kron även stått för korrekturläsning och redigering inför slutversionen av rapporten.

2. Metod

Denna studie är en förstudie och avser att ge en översikt över pågående initiativ och identifiera utmaningar som kan adresseras i framtida projekt inom området elektrifierad sjöfart.

Utgångspunkten har varit att sammanställa information kring teknikutvecklingen från de initiativ som skett historiskt eller pågår just nu. Detta har skett dels genom en översyn av beskrivningar i rapporter och artiklar och genom intervjuer med aktörer som verkar inom området. Även erfarenheter från SSPA:s pågående projekt har bidragit till insikter kring möjliga elektrifieringsinitiativ i framtiden.

Teknikutvecklingen delades upp i fem områden (maskineri, energilagring, landanslutning, system samt elförbrukning ombord) för att beskriva nuläget på teknikfronten. Tillämpningen av olika elektrifieringsalternativ har beskrivits i förhållande till olika fartygssegment.

Arbetet med att ta fram de parametrar som kan vara dimensionerande för en elektrifiering av sjöfarten har genomförts av RISE. Valet av parametrar har grundats på, dels erfarenheter och forskning som RISE erhållit tillsammans med parter i olika projekt, kopplat till fordon på land såsom bilar, lastbilar och bussar och båtar/färjor, och dels intervjuer med relevanta parter i samband med detta rapportskrivande.

Intervjuer låg även till grund för att fånga upp aktörernas perspektiv kring drivkrafter och utmaningar. De aktörsgrupper som intervjuades var användare (hamnar, rederier), leverantörer (energilagring, elektricitet, fartygsdesign, system och komponenter, varv, landanslutning), policy/regelverk (myndigheter, klassningssällskap) och forskning (universitet, högskolor, institut). Totalt 20 intervjuer genomfördes, både genom personliga möten och per telefon. Nio hamnar kontaktades med ett frågeformulär via mail, där tre av hamnarna (Malmö, Trelleborg och Piteå) återkom med svar. Intervjuerna genomfördes av flera personer inom projektgruppen, både från SSPA och RISE. Utifrån de olika aktörsgrupperingarna delades ansvaret upp mellan olika personer i projektgruppen att ta kontakt och genomföra intervjun. Intervjuresultaten antecknades enligt intervjumallens temaområden. Tillsammans med gemensamma diskussioner fångades de övergripande drivkrafterna och utmaningarna upp.

Utifrån de identifierade utmaningarna har ett antal projektidéer konkretiserats som exemplifierar några av det forskningsbehov som finns inom ramen för elektrifiering av sjöfarten.

3. Beskrivning av elektrifierade system

3.1 Historisk utveckling

Användande av batterier och elektriska system för att ge fartyg framdrift är inte på något sätt en nyhet. Det första kända fartyget med batterier som energikälla för framdrivning byggdes 1839 för passagerartrafik i St. Petersburg (Alnes et al., 2017). Det var en 8 m lång båt med zink-platina-celler i sina batterier (Molinas and Monti, 2017). 1881 byggdes båten Eureka av Gustave Trouvé och drevs med bly-syra batterier (Nova Scotia Boat Builders Association, 2015). I Berlin utförde von Siemens tester med elektrisk framdrift i ett fartyg 1886 (Molinas and Monti, 2017). Batteridrivna flytande farkoster var populära under slutet av 1800-talet. Det var dock små båtar som huvudsakligen användes i sjöar, floder och kanaler, beroende på begränsad räckvidd och gles förekomst av möjligheter att ladda batterierna (Alnes et al., 2017). Efter introduktionen av förbränningsmotorer under tidigt 1900-tal minskade förekomsten av batterianvändning snabbt som kraftkälla för framdrift i fartyg och båtar.

Dieselektrisk framdrift utvecklades under tidigt 1900-tal för att lösa problemet att ingen väl fungerande metod att vända rotationsriktning på propelleraxeln uppfunnits, det var däremot enkelt att byta rotationsriktning på en elmotor. Den första direkt drivna och reverserbara axellinan med förbränningsmotor kom 1905 (Moreno and Pigazo, 2007). Det första kända dieselektriska fartyget var den ryska flodtankern Vandol, vilken sjösattes 1903 (Emblemsvåg, 2017; Moreno and Pigazo, 2007). Den amerikanska flottan beställde ett antal stridsfartyg med dieselektrisk framdrivning under perioden 1912 till 1919 (Moreno and Pigazo, 2007). Efter andra världskriget försvann de elektriska framdrivningssystemen nästan helt från civil sjöfart på grund av snabb utveckling av de mekaniska drivlinorna och allt effektivare och större förbränningsmotorer. Inte förrän under 1980-talet dyker exempel på dieselektrisk framdrivning upp igen på nya fartyg som inte är avsedda för militärt bruk. Under 1990-talet ger introduktionen av elektriskt drivna roder-propellrar ett uppsving för förekomsten av elektriska drivlinor (Moreno and Pigazo, 2007).

Intresse för och studier av hybriddrivlinor för fartyg hade ett visst uppsving under 1970-talets energikris, särskilt för mindre fartyg. Först under senare år har det funnits ett märkbart intresse för större batteriinstallationer i fartyg (Alnes et al., 2017). Wu och Bucknell (2016) rapporterade att det år 2016 fanns trettio kända fartyg med större batteriinstallationer i hela världen, av dessa endast ett med ett helt batteribaserat energisystem, den norska bilfärjan Ampere. Av de övriga var femton dieselektriska fartyg, huvudsakligen färjor och stödfartyg för offshore och dykeriarbete. Tre av fartygen var bogserbåtar med elassisterad mekanisk propulsion. De kvarvarande sju var biltransportfartyg som använde batterier för att lagra energi, genererad av stora solcellspaneler på väderdäck.

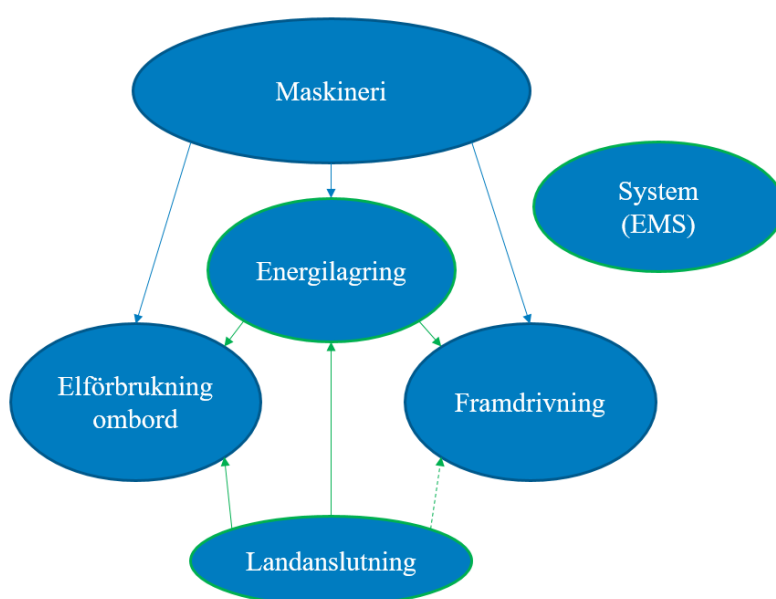
3.2 Tekniköversikt

Alla moderna fartyg har någon nivå av elektriska system ombord. Med elektrifiering av fartyg menas i denna rapport att elektricitet används som energibärare för fartygets framdrivningssystem, antingen i viss utsträckning, eller helt och hållet.

Idag är just dieselektriska lösningar vanliga inom vissa segment inom sjöfarten, framförallt för fartyg med:

- Högt elektricitetsbehov, exempelvis kryssningsfartyg och konstruktions- och produktionsfartyg/-riggar inom olje- och gassektorn.
- Höga krav på manövrerbarhet och dynamiskt positioneringssystem, främst inom offshore-segmentet, exempelvis PSV (Platform supply vessel), OSV (Offshore support vessel), AHTS (Anchor handler and Tug supply vessel) och borrh- och produktionsenheter.
- Fartygsdesign som försvårar traditionell drivlina på grund av geometriska restriktioner, exempelvis RoRo/RoPax-fartyg, bilfärjor och vissa typer av passagerarfärjor.

Nedan visas en generell gruppering över tekniska komponenter för ett fartyg (Figur 1). Det finns ett *maskineri* som levererar energi (mekaniskt med en roterande axel eller elektriskt genom kablar) för framdrivning och elförbrukning ombord. Under de senare åren har en ökad medvetenhet kring miljöfrågor, i kombination med teknikutveckling och fallande priser på litiumjonbatterier skapat både vilja och möjlighet till att utöka graden av elektrifiering ombord på fartyg till antingen batteridieselhybrid eller ren eldrift med energi från batterier. Detta görs genom att implementera ett *energilager* i systemet, som antingen kan laddas av maskineriet ombord och genom detta medge en effektivare användning av maskineriet, eller laddas genom landanslutning vid kaj och därigenom minska bränsleförbrukningen ombord på fartyget.



Figur 1. Fartygets tekniskdelar kopplat till energiförbrukning och framdrivning

I denna förstudie har en kort tekniköversikt gjorts för att kartlägga möjligheter och begränsningar för elektrifiering inom sjöfarten, samt identifiera områden där behov och potential för utveckling finns.

Det finns principiellt flera steg eller grader av elektrifierade lösningar ombord på ett fartyg.

- Den lägsta graden av elektrifiering som beaktas i denna rapport är *dieselelektrisk framdrivning*. Detta innebär att fartygets huvudmotorer är kopplade till generatorer, och elektriciteten som generatorerna genererar används för att driva elmotorer som är kopplade till fartygets framdrift.
- Nästa nivå av elektrifiering är *batterihybrid*, vilket innebär att fartyget är utrustat med energilagringmöjligheter (oftast batterier) för att jämna ut lasten på maskineriet. Detta innebär att maskinerna kan användas på ett bättre sätt då batterierna hanterar variationer i effektbehovet, vilket ger generellt sätt ger en högre verkningsgrad och en renare förbränning.
- Om möjlighet finns för laddning i land kan ett batterihybridsystem även kompletteras med energi från elnätet, ett s.k. *plugin-batterihybridsystem*. Detta minskar behovet av energiproduktion ombord, vilken ofta är fossilbaserad.
- Om fartyget har goda möjligheter till frekvent laddning och ett energi- och effektbehov som kan täckas av batterier ombord så kan det göras *helelektrifierat*, vilket innebär att det drivs helt av el som fartyget försetts med via landanslutning vid kaj.

Vilken grad av elektrifiering som är lämplig eller möjlig för ett fartyg beror på en mängd faktorer, beskrivna senare i rapporten.

De tekniska komponenterna i Figur 1 presenteras mer ingående nedan.

Maskineri

Maskineriets syfte i det elektrifierade systemet är att generera ström till förbrukare ombord. Det vanligaste är att en förbränningsmotor med generator, s.k. generatoraggregat, används, men även bränsleceller, solceller eller liknande skulle kunna vara tänkbara som alternativ.

Tekniskt sett är generatoraggregat väl etablerat och beprövat, från de minsta till de största effektbehoven, och klarar att arbeta med relativt snabba lastvariationer. En dieselmotor har mellan 40-50% verkningsgrad i omvandlingen från bränsle till vridmoment vid optimal last och vid låg last är verkningsgraden lägre. En generator har c:a 95% verkningsgrad, vilket sammanlagt ger en verkningsgrad från bränsle till elektricitet mellan 38-47%.

Bränsleceller är en teknologi som varit känd länge, där ett bränsle (oftast vätgas) och syre får reagera och elektricitet kan utvinnas direkt vid reaktionen. Verkningsgraden är över 50%, och kan vara så hög som 65%. Bränslecellernas svaghet är att de har svårt att producera el vid en varierande belastning, vilket dock kan lösas genom att de kombineras med batterier. Varierande belastning påverkar dessutom

bränslecellens livslängd negativt. Utöver detta finns utmaningar kring bunkring, förvaring och tillgång av vätgas. Dessa tre utmaningar, plus relativt hög kostnad gör att bränslecellernas kommersiella betydelse än så länge uteblivit. Framsteg inom energilagring kan dock möjliggöra ökad användning av bränsleceller.

Energilagring

Med energilagring menas applikationer som gör det möjligt att lagra elektrisk energi. I teorin kan detta vara olika typer av teknologier, exempelvis kemisk lagring i vätgas genom elektrolys, via laddningsbara batterier eller i superkondensatorer. I praktiken brukas idag i princip enbart laddningsbara batterier, då energitätheten är högre än för superkondensatorer, och energiförlusterna låga.

De batterier som används är framförallt litiumjonbatterier, även om det finns ett fåtal exempel där blysyrabatterier och nickelkadmiumbatterier används. Anledningen att litiumjonbatterier är dominerande är att energi- och effekttätheten är högre än för övriga batteritekniker.

De produkter som finns för den maritima marknaden byggs upp i fyra nivåer. Den minsta beståndsdelen i batteriet är battericellen, som består av anod och katod med en separator emellan och som är försänkta i en elektrolyt. För litiumjonbatteriet består katoden av en litiumförening, den vanligaste för maritimt bruk är LiNiMnCoO_2 (NMC), och anoden är oftast av grafit. Utöver NMC är även litiumtitanat och litiumjärnfosfat vanliga teknologier.

Ett flertal celler paketeras sedan samman och integreras med sensorer, kontrollsystem och fysiskt skydd, i så kallade moduler. Modulerna kopplas sedan samman för att uppnå önskad systemspänning till en batteristräng. Batteristrängarna bygger sedan upp batteripaketet.

De hittills största batteripaketerna är levererade till bilfärjor och är i storleksordningen 4 MWh.

Elförbrukning ombord

Med elförbrukning ombord menas den elenergi som behövs till fartyget, exkluderat fartygets framdrivning. Exempel på detta är ljus och luftkonditionering för passagerarutrymmen, stödsystem för pumpar, värme, elektronik etc. som krävs för styrning och reglering av fartyget. En designmässig utmaning för ett elektrifierat fartyg med batteriinstallation är värmekontroll, av två anledningar. Den första är att litiumjonbatteriet bör opereras mellan 20 och 25 grader C. Detta gör att det, för skandinaviska förhållanden, kan krävas både uppvärmning och nedkylning av batterierna. Utöver detta blir uppvärmning av utrymmen och besättning mer komplicerat, då det genereras mindre eller ingen värme i maskinerna, och uppvärmningen därför måste lösas på annat sätt.

Framdrivning

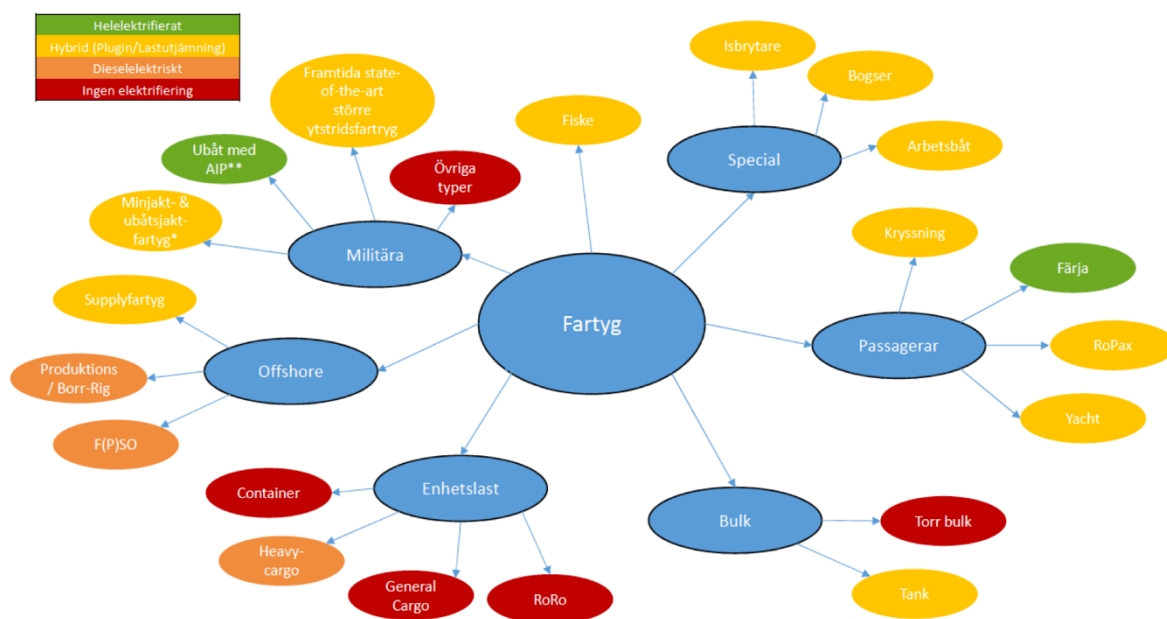
Med framdrivning menas de komponenter som används till framdriften av fartyg, där elförbrukaren oftast är en elmotor.

System

Jämfört med ett konventionellt framdrivningssystem kräver en högre grad av elektrifiering mer sofistikerade styrsystem för att styra hur elektriciteten går in och ut ur batterierna, för att säkerställa att det hela tiden finns tillräckligt med information om systemets hälsa och status till användaren, samt att säkerhetssystemen fungerar som de ska. Dessa funktioner samlas normalt i energihanteringssystemet (Energy Management System - EMS) som oftast integreras fartygets huvudtavla, d.v.s. den huvudsakliga kopplingstavlan för det elektriska systemet.

3.3 Fartygssegmentens olika grad av elektrifiering

I Figur 2 nedan visas en översikt över fartygskategorier där lösningar inom olika grader av elektrifiering existerar i dagsläget: helelektrisk (grön), hybrid (gul), dieselelektrisk (orange). De olika fartygskategorierna är passagerarfartyg, bulkfartyg, offshore, militärt, fiske och specialfartyg. Generellt gäller att fartyg som opererar med en hög variationsgrad i motoreffekt har högre potential vid elektrifiering för att öka verkningsgraden. Hög variationsgrad i motoreffekt erhålls främst när sträckor mellan hamnar är korta, eller när operationen till stor grad sker där det behövs mycket ändringar i kurs och gaspådrag, exempelvis inomskärs eller i hårt trafikerade farvatten.



* Kommer sannolikt att ha elektriskt lågfartsmaskineri för extremt låga hydroakustiska signaturer

** Gäller även autonoma undervattensfarkoster (AUV)

Figur 2. Fartygssegment och dess olika elektriska tillämpningar

Passagerarfartyg

Passagerarfartyg kan delas in i flera underkategorier. Den största skiljelinjen är mellan fartyg med större transportfokus, dvs passagerarfartyg i linjetrafik som exempelvis bilfärjor, pendlarfärjor och RoPax-färjor, och nöjesfartyg, såsom kryssningsfartyg och yachter.

För linjer med transportfokus längs en definierad rutt syns idag en hög grad av elektrifiering, främst i Norge, där exempelvis Statens Vegvesen har ett uttalat mål att reducera utsläppen från bilfärjetrafiken. Den norska nationella transportplanen 2018-2029 uttalar att regeringen skall säkerställa att nya färjor som är anslutna till det nationella offentliga vägsystemet använder noll- eller lågemissionsteknologi (Norwegian Ministry of Transport and Communications, 2016). Detta, tillsammans med statligt stöd, har resulterat i helt batteridrivna färjor, exempelvis Norleds "E/S Ampere". E/S Ampere, som är världens första helelektriska bilfärja, sjösattes 2015 och transporterar bilar och passagerare över Sognefjorden i Norge (Moore, 2015). Förutom denna satsning så är fler helelektriska färjor planerade i Norge. 2017 beställde färjerederiet Fjord1 fem fartyg från Havyard Shipyard, med planerad leverans under 2018 och 2019 (Moore, 2017). Finland sjösatte den batteridrivna färjan "Elektra" under 2017. Detta fartyg har en kapacitet att förflytta över 90 bilar och 375 passagerare. Elektra har ett batteri med en effekt på 1 MW, och tre dieseldrivna generatoraggregat för extra effekt i de fall isläget kräver det eller att batteriets laddning inte fungerar som det ska (Knight, 2017). I Sverige har HH-ferries under 2017 konverterat två av fartygen som trafikerar mellan Helsingborg-Helsingör till batteridrift, Tycho Brahe och Aurora. Färjorna har utrustats med specialbyggda litiumjonbatterier på 4,16 MWh, vilka ska laddas i hamn med hjälp av en helautomatisk robotarm som ska ansluta laddningskabeln (Fredelius, 2017). Tycho Brahe skulle tas i bruk i juni 2017, men premiären har skjutits upp p.g.a. tekniska problem, och det är i dagsläget inte känt när premiären kommer ske (TT, 2017).

Än så länge är det främst kortare sträckor som är helt batteridrivna. Överfartstiden för Ampere är c:a 20 minuter. För sträckor med längre överfartstider blir batterierna för stora och dyra för att investeringen ska motiveras. Scandlines har dock investerat i mindre batteripaket på färjorna som trafikerar Rödby-Puttgarden, vilket givit en betydande reduktion i bränsleförbrukning. Alla fyra färjorna på denna 18,5 km långa rutt är utrustade med 1,9 MWh i batterierna (Scandlines, 2017). Scandlines sjösatte 2016 två batterihybridfärjor i trafik mellan Rostock och Gedser, en 49 km lång rutt (Scandlines, 2017). Scandlines batterihybridfärjor var medfinansierade av EU genom "Trans-European Transport Network". Andra exempel på batterihybridfärjor inkluderar tre RoPax-färjor som trafikeras av Caledonia Maritime Assets i Skottland, varav den första sjösattes 2012 (Caledonia Maritime Assets, 2018). En eftermonterad batterihybrid passagerarfärja är den 23 meter långa "Ferry Happiness", vilken sattes i trafik i Taiwan 2017 (Hazarika, 2017).

För de riktigt korta färjelinjerna finns möjligheten använda en elektriskt driven linfärja med kabelanslutning som rullas upp på en vinda vid överfarer, något som Färjerederiet börjat implementera på ett antal linjer (Färjerederiet, 2017).

För de mer nöjesbetonade fartygssegmenten är det främst krav på nollutsläpp i särskilt skyddade områden, sjöar, kanaler samt i vissa hamnar, som driver systemen till att kunna operera en viss tid utan att använda bränsle.

Bulkfartyg

Bulkfartyg delas främst in i torr- och flytande bulk. Storleken på fartygen varierar

från c:a 4000 tons lastkapacitet upp till över 500 000 ton. De större fartygen är främst oceangående och är ej elektrifierade. I de mindre storlekarna finns det, främst inom produkttankersegmentet, exempel på dieselelektriska och enstaka batterihybridfartyg.

Offshore

För offshore-fartyg har dieselelektriska system länge varit dominerande, då dessa fartyg ofta har ett dynamiskt positioneringssystem, med uppgift att hålla fartyget stilla kring en punkt. Dessa dynamiska positioneringssystem kräver ofta låg medeleffekt, men för redundans är alltid flera extra generatoraggregat igång, för att snabbt kunna ge korta impulser från fartygets propellrar för att korrigera positionen när den driver av från önskad position. Lasten på dessa generatoraggregat blir då låg, vilket medför en låg verkningsgrad. För de typer av fartyg som ofta opererar med dynamisk positionering (DP-fartyg) har det visat sig effektivt att låta överkapaciteten bestå av ett batterisystem. Detta minskar då antalet körtimmar på motorerna, samt bränsleförbrukningen. Det första nybyggda offshore-supply-fartyget som fick ett batteri installerat var "Edda Ferd" som sjösattes 2013 (DNV GL, 2015). Ytterligare exempel på offshore-supply-fartyg som fick ett batteri installerat (500 kWh) 2013 var "Viking Lady" (DNV, 2015).

Enhetslast

Enhetslast, främst container, ser idag låg grad av elektrifiering. Detta då fartygen i stor utsträckning kan placera motorrummet relativt fritt, samt att fartygen generellt opererar med en konstant last, vilket är två tydliga argument för att använda en helt mekanisk drivlina. För enhetslastande fartyg som har högt elektricitetsbehov, exempelvis fartyg för kylda containers, används separata generatoraggregat för att förse lasten med tillräcklig elektricitet.

Militära fartyg

Av de militära fartygen är det idag ubåtar med luftberoende maskineri (AIP, air independent propulsion) som har högst grad av elektrifiering. Eftersom de har någon form av energigenererande system ombord (antingen baserad på bränslecellsteknik eller en Stirling-motordriven generator) är de någonstans mitt i mellan kategorierna "hybrid" och "helelektrifierad". De har klassats som helelektrifierade i och med att de har så stora batterisystem ombord. Även de alltmer förekommande autonoma undervattensfarkosterna (AUV, autonomous underwater vehicle) faller under denna kategori.

För framtida fartygsklasser avsedda för ubåtsjakt eller minjakt är bedömningen att dessa i allt högre grad kommer att ha ett elektriskt lågfartsmaskineri för att ge dem så hydroakustiskt tyst drift som möjligt då de utför sin huvuduppgift. Lågfartslägen kommer att kraftföras från endera av ett rent diesel-elektriskt eller ett hybrid-system med batterier ombord. Eftersom högfartsläge sannolikt sker via mekanisk direkt drift från förbränningsmotor har de klassats till kategorin "hybrid" oavsett om de har energilagrande system ombord eller inte.

Framtida större fartyg (fregatter, jagare eller större) från nationer med ambition att ha spjutspetsteknologi i sina marina stridskrafter kommer att inkorporera olika typer

av elektriskt drivna vapensystem. Dessa kommer att vara av endera eller båda av typerna elektromagnetiska "rail-guns" eller av någon variant av lasersystem. Dessa kräver mycket höga momentana effekter då de avfyras och behöver snabb återladdning för att ha tillräckliga eldhastigheter. Detta gör att de kommer att ha elektrifierade propulsionsystem och stora energilagrande system ombord (kondensator eller batteri-baserade). De har därför klassats som hybrid-typ.

Övriga militära fartyg bedöms byggas som nu, med en låg grad av elektrifiering ombord.

Specialfartyg

De specialfartyg som undersökts i detta projekt är bogserbåtar, isbrytare och arbetsbåtar. De lämpar sig alla väl för elektrifiering. Det finns redan exempel på bogserbåtar i urbana miljöer som är av pluginhybridtyp, där största delen av operationen kan ske med batterierna för att minska de lokala utsläppen. I Sverige bygger Luleå Hamn en elhybridbogserbåt, som planeras vara i drift i början av 2019 (Luleå hamn, 2017). Världens första hybridbogserbåt, "Caroline Dorothy", sjösattes 2009 i Long Beach, Kalifornien (Port of Long Beach, 2010).

Arbetsbåtarnas huvuduppgift medför ofta krav på stillaliggande samtidigt som eventuell utrustning ska försörjas med elektricitet. Detta är en operationsprofil som lämpar sig väl för elektrifiering, eftersom operationen kräver stora variationer i motoreffekt. Är arbetsområdet dessutom nära till land finns möjlighet till en helt batteridriven lösning eftersom det då är möjligt att ansluta laddström. Det norska fiskefartyget "Karoline" sjösattes 2015 och var byggt som en prototyp för batteriteknikinstallationer på mindre fiskefartyg (Aarsaether, 2017). Under fiske är batteriet den primära kraftkällan, medan ett dieseldrivet generatoraggregat startas vid högre laster, tex under transit eller för att ladda batteriet (Aarsaether, 2017). Ocean marine i Quebec, Kanada, bygger ett hybridfiskefartyg för hummerfiske, vilket planeras vara 100% elektriskt och i drift 2018 (Desmond, 2017).

Sjöräddningsoperationer som innehåller långa sekvenser av systematiskt sökarbete efter exempelvis försvunna personer med mycket långsam gång. Inom detta segment finns även möjligheter till att utnyttja eldrift i större utsträckning.

Genom Sjöfartsverkets mål att modernisera Sveriges isbrytande flotta har frågan kring elektrifiering väckts även där. Dagens isbrytare är dieselektriska, men operationsprofilen lämpar sig mycket väl för en batterihybridlösning.

3.4 Potential för elektrifiering i framtiden

Med ökande krav på minskade utsläpp från transportsektorn förväntas elektrifieringstrenden fortsätta, både på regional och nationell nivå, och främst inom de emissionskontrollerade områdena. Dagens batteriinstallationer har batterienergi begränsad till c:a 4 MWh, vilket är installerat på Tycho Brahe och Aurora, som trafikerar sträckan Helsingborg-Helsingör (Lambert, 2017). I princip samtliga fartygsprojekt med stora batteriinstallationer är gjorda med kraftiga ekonomiska subventioner.

Det finns exempel på projekt som siktar på högre installerad batterieffekt, t.ex. Yara Birkeland som planeras ha ett batteripack på 7-9 MWh (Kongsberg, 2018). I takt med att batteripriset minskar och energitätheten ökar, i kombination med att laddningstiden förkortas kommer dock den batterilagrade energin att utökas och längre sträckor kommer kunna elektrifieras. Ett område där elektrifiering bör kunna ske är längre RoPax-sträckor, exempelvis sträckorna Göteborg-Fredrikshamn, Strömstad-Sandefjord, Kristiansand-Hirtshals och Rödbby-Puttgarden. Stena har ett nystartat projekt att elektrifiera Stena Jutlandica som trafikerar Göteborg - Fredrikshamn, där ett första steg är att implementera batteridrift av en bogpropeller för att slippa starta ett generatoraggregat, vilket planeras vara i drift under sommaren 2018 (Lighthouse, 2018).

Ett område med ett stort intresse för elektrifiering är för fartyg på Europas inre vattenvägar. De fartyg som trafikerar här har låg effektförbrukning och har i princip alltid närhet till ett elnät, vilket gör dem mycket lämpliga för elektrifiering. Holländska Port Liner har utvecklat "Tesla of the canals", och planerar att sjösätta fem helelektriska pråmar i augusti 2018 med plats för 24 stycken tjugofots-containers (The Guardian, 2018).

Yara Birkeland är ett fartyg för containertrafik (för 120 TEU) designat av Marin Teknikk, som förutom att vara helelektriskt även ska utvecklas till ett autonomt fartyg att trafikera mellan tre hamnar längs Norges kust, Heröya, Larvik, Brevik (Kongsberg, 2018).

Utöver ovanstående exempel är det rimligt att tro att de flesta system som idag är dieselelektriska snart kommer finna lönsamhet i att övergå till ett batterihybridssystem, då detta kan minska effektförbrukning och gångtimmar på motorerna.

Utöver fartygssegment kan litiumjonbatteriers lastutjämnande effekt på motorerna ses som en möjliggörare för användning av gasformiga drivmedel, samt bränsleceller. En norsk satsning på bränsleceller är Bröderna Aas katamaran för passagerartrafik med mål att vara i trafik 2021 (TU, 2017a). Stora lastvariationer har visat sig problematiskt för exempelvis bränsleceller och LNG-motorer. Ett mellanlager av batterier kan eliminera lastvariationen på motorn eller bränslecellen och därmed öka säkerheten i systemet, samtidigt som bränsleförbrukningen minimeras.

3.5 Parametrar som påverkar prestanda och kostnader ur ett holistiskt perspektiv

Då elektrifiering av vägfordon har nått längre än för sjöfarten, är det rimligt att leta efter synergier mellan elektrifiering för sjöfarten och vägfordon. Elektrifiering av busslinjer har pågått några år och numera finns verktyg för att designa såväl erforderlig batterikapacitet som laddningseffekt i infrastrukturen, där totalkostnaderna är en viktig del av analysen. Appendix A beskriver kort avsikten med designverktyget och hur det fungerar. Översätts de viktigaste designparametrarna till elektrifiering av fartyg och dess infrastruktur drar vi

slutsatsen att bl.a. följande parametrar är dimensionerande för att göra kostnads- och energiberäkningar för elektrifierade fartyg.

Körprofil

Att driva fram ett fartyg och förse alla komponenter med el kräver energi som genereras av fartygets maskineri, alternativt genereras på land och lagras ombord på fartyget. Energiförbehovet som skall täckas är dels för framdrivningen, men också energiförbehov i fartygets övriga förbrukare, exempelvis pumpar, belysning och ventilation. Hur fördelningen mellan energiförbehov för framdrivning och övrig last ser ut varierar beroende på fartygstyp. Effektbehovet varierar över tid och är beroende på hur fartyget opereras. Effektbehovet varierar bl.a. av följande orsaker:

- Operationsprofilen, där operationer som angöring och avgång, accelerationer, transit i marschfart har olika effektbehov och olika variationer i effektbehov. Förutom framdrivning och manövrering så varierar t.ex. värmebehovet över dygnet och årstiderna. Till detta kommer variationer i vattenström, våghöjd, vind och istäcke i operationsområdet som har en påverkan på effektbehovet. För att klara av operation mellan två kajplatser måste stor hänsyn tas till de dagar effektförbrukningen är som högst, för att säkerställa att tillgängligheten på fartyget är tillräcklig.
- Hur fartyget opereras påverkar energiförbrukningen. Långsamma accelerationer och hastigheter kräver mindre energi än snabba hastighetsändringar. För förbränningsmotorer är verkningsgraden generellt sämre vid snabba accelerationer och höga hastigheter, så bränslebesparingar kan göras genom mer varsam styrning av fartyget.
- Området där fartyget opererar. Uppgrundningar och djup ger exempelvis squat² och bankeffekter³.

Fartygsspecifika parametrar

Utöver elektrifieringsspecifika parametrar, påverkas energiåtgången för ett fartyg framförallt av de hydrodynamiska parametrarna såsom:

- Skrovets utformning (deplacement, trim, djupgående, typ av framdrift, roderlösningar, tröghetskrafter och moment).
- För bussar är batterivikten en viktig parameter som direkt påverkar energiåtgången och därmed dimensioneringen av batteristorleken. För fartyg är batterivikt, storlek och placering av betydelse för fartygets stabilitet och hydrodynamiska motstånd, främst för mindre fartyg. Detta gör att sambandet mellan batteri och skrov är svårt att beskriva, då ett tungt batteri ökar

² Squat är ett fenomen som inträffar när fartyg framförs i grundare vatten eller farleder samt kanaler, vilket innebär att fartyget får ett ökat djupgående, se <https://sv.wikipedia.org/wiki/Squat>.

³ Om ett fartyg och avståndet till kanalbank eller liknande minskar på den ena sidan, exempelvis babords sida, uppstår ett större tryck på babords bog medan trycket blir mindre utefter babords sida. Detta beror på att det snabbare strömmande vattnet på babordssidan på grund av strömningshastigheten har mindre bärighet. Fartyget får då en tendens att gira styrbord samtidigt som akterdelen, på grund av det mindre vattentrycket utefter babords sida, sugas babord över. Denna verkan kallas bankeffekt.

motståndet, vilket då skulle kräva ett ännu tyngre batteri. Därför bör, för bästa batteri-elektriska fartygssystem, skrovet och batteriinstallationen göras integrerat.

Laddinfrastrukturen

Elektrifiering av maritim sektor innebär också behov av att tillgängliggöra infrastruktur för laddning av batterier. Det finns redan idag anslutning till landbaserade elnät i de flesta hamnar (Sveriges Hamnar, 2016), men det saknas en laddningsinfrastruktur för elektrifierade fartyg där energiöverföringen, utöver övriga de system som är aktiva under angöring, även skall täcka hela eller delar av framdriften. Följande är viktigt att tänka på avseende laddningsinfrastrukturen och energin som skall föras över:

- Laddarnas placering. För en busslinje är det oftast enklare att fysiskt hitta platser, men i fartygsfallet kan detta vara svårare med tanke på t ex. tillgänglig kapacitet på ”matarledning” nära kaj.
- Laddarnas effekt. Vissa fartyg ligger länge vid kaj och då kan energiöverföringen ske med lägre effekt, medan det i andra fall krävs hög effekt för att föra över erforderlig energimängd på kort tid. Ju högre laddningseffekt, desto kortare tid att ladda, men högre laddningseffekt innebär också högre kostnader och kräver högre effekt från det matande nätet.
- För att minska kostnaderna och kraven på elnätet är det möjligt att med låg effekt ladda ett batterilager som placeras på kajen, så att fartyget när det lägger an och behöver laddas kan göra detta med högre effekt från energilagret. Detta alternativ kräver dock en stor investering och måste avvägas mot kostnaden att tillhandahålla erforderlig effekt direkt i anslutningen.

Kostnadsberäkningar

För att kostnadsberäkna olika lösningar så behövs data för investerings-, drifts- och underhållskostnaden. Specifikt behövs:

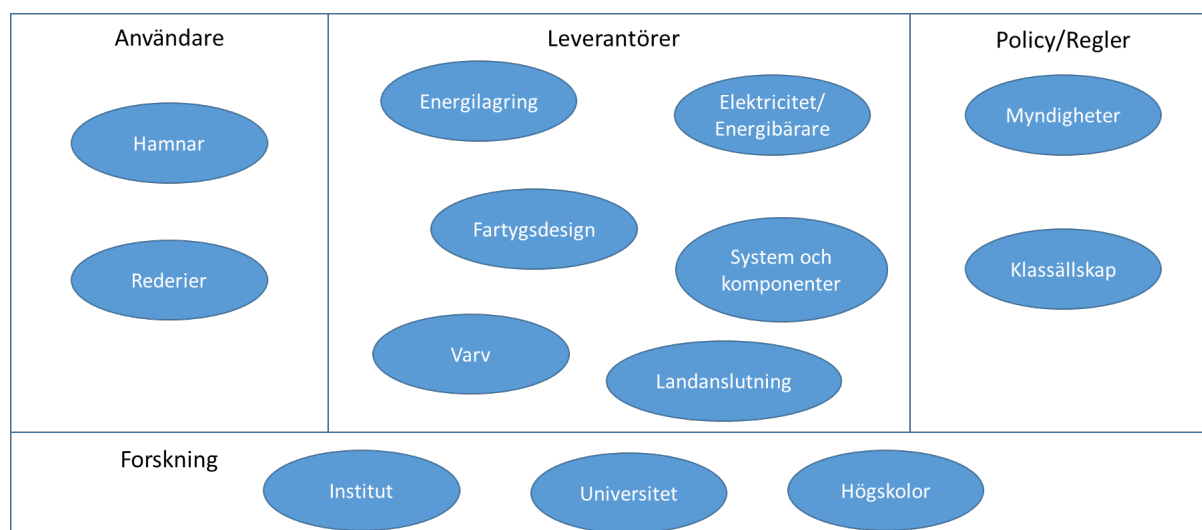
- Pris på olika systemkomponenter såsom, batterier, laddningsinfrastruktur med eventuella mellanlager, inkoppling mot elnätet, samt modifiering av kajer och kostnader för lokalisering av laddningsinfrastrukturen.
- Pris för byggnation av fartyg, eller pris för ombyggnation av existerande fartyg.

I avskrivningskalkylen samt vid kostnadsberäkningarna är siffrorna 7, 10, 20, 50 år väsentliga. 7 år för ett batteris livslängd används på fordonssidan, 10 år för upphandlingstid av kollektivtrafik (för tex Västtrafik som även har färjetrafik), 20 års livslängd för ladd-infrastruktur och 50 år (eller mer) teknisk livslängd för båten. Det är viktigt att ha ett helhetsperspektiv på olika aktörers bidrag/kostnad i den maritima sektorn då kostnads- och intäktslogiken förändras med elektrifiering.

4. Perspektiv från aktörerna

4.1 Aktörer som är involverade med att utveckla elektrifierade fartyg

Flera olika aktörer är involverade i elektrifiering av sjöfarten, se Figur 3. Centrala aktörer är rederierna, som beställare av fartyg och ny teknik, men även hamnarna, som tillhandahållare av laddningsinfrastruktur. Teknikleverantörer spänner inom ett antal områden, energilagring (t.ex. batterier eller bränsleceller), system och komponenter till ombordvarande system, fartygsdesign och landanslutning. Även leverantörer av energibäraren, såsom elektricitet eller vätgas, är viktiga aktörer i ett elektrifierat system. Varven är på ett sätt användare av den teknik som tillhandahålls av leverantörerna, men är också den aktör som i slutändan levererar nybyggda fartyg till rederierna. Även myndigheter och klassningssällskap har en viktig roll i utformningen av långsiktiga mål, regler och standarder. Forskningsaktörer är delaktiga i systemet och kan skapa möjligheter för nya tekniska lösningar inom ramen för forskningsprojekt, eller förståelse för systemet i sin helhet. Som nämnts i tidigare kapitel så är det just nu en snabb utveckling kring elektrifierade fartyg. Utifrån de intervjuer som genomförts, med aktörer som representerar en stor bredd av företag inom dessa aktörsgrupper, redovisas nedan de drivkrafter och problem som adresseras i pågående satsningar och identifierade utmaningar inför framtiden. Det är en stor bredd i antal aktörer, vilket ställer höga krav på hur insatser ska samordnas för att få till väl fungerande elektrifierade fartygsoperationer.



Figur 3. Aktörer involverade i elektrifiering av sjöfarten.

4.2 Drivkrafter

Företagen som har intervjuats uttrycker olika typer av drivkrafter som kan kopplas till miljö, ekonomi, marknad och säkerhet.

Klimat- och miljöincitament

Det finns ett mycket tydligt politiskt mål att nå ett fossilfritt transportsystem, och elektrifiering av sjöfarten är, som nämnts tidigare, en potentiell möjlighet, både då svensk el till största delen är klassad som fossilfri, och som möjliggörare för användning av alternativa energikällor.

Med "miljö" avses här framförallt lokala effekter av utsläpp med potential att orsaka skador och störningar på människor, natur och fysiska strukturer. Exempel på sådana utsläpp och emissioner är kväveoxider, svaveloxider, partiklar inklusive sot samt buller och vibrationer. Indirekt påverkas även "miljö" på andra platser än där de lokala utsläppen sker, som vid tillverkning och transport av komponenter, system och använda förbrukningsvaror för fartyget.

Med "klimat" avses här effekter av utsläpp med potential att påverka det globala klimatet där exempel på sådana utsläpp är framförallt koldioxid och metan. Även för "klimat" finns effekter från utsläpp på andra platser än där fartyget vistas från dess tillverkning och användning.

De svenska klimat- och miljömålen syns tydligt på myndighetssidan, där bl.a. kommuner driver mot fossilfrihet och/eller minskad miljöpåverkan i de lösningar som analyseras inför framtiden. Ett exempel är Kungälv kommun, som just nu ser över möjligheten att konvertera Marstrandfärjan till eldrift. Hos aktörer som har en statlig eller kommunal koppling, såsom de rederier som driver den kommunala kollektivtrafiken, blir även denna ambition tydlig. I stadsmiljö är minskade utsläpp av NO_x och partiklar en stark drivkraft för att förbättra den lokala luftkvalitén.

Många av Sveriges hamnar erbjuder idag möjlighet till landanslutning som ett led i att förbättra den lokala miljön och att erbjuda rederierna möjligheten att minska sitt klimatavtryck. Ur ett europeiskt perspektiv kan man se att landanslutning med högspänning endast finns i var femte hamn medan svagpänning (som erbjuds till handelsfartyg i t.ex. i Stockholm) är mer utbrett (EcoPorts, 2017). För att möjliggöra för flera och större fartyg att ansluta sig till landström i svenska hamnar krävs att laddinfrastrukturen utvecklas.

Flera hamnar erbjuder ekonomiska incitament i form av olika typer av anlöpsrabatter för miljöfrämjande insatser. Göteborgs Hamn har exempelvis miljörabatter för de redare som ansluter till elnätet vid kaj via den infrastruktur som tillhandahålls, och även reducerade avgifter för de fartyg som når upp till särskilda miljöindex enligt ESI (Environmental Ship Index) och CSI (Clean Shipping Index) (Göteborgs Hamn, 2017). Miljörabatter eller incitament finns även i andra hamnar, till exempel hos Stockholms Hamnar, där redare erbjuds en miljon kronor i bidrag för ombyggnation av fartyg som möjliggör elanslutning vid kaj (Stockholms Hamnar, 2017).

Landanslutning av fartyg har även en positiv effekt på bullernivåerna i hamnen, då hjälpmaskineriet kan stängas ned. Minskade bullernivåer kan också möjliggöra ökade möjligheter att behålla eller lokalisera kajlägen för färjor och andra fartyg i urbana miljöer.

Ekonomiska incitament

Ekonomiska incitament som driver på elektrifiering inom sjöfarten saknas hos de flesta aktörer. Underhållskostnaden för maskinsystemen på ett batteridrivet fartyg väntas bli mycket lägre och ses som en möjlig ekonomisk besparing, men kostnaderna för elektrifieringen är höga. Dessutom konkurrerar idag inte ett elektriskt system, med batteri som energibärare som laddas från land, på samma

villkor som en traditionell förbränningsmotor, då elektricitet för framdrivning beskattas men inte diesel. Om skatten på landström som används för propulsion togs bort, skulle den ekonomiska drivkraften att elektrifiera även öka avseende energikostnaden.

Det är också en stor initial investeringskostnad att konvertera ett befintligt konventionellt fartyg till eldrift eller att bygga ett nytt. Det är tydligt i flera exempel inom färjetrafiken att en elektrifieringsinvestering är beroende av medfinansiering från den offentliga sektorn för att vara möjlig att genomföra. Exempelvis stod EU-medel för en stor andel (40%) av investeringskostnaden i HH-ferries konverteringsprojekt av de två systerfartygen Tycho Brahe och Aurora. I Stenas pågående satsning för att ta det första steget mot elektrifiering av RoPax-färjan Jutlandica, är c:a hälften av den totala finansieringen offentlig.

När dynamisk positionering är en stor del av driftsprofilen kan det vara ekonomiskt försvarbart med en investering i batteribankar då det här ofta finns effektiviseringspotential genom minskade bränslekostnader, men även andra fördelar i form av prestanda och snabbare effekttillgång. Inom offshoreindustrin är dynamisk positionering vanligt, fartyg och olika typer av plattformar använder med hjälp av ett välutvecklat styrsystem korta impulser⁴ från sina propellrar för att hålla eller gå till en specifik position. Exempelvis borrhävar, konstruktionsfartyg, Platform Supply Vessels och ankarhanteringsfartyg. Dynamisk positionering i kombination med batterihybridisering gör operation mer effektiv och detta är ett segment där hybridlösningar är starkt på frammarsch. Den korta responstiden som en batterihybridlösning har gällande tillgänglig kraft, innebär att fartyget snabbare kan kompensera för en avvikelse, vilket medför säkrare operation av fartyget och miljövinster både för DP-fartyget men även den installation/rigg man ligger och jobbar vid. Detta ger minskade utsläpp i området. Detta är en trend som även större riggar/bostadsplattformar ser som vägen framåt, förutom att en batteribank ger ovan nämnda fördelar så är batteribanken också ytterligare en försäkring mot black-out och möjliggör att de resterande hjälpmaskinerna opereras mer optimalt. Det medför även en stor vinst i underhållsarbetet, då det möjliggör mer optimerade driftscykler på maskinerna och möjligheten att göra löpande underhåll då riggen/plattformen då dynamisk positionering används.

Marknad

Flera leverantörer ser en ökad förfrågan av elektrifieringslösningar. En av batteritillverkarna nämner en stark ökning på offertförfrågningar, men fortfarande är det få som går vidare till affär. Även inom automooring (system för automatisk förtöjning vid kaj) och landanslutningar förutspås en ökad efterfrågan. När det gäller bränsleceller så upplevs en stark marknad för framtida projekt i Norge.

⁴ Dynamisk Positionering bygger på att systemet "spänner upp rummet" med kraftvektorer, man använder kontinuerligt propellerkrafter och reglerar dem dynamiskt för att hålla/förflytta sig. Saknas en yttre kraft som vind eller ström, ställer man propellerkrafter mot varandra för att skapa en någorlunda stabil miljö för systemet.

Även om det är en stor kostnad att investera i elektriska lösningar på fartygen så finns ett potentiellt PR-värde i att elektrifiera, vilket kommit upp i diskussion med rederiaktörer.

Säkerhet

Värt att nämna är även den potential till ökad säkerhet som finns med ett elektriskt system. Detta har inte nämnts specifikt av aktörerna, men blir tydligt vid jämförande av prestanda i en traditionell drivlina och en elektrisk. Det finns goda möjligheter att bygga en hel- eller delelektrifierad drivlina med en mycket hög grad av redundans. Ett exempel på en ibland efterfrågad funktionalitet som skulle kunna lösas billigare med elektrifiering är take-me-home-funktion, vilket betyder att ett extra batteripack skulle kunna fungera som motorkraftreserv vid en eventuell blackout.

4.3 Problem som adresseras i pågående projekt

I pågående initiativ för helelektriska lösningar av fartyg så finns framförallt exempel inom kortväga färjetrafik, där det på den svenska sidan finns ett antal befintliga fartyg som opererar i dagsläget. Som tidigare nämnts; HH-ferries Aurora och Tycho Brahe går just nu mellan Helsingborg och Helsingör, Sjövägen och Movitz som opererar i Stockholms skärgård och de fyra linfärjor som trafikerar Hamburgsundsleden, Malöleden, Kastelletleden och Kornhallsleden.

Pågående svenska satsningar är exempelvis en ny plugin-hybrid färja, med upp till 4 timmars batteridriftskapacitet, som just nu är under byggnation och planeras ingå i kollektivtrafiken över Göta Älv i Göteborg (driftstart beräknas till sent 2018 eller tidigt 2019). Dessutom pågår utredningar kring möjlig framtida elektrifiering av Marstrandsfärjan som trafikerar mellan Koön och Marstrandsön norr om Göteborg. På hybridsidan arbetar just nu Stena Teknik med ökad elektrifiering av Jutlandica, där batteridrift av en bogpropeller, i stället för att starta en hjälpmaskin, planeras i drift sommaren 2018.

Teknik

Idag används i princip uteslutande litiumjonbatterier vid nya installationer, där effekt och energi anpassas till fartygets operationsprofil. Batterier med ett energiinnehåll på upp till 4 MWh finns i dagsläget installerade i befintliga system (t.ex. HH-ferries). Storleken på batteriet avgörs av kostnader, vilket energilagerbehov som finns och vad batterileverantören kan erbjuda i dagsläget.

Det som framförallt skiljer sig mellan olika leverantörer är vilken batterikemi som används samt om man använder luft eller vattenkylning av batterierna. Även hur man övervakar batteriet skiljer sig, såsom att detektera hög temperatur, avvikelser i spänning, fukt i cellerna och gasutveckling.

Varje fartyg som idag installerat batteri har sin unika lösning med avseende på de kringssystem där helelektriska lösningar krävs. Standard finns när det gäller kablage och kontakter, spänningar och frekvenser, men ej på funktionalitet och teknik ombord. Eftersom varje fartyg har sina unika förutsättningar, gör detta att en stor insats behövs för att ta fram dessa specialiserade kringutrustningar. Stena bedömer

att c:a 1/3 av budgeten när Jutlandica konverteras till hybriddrift kommer gå till kringutrustningen, vilket är lika stor del som batteri investeringen.

Laddinfrastruktur

Det finns idag möjlighet för fartygen att ansluta sig till elnätet i flertalet av de stora svenska hamnarna, detta genom landanslutning ("cold ironing" eller "shore side electricity"). Detta är främst avsett att minska utsläpp och buller från fartyget när det ligger vid kaj, genom att de kan stänga av fartygets generatoraggregat som genererar den el som fartyget behöver vid kaj. Även om denna service tillhandahålls av hamnarna så är det oklart hur många fartyg som faktiskt utnyttjar denna möjlighet. Som nämnts ovan finns miljödifferenterade hamnavgifter i flera svenska hamnar, bl.a. för att initiera användningen av elanslutning när fartygen ligger vid kaj. Hamnarna har olika modeller för debitering beroende på vilken infrastruktur man har, om man erbjuder svagström (220V) och/eller starkströmslösningar >10kV, se exempelvis Trelleborgs hamn (se Trelleborgs hamn, 2018). Till denna problematik tillkommer en internationell dimension, då det ombord på fartygen finns flera olika lösningar när det gäller frekvenser och spänning.

Varje enskilt fartyg har dessutom olika förutsättningar för hur laddningen kan ske vid kaj. För HH-ferries fartyg Aurora och Tycho Brahe sker anslutningen till kabeln vid kaj med hjälp av en robotarm som automatiskt kopplar fartyget till elnätet för att optimera tiden för laddning, vilket även är en mer säker lösning då den höga effekten i kabeln (upp till 12 MW) är en riskfaktor vid manuell hantering. För att operationen skall fungera effektivt krävs att laddningstiden är mellan 5-10 minuter i vardera hamn. Detta har varit en utmaning i projektet.

För andra initiativ i Göteborgs- och Stockholmsregionen sker laddningen med direktansluten kabel. För Stenas Jutlandica planerar man att använda en befintlig och väl fungerande elinfrastruktur på plats i hamnen (1,6 MW vid 10kV), med vilken det är möjligt att direktansluta fartyget med kabel. De fyra kabelfärjorna i Sverige som har elektrifierats har direktanslutning av el via kabel under färd (Nohrstedt, 2017).

Säkerhet

En svensk studie (Andersson et al., 2017) har nyligen analyserat vilka säkerhetsåtgärder som finns tillgängliga för litiumjonbatterier idag (exempelvis olika sätt att upptäcka brand i batteri, hur bränder kan begränsas och explosioner undvikas samt ventilationens roll). Ett batteri innehåller en stor mängd elektrokemisk energi och därför finns det risk för ett accelererat förlopp vid brand, eftersom att kortslutningar kan medföra hastiga temperaturstigningar, vilket får branden att sprida sig med ytterligare hastighet. Är temperaturen tillräckligt hög hamnar batteriet i s.k. "thermal runaway", där batteriet brinner snabbt och varmt, och stora mängder brännbara gaser utvecklas, vilket kan leda till kraftiga ytterligare bränder och explosion (Andersson et al., 2017). Angreppssättet för att hantera en batteribrand är att kraftigt kyla ned härden, och här finns flera olika sätt där vatten kan vara ett hjälpmedel, men inte alltid lämpligt (Andersson et al., 2017). Denna förstudie har identifierat en utmaning i hur säkerheten kring batteridrift ombord på

fartyg ska hanteras. Internationellt har säkerhetsfrågan även adresserats på forskningssidan, bl.a. av Rao et al. (2015) och Luo et al. (2018) som föreslår ett antal åtgärder för att hantera säkerhet med litiumjonbatterier vid brand, vilket är input till utvecklingen av batteriet och hantering av brandrisken.

För att kunna ta en batteriinstallation i drift så krävs en riskanalys enligt IMO Guidelines MSC.1/ Circ.1455. I detta ingår att göra en HAZID, vilket innebär att kontrollera hur batteriet beter sig under drift för det specifika projektet, och identifiera möjliga risker, t.ex. kopplat till spänning och temperatur. Ett utfall kan vara för hög temperatur för att kylningssystemet inte fungerar, vilket kräver en rutin för att kolla cirkulationstanken vid ett specifikt intervall. Om man får för låg temperatur på batteriet indikerar detta behov av värmeslinga.

Ett exempel på en batteribrand och explosion som skett är på fartyget Campbell Foss 2012. En riskanalys och omdesign genomfördes och ett nytt batterisystem återinstallerades 2016, se Hayman (2016). Riskanalysen resulterade i flera förslag på åtgärder som implementerades i den nya installationen.

Miljöpåverkan från hybrid- och batterifartyg ur ett LCA-perspektiv

Även om användning av batterier som energilagrande system inte orsakar lokala emissioner till luft eller vatten då de används i ett fartyg orsakar de annan miljöpåverkan, från tillverkningen och transporten av batterisystemet, från tillverkningen av den el som laddar batterierna, och från batteriernas skrotning och eventuella återanvändande. Få studier har genomförts avseende livscykelanalys av miljöpåverkan från fartygsanvända batterisystem.

Maritime Battery Forum (2016) utvärderade miljöpåverkan i ett livscykelperspektiv för ett OSV-fartyg med elektrisk hybriddrivlina och en fullständigt elektrifierad passagerarfärja, där båda fartygen opererades i Norge. Ling-Chin och Roskilly (2016a; 2016b; och 2016c) genomförde livscykelanalyser för ett antal hybriddrivlinekoncept för en tänkt RoRo-färja för bruk inom EU. Analyserna genomfördes både för nybyggnation och för konvertering av existerande fartyg. Maritime Battery Forum (2016) rapporterade också att det vid tiden för deras arbete inte hittades några publicerade livscykelanalyser för fartygsplacerade batterisystem. Vid samma tillfälle påpekades också att det finns flera skillnader mellan batterisystem framtagna för fartyg och de som är framtagna för bilar. Det hävdades att GWP (global warming potential) räknat per kWh installerad energimängd var högre för fartyg än för bilar. Detta ansågs i första hand bero på behovet av mer omfattande system och komponenter för batteriernas montage- och kontrollsystem vid fartygsanvändning.

Under 2017 genomfördes en livscykelanalys av energianvändning och emission av växthusgaser för litiumjonbatterier avsedda för lättare lastbilar och transportfordon (Romare och Dahllöf, 2017). Studien redovisade att en stor andel av energianvändning och emissioner för hela livscykeln för batterierna uppkom vid tillverkningen. Vidare redovisades att de totala växthusgasemissionerna för laddning av batterierna erhöll en stor påverkan av emissionskoefficienterna för den elproduktionsmix som analysen utgick från. Studien påpekade att det finns behov av att få fram mer primärdata av högre kvalitet avseende påverkan från hela

produktionskedjan för att bättre kunna beräkna miljöpåverkan från litiumjonbatterier i ett livscykelperspektiv.

Elproduktionsmixen för landström som används för att ladda batterisystem på fartyg varierar stort mellan olika länder, vilket ger en betydande skillnad i miljöpåverkan från operationen av fartyget. I Norge kommer merparten av nyttjad el från vattenkraft, vilket ger en CO₂-ekvivalent av 30 gram CO₂ per kWh el. Medelvärdet för hela EU är 470 gram CO₂/kWh enligt databasvärden från Ecoinvent (Maritime Battery Forum, 2016). Studien fann trots användande av den högre siffran för CO₂-belastning för nyttjad el att GWP för operation av de studerade fartygen med batterisystem laddade från landström var lägre än GWP för en dieselmekanisk drivlina. Studien visar också på de stora skillnader i livscykelmiljöpåverkan som uppstår beroende på vilken elmix och relaterad CO₂-belastning som olika regionala förutsättningar ger upphov till. En motsvarande studie av DNV GL (2015) bekräftar också att för fartyg med batterisystem som laddas från elnätet i land erhålls stor spridning i potentialen för besparing av livscykelberäknad GWP, beroende dels på CO₂-belastningen för den el som används och dels på vilka emissioner batteriernas produktionskedja har.

Fallstudierna som beskrivits av Ling-Chin och Roskilly (2016a) inkluderade 26 kategorier av miljöpåverkan i analyserna. En konventionell dieselmekanisk drivlina på ett RoRo-fartyg i trafik internt i EU jämfördes med ett ombyggt fartyg kompletterat med batterier, solceller på däck och landanslutning i hamn. En ytterligare jämförelse gjordes mellan den konventionella drivlinan och ett nybyggt fartyg med helelektrisk drivlina inkluderande generatoraggregat ombord, batterisystem, solceller och landanslutning i hamn. Analystiden sattes till 30 år för att innefatta hela fartygets livslängd inkluderande skrotning av fartyget. Det ombyggda fartyget erhöll en reduktion av 8 % av använd bränslemängd medan nybygget erhöll en bränslereduktion av 30 % jämfört med det icke-ombyggda fartyget med konventionell drivlina.

Den största miljöpåverkan erhöles från fartygets driftfas samt dess skrotning. Det nybyggda fartyget med sin hybriddrivlina erhöles reduktion i 20 av de analyserade kategorierna av miljöpåverkan - för de övriga sex erhöles en ökad miljöpåverkan (Ling-Chin and Roskilly, 2016 b).

De få analyser som gjorts av miljöpåverkan i ett livscykelperspektiv för batterisystem och elektrifierade drivlinor på fartyg visar att den beräknade miljöpåverkan kraftigt påverkas av ansatta primärvärden och antaganden för produktionskedjan för batterierna, livslängd och hantering av kasserade batterier samt elmixen som används i fartygets operationella fas. Det finns behov av ytterligare arbete inom detta område för att erhålla bättre underbyggda grunddata och därmed en bättre bas för de antaganden som görs för framtida beräkningar av miljöpåverkan.

Pågående forskning i Sverige

Chalmers, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper (M2), har ett fokus på maritim forskning och här pågår flera projekt som är direkt relaterade till elektrifiering av sjöfarten. M2 har två dedikerade avdelningar för det maritima området, Marin Teknik respektive Maritima Studier. Båda dessa avdelningar arbetar inom området eldrivna fartyg. På avdelningen Marin Teknik pågår bl.a. ett projekt

kring elektrifiering av fartyg i is, vilket är ett samarbetsprojekt med bl.a. Finland med finansiering från Nordiska Ministerrådet. Vidare pågår mindre projekt kring elektrifiering av utombordsmotorer, dock främst avsedda för fritidsbåtar. Det finns också ett projekt där man utvecklar en befintlig energimodell, som idag inkluderar förbränningsmotorer och segelassisterad framdrift, även för elmotorer. På avdelningen Maritima Studier genomförs en förstudie tillsammans med Styröbolaget där både el för framdrift respektive autonom förtöjning studeras. Vidare arbetar forskargruppen "Sjöfartens Miljöpåverkan", inom Maritima Studier, med flera projekt kring alternativa bränslen och energimetoder, där även eldrift ingår som ett fall. Här jämförs bl.a. miljöpåverkan genom en förenklad livscykelanalys för ett närsjöfartsfartyg som antingen är eldrivet eller använder fossila bränslen från el. Även ett examensarbete kring batterier i hybriddrift har initierats.

SSPA, som ägs av Chalmers Stiftelse, bedriver forskning och erbjuder tjänster inom den maritima branschen, och har identifierat en ökad förfrågan på uppdrag kopplade till elektrifiering av sjöfarten. Just nu deltar SSPA i två internationella forskningsprojekt där elektrifiering av sjöfart är aktuellt inom Interreg ÖKS (NÖKS II, 2015-2018) respektive Interreg Nordsjön (IWTS - Inland Waterway Transport Solutions, 2017-2020). Dessa projekt adresserar möjligheter för överflyttning av gods till vattenvägarna. Möjliga fartygsutformningar och alternativa framdrifter för tillämpning i logistikkoncept i inre vattenvägar analyseras. I IWTS är elektrifiering av sjöfart på inre vattenvägar en teknik som kommer inkluderas i föreslagna fartygskoncept, där möjligheterna för tillämpning i fallstudier på Göta Älv och Väneren kommer att analyseras och simuleras. Inom projektet kommer man studera på vilket sätt elektrifiering kan spela en roll i ett hittills outforskat segment inom fartygssektorn (containertransporter i pråm/feedertrafik på inre vattenvägar). Utöver dessa pågående projekt har EU-projektet BB Green, som pågick 2008-2015, utvecklat och demonstrerat ett nytt fartygskoncept för en höghastighetsfärja som möjliggjorts av en luftkuddeassisterad skrovform för att minska effektbehovet, i kombination med elektrifiering. SSPA var involverad i att utveckla och testa skrovutformningen och, i förlängningen av BB Green-projektet, även utföra ytterligare operationella tester av fartyget i ett projekt finansierat av Stockholms Läns Landsting (2016-2017).

RISE, som är ett helstatligt forskningsinstitut i Sverige, bedriver forskning och utveckling inom ett stort antal områden och också inom transportområdet, inklusive den maritima branschen. RISE arbetar med säkerhetsfrågor till sjöss, bl.a. batteribränder. RISE Viktoria, en del inom RISE som enbart fokuserar på hållbar mobilitet, driver och deltar i ett flertal maritima projekt, dock få med elektrifieringsfokus. Nämnas kan dock ett tidigt examensarbete som undersökte lämpliga elframdrivningssystem för älvskyttlar över Göta Älv inklusive krav på laddinfrastrukturen (Carlsten och Gustavsson, 2012). RISE har stor erfarenhet av elektrifierade vägtransporter och ambitionen är att kunna överföra denna kunskap till den maritima sektorn.

4.4 Utmaningar

De utmaningar som identifierats utifrån diskussioner med aktörerna beskrivs här inom områdena teknik, laddningsinfrastruktur, ekonomiskt risktagande och säkerhet. Dessa områden ska inte ses som en heltäckande lista på utmaningar med elektrifiering av sjöfarten, men avser att på en övergripande nivå sammanfatta de utmaningar som mest frekvent har kommit upp i diskussionerna med aktörerna.

Teknik

Tekniska utmaningar som identifierats berör ett antal frågeställningar. Energitätheten i batterierna är en kritisk faktor, d.v.s. batteriets energimängd vs. batteriets vikt eller volym. Batteriet är oftast en stor kostnadspost i totala investeringen, exempelvis nämner Stena som sin bedömning att c:a $\frac{1}{3}$ av totala konverteringskostnaden för hybridisering av Jutlandica är kopplad till batterikostnaden. Här finns en begränsning kopplat till storleken, då det idag inte finns några exempel på batteridrift med mer än 4 MWh batteristorlek. Detta är främst en effekt av kostnadsläget för batterier. Batterier tar också av tillgänglig lastkapacitet i högre utsträckning än tankar för marint bränsle. Dessa två faktorer kan anses vara vad som huvudsakligen begränsar ännu större batteri-installationer i dagens läge. Det råder knappast något tvivel om att maximal storlek för batteriinstallationer kommer att öka i takt med att kostnad och vikt per lagrad energimängd går ned. Även priset på marint bränsle påverkar hur stora batteri-installationer som går att få konkurrenskraftiga.

En ytterligare teknisk utmaning rör temperaturregleringen i batterierna. Batterierna bör hålla mellan 20-25 °C för en optimal temperaturreglering. Hur detta skall lösas är inte helt klart, vilket visas i de olika teknikerna på marknaden. Ytterligare diskussion om utmaningen med säkerheten i batterierna beskrivs separat nedan.

En av de större tekniska utmaningarna vid batteridrift är laddningshastigheten för batteriet. Vilken laddningshastighet som krävs beror på kriterierna för att operationen skall fungera. Tiden som är tillgänglig för laddning i kombination med energikapaciteten i batteriet sätter krav på laddningshastigheten i batteriet och den effekt som krävs i landanslutningen. Ofta är korta laddningstider ett krav för att klara operationen i färjetrafik, vilket är det segment som fram tills idag implementerat full batteridrift. I dessa fall kan även laddningstiderna bli dimensionerande för batteriets storlek. Exempelvis, om en färja kräver 100 kWh för en överfart och måste ladda denna effekt på 5 minuter, så sätter maximal möjlig laddningshastighet begränsningen för storleken på batteriet. Som exempel används ett Li-NMC-batteri med en laddningskapacitet på 2,4 C. Det innebär att batteriet kan gå från 0% till 100% state-of-charge på 25 minuter. Vid krav om att kunna ladda 100 kWh på 5 minuter så innebär det att batteriets storlek måste vara minst 500 kWh för att kunna klara operationen utifrån batteriets maximala laddningshastighet.

Utöver laddningshastigheten är själva laddningsmetoden även en teknisk utmaning. Flera olika exempel på laddningsmetoder finns framtagna och levererade från ett fåtal leverantörer, normalt i mycket litet antal (i princip tio eller färre). Undantaget

till detta är manuellt anslutna landströmsanslutningar, vilka finns i ett stort antal. I princip kan lösningarna kategoriseras enligt följande:

- Elektrisk anslutningsprincip
 - Via kontakter eller kontaktorer (“trådad” anslutning)
 - Likströmsanslutning
 - Växelströmsanslutning
 - Via induktion (“trådlös” anslutning)
 - Alltid växelströmsanslutning
- Anslutningsmetod
 - Manuell
 - Kabelvinda ombord fartyget och inkoppling på kaj
 - Kabelvinda på kajen och inkoppling i fartyget
 - Automatisk
 - Industrirobot-arm med flera frihetsgrader
 - Strömavtagare
 - Kontakter monterade på “spjut”, vilka skjuts in i en motsvarande kontakt via teleskopisk arm eller genom att fartyget kör in i kontakten i sitt ordinarie läge

Vilka lösningar som är att föredra i olika miljöer är inte helt självklart. Dessutom är det inte heller självklart att en teoretiskt bra lösning fungerar bra i praktiken. De praktiska förutsättningarna skiljer sig från dag till dag, t.ex. vågor, vattenstånd och vind och då ändrar sig förutsättningarna för en smidig och effektiv hopkoppling från en punkt till en annan. Detta har exemplifierats genom de utmaningar man behövt adressera vid HH-ferries konvertering, där en robotarm används för att koppla landström till båtens laddningsanslutning, vilket visat sig utmanande i den operationella miljön där en robot skall koppla in sig mot ett rörligt mål. Den teknik som används i detta fall är dock det första försöket till denna användning, och exemplifierar den risk och stora insats som krävs för driva fram en anpassad teknik för tillämpning i nya sammanhang.

Fartyg har generellt lång livslängd. En konvertering kontra en nybyggnation kräver helt skilda angreppssätt. En utmaning är hur en konvertering kan lösas på ett konkurrenskraftigt sätt. Lärdomar från olika konverteringsprojekt skulle kunna effektivisera insatsen som krävs och även möjliggöra för en standardiserad process. Trots allt är det viktigt att poängtera att vid nybyggnation, då hänsyn tas till en elektrifierad drivlina redan i designfasen, kan helt andra effektiviseringar göras kopplat till skrovutformning och vikt.

Ladd- och landinfrastruktur

Landanslutning för el finns i flera av handelsflottans större hamnar, men det är inte klart i hur stor utsträckning dessa används i dagsläget. Flera som intervjuats har påtalat bristen på användning, men för att kunna ge en heltäckande bild behöver frågan diskuteras med ytterligare hamnar. Landanslutningsinfrastrukturen ger fartygen möjlighet att använda landström för hotell-lasterna då fartyget ligger vid

kaj. För dessa landanslutningar finns en standard (ISO/IEC/IEEC 80005). I praktiken är det möjligt att även använda denna infrastruktur till uppladdning av batterier, men eftersom olika batteristorlekar och laddningshastigheter ställer olika krav på laddningsinfrastrukturen är det inte självklart hur befintlig landanslutning kan användas även för laddning. Stena Lines projekt under 2018 med Jutlandica, är det första större testet i Sverige där man använder befintlig landanslutning för en “plug-in” lösning.

En möjlig anledning till den låga användningen av landanslutning av el när fartygen ligger vid kaj, som har diskuterats inom projektgruppen, kan vara att fartygen inte är anpassade för att ansluta 50 eller 60 Hz system. Detta kanske framförallt gäller äldre fartyg. För nyare fartyg borde det teoretiskt sett inte finnas några hinder, men här kan vetskapen om en möjlig risk för blackout göra att besättningen inte använder möjligheten till landanslutning, och därmed förblir ovan att hantera en sådan inkoppling. Stabiliteten i elnätet kan påverka blackout-risken, men då Sveriges elnät håller en hög stabilitet borde inte det vara en riskfaktor i de svenska hamnarna, men möjligtvis i vissa andra länder. Seatrans vill bygga om fyra av sina fartyg till pluginhybrider (TO, 2017b). I dessa ombyggnationsplaner är en viktig komponent att möjliggöra batteridrift vid kajläge genom anslutning av växelström på 220, 440 eller 690 volt och 50 Hz (TU, 2017b).

Hur man kan öka användande av befintlig landström för hotell-laster är en intressant fråga att studera närmare i kommande projekt, för att minska de lokala emissionerna då fartygen ligger vid kaj. Problem med olika frekvenser på fartyg och iland löses med omformare. Dessa omformare har tidigare kostat enorma summor men är inte längre den största kostnaden vid landanslutning.

Hamnarna hamnar mellan två aktörer (minst): rederierna och elleverantörerna. Många elleverantörer är lokala, vilket innebär att prisbildningen för elen till rederiet varierar kraftigt över Sverige (och i många andra nationer). Detta är något som hamnarna inte alltid kan påverka och det kan leda till att genomförda eller framtida investeringar inte betalar sig.

En annan försvårande faktor för hamnarna/rederierna är utformningen av infrastrukturen. Fartyg som går i linjetrafik och använder sig av fasta kajer, kan med fördel anslutas till landström. Men resterande sjöfart är svårare att koppla upp, då fartygets läge längs kajen avgör huruvida det är fysiskt möjligt att ansluta fartyget på grund av att det oftast är last/lossningsoperationen som avgör vart fartygen förtöjs i förhållande till kranar etc. Om flera fartyg elektrifieras och kräver landström, kommer troligen investeringsbehovet i infrastruktur för kraftförsörjning att öka. Stora investeringar kommer att krävas speciellt för den typ av sjöfart som har korta (få minuter/timmar) hamnanlöp, där effekttopparna blir höga. Hamnanlöp som varar 12 timmar eller mer kan kanske klaras med den infrastruktur man redan har för landanslutning.

Ekonomi

Det är idag ett ekonomiskt risktagande att investera i en helelektrisk lösning i fartyg. Sjöfartsnäringen är på uppgång, men det finns få exempel på rederier som i dagsläget har möjlighet att ta hela investeringskostnaden själva. Här visar existerande exempel att extern finansiering, tex EU-medel, är en möjliggörare för att ta steget till en helelektrifierad lösning. Exempelvis hade HH-ferries en stor andel (120 MSEK av 300 MSEK) medfinansiering från EU (HH-ferries, 2017), och detsamma gäller Stena Lines satsning på Jutlandica (ca 50% offentlig finansiering). Det handlar inte enbart om batterikostnaden (som är en stor del av den totala investeringskostnaden), utan även styrsystemet som i vissa fall kan vara en lika stor kostnad som batteriet, vilket Stena även bekräftar.

I en studie genomförd av DNV GL (Alens et al., 2017) har det konstaterats att det för hybriddrift och energilagringlösningar på fartyg är stora variationer i förväntad återbetalningstid. Detta beror på skillnader i operationsprofiler, integreringskostnader och bränslepriser. En återbetalningstid på fem år är möjlig om bränslebesparingar på mer än 10% är nåbara och om externt bidrag till investeringen erhållits, exempelvis via den norska NOx-fonden eller ENOVA (Alens et al., 2017).

På supplyfartyg inom offshore-industrin används elektrifieringen som "spinning reserve" (att reservkraft från exempelvis ett batteri finns tillgänglig för att snabbt växlas upp vid behov). Detta är ett fartygssegment med prognostiserat goda återbetalningstider för elektrifiering - förutsatt att fartygen har beläggning. Men hur man gör en sådan prognostisering är inte helt självklart. I dagsläget är det svårt att skapa ett business case då det finns stora osäkerheter i beräkningarna, vilket betyder att det är ett stort risktagande i investeringen. Här handlar osäkerheterna inte bara om faktiska investeringskostnader, utan om möjliga kostnader som uppkommer i de specifika operationella förutsättningarna, exempelvis verklig livslängd på batteriet (om den skiljer sig från specifikationen från leverantören), eller vilka underhållskostnader som kan uppkomma i ett helelektriskt system och övriga risker som behöver tas med i kostnadsanalysen. Idag saknas tillräckligt med, allmänt och offentligt tillgängliga, erfarenheter från drift- och underhållskostnaden av helelektriska system över tid. Dessutom kan det uppkomma barnsjukdomar när ny teknik skall implementeras i nya miljöer, vilket också kan generera extra och oväntade kostnadsposter. En samlad erfarenhet kring vilka kostnader som kan komma att uppstå och när de uppstår, skulle skapa en bättre helhetsbild över kostnadsläget och möjliga kostnader kopplat till risker med helelektrifierade system. Hur man kan analysera i vilka fall det är finansiellt gångbart med helelektriska fartygslösningar, inom olika segment och under olika förutsättningar, kan vara en intressant fråga för kommande projekt.

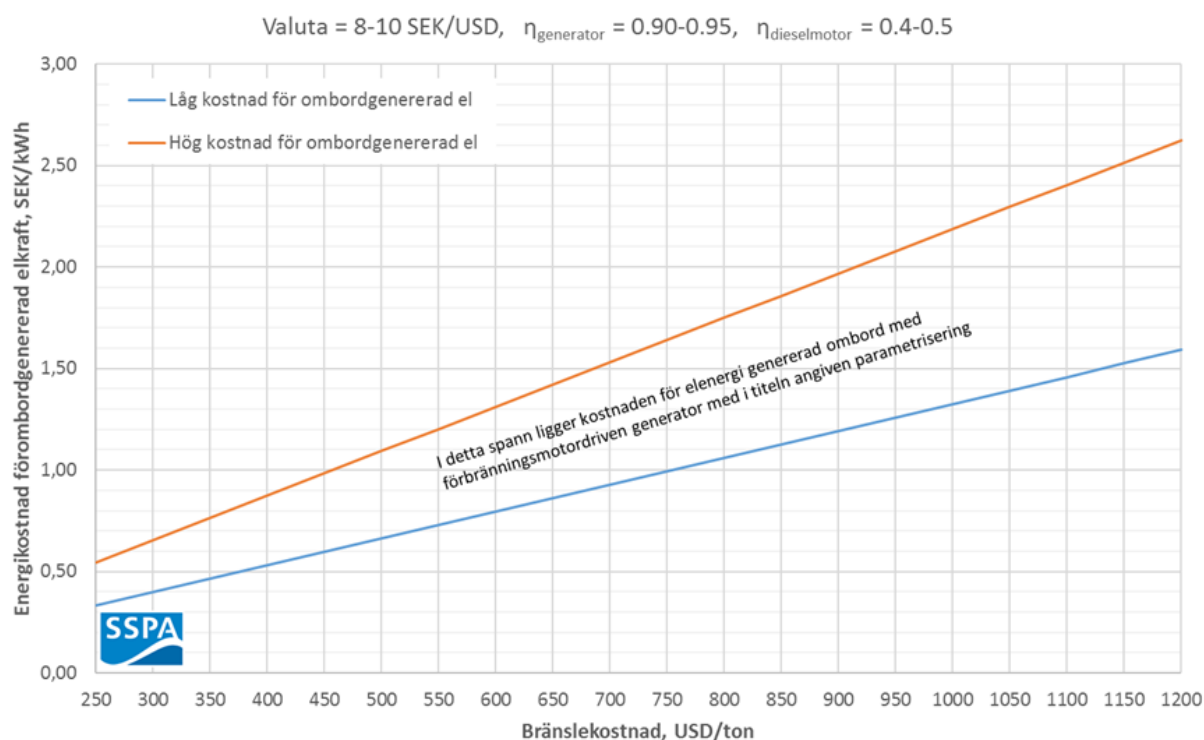
En ytterligare fråga kring ekonomiska aspekter på elektrifiering, som kommit upp i flera intervjuer, är det faktum att dieseln är skattebefriad, men att el från landnätet ofta belastas med energiskatt. För landanslutning till elnätet i hamn, för att kunna stänga ned ombordplacerade generatoraggregat (s.k. "cold ironing"), är fartyg med

större än 400⁵ i bruttodräktighet befriade från elskatt i Sverige. Eftersom att mindre fartyg är exkluderade blir att kostnadsbilden ogynnsam för dessa att välja el från landnätet. Även för fartyg som omfattas av skattereduktionen är det ekonomiska incitamentet, beroende på valutakurser, energipriser och aktuell energiförbrukning, ofta svagt.

För att illustrera hur de ekonomiska incitamenten beror på bunkerpris, elpris, valutakurs och verkningsgrad hos ombordsystem har ett räkneexempel genomförts. Nedanstående figur visar kostnaden för elkraftgenerering ombord med ett generatoraggregat som funktion av kostnaden på marint bränsle. För beräkningen har använts en spridning i data enligt följande:

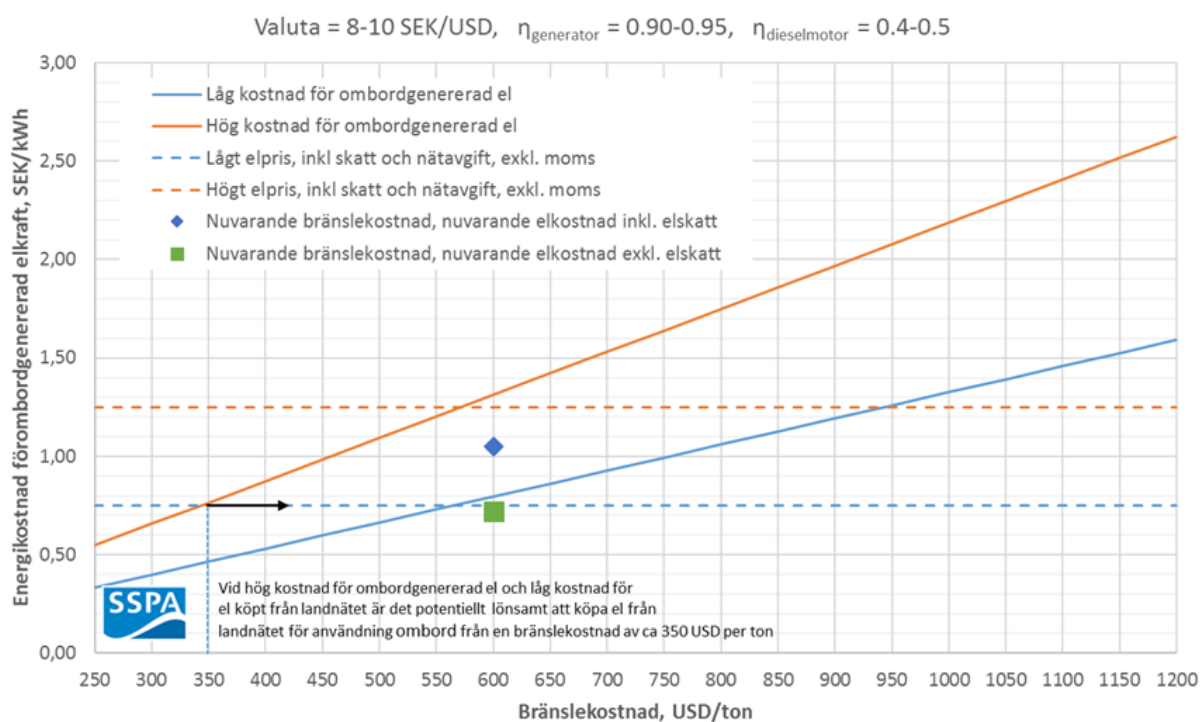
- Valutakurs: mellan 8 och 10 SEK/USD
- Verkningsgrad för förbränningsmotor: mellan 45 % och 50 %
- Verkningsgrad för generator: mellan 90 % och 95 %.

Notera att grafen endast representerar kostnaden för energin som används, den inkluderar inte kostnader för att anskaffa och underhålla nödvändiga system för att generera energin. Den verkliga totalkostnaden för elen ombord är alltså högre än den angivna. Exakt hur mycket högre kostnaden är måste beräknas från fall till fall eftersom kostnaderna i så hög grad beror på storlek och typ av förbränningsmotor, generator och erforderliga stödsystem.



⁵ Bruttodräktighet (GT) 400 innebär en innesluten volym av skrov och överbyggnad av minst 1 500 m³.

Som referensvärde ligger priset på lågsvavlig MGO i Göteborg på c:a 600 USD per ton vid tidpunkten för rapportens utgivande. Kostnaden för el från landnätet är vid samma tidpunkt cirka 0,35 SEK/kWh. Med elskatt (för närvarande 0,331 SEK/kWh) och ett påslag av 0,35 SEK/kWh i elnätskostnader blir priset för el ombord köpt från landnätet därmed cirka 1,05 SEK/kWh. De senaste fyra åren (2013-2017) har elpriset varierat mellan 0,75 och 1,25 SEK/kWh (0,20 till 0,40 SEK/kWh för elförbrukningen, 0,331 SEK/kWh i energiskatt för 2018 och 0,25 till 0,50 SEK/kWh i nätavgifter). Om dessa kostnader ritas in i tidigare visad figur tillsammans med datapunkter för aktuella el- och bränslekostnader erhålls istället följande figur.



Med dessa historiska elpriser krävs ett bränslepris på mellan 550 och 950 USD/ton (låg kostnadskurva) eller mellan 350 och 550 USD/ton (hög kostnadskurva) för att ha en teoretisk möjlighet att finansiera den extra investering som krävs för elektrifiering. Om det inte finns en större prisspridning mellan bränslepriset och landström, och om miljövinsten inte värde- eller prissätts, kommer elektrifieringen att gå långsamt eller helt utebli.

Om krav skulle ställas på snabbare övergång till bränslen med låga emissioner, av en eller flera av fossil CO_2 , NO_x och partiklar, ser kalkylerna annorlunda ut eftersom dessa bränslen är dyrare. Om HVO används istället för jämförelsen är priset för samma period mellan 10 och 12 SEK/liter exklusive moms, vilket motsvarar ett pris mellan 1190 och 1790 USD/ton och en elkostnad på 1,60 till 2,40 SEK/kWh (låg kostnadskurva) eller 2,35 till 3,50 SEK/kWh (hög kostnadskurva) ombord. För detta fall inses att det finns en god sannolikhet att ekonomiskt motivera att åtminstone delar av HVO-användningen ersätts med energi från elnätet. Notera också att det med dagens bränslekostnad i princip redan finns en garanterad vinst i att köpa elektricitet från landnätet för att ersätta MGO om elskatten för el till framdrift skulle tas bort.

Säkerhet

Avseende säkerheten kring helelektriska lösningar med batterier så har diskussionerna framförallt kretsats kring hur en eventuell brand kan hanteras. Som nämnts i tidigare avsnitt kräver släckning av brand i batterier en annan typ av lösning i form av kylning. Dessutom kan olika typer av batteriteknik, exempelvis vattenkylda och luftkylda, kräva olika säkerhetssystem.

I dagsläget finns få exempel på brandolyckor i batterier och därmed också liten erfarenhet av hur en brand kan hanteras i praktiken samt effekterna av denna. Ett exempel som nämndes ovan var branden och explosionen av batteriet i Campbell Foss (se Hayman 2016), vilka gav unika insikter, framförallt kring utformningen av ett nytt batteri och system. Samlade erfarenheter kring riskerna vid brand och sannolikheter för att det faktiskt sker behövs. Olika sätt att detektera och bekämpa brand existerar, dessutom måste det säkerställas att övriga system på fartyget inte påverkas så att man får en blackout då detta kan få ännu större följder.

Förutom hur en brand kan hanteras är även driftsäkerheten en fråga det inte finns erfarenhet kring, d.v.s. vilka möjliga driftstörningar som kan uppkomma under batteriets operationella livstid. Exempelvis finns specificerat för vissa batterier (av typ litium-jon-NMC) att livstiden är 7 år, men det finns ännu inga rapporter över hur operationen påverkar livslängden, d.v.s. om 7 års operation är möjlig i praktiken. Det handlar om att det är ny teknik i en ny operationell miljö och vad som händer över tid har ännu inte kunnat testats fullt ut. Vilka störningar och kostnader kopplat till dessa störningar kan uppstå under batteriets livstid?

IMO har arbetat med regleringar och rekommendationer avseende säkerheten kring bränsleceller som en del av IGF-koden (International code of safety for ships using gases and all other low flash point fuels). Detta arbete utvecklades under hösten 2017 till att inte bara hantera bränsleceller med LNG som bränsle, utan även andra typer av bränslen för generisk applicerbarhet. Redan 2008 gjordes en HAZID (Hazard Identification Study) och HAZOP (Hazard and Operability Study) för en installerad bränslecell på ett Walleniusfartyg med metanol som bränsle inom EU-projektet METHAPU.

För lindrivna färjor bedöms riskerna för kollisioner och tillbud som större än för friseående färjor med korsande trafik, vilket är ytterligare en aspekt att ta hänsyn till. Ett sådant exempel är projektet med konvertering av Marstrandfärjan, där lindrift eller elförsörjning med fast ansluten kabel är tänkbara alternativ.

4.5 Den svenska marknaden

Det finns en stark tillväxt och framtidstro hos aktörer på den svenska marknaden. Även om den största framväxten av helelektriskt drivna fartyg så här långt har skett på norska vatten, kommer fler och fler exempel på helelektriska fartyg världen över. I Sverige verkar marknaden växa snabbt. Flera leverantörer nämner att de ser en ökad efterfrågan på teknik kopplat till elektrifiering av fartyg som batterier, bränsleceller, system och laddningsinfrastruktur.

Det finns en mängd olika aktörer i Sverige som agerar inom den maritima branschen och för elektrifiering. Inom batteritillverkning har NorthVolt nyligen aviserat sin satsning för fortsatt utveckling och möjlig produktion av batterier (Phillips, 2018). I Sverige finns också SAFT Batteries som producerar marina batterisystem. Dessutom har fordonsindustrins satsningar på elektrifiering även börjat spilla över på den maritima sektorn. Exempelvis levererar Volvo Penta även elektriska system för den maritima sektorn och uttalar en stark tro på en växande marknad, framförallt när det gäller fritidsbåtar och mindre fartyg såsom arbetsbåtar och lotsfartyg.

Fordonsindustrin har även gett avknoppning till bränslecellstillverkning. Göteborgsbaserade Powercell tillverkar bränsleceller som enda svenska tillverkare. Norge ligger långt framme med planer på bränsleceller i fartyg. Inom detta område finns därmed en svensk leverantör med potentiell marknad i Norge.

5. Forskning och projektidéer

Det finns behov av forskning för att öka elektrifieringen av sjöfarten.

Forskningsbehoven kan delas in i följande områden:

Samhällsperspektivet

En elektrifiering av sjöfartssektorn måste ses ur ett helhetsperspektiv där hela person- och transportsystemet beaktas. Vissa av dagens landtransporter kan i framtiden med fördel göras med fartyg. Om Sverige och världen skall ställa om transportsystemet till fossilfrihet och utan skadliga utsläpp, krävs helhetssyn och kunskap om hur detta skall ske. Det är viktigt att arbeta med forskning inom LCA (Life Cycle Assessment), miljösystemanalyser, konsekvensbeskrivningar, kostnadsnyttoanalyser etc. för att öka kunskaperna om hur fartygstransporter förhåller sig till andra typer av transporter, men även för att bättre förstå och förbättra de fartygstransporter som redan görs idag.

Teknik (fartygssystem, laddningsinfrastruktur och batterisäkerhet)

Elektrifiering av sjöfarten kräver teknikutveckling, såväl på fartygen som för laddningsinfrastrukturen på land. Det finns behov av forskning i alla faser av en ny tekniks utvecklingscykler, från koncept, kravställning och arkitektur, detaljerad design och implementering, test och verifiering, systemverifiering och validering, till drift och underhåll. Det finns redan exempel på elektrifierade fartyg, men det krävs mycket nytt kunnande för att utveckla effektiva, bra och säkra drivlinor som helt eller delvis drivs på el, där elen överförs till fartygen via någon laddningsinfrastruktur och lagras ombord i t.ex. batterier eller kondensatorer.

Maritim sektor skiljer sig från biltillverkning på olika sätt, bl.a. tillverkas fartyg i enstaka exemplar till skillnad från masstillverkning av olika fordonsmodeller. En viktig del i koncept- och designfasen är att kunna utvärdera olika alternativ utan att behöva bygga prototyper. Metodutveckling av simuleringsmodeller har fått stor genomslagskraft inom bilindustrin, och behöver rimligen utvecklas även inom maritim sektor.

Vissa lösningar och delar kan hämtas från andra sektorer, t.ex. från lastbilstillverkare som gör stora förbränningsmotorer, men lösningarna kommer behöva anpassas till den maritima sektorn. Batterisäkerhetsfrågor på fartyg är ett exempel som specifikt behöver studeras närmare. Fartyg med stora batterier och kort tid för laddning kräver stora effektnivåer, vilket i sin tur implicerar stor laddningseffekt från nätet. Som alternativ går det att upprätta ett energilagret som långsamladdas från elnätet så att den höga effekten kan överföras från energilagret när båten anländer. Om eller hur detta alternativ är tekniskt och ekonomiskt genomförbart återstår att utreda och är relevanta forskningsområden.

En aspekt på elektrifiering är att framtagandet av ekonomiskt och tekniskt framgångsrika fartygssystem kräver en hög nivå på systemarbetet och de beräkningar som genomförs för effekt- och energiprofiler, kostnadskalkyler och miljöbelastningar.

Ekonomi – affär

Den maritima sektorn har utvecklats under lång tid och fartyg drivs av huvudsakligen fossila bränslen. Av klimat- och miljöskäl går det dock inte fortsätta som förut utan bättre alternativ måste utvecklas. Beroende på hur incitament och regelverk implementeras kommer detta att driva på branschen. Omställningen är dock kostsam och förknippad med en hel del osäkerheter, inte minst kopplat till skillnader i lagstiftning och regler i olika delar av världen. För den enskilde redaren är det enklast att beställa och bygga ett nytt fartyg på traditionellt sätt med fossilt bränsle. Det är inte uppenbart idag hur affären ser ut och hur lång återbetalningstiden blir för fartyg som går på el, om det ens blir en positiv kalkyl. Eldrift innebär även att nya aktörer kommer in i branschen som elbolag, tillverkare av laddningsinfrastruktur etc. Det förändrar därmed affärslogiken för t.ex. hamnar där elen blir ett nyckelbränsle, med allt vad det innebär i form av kostnader, möjligheter att föra över energi på ett standardiserat sätt etc.

Affären i detta avsnitt syftar på den enskilde aktörens möjligheter att tjäna pengar på sin verksamhet. Affärsmodellen är själva sättet som affärsverksamheten bedrivs och skiljer sig för olika aktörer. En elektrifiering av maritim sektor innebär att affärsmodellerna för involverade aktörer förändras samt även ekosystemet av aktörer som tillsammans behövs för att tillhandahålla en elektrifierad tjänst, och därför behöver dessa områden utforskas. Av vikt att förstå är kostnads- och intäktsförmågan på övergripande nivå, för att se om det redan idag är en lönsam affär att elektrifiera eller om stöd, subventioner och/eller incitament behövs och hur dessa skall utformas för att ge bäst effekt.

Att i allt högre grad kunna nyttja idag icke-maritim och befintlig teknik och befintliga produkter, utvecklade för exempelvis lastbils- och busstransporter, inom sjöfarten torde ha en gynnsam effekt på kostnadsnivåerna vid installation och konvertering. En ökad användning av icke-maritima lösningar ligger också i linje med begrepp som ökad intermodalitet och effektiva transporter. Ny teknik med förbättrade miljöprestanda möjliggör också nya tillämpningar med effekter på fysisk planering, introduktion av urban sjöfart, stadsnära kajlägen, etc.

Beteende

Elektrifiering innebär förändrade egenskaper hos fartygen och ”påfyllningen av elbränslet”. Det finns därför beteendefrågor kopplade till elektrifiering av maritim sektor, ur olika intressentperspektiv. En del personer har i intervjuer tagit upp detta perspektiv, även om det mesta kretsar kring andra frågeställningar. För vägfordon är beteendefrågan ett hinder för omställning till fossilfrihet, främst avseende privatägda personbilar där människors val inte är rationellt på samma sätt som för kommersiell verksamhet som mer styrs av ekonomi.

För passagerartrafik är det av yttersta vikt att förstå betalande passagerares åsikter om hur elektrifiering upplevs, jämfört med ibland bullrig resonansförstärkt fossilbränsledrift. En gissning är att elektrifiering kommer upplevas mer bullerfritt och utan sotiga utsläpp, precis som upplevelserna är på bilsidan. Förutom passagerarna, så finns ombordpersonalens perspektiv, underhållsperspektiv,

laddningshandhavandeperspektiv etc. som alla är intressanta ur forskningshänseende, för att värdera för- och nackdelar, kunna åtgärda problem, bedöma affärsmodeller etc.

Beteendestudier görs med fördel i samband med nya teknikstudier och demonstrationer där olika intressenters åsikter beaktas för att förbättra nästa generations lösning och erbjudande.

5.1 Konkrete projektförslag

Med ovan sagt inses att det går att göra projektförslag kring det mesta inom maritim elektrifiering. I det följande avser vi dock att peka ut några specifika projektförslag som av olika skäl är lämpliga att genomföra.

Aktörskonstellation för affärsmodeller inom maritim elektrifiering

Det finns ingen färdig modell för hur aktörskonstellationen och affären ser ut för maritim elektrifiering. Denna förstudie har identifierat ett antal olika aktörer som arbetar med elektrifiering, användare, leverantörer, myndigheter/klassällskap samt forskare. Omställningen kommer med all säkerhet gå trögt och ske enbart när affären för involverade aktörer är tillräckligt tydlig och intressant. Forskningen har en roll och kan påskynda detta arbete. Som parallell kan nämnas elvägar (laddning av fordon under körning) där motsvarande frågeställningar dyker upp. Ett projekt görs med fördel i samverkan mellan lämpliga aktörer för att, på en övergripande nivå, förstå drivkrafter, hinder och att tillsammans ta fram rimliga affärsmodeller, som sedan kan verifieras. Olika aktörers roller i elektrifieringen bör belysas, såsom redaren och hamnens roll, vilka är centrala användare av elektriska system, vilka också behöver samverka väl. Värt att påpeka är dock att det inte kommer finnas snabba vägar till resultat utan att det snarare kommer att vara en långsam utveckling där kunskaper och forskning kan påskynda utvecklingen.

Ekonomiska incitament för elektrifiering

Som ett ytterligare steg i att förstå möjliga vägar till redarens affär så föreslås ett projekt som studerar de ekonomiska incitamenten för elektrifiering mer i detalj, utifrån redarnas perspektiv. Med nuvarande kostnadsskillnad för elektricitet tillverkad ombord med generatoraggregat eller köpt från elnätet i land finns som konstaterats mycket små ekonomiska incitament till tekniska åtgärder ombord syftande till att minska koldioxidbelastningen genom att köpa den från elnätet. För mindre fartyg (bruttotonnage under 400) finns inte ens idag möjligheten till befrielse av elskatten vilket innebär att alla dessa fartyg med avseende på energipris inte har någon möjlighet alls att räkna hem investeringar för att ansluta mot elnätet. Om det inte går att skapa ekonomiska förutsättningar för det enkla fallet att ansluta fartygen till elnätet i land när de ligger vid kaj är sannolikheten för att det skall gå att elektrifiera delar av behovet av energi för framdrift antagligen låg. För fartyg som avser använda elektricitet från landnätet för lagring i batterier ombord för senare användning till sjöss ökar bara på ovanstående problemformuleringar ytterligare. Förutom kostnader för drift med elektrifiering så är det dessutom en stor ekonomisk investering för konvertering eller nybyggnation, där batterikostnad, kringsystem och

installation är de tre stora kostnadsposterna. För att kunna komma över denna kostnadspuckel så krävs i de flesta fall en statlig medfinansiering.

Därmed är ett relevant projektförslag att studera de ekonomiska förutsättningarna för elektrifierad sjöfart, och vilka åtgärder som påverkar dessa ekonomiska förutsättningar. Ekonomiska förutsättningar är särskilt intressant ur redarens perspektiv, där operativa förutsättningar, samt kostnader för om- och nybyggnation av fartyg och infrastruktur bör beskrivas. Åtgärder bör ses både ur från företaget och ett myndighetsperspektiv. För företagsperspektivet är det exempelvis intressant att studera hur effektivare processer för systemutformning kan utvecklas och standardiseras på fartygen, samt hur detta påverkar implementeringskostnaden. Genom att bredda systemsynen, t.ex. inkludera tekniska och operativa aspekter på landströmsanslutningen, kan det finnas en potential att sänka investeringsbehovet på fartyget. Exempelvis kan en del av investeringarna och teknikinnehållet flyttas till kaj (d.v.s. till hamnägaren). Från ett myndighetsperspektiv bör möjliga regleringar och skatter kopplat till el- och oljepris studeras samt hur ytterligare statliga ekonomiska incitament kan påverka marknaden för elektrifierade fartyg.

Simuleringsmiljö elektrifierad sjöfart

Som ett ytterligare steg i att effektivisera processen kring val av tekniska lösningar när fartyg konverteras till elektrifierad drift, föreslås utveckling av en simuleringsmiljö för elektrifierad sjöfart. Det är svårt för redare och skeppsbyggare att utreda och besluta vilka drivlinekonfigurationer som lämpar sig bäst om ett fartyg skall drivas på el. Det befintliga verktyget för bussar (se Appendix A) som nämnts tidigare i denna rapport ger som utdata energibehov, laddningsbehov och laddningshastighet, givet ett visst fordon som kör en viss sträckning. Detta ger förutsättningar och indata till efterföljande designarbete, vilket dock inte stöds i verktyget i dagsläget. Befintligt verktyg bygger på att elbussen är given och kör en viss sträckning, vilket kan ge en uppfattning om energiåtgång och effektbehov, vilket i sin tur ger t.ex. batteristorlek och laddningseffekt. Verktyget behöver dock utvecklas för fartygsändamål, eftersom det hittills bara är utvecklat för elbussanvändning.

Det är orimligt att tro att en enskild redare skall bekosta utvecklingen av metod- och simuleringsverktyg för att designa drivlinan för ett enstaka fartyg. Det är lättare att motivera för tillverkare inom fordonsindustrin med stora serier av fordon där kostnaderna för motsvarande metod- och simuleringsverktygsutveckling slås ut på alla fordon, vilket gör kostnaden per fordon låg. Fordonsindustrin (både personbils- och lastbilstillverkarna) har valt numeriskt modellbyggande och simulering även om kostnaderna inte är försumbara, eftersom att alternativet att bygga prototyper både är kostnads- och tidskrävande. Dessutom görs styrningen av drivlinan lämpligen i samma miljö, och kan inkluderas i utvärderingen. Simuleringsmiljön stöder buggförfarande av styrkod vilket minskar risken för kritiska fel. Det finns möjliga synergier och mycket kunnande att hämta från fordonsindustrin, men med anpassningar till den maritima sektorn.

Detta projektförslag, att bygga upp metod- och simuleringsverktygutveckling, görs med fördel genom att samtidigt ha ett reellt fall att arbeta med. Då kan metoden och simuleringsverktyget utvecklas för det fallet och sedan generaliseras så långt möjligt, och utvecklas i takt med fler fall. En konkret aktör att genomföra detta tillsammans med är Trafikverkets Färjerederi som ansvarar för de gula vägfärjor som är en del av Sveriges väginfrastruktur.

Laddinfrastruktur & standardisering

Ett fartyg kan laddas på olika sätt, från kabelanslutning till automatisk anslutning via kabel eller med annan teknik som t.ex. induktionsladdning. I vissa fall är fartyget och laddningsplatsen unik i det avseende att enbart en enskild båt lägger till vid en kaj, vilket medför att det är möjligt att utveckla en egen laddningsteknik som passar ändamålet. I andra fall, t.ex. i en hamn där olika fartyg anlöper samma kajer, är det viktigt att standardisera laddningsförloppet så att flera fartyg kan servas. Detta projektförslag handlar om att börja arbetet med att kravställa laddningsinfrastrukturen, både på land och fartyg. Alla laddare kommer naturligtvis inte att kunna ladda alla fartyg, utan kommer skilja sig i effektnivåer och andra förutsättningar som t.ex. krav på automation etc. I projektförslaget ingår därför att klassificera och identifiera laddningsbehov (energi och effekter) och andra krav för olika fartygssegment. För att komma fram till kravspecifikationen behöver fartygssegmentens operationsprofiler samt möjliga tekniklösningar inkluderas. Exempelvis kan viss teknik vara mer lämplig att anlägga i hamnen än på varje enskilt fartyg ur ett totalkostnadsperspektiv. Exempel på sådana komponenter kan vara skiljetransformatorer, växelomriktare och frekvenskompensatorer. I studien ingår med fördel intervjuer med relevanta aktörer. Studien skulle bidra till kunskap som kan ligga till grund för att kunna utforma bättre riktade investeringsstöd för att stödja laddningsinfrastrukturlösningar i hamnar.

Praktisk erfarenhet från elektrifierad sjöfart

I dagsläget saknas en samlad bild av praktisk erfarenhet från elektrifiering inom sjöfarten. Vid konvertering är det i varje specifikt fall en unik lösning som skall tas fram och det finns då en stor osäkerhet i kostnads- och riskkalkylen. Detta beror på att det finns mycket begränsad erfarenhet av exempelvis vilka säkerhetsrisker som finns, vilka drifts- och underhållskostnader som kan uppstå och om batteriets livslängd verkligen lever upp till tillverkarens tekniska specifikation under de specifika operationella förutsättningarna som existerar i det enskilda fallet. Detta projektförslag handlar därför om att samla de praktiska erfarenheter som i dagsläget finns från elektrifierade tillämpningar i sjöfarten och studera pågående initiativ för att kunna bredda erfarenhetsbanken. Projektet kommer att involvera flertalet aktörer, och studera ett antal fallstudier över tid där elektrifiering just nu håller på att implementeras på befintliga fartyg. Beteendefrågor är även väsentliga i denna typ av studie. Förutom fallstudier, så kommer även projektet att se över möjligheterna att skapa en demonstration av en elektrifierad sjöfartslösning, vilket skulle kunna möjliggöra detaljerad datainsamling kring specifika risker eller operationella förutsättningar. Förutom en samlad beskrivning av erfarenheter kring säkerhet, drift

och underhåll så skulle även projektet möjliggöra bättre underlagsdata för detaljerade LCA och LCC-analyser inom elektrifierad sjöfart.

Elektrifiering av sjöfarten som en del i transportsystemet

Vi har i denna förstudie motiverat att elektrifiering av sjöfart kan ha en stor roll i omställningen till en fossilfri transportsektor. Sjöfarten kan även spela en allt större roll då mer gods- och persontransporter har potential att flyttas över till sjövägen. På en övergripande makronivå, behöver rollen av elektrifiering i sjöfarten studeras närmare. Det handlar om att bättre förstå inom vilka fartygssegment, och i vilken storleksordning, som elektrifiering inom sjöfarten kan bidra till klimat- och miljömål, både lokalt och globalt. Här är det viktigt att poängtera att det inte enbart handlar om helelektrifierade lösningar, där batteridrift är i fokus, utan här finns en mängd intressanta kombinationer av hybridlösningar som kan komma att vara relevanta alternativ beroende på fartygssegment, t.ex. batterier i kombination med alternativa bränslen såsom HVO, metanol, vätgas eller biogas. Även betydelsen av elanslutning då fartygen ligger i hamn ("cold ironing") är intressant att studera närmare, då detta kan vara ett första enkelt steg till elektrifiering av fartygsflottan. I projektförslaget innefattas att studera möjliga elektrifieringslösningar inom sjöfarten, både miljö-, energi- och kostnadsanalyser, t.ex. genom LCA och LCC. Det finns få analyser av miljöpåverkan i ett livscykelperspektiv för batterisystem och elektrifierade drivlinor på fartyg. Dessutom finns inga sådana analyser på hybridsystem med olika alternativa drivmedel i kombination med batterier. Projektet kan med fördel jämföra kostnadseffektivitet och miljövinster för tillämpning av elektrifiering inom olika sjöfartssegment med tillämpning inom andra transportslag. Projektet skall ge en tydligare bild av sjöfartens roll i en fossilfri transportsektor.

LETS - Electromobilitylabbet

Med bakgrund mot den svenska regeringens plan att satsa nästan en miljard kronor de kommande sex åren på en ny testbädd för elektromobilitet (Regeringskansliet, 2017) (även kallad Elektromobilitetslabbet eller LETS - Laboratory for Electrified Transports Sweden) så är det viktigt att identifiera vilken elektromobilitetsforskning som pågår idag och vilken forskning man skulle vilja driva inom den nya testbädden. Regeringens ambition är att göra Sverige världsledande inom elektromobilitet med syftet att alla ingående parter ska bidra till en gemensam kraftsamling för att stärka forskning och utveckling inom området.

När labbet är en realitet, öppnar det upp för många möjligheter att testa och verifiera drivlinor med t.ex. batterier samt anslutningar till laddningsinfrastruktur, även i kommande maritima tillämpningar. Det är därför lämpligt att en förstudie tittar på hur ett labb kan möjliggöra test- och verifiering av fartygs drivlinor samt anslutningar till alternativa laddningsinfrastrukturlösningar. Marina applikationer är dimensionerade för helt andra operationella förutsättningar och ställer andra krav på testutrustning i jämförelse med elektromobilitet inom fordonsbranschen. Lokalisering av labbet är en faktor som kan möjliggöra ytterligare tester, t.ex. om labbet ligger vid vattnet så att fartyg ingår i tester liggandes vid kaj. Möjligheter för att testa högeffektladdning och batterilager för mellanlagring är av intresse att utforska ytterligare.

6. Referenser

- Aarsaether, K.G. 2017. Energy Savings in Coastal Fisheries: Use of a Serial Battery Hybrid Power System. IEEE Electrification Magazine, 5 (3), 74-79.
- Alnes, O., Eriksen, S., and B.-J. Vartdal. 2017. Battery-Powered Ships: A Class Society Perspective. IEEE Electrification Magazine 5(3):10-21.
- Andersson, Wikman, Arvidson, Larsson och Willstrand (2017). Safe introduction of battery propulsion at sea. SP rapport 2017:34.
- Caledonia Maritime Assets Ltd. 2018. Hybrid Ferries Project – History of our Hybrid Ferries. Available: <http://www.cmassets.co.uk/project/hybrid-ferries-project/> [Accessed 20180109].
- Carlsen S., Gustavsson A. Elektrifiering av Älvskytteln. Examensarbete. Institutionen för signaler och system. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg, Sverige 2012. https://www.viktoria.se/sites/default/files/public/viktoria.se/upload/publications/elektrifiering_av_alvskytteln.pdf
- Desmond, K., 2017. Electric Boats and Ships – A History. McFarland Co.: North Carolina.
- DNV GL. 2015. In Focus – the Future is Hybrid – a guide to the use of batteries in shipping. Hovik: DNV GL. Available: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/future-is-hybrid-download.html> [Accessed: 20171211].
- EcoPorts, 2017. EcoPorts Publications Sustainability Report 2017. Available at: <https://www.ecoport.com/publications/sustainability-report-2017>
- Emblemsvåg, J. 2017. The Electrification of the Maritime Industry. IEEE Electrification Magazine. September, 2017, pp. 4-9.
- EU Emissions Trading System (EU ETS) 2018. https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en [Accessed 2018-03-07]
- F3, Fossil Free Fuels, <http://f3centre.se/> [Accessed 20180307]
- Fredelius, A., 2017. Robot laddar batterier som ska driva färjorna. Ny Teknik. Available: <https://www.nyteknik.se/fordon/robot-laddar-batterier-som-ska-driva-farjorna-6819411>
- Färjerederiet. 2017. Färjerederiet årsrapport 2016. Vaxholm: Trafikverket Färjerederiet.
- Geertsma, R.D., Negenborn, R.R., Visser, K., and J.J. Hopman. 2017. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. Applied Energy, 194, pp. 30-54.

- Göteborgs hamn (2018). Göteborgs hamn hemsida:
<https://www.goteborgshamn.se/om-hamnen/gronare-transporter/miljorabatt-i-hamntaxan/> [Accessed 2018-02-15]
- Hayman, S. 2016. FINAL REPORT ON BATTERY RE- INSTALLATION - CAMPBELL FOSS and CAROLYN DOROTHY.
- Hazarika, M. 2017. New hybrid electric ferry launched in Taiwan. Ship Technology. Available: <http://www.ship-technology.com/news/newsnew-hybrid-electric-ferry-launched-in-taiwan-5731426/> [Accessed: 20180212].
- HH-ferries, 2017. HH Ferries Group har skickat Tycho Brahe till varvet för övergång till batteridrift. Available: <http://hhferriesgroup.se/2017/04/26/hh-ferries-group-har-skickat-tycho-brahe-till-varvet-for-overgang-till-batteridrift/>
- Knight, S. 2017. 'Elektra': Commercial battery ferries become a reality. Maritime Journal. Online. Available: <http://www.maritimejournal.com/news101/vessel-build-and-maintenance/ship-and-boatbuilding/elektra-commercial-battery-ferries-become-a-reality>
- Kongsberg, 2018. Autonomous ship project, key facts about YARA Birkeland. <https://www.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/4B8113B707A50A4FC125811D00407045?OpenDocument> [Accessed 2018-03-07]
- Lambert, F. 2017. Two massive ferries are about to become the biggest all-electric ships in the world. Electrek. Available: <https://electrek.co/2017/08/24/all-electric-ferries-abb/> [Accessed: 20180305].
- Lighthouse, 2018. Stena har skrivit batterikontrakt för Jutlandica. Available: <http://www.lighthouse.nu/sv/nyheter/032018/stena-har-skrivit-batterikontrakt-f%C3%B6r-jutlandica> [Accessed: 20180313]
- Ling-Chin, J., and A.P. Roskilly. 2016a. A comparative life cycle assessment of marine power systems. Energy Conversion and Management 127, 477-493.
- Ling-Chin, J., and A.P. Roskilly. 2016b. Investigating the implications of a new-build hybrid power system for Roll-on/Roll-off cargo ships from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study. Applied Energy 181, 416-434.
- Ling-Chin, J., and A.P. Roskilly. 2016c. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study. Energy Conversion and Management 117, 305-318
- Luleå hamn, 2017. Luleå hamn investerar i ny bogserbåt. Available: <http://www.portlulea.com/60/nyheter/nyhetsarkiv/2017-08-25-lulea-hamn-investerar-i-ny-bogserbat.html> [Accessed: 201803-13]
- Luo, W.-T., Zhu, S.-B., Gong, J.-H., and Z. Zhou. 2018. Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries. Procedia Engineering 211 (2018) 531-537.

Maritime Battery Forum. 2016. Life cycle assessment of batteries in maritime sector. Report prepared for the Norwegian Business Sector's NOx Fund (Naeringslivets NOx-fond).

Mildén, M. Regeringen ger uppdrag att analysera en övergång till fossilfria bränslen för statligt ägda fartyg
https://www.transportnet.se/article/view/587697/trafikverket_utvarderar_fossilfrihet_for_fartyg?ref=newsletter&utm_medium=email&utm_source=newsletter&utm_campaign=daily [Accessed: 20180306]. Transportnet. 2018.

Molinas, M., and A. Monti. 2017. The Marine Electrical Revolution: Battery Power at Sea. IEEE Electrification Magazine, September 2017, pp. 2-3.

Moore, K. 2015. Siemens powers first all-electric car ferry. Workboat. Available: <https://www.workboat.com/blogs/passenger-vessels/siemens-powers-first-all-electric-car-ferry/> [Accessed: 20180226].

Moore, R. 2017. Havyard wins Fjord1 order for five all-electric ferries. Passenger Ship Technology. Available: http://www.passengership.info/news/view,havyard-wins-fjord1-order-for-five-allelectric-ferries_48114.htm [Accessed: 20180305]

Moreno V.M., and A. Pigazo. 2007. Future trends in electric propulsion systems for commercial vessels. Journal of Maritime Research, IV(2): 81–100.

Norwegian Ministry of Transport and Communications. 2016. National Transport Plan 2018-2029. Meld. St. 33 (2016-2017) Report to the Storting (white paper). Available: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20162017/id2546287/> [Accessed: 20170815].

Nova Scotia Boat Builders Association. 2015. Review of All-Electric and Hybrid-Electric Propulsion Technology for Small Vessels. Halifax: Nova Scotia Boat Builders Association. Available: http://www.nsboats.com/wp-content/uploads/2015/03/HybridTechnologyReview_NSBA.pdf [Accessed: 2018-02-05].

Nohrstedt (2017). Linfärjan Gerd går från Diesel till el. NyTeknik, 2017-01-12.

Phillips (2018). Jätteinjektion till Northvolt – EIB skjuter till 517 miljoner kronor. Dagens Industri. 2018-02-12.

Port of Long Beach. 2010. World's First Hybrid Tugboat to Get a Sibling. Press Release. Available: <http://www.polb.com/civica/filebank/blobdownload.asp?BlobID=7603>

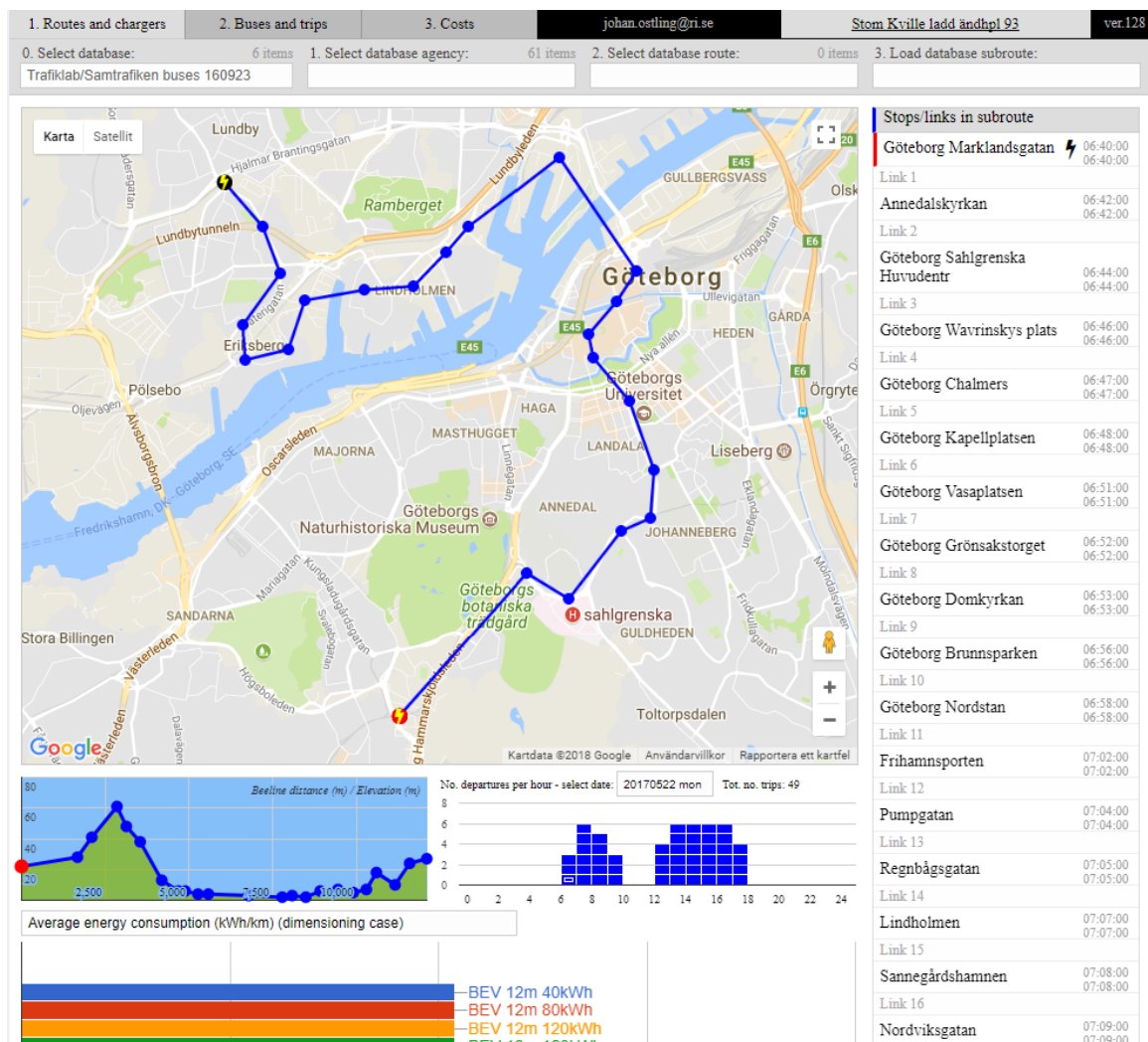
Rao, H., Huang, Z., Zhang, H., and S. Xiao. 2015. Study of fire tests and fire safety measures on lithiumion battery used on ships. 2015 International Conference on Transportation Information and Safety. IEEE.

Regeringskansliet (2018). Riksdagen antar historiskt klimatpolitiskt ramverk. <http://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2017/06/riksdagen-antar-historiskt-klimatpolitiskt-ramverk/> [Accessed: 2018-03-06].

- Regeringskansliet (2017). Nationell satsning på elektriska fordon. <http://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2017/05/nationell-satsning-pa-elektriska-fordon/> [Accessed: 2018-03-06].
- Romaire, M., and L. Dahlöf. 2017. The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries - A study with focus on current technology and batteries for light-duty vehicles. Report No. C 243. Gothenburg: IVL.
- Scandlines. 2017. The World's Largest Hybrid Ferry Fleet. Available: <https://www.scandlines.com/about-scandlines/press/documents> [Accessed: 20180228].
- Stockholms hamnar (2018). Stockholms hamnars hemsida: <https://www.stockholmshamnar.se/om-oss/nyheter/2014/stockholms-hamnar-infor-nya-miljorabatter-for-el-anslutning-och-lng-fartyg/> [Accessed 2018-02-15]
- Svensk Sjöfart (2018). <http://www.sweship.se/svensk-sjofart-i-korthet/sjofarten-i-siffror/> [Accessed: 2018-03-06].
- Sveriges Hamnar (2016), https://www.transportforetagen.se/Documents/Publik_F%C3%B6rbunden/Sveriges_Hamnar/Branschfr%C3%A5gor/Milj%C3%B6/Fr%C3%A5gor%20och%20svar%20om%20milj%C3%B6/Folder%20Landstr%C3%B6m.pdf [Accessed: 20180303]
- The Guardian, 2018. Worlds first electric container barges to sail from european ports this summer. Available: <https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/24/worlds-first-electric-container-barges-to-sail-from-european-ports-this-summer>
- Trelleborgs hamn (2018). Prislista Trelleborgs hamn 2018. Available: http://www.trelleborgshamn.se/wp-content/uploads/2018/01/Prislista-2018_sve-003.pdf
- TT, 2017. Fortsatta problem skjuter upp premiären för batterifärjan. Ny Teknik. Available: <https://www.nyteknik.se/fordon/fortsatta-problem-skjuter-upp-premiaren-for-batterifarjan-6882344>
- TU, 2017a. Denne båten kan bli en game changer. Available: <https://www.tu.no/artikler/denne-baten-kan-bli-en-game-changer/414047>
- TU, 2017b. Seatrans vil bygge om fire skip til plug-in hybrid. Available: <https://www.tu.no/artikler/seatrans-vil-bygge-om-fire-skip-til-plug-in-hybrid/397098>
- Wu, P. and R. Bucknall. 2016. Marine propulsion using battery power. In: (Proceedings) Shipping in Changing Climates Conference 2016. Available: http://discovery.ucl.ac.uk/1528988/1/Wu_Marine%20propulsion%20using%20battery%20power_full%20paper_final.pdf

7. APPENDIX A - Elektrifiering bussystem

För att kunna visualisera och på ett övergripande sätt se alla olika aktörers bidrag till elektrifiering i form av utrustning/tjänster och dess kostnader har RISE Viktoria i ett projekt som är finansierat av Energimyndigheten ”Energiförsörjningsalternativ för elektrifierade bussystem, 41407-1” (förkortat EAEB) analyserat elektrifiering av bussar som körs i komplexa linjesystem, men även ”enkla” där enstaka/fåtal buss/bussar körs. Med det som utgångspunkt för den maritima sidan ser man såväl likheter som olikheter. För bussprojektet har det precis tagits fram ett mjukvarubaserat verktyg som körs från ett webinterface där man utifrån en given tidtabell förser den med rätt antal fordon och rätt placerade laddare, analyserar bl.a. vilken energiförbrukning respektive fordon har beroende på vilken batteristorlek bussen har etc. Som grund för denna analys finns även detaljer som fordonets vikt, uppförs- och nedförsbackar under körning, förarens körstil, längd på körsträckor mfl. Batteriets kondition över tid och laddarnas laddeffekt samt verkningsgrad är andra viktiga parametrar för att kunna göra energi- och kostnadsberäkningar. Nedan visas som exempel figurer med olika vyer av verktyget för en specifik linje i Göteborg.



Figur: Skärmdump EAEB verktyget. Exempel som visar en linjesträckning i Göteborg, med höjdprofil, antalet avgångar etc. givet en specifik tidtabell.

Items 3. Load database subroute: Depots: Add...

Stops/links in subroute

Göteborg Marklandsgatan	06:40:00	06:40:00
Link 1		
Annedalskyrkan	06:42:00	06:42:00
Link 2		
Göteborg Sahlgrenska Huvudentr	06:44:00	06:44:00
Link 3		
Göteborg Wavrinskys plats	06:46:00	06:46:00
Link 4		
Göteborg Chalmers	06:47:00	06:47:00
Link 5		
Göteborg Kapellplatsen	06:48:00	06:48:00
Link 6		
Göteborg Vasaplatsen	06:51:00	06:51:00
Link 7		
Göteborg Grönsakstorget	06:52:00	06:52:00
Link 8		
Göteborg Domkyrkan	06:53:00	06:53:00
Link 9		
Göteborg Brunnsparcken	06:56:00	06:56:00
Link 10		
Göteborg Nordstan	06:58:00	06:58:00
Link 11		
Frihamnssporten	07:02:00	07:02:00
Link 12		
Pumpgatan	07:04:00	07:04:00
Link 13		
Regnbågsgatan	07:05:00	07:05:00
Link 14		
Lindholmen	07:07:00	07:07:00

Subroute details

Göteborg Marklandsgatan - Göteborg Eketrägatan

database: Trafiklab/Samtrafiken buses 170525
agency: Västtrafik
rt. short name: 16
route id: 7044
headsign: Göteborg Marklandsgatan
no. stops: 23
beeline length: 12100m
path length:
duration min: 00:40:00
duration max: 00:44:00
elevation gain: 5m
cum. elev. gain: 73m
cum. elev. loss: -68m
color: blue
no. charge pts: 2
no. chargers: 3
charge power: 1.35MW
avg. transfer speed: 15km/h

< Show transfer links | Add to config. >
Get navig. path

Stop/link details

Göteborg Marklandsgatan

lat: 57.674402
lon: 11.936042
id: 740025657
agency stop id: 4760
location type: stop
parent station:
beeline dist.: 0m
path distance:
elevation: 22m
cum. elev. gain: 0m
cum. elev. loss: 0m
charge point: Göteborg Marklandsgatan
no. chargers: 1
charge power: 450kW

Charge point...

Charge points in config.

no. charge points: 3
total no. chargers: 5
total charge power: 2.25MW

< Show | Remove all

Depots in configuration

Kville
no. chargers: 21 x 22kW

< Show | Remove

Subroutes in configuration

Fyrkörtorget - Göteborg Eketrägatan
Västtrafik route 16 - 7044
no. charge pts: 2

< Show | Remove

Göteborg Eketrägatan - Fyrkörtorget
Västtrafik route 16 - 7044
no. charge pts: 2

< Show | Remove

Göteborg Eketrägatan - Göteborg Marklandsgatan
Västtrafik route 16 - 7044
no. charge pts: 2

< Show | Remove

Göteborg Marklandsgatan - Göteborg Eketrägatan
Västtrafik route 16 - 7044
no. charge pts: 2

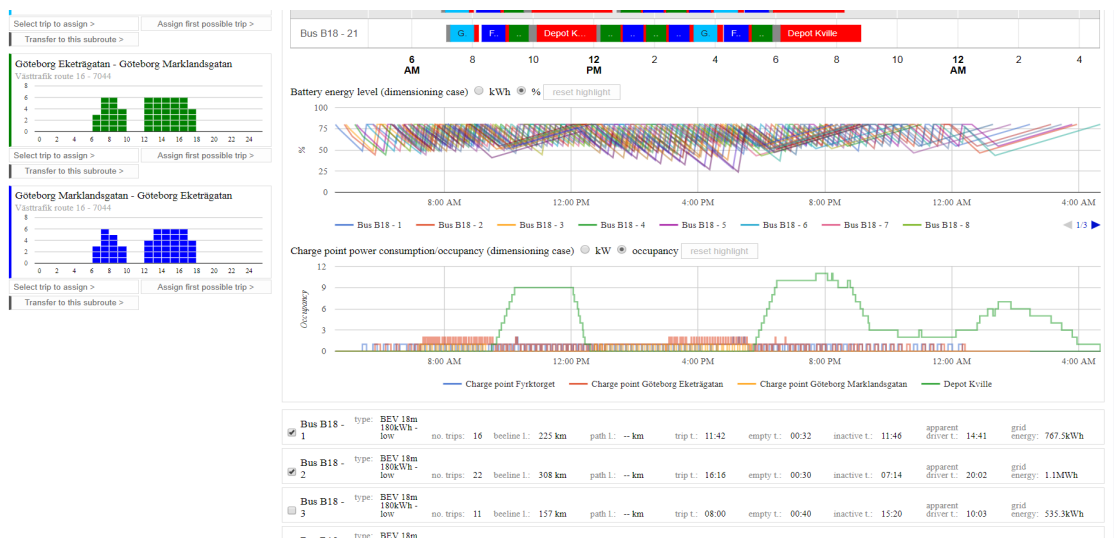
< Show | Remove

< Show all on map

Figur: Skärmdump EAEB verkyget. Mer detaljerad data kring hållplatser, laddare, laddeffekter, etc. för linjesträckningen i föregående figur.



Figur: Skärmdump EAEB verktyget. Mer detaljerad information med detaljer om busstrafiken och när enskilda bussar körs, laddas etc. för linjesträckningen i föregående figur.

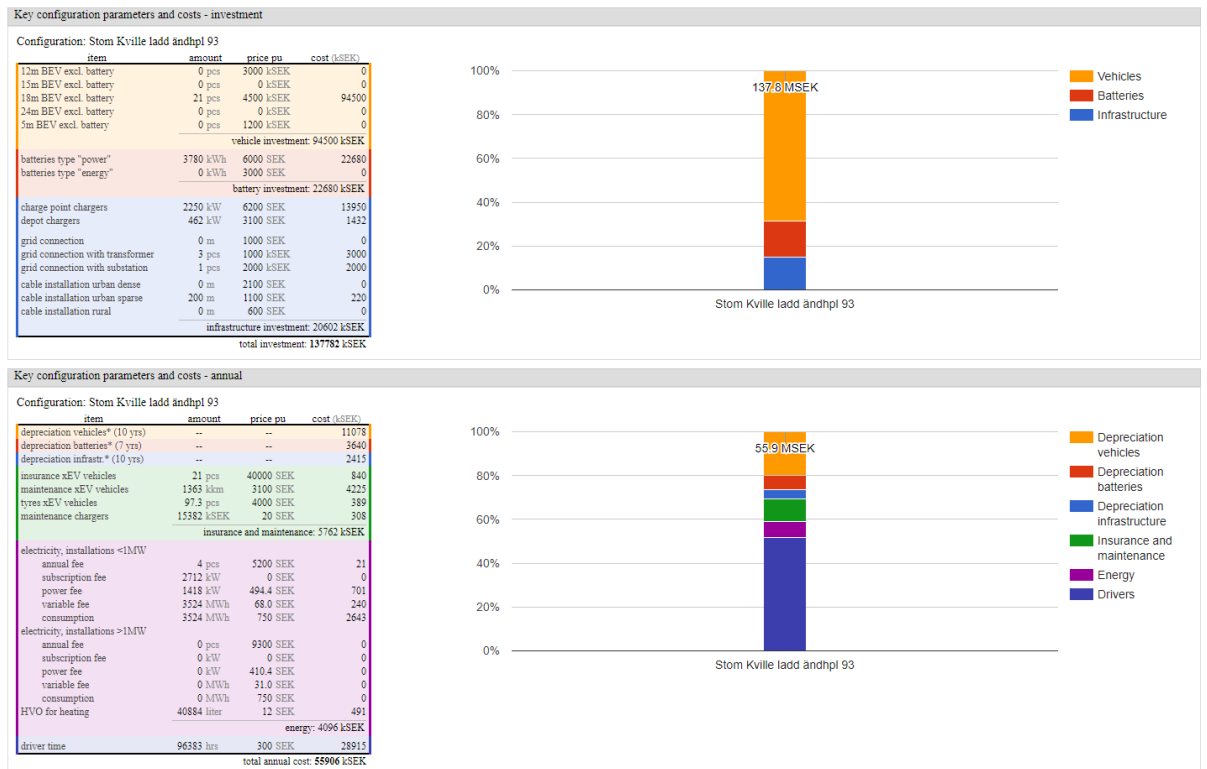


Figur: Skärmdump EAEB verktyget. Mer detaljerad information med detaljer om busstrafiken och när enskilda bussar körs, laddas etc. för linjesträckningen i föregående figur. Mer detaljerad information kring laddstatus i bussarna.

Utifrån ovan analys kan ett antal slutsatser dras. I projektet har, tillsammans med branschen (som varit projektpart, t.ex. AB Volvo, Göteborg Energi m.fl.), ett antal slutsatser om vilka systemparametrar som är viktiga, bl. a beroende på vilket trafikarbete som skall utföras och en mängd andra detaljer. Linjer kan variera på olika sätt, t.ex. kan de gå fram och tillbaka med hög eller låg turtäthet på långa som korta sträckor, och det finns komplexa linjenät där en individuell buss kan köra många olika linjesträckningar på ett dygn.

Laddarnas geografiska placering är av stor vikt för lösningen och ekonomin samt vilken laddstrategi som tillämpas. I bussbranschen pratas det främst om ändhållplatsladdat respektive depåladdat. Ändhållplatsladdat kan enkelt uttryckas som att bussen kan laddas innan den startar sin tur, och när turen kommer till ändhållplatsen kan den välja att ladda eller inte. I depåladdningsalternativet laddas bussen på natten och förhoppningsvis räcker den laddningen hela trafikdygnet. Bussens batteri har i dessa två strategier två olika batterikemier, en som är energioptimerad för depåladdning och en som är effektoptimerad för ändhållplatsladdning.

Den typiska energiförbrukningen är c:a 2 kWh/km för en buss. Bussens batteri kan i depåladdningsutförande ha stora och tyngre batterier på 500 kWh och i ändhållplatsutförandet mindre och lättare typ på 180 kWh. Laddarna i ändhållplatsalternativet kan ha en kapacitet på c:a 500 kW och i depåfallet 80 kW. Laddtiden för ändhållplatsalternativet är viktigt och ligger i spannet 2-6 minuter, i depåfallet handlar det om timmar. Fordonets vikt och passagerarkapacitet samt beläggningssnitt är av betydelse när nyttor skall beräknas. En buss som rymmer c:a 80 personer väger 18 ton fullastad. Man räknar i snitt med 65% beläggning under ett trafikdygn i ett storstadsområde. För att kunna beräkna de övergripande kostnaderna är pris/kostnad för olika systemkomponenter av betydelse. För att få en total kostnad behöver olika aktörers respektive kostnader läggas ihop, vilket ”verktyget” gör. Med detta resultat möjliggörs kostnadsjämförelser mellan olika strategier. Följande figurer visar några figurer med olika kostnadsvyer av verktyget för samma specifika linje i Göteborg som i tidigare exempel.



Figur: Skärmdump EAEB verkyget. Kostnadsberäkning av elektrifierat bussystem för linjexemplet, där översta stapeln visar inköpskostnad (fördelat på fordon, batterier samt infrastruktur) och nedersta stapeln driftskostnaden per år (där förarkostnaden är halva driftskostnaden).

Verkyget behöver justeras för att göra motsvarande beräkningar för elektrifierad sjötransport. Ett sätt att hantera energiförbrukningen för ett visst fartyg är att göra beräkningen för ett representativt år då fartyget går i en trafik. Om alla delsträckor summeras under året och årsförbrukningen av drivmedel är känt går det att räkna fram en årsmedelförbrukning. På detta sätt kan man "hantera" avvikelserna med vattenström/vågor/vind/tidvatten och väder samt givetvis acceleration, marschfart, tilläggning samt "putta" båt mot kajen.