



Batteridrift av ferger

ZERO-RAPPORT november 2010

Olav Andreas Opdal



Om ZERO

Zero Emission Resource Organisation er en miljøstiftelse som skal bidra til å begrense de menneskeskapte klimaendringene. Vårt utgangspunkt er at det finnes utslippsfrie alternativer til de fleste utslippskilder. ZERO har som mål å være en pådrivere for de utslippsfrie løsningene og jobbe for at de realiseres framfor de forurensende.

Spørsmål om denne rapporten kan rettes til:
ZERO – Zero Emission Resoruce Organisation
Maridalsveien 10
0178 Oslo
www.zero.no
zero@zero.no



Forord

Denne studien er et resultat av ZERO-prosjektet «Batteriferge». Hensikten med rapporten har vært å utrede mulighetene for å erstatte dieselfremdriftssystem med batterielektrisk fremdrift på ferger, og hvilken effekt en slik omlegging kan ha som klimatiltak i norsk innenriks sjøtransport.

Prosjektet er utført av Zero Emission Resource Organisation (ZERO) med god støtte fra en referansegruppe med representanter fra Rederienes Landsforening, Tide/Sjø, Energi Norge, Statens vegvesen og AGR-Marine Engineering.

Prosjektet er finansiert av Rederienes Landsforening, Statens vegvesen og Energi Norge.

Olav Andreas Opdal
Oslo, 21.10.2010

Rapporten er laget med støtte fra:



Sammendrag

Innenlands fergetrafikk i Norge slipper per i dag ut ca. 400 000 tonn CO₂ i året. Dette utgjør i underkant av 1 % av de norske utslippene. Gjennom denne rapporten vil vi vise at det er teknologisk og praktisk mulig å redusere disse utslippene til et minimum ved at fergene går over på strøm og kun bruker diesel som reservedrivstoff. Dette gjelder både nye ferger og mange av de gamle som kan bygges om. I rapporten viser vi hvilke utfordringer som er knyttet til batteridrift av ferger og hvordan disse utfordringene kan håndteres.

I dag går fergene stort sett på forurensende diesel. For å kunne bytte ut dieselen og gå over på fornybar, elektrisk energi, må den energien fergene trenger kunne lagres i for eksempel et batteri. Eller sagt svært enkelt; batteriet erstatter kanna med diesel. Mange fergesamband i Norge kan være godt tilpasset batteridrift med hyppige, korte overfarter og lengre stans om natten. Under disse oppholdene kan batteriene om bord i fergene lades opp.

Kunnskap og erfaringer knyttet til utvikling av batterier for elbiler er meget nyttig i arbeidet med batterier for ferger. Kravene til batteriene er ulike, men mange av utfordringene er like.

For ferger er innkjøpspris, vekt, syklisk levetid og ladetid svært viktige faktorer når enn skal vurdere hvilke batterityper som er egnet for ferger. I tillegg kommer spørsmålet om sikkerhet. I rapporten analyserer vi en rekke forskjellige batterityper og konkluderer med at det først og fremst er batteritypene litium ion, nikkelmetallhybrid-batterier (NiMh), nikkel-kadmiumbatterier (NiCd), blysyrebatterier og kanskje også ZEBRA-batterier som per i dag er godt nok utviklet til at de vil kunne benyttes i ferger. Av disse er sannsynligvis litium ion og NiMh best egnet. Dessuten finnes det flere batterityper som ennå er på forsknings- og utviklingsstadiet. Den endelige vurderingen av batterier må gjøres for det enkelte prosjekt.

I arbeidet med denne rapporten har vi hentet inn informasjon om forskjellige ferger, skip og båter som vurderer batterier til fremdrift. Det skotske statseide fergeselskapet CMAL og norske AGR Marine Engineering har begynt å arbeide med mulighetene for batteridrevne ferger. Norske Fjellstrand har også utviklet et konsept for en batteriferge for sambandet Jondal – Tørviksbygd.

ZERO anbefaler i denne rapporten at vi i Norge, gjennom et forprosjekt på et enkelt fergesamband, skaffer oss mer kunnskap om kostnader, batteriets levetid, teknologisk gjennomførbarhet og behov for ladetid og infrastruktur på land. Forprosjektet kan for eksempel initieres ved at en fylkeskommune tar initiativ til det på en av fylkets ferger.

Norge har forpliktet seg til å redusere de norske utslippene av klimagasser med 15 til 17millioner tonn innen 2020. Selv om fergedriften innenlands ikke utgjør noen stor andel av Norges totale utslipp, er det viktig å kutte utslipp der det er mulig. Arbeidet med å utvikle, utprøve og videreutvikle teknologien som gjør klimavennlig batteridrift av ferger mulig, er også viktig fordi denne kunnskapen og teknologien kan dras nytte av i fergedrift og skipsfart i verden for øvrig. Slik vil det å få norske ferger over fra dieseldrift til batteridrift kunne ha langt større betydning enn det at vi kutter utslipp nasjonalt.

ZERO arbeider for å begrense klimaendringene gjennom å vise fram og få gjennomslag for utslippsfrie energiløsninger blant annet i transportsektoren. Får vi fergene våre over på batteridrift, reduserer vi klimagassutslippene samtidig som vi slipper støy og annen forurensning som dagens dieselferger medfører.

Forkortelser

DOD – Depth of discharge

NiMH – Nikkel-metallhydrid

NiCd – Nikkel-kadmium

Li-ion – Litium-ion

Li-S – Litium-svovel

MGO – Marin gassolje

Innhold

Forord	3
1 Innledning	8
1.2 Ferger og utslipp	8
1.3 Batteridrift av ferge	8
1.4 Reguleringer og tilskuddsmuligheter for batteriferger	8
1.4.1 NOx-fondet	8
1.4.2 Transnova	9
1.4.3 Innovasjon Norge	9
1.4.4 Forskningsrådet	9
1.4.5 Stille krav i anbud	9
1.5 Muligheter for en utslippsfri fergesektor	9
2 Batteriteknologi	10
2.1 Grunnleggende om batteri og elektrokjemi	10
2.2 Kriterier for valg av batteri	11
2.3 Batterityper	12
2.3.1 Blysyrebatterier	12
2.3.2 Nikkel-metallhydrid (NiMH)	13
2.3.3 Litium-ion-batterier	14
2.3.4 NiCd-batterier	17
2.3.5 ZEBRA-batterier	20
2.3.6 Litium-polymer-batterier	20
2.4 Mulige fremtidige batterier	21
2.4.1 Sink-luft-batterier	21
2.4.2 Litium-svovel	21
2.5 Sammenligning av batteriteknologier	22
3 Erfaringer med og teknologistatus for batteridrift av større skip og ferger	23
3.1 Ubåter	23
3.2 CMAL	23
3.3 Fergen Maj	23
3.4 Planet Solar	24
3.5 Norske initiativ	24
3.5.1 AGR Marine Engineering	24
3.5.2 Fjellstrand AS	24
3.5.2 Sandvik Båtbyggeri	24

4 Kan batterier benyttes til full eller delvis fremdrift av en norsk ferge?	25
4.1 Dimensjonering av batterifergeser	25
4.1.1 Dimensjonering av batteripakker	25
4.1.2 Driftsprofil.....	26
4.1.3 Hybriddrift.....	26
4.1.4 Nybygging kontra ombygging av fergeser.....	27
4.1.5 Komponenter til en batteriferge	27
4.1.6 Nettkapasitet	27
4.1.7 Formelle krav til batterifergeser.....	28
4.1.8 Jondal - Tørvikbygd	28
4.2 Økonomi	28
4.3. Miljøbelastning	28
4.4 Næringsmuligheter med batterifergeser.....	29
5 Oppsummering og konklusjoner	30
6 Referanseliste	32

Liste over figurer

Figur 1: Elektrokjemisk celle (Kiehne 2003).....	10
Figur 2: Blysyrebatteri (Warrier mfl 2009)	12
Figur 3: Litium-ion-batteriets lade- og utladningsmekanisme (Warrier mfl 2009).....	15
Figur 4: PlanetSolar (Foto: PlanetSolar)	23
Figur 5: Slik ser Fjellstrand AS for seg at en batteriferge kan se ut (Fjellstrand 2010)	24
Figur 6: Utladning på en tenkt batteridrevet ferge	25
Figur 7: Batteripakkevekt for fergeser	26
Figur 8: Driftsprofil for en ferge (Marintek 1998).	27

Liste over tabeller

Tabell 1: Oversikt over li-ion-teknologier og – produsenter (Warrier mfl 2009)	17
Tabell 2: Oversikt over batteriteknologi (Warrier mfl 2009)	22
Tabell 3: Driftsprofil for en ferge (Marintek 1998).....	26

1 Innledning

Norge har satt som mål å begrense sine klimagassutslipp slik at den globale middeltemperaturen ikke øker med mer enn 2 °C fra førindustriell tid (gitt at andre industriland reduserte tilsvarende). Dersom temperaturen stiger mer enn dette setter en fullstendig nedsmelting av grønlandsisen inn (Gregory mfl 2004), og en kollaps i Amazonas' økosystem vil kunne omgjøre regnskogen til en savanne (Cox mfl 2004). Ifølge en norsk studie publisert i tidsskriftet *Climatic Change* i juni 2007 er sjansen 50 prosent for å unngå global oppvarming over 2 °C, forutsatt at globale utslipp av klimagasser kuttes med 80 prosent fra år 2000 innen 2050 (Berntsen mfl 2007). For å unngå global oppvarming er det essensielt at energibruken legges om på alle områder i samfunnet. Så også i fergesektoren, som per i dag er avhengig av fossil energi. På sikt kan batteridrift på norske ferger bidra til kutt av klimautslipp, om elektrisiteten som blir brukt ikke har ført til utslipp ved generering.

1.2 Ferger og utslipp

På grunn av spredt bebyggelse ved kysten og mange fjorder er det i dag rundt 180 ferger i bruk i Norge. Selv om bruer mange steder har tatt over funksjonene deres, spiller ferger fortsatt en viktig rolle i norsk infrastruktur. Omkring 80 prosent av norsk fergetransport er lokalisert i området mellom Stavanger og Trondheim. Transporten av mennesker og biler fører til betydelige tidsbeparelser for folk langs kysten.

Det er Vegdirektoratet som har ansvaret for riksvegfergene, mens fylkeskommunene har ansvaret for norske fylkesvegferger. Etter en forvaltningsreform er rundt 60 prosent av de statseide riksvegene eid av fylkeskommunene fra 1.1.2010. Dette medfører at ansvaret for de fleste fergesamband overføres til fylkeskommunene (Statens vegvesen 2010). Etter reformen har fylkene ansvaret for 77 nye fergesamband, mens staten gjennom Statens vegvesen har ansvaret for 18 fergesamband (Samferdselsdepartementet 2008).

Den respektive myndighet kan stille operasjonelle krav til drift på ulike samband, inklusive krav om batteridrift på ferger.

De norske fergene er hovedsakelig drevet med forbrenningsmotorer. Foruten enkelte ferger som går på naturgass, bruker de fleste marin gassolje (mellomdestillat, en type diesel) som drivstoff. Naturgass har mange fordeler fremfor diesel. Blant medfører den betydelig lavere NOx-utslipp, men naturgass gir kun marginalt lavere CO2-utslipp enn diesel, og bruken av den kan derfor ikke betraktes som et klimatiltak. Konvensjonelle ferger forbruker altså alle fossilt driv-

stoff som bidrar til global oppvarming. Selv om mange ferger bidrar til kortere kjørelengde for kjøretøy og derved til kutt i klimagassutslipp, er det fortsatt store muligheter for kutt av klimagassutslipp fra fergesektoren.

Samlet bidrar den norske innenriksflåten til utslipp av om lag 4 millioner tonn CO2-ekvivalenter i året (ca. 8 prosent av totale norske CO2-utslipp). Ferger står for om lag 418 000 tonn CO2-utslipp i året (Gude mfl 2005).

1.3 Batteridrift av ferge

Per i dag er skip i svært begrenset grad drevet på batterier. Det best kjente unntaket er ubåter, der konseptet er etablert. Målet med ZEROs prosjekt «Batteridrift av ferger» er å avdekke muligheter for slik drift også i ferger. I utgangspunktet virker ferger som en ideell kandidat til batteridrift, på grunn av hyppige og korte overfarter og ofte stans om natten da fergene kan lades opp. I tillegg er fergenes tyngde en tilsynelatende fordel. Batterityngden vil ikke, selv med en forholdsvis stor batteripakke utgjøre noe problem. Målet med prosjektet er med bakgrunn i tilgjengelig info om batterier å anslå hvilken teknologi som er best tilpasset fergedrift, samt vurdere om mulige fremtidige batteriteknologier kan gjøre prosjektet lettere gjennomførbart.

Med jevne mellomrom siden midt på 1980-tallet er det i Norge produsert rapporter og utredninger om mulighetene ved batteridrift av ferger. Den tidligste ZERO kjenner til, er rapporten «Batteridrevne ferger - teknisk økonomiske analyser», laget av IKO Maritime AS. Rapporten slår fast at det er umiddelbart interessant å se på hva elektrisk drift av ferger vil kunne innebære, på grunn av lave strømpriser (IKO Maritime AS 1985). ZERO kjenner også til et par andre utredninger prosjekter som generelt er positive til mulighetene for batteriferger. Med de siste års utvikling i batteriteknologi for el-biler er det likevel interessant å se på batteriferger med nye øyne.

1.4 Reguleringer og tilskuddsmuligheter for batteriferger

For at prosjektet skal bli en realitet, må myndighetene enten subsidiere de batteridrevne fergene eller stille krav om dette. Det finnes flere mulige kanaler for støtte til batteridrevne ferger.

1.4.1 NOx-fondet

Næringslivets NOx-fond har som formål å redusere utslipp av såkalt nitrogenoksid (NOx). Fondet er opprettet etter en avtale mellom myndigheter og

næringslivet. Den er stiftet av 14 samarbeidende næringsorganisasjoner. Fra NOx-fondet kan skip med motorer over 750 kW søke støtte. Til skip med motorer under 750 kW blir det ikke utbetalt støtte, fordi disse skipene ikke er avgiftspliktige.

NOx-fondet har i 2010 100-150 millioner kroner tilgjengelig til prosjekter som skal gjennomføres i 2011. Prosjektene det søkes til, kan få 75 % støtte fra fondet, begrenset oppad til inntil 100 kr/kg i reduserte NOx-utslipp (NHO 2010b)

1.4.2 Transnova

I 2008 ga Samferdselsdepartementet Statens vegvesen i oppgave å lede Transnovaprojektet. Transnovaprojektet har som formål å støtte tiltak som bidrar til å redusere klimagassutslipp. Prosjektet skal i første omgang drives i tre år og disponerer 50 millioner til klimatilbud i transportsektoren. Deretter skal projektet evalueres for å se om ordningen skal bli permanent. Tanken er at Transnova skal bli for transportsektoren det statsforetaket Enova er for energiproduksjonen i Norge. Delmål 1 for Transnova er å erstatte fossilt drivstoff med fornybart, også innenfor sjøtransport. Et prosjekt med batteridrift av ferger vil dermed kunne få støtte fra Transnova (Transnova 2010)

Transnova har støttet projektet med batteridrift som Fjellstrand har iverksatt (omtalt i 3.5.2)

1.4.3 Innovasjon Norge

Innovasjon Norge tilbyr tjenester og programmer som skal bidra til å utvikle distriktene, øke innovasjonen i næringslivet over hele landet og profilere norsk næringsliv og Norge som reisemål. Staten er en sammenslåing av mange tidligere støtteprogrammer for næringslivet, blant annet Statens nærings- og distriktutviklingsfond. Innovasjon Norge bidrar til næringsutvikling. Siden batteriferge er banebrytende i verdensammenheng kan det ses på som næringsutvikling at Norge utvikler og tar i bruk denne teknologien. På sikt kan norske kompetansemiljøer selge teknologien til utlandet (Innovasjon Norge 2010).

1.4.4 Forskningsrådet

Fornybar energi og marin forskning har forskjellige programmer i Norges forskningsråd. Forskningsrådet støtter imidlertid i hovedsak grunnforskning. Likevel er det mulig at enkelte deler av utviklingen av en batteriferge kan havne inn under program som for eksempel RENERGI (Fornybar energi) (Norges Forskningsråd 2010a) eller MAROFF (marin forskning) (Norges Forskningsråd 2010b).

1.4.5 Stille krav i anbud

En annen mulighet til å få innført batteridrift av ferger er å styre drivstoffbruken i ønsket retning gjennom krav i anbud. Fergene i Norge drives på oppdrag i perioder på 5-7 år, og i oppdragsteksten eller anbudsutlysningen kan fylkene eller staten sette krav til miljøvennlig drift.

1.5 Muligheter for en utslippsfri fergesektor

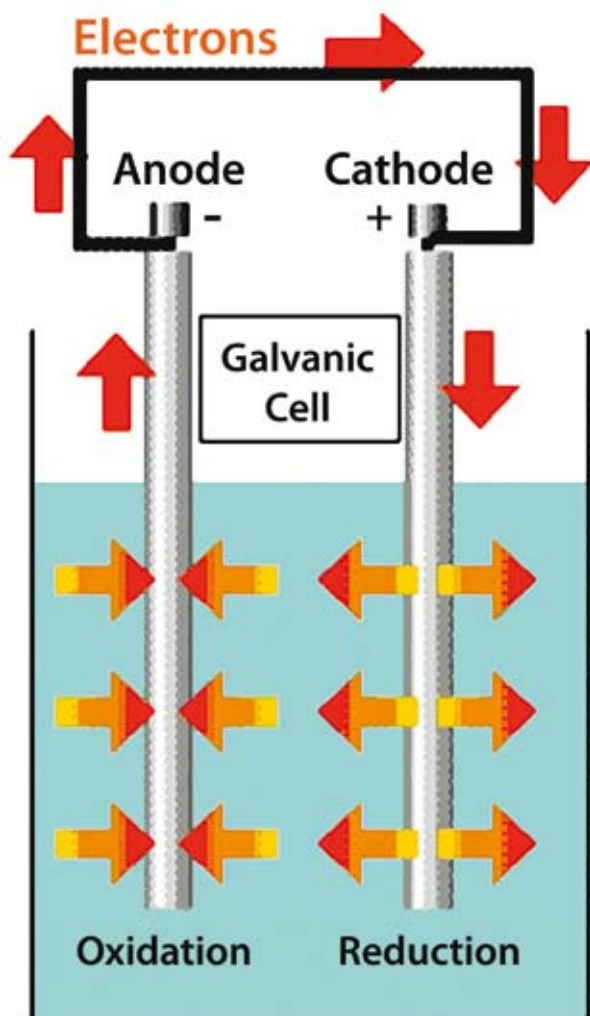
I tillegg til batteridrift av ferger finnes flere andre muligheter for utslippsfri fergetransport. ZERO har tidligere utredet både bruk av biodiesel og hydrogen i ferger. Publikasjonene er tilgjengelig på nettsiden www.zero.no.

2 Batteriteknologi

For å kunne benytte elektrisk energi på ferger må energien lagres, og dette kan for eksempel gjøres i batterier. Problemet er at elektrisk energi må konverteres til en annen form før lagring. I batterier lagres den elektriske energien i kjemiske forbindelser, og under utladning skjer en kjemisk prosess som genererer energi i form av elektrisitet (Kiehne 2003). Batterier består av en eller flere elektrokjemiske celler og finnes i to hovedtyper: Primær- og sekundærbatterier. Primærbatterier kan omdanne den kjemiske energien bare én gang, mens sekundærbatterier kan lades opp igjen og brukes flere ganger (Kiehne 2003).

2.1 Grunnleggende om batteri og elektrokjemi

Figur 1 viser en elektrokjemisk celle. Den positive elektroden kalles katode, mens den negative elektroden kalles anode. Et batteris størrelse og ytelse karakteriseres med spenningen mellom polene (volt/V) og den totale energien lagret i cellen (wattimer/Wh). Energien ledes ut av batterier når elektronene går fra den negative til den positive elektroden.



Figur 1: Elektrokjemisk celle (Kiehne 2003)

Forskjellige typer batterier har forskjellig elektrisk potensial, som regel på et par volt. For å få tilstrekkelig høy spenning til bruk på en ferge, kobles flere celler i serie.

Mengden energi som kan hentes ut av et batteri, er avhengig av hvor raskt batteriet utlades. Generelt vil det være mulig å få mer energi ut av et batteri med lavt effektuttak. Energimengden i et batteri er oppgitt med en bestemt strøm over en tidsperiode. Dette forholdet kalles batteriets kapasitet og er angitt som:

$$t = C / I$$

I dette forholdet angir C kapasiteten når den utlades med 1 ampere i timen. I er strømstyrken batteriet lades ut med, og t er tiden i timer batteriet varer.

De parametrene som foruten batteriets utforming påvirker utladningen mest, er:

- Utladningsstrøm
- Spenningsgrense, altså sluttspenningen
- Temperatur

Etter hvert som batteriet lades ut, vil spenningen falle, og batteriets evne til å levere effekt blir redusert. For noen batterityper er denne prosessen jevn, mens andre typer leverer godt lenge for så raskt å levere mindre effekt. Driftsmessig er det siste å foretrekke, men dette stiller høye krav til utstyret som skal angi restkapasiteten i batteriet.

Mulighetene for storskala introduksjon av elbiler har satt fart i utviklingen av batteriteknologi, siden det stilles strenge krav til batterier tiltenkt elbiler. Utviklingen av elbiler er tett knyttet til utviklingen av kostnadseffektive, sikre og holdbare batteriløsninger.

De første elbilene ble produsert så tidlig som på 1890-tallet, og rundt århundreskiftet var det omtrent 15 000 elbiler i USA. Elektriske busser, trucker og taxier ble satt i drift og opererte lønnsomt. Men den raske utviklingen av forbrenningsmotoren gjorde at elbilene etter hvert ble utkonkurrert. Etter krigen forsvant elbilene, helt til de igjen ble aktualisert, først utløst av oljekrisene på 70-tallet av trusselen fra global oppvarming (Kiehne 2003). I nyere tid har store forskningsprosjekter hatt som mål å utvikle batteriteknologi. Siden tidlig på 1990-tallet har blant annet United States Advanced Battery Consortium (USABC) ledet et stort samarbeidsprosjekt mellom industrien og den amerikanske regjeringen med tanke på utvikle mer avansert batteriteknologi. De to teknologiene som ble ansett for å ha størst potensial og mottok mest utviklingsstøtte, var nikkell-metallhybrid-batterier (NiMH) og litium-ion-batterier.

2.2 Kriterier for valg av batteri

Den siste tids utvikling av batterier for el-biler er svært interessant for batterifergedrift. Kravene som stilles til ferger og biler er ikke like, men mange av utfordringene er de samme. For elbiler har batterienes vekt vært den klart mest begrensende faktoren. Dette har ledet forskningen i retning av svært energikompakte batteriløsninger. Også en rekke kriterier påvirker valg av batteri til en batteriferge.

Ladetiden

Ladetiden er den tiden det tar å lade opp batteriet fra utladet tilstand. Ved drift av batteriferge er mellomladninger ved korte kaianløp ønskelig. Dette vil redusere batteripakkens størrelse, kostnad og vekt. Ladetiden avhenger av effekten som benyttes under lading. Noen batterityper tåler ikke at batteriet lades opp ved veldig høy effekt. Hybriddrift (et system som kombinerer konvensjonell forbrenningsmotor med el-motor til fremdrift) krever at batteriet tåler hyppig lading og utladning.

Syklisk levetid

Alle batterier forringes ved bruk og over tid. Dette skyldes forandringer i struktur og sammensetning av kjernekomponenter i battericellene ved oppladning og utladning. Batteriets sykliske levetid er angitt som det antall ganger et batteri kan lades opp før den nominelle kapasiteten er redusert til 80 prosent (Kalahammer mfl 2007). Syklisk levetid er en viktig faktor i driften av en batteriferge. Den spiller sterkt inn på driftskostnadene, siden kapitalkostnadene ved batterifergedrift er avhengig av hvor lang tid batteriene varer før de må byttes ut.

Energitetthet

For elbiler er batteriets energitetthet den kanskje viktigste parameteren av alle. Energitetthet måles i Wh/kg (wattimer per kilo) og angir hvor mye energi som kan hentes ut av batteriet per vektenhet. Tettheten er avhengig av effekten batteriet lades ut med. Energitetthet er også viktig for batterifergeprosjektering. Det er ønskelig at fergebatteriene har så høy tetthet som mulig. Dette reduserer batteripakkens vekt og størrelse.

Effektitetthet

Effektitetthet uttrykkes i w/kg (watt per kilo) og angir den maksimale effekten som kan hentes ut fra batteriet. Denne tettheten er avhengig av hvorvidt batteriet er nyladet eller nesten utladet. Det er vanlig å oppgi ladetilstanden når batteriet er 80 prosent utladet. Dette betegnes som 80 DOD (Depth of discharge).

Pris

Det er generelt høyere pris på de mest teknologisk avanserte batteriene. Ofte har disse batteriene også de fremste egenskapene. Det blir derfor en optimaliseringssak om det skal investeres i de dyreste batteriene. Mulig ekstraustyr for å spesialtilpasse batterier til batteriferge kan også gjøre enkelte batterier mer kostbare.

Minneeffekt

Noen batterier er utsatt for den såkalte minneeffekten. Minneeffekten oppstår når et batteri ikke er fullstendig utladet og deretter lades. Om batteriet gjennomgående lades opp etter at det er bare delvis utladet, for eksempel ved 50 prosent utladning, vil batteriet til slutt bare holde 50 prosent lading (Warrier mfl 2009).

Resirkulerbarhet

Et viktig kriterium for valg av batteri er at det kan resirkuleres og at det finnes utbygd infrastruktur for behandling av den aktuelle batteritypen.

Selvutladningstid

Hvis et batteri ikke benyttes, vil det likevel lades ut etter en viss tid. Selvutladningstiden er avhengig av temperaturen i batteriene og type batteri. Enkelte batterier tar skade av å stå utladet over lengre tid.

Sikkerhetsvurderinger

Noen batterier trenger kontrollsystemer for å sikre at det ikke utvikler seg varme og eksplosjonsfare. Dette kan medføre økte kostnader når det er snakk om nye bruksområder. Utvikling av varme kan for noen batteriers vedkommende kreve kjøling. Her vil sjøgående fartøy ha en fordel, siden kjølevann er lett tilgjengelig.

2.3 Batterityper

Som nevnt har utviklingen av batterityper gått raskt de siste årene, hovedsakelig på grunn av strenge krav til rekkevidde, vekt og effekt i en effektiv elbil. Utviklingen gir nå gode erfaringer for bruk i batteriferger. I det følgende ser vi nærmere på de ulike batteritypenes styrker og ulemper.

2.3.1 Blysyrebatterier

Per i dag er blysyrebatterier de mest brukte. Slike batterier ble først tatt i bruk for om lag 150 år siden. Syrebatteriene består blant annet av nettplater, positive og negative plater, separatorer og en elektrolytt (Warrier mfl 2009).

På den positive polen av batteriet er det aktive materialet et rutenett fylt med blyperoksid, en sammensetning som inneholder perokside anioner eller oksygen-oksygen enkeltbinding). Materialet på den negative polen er en blysvamp plassert på nett. Begge platene er svært porøse og lar elektrolytten trenge fritt gjennom platene.

Hvert batteri består av grupper av positive og negative plater med samme ladning. Platene er sveiset sammen og holdes adskilt med separatorer. Separatorene er laget av porøs plastikk, elektrisk isolerende plater

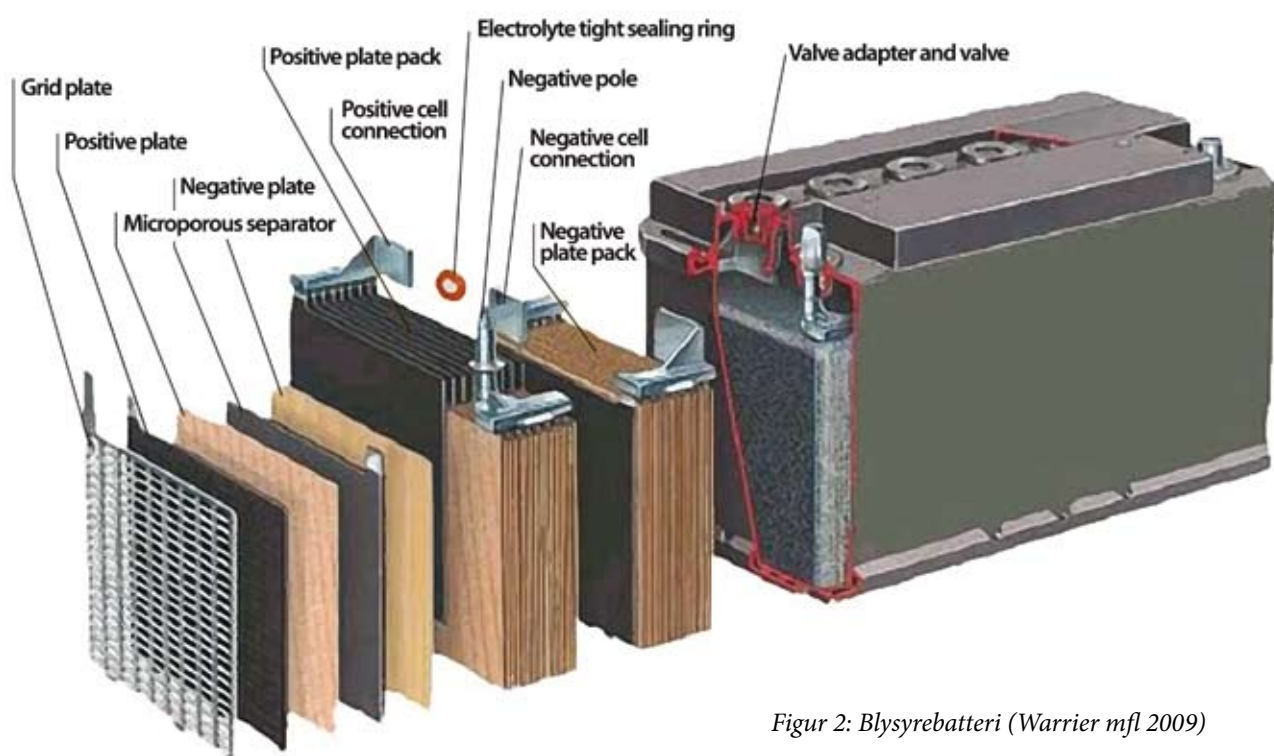
som tillater overføring av ioner mellom platene. Et 12 volts batteri har seks celler i serie med en spenning på 2,1 volt (Warrier mfl 2009).

Elektrolytten består av omtrent 65 prosent vann og 35 prosent svovelsyre (H_2SO_4). Elektrolytten tilfører den positive polen sulfat, som reagerer med blyperoksid og utløser elektrisk energi. Tilgjengelig spenning i batteriet senkes når mengden syre senkes i elektrolytten.

Batterikassen er som regel et helstykke bestående av sammenstilling av polypropylen. Konvensjonelle blybatterier må regelmessig etterfylles med elektrolytt, siden batteriet gradvis mister vann i form av hydrogen og vanddamp.

Blysyrebatterier kan utformes som startbatterier eller såkalte dyp-syklus-batterier. Majoriteten av blysyrebatterier som leveres til elbiler, krever lavt eller intet vedlikehold. Disse er mer robuste versjoner av vanlige blysyrebatterier, med tykkere og slitesterk konstruksjon. Lavvedlikeholds-batteriene leveres med luftkanaler og lokk. Påfylling av vann trengs langt sjeldnere enn i vanlige blysyrebatterier. Vedlikeholdsfrie batterier har lav gassutvikling og trenger ikke etterfylling av vann.

Schematic diagram of a battery



Figur 2: Blysyrebatteri (Warrier mfl 2009)

Fordeler

- Billig og enkelt å produsere
- Velutviklet, pålitelig og godt forstått
- Lav selvutladning
- Små krav til vedlikehold
- God effektetthet, kan klare stor utladning på kort tid for å skape en boost i effekt

Ulemper

- Lav energitetthet
- Dype utladninger forkorter batteriets levetid betydelig
- Bly og elektrolytt er en trussel for miljøet
- Ytelsen påvirkes ved temperaturer mindre enn 10 °C, noe som krever tilleggsbatteri for varming og isolasjon
- Kan ikke lagres i utladet tilstand

(Kilde: Warrierr mfl 2009)

Miljø

Et gjennomsnittlig blysyrebatteri varer i tre til fem år. Bly er ekstremt giftig og kan være svært farlig selv i små mengder. Gjenvinning av blysyrebatterier er imidlertid godt utviklet. I USA gjenvinnes 97 prosent av alt bly fra blysyrebatterier, og et nytt blybatteri inneholder 60-80 prosent gjenvunnet bly og plast (Battery Council International 2009).

Ifølge nettstedet «Miljøstatus i Norge» reduseres konsentrasjon av bly i naturen. Prøver viser at det er høyere konsentrasjon av bly i naturen enn før den industrielle revolusjonen, men den siste tiden har konsentrasjonen begynt å synke. Den forhøyede konsentrasjonen skyldes både lokale utslipp og utslipp ført til landet med luftstrømmer. Den største utslippskilden til bly i Norge er ammunisjon. Ifølge miljøstatus i Norge er ikke blybatterier noen stor kilde, som følge av god innsamling og behandling som farlig avfall (Miljøstatus Norge 2010)

I en livssyklusanalyse utført i Belgia anslås det likevel at blysyrebatterier har forholdsvis stor påvirkning på miljøet sammenlignet med andre batterityper, mye på grunn av dets korte livsløp og lave energitetthet. Likevel anslår studien at disse miljøpåvirkningene blir små sammenlignet med fossile drivstoff (Matheys mfl 2006).

2.3.2 Nikkel-metallhydrid (NiMH)

Nikkel-metallhydrid-batterier er alkaliske: De bruker en hydrogenlagerlegering som negativ elektrode, et såkalt metallhydrid. Nikkel-hydroksid benyttes som positiv elektrode og kaliumhydroksid som elektrolytt. Det meste av forskningen på NiMH-batterier har å gjøre med utforming av og materialvalg for metall-

hydridet. De mest kjente hydrogenabsorberende legeringene er forbindelser av titan, vanadium, zirkonium, nikkel, mangan og aluminium.

NiMH-batterier fikk sitt gjennombrudd da det ble oppdaget nikkelbaserte legeringer som beholder strukturen over et stort antall oppladnings- og utladningssykluser, og der hydrogen tas inn og slippes ut fra legeringens krystallgitter. En slik legering består av to-tre materialer. Bare et fåtall slike legeringer kan oppnå disse egenskapene med et akseptabelt hydrogentrykk i en lukket battericelle og i tillegg ha tilstrekkelig motstand mot korrosjon av kaustisk elektrolytt, som brukes i NiMH-celler. Etter mange års utvikling har legeringer med formen AB₅ (hvor A angir et alkalisk metall, som lantan, og B står for nikkel) fremstått som den foretrukne sammensetningen av negative elektroder (Kalhammer mfl 2007).

Under oppladning av batteriet går hydrogen-ioner fra den positive til den negative elektroden, hvor de blir absorbert i metallhydridmaterialet. Elektrolytten inngår ikke i reaksjonen, men fungerer kun som en kanal for hydrogen-ionene. Når batteriet utlades, reverseres prosessen, og hydrogen-ioner går fra den negative til den positive elektroden (Kalhammer mfl 2007).

NiMH-batterier finnes både i sylindrisk og prismeaktig utforming. Den sylindriske typen har cellens aktive materialer laget i lange bånd og ordnet i en slags spiralform inne i en sylinder av stål. Den negative elektroden er viklet parallelt med den positive, og en separator som inneholder elektrolytt er plassert mellom dem. Den negative elektroden er koblet til batteriets stålkasse, mens den positive elektroden er koblet til den positive terminalen på toppen av batteriet.

Sylindriske celler er ofte koblet sammen i serier av seks som former en batterimodul med 7,2 volts spenning. Grupper av disse modulene settes ofte sammen i serier for å lage batteripakker for elbiler, og slike pakker kan kanskje også passe for batteriferger. De prismeformede cellene er utformet slik at de ligner en boks. Det aktive materialet er lagt i rektangulære flate plater som i blysyrebatterier, og de positive og negative elektrodene er plassert vekselvis i batterikassen. Separatorene ligger mellom plater og hindrer kontakt, mens elektrolytten kan flyte fritt. De prismeaktige cellene behøver mindre lagringsplass, har en mer fleksibel form, bedre varmeledningsegenskaper og muliggjør mer pålitelige celleforbindelser. Prismeceller har ikke noe luftesystem og kan derfor oppleve trykkøkning. Dette kan gjøre at cellene ødelegges, og de trenger derfor sterkere materiale og bedre sveising for å motstå trykket (Warrierr mfl 2009).

Fordeler og ulemper

I nikkel-metallhydrid-batterier forandres tettheten i elektrodene noe i løpet av en oppladnings- og utladningscyklus, men endringen er minimal, siden bare protoner utveksles. Dette gir NiMH-batteriet en lang batterisiklus, som er en av dets største fordeler. En annen gunstig funksjon er bruken av kaustisk elektrolytt som gjør at effektiviteten blir høy selv uten bruk av veldig tynne og kostbare cellestrukturer. Disse fordelene skyldes at batterier av denne typen har relativt lav celledensitet, samt bruken av flytende elektrolytt (Kalhammer mfl 2007).

En viktig ulempe ved NiMH-batterier er den beskjeden spesifikke energitettheten, som også kommer av lav celledensitet. En annen er oksygenproduksjonen som oppstår ved den positive elektroden ved lading. Det er derfor viktig at elektrodene ikke inneholder substanser som for eksempel jern som kan katalysere oksygenutvikling. Oksygenutvikling oppstår nær slutten av oppladningen og øker med temperaturen. Høyere temperatur øker korrosjonen på den negative elektroden av elektrolytten. Det tilhørende tapet av elektrolytt og tapet av hydrogen gjennom cellen begrenser NiMH-batteriets levetid (Kalhammer mfl 2007).

NiMH-batteriene tåler altså varme dårlig. Elbiler med slike batterier styres derfor med kjølesystemer i form av luftkjøling, der friluft eller kabinluft blåses inn over batteriene med en vifte. Slike foranstaltninger må også vurderes på ferger med slike batterier (Warrier mfl 2009).

Fordeler

- 30-40 prosent høyere kapasitet enn vanlige nikkell-kadmium-batterier
- Mindre utsatt for minneeffekten enn NiCd (se kap 2.3.5 under)
- Holdbar, siden elektrolytten ikke reagerer med aktivt materiale
- Miljøvennlig
- Enkel lagring og transport

Ulemper

- Høy selvutladning, spesielt ved høye temperaturer
- Forholdsvis dyrt, sammenlignet med for eksempel blysyrebatterier
- Begrenset levetid om batteriet ofte har dype utladninger
- Mer kompleks lading grunnet lengre ladetid enn NiCd. Genererer mer varme under lading

(Kilde: Warrier mfl 2009)

Miljø

Siden nikkellhydridbatterier ikke inneholder giftig kadmium, slik nikkell-kadmiumbatterier gjør, regnes de som mindre skadelige for miljøet. Elektrolytten kan i store nok konsentrasjoner være en miljøutfordring, og store mengder batteri bør derfor behandles. Det meste av nikkelet i batteriet gjenvinnes (Battery University 2010).

Ifølge en livssyklusanalyse utført av belgiske forskere har likevel NiMH-batterier omtrent like stor påvirkning på naturen som blysyrebatterier, og større enn litium-ion-batterier. Dette skyldes at det i undersøkelsen det her er snakk om, blir lagt stor vekt på energibruk i produksjonen, og energiforbruket i NiMH-batteriproduksjon er forholdsvis høyt (Matheys mfl 2006).

Det er ingen spesielle sikkerhetsutfordringer knyttet til NiMH-batterier under normale operasjonsbetingelser.

Leverandører

NiMH-teknologi lisenseres fra selskapet Ovonic Battery Company til alle NiMH-batteriprodusenter i verden av betydning.

Sammenlignet med tilfellet for blysyrebatterier finnes det antageligvis et svært begrenset antall store tilbydere av NiMH-batterier. Panasonic er sammen med underselskapet Sanyo en stor leverandør etter sammenslåingen i 2009, selv om Sanyo måtte selge unna store deler av produksjonskapasiteten til Fujitsu (International Law 2009). Andre store leverandører er Cobasys (fellesforetak mellom Ovonic og Chevron) og Johnsons Controls (som blant annet eier Varta). Johnsons Controls har blant annet inngått et strategisk samarbeid med den franske batteriprodusenten Saft.

Hos disse selskapene skjer det mye forskning og utvikling på NiMH-batterier, og ifølge Kalhammer et al 2007 har forskningen gjort gode erfaringer med å gi NiMH-batterier lang levetid. Den lave energitettheten er blitt sett på som den største utfordringen for NiMH-batterier, og dette forskes det nå mye på.

2.3.3 Litium-ion-batterier

Litium-ion-batterier er av mange oppfattet som den mest lovende batteriteknologien for elbiler. Som det letteste og mest elektronegative metallet er litium det også det mest ettertraktede materialet for negative elektroder i batterier. Men høy reaktivitet med vann og løsemidlene som ble benyttet i batterienes elektrolytter forhindret bruk av litium i batterier inntil tidlig 1990-tall. Det ble da oppdaget at litium elek-

trokjemisk kan innsettes i et vertsmateriale (karbon) og skape et beskyttende lag (SEI – solid- electrolyte interface) ved grensesnittet til det litiumholdige karbonet mot elektrolytten når batteriet lades for første gang. Dette laget hindrer også fremtidige angrep fra elektrolytten på litiumet, men tillater litium-ioner å passere under oppladning og utladning. Vertsmaterialet som danner den negative elektroden i Li-ion-celler, er laget av grafitt og/eller koks. Blandet med bindingsmateriale blir karbonet avsatt på tynne kobberplater som fungerer som ledningsstøtte. En rekke materialer kan pares med den karbonbaserte negative elektroden. Også disse materialene er blandet med karbon for økt ledningsevne og bindingsmiddel og blir så avsatt på aluminiums-plater. Elektrolytten er laget av et litiumsalt i et organisk løsemiddel. Porøse polyetylen-membraner skiller platene, men tillater strømmen av ioner, samtidig som elektroner blokkeres. Når batteriet lades, beveger litium gjennom elektrolytten fra den positive til den negative elektroden og fester seg til karbonet (Warrier mfl 2009), (Kalhammer mfl 2007).

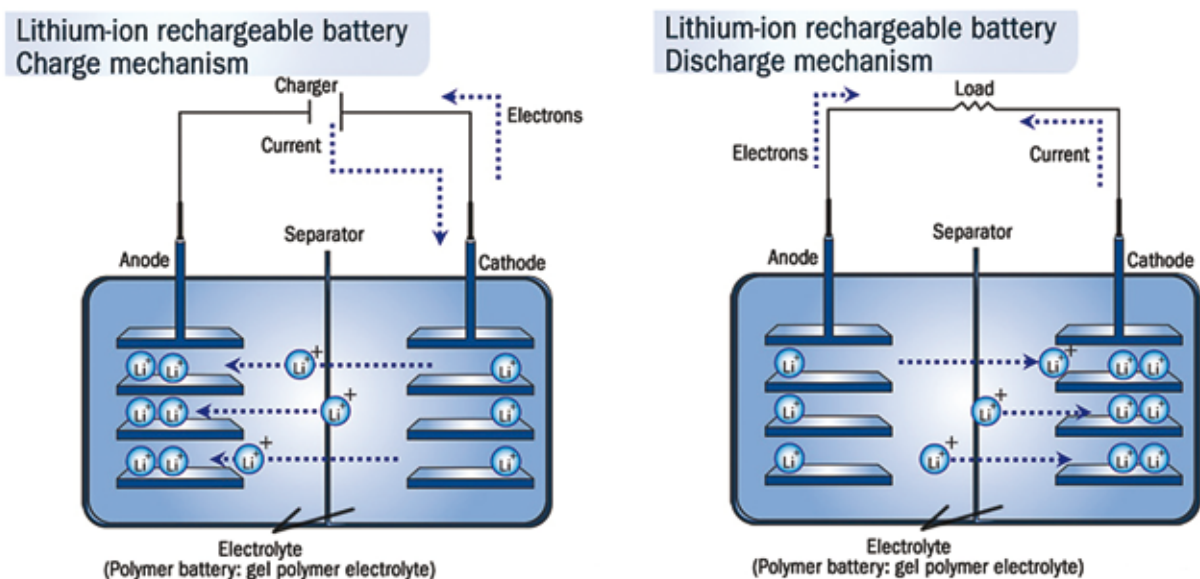
En viktig grunn til at litium-ion-batterier er interessante også for bruk i ferger, er den høye celledspenningen, som er direkte resultat av det negative potensialet til litium. Cellespenning avhenger av hvilket positivt elektrode-materiale som velges. Den for tiden mest brukte positive elektroden gir operasjonsspenning på omtrent 2,75-4,2 volt. Den nominelle celledspenningen er om lag 3,6 volt. Og mesteparten av kapasiteten leveres på spenninger mellom 3,5-4,0 volt.

Fordeler og ulemper

Høy spenning er årsaken til li-ion-batterienes høye spesifikke energitetthet. Høy celledspenning gjør også at det trengs færre celler til et batteri, noe som reduserer produksjonskostnadene og øker påliteligheten. Den andre hovedfordelen med li-ion-batterier er litiumets størrelse, som tillater reversibel elektrokjemisk inkludering av litium-atomer i den karbonbaserte negative elektroden med begrenset belastning. Litium-ionets lille størrelse blir lett og reversibelt innlemmet i en mengde vertsmateriale som danner den positive elektroden. Dette danner grunnlaget for et robust batteri med langt syklisk liv, spesielt i dype utladninger. Li-ion-batterier har tynn cellekonstruksjon og lav selvutladning, noe som resulterer i høy energieffektivitet og høy effektetthet.

Den største utfordringen med kommersiell utnyttelse av utnyttelse av li-ion-batterier skyldes også det sterke negative potensialet til litium. Dette påvirker effektiviteten til litium som en negativ elektrode og den kjemiske reaktiviteten inne i cellen. Det er det beskyttende SEI-laget som hindrer ukontrollerte reaksjoner mellom litium og elektrolyttløsemiddel og tillater kontrollert lading og utladning av li-ion batterier.

En annen utfordring at li-ion-batterier er sensitive for overlading, som kan føre til kjemisk nedbrytning av materialet på positive elektroden og elektrolytten. Dette skader cellen og kan resultere i farlige hendelser som utvikling av gasser og utslipp av brennbar elektrolyttløsemiddeldamp dersom cellens



Figur 3: Litium-ion-batteriets lade- og utladningsmekanisme (Warrier mfl 2009)

sikkerhetspakning blir ødelagt av høyt trykk. Li-ion-batteriene trenger derfor nøye spenningskontroll for å hindre overlading, i motsetning til for eksempel NiMH-batterier.

Det kan være verdt å nevne at siden kravene til sikkerhet og batteriets sykliske levetid er høye på for eksempel ferger er det enda viktigere at disse spenningskontrollene fungerer og er godt utprøvd/demonstrert.

Fordeler

- Høy energitetthet
- Høy celledensitet, resulterer i behov for færre celler per batteri
- Lav selvutladning
- Ingen minneeffekt
- Lavt behov for vedlikehold

Ulemper

- Sikkerhet og stabilitet
- Behov for omfattende overvåkingssystem for å kontrollere lading og utladning
- Kostbar produksjon, men forventes å bli rimeligere de neste årene
- Utsatt for aldring selv når de ikke er i bruk

(Kilde: Warrier mfl 2009)

Utviklingen av litium-ion-batterier har gått raskt de siste årene. For å utvikle et batteri med høy energitetthet og sikkerhet har hoveddelen av forskningen vært rettet inn mot katodematerialet og elektrolytten. Mobiltelefoner og bærbare pc-er har brukt kobalt(II)oksid som positiv elektrode. Kobalt(II)oksid har god kapasitet, men er dyr per kWh, noe som gjør materialet upraktisk i elbiler og batteriferger. Under er summert noen av de viktigste katodematerialene:

Nikkel-kobolt-mangan batterier (NCM-batterier) er noe lette å produsere og kan potensielt produseres forholdsvis rimelig. NCM-batterier kan lades til to spenningsnivåer. På høyere spenningsnivåer har batteriene bedre lagringskapasitet, men kan muligens degraderes på grunn av oppløsning av manganen. Lavere spenningsbatterier har lavere lagringskapasitet og kan være dyrere per kWh, men virker å være mer stabile. Det er foreløpig uklart hvor stabile batteriene er over tid (Kalhammer mfl 2007).

Nikkel-kobolt-aluminium-batterier (NCA-batterier) ligner på NCM-batteriene, men benytter aluminium i stedet for mangan. Dette gjør batteriene billigere, samt at de har lengre syklisk levetid.

Manganoksidspinell (LMO-batterier) er en type batteri som gir høyere effekt til en lavere pris enn kobolt-

baserte positive elektroder. Spinellstrukturen gjør at denne batteritypen er meget stabil. Strukturen skaper også større overflate, noe som gjør at flere ioner kan flytte mellom elektrodene. Batteriene har til gjengjeld forholdsvis lav energitetthet (Warrier mfl 2009).

Litiumtitanat (LTO) benytter mangan-katoder, i likhet med LMO-batteriene, men i stedet for grafitt benyttes titan i anodene. Disse batteriene leverer høy effekt, god stabilitet og god ytelse ved lave temperaturer, men litt lavere energitetthet enn LMO-batterier. LTO-batterier er også billigere, siden de verken inneholder nikkel eller kobolt (Warrier mfl 2009).

Jernfosfat (LFP, LiFePo₄) ser ut til å kunne løse mange av utfordringene litiumbatteriene har hatt med sikkerhet, samt gi større stabilitet enn kobalt(II)oksid-batterier og manganoksidspinell-batterier. LFP-batterier er billige, og de sterke bindingene i batteriet mellom jern, fosfat og oksygenatomer gjør at det er mindre utsatt for å oksidere når det overlades og derfor mer stabilt. Jernfosfat leder dessverre ikke så bra, men overføringsevnen økes ved å benytte såkalt doping. Det innebærer å tilsette urenheter til en halvleder og således forandre strukturen for å optimalisere ønskede egenskaper. Likevel opererer cellene i et LFP-batteri på lavere spenning, og det trengs flere celler for å oppnå en gitt spenning. Med bruk av nanostrukturer kan overflaten økes og flere ioner kan flyttes mellom elektrodene, noe som potensielt kan oppheve dette problemet (Warrier mfl 2009).

Det er rimelig å anta at også andre materialer kan vise seg å kunne forbedre litium-ion-batterier med hensyn til celledensitet, elektrokjemisk reversibilitet, kjemisk stabilitet og/eller lave kostnader (Kalhammer mfl 2007).

Elektrolytten som brukes i li-ion-battericeller er en løsning av fluorholdige litium-salt-forbindelser (typisk LiPF₆) i et organisk løsemiddel, og tillater strømtransport med litium-ioner mellom elektrodene (Kalhammer mfl 2007).

Leverandører

Tabellen viser de viktigste teknologiene og hvilke selskaper som jobber med litium-ion-teknologien.

Det finnes altså mange produsenter av litium-ion-batterier. Blant de største kan nevnes Sanyo, som har kontrakt med Volkswagen; GS Yuasa, med kontrakt med Mitsubishi; og Johnson Controls-Saft, som er valgt av Ford.

Miljø

Litium er en begrenset ressurs, og det er blitt stilt

Oversikt over li-ion-teknologier og -produsenter

Katode-gruppe	Gruppe A (Nikkelbasert)	Gruppe B (Jernbasert)	Gruppe C (Manganbasert)	Gruppe C-1 Mn-basert generasjon	Gruppe C-2 Mn-basert generasjon 2
Katode	LiNiCo _x O	LiFePO ₄	LiMn ₂ O ₄	LiMn ₂ O ₄	LiMn ₂ O ₄
Anode	Grafitt	Grafitt	Grafitt	Hard karbon	LTO
Fordeler	Kapasitet	Sikkerhet Pris	Pris Effekt	Effekt Levetid Lav temp Sikkerhet	Effekt Levetid Lav temp Sikkerhet
Ulemper	Sikkerhet Pris Kald temp	Høy temp Spennning Kald temp	Høy temp Levetid Kald temp	Energieffektivitet	Lavere energitetthet
Produsenter	Hitachi JCI/Saft Panasonic EV Sanyo	A123 BYD Valence	GS Yuasa LG Chemicals NEC-Lamilion Samsung	Ener1	Altair Nano Ener1 Toshiba

Tabell 1: Oversikt over li-ion-teknologier og -produsenter (Warrier mfl 2009)

spørsmål ved hvorvidt det er tilstrekkelig av metal-let til en storstilt innføring av litium-ion-batterier i transportsektoren. Rapporter om dette temaet gir ulike anbefalinger, men ifølge en fersk rapport av Gruber & Medina, er det selv i et scenario med svært stor innfasing av li-ion-batterier i transportsektoren fortsatt tilstrekkelige ressurser tilgjengelig (Gruber & Medina 2010).

Ifølge den belgiske livssyklusanalysen vi har vist til tidligere, kommer li-ion-batterier svært godt ut sammenlignet med andre batterier med hensyn til miljøpåvirkning. Dette skyldes blant annet at det er forholdsvis lite energikrevende å produsere slike batterier (Matheys mfl 2006).

2.3.4 NiCd-batterier

Nikkel-kadmiumbatterier (NiCd) nevnes her fordi de tidligere var utbredt i bruk. Kadmium er giftig, og dette gjør batteriene mindre interessante i dag. Enkelte batterileverandører satser likevel på NiCd.

NiCd-batterier har en positiv elektrode av nikkelhydroksid og en negativ elektrode av metallisk kadmium. Elektrodene er vanligvis adskilt av en porøs nylonseparator. Elektrolytten er kaliumhydroksid, og spenningen ligger typisk på 1,2 volt. Under utladning reagerer nikkeloksyhydroksid med vann og produserer nikkelhydroksid og et hydroksid-ion, samt at kadmiumhydroksid produseres ved den negative elektroden. Ved oppladning reverseres prosessen og batteriet blir tilbakestillt til sin opprinnelige tilstand.

Fordeler og ulemper

Oppladning fører til noe oksygenproduksjon ved den positive elektroden, samt noe hydrogenproduksjon ved den negative elektroden. Dette resulterer i behov for utlufting, men behovet er mye mindre enn for bly-syrebatterier.

På grunn av høye oppladnings- og utladningshastigheter har NiCd-batterier vært av en viss interesse for elbilprodusenter. Men det giftige kadmiumet og batterienes lave energitetthet og minneeffekt dem til et langt fra ideelt valg for elektriske biler og batteriferger.

Fordeler

- Lave produksjonspriser
- Velutviklet og pålitelig
- God ytelse ved lave temperaturer
- Lang syklisk levetid
- Hurtigladning og utladning.
- Lave vedlikeholdskostnader

Ulemper

- Kadmium er giftig, men innsamlings- og gjenvinningsgraden er høy
- Minneeffekt
- Lav energitetthet
- Høy selvutladning

(Kilde: Warrier mfl 2009)





2.3.5 ZEBRA-batterier

Zebra-batterier kalles også natrium-nikkel-klorid-batterier og er basert på den kjemiske reaksjonen mellom natrium og nikkel(II)klorid til nikkel og natriumklorid. Under utladningsreaksjoner blir natrium elektrokjemisk oksidert til natrium-ioner. Ionene flytter seg gjennom veggen på et keramisk rør som inneholder nikkel-klorid og flytende natrium-aluminiumklorid med en ledende karbontråd. Ved den positive elektroden reduseres nikkelklorid til nikkelmetall og klorid-ioner. Klorid-ioner inngår forbindelse med natrium-ioner og danner natriumklorid. Driftstemperaturen i cellen må ligge på mellom 270-350 °C for å holde natrium og natrium-aluminiumklorid flytende og for å sikre tilstrekkelig ioneledningsevne (Kalhammer mfl 2007).

Utviklingen av keramiske rør som effektivt kunne lede natrium-ioner var gjennombruddet for ZEBRA-batterier.

Fordeler og ulemper

ZEBRA-batteriene har utfordringer, men også unike fordeler, som begge skyldes cellestrukturen. På grunn av høy driftstemperatur krever batteriene oppstartsvarme og god isolasjon. Til gjengjeld opererer de godt isolerte ZEBRA-batteriene godt uavhengig av omgivelsestemperatur. ZEBRA-batterier varer lenge og tåler mange omganger oppladning og utladning. Kombinasjonen relativ lav vekt og høy celledensitet gir god energitetthet.

I motsetning til li-ion-batterier kan ZEBRA-batterier tåle betydelig overladning. ZEBRA-batterier tåler også et betydelig antall individuelle celledensiteter; dette resulterer bare i litt sviktende kapasitet. Lav kostnad på materialene er en annen viktig fordel ved ZEBRA-batteriene.

Den viktigste ulempen ved ZEBRA-batteriene er at maksimum energitetthet er begrenset til omtrent 180 W/kg. Sammen med behovet for høy temperatur har denne ulempen vært en viktig grunn til batteriets begrensede utbredelse. Dette er kanskje på vei til å forandre seg nå. Blant annet har bilprodusenten Think benyttet ZEBRA-batterier i sin nye modell Think City. Lav energitetthet og behov for høy temperatur med god isolasjon kan ha mindre å si ved drift i ferger sammenlignet med biler.

Miljø

Det amerikanske selskapet Inmetco har lyktes i å resirkulere ZEBRA-batterier. Sluttproduktet benyttes i stålproduksjon. Nikkel tas ut for å selges igjen, og inntekten fra salget skal i prinsippet kunne dekke hele

kostnaden med resirkuleringen (Galloway & Dustmann 2003).

Batterileverandører

ZEBRA-batteriene tilbys av det sveitsiske firmaet MES-DEA, en tilbyder av komponenter til elbiler.

2.3.6 Litium-polymer-batterier

Disse batteriene ble utviklet gjennom forskning på li-ion-batterier. Elektrolytten i li-poly-batterier er ikke flytende, men litiumsaltet holdes fast på et polymerkompositt. Polymerdesignet fungerer også som separator mellom elektrodene. Utformingen gjør det blant annet lettere å oppnå god produksjon, robusthet og sikkerhet (Warrier m.fl. 2009).

En viktig ulempe ved litium-polymer er dårlig ledningsevne, og batteriene kan derfor ikke levere store mengder strøm til en ferge med høy last. Oppvarming av cellene til om lag 140 °C bedrer effektiviteten.

Cellespenning ved full oppladning er 4,23 volt for et li-poly-batteri. Selv om cellene tåler overladning bedre enn li-ion-celler, må de likevel beskyttes for overladning.

Li-poly-batterier er dyre å produsere og har en høyere pris per kWh enn batterier av typen li-ion, NiMH og NiCd. Til gjengjeld er batteriene lette, og batterikassene trenger ikke være av metall.

I noen li-poly-celler er det gjort bruk av gele-elektrolytt for å øke ion-ledningsevnen. Disse cellene er kjent som litium-ion-polymer-celler (Warrier m.fl. 2009)

Fordeler

- Fleksibel form, produsenter er ikke bundet av standard celleformater
- Lav vekt
- Forbedret sikkerhet – større resistans mot overladning og mindre sjanse for lekkasje av elektrolytt

Ulemper

- Lavere energitetthet enn li-ion
- Kortere syklisk levetid enn li-ion
- Li-poly-batterier må driftes ved temperaturer på mellom 80 °C og 120 °C.
- Dyre å produsere

(Kilde: Warrier m.fl. 2009)

2.4 Mulige fremtidige batterier

Batteriferges stiller andre krav til batterier enn elbiler, og det er derfor verdt å vurdere batteriteknologier som ennå ikke har slått igjennom for elbiler. Batteritypene som presenteres her, er fortsatt ikke omsatt kommersielt, men befinner seg på forsknings- og utviklingsstadiet.

2.4.1 Sink-luft-batterier

Disse batteriene benyttes vanligvis i høreapparater, men har den siste tiden blitt utviklet og testet for bruk i biler. Sink-luft-batterier er mekaniske oppladbare batterier drevet av oksidasjon av sink med oksygen fra luft. Den positive elektroden består av oksygen i gassform, og den negative av sink. Den negative elektroden blir brukt opp under utladning, og batterier lades opp ved å erstatte de brukte sink-elektroden. Det er hastigheten på utvekslingen av luft-elektrolytten mellom elektrodene som bestemmer effektiviteten. Sink-luft-batterier har en maksimal energitetthet på hele 200 Wh/kg og en spesifikk effekt på 90 W/kg ved 80 prosent DOD.

En stor ulempe ved sink-luft-batterier er at sink er et fast materiale som ikke kan pumpes og behandles slik en væske kan. En infrastruktur for gjenvinning av sink fra brukte sink-luft-batterier må også opprettes ved omfattende bruk. Elektrolytten kan ta skade av varierende luftfuktighet og CO-CO₂ innhold. Dette gjør det essensielt at batteriet er forseglet når det lagres. Når batteriet er i bruk, er det tilsvarende viktig at luften filtreres, luftfuktigheten sjekkes og CO₂-innholdet reduseres ved skrubbing.

Selv om det har vært gjort forsøk med bruk av sink-luft-batterier i kjøretøy, er utviklingen av denne batteritypen fortsatt kommet kort. Både i USA og Tyskland har igangsatte forskningsprogrammer for slike batterier nå blitt stoppet (Warrier m.fl. 2009).

2.4.2 Litium-svovel

Disse batteriene har større potensiell energitetthet enn noen kjent batteritype. I prinsippet er denne batteritypen derfor svært spennende. Men til tross for vedvarende forskningsaktivitet de siste 10-15 årene er det fortsatt ingen levedyktig litium-svovel-teknologi på plass. Historisk har denne teknologien vært for dyr, usikker og upålitelig. På grunn av nye forskningsgjennombrudd de siste årene er batteriteknologien likevel interessant. Den tyske kjemigiganten BASF og batteriprodusenten Sion Power har inngått samarbeid og allerede produsert prototyper av litium-svovel-batterier.

Batterier av denne typen har en elektrode av litium og en av svovel (som typisk er blandet med karbon). Som i li-ion-batterier forflyttes litium-ioner mellom elektrodene ved oppladning og utladning. Men den teoretiske kapasiteten til litium-svovel-batterier er høyere enn for li-ion, på grunn av måten ionene blir assimilert i elektrodene.

Å lage et materiale som utnytter den teoretiske kapasiteten, har vært en utfordring, særlig fordi svovel er et isolerende material, noe som gjør det vanskelig for elektroner og ioner å forflytte seg. Så selv om hvert svovelatom i teorien kan være vert for to litium-ioner, er det i praksis slik at bare svovelatom nær overflaten av materialet aksepterer litium-ioner. Et annet problem er at det etter hvert som svovel binder seg til litiumioner og til slutt danner dilitiumsulfat, dannes en rekke mellomprodukter kalt polysulfider. Disse løses opp i batteriets flytende elektrolytt og kan til slutt felles ned i andre deler av batteriet og blokkere oppladning og utladning. Dette kan føre til at batteriet slutter å fungere etter bare et par ladningscykluser. I tillegg kan overoppheting ved litium-elektroden få batteriet til å kortslutte. Dette kan føre til at metallet begynner å smelte. Om smeltet litium lekker ut og kommer i kontakt med vann, kan dette starte en brann (Bullis 2009)

BASF og Sion Power mener å ha overvunnet disse problemene. Selskapene har som mål å produsere en litium-svovel-celle med en energitetthet på 600 Wh/kg og 1000 ladesykluser innen 2016. Ifølge Sion Power har de utviklet en teknikk for å beskytte litium-anoden, noe som forbedrer livstiden og sikkerheten til batteriet. Ifølge selskapet skal batteriene også være veldig miljøvennlige, siden de ikke inneholder tungmetaller (Sion Power 2010).

En tidlig antagelse er at batteriene kommer til å koste rundt 30 prosent mer enn vanlige litium-ion-batterier. For at litium-svovel-batteriene skal være interessante, bør det derfor finnes et marked som er villig til å betale mer for å få mer kapasitet ut av hver utladning. For ferger vil det her kunne være snakk om samband med lengre overfarter, eller der det ikke er tid til lange oppladninger mellom hver overfart (Kalhammer m.fl. 2007)

2.5 Sammenligning av batteriteknologier

I tabell 7 under presenterer vi en sammenfattet oversikt over de ulike batteriteknologienes fordeler og ulemper.

Vurdering for batteriferges

Den endelige vurderingen av hvilke batterier som skal brukes i ferger, må gjøres for det enkelte fergesamband. Likevel er det mulig å gjøre enkelte generelle vurderinger ut fra den innsamlede informasjonen.

Per i dag er batterier av typen litium-ion, nikkel-metallhydrid (NiMH), nikkelkadmium (NiCd) og blysyre de som først og fremst er godt nok utviklet til å benyttes i ferger. ZEBRA-batterier kan også være en aktuell batteritype for ferger.

De viktigste parametrene for vurdering av batterier i ferger er pris, vekt, og syklisk levetid. Flere andre parametre virker inn på disse igjen, blant annet batteriets evne til å lades og evnen til å ta inn lading på høy effekt. Et batteri som tar inn lading på høy effekt, vil i

større grad kunne lades opp under de korte stoppene på fergekaien, gitt at det er kapasitet nok i det aktuelle kraftnettet til oppladning. Nye moderne litium-ion-batterier har denne fordel og er tilrettelagt for hurtiglading i biler.

Det som på den andre siden taler for nikkel-metallhydrid, er at lav vekt ikke er like viktig i en ferge som i en bil. Dette taler også for blybatterier. Blybatterier er i tillegg de best utviklede batteriene og de klart billigste. Store batteripakker veier likevel mer og er tyngre å skifte når batteriene må erstattes.

For å kutte kapitalkostnader er det ønskelig at batterier i ferger har lang syklisk levetid. Dette taler på sin side for nikkel-metallhydrid-batterier.

Nikkelkadmiumbatterier byr på utfordringer med hensyn til miljøforurensing og giftighet. Dette må vurderes fra tilfelle til tilfelle. Nikkel-kadmium har lav energitetthet og lang levetid. Rent driftsmessig kan også disse batteriene dermed være aktuelle.

Oversikt over batteriteknologier										
Batteritype	Anode	Katode	Elektrolytt	Åpen kretsspennning	Maks. energitetthet	Maks. effektetthet	Driftstemp.	Antall 80 % utladning før utskifte	Selv-utladning per mnd.	Kommersiell status
Enhet				Volt	Wh/kg	W/kg	°C		%	
Blysyre	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄	2,1	35	150	Omgivelse	1000	3 – 4	Kommersiell 40 mrd US dollar
Avansert blysyre	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄	2,1	45	250	Omgivelse	1500	-	
NiCd	Ni	Cd	KOH	1,2	50	200	Omgivelse	2000	20	Kommersiell 1 mrd US dollar
NiMH	Ni	Metallhydrid	KOH	1,23	70-80	200	Omgivelse	2000+	30	Kommersiell for el. artikler, gryende marked for større applikasjoner
ZEBRA	NiCl	Na	βAl ₂ O ₃	2,1-2,2	100	150	300	700+	0	Kommersiell
Li-ion	Karbon	Variierende	Organisk	3,6	120 - 150	120 - 150	Omgivelse	1000	10	Kommersiell
Li-poly	Li	V6O13	(PEO*) ₁₂ LiClO ₄	2,0 - 2,5	150 - 200	350	80 - 120	1000	10	
Sink-luft	Zn	O ₂	KOH	1,65	200	80 - 140	Omgivelse	200		
Li-S	Li	S	-	1,7-2,5	>350	Ca. 600	-	1000		

Tabell 2: Oversikt over batteriteknologi (Warrier mfl 2009)

3 Erfaringer med og teknologistatus for batteridrift av større skip og ferger

Det finnes så vidt ZERO kjenner til ikke mange ferger som per i dag utelukkende drives med batterier. I arbeidet med dette prosjektet har vi likevel forsøkt å innhente informasjon om ferger, skip eller båter som på noe vis benytter eller har benyttet batterier til fremdrift. Under er gjengitt de viktigste.

3.1 Ubåter

Bruk av batterier til fremdrift av marine fartøy er ingen ny idé. Batteridrevne undervannsfartøy har lenge blitt utstyrt med batterier. Hensikten er at ubåten skal ha en fremdrift som genererer minst mulig støy, ikke tærer på båtens oksygenbeholdning og heller ikke genererer forbrenningsgasser som røper båtens posisjon. Ubåter kan for en begrenset periode drives utelukkende på batteristrøm som driver en likestrømsmotor. Når den beveger seg i overflaten, drives ubåten med dieselmotorer, som benytter luft og skaper avgasser og altså ikke kan benyttes under vann.

Ubåter har tidligere vært driftet med blybatterier, men det foregår nå forskning og utvikling på bruk av litium i ubåter (Beyer 2010).

3.2 CMAL

Det skotske statseide selskapet CMAL – Caledonian Maritime Assets Ltd. – eier flere fartøyer og setter

driften av dem ut på anbud. CMAL har begynt å se på mulighetene for batteridrift av ferger. Ifølge prosjektleder Jim Anderson befinner prosjektet seg for tiden på et kritisk punkt hvor selskapet snart skal gjøre et teknologivalg. Selskapet har innledet samarbeid med det franske batteriselskapet SAFT. SAFT utvikler batteripakkene som skal brukes og baserer teknologien på li-ion-batterier. CMAL håper å kunne fatte beslutning i september/oktober 2010 om å bygge en ny ferge med 20 prosent batteridrift: Det vurderes hvordan batteridriften skal integreres med tre dieselmotorer. Fergen som er tenkt bygd, vil være om lag 43 meter lang, frakte 43 biler og ha et energibehov per dag på 3000 kWh/dag. Med en iberegnet overdimensjonering regner CMAL med å trenge omtrent 10 tonn batterier. Anderson sier at de gjerne ville bygget en 100 prosent batterielektrisk ferge, men at kostnader og vekt gjør dette vanskelig. For at prosjektet skal bli virkelighet, må skotske styresmakter støtte prosjektet finansielt (James Anderson CMAL 2010).

3.3 Fergen Maj

I Sverige har kabelfergen Maj blitt bygget om til batteridrift.

Fergen ble ombygd i 2005, og ombyggingen kostet da om lag 5 000 000 SEK. Det ble installert blysyrebatterier i fergen av typen Classic EPzS 180 2V 180Ah (C5), montert i tre grupper à 167 celler. Batteriene er levert av TUDOR i Sverige (Exide Industrial Energy Sverige). El-motorene kjøres på 400 V. Med nyinstallerte batterier kunne fergen brukes uten å benytte



Figur 4: PlanetSolar (Foto: PlanetSolar)

dieselmotorene, ved lading 5-6 timer om natten, 30 minutter om morgenen samt 30 minutter om ettermiddagen. Prosjektleder Jarl Andreasson opplyser at batteriene etter noen år (3-4 er i ferd med å bli dårligere og må derfor lades i 2-3 timer om morgenen med dieselgenerator under drift (Andreasson 2010).

3.4 Planet Solar

Howaldtswerke-Deutsche tester for tiden en ny type litium-ion-batterier som skal tas i bruk på den solkraftdrevne båten PlanetSolar. Sammen med verftet Knierim Yachtbau og batteriprodusenten GAIA lager det tyske selskapet nå neste generasjons energilagringsteknologi, som er ment tilpasset ubåter (Bairdmaritime 2010).

Den 85 tonn tunge katamaranen PlanetSolar skal gjøre et forsøk på seile jorden rundt med solenergi som fremdrift og holde en gjennomsnittsfart på 7,5 knopp. For å kunne gjøre dette er det essensielt å ha batterier som kan lades opp når det er sol og lades ut når det er overskyet. Turen foregår i 2010, og i skrivende stund er båten utenfor kysten av Marokko (Planet solar 2010).

3.5 Norske initiativ

Som tidligere nevnt er mulighetene for batteridrift i båter blitt undersøkt flere ganger de siste 20-30 årene i Norge. Under følger en omtale av de for tiden mest aktive initiativene fra norske aktører på området.

3.5.1 AGR Marine Engineering

AGR er et selskap som spesialiserer på å designe skip, spesielt i segmentet 25-150 meter. Selskapet er tidligere kjent som Kverndokk og Eldøy og har jobbet med utvikling av et konsept for batteridrevne ferger i flere år (AGR Marine Engineering 2010).

3.5.2 Fjellstrand AS

Fjellstrand AS er et skipsverft lokalisert på Omastrand i Hardangerfjorden som utvikler, markedsfører og konstruerer avanserte høyhastighets katamaraner, både passasjerbåter og bilferger, i aluminium. Fjellstrand har utviklet et konsept for en batteriferge og presentert mulighetene rundt batteridrift for sambandet Jondal-Tørvikbygd (Fjellstrand 2010).

3.5.2 Sandvik Båtbyggeri

Sandvik Båtbyggeri har utviklet det som kan kalles en slags plugg-inn hybridbåt. Båten er ikke en ferge, men en 44-fots passasjerbåt. Den er nå under konstruksjon og antas å være klar til prøvedrift i juni 2011. Båten kjører på elektrisk energi fra batteri og landstrøm eller fra en dieselmotor om batteriene blir utladet. Batteripakken er på 200 ampere timer og 300 volt. Sandvik båtbyggeri bygger båten med støtte fra Norges forskningsråd, Innovasjon Norge og Transnova (Sandvik båtbyggeri 2010).



Figur 5: Slik ser Fjellstrand AS for seg at en batteriferge kan se ut (Fjellstrand 2010)

4 Kan batterier benyttes til full eller delvis fremdrift av en norsk ferge?

Batteriferges kan tenkes installert på nybygde ferger eller på eldre ferger gjennom ombygging. I begge tilfeller er det viktig å vurdere faktorer som batteriets dimensjoner og vekt, energi tilgjengelig, overfartstid og ladningstid. I prosjektet «Batteridrift av ferger» har ZERO gjort nettopp slike vurderinger. Verdien vi gjengir i denne prosjektrapporten, er gjennomsnittlige og basert på data fra et antall forskjellige ferger. Vi har valgt ikke å fokusere på en bestemt ferge, men se mer generelt på norske ferger og mulighetene for overgang til batteridrift. Dette valget er også gjort for å unngå å røpe bedriftsensitiv informasjon om spesifikke ferger og fergestrekninger.

4.1 Dimensjonering av batteriferges

4.1.1 Dimensjonering av batteripakker

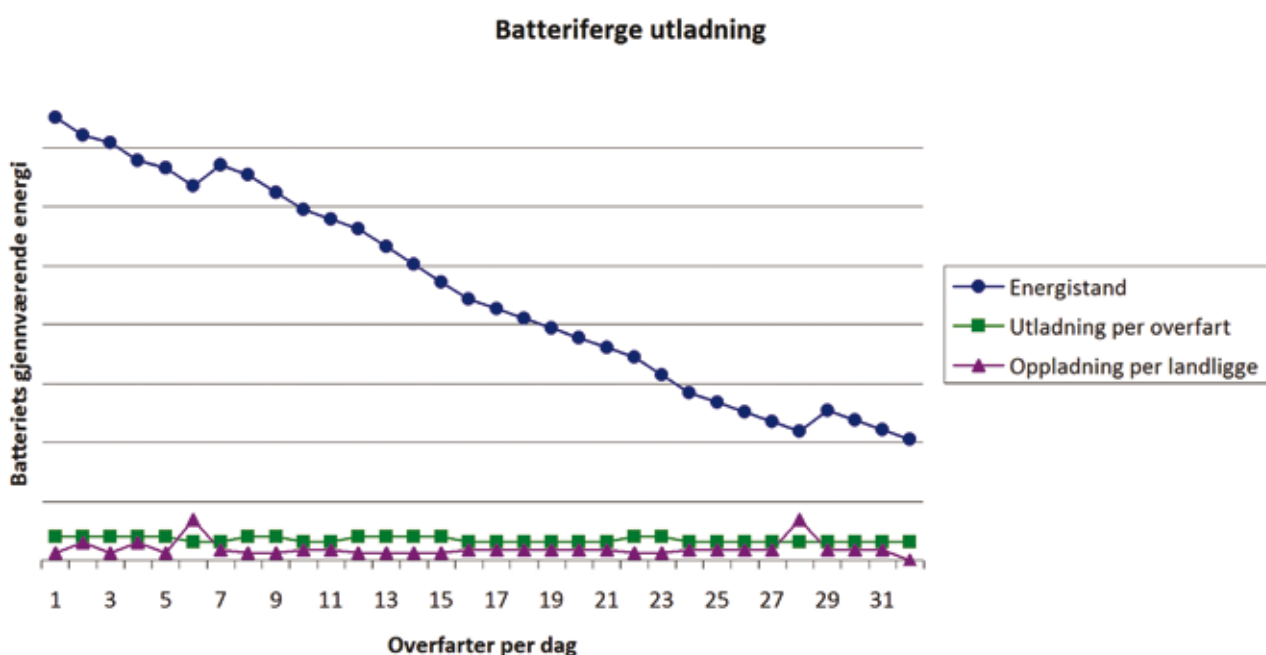
Norske ferger og fergesamband varierer mye i størrelse, installert effekt, overfartstid og driftstid. Norske ferger kan gjerne gå mellom flere stoppesteder, og noen strekninger kan være betjent av flere ferger. Det finnes ferger med kapasitet på opptil 200 biler og installert effekt på over 10000 kW, men også små ferger med installert effekt ned til omtrent 200 kW. Den gjennomsnittlige norske fergen har imidlertid installert effekt på 500-1000 kW. Drivstofforbruket på en slik ferge vil typisk være fra 50 til 120 liter diesel per driftstid. Energiforbruket varierer, fra 2000 kWh per døgn for de minste fergerne og oppover.

Gjennom døgnet kan en norsk ferge som er drevet på batteri, lades om natten når fergen ligger til kai og også i løpet av dagen. De fleste ferger opererer i tidsrommet mellom kl. 06.00 og 01.00, hvilket betyr at det ofte er mulighet til fem timers ladning i løpet av natten. De fleste ferger kjører nesten uavbrutt gjennom dagen, med unntak av en halvtimes pause for middag og ettermiddag.

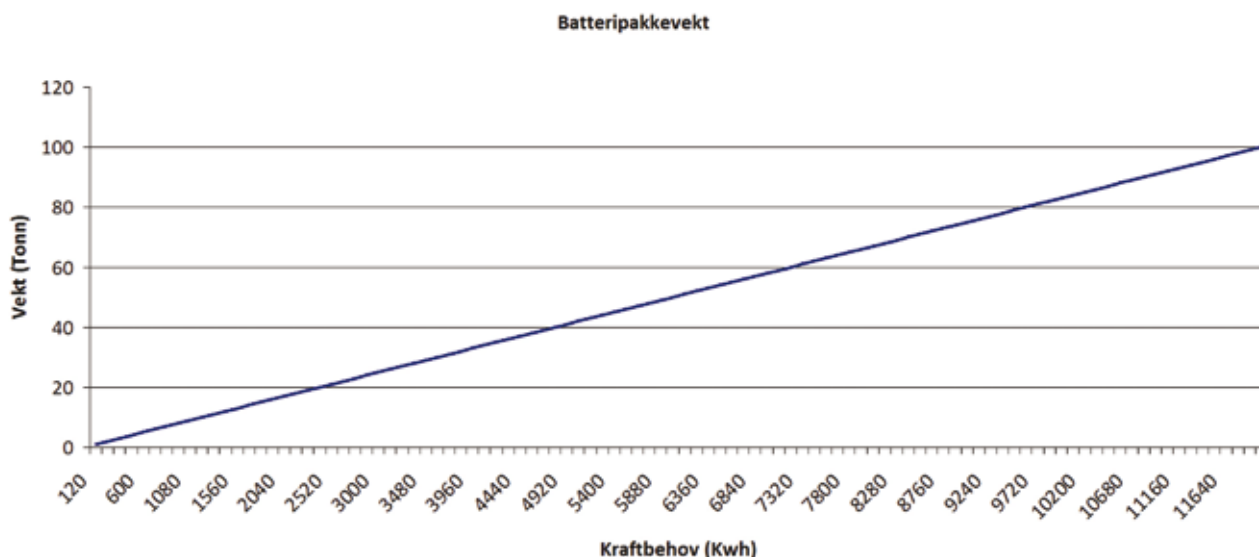
Figur 6 under viser vår beregning av utladningen av batterier på en ferge med 32 overfarter i døgnet. Om morgenen har fergen ladet opp til full kapasitet og lades ut gjennom dagen. I løpet av dagen blir batteriet ladet opp ved hvert landligge og i to lengre pauser. Fergen trenger derfor ikke dimensjoneres for all energien den trenger i løpet av dagen. Dette reduserer kostnad og vekt på fergens batteripakker.

Vekten av batteripakkene er et viktig aspekt i en vurdering av batteridrift av ferger. Avhengig av størrelse på fergen kan vekten være en begrensende faktor. Figur 7 under viser sammenhengen mellom vekten av batteripakker av typen litium-ion og fergens kraftbehov. For eksempel ser vi at ferger med kraftbehov på 12 000 kWh i døgnet vil trenge en batteripakke på om lag 100 tonn. En ferge med kraftbehov på ca 2000 kWh per døgn vil til sammenligning trenge en batteripakke på om lag 17 tonn, dersom man ikke regner med lading på hver overfart.

Vekten av batteripakker som fremgår av figuren, kan sies å være overkommelig. Det er likevel ønskelig å redusere vekten så mye som mulig, blant annet



Figur 6: Utladning på en tenkt batteridrevet ferge



Figur 7: Batteripakkevekt for ferger

på grunn av batterikostnadene. Batteripakkene kan gjøres lettere og mindre ved å optimalisere ladning i løpet av dagen. Ved å lade mest mulig mellom hver overfart kan man redusere batterivekten betydelig. Sannsynligvis kan om lag en tredel av energien som brukes, tas opp ved hver overfart, avhengig av ladestyrke og hvor lenge fergen ligger til kai.

Batterileverandøren SAFT Batteries er av den oppfatning at batteripakker i ferger i første omgang ikke bør ha større kapasitet enn 1000 kWh. Dette vil tilsvare en batteripakke på om lag 9 tonn som sannsynligvis er egnet til hybriddrift eller bruk i små ferger (Beyer 2010).

Levetiden til disse batteriene er avhengig av ladesyklus og utladning. Ifølge batterileverandøren SAFT kan dette redegjøres nærmere for ved opplysninger om spesifikasjoner på det aktuelle fergesambandet.

4.1.2 Driftsprofil

Som en del av prosjektet «Batteridrift av ferger» har

Driftsprofil				
	Tidstabell (MIN)	Effekt-tabell	Effekt (kw)	
(T1,P1)	4	13,83 %	208	Landligge
(T2,P2)	1,6	40,48 %	610	Manøvrering ut
(T3,P3)	1,2	88,35 %	1331	Akselasjon
(T4,P4)	5,9	74,01 %	985	Overfart
(T5,P5)	0,9	13,50 %	180	Manøvrering inn
(T6,P6)	1,4	33,29 %	443	Bremsing

15

Tabell 3: Driftsprofil for en ferge (Marintek 1998)

fergerederiet Marintek utarbeidet en generell driftsprofil for en ferge. I prosjektet er denne driftsprofilen benyttet til å beregne energibehov og batteribehov.

En ferge bruker sjelden full effekt, og det er under akselerasjon og overfart at effektbruken er størst. Vår generelle driftsprofil er gjengitt i tabell 3 og figur 8 under og viser hvor mye effekt fergen bruker i ulike faser av driften. Den tar utgangspunkt i et samband med 15 minutters frekvens mellom avgangene.

I virkeligheten vil driftsprofilen variere mye, avhengig av strekning og type ferge. Den generelle profilen vi har utarbeidet her, og som er basert på data fra ulike samband, viser likevel at all effekt på fergemotorene sjelden brukes. Ofte er motorene kraftig overdimensjonert. I våre videre beregninger av effekt og energibruk for batteriferger har vi derfor tatt utgangspunkt i drivstofforbruk.

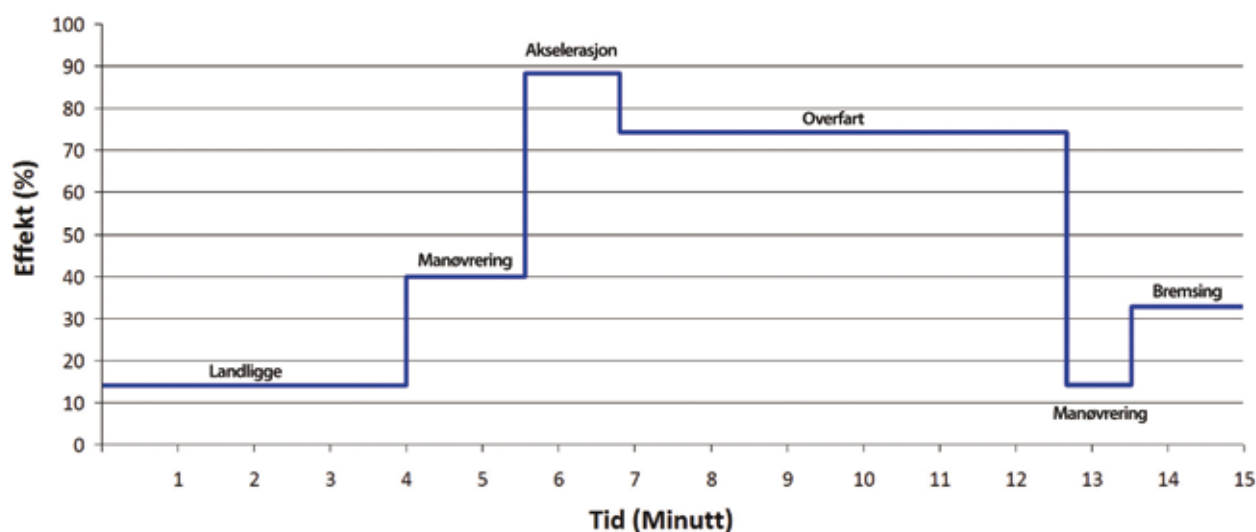
4.1.3 Hybriddrift

Våre tidligere beregninger viser altså at det er mulig å drive ferger utelukkende på batteri. Ved å benytte hybriddrift i de første forsøkene på større ferger vil man likevel ha større driftssikkerhet. Med hybriddrift vil det være to kraftkilder tilgjengelig for drift. Ferger er fartøy som må være svært pålitelige hva gjelder regularitet.

Hybriddrift av en ferge innebærer at dieselgeneratorer supplerer eller avløser batteripakken når fergen trenger å gå med full effekt. Maskinen dimensjoneres da optimalt med hensyn til størrelsen på batteripakke og dieselmotor.

Siden alle batteridrevne ferger bør ha backupsystemer

Driftsprofil for en ferge



Figur 8: Driftsprofil for en ferge (Marintek 1998).

for fremdrift, bør alle ferger i utgangspunktet være potensielle hybrider. Slik kan dieselsystemene slå inn når batteriet enten er utladet eller hvis det av en eller annen grunn skulle slutte å fungere.

4.1.4 Nybygging kontra ombygging av ferger

En ferge drevet av batterier vil altså kunne dra nytte av diesel/elektrisk systemer på eksisterende ferger. Ombygging av fergene på norske samband er trolig gjennomførbart, siden det generelt er god plass til batterier i disse fergene.

En ny ferge vil likevel ha fordeler dersom utformingen av batteriet og vektfordelingen blir optimalisert. Ifølge firmaet Fjellstrand AS har fergens vekt/lengde/bredde-forhold mye å si for valg av samband for batteridrift. For korte ferger er vekten spesielt viktig, men for lange ferger som veier mye fra før betyr ikke batterivekten så mye. Fjellstrand AS konkluderer at små ferger med korte overfarter er ideelle for batteridrift (Tolo 2010).

4.1.5 Komponenter til en batteriferge

Et motorsystem for en batteriferge må ha et elektrisk fremdriftsanlegg med frekvenskontroll som på en diesel/elektrisk ferge. I tillegg kreves det kontrollsystemer både for lading og bruk. Dette må utvikles for den effekten fergen skal lades med, kanskje på flere hundre kilowatt. Fergene bør også ha kontrollsystemer for kjøling. Her har som nevnt ferger en fordel sammenlignet med elbiler, siden det er rikelig med kjølevann tilgjengelig fra sjøen.

Batteridrift av ferger er også en utfordring for net-

tet og ladestasjonen som skal betjene en batteriferge. Siden kraftnettet sjelden utsettes for så store belastninger som hurtiglading av batteriferger utgjør, må driften avklares med det lokale kraftselskapet. Ifølge Fjellstrand vil en batteriferge med deres utforming trenge en effekt på 700 kW under lading. Dette lar seg gjøre, men kan medføre en del kostnader til utviklings av ladestasjoner tilpasset batteridrevne ferger.

4.1.6 Nettkapasitet

Batteridrevne ferger kan altså kreve en maksimaleffekt på i underkant av 1 MW ved lading. Dette pådraget eller ladeeffektbehovet er stort for elektrisitetsnettet. Det lokale fordelingsnettet frakter elektrisitet i høyspent (opp til 22 kV) eller lavspent (230 eller 400 V). En vanlig hurtigladestasjon for elbiler vil sannsynligvis operere med en spenning på 400 volt og en strømstyrke på 63 ampere. Dette gir en effekt på om lag 43 kW. Batteriferger vil kreve langt høyere effekt og trenger derfor sterkere nett enn det vanlige lavspente fordelingsnettet. Likevel er ikke effektutfordringen avskrekkende. En batteriferge vil sannsynligvis ha samme pådrag som om lag 10-50 boliger.

Under prosjektering av en batteriferge bør likevel spørsmålet om nettkapasitet tas opp med det lokale kraftselskapet på et tidlig tidspunkt i prosessen.

Fordelen med et godt utbygd nett ved fergekaien er at det kan legges opp til hurtiglading også av elbiler som står i kø for å komme om bord, siden disse ikke vil benytte kapasiteten samtidig som fergen.

4.1.7 Formelle krav til batterifergen

Sjøfartsdirektoratet har ikke utarbeidet noen formelle krav til batteridrift av ferger. På generell basis opplyser direktoratet at brannsikkerhet er den viktigste faktoren når sikkerhetskrav settes. Det er viktig å sikre god ventilasjon og relevante slukningsredskap om bord. I dette tilfellet vil det sannsynligvis måtte stilles krav til kopperbrannslukningsapparat. Det er påkrevd med en nødkraftkilde for ferger, og dette vil også gjelde for batteriferger. Sjøfartsdirektoratet er positive til utviklingen av nye drivstoff i fergesektoren, men ønsker å være med på å lage et robust og godt regelverk (Skog 2010).

4.1.8 Jondal - Tørvikbygd

Som nevnt har Fjellstrand utarbeidet et konsept for en ferge på sambandet Jondal-Tørvikbygd. Sambandet har forholdsvis få kryssninger per dag og er betjent av en relativt liten ferge, noe som etter Fjellstrands mening passer bra til batteridrift. Driftstiden på sambandet i løpet av et døgn er omtrent tredelt. Med dette menes at den totale operasjonstiden for ferger er omtrent 8 timer og 50 min, ladetiden i løpet av dagen for en eventuell batteriferge er 7 timer og 10 min, og nattligget er omtrent 8 timer. Dette gjør det mulig å lade batteriene helt opp om natten og lade forholdsvis mye i løpet av dagen, noe som reduserer batteripakkestørrelsen og dermed utgiftene til batterier.

Fergen Fjellstrand har prosjektert, har et energibehov på 2 320 835 kWh i året. Den har en batteripakke på 20 tonn batterier av typen litium-ion, og er en 100 prosent batteriferge med diesel som reservefremdriftsløsning. Driftsmønsteret innebærer lading til full kapasitet om natten og lading mellom hver overfart, samt i to driftspauser om dagen. Fjellstrand har regnet seg frem til at en batteriferge av dette slaget vil kunne konkurrere økonomisk med dieselferger. Selskapet konkluderer også at ferger vil gi betydelige positive miljøeffekter: Den vil kutte 539 tonn CO₂-utslipp og 15 tonn NO_x-utslipp (Tolo 2010).

4.2 Økonomi

En ferge med et drivstofforbruk på om lag 80 liter per driftstime vil, ut fra en pris på 4,20 kroner per liter MGO) ha årlige drivstoffutgifter på om lag 2,3 millioner NOK. Dersom vi tar utgangspunkt i en gjennomsnittlig strømpris på 0,50 kroner per kWh og 0,35 kroner i nettleie per kWh, vil en batteriferge ha årlige energiutgifter på om lag 1,8 millioner NOK.

For å avgjøre hvor store batteripakker en ferge skal ha og hva disse vil koste, kreves nøyaktige beregninger av spesifikke batteripakker, strekninger og ferger. Et overslag viser at ferger i eksempelet over kan trenge 34 tonn batteri, noe som vil gi koste om lag 15 mil-

lioner kroner. for pakken og tilsvare kapitalkostnader på om lag 1,6 millioner kroner årlig. Siden både tankanlegg og dieselsystemer trolig må beholdes som backupløsning, kan det ikke påregnes noen besparing ved å erstatte disse.

I tillegg kommer en del tilleggskostnader, avhengig av behovet på hver enkelt ferge. Dette dreier seg i hovedsak om ladestasjoner, kontrollsystemer, elmotorer tilpasset batteridriften og eventuell utbygging og/eller forsterkning av elektrisitetsnettet i det aktuelle området.

4.3. Miljøbelastning

Den norske innenriksflåten bidrar til utslipp av om lag 4 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i året. Norske ferger står for om lag 10 prosent av dette, eller 410 000 tonn. En stor norsk ferge har et CO₂-utslipp på 3000-5000 tonn CO₂ i året. Fergen i eksemplet over har et dieselforbruk på 80 liter per driftstime og vil dermed ha et årlig utslipp på om lag 1500 tonn CO₂. Dette tallet angir reduksjonspotensialet ved innføring av batteriferger, siden sistnevnte ikke vil føre til skadelige utslipp til luft ved drift.

Nitrogenoksider (NO_x) er gasser som fører til sur nedbør og økt konsentrasjon av bakkenært ozon (NHO 2010a). Utslippene kan gi skadelige effekter på økosystemer og vegetasjon. I tillegg gir de helseskader for mennesker. NO_x-utslipp kommer blant annet fra forbrenning av fossile brenslere som MGO og naturgass. Gjennom Gøteborgprotokollen har Norge forpliktet seg til å redusere sine NO_x-utslipp til maksimalt 156 000 tonn i året.

De totale norske utslippene av NO_x fra ferger var i 2007 6425 tonn. NO_x-utslippene fra en ferge som bruker 80 liter diesel i timen, er om lag 40 tonn årlig (Flugsrud mfl 2010).

En norsk batteriferge vil ha null utslipp til luft under bruk. Utslipp knyttet til produksjon av batteriet avhenger av hvordan elektrisiteten ved den enkelte fabrikk blir produsert. Elektrisiteten som benyttes på en batteriferge kan også komme fra fossile kilder. I Norge blir mesteparten av energien produsert fra fornybare kilder.

En batteriferge vil sannsynligvis også ha en fordel når det kommer til støy. I sentrale strøk er støy et problem og reduksjon av støy kan også sees på som en miljøfordel.

4.4 Næringsmuligheter med batteriferges

I første omgang har ZERO-prosjektet «Batteridrift av ferger» denne studien undersøkt mulighetene knyttet til batteridrift av ferger. På lengre sikt kan kanskje batteridrift tas i bruk også i større skip og over lengre avstander. I tillegg er mulighetene for bruk av landstrøm for større skip allerede et viktig element i utviklingen av mer miljøvennlige skip. Dette har først og fremst vært diskutert som et tiltak for å unngå at store cruiseskip anløper byer og tettbygde strøk plaget av mye lokal forurensning og forverrer situasjonen. Dersom skipene kobles til landstrøm når de ligger ved kai, kan dette redusere utslipp fra skipene og skape bedre lokalmiljø. I en større sammenheng kan infrastruktur som bygges for dette formålet på sikt også gi ladekapasitet til havner og mulige fremtidige batteri/hybridskip.

Utvikling av batteriferges kan også være gunstig for norske kompetansemiljøer. På sikt kan dette bli en teknologi som blir etterspurt over hele verden og dermed hjelpe norsk verfts- og leverandørindustri. Norge har tidligere vært ledende innen bruk av LNG – flytende naturgass – i maritim sektor, men batteridrift er enda mer visjonært og miljøvennlig tiltak.

Foto: Tide



5 Oppsummering og konklusjoner

Etter en gjennomgang av tilgjengelig materiale og informasjon om batteriferges kan vi slå fast at ferger av gjennomsnittlig størrelse høyst sannsynlig vil kunne drives utelukkende med elektrisk energi fra batterier.

Som konsept er batteriferges nokså nytt, men bruk av batterier i båter, spesielt ubåter, er en gammel teknologi hvor norske leverandører har gitt viktige bidrag. Ideen bak batteriferges er heller ikke ny. Utredning av batteriferges i Norge ble foretatt allerede på 1980-tallet, men i praksis er driftsformen så godt som uprøvd. I Sverige har et selskap konvertert en dieselferge til batteridrift, men her er det snakk om en kabelferge. I Skottland er man kommet svært langt i å utvikle en hybridferge som drives dels av batterier, dels av dieselmotorer. I Norge jobber flere aktører med batteridrift, men ingen ferger er ennå blitt satt i drift.

Som et resultat av utprøving i andre kjøretøyer eksisterer batterier av en slik kvalitet og til en slik pris at de kan brukes også på andre områder. Dersom batterier skal tas i bruk i ferger, er pris, vekt, og syklisk levetid de viktigste parametrene å ta hensyn til. Per i dag er det i første rekke batterier av typen litium-ion, nikkellmetallhydrid og blysyre – kanskje også ZEBRA – som er godt nok utviklet til å kunne benyttes i ferger. I biler har det blitt satset på litium-ion-batterier, og det er grunn til å anta at denne typen er velegnet også i ferger.

En vanlig norsk ferge med et drivstofforbruk på om lag 80 liter per driftstime vil kunne konverteres til drift med en batteripakke på om lag 34 tonn til 15 millioner kroner. Direkte energitgifter for en slik ferge vil være om lag 1,7 millioner i året, mot 2,3 millioner ved dieseldrift.

Batterifergens motorsystem må ha elektrisk fremdriftsanlegg med frekvenskontroll som på en diesel/elektrisk ferge. I tillegg kreves kontrollsystemer både for lading og bruk. Dette vil medføre noen ekstra kostnader.

I bruk vil en batteriferge være svært miljøvennlig og ikke gi utslipp til luft. Til sammenligning vil en vanlig dieselferge med drivstofforbruk på 80 liter per driftstime slippe ut 1500 tonn CO₂ årlig, i tillegg til betydelige mengder NO_x (40 tonn).

ZERO anbefaler at det gjennomføres et forprosjekt med batteridrift på et utvalgt fergesamband i Norge. Forprosjektet kan gi nærmere svar på spørsmål om kostnader, batterienes levetid og teknologisk gjennomførbarhet. Fergen som trafikkerer sambandet bør i utgangspunktet ha et nattligge på minimum fem timer, kunne lades i løpet av dagen og helst ikke være for stor, selv om batteridrift også kan bli aktuelt på større ferger i fremtiden.

6 Referanseliste

- AGR Marine Engineering, 2010. AGR Marine Engineering. Tilgjengelig på: <http://www.agr.com/Our-Services/Field-Operations/Project-management/Marine-Engineering/>.
- Andreasson, J., 2010. Informasjon om ferjen maj.
- Anderson, J., CMAL, 2010. Samtale med James Anderson.
- Bairdmaritime, 2010. Testing of new battery cells for submarines on board solar catamaran. Tilgjengelig på: http://www.bairdmaritime.com/index.php?option=com_content&view=article&id=5902:testing-of-new-battery-cells-for-submarines-on-board-solar-catamaran&catid=82&Itemid=79 [Aksessert Juni 1, 2010].
- Battery Council International, 2009. Battery recycling. Tilgjengelig på: <http://www.batterycouncil.org/LeadAcidBatteries/BatteryRecycling/tabid/71/Default.aspx> [Aksessert Mai 11, 2010].
- Battery University, 2010. Recycling batteries. Tilgjengelig på: <http://www.batteryuniversity.com/partone-20.htm> [Aksessert Mai 19, 2010].
- Berntsen, T. mfl, 2007. To what extent can a long-term temperature target guide near-term climate change commitments? *Climate Change*, 82(3-4), 373-391.
- Beyer, T., 2010. Epost fra saft batteries.
- Bullis, K., 2009. Revisiting Lithium-Sulfur Batteries. *Technology Review*. Tilgjengelig på: <http://www.technologyreview.com/energy/22689/?a=f> [Aksessert Juni 1, 2010].
- Cox, P.A. mfl, 2004. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. Springer Wien, 78(1-3), 137-156.
- Fjellstrand, 2010. Fjellstrand. Tilgjengelig på: http://www.fjellstrand.no/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=11 [Aksessert September 9, 2010].
- Flugsrud, K., Hoem, B. & Aasestad, K., 2010. Utslipp til luft av NOx fra innenriks sjøfart og fiske, SSB. Tilgjengelig på: http://www.ssb.no/emner/01/04/10/rapp_201040/rapp_201040.pdf [Aksessert Oktober 21, 2010].
- Galloway, R. & Dustmann, C.H., 2003. ZEBRA Battery - Material cost, Tilgjengelig på: http://eaaeurope.org/EVS20_Long_Beach_2003.pdf.
- Gregory, J.M., Huybrechts, P. & Raper, S.C., 2004. Climatology: threatened loss of the Greenland ice. *Nature*. Tilgjengelig på: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15071587> [Aksessert November 12, 2009].
- Gruber, P. & Medina, P., 2010. Global Lithium Availability: A constraint for electric vehicles?, University of Michigan. Tilgjengelig på: <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/69226/1/Global%20Lithium%20Availability%20-%20Paul%20Gruber%20%26%20Pablo%20Medina.pdf> [Aksessert Mai 21, 2010].
- Gude, S. mfl, 2005. Miljørapport for innenriks ferjetrafikk 2005, Sjøfartsdirektoratet, Statens vegvesen og Rederienes landsforening. Tilgjengelig på: http://www.sjofartsdir.no/upload/Sj%C3%B8sikkerhet/Rapporter/2005_ferjefaktautvalget_%20%C3%A5rsrapport_%20milj%C3%B8.pdf [Aksessert September 8, 2010].
- IKO Maritime AS, 1985. Batteridrevne ferger - Teknisk økonomisk analyse - prosjektforslag, Tilgjengelig på: [Aksessert April 28, 2010].
- Innovasjon Norge, 2010. Innovasjon Norge - Om oss. Tilgjengelig på: <http://www.innovasjonnorge.no/Om-oss/> [Aksessert September 9, 2010].
- International Law, 2009. Panasonic Merger With Sanyo Cleared by FTC. Tilgjengelig på: <http://www.law.com/jsp/law/international/LawArticleIntl.jsp?id=1202435811224> [Aksessert Mai 19, 2010].
- Kalhammer, F.R. mfl, 2007. Status and prospects for zero emissions vehicle technology, State of California air resource board. Tilgjengelig på: http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf.
- Kiehne, H.A., 2003. Battery technology handbook, Expert Verlag. Tilgjengelig på: <http://www.google.com/books?hl=no&lr=&id=1HSsx9fPAKkC&oi=fnd&pg=PR19&dq=batteries+basic+technology&ots=7ORRVo7Mpj&sig=iWcQCepXy8b5ZnCq6cNVNR9PpJ8#v=onepage&q=batteries%20basic%20technology&f=false> [Aksessert April 29, 2010].
- Marintek, 1998. Elektrisk drift av ferger - batteridrift/hybride løsninger,
- Matheys, J. mfl, 2006. Comparison of the environmental impact of 5 electric vehicle battery technologies using LCA, Tilgjengelig på: <http://www.mech.ku>

- leuven.be/lce2006/010.pdf [Aksessert Mai 11, 2010].
- Miljøstatus Norge, 2010. Bly. Tilgjengelig på: <http://www.miljostatus.no/Tema/Kjemikalier/Noen-farlige-kjemikalier/Bly/> [Aksessert Mai 14, 2010].
- NHO, 2010a. Hva er NOx? Tilgjengelig på: <http://www.nho.no/hva-er-nox/category469.html> [Aksessert Juli 2, 2010].
- NHO, 2010b. Næringslivets NOx-fond. Tilgjengelig på: <http://www.nho.no/naeringslivets-nox-fond/send-soeknaden-foer-1-november-article22282-457.html> [Aksessert August 20, 2010].
- Norges Forskningsråd, 2010a. Fremtidens rene energisystemer (RENERGI). Tilgjengelig på: <http://www.forskningsradet.no/no/Utlysning/RENERGI/1079630580637> [Aksessert Oktober 21, 2010].
- Norges Forskningsråd, 2010b. Maritim virksomhet og offshoreoperasjoner (MAROFF). Tilgjengelig på: <http://www.forskningsradet.no/no/Utlysning/MAROFF/1049462132121> [Aksessert Oktober 21, 2010].
- Planet solar, 2010. PlanetSolar :: Premier tour du monde à l'énergie solaire :: PlanetSolar. Tilgjengelig på: <http://www.planetsolar.org/> [Aksessert Oktober 13, 2010].
- Samferdselsdepartementet, 2008. Nasjonal transportplan St.meld. nr. 16 (2008-2009). Tilgjengelig på: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/sd/dok/regpubl/stmeld/2008-2009/stmeld-nr-16-2008-2009-/6/2/2.html?id=548882> [Aksessert April 23, 2010].
- Sandvik båtbyggeri, 2010. Stor interesse for Sandvik 44. Tilgjengelig på: <http://www.sandvikboats.no/nor/content/view/full/256> [Aksessert September 9, 2010].
- Sion Power, 2010. Sion Power Receives ARPA-E Grant to Develop Batteries for Electric Vehicles. Tilgjengelig på: <http://sionpower.com/pdf/articles/ARPA-E%20Grant%20Press%20Release.04-30-2010.pdf> [Aksessert Juni 1, 2010].
- Skog, Ø., 2010. Samtale med Øyvind Skog Sjøfartsdirektoratet. Tilgjengelig på: [Aksessert Oktober 12, 2010].
- Statens vegvesen, 2010. Forvaltningsreformen: Veger skifter eier. Tilgjengelig på: <http://www.vegvesen.no/Om+Statens+vegvesen/Aktuelt/Vegnettet+fra+2010> [Aksessert April 23, 2010].
- Tolo, E., 2010. Fjellstrand. [Aksessert September 7, 2010].
- Transnova, 2010. Bakgrunn og målsetting. Tilgjengelig på: <http://www.transnova.no/omTransnova/bakgrunn>.
- Warrier, D., Osborne, J. & Odama, Y., 2009. The race for the electric car - a comprehensive guide to battery technologies and market development, Thomas weisel Partners. Tilgjengelig på: http://theestory.com/files/tweisel_electric_cars.pdf.



www.zero.no

ZERO

