

SEPTEMBER 2023
TRANSPORTMINISTERIET

GRØN OMSTILLING AF HURTIGFÆRGER



SEPTEMBER 2023
TRANSPORTMINISTERIET

GRØN OMSTILLING AF HURTIGFÆRGER

PROJEKTNR.

A245872

DOKUMENTNR.

VERSION

5.0

UDGIVELSESDATO

September 2023

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

LRJE, MIFN, HOK

KONTROLLERET

OLEK

GODKENDT

OLEK

INDHOLD

1	Indledning	4
2	Indenrigshurtigfærger	7
3	National og international regulering	8
3.1	CO ₂ -afgifter	8
3.2	EU-regulering	9
4	Tiltag og teknologier	13
4.1	Lavere hastighed	13
4.2	Færre afgang	17
4.3	HVO	18
4.4	Gas (LNG og LBG)	19
4.5	Elfærge med batteri	22
4.6	Elfærge med flywheel	27
4.7	El-hybrid	29
4.8	Power-to-X	31
5	Konsekvenser for hurtigfærgerne af forskellige udviklingsspor	38
5.1	HVO	40
5.2	Elfærge	41
5.3	Power-to-X	45
6	Sammenfatning	49

1 Indledning

Med *Aftale om udmøntning af pulje til grøn transport* af 3. april 2020 (S, SF, EL, RV, ALT, V, K, DF, LA) blev der afsat 1 mio. kr. til gennemførelse af en analyse, hvor det blev undersøgt, hvilke færgeruter der er mest egnede til at overgå til vedvarende energi, og på hvilken måde omstillingen af færger bedst understøttes via midler fra puljen til grøn transport.

Omstilling til eldrift er allerede teknologisk muligt for hovedparten af de danske indenrigsfærger. Analysen (herefter "Færgeanalysen"), som blev udarbejdet af COWI og offentliggjort i 2021, omhandlede alle 66 færger, som er i almindelig indenrigsdrift i Danmark, og som betjener 50 forskellige ruter. Færgeanalysen viste, at det er muligt at omstille en stor del af de danske indenrigsfærger og opnå drivhusgasreduktioner til relativt lave skyggepriser, bl.a. som følge af, at omstillingen vil have betydelig effekt på den lokale luftforurening.

På baggrund af konklusionerne i analysen blev der afsat midler fra Grøn transportpulje I og II til to færgepuljer til grøn omstilling af indenrigsfærgerne. I 2021 blev tilskuddene fra Pulje til grøn omstilling af indenrigsfærger fordelt til 11 indenrigsfærger (fordelt på 10 danske indenrigsfærgeruter), mens der i 2022 blev fordelt tilskud til 3 færgeruter fra Pulje til grøn omstilling af indenrigsfærger II. I alt er der fra puljen givet tilsagn om 280,2 mio. kr.

Færgeanalysen pegede på, at der ikke er lige så oplagte omstillingsmuligheder for hurtigfærger som for de fleste andre indenrigsfærger. Hurtigfærgerne på Kattegat sejler på ruterne Odden-Aarhus og Odden-Ebeltoft og drives af det kommercielle rederi Molslinjen. Herudover sejler en hurtigfærge, som drives af Samsø Rederi, mellem Aarhus og Sælvig.

Da hurtigfærgerne på Kattegat udleder ca. 130-140.000 tons CO_{2e} årligt, står de for størstedelen af indenrigsfærgernes samlede CO₂-udledninger på ca. 220.000 tons CO_{2e} årligt. Det er derfor væsentligt at finde frem til grønne omstillingsmuligheder for hurtigfærgerne. Molslinjen arbejder selv med at finde grønne alternativer gennem optimering af de eksisterende hurtigfærger.

Med aftale af 19. april 2021 om udmøntning af midler fra Grøn Transportpulje II til grøn omstilling af indenrigsfærger er det besluttet at igangsætte en analyse af, hvordan hurtigfærger i Danmark kan gennemgå en grøn omstilling.

Analysen er udarbejdet af COWI i perioden august 2022-juni 2023 og fokuserer på indenrigshurtigfærgerne, men analysens resultater vil i vidt omfang kunne overføres til Ystad-Rønne-ruten.

Rapportens kapitel 2 omfatter en oversigt over de færger, der er omfattet af analysen, mens den relevante nationale og internationale regulering gennemgås i kapitel 3. I kapitel 4 gennemgås de tiltag og teknologier, der kan bringes i spil for at nedbringe udledningen af drivhusgasser. Kapitlet gennemgår alle kendte tiltag og teknologier, som enten kan implementeres umiddelbart, eller som er under udvikling til brug i skibsfart. Hvert tiltag og hver teknologi beskrives og vurderes i forhold til økonomi, udfordringer, tidsplan, konsekvenser for havneanlæg og forsyning, potentiale for reduktion i drivhusgasser samt betydning for driften og for passagererne. På baggrund af gennemgangen giver COWI deres vurdering af det enkelte tiltag og teknologien i forhold til muligheden for benyttelse på Kattegatruterne. De tiltag og teknologier, der anses som de mest relevante, gennemgås yderligere i kapitel 5 for at fastlægge konsekvenserne for hurtigfærgerne. For flere af teknologierne er der så store usikkerheder, at der gives eksempelsberegninger på mulige meromkostninger snarere end en konkret økonomisk vurdering af tiltaget. Kapitlet omhandler kun tiltag og teknologier, som er relevante for hurtigfærgerne. Slutteligt sammenfattes hovedbudskaberne i kapitel 6.

Storebæltsforliget

I forbindelse med den politiske aftale af 12. juni 1986 om Storebæltsforbindelsen blev det mellem den daværende regering (Venstre, Det Konservative Folkeparti, Kristendemokraterne og Centrum-Demokraterne) og Socialdemokratiet aftalt, at staten skal sikre, at der opretholdes mindst én færgeforbindelse mellem Sjælland og Jylland over Kattegat samt en rute mellem Spodsbjerg og Tårs.

Boks 1 Lov om anlæg af en fast forbindelse over Storebælt¹

§ 13. Ministeren for offentlige arbejder kan pålægge selskabet i et nærmere fastsat omfang at opretholde en bilfærgeforbindelse mellem Sjælland og Jylland over Kattegat og en bilfærgeforbindelse mellem Spodsbjerg og Tårs.

Aftalen er i dag konkret udmøntet i § 2, stk. 5, i lov om færgefart², hvoraf det fremgår, at transportministeren kan pålægge A/S Storebælt i et nærmere bestemt omfang at opretholde en bilfærgerute mellem Sjælland og Jylland over Kattegat og en bilfærgerute mellem Spodsbjerg og Tårs. Det fremgår desuden af lov om færgefart, at det er A/S Storebælt, der efter pålæg fra transportministeren, udbyder driften af de pågældende bilfærgeruter:

¹ 1986 LSF 177: <https://www.retsinformation.dk/eli/ft/198612K00177>

² <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2008/915>

Stk. 5. Transportministeren kan pålægge A/S Storebæltsforbindelsen i et nærmere fastsat omfang at opretholde en bilfærgerute mellem Sjælland og Jylland over Kattegat og en bilfærgerute mellem Spodsbjerg og Tårs.

A/S Storebælt har i overensstemmelse med lovgrundlaget, og efter pålæg fra transportministeren, udbudt færgeruten Spodsbjerg-Tårs, som besejles af Molslinjen under navnet Langelandslinjen.

Kattegatruten besejles af Molslinjen på kommercielle vilkår, hvorfor ruten ikke udbydes af A/S Storebælt. Transportministeren kan i henhold til Lov om Færgesfart § 2, stk. 5, pålægge A/S Storebæltsforbindelsen (Sund og Bælt A/S) at opretholde en bilfærgerute mellem Sjælland og Jylland.

2 Indenrigshurtigfærger

Nærværende analyse omfatter hurtigfærgerne på ruterne Odden-Aarhus og Odden-Ebeltoft, som besejles af det kommercielle rederi Molslinjen. Ruten Ystad-Rønne besejles ligeledes af Molslinjen (under navnet "Bornholmslinjen") med hurtigfærger, men ruten er ikke omfattet af denne analyse, idet den ikke er indenlandsk. Mulighederne for omstilling af Bornholmslinjen må dog forventes at være de samme som for kattegatruterne. Endelig sejler en mindre hurtigfærge mellem Aarhus og Sælvig på Samsø. Færgeren er en ren passagerfærge og har en sejltid på niveau med de andre hurtigfærger. Ruten behandles ikke særskilt i analysen, da den har meget få afgange, men de tekniske aspekter vedrørende forskellige teknologier vil også gælde for færgen på ruten.

Data for de af analysen omfattede færger er vist i *Tabel 1 Data for færger på ruten Aarhus-Odden samt Ebeltoft-Odden (sejllængde ca. 39 sømil)*. Forbrugstal gælder for 2019. Olieforbruget er baseret på en overfartstid på 75 minutter. I 2022 er overfartstiden øget til ca. 82 minutter, hvorved olieforbruget gennemsnitligt er reduceret med ca. 450 kg (ca. 8 pct.).

Tabel 1 Data for færger på ruten Aarhus-Odden samt Ebeltoft-Odden (sejllængde ca. 39 sømil)

Færgenavn:	HSC Max	H/F Express 2	H/F Express 3	H/F Express 4
Byggeår	1998	2013	2017	2019
Byggeværft	INCAT	INCAT	INCAT	AUSTAL
Hovedmotoreffekt (kW)	28.320	36.000	36.400	36.400
Passagerantal	884	1.150	1.094	1.166
Antal personbiler	220	415	417	425
Maksimal dødvægt (tons)	500	1.000	1.000	1.000
Overfartstid (minutter)	75	75	75	75
Maksimal servicefart (knob)	39	38	40	40
Antal enkeltture i 2019	(Indsat i 2022)	2.414	2.676	2.219
Olieforbrug i 2019 (tons)	Indsat i 2022	13.187	14.555	11.497
Olieforbrug pr. tur i 2019 (kg/tur)	Indsat i 2022	5.463	5.439	5.181

3 National og international regulering

Som led i den grønne omstilling er både EU og Folketinget på vej med ny regulering, der har betydning for den danske færgedrift. Af særlig relevans for analysen er *aftale om grøn skattereform for industri mv.* af 24. juni 2022 mellem den daværende regering (Socialdemokratiet), Venstre, Socialistisk Folkeparti og Det Konservative Folkeparti og arbejdet i EU med yderligere regulering af transportsektoren – særligt i relation til EU's Fit-for-55-pakker.

I dette afsnit gennemgås hovedelementerne i ovenstående regulering med henblik på at vurdere, hvilke konsekvenser det kan have for de danske hurtigfærger.

3.1 CO₂-afgifter

Den 24. juni 2022 blev der indgået en politisk aftale mellem Socialdemokratiet, Venstre, Socialistisk Folkeparti, Radikale Venstre og Det Konservative Folkeparti om en grøn skattereform, hvor rammerne for en fremtidig CO₂-afgift er aftalt. De lovgivningsmæssige rammer blev ikke vedtaget inden valget den 1. november 2022 og skal derfor gennemføres af SVM-regeringen.

Aftalen betyder, at der i 2030 er en CO₂-afgift på 750 kr. pr. ton udledt CO₂ for de virksomheder, som ikke er omfattet af EU's kvotehandelssystem.

Der er aftalt en gradvis indfasning af CO₂-afgiften fra 2025 til 2030. Afgiften for *ikke-kvotebelagte sektorer* starter med 350 kr. pr. ton CO_{2e} i 2025 og vil stige med 80 kr. pr. ton CO_{2e} om året frem til 2030. For de *kvoteomfattede sektorer* – som med den nye EU ETS-aftale også omfatter en del af indenrigsfærgerne – indfases afgiften med 75 kr. i 2025 og stiger med 60 kr. pr. ton CO_{2e} om året og ender på 375 kr. i 2030.

Dertil er aftalt en bundpris for den kvotebelagte del, så der som minimum skal betales 1.125 kr. pr. ton CO_{2e} i 2030. Det svarer til en EU-kvoteprijs på 750 kr. pr. ton CO_{2e} plus 375 kr. pr. ton CO_{2e} i afgift.

En del af indenrigsfærgefarten, herunder hurtigfærgerne på Kattegatforbindelsen, skal således betale en national CO₂-afgift på 375 kr. pr. ton udledt CO₂ i 2030 i lighed med de virksomheder, som er omfattet af EU's kvotehandelssystem.

I aftalen fremhæves ydermere særligt indenrigshurtigfærger, der *ikke kan elektrificeres og skal sejle på e-fuels*, og der er i aftalen enighed om, at disse prioriteres ved fremtidig omstillingsstøtte som *Fond til grøn omstilling*.

Fond til grøn omstilling i grøn skattereform

I grøn skattereform indgår en prioritering af ca. 7 mia. kr. frem mod 2030 til en fond til grøn omstilling. Midlerne skal primært gå til omstillingsstøtte til virksomheder samt til en pulje til fangst og lagring af CO₂. Omstillingsstøtten indfases parallelt med, at den nye CO₂-afgift indfases.

Boks 2 *Fond til grøn omstilling*

Omstillingsstøtte til virksomheder

Omkring 4 mia. kr., inkl. reserve, skal gå til omstillingsstøtte målrettet de virksomheder, der har sværest ved at omstille sig, herunder en prioritering af indenrigshurtigfærger, der ikke kan elektrificeres. Støtten kan hjælpe virksomhederne – mod at stille krav - i en overgangsperiode.

Pulje til fangst og lagring af CO₂ (CCS)

Omkring 3 mia. kr. skal gå til tilskud til fangst og lagring af CO₂ (CCS). Tilskuddet gives til fangst og lagring af fossile såvel som biogene kilder (BECCS), fx biogas, biomasse og biogent affald, hvorved der gives en tilskyndelse til negative udledninger.

3.1.1 Økonomiske konsekvenser

I vurderingen af konsekvenserne for Kattegatfærgerne tages udgangspunkt i, at skibsfarten inkluderes i EU's kvotehandelsystem fra 2024.

Færgerne betaler i dag ikke afgift af den diesel, der forbruges. Med indførelse af en national CO₂-afgift vil det betyde en stigning i betalingen for energiforbruget for hurtigfærgerne på 375 kr. pr. ton CO_{2e}, der udledes.

I dag (2019-tal) bruges i alt 41.450 tons dieselolie om året på de fire hurtigfærger og hurtigfærgeren fra Aarhus til Samsø, der alle sejler på Kattegat. CO₂-udledningen pr. kg marinegasolie (MGO) er 3,206 kg CO₂. I alt har færgerne derfor en samlet årlig CO₂-udledning på 132.800 tons. Det giver en samlet afgiftsbetaling på ca. 49,8 mio. kr. om året i 2030 (stigende fra ca. 10 mio. kr. i 2025). Dertil kommer de forventede udgifter til CO₂-kvoter (se opgørelse i afsnit 3.2.1).

Hvis dette fordeles pr. køretøj, som benytter færgerne, svarer det til ca. 36 kr. pr. køretøj.³ Hvis meromkostningen overvæltes på forbrugeren, vil det således alt andet lige medføre en prisstigning på billetpriserne på ca. 36 kr. pr. køretøj som følge af indførelsen af en CO₂-afgift.

3.2 EU-regulering

Europa-Kommissionen har gennem flere år arbejdet med initiativer til at reducere udledningen af drivhusgasser. Europa-Kommissionens Fit-for-55-pakke fra 2021 har ført til forskellige initiativer, der også omfatter hurtigfærgerne, og indeholder følgende elementer:

- > Udvidelsen af EU's kvotehandelsystem til søfart

³ I 2019 sejlede 1.368.200 biler med Kattegatruterne jf. Statistikbanken.

- > Forslag til revision af direktivet for vedvarende energi (VE II-direktivet, eller RED II Directive)
- > Forhandlinger om ændringer i Energibeskatningsdirektivet
- > Carbon border adjustment mechanism (CBAM)-forordningen
- > FuelEU Maritime-forordningen
- > AFIR-forordningen

EU's kvotehandelssystem

I december 2022 blev indgået en foreløbig aftale om at udvide EU's kvotehandelssystem til også at omfatte skibe over 5.000 bruttotons.⁴ Det betyder, at hurtigfærgerne indlemmes i kvotehandelssystemet fra 2024. Aftalen blev endeligt vedtaget i maj 2023.

EU's kvotehandelssystem er et CO₂-marked baseret på et emissionsloft og et handelssystem for energiintensive industrier og energisektoren.

Der er enighed om en gradvis indførelse af forpligtelser for rederier til at afgive kvoter: 40 pct. for verificerede udledninger fra 2024, 70 pct. fra 2025 og 100 pct. fra 2026. Skibe, der sejler mellem to EU-havne, skal betale CO₂-kvoter svarende til hele deres udledning, og skibe, der sejler mellem en EU-havn og en havn i et tredjeland, skal betale CO₂-kvoter for halvdelen af deres udledning. Søtransportaktiviteter til øer med under 200.000 indbyggere, som ikke kan forbindes via vej eller tog, kan undtages for forpligtelsen.

FuelEU Maritime

I juli 2023 blev FuelEU Maritime-forordningen vedtaget. Forordningen indfører et CO₂-fortrængningskrav for skibe over 5.000 bruttoton på 2 pct. i 2025, 6 pct. i 2030, 14,5 pct. i 2035, 31 pct. i 2040, 62 pct. i 2045 og 80 pct. i 2050. Førstegenerations biobrændstoffer vil have samme emissionsfaktor som fossile brændstoffer. Kravet gælder for skibe som sejler mellem to EU-havne samt for 50 pct. af sejladsen til og fra en EU-havn og en havn i et tredjeland. Frem til 2034 vil det være muligt at dobbelttælle brugen af PtX-brændstoffer op mod CO₂-fortrængningskravet. Fra 2034 vil indføres et underkrav på 2 pct. til brug af PtX-brændstoffer, såfremt PtX udgør under 1 pct. af de grønne brændstoffer i 2031. FuelEU Maritime fastlægger endvidere krav til etablering af f.eks. landstrøm til

⁴ EU-Kommissionen skal senest i 2026 præsentere en rapport, som redegør for, hvorvidt det er økonomisk bæredygtigt, samt om der er miljømæssige og sociale effekter ved at inkludere skibe mellem 400 og 5.000 bruttoton i EU's kvotehandelssystem. Rapporten skal ligeledes undersøge opførelse af brændstoffers udledninger i et livscyklusperspektiv.

skibene, når de ligger ved kaj. Hvis skibet ligger til kaj i mindre end to timer, eller der ikke er mulighed for adgang til landstrøm, kan det undtages. Det vil således være aktuelt for hurtigfærgerne i fast rutefart.

Prissætning af CO₂ ved energibeskatning og import

To yderligere centrale elementer, der arbejdes med i Fit-for-55, er tilpasninger af energibeskatningen (Energy Taxation Directive) og den såkaldte CO₂-grænsetilpasningsmekanisme (CBAM).⁵ I revisionen af energibeskatningsdirektivet foreslås en tilpasning af beskatningen af energiprodukter og elektricitet, som afspejler energiindhold samt klima- og miljøpåvirkningen. Drivmidler, som udleder fossilt CO₂, vil dermed kunne beskattes højere end dem med mindre klimaeffekt. CBAM skal modvirke, at der sker carbonlækage, hvor aktørerne flytter deres CO₂-emissioner uden for EU for dermed at undgå EU-lovgivningen. Det er ikke afklaret, hvordan en ny energibeskatning og CBAM vil påvirke den danske CO₂-afgift, om der skal ske en tilpasning til omfang og størrelse samt indfasningen, eller om den kommer til at omfattes skibsfarten.

AFIR-forordningen

Et andet element er målsætninger for udrulning af infrastruktur til optankning af alternative drivmidler gennem Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR-forordningen). I revisionen af AFIR-forordningen (foreløbig aftale primo april 2023) opstilles bindende mål for udrulning af lade- og tankinfrastruktur for alternative drivmidler, herunder interoperabilitet og gennemsigtighed i priserne. Det gælder bl.a. et LNG-infrastrukturnetværk og brintforsyning, der har relevans for færgedrift. Forordningen sikrer, at der er adgang til brint og til LNG i EU's TEN-T core and comprehensive network (vej- og søtransportkorridorer). Denne infrastruktur omfatter endvidere landstrøm. Der er ikke endnu indgået aftaler om infrastruktur til nye alternative brændstoffer som f.eks. e-metanol og e-ammoniak. AFIR-forordningen blev vedtaget i juli 2023.

3.2.1 Økonomiske konsekvenser

EU-lovgivningen kan få stor indflydelse på driften af hurtigfærgerne på Kattegatruterne. Inklusionen i EU-ETS vil betyde, at hurtigfærgerne skal betale en national CO₂-afgift på 75 kr. pr. ton CO₂e i 2025 stigende med 60 kr. om året op til en afgift på 375 kr. pr. ton CO₂e i 2030. Idet der også skal købes CO₂-kvoter, vil den samlede omkostning for CO₂-kvoter og CO₂-afgift derfor være minimum 1.125 kr. pr. ton CO₂e i 2030, jf. afsnit 3.1.1, og højere, hvis kvoteprisen er højere end 750 kr. pr. ton CO₂e.

CO₂-fortrængningskravet i FuelEU Maritime kan ligeledes få betydning for færgedriften. CO₂-fortrængningskravet kan lede til ændrede omkostninger ved at skulle anvende dyrere brændstoffer (f.eks. HVO eller PtX-brændstoffer) for at imødekomme kravet. Hvis fortrængningskravet efterleves, vil det betyde, at der

⁵ Opnået enighed om i Europa Parlamentet december 2022, men endnu ikke godkendt i Det Europæiske Råd.

udledes 2 pct. mindre CO₂e pr. GJ i 2025 og 6 pct. i 2030 stigende til 80 pct. i 2050.

En økonomisk konsekvensberegning af CO₂-kvotekøbene vil alt andet lige betyde en merudgift, der er (mindst) dobbelt så høj som betaling af CO₂-afgiften jf. afsnit 3.1 (ved en kvotepris på 750 kr. og CO₂-afgiften på 375 kr. i 2030). Det vil svare til en merudgift til køb af CO₂-kvoter med det olieforbrug, som Kattegatfærgerne havde i 2019, på ca. 99,6 mio. kr. årligt.

Betaling af CO₂-kvoter i EU-regi og den nationale CO₂-afgift vil således give en samlet CO₂-omkostning på omtrent 149 mio. kr. årligt. Såfremt den fulde omkostning væltes over på forbrugeren, vil det alt andet lige føre til en prisstigning på omkring 109 kr. pr. billet i 2030⁶. Disse omkostninger vil reduceres løbende i takt med det stigende CO₂-fortrængningskrav i FuelEU Maritime-forordningen. Til gengæld vil omkostningerne til et eventuelt dyrere brændstof trække i modsat retning. Der er ikke udarbejdet en opgørelse af denne balance.

⁶ Det er forudsat, at EU-CO₂-kvoterne ikke koster mere end 750 kr. pr. ton CO₂.

4 Tiltag og teknologier

For at undersøge hvilke muligheder der kan være for at reducere drivhusgasudledningerne fra hurtigfærger, gennemgås relevante teknologier og omstillingsmuligheder nedenfor. Der er tale om både tiltag, som kan igangsættes med det samme, og teknologier, som er under udvikling og forventes at kunne anvendes i fremtiden. Det handler om tiltag som lavere tophastighed og alternative drivmidler som HVO, el og PtX. I *Tablet 2* fremgår de relevante drivmidler og overordnede indikatorer for status og tidshorisont i forbindelse med forskellige aspekter af teknologien som tilgængelighed af drivmidler, motorteknologi, sikkerhed og regulering. Vurderingerne er baseret på vurderinger først fremlagt af Mærsk McKinney Møller Center for Zero Carbon Shipping og er tilpasset yderligere på baggrund af input fra DNV⁷. Farverne afspejler modenheden af hhv. teknologien og drivmidlet, mens årstallene kan ses som en indikation af, hvornår hhv. teknologien og drivmidlet forventes at være implementerbare. Teknologier og drivmidler beskrives nedenfor.

Tablet 2 *Oversigt over drivmidlernes modenhed*

	Feedstock tilgængelighed	Drivmiddelproduktion	Infrastruktur, lagring og bunkring	Lagringsmulighed ombord og tilstedeværelse af nødvendig teknologi	Sikkerhed ombord	Regulering
HVO (2. generation)		før 2023	før 2023	før 2023	før 2023	før 2023
El (VE) - batteri	før 2030	før 2023	efter 2023	før 2023	før 2023	før 2023
El (VE) - flywheel	før 2030	før 2023				
Brint	før 2030					før 2032
E-metanol		efter 2024		2022		
E-ammoniak	før 2030		2026	efter 2026	2027	2028

Forklaring

Moden og afprøvet	Løsninger er identificeret	Væsentlige udfordringer udestår
-------------------	----------------------------	---------------------------------

Kilde: Mærsk McKinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, DNV, tilpasset af COWI.

Note: vedværende energi er allerede en tilgængelig feedstock, dog forventes den danske elforsyning først i 2030 at være helt vedvarende.

For hvert tiltag eller teknologi gennemgås en række fastlagte punkter: hvad tiltaget eller teknologien går ud på; mulige udfordringer herved; betydning for havneanlæg, forsyning, drift og passagerer; eksempelberegninger på mulige økonomiske konsekvenser; tidshorisont; og endelig reduktionspotentialet af drivhusgasser fra et livscyklusperspektiv.⁸

Det bemærkes, at el og VE-brændstoffer opgøres som klimaneutralt op mod de nationale klimamål, når de benyttes i transportsektoren, *jf. FN's opgørelsesmetode*.

4.1 Lavere hastighed

Beskrivelse af tiltag

⁷ Klassifikationsselskabet, som er en sammenslutning af Det Norske Veritas og Germanischer Lloyd

⁸ For en nærmere beskrivelse af opgørelsesmetoderne af drivhusgasudledninger henvises til 6Bilag D.

Rederiet kan sejle med en lavere hastighed eller reducere tophastigheden med henblik på at reducere olieforbruget og dermed emissionerne.

Molslinjen har pr. 23. maj 2022 valgt at lade en mindre del af sejlturen blive tilbage ved lav hastighed, hvorved de samlet set har opnået en reduktion af energiforbruget på ca. 8 pct. Tiltaget har forlænget sejltiden på Aarhus-Odden med ca. 5 minutter.

Udfordringer

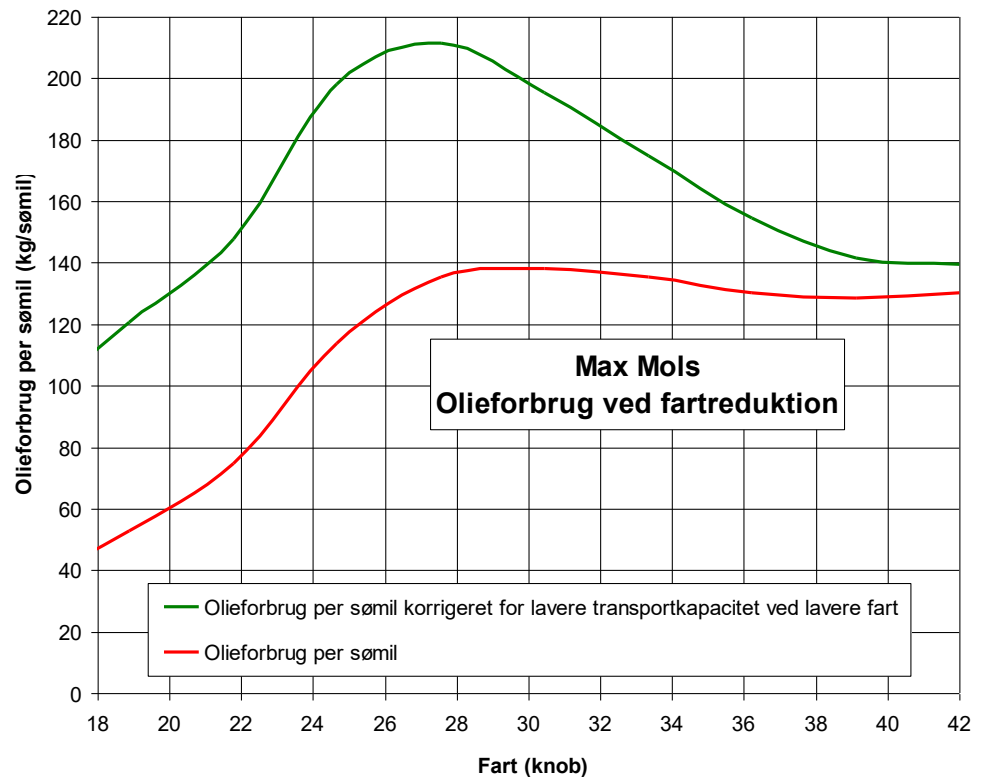
Ved at sænke tophastigheden bliver overfartstiden forlænget, hvilket betyder, at det ikke vil være muligt at have lige så mange daglige afgange på ruten. Hvis den samme transportkapacitet skal opretholdes, er man derfor nødt til at øge antal færger på ruten.

Sejlsplanen skal ændres for at tage højde for den forlængede overfartstid. Passagererne kan finde det mindre attraktivt med den forlængede overfartstid og dermed begynde at efterspørge andre muligheder for at rejse mellem Øst- og Vestdanmark. Det har ikke været muligt at vurdere ændringen i efterspørgselseffekten.

Derudover vil energibesparelsen ved hurtigfærgerne aftage, hvis hastigheden nedsættes. Normalt kan man spare energi til fremdrivning ved at reducere et skibs hastighed, men for hurtigfærger gælder nogle specielle hydrodynamiske forhold. De hydrodynamiske forhold har en afgørende indflydelse på energiforbruget. En væsentlig parameter, der har indflydelse på et skibs fremdrivningsmodstand og dermed energiforbruget, er det såkaldte Froude-tal.⁹ Dannelsen af bølger medfører et øget energiforbrug. Sejler man ved en fart, der er væsentlig højere end "hump"-punktet, falder bølgeomstanden ganske meget, og dermed også den samlede fremdrivningsmodstand, som tilsammen udgøres af skibets bølgeomstand og dets friktionsmodstand. Hovedparten af hurtigfærgerne benytter sig af at sejle med en fart væsentligt over "hump"-punktet, hvor deres fremdrivningsmodstand er moderat, og netop derfor kan man ikke reducere energiforbruget pr. sømil ved at mindske farten, *jf. Figur 1*.

⁹ opkaldt efter hydrodynamikforskeren William Froude. Flere detaljer er beskrevet i 0

Figur 1 Olieforbrug pr. sømil for HSC Max som funktion af skibets servicefart. Når farten falder under 39 knob, skal der kompenseres med ekstra afgang for at opretholde transportkapaciteten.



Ved en lavere fart mindskes transportkapaciteten pr. tidsenhed. Sænker man farten, skal man indsætte flere fartøjer, hvis der ønskes at opretholde samme transportmængde pr. tidsenhed. Halveres farten eksempelvis, skal der sættes et ekstra fartøj i drift, så det enkelte skibs olieforbrug pr. tidsenhed skal derfor multipliceres med to for at få det korrekte, korrigerede olieforbrug pr. tidsenhed. En sænkning af farten betyder for det enkelte fartøj et lavere energiforbrug, men denne reduktion modvirkes af, at der skal indsættes ekstra skibe for at få det sande billede af olieforbruget pr. sømil, jf. Bilag A, hvoraf det fremgår, at det er en ulempe at mindske farten, i hvert fald helt ned til omkring 22 knob.

Boks 3 Definition af en hurtigfærge

En hurtigfærge er det, som i IMO-regi kaldes et High Speed Craft-fartøj, jf. IMO's High Speed Craft Code 2000. Et HSC-fartøj er karakteriseret ved, at fartøjets maksimale fart er højere end flg. hastighed, målt i m/s:

$$3,7 \cdot (\text{fartøjets total skrogvolumen i m}^3)^{(1/6)}$$

For Express 4 er skrogvoluminet $2.500/1,015 = 2.463 \text{ m}^3$, idet displacementet¹⁰ er 2.500 tons, og vægfylden er $1,015 \text{ t/m}^3$

High speed craft-farten for Express 4 er $13,6 \text{ m/s} = 26,4 \text{ knob}$

Det ses af formelen for HSC-farten, at fartøjets displacement har en væsentlig indflydelse på denne fart.

¹⁰ den vandmasse, som et skib fortrænger

Sejler hurtigfærger meget langsomt, vil motorerne blive belastet negativt uden for deres normale operationsområde, hvor olieforbruget pr. kWh stiger markant, og hvor motoren på lang sigt vil slides mere end ved normal fart.

Økonomi

Ved at sejle langsommere med en hurtigfærge, ned til omkring 18 - 20 kn¹¹, kan man opnå en oliebesparelse, jf. Figur 1, men ved denne fart kan færgen ikke længere betragtes som en hurtigfærge. Opereres skibet under 22 knob, er det ikke et "high speed craft" fartøj.

En lavere tophastighed vil derfor ikke medføre et lavere brændstofforbrug så en økonomisk og klimamæssig besparelse udebliver. Det er en forskel fra Molslinjens allerede implementerede fartreduktion med oliebesparelse, hvor farten kun reduceres ved start og slut, dvs. der hvor færgen sejler forholdsvis langsom i forvejen.

Havneanlæg og forsyning

Ikke relevant, da teknologien ikke kræver ændring af hverken materiel, havneanlæg eller forsyning.

Tidshorisont

Direkte implementerbart, da det ikke kræver ændringer af materiel, færgelejer og energiforsyning.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Drivhusgasreduktionen er proportional med det reducerede brændstofforbrug. Tiltaget vil dog ikke kunne lede til klimaneutral færgedrift, hvis færgen bruger fossile brændstoffer.

Betydning for driften

Lavere fart betyder, at sejltiden øges.

Idet reduktion af farten som nævnt betyder mindre for transportkapacitet, kan det være nødvendigt at indsætte ekstra færger, såfremt tiltaget ikke skal føre til nedgang i passagerer.

Betydning for passagererne

Længere overfartstid kan gøre det mindre attraktivt for kunderne at benytte færgen og betyde, at flere vælger at køre over Storebælt i stedet.

COWIs vurdering

Hvis farten kommer så langt ned, at færgerne ikke længere vil have status som hurtigfærger, mindskes transportkapaciteten, og det kan derfor være nødvendigt at indsætte yderligere færger, hvilket ikke bidrager til den grønne omstilling.

¹¹ 33-37 km/t

Lavere fart kan umiddelbart implementeres, men idet hurtigfærgerne fortsat sejler på diesel, er der ikke tale om en langsigtet løsning i forhold til den grønne omstilling.

4.2 Færre afgang

Beskrivelse af tiltag

Rederiet kan reducere antallet af afgang og dermed reducere olieforbruget. Molslinjen har med virkning fra uge 43/2022 aflyst den sidste dobbelttur fra Aarhus kl. 20.25 og fra Sjællands Odde kl. 22.10 torsdag og fredag aften (med undtagelse af torsdag den 22. og fredag den 23. december 2022).

Udfordringer

Reduktion i antallet af afgang betyder mindre fleksibilitet for passagererne.

Økonomi

Rederiet sparer udgifter til brændstof på de aflyste afgang, men der vil til gengæld potentielt være færre passagerindtægter og dermed skal de faste omkostninger spredes på færre afgang. Færre afgang kan få afledte effekter på antallet af passagerer på andre afgang, idet nogle kunder eventuelt helt fravælger ruten som et alternativ. Det er ikke muligt at fastlægge, i hvilken grad denne effekt kommer i spil, og dermed heller ikke, i hvilken grad det påvirker økonomien for færgedriften.

Havneanlæg og forsyning

Ikke relevant, da teknologien ikke kræver ændring af hverken materiel, havneanlæg eller forsyning.

Tidshorisont

Direkte implementerbart, da det ikke kræver ændringer af materiel, færgeljer og energiforsyning.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Drivhusgasreduktionen er proportional med det reducerede brændstofforbrug, dvs. med den dieselolie, der spares ved at have færre afgang.

Betydning for passagererne

Færre afgang kan gøre det mindre attraktivt for kunderne at benytte færgen, da det mindsker fleksibiliteten. Hvis antallet af afgang reduceres meget, kan det betyde, at flere vælger at køre over Storebælt i stedet for at benytte de afgang, der tilbydes. Det er dog ikke muligt at vurdere, i hvilket omfang det reelt bliver tilfældet.

COWIs vurdering

Begrænsning til et antal afgang, som stadig kan servicere transportbehovet, kan kun bidrage i meget beskedent omfang til reduktion i drivhusgasserne og er ikke en langsigtet løsning i forhold til den grønne omstilling, da der stadig sejles på dieselolie på de resterende afgang.

4.3 HVO

Beskrivelse af tiltag

HVO¹² er et biobrændstof, som er et alternativ til konventionel diesel. HVO kan anvendes direkte i eksisterende dieselmotorer uden betydelige ændringer af motorsystemerne.

HVO kan bestå af mange forskellige biologiske råvarer, som kategoriseres som enten første- eller andengenerationsråvarer. Førstegenerations-biobrændstoffer produceres af fødevarer- og foderbaserede afgrøder, der ellers kunne benyttes til fødevarerproduktion, hvorfor produktionen står i direkte konkurrence med fødevarerproduktionen. Noget af produktionen af råvarerne sker på jord, der skaffes ved at rydde skovarealer. Derved fjernes muligheden for naturligt optag af CO₂ i disse skove og arealer, hvorfor produktionen er behæftet med markante drivhusgasudledninger. Andengenerations-biobrændstoffer er affaldsprodukter, hvorfor drivhusgasudledningerne herfra er mindre. Derfor betragtes kun andengenerations-HVO i denne undersøgelse.

Udfordringer

Produktionen af andengenerations-biobrændstoffer, herunder avancerede biobrændstoffer, er ikke skalérbar i høj grad, da der er en begrænsning på, hvor meget biogent materiale der er tilgængeligt. Derfor er udbuddet af HVO begrænset.

Økonomi

Prisen på HVO har i efteråret 2022 ligget på 20-25 kr./l. ekskl. moms, og for 2023 er den pris, der kan aftales for garanteret leverance af HVO, op til fem gange højere end prisen på marinediesel. Den har tidligere ligget lavere (ned til omkring 16 kr./l ekskl. moms). Det begrænsede udbud og en generel øget efterspørgsel efter HVO, eksempelvis fra andre transportformer, som bruger HVO for at leve op til CO₂-fortrængningskrav, leder til, at priserne kan stige. I en estimering af fremtidens energipriser med den internationale TIMES-model¹³, hvor der tages højde for udviklingen i både udbud og efterspørgsel efter en lang række forskellige energityper, herunder både fossile og ikke-fossile kilder, vil prisen på HVO¹⁴ være 75-150 pct. højere end dieselolie, som bruges i skibsfarten. Det er ikke muligt at forudsige præcist, hvor meget højere prisen vil være, da mange faktorer har betydning for udviklingen.

Ved at sejle på HVO kan der til gengæld opnås besparelser på betaling af CO₂-afgift og køb af CO₂-kvoter *jf. afsnit 3.1.1 og 3.2.1.*

Havneanlæg og forsyning

Der er ingen særlige forhold nødvendige for at kunne bunkre HVO. De samme tanke, som anvendes til diesel, kan benyttes.

¹² hydrogeneret vegetabilsk olie

¹³ Se bl.a. [IEA-ETSAP | Times](#)

¹⁴ I modellen regnes på et gennemsnit af biodiesel og ikke HVO, men det forventes, at HVO vil følge prisen på biodiesel, da de vil være nære alternativer til hinanden.

Tidshorisont

Direkte implementerbart.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Tidligere beregninger indikerede en drivhusgasreduktion ved brug af HVO i stedet for diesellole på i bedste fald ca. 90 pct. Med de nye LCA-metoder (der er under konstant udvikling i henholdsvis IMO- og EU-regi) ser det ud til, at CO₂-reduktionen ved brug af andengenerations-HVO er ca. 44 pct. i forhold til diesellole, alt efter hvilke råvarer HVO er baseret på (jf. Bilag D).

Betydning for driften

Ingen.

Betydning for passagererne

Ingen.

COWIs vurdering

Brug af andengenerations-HVO som brændstof kan bidrage til en reduktion i drivhusgasserne, men det er ikke tilstrækkeligt til at sikre en langsigtet grøn omstilling. COWI vurderer, at de tilgængelige mængder af andengenerationsbiomasse til produktionen er begrænset, og at produktionen af HVO ikke kan skaleres til at dække alle behov. Derudover er der rejst usikkerhed om, hvorvidt vugge-til-grav reduktionerne er helt så store som først vurderet, og anvendelsen derfor ikke kan sikre en fuldstændig reduktion af drivhusgasser.

Teknologien er dog direkte implementerbar og kan derfor bruges til at opnå en reduktion her og nu.

4.4 Gas (LNG og LBG)

Beskrivelse af tiltag

LNG (liquefied natural gas) er naturgas, der er gjort flydende ved, at gassen køles ned til ca. -161 °C. LNG har den fordel, at den kan transporteres over lange afstande og - ligesom diesel - ikke er afhængig af et gasforsyningsnet. Der skal dog være adgang til LNG i den pågældende havn på samme måde som for f.eks. diesel. Til gengæld har LNG den ulempe, at den skal holdes afkølet både under og mellem transporter for, at den ikke fordamper.

LBG (liquified biogas) eller flydende biogas er teknisk set det samme som LNG, men hvor det flydende metan stammer fra biogasanlæg. LNG og LBG kan bruges i samme motor og blandes undertiden sammen i forhold til, hvor mange certifikater til biogas, der købes.

Færger, som drives med gas, har et dual fuel-motorsystem.¹⁵ En dual fuel-motor kan både sejle på almindelig olie, men også eksempelvis LBG, metanol eller ammoniak. Princippet består i at en dual fuel-motor har to forskellige brændstof

¹⁵ Færgen Prinsesse Isabella sejler i dag mellem Hou og Sælvig med dual fuel-motorer på LNG og delvist på MGO.

indsprøjtningssystemer. Konkret benyttes en mindre portion (2–5 pct.) dieselolie som såkaldt pilotolie til at antænde LNG-forbrændingsprocessen.

LNG giver - sammenlignet med dieselolie - gode røggasemissionsforhold med lave NO_x-udslip, så IMO's Tier III-krav kan opfyldes uden brug af katalysatorer eller andre tekniske NO_x-reduktionsteknologier. Partikel- og SO_x-emissionerne er endvidere meget lave.

Udfordringer

Driften på en hurtigfærge er kompleks, da der skal skiftes mellem drivmidler. Dual fuel-motordrift (brug af dieselolie og LNG/LBG) byder på nogle motorrelaterede udfordringer ved reduceret fart under havnemanøvrer samt under ind- og udsejling. Her bliver man nødt til skifte fra LNG-drift til oliedrift, som medfører øget drivhusgasudslip, så der overordnet set skal benyttes diesel ud over de 2–5 pct. der bruges som pilotolie. At skifte mellem drivmidlerne på denne måde gør driften kompleks og øger risikoen for tekniske nedbrud.

Motorteknologien og opbevaringen ombord kræver omfattende konstruktionsændringer på en hurtigfærge. LNG fylder ca. 70 pct. mere end diesel, hvorfor der *kan* være en udfordring også med kapaciteten på færgerne. Da der allerede i dag optimeres med vægten på hurtigfærger, bunkres ved hver tur, så der ikke sejles med unødigt megen ekstra last. Der er derfor ikke mulighed for at kompensere ved at reducere pladskravet gennem mindre tanke og hyppigere bunkring. Der vil være en mindre vægtforøgelse på hurtigfærgen ved LNG/LBG-drift, da der er brug for tanke og systemer til både dieselolie og gas.¹⁶ Opbevaring af gas på skibet kræver særlige tryktanke og isolation, da gassen skal være nedkølet. Det *kan* være en teknisk udfordring for hurtigfærger, hvor vægten er afgørende for evnen til at have tilstrækkelig opdrift og dermed reducere vandmodstanden fra færgerne. Vægt-udfordringen ved LNG/LBG forventes at være væsentligt mindre end for andre drivmidler (se særligt afsnit 4.5 om vægtudfordringer).

Forsyning af LBG kan være en udfordring, idet der ikke findes tilstrækkelige kilder til alle sektorer, som er interesserede i at bruge LBG. Dog er forsyningen bedre end for HVO, da LBG kan produceres af flere afgrøder.

Økonomi

Det er ikke muligt at indhente konkrete oplysninger om fremtidige priser på LBG. Gas baseret på biomasse er hidtil kun opgjort som CNG/CBG (compressed natural gas/compressed biogas). Prisen på biogas til transportbehov har i 2022 ligget på omkring 15 kr./kg ekskl. moms¹⁷, men har først på efteråret 2022 været væsentlig højere. Biogas er basisinput i LBG, og prisen på LBG vil derfor følge udviklingen i prisen på biogas. Prisen på LBG bestemmes af flere komponenter, og ud over prisen på biogas skal der betales for køling og tryksætning. Denne er dog konstant, så den fremtidige udvikling i prisen antages at være

¹⁶ Systemet består af eksisterende dieselmotorsystem plus et komplet gassystem (med IMO-C tryktanke, fordampersystem, trykopybygningssystem, gasventilblokke samt ventileret dobbeltrørsystem med gasdetektorer).

¹⁷ Baseret på OK priskatalog for forskellige brændstofprodukter.

uafhængig af denne særlige komponent. Hertil skal udgiften til at holde gassen nedkølet på skibet indregnes.

Priserne på biogas har fulgt den generelle udvikling i priserne på naturgas og var i 2020 og 2021 under 10 kr./kg. Prisen på LNG har haft et lignende forløb, hvor den internationale spotpris for LNG i 2021 var på ca. 2 kr./m³, men er steget til 5,30 kr./m³ i begyndelsen af 2022 og er - efter rekordhøje priser på helt op til 28 kr./m³ - igen faldet til omkring 5 kr./m³. Til sammenligning har den internationale pris på MGO svinget mellem 2.706 kr./ton op til 9.663 kr./ton og er faldet til ca. 6.000 kr./ton.

I den internationale TIMES-model fremskrives, at merprisen for biogas i forhold til diesel i en periode frem til 2027/2028 vil være helt op til 70 pct. Den forventes at falde til omkring 20-30 pct. fra omkring 2030 og fremefter. Prisen på biogassen afhænger i den prognose af både produktion og efterspørgsel efter gassen til andre formål og de alternativer, der findes til de forskellige sektorer.

Naturgas (CNG og LNG) er en fossil gas og skal derfor betale både den danske CO₂-afgift og købe CO₂-kvoter, dvs. den samlede meromkostning pr. ton CO₂e vil være på 1.125 kr. Ved anvendelse af biogas (CBG og LBG) vil der være mulighed for at undgå køb af CO₂-kvoter, jf. certificeringsordningerne. Det er ikke klart, hvorvidt det så medfører, at minimumskravet for danske CO₂-kvoter træder i spil. Det vil i givet fald betyde en meromkostning på 1.125 kr. pr. ton CO₂e.

Havneanlæg og forsyning

Gas kan transporteres i de eksisterende gasledninger i gasform¹⁸. Men gassen skal komprimeres til LNG/LBG, før den overføres til færgerne. Det er også muligt at transportere LNG/LBG i tankbiler. Hvis der skal etableres større faste LBG-tankanlæg på havnene, kan det udgøre en større omkostning (25-70 mio. kr. afhængigt af størrelsen på de anlæg, der etableres), hvorimod mindre tankanlæg baseret på mobile tankanlæg, der enten udskiftes, når de er tomme, eller fyldes fra tanklastbiler, kan etableres relativt billigt (etcifret millionbeløb afhængig af antal tanke)¹⁹.

Tidshorisont

Det er muligt at bygge LBG-drevne hurtigfærger i dag. Det vil dog kun være relevant i forbindelse med kontrahering af ny færge, som kan sejle på LNG/LBG (og dermed ikke ved retrofit af eksisterende færger), da konstruktionen af færgen vil være væsentlig forskellig fra de eksisterende dieselfærger.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Den største andel af LNG og LBG er metan. Brug af LNG er ofte forbundet med

¹⁸ Fjord Lines færger forsynes via et anlæg uden for Stavanger (Norge). Fra fabrikken transporteres brændstoffet via et underjordisk rør ind i skibene.

¹⁹ Jf. Green Cruise Port "Business case for LNG for Cruise Vessels." Port of Esbjerg, 7. June 2018

et metanudslip, hvilket har en negativ indflydelse på det overordnede drivhusgasaftryk, grundet metanens meget høje drivhuspotentiale (Global Warming Potential, GWP), som er 28 gange større end for CO₂²⁰. Dette modvirker ofte den lavere direkte drivhusgasreduktion ved brug af LNG i stedet for dieselolie²¹.

Drivhusgasreduktionen ved LBG er højere end ved LNG. Beregninger efter vugge-til-grav-metoden viser en drivhusgasbesparelse på 80 pct. ved brug af LBG sammenlignet med dieselolie. I en anden LCA-beregning vurderede COWI, at drivhusgasreduktionen ved brug af LBG er ca. 130 pct. sammenlignet med fossilt brændstof²². Endvidere undersøgte COWI konsekvenserne ved metanudslip i distribution og anvendelse af LBG. Analysen viste stadig en drivhusgasreduktion på 128 pct., når der tages hensyn til metanudslippet, hvorfor COWI vurderer, at metanudslippet ikke er en stor udfordring ved denne teknologi.

Betydning for driften

Ingen

Betydning for passagererne

Ingen

COWIs vurdering

COWI vurderer, at LNG ikke er et relevant drivmiddel i den grønne omstilling, da der ikke kan opnås klimagevinster herved.

LBG vil reducere drivhusgasemissionerne mere end LNG (efter vugge-til-grav opgørelsen), mens driftsomkostningerne samt konstruktions- og driftsimplicationerne er større end for diesel. Reduktionen af drivhusgasserne afhænger også af om pilotolien er fossilfri eller emissionsfri (jf. f.eks. afsnit 4.3 om HVO).

Molslinjen vurderer, at gas ikke er en løsning i hurtigfærger, da anvendelsen af gas øger kompleksiteten på driftsområdet. Det skyldes, at der skal benyttes diesel til dele af driften, både som pilotolie og ved manøvrerne i havnen. Herudover ser Molslinjen store udfordringer med de nødvendige konstruktionsændringer, der skal laves på hurtigfærgerne for at kunne benytte LNG/LBG og den øgede vægt og volumen herved. COWI er enig i denne vurdering.

4.5 Elfærge med batteri

Beskrivelse af tiltag

Færger med elmotor og batteri, som oplades i havn.

²⁰ Det svarer til GWP over 100 år. For en kortere tidshorisont er GPW fra metan betydeligt højere, svarende til eksempelvis 84-87 CO₂-ækvivalenter over 20 år.

²¹ jævnfør 6Bilag D, hvor en LCA-beregning under de nyeste retningslinjer til metode i IMO- og EU-regi fremgår

²² Besparelsen ligger delvis i landbrugssektoren, hvorfor tallet er over 100 pct.

I farvandene i og omkring Danmark sejler nu 4 færger, som er 100 pct. batterifærger, *jf. Tabel 3*.

De to store skibsproducenter, der bygger hurtigfærger, har begge lanceret en elektrisk drevet prototype på en hurtigfærge²³.

De fuldt elektriske danske færger er følgende:

- > TYCHO BRAHE på Helsingør–Helsingborg-ruten. Ombygget til fuldelektrisk drift i 2018 via retrofit.
- > AURORA AF HELSINGBORG på Helsingør-Helsingborg-ruten (søsterskib til TYCHO BRAHE og oprindeligt fremdrevet med dieselektrisk maskineri). Begge færger overgik i 2018 til fuldelektrisk drift via retrofit.
- > ELLEN på Søby–Fynshav-ruten, sat i drift i 2019.
- > GROTTTE på Esbjerg–Fanø-ruten, sat i drift i 2021.

De nævnte færger og ladeanlæg har været berørt af en række problemer som følge af den nye relativt uprøvede teknologi, der er anvendt. Eksempelvis har de to færger på Helsingør–Helsingborg-ruten i flere omgange – i længere perioder – ikke været i stand til at sejle ved brug af batterier – bl.a. på grund af problemer med robotterne med automatisk opladning, som har voldt problemer. I disse kritiske perioder har skibenes oprindelige dieselektriske maskineri været anvendt, så man har undgået driftsstop.

Tycho Brahe har fået skiftet det oprindelige batterisystem og er i den anledning blevet opgraderet, så batterikapaciteten er blevet øget ca. 50 pct., dog med en næsten uændret vægt, så batterierne med 50 pct. større kapacitet faktisk er lidt lettere end de første batterier på de to færger. Dette viser en øget batterieffektivitetsforbedring på blot 4 år, *jf. Tabel 3*.

²³ Hhv. Austal's VoltaExpress og Incat's Electric CVP 2099 skrog.

Tabel 3 Batteridata for el-færger i Danmark

Færge	Batteri-fabrikat	Bat-teri-vægt	Kapa-citet	Energi-densi-tet
		tons	kWh	kg/kWh
TYCHO BRAHE (1. generation batterier)	SPBES (SHIFT)	57,0	4160	13,7
TYCHO BRAHE (2. generation batterier)	Corvus Dolphin	52,0	6345	8,2
AURORA af Helsingborg (1. generation batterier)	SPBES (SHIFT)	57,0	4160	13,7
AURORA af Helsingborg (2. generation batterier)	SPBES (SHIFT)	69,7	4800	14,5
ELLEN	Leclanché	54,3	4401	12,3
GROTTE	Corvus Orca	15,23	1107	13,8
Gennemsnit				12,7

Færgeren ELLEN har også været ramt af forskellige tekniske vanskeligheder siden indsættelsen, og man har derfor udskiftet batterier løbende.

Der er flere parametre, der skal tages hensyn til ved dimensionering af batterikapacitet, f.eks.:

- > Antal opladninger pr. dag
- > Batteriernes forventede levetid
- > Specifikke forhold vedr. den anvendte batteritype
- > Ladetid
- > Ladeeffekt

Ovennævnte parametre er årsag til individuelle forhold vedr. batteripakkerne for de nævnte færger. Det ses, at gennemsnitsvægten for de 4 færger er 12,7 kg/kWh med en variation på 8-14 kg/kWh. Alle batterileverandører er enige om, at batterivægten vil falde de kommende år. Teknologiuudviklingen for batteri og ydelse er forbundet med usikkerheder. Efter en række sonderinger hos leverandører, i faglitteraturen samt efter kontakt til DTU²⁴ forventes en specifik vægt på ca. 5 kg/kWh, i perioden 2025–30. Batterivægten forventes at falde efter 2030. Det er for nuværende ikke muligt at angive mere nøjagtige estimater for den fremtidige batterivægt, da nye batterityper forventes at se dagens lys.

Udfordringer

Med dagens batteriteknologi på omkring 10 kg/kWh bliver batterivægten stor, især hvis sejlafstanden er lang og energiforbruget er højt. For hurtigfærger er batterivægten således et problem, da lastkapaciteten reduceres markant, og det ikke ville være muligt at medtage det samme antal biler. For eksempel forventes batterivægten for hurtigfærgerne på Kattegatruten med dagens teknologi at ligge på ca. 550 tons, som skal holdes op imod, at færgerne i dag er lastet med

²⁴ Professor Chresten Træholt, Sektion Power-to-X og Lagring, Division for Power og Energisystemer, Institut for Vind og Energisystemer

ca. 30 tons brændselolie. Frem til 2025 vil denne vægt formentlig halveres, men det er nok først efter 2030, at batterivægtene er kommet så langt ned (til ca. 2 kg/kWh), at en batteriløsning er inden for en teknisk realistisk rækkevidde, jf. Bilag C.

Hertil kommer, at opladningshastigheden vil være en udfordring. Specifikt for Kattegatfærgerne skal der overføres ca. 35 MWh på maksimalt 30 minutter eller mindre afhængigt af opholdstiden i havn. Herudover er ladeinfrastrukturen i havnene ikke til stede endnu, hvorfor der kan være udfordringer med at få en tilslutning med tilstrækkelig kapacitet.

Det kan overvejes at ombygge en eksisterende dieselfærge til elfærge (retrofit). COWI vurderer dog, at den teknologiske løsning er behæftet med ulemper, der vil være umulige at imødekomme. Det skyldes, at olietankene skal nedlægges og erstattes af dedikerede rum til batteripakker. Fjernelsen af tunge dieselmotorer, der skal erstattes af lettere elmotorer, skal sammenholdes med placeringen af tunge batteripakker og andet elektrisk kontroludstyr, som vil medføre store vægtmæssige forandringer, der vil få en væsentlig indflydelse på skibets vægtbalance, som vil påvirke trimmet i ugunstig retning.²⁵

Økonomi

Den største meromkostning sammenlignet med dieseldrevne færger er udgiften til batterierne. Batterierne forventes også at skulle udskiftes et antal gange under færgens tekniske levetid. Prisen på batterier forventes at falde de kommende år. I bl.a. Energistyrelsens teknologikatalog fremskrives prisen til 476 kr./kWh (70 USD/kWh) i 2030.²⁶ I 2021 lå prisen på ca. 880 kr./kWh (130 USD/kWh) for lithium-ion batterier (International Energy Agency). Baggrunden for disse tal kendes ikke eksakt, men tallene virker lave, når der sammenlignes med de priser, som producenterne af elfærger oplyser. Derfor er der for dette projekt indhentet aktuelle batteripriser fra forskellige batterileverandører for at få realistiske batteripriser med dagens teknologi, som rettes imod skibsfarten. Disse priser ligger på knap 4.080 kr./kWh (600 USD/kWh) for kun batterierne. Lægger man dertil prisen for den nødvendige elektronik, der skal installeres i forbindelse med batteripakken, nærmer prisen sig ca. 4.760 kr./kWh (700 USD/kWh). Udvikling i batteripriserne kan dog forventes også at gælde her, selv om udgangspunktet er noget højere end batteripriserne forudsat af Energistyrelsen.

Udover høje batteriomkostninger kommer omkostninger til ladeinfrastrukturen. Det koster 1.160 kr. i tilslutningsafgift at få lagt 1 ampere mere strøm ind. Hertil kommer udgiften til kabler, transformere, ladeudstyr mv. Priserne på ladestanderer er ikke kendt i forhold til det konkrete behov for hurtigfærgerne. DTU Elektro benytter en gennemsnitspris på 1.000 kr. pr. kWh, som laderen skal levere, dvs. at hvis der skal etableres en 70 MW lader, koster den cirka 70 mio. kr. at

²⁵ Det er ikke en generel udfordring for retrofit. Eksempelvis var der ingen vægtmæssige udfordringer ved ombygningen af færgerne mellem Helsingør og Helsingborg, blandt andet fordi designet af færgen allerede på projektstadiet havde sikret tilstrækkelig ekstra dødvægt.

²⁶ Med en dollarkurs på 6,80 kr./USD.

etablere. Der er dog stor usikkerhed om dette tal. Det kan være både billigere og dyrere end det niveau, men udviklingen i teknologi kan betyde faldende priser på disse ladere. Den samlede omkostning til tilslutning og lader kan derfor komme til at ligge i størrelsesordenen 150 millioner kr.

Sejlads på strøm er ikke forbundet med CO₂-udledninger, så der skal hverken betales CO₂-kvoter eller betales dansk CO₂-afgift.

Havneanlæg og forsyning

Der skal være tilstrækkelig kapacitet i energinettet til at håndtere den meget store effekt ved ladning. Den tilgængelige elinfrastruktur er for nuværende varierende i Danmark. Nogle havne har kun lavvoltsystemer tæt på færgelejet, dvs. 400 Volt, mens andre havne er forsynet med højspændingssystemer på eksempelvis 10 kV, som er en fordel for at mindske ladetiden og diverse elektriske tab. En central forudsætning er adgang til transformerstationer med tilstrækkelig kapacitet. I Aarhus er der fra færgelejet 1,6 km til nærmeste 60kV transformer med en 32 MW kapacitet, hvorimod der fra færgelejet på Sj. Odde er 14 km til nærmeste 50kV transformer. Det vil derfor være nødvendigt at trække kabler til området, hvilket er med til at fordyre udgiften ved omstilling til eldrift. Hertil kommer, at transformerstationerne skal udbygges for at kunne levere den nødvendige kapacitet.

Helt overordnet vil ladefaciliteterne til så store energimængder, der her vil blive tale om, blive en stor teknisk udfordring, som der ikke her redegøres for i detaljer, og som i øvrigt vil ændres de kommende år, når der indhentes langt mere erfaring på maritimt batteriforbrug.

Tidshorizont

Førend færgen kan bestilles på et værft, skal den designes ud fra en række nærmere fastsatte specifikationer, f.eks. hvor mange passagerer og køretøjer, der skal kunne fragtes.

Tidshorizonten for bygning af en elfærgen er mindst 2-3 år fra kontrakt til levering.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Der er potentiale for en reduktion på 100 pct. fra vugge-til-grav, hvis færgen lades med vedvarende energi.

Betydning for driften

Der vil være et mindre støjniveau og færre vibrationer ombord i forhold til dieselmaskineri.

Yderligere påvirkninger for driften kommer an på, hvorvidt ladehastigheden passer sammen med på- og aflastning af passagerer og køretøjer.

Betydning for passagererne

En elfærgen har et mindre støjniveau og en mere stabil sejlads, hvilket er til gavn for passagererne.

COWIs vurdering

Med den nuværende batteriteknologi er det ikke muligt at installere batterier med tilstrækkelig kapacitet og drive en hurtigfærge udelukkende hermed, hvorfor det ikke er relevant at overveje denne mulighed på nuværende tidspunkt. På længere sigt (efter 2030) kan nye batteriteknologier komme på banen, der reducerer batterivægten tilstrækkeligt til at hurtigfærger kan omlægges til batteridrift. Samtidig skal elforsyningen bygges ud markant for at sikre tilstrækkelig ladekapacitet.

4.6 Elfærge med flywheel

Beskrivelse af tiltag

Et flywheel er en klassisk mekanisk indretning, som kan bevare kinetisk energi i form af rotation over kortere eller længere tid som erstatning for batterier. Et flywheel sættes i omdrejninger ved hjælp af en elektromotor – op til ca. 60.000 RPM (RPM = omdrejninger per minut). Den elektriske energi, der tilføres drivmotoren, skal styres af groft sagt samme elektronikstyring, som anvendes ved opladninger af batterier.

Med et flywheel erstattes en kemisk baseret batteriteknologi af en mekanisk teknologisk løsning. Når energien i et flywheel skal benyttes, udtages energien fra flywheeleet via en generator (samme enhed, som kan operere som motor til ovennævnte energiopladning). Store energimængder kan udtages på meget kort tid, hvilket er et af de meget karakteristiske træk ved teknologien. Et flywheel er lejret i magnetiske lejer, og det er anbragt i et vakuum, hvilket medvirker til meget lavt energitab på ca. 2 pct.

Status på teknologien

Så vidt vides er teknologien på nuværende tidspunkt ikke udbredt i transportsektoren på verdensplan, men den bruges til andre typer ikke-mobile energilag-ringsanlæg af forskellig karakter, hvor energien f.eks. lagres, når strømmen er billig, og kan bruges, når den er dyr.

Firmaet WattsUp Power har siden 2014 arbejdet på teknologien, som fortsat er under udvikling til brug for skibsfart.

Molslinjen har i november 2022 købt sig ind i WattsUp Power. En testenhed med 250 kWh flywheels vil i første omgang blive monteret på færgen Express 4, hvor de nye flywheels skal levere strøm til skibets enkelte systemer, og teste, om de påvirkes af færgens bevægelser. Første skridt mod en godkendelse bliver en test på Fyn, som skal vise, om de teoretiske beregninger holder i praksis.

WattsUp Powers største flywheel er ifølge deres egne oplysninger på 100 kWh. Molslinjen har oplyst, at de svinghjul, de udvikler sammen med WattsUp Power, forventes at kunne lagre 500 kWh i en 1.200-1.400 kg svinghjulsenhed, svarende til 2,6 kg/kWh, se også *Bilag C*.

Ifølge faglitteraturen og kontakt til DTU²⁷ er størrelsen af flywheel i forskningsmæssige projekter samt kommerciel anvendelse for nuværende langt mindre, end de enheder WattsUp Power forventer at kunne udvikle. Energidensiteten afhænger meget af de valgte materialer.

Der kan være vægtfordele ved flywheel-teknologien sammenlignet med batterier, se *Bilag C*. Når energien er opladet i et flywheel, vil man efterfølgende kunne udnytte energien fra 100 pct. og ned til ca. 15 pct., hvilket er en fordel i forhold til en batteriladeløsning²⁸.

Udfordringer

Flywheel-teknologien er en kendt teknologi, men den benyttes på nuværende tidspunkt ikke til skibsfart, hvorfor der ikke er konkrete erfaringer om, hvordan teknologien skal implementeres på en hurtigfærge²⁹. De mange ubekendte kan give en række tekniske og sikkerhedsmæssige udfordringer, som ikke kan vurderes på forhånd. Teknologien skal derfor testes bl.a. med henblik på eventuelle sikkerhedsrisici, da risikoen for uheld med flywheel ikke er fuldt afdækket, og teknologien ikke er testet på skibe i bevægelse. Når teknologien er færdigudviklet og testet i forhold til skibsfart, skal den herefter godkendes af relevante myndigheder.

Vægten af et flywheel kan give udfordringer med transportkapaciteten, dvs. opnåelse af tilstrækkelig dødvægt. Selv om et flywheel ville kunne være en lettere løsning end et batteri, er vægten stadig forholdsvis stor og større end drift med f.eks. LBG.

Økonomi

For nærværende er der endnu ikke oplysninger om omkostninger forbundet med anskaffelsen af flywheels. Yderligere overvejelser fra Molslinjen vedrørende investeringer og driftsomkostninger fremgår i afsnit 5.2.

Ved sejlads på strøm udledes ikke drivhusgasser, så der skal hverken indkøbes CO₂-kvoter eller betales dansk CO₂-afgift.

Havneanlæg og forsyning

Flywheels har de samme forsyningsmæssige udfordringer som ved batterier (jf. *afsnit 4.5*), dvs. det skal sikres, at der er højspændingsforbindelser i størrelsesordenen 50 kV med de komplikationer, der tidligere er beskrevet i den forbindelse. I lighed med drift på batterier kan der etableres en energibank (et batteri eller et landbaseret flywheel), der oplades med en lavere effekt. Det kan reducere behovet for kapaciteten i elnettet.

Tidshorisont

²⁷ Se eksempelvis Xiaojun Li, Alan Palazzolo (2022): A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities

²⁸ et batteri skal mest optimalt opereres fra 80 pct. af maksimal opladning og ned til 20 pct. opladning, så man dermed kun i praksis kan anvende 60 pct. af batteriets kapacitet

²⁹ Med DTU er drøftet, at teknologien har mange ubekendte ift. skibsfarten, som gør den meget usikker.

Idet flywheel-teknologien til skibsfart stadig er under udvikling, er tidshorisonten ikke kendt.

Molslinjen forventer dog, at teknologien muligvis kan være i drift inden for ca. 5 år.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Op til 100 pct. reduktion fra vugge-til-grav, hvis der er nok vedvarende energi tilgængelig.

Betydning for driften

Driften vil afhænge af, hvor meget energi der kan overføres, men Molslinjen forventer, at store energimængder kan udtages på meget kort tid. De vurderer, at teknologien er så tilstrækkeligt udviklet, at det er muligt at installere flywheels på de nuværende hurtigfærger. Det vil dog foreløbigt kun være de elektriske systemer om bord, der vil blive drevet af strøm fra flywheelet, mens sejladser fortsat vil være på diesel. Ved større ombygninger eller indkøb af nye færger vil hele driften foregå på strøm, men vil afhænge af, at der sikres adgang til tilstrækkelige mængder energi på havnen.

Betydning for passagererne

En færge, der drives med flywheel, vil have et mindre støjniveau, hvilket vil være til gavn for passagererne.

Det er usikkert, hvorvidt brugen af flywheel kan betyde vibrationer ombord på færgen. Det vil være et sigte at få dette afklaret med Molslinjens forsøg med flywheel på Express 4, som forventes gennemført i 2023.

COWIs vurdering

Flywheelet vil sikre fuld reduktion af drivhusgasserne., Det er usikkert, om og hvornår den kan være i drift på hurtigfærgerne, herunder afklaring af vægtudfordringen og en formel godkendelse af teknologien til brug i skibsfarten. Hvis udfaldet af de test, der skal gennemføres, er positivt, kan teknologien være relevant ved fremtidig elektrisk drift på færger inkl. hurtigfærgerne.

Molslinjen vurderer:

Det forventes, at hurtigfærgerne Express 3 og 4 på Kattegat kan ombygges til flywheel. Tidshorisonten for ombygningen er under 5 år.

4.7 El-hybrid

Beskrivelse af teknologien

En el-hybridfærge er en færge, hvor fremdrivningsmotorerne er elmotorer som på en ren el-færge. Strømmen til elmotorerne leveres dels fra batterier og dels fra ét eller flere dieselgeneratorsæt. Man kan dimensionere et sådant anlæg in-

dividuet, enten med en stor batterikapacitet og en mindre dieselgeneratorkapacitet, eller med en begrænset batterikapacitet og en relativ stor dieselgeneratorkapacitet.

Et eksempel er ruten Rødby-Puttgarden har siden 1997 været besejlet med fire søsterfærger, der alle oprindeligt er konstrueret som dieselelektriske færger, men som siden 2013 gradvist har fået installeret flere og flere batterier, så de i dag sejler som hybridfærger.

Udfordringer

Et anlæg med en relativt stor batterikapacitet vil møde de samme vægtmæssige udfordringer som en ren elfærge med relativt tunge batterier inden for den nærmeste tidshorizont på 10 år. Dertil skal lægges vægten af de dieseldrevne generatorsæt, som forværrer de vægtmæssige udfordringer, og gør løsningen meget lidt attraktiv/umulig for en hurtigfærge, hvor vægten er en altafgørende parameter.

Hybridfærger har været anvendt i flere år på Rødby-Puttgardens færger med succes, da man benytter systemet til at opnå en optimal belastning af dieselgeneratorsættene. Løsningen fungerer godt på netop disse færger, da de har tilstrækkelig dødvægt og ikke opererer som hurtigfærger, og derfor ikke har vægtfølsomhedsproblemer. Det betyder også, at man konceptuelt ikke kan sammenligne disse færgers operationsmønstre med en typisk hurtigfærges sejlads mønstre, og de indvundne fordele på Rødby-Puttgarden vil ikke kunne indhøstes med en typisk hurtigfærge på Kattegatforbindelsen.

Økonomi

Den konkrete økonomi ved hybridfærger er ikke vurderet. Omkostningerne vil afhænge af, hvor stor en del af driften, der skal ske på batteridrift. En hybridfærge vil have omkostninger til både dieseltanke og batterier samt udstyr til at drive færgerne både med diesel og med el.

Havneanlæg og forsyning

Kræver anlæg af ladeinfrastruktur, hvis færgen skal oplades i havnen. Se afsnit 4.5 for en beskrivelse af udfordringer med infrastrukturen.

Tidshorizont

Der er forskellige former for hybridfærger i drift allerede. Det vil være muligt at bestille en hybridhurtigfærge, når nuværende færger skal udskiftes. Det vil dog være færger med begrænset batterikapacitet på grund af vægtudfordringen og dermed begrænset effekt på drivhusgasudledningerne. Det vurderes ikke muligt at indsætte hybridfærger selv på længere sigt, med en større andel batteridrift da vægten på batterierne, dieseltanke og generatorer vil give for stor vægt til at kunne anvendes på hurtigfærger.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Det afhænger af, hvilke brændstoffer der kombineres og i hvilke forhold. Jo større andel af grøn strøm, jo større vil reduktionen være. Hvis kombinationen

er med andre fossilfrie alternativer, kan reduktionspotentiallet komme i nærheden af 100 pct. Bemærk at eldriften vil være emissionsfri i transportsektoren efter FN's opgørelsesmetode, uanset emissioner fra elproduktionen.

Betydning for driften

Ingen

Betydning for passagererne

Ingen

COWIs vurdering

Med den nuværende batteriteknologi er det ikke muligt at installere batterier med tilstrækkelig kapacitet og drive færgen udelukkende hermed. En kombination af flere teknologier gør færgerne tungere og vil udfordre hurtigfærgeteknologien, jf. afsnit 4.4 og 4.5. Hybridløsninger, hvor batterier benyttes til energilagring, vurderes ikke som relevante at overveje på nuværende tidspunkt.

4.8 Power-to-X

Power-to-X (PtX) er en teknologi til at producere brændstoffer, som er relevante for skibsfarten. En nærmere beskrivelse kan læses i *Boks 4*.

Boks 4 Faktaboks om Power-to-X fra Energistyrelsens hjemmeside

Power-to-X (PtX) dækker over en række teknologier, som alle tager udgangspunkt i, at strøm udnyttes til at fremstille brint.

I Danmark taler man om Power-to-X. I udlandet kalder man det grøn brint eller "electrofuels" ("e-fuels"), men begge begreber beskriver den proces, hvor strøm og vand bliver lavet om til brint gennem elektrolyse. Brinten kan bruges direkte i fx lastbiler, færger eller industrien, men kan også viderekonverteres til andre brændstoffer.

Viderekonverteringen kan ske med kvælstof fra luften for at producere ammoniak eller med CO₂ for at producere brændstoffer som metanol eller flybrændstof. CO₂en kan fx komme fra biogasanlæg eller opsamles fra kraftvarmeværker, affaldsforbrænding eller industrien, og kan både anvendes til PtX (Carbon Capture and Utilization - CCU) eller deponeres i undergrunden (Carbon Capture and Storage - CCS).

Energistyrelsen vurderer, at PtX er en væsentlig brik i at opfylde regeringens 70 pct. målsætning i 2030, men særligt frem mod klimaneutralitet i 2050, hvor PtX-brændstoffer kan benyttes til at omstille dele af transportsektoren særligt inden for luftfart, søfart, den tunge vejtransport, landbruget, industrien osv.

Danmark har en lang række virksomheder, der står klar med teknologi og ekspertise på tværs af hele PtX-værdikæden. Samtidig har vi store ressourcer inden for vedvarende energi (VE). Resten af Europa har også fået øjnene op for grøn brint og PtX, og der opstår store markeder i vores nabolande frem mod 2030 og 2050. Derfor er der store erhvervs- og eksportpotentialer i PtX-området for Danmark.

Denne rapport fokuserer på brint, e-metanol og e-ammoniak som drivmidler til hurtigfærger.

Ca. 75 pct. af den nuværende brintproduktion er baseret på naturgas (kaldet grå brint), mens den resterende mængde er baseret på kul (kaldet brun brint), og

dermed er produktionen ikke CO₂-neutral. Brint produceret gennem PtX-processen kaldes grøn brint og regnes som CO₂-neutral, såfremt der kun bruges vedvarende el (herunder atomkraft). Her er det en udfordring, at udbygningsplanerne for vedvarende energi og for produktionsanlæggene til brint og PtX produkterne er langsigtede. Mange aktører vil de kommende år have behov for meget store mængder vedvarende energi, og der bliver derfor stor efterspørgsel efter den udbudte energi.

En yderligere udfordring for alle PtX-drivmidler, som omtales i rapporten, er, at PtX-processen er meget energiintensiv. For at producere en given energimængde PtX-brændstof skal der anvendes ca. to til fire gange mere elektricitet i forhold til en batteribaseret energiforsyning. Derfor vil prisen for PtX-drivmidler forventes at være væsentligt større end en ren elbaseret løsning.

4.8.1 Brint

Beskrivelse af teknologien

Brint kan anvendes i brændselsceller, men også i en forbrændingsmotor.

For enkelte mindre færger anvendes brint allerede, da der ikke er behov for at have så meget brint til rådighed på en kort tur, at påvirker driften. For hurtigfærger med en længere distance vil brinten fylde meget, hvilket gør det urealistisk at anvende brint idet kapaciteten på færgerne reduceres væsentligt.

Udfordringer

Brændselscelleteknologien leverer for nærværende kun brændselsceller på maks. 200 kW pr. enhed, som giver en udfordring i forhold til vægt og volumen, da der vil være brug for mange brændselsceller pr. færge, hvor hver celle vejer omkring 1 tons. For hurtigfærgerne, der skal sejle langt, vil antallet af celler, der skal være om bord give så stor en vægtforøgelse, at det gør brint som brændstof mindre egnet til hurtigfærger.

Opbevaringen af brint kan medføre udfordringer. Alt efter om brint skal være i gas eller flydende form skal den tryksættes og nedkøles. Ved et lavere tryk fylder brint mere. Selv når brinten holdes kold og er under højt tryk i trykbeholdere³⁰, vil det stadig fylde meget for at have det energiindhold, som er nødvendig for at drive færgerne. Netop for fremdrivning af en hurtigfærge med et relativt højt energiforbrug betragtes brint overordnet set ikke som en realistisk løsning, da netop hurtigfærger har volumenproblemer i relation til opbevaring af brændstof.

Ud over det store volumenkrav til opbevaring af brint på skibe, er der også en række sikkerhedskrav til opbevaring og transport af brint. Det skal blandt andet sikres, at en ordentlig infrastruktur er til stede i de forskellige havne, hvilket kan være en stor forhindring for udbredelsen. Bunkringstiden med brint er høj, både ved flydende form og komprimeret form set i relation til den relative korte tid

³⁰ Opbevares under tryk op til 800 bar ved stuetemperatur. Alternativt nedkøles det til -253 grader ved atmosfære tryk.

hurtigfærgerne ligger i havn. Bunkring vil forfor en fyldning af 2.000 kg brint-brint ligge på ca. 15 timer³¹, hvilket er en direkte forhindring i forhold til behovet for kort turn around-tid i havn for selve hurtigfærgekonceptet.

Tillige medfører brug af brint, at der opretholdes en høj sikkerhed, da brint er meget brandfarligt. Der er en betydelig sikkerhedsrisiko, og regler for brug i skibsfarten er ikke fastlagt endnu. Brint eksploderer ved stort set alle blandingsforhold, og tændingsenergien er lav.

Økonomi

Det har ikke været muligt at vurdere omkostninger og økonomi ved at bygge brintdrevne hurtigfærger.

Havneanlæg og forsyning

Der er ikke indhentet konkret information herom. Det er dog lige kommet frem, at det tager cirka en måned at bunkre Norges første brintdrevne færge MF Hydra.³² Ovenstående beregning peger dog på væsentlig lavere, men dog lange bunkringstider for en hurtigfærge på størrelse med kattegatfærgerne.

Tidshorisont

Den norske brint-drevne passagerfærge MF Hydra blev indsat i drift den 31. marts 2023. Der er mange ubekendte forbundet med ibrugtagningen. Selv om brændselscelleteknologien og brintproduktion er kendt, er udsigten til, at teknologien er klar til at blive anvendt i hurtigfærger, lang. COWI vurderer ikke, at det bliver en mulig løsning før 2030-2035.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Hvis brinten produceres af vedvarende energi (eller atomkraft), vil brint kunne fjerne alle drivhusgasudledningerne.

Der bemærkes, at nedkølingen af brint, så den bliver flydende, er en meget energikrævende proces. Det kan være kontraproduktivt, når energien, som bruges dertil, ikke er vedvarende og man ønsker at reducere CO₂.

Betydning for driften

Den nuværende tid til bunkring vil umuliggøre en opretholdelse af normal drift. Det kan endnu ikke vurderes, hvilke andre eventuelle effekter brint vil have for driften af hurtigfærger.

Betydning for passagererne

Der kan være en begrænsning i muligheden for at bunkre, mens der er passagerer om bord. Der er ikke endnu lavet regler for, hvordan brint skal håndteres i

³¹ COWI beregning pga. Dual Ports rapport fra 2019, Feasibility of hydrogen bunkering (fortrolig): <https://northsearegion.eu/dual-ports>. 2.000 kg. brint vil give den mængde energi, der skal til at drive Kattegatfærgerne.

³² Bunkringstid for ny, norsk brintfærge: https://www.soefart.dk/article/view/885546/bunkringstid_for_ny_norsk_brintfaerge_en_maned Bunkringstid for ny, norsk brintfærge: https://www.soefart.dk/article/view/885546/bunkringstid_for_ny_norsk_brintfaerge_en_maned En måned - Søfart (soefart.dk)

forbindelse med færgedrift. Det er derfor for tidligt at vurdere om dette vil være en reel udfordring, og derfor også om der vil være en påvirkning for passage-erne.

COWIs vurdering

Pga. de beskrevne volumenproblemer, vægtudfordringer og bunkringsudfordringer er det ikke realistisk at betragte brint som en løsningsmulighed i forhold til den grønne omstilling af hurtigfærgerne på nuværende tidspunkt.

4.8.2 E-metanol

Beskrivelse af tiltag

Flere motorfabrikanter fremstiller i dag forbrændingsmotorer som dual fuel-motorer til dels at kunne sejle på ren dieselolie, dels at kunne anvende e-metanol som brændstof. Der er brug for et dual fuel-motorsystem, da dieselolie (eller tilsvarende, f.eks. HVO) bruges som pilotbrændstof, dvs. der bruges en mindre procentdel diesel til at antænde metanolen (2–5 pct.).

E-metanol produceres ved at kombinere brint fra elektrolyse med kulstof. De første PtX-anlæg forventes at kunne levere e-metanol tidligst i 2024.

Udfordringer

Skibet har lidt øget egenvægt på grund af et dual fuel-motorsystem med tanke til både e-metanol og dieselolie. Herudover kræver skibet mere tankkapacitet på grund af mindre energiindhold pr. liter brændstof³³ sammenlignet med dieselolie. Vægtforøgelsen for den nødvendige e-metanol er derfor omkring dobbelt op i forhold til diesel. Dertil kommer, at der, ud over den dobbelte tankkapacitet, kræves andre tanke end de almindelige dieselolietanke, da der skal indbygges (en ekstra volumenkrævende konstruktion omkring tankene). Der skal desuden installeres skrog-separate rustfrie ståltanke, da metanol og aluminium reagerer kraftigt med hinanden. Den større volumen og pladsbehov til tankene reducerer kapaciteten på færgerne.

For at være et drivmiddel uden signifikante drivhusgasudledninger efter VE II-direktivet skal e-metanol produceres med CO₂ fra en biogen kilde fra 2036. Certificeret biogen CO₂ kan blive en mangelvare i fremtiden. Dette kan drive prisen på metanol yderligere op. Derudover er indfanget CO₂ via Direct Air Capture (DAC) en dyr og energitung proces.

Økonomi

Det er ikke muligt at give oplysninger om prisen på en metanolfærge, da der på nuværende tidspunkt er for mange usikkerhedsfaktorer, specielt i relation til tankplacering og layout af færgen samt indflydelse på selve skrogstrukturen. I

³³ E-metanol har en energitæthed på 16 MJ/L, hvor diesel har en tæthed på 38,3 MJ/L. Dvs. tankene skal være op mod 2,4 gange større for at have den samme mængde energi med.

afsnit 5.3 gengives nogle omkostningsovervejelser baseret på bl.a. Mærsk bestilling af metanoldrevne skibe, hvor en meromkostning på 15 pct. i forhold til et dieselskib nævnes.

Havneanlæg og forsyning

Det er usikkert, om eller nærmere hvornår e-metanol kan produceres i tilstrækkelig grad. Det kommer i høj grad an på carbon capture-teknologien og muligheder og adgang til certificeret biogen CO₂ samt den internationale udvikling i produktionskapaciteten.

I forhold til havneinfrastruktur er metanol underlagt Seveso III-direktivet³⁴, men bunkring foregår allerede i eksempelvis Göteborg havn, hvorfor det ikke vurderes at være en betydelig udfordring.

Tidshorisont

Motorteknologien er allerede på markedet. Forsyning med e-metanol forventes tidligst i 2024., men færgerne kan sejle på fossilt baseret metanol, som dog ikke giver en drivhusgasreduktion. Der er en lang række udviklingsprojekter i gang mange steder i verden med fokus på at producere e-metanol. Det er ikke muligt at afgøre i hvilken grad der vil være tilstrækkeligt udbud hvis hurtigfærgerne omstilles tidligt til metanol. I sidste ende vil det afspejles i prisen på brændstoffet og på de alternativer, der forventes på markedet som f.eks. e-ammoniak.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Der kan være op til 95 pct. mindre udslip af drivhusgasser for e-metanol i følge de seneste LCA-beregningsprincipper fra IMO og EU. Hvis der anvendes diesel i forbindelse med tænding (pilotfuel) af dual fuel-motorsystemet, vil der dertil være en udledning. I tændingen af dual-fuel-motorsystemet kan dog også anvendes HVO eller e-diesel som vil være klimaneutralt.

Betydning for driften

Lastning og bunkring kan muligvis ikke udføres simultant. Det tager længere tid at bunkre på grund af lavere energitæthed af e-metanol sammenlignet med diesellole. Mængden af energi, der bunkres for hver tur, er tilpasset, så hurtigfærgerne ikke skal sejle med mere vægt end nødvendigt. Det vurderes ikke at være muligt at lægge enkelte enkelt stop ind, hvor der bunkres ekstra metanol, så der ikke er behov for længere ophold i havnen ved den almindelige drift.

Betydning for passagererne

Ingen

COWIs vurdering

Metanoldrift i søfarten er under kraftig udvikling. Der er allerede bestilt metanol-skibe til levering inden for de nærmeste år, men der er så vidt vides endnu ikke bestilt metanoldrevne hurtigfærger. Der er stadig behov for at udvikle hurtigfærger, så de kan håndtere pladsbehovet til metanol-tankene, og der skal ske en

³⁴ Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC.

væsentlig udbygning af produktionskapaciteten, før det vil være et reelt teknisk alternativ. E-metanol vil dog i fremtiden være et brændstof i søfarten og derfor også relevant for hurtigfærger. Dog kan der også for metanoldrevne færger være en mindre udfordring med vægt og især plads og kapacitet på færgerne samt bunkringstiden. Endelig skal pilotolien være fossilfri for at sikre den største fjernelse af drivhusgasemissionerne.

4.8.3 E-ammoniak

Beskrivelse af tiltag

Motorer, som drives af e-ammoniak, er under udvikling hos flere af de store motorfabrikanter, men forventes tidligst på markedet i 2025.

E-ammoniak produceres ved at kombinere brint fra elektrolyse med kvælstof fra atmosfæren. Der er derfor ikke forsyningsbegrænsninger sammenlignet med biogen CO₂, som bruges i produktionen af e-metanol.

Udfordringer

E-ammoniak er meget giftigt, hvis der kommer et udslip. Herudover kræver skibet omkring tre gange så stor tankkapacitet som diesel på grund af mindre energiindhold pr. liter brændstof³⁵ sammenlignet med diesellole. Der er endnu ikke udarbejdet fælles regler for håndtering af ammoniak på færger eller ved bunkring i havn.

Økonomi

Prisen på e-ammoniak kendes ikke endnu. Det forventes dog, at den vil være væsentligt højere end diesel alene på grund af det store energiforbrug ved fremstillingen. IMO forventer en lidt lavere pris end på e-metanol, da der ikke skal betales for kulstof og den lettere tilgang til nitrogen.

Havneanlæg og forsyning

Det er usikkert, om eller hvornår e-ammoniak kan produceres i tilstrækkelig grad. Der kan være udfordringer med lagring på havnen, da ammoniak er underlagt Seveso III-direktivet, og der er flere sikkerhedshensyn end ved f.eks. med e-metanol.

Tidshorisont

Udvikling af e-ammoniak er teknisk muligt og installation af motorer, der kan benytte e-ammoniak forventes på plads efter 2025. Der vil dog gå flere år inden produktionen af e-ammoniak er på et niveau, der kan give en tilstrækkelig sikker forsyning. Forsyningen forventes ikke at være på plads før 2030³⁶. Det vil

³⁵ E-ammoniak har en energitæthed på 11,5 MJ/L, hvor diesel har en tæthed på 38,3 MJ/L, dvs. tankene skal være op mod 3 gange større for at have den samme mængde energi med.

³⁶ Copenhagen Infrastructure Partners regner i deres projekt HØST med en e-ammoniakproduktion fra 2027, som dog til at starte med skal afsættes til gødningsindustrien.

være muligt at etablere et anlæg specifikt rettet mod forsyning af hurtigfærgerne, men det vurderes ikke at være en realistisk mulighed i dansk kontekst idet der kræves større anlæg for at opnå en fornuftig drift.

Potentiale for reduktion i drivhusgasser

Der kan nås op til 99 pct. mindre udslip af drivhusgasser ifølge de seneste LCA-beregningsprincipper fra IMO og EU. Opgørelsen er behæftet med usikkerhed vedrørende manglende kendskab til lattergasudslip fra ammoniakmotorer, som har en GWP-faktor på 256 CO₂e over 100 år. Det kan derfor have en negativ klimaeffekt og reducere gevinsterne opnået ved at fjerne CO₂-udledningerne. På nuværende tidspunkt er forskning og udvikling af ammoniakmotorer på et stadie med mange usikkerheder, hvorfor det er vanskeligt at sige, hvor stort det potentielle lattergasudslip vil være.

Betydning for driften

Lastning (eller påstigning af passagerer) og bunkring kan sandsynligvis ikke udføres simultant på grund af sikkerhedshensyn. Det tager længere tid at bunkre på grund af lavere energitæthed sammenlignet med både dieselolie og e-metanol. Herudover er sikkerhedsrisikoen højere end ved e-metanol pga. giftigheden af ammoniak. Hurtigfærger bunkres ved hver tur for at undgå sejlads med for stor vægt. Det er derfor ikke umiddelbart en løsning at bunkre større mængder brændstof udenfor driftsperioden for at undgå bunkring, mens der er påstigning af passagerer.

Betydning for passagererne

Ammoniak er meget giftigt ved et udslip, og risikoen for at bruge det på et passagerskib er stor, da det ikke er muligt at træne passagererne i sikkerhedsforanstaltninger. Ammoniak kan nemmere bruges på skibe, som ikke sejler med passagerer, da besætningen kan trænes i sikkerhedsforanstaltninger.

I forhold til selve sejladsen, hastighed, afgang mv. er der ingen umiddelbare indvirkninger.

COWIs vurdering

E-ammoniak anses for at være et af fremtidens drivmidler i søfarten. Derfor vil det også i teorien være en teknisk mulighed for hurtigfærger. Der er stadig mange udfordringer ved teknologien, som skal løses, og en egentlig produktionskapacitet skal udvikles, før det kan overvejes som en relevant teknologi for hurtigfærger. Da teknologien anses som én af flere PtX-løsninger, kan det også på lang sigt blive et alternativ for de danske hurtigfærger.

5 Konsekvenser for hurtigfærgerne af forskellige udviklingsspor

I dette afsnit gennemgås de konkrete muligheder for grøn omstilling af Kattegatfærgerne. Afsnittet indeholder ligeledes en vurdering af konsekvenser for driften, økonomi og udledninger og peger på nogle af de potentialer og barrierer, der konkret er for driften på Kattegatruterne.

På baggrund af gennemgangen af de forskellige teknologiske udviklingsmuligheder, der kan føre til reduktion i drivhusgasudledninger fra hurtigfærgerne, er det COWIs vurdering, at Kattegatfærgernes primære mulighed for at blive helt emissionsfri skal ske ved et skift til alternative drivmidler.

Det bemærkes, at el og VE-brændstoffer opgøres som klimaneutrale, op mod de nationale klimamål, når de benyttes i transportsektoren, jf. *FN's opgørelsesmetode*.

Der er en række ubekendte og usikkerheder ved de enkelte alternativer, som betyder, at vurderingerne er af overslagsmæssig karakter. Resultaterne vil også være relevante for andre ruter, der drives med hurtigfærger.

Konsekvenserne er udarbejdet i samarbejde med projektets arbejdsgruppe og skal ses som illustrative eksempler på de muligheder, der er for en grøn omstilling. Gennemgangen giver ikke samlede omkostningsvurderinger idet dette kræver flere informationer end det er muligt at indhente. Der er derfor ikke udarbejdet konkrete business case eller samfundsøkonomiske analyser af de enkelte alternativer.

Økonomi

Det har ikke været muligt at udarbejde komplette og fuldstændige beregninger af alle omkostninger forbundet med de omtalte tiltag og teknologier for derved at kunne vurdere de forskellige muligheder mod hinanden. En sådan vurdering skal nødvendigvis bygge på et godt datagrundlag for at kunne belyse alle aspekter, og da de fleste omstillingsmuligheder ligger ude i fremtiden, er omkostningsestimaterne meget usikre.

De relevante driftsomkostninger og investeringer til en sådan vurdering omfatter motorteknologier og skibe, batteripakker, flywheels eller specialtanke til e-fuels, OPEX i form af omkostninger for drivmidler samt investeringer i nye faciliteter som eksempelvis ladeinfrastruktur.

Molslinjen har delt deres forventninger til meromkostninger, jf. boks 5.

Boks 5 *Molslinjens vurdering af driftsomkostninger ved forskellige drivmidler*

Molslinjen har gennem de seneste 2-3 år arbejdet på projekter vedr. grøn omstilling, primært gennem elektrificering af hurtigfærgerne på Kattegat, hvorfor rederiets forskellige estimater er benyttet i det følgende. Rederiet har også løbende fulgt prisdannelsen samt forventninger til fremtidens priser for drivmidler for at kunne sammenligne driftsomkostningerne ved de forskellige alternativer.

Nedenfor er opsummeret Molslinjens estimater på driftsomkostninger til drivmidler ved drift af hurtigfærger på Kattegat med udgangspunkt i forbrug i 2019. Prisen for HVO varierer stærkt over tid. Den sammenlignes med MGO-prisen for årene 2019-20 med tal fra *Færgeanalysen*. Molslinjen oplyser, at prisen for en garanteret leverance i 2023 er 4,2 gange højere end for MGO, hvilket giver en større meromkostning. Samtidig er der sket betydelige ændringer i priserne for MGO og el siden 2019. Fremtidige priser er usikre, og hvorvidt de nuværende højere priser fortsætter, og hvor længe, kan der ikke siges noget om. Derfor er nedenstående tabel og figur grove indikationer på, hvad merprisen ville have været i 2019-20 og kan være fremadrettet.

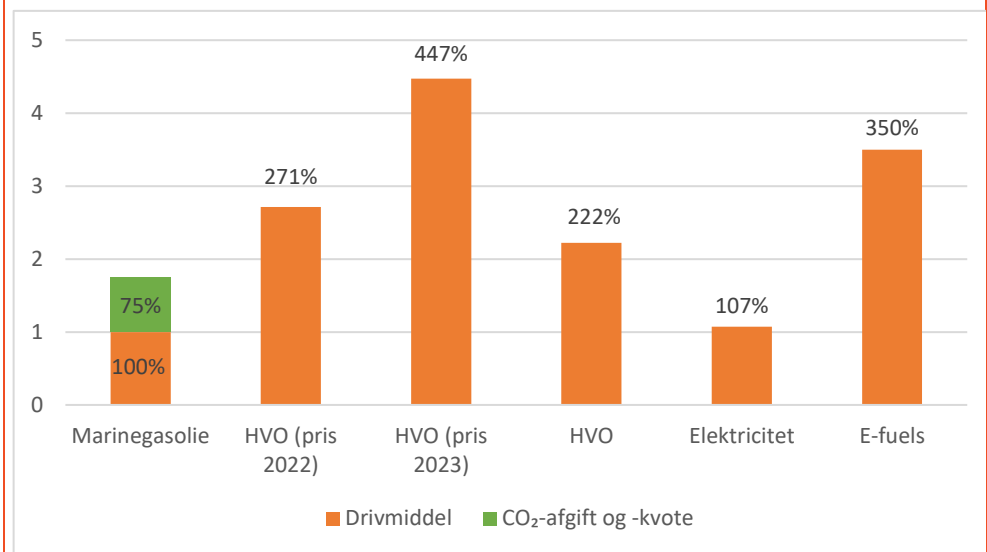
Tabel 4 Drivmiddelforbrug og driftsomkostninger pr. år ekskl. moms og afgifter. Oplyst af Molslinjen.

	Volu- men	Volumen	Pris/	Drifts- omkost- ninger	Ekstra driftsom- kostning
	Mt	1.000 li- ter eller MWh	Kr. / liter eller kWh	mio. kr.	mio. kr.
Marinegas- olie	39.293	46.500	4,30	200	
HVO*	38.114	48.864	9,10	445	245
HVO (pris 2022)	38.114	48.864	11,10	542	342
HVO (pris 2023)	38.114	48.864	18,30	894	694
Elektrici- tet**		194.794	1,10	214	14
E-fuels			3-4 x elektricitet	650 - 850	450 - 650

Note: (*) langsigtet pris estimeret i TIMES modellen. HVO-prisen vil være mellem 75 pct. til 150 pct. højere end MGO. (**) i Færgeanalysen var elprisen 50% lavere, som ville give en besparelse ift. udgifter til drivmidlet. Meromkostningerne skal holdes op imod besparelsen i CO₂- afgifts og - kvotebetalinger på ca. 150 mio. kr. i 2030 ved klimaneutral drift.

Forventede forskelle i driftsomkostninger kan også illustreres med Figur 2.

Figur 2 Sammenligning af driftsomkostninger for drivmidler med marinegasolie



Note: Tal fra Molslinjen suppleret med COWI's tal fra Færgeanalysen

5.1 HVO

HVO (hydrogenereret vegetabilsk olie) kan benyttes uden ændringer på de nuværende færger. Operatøren kan derfor allerede i dag benytte anden generations-HVO som erstatning for dieselolie. HVO benyttes af rederiet på færgerne til Fanø (Fenja og Menja), så erfaringen med drift og forsyning er allerede på plads.

Alt efter om det bruges i sin rene form eller blandes med dieselolie, kan HVO efter en vugge-til-grav-vurdering føre til en reduktion i drivhusgasudledningerne på ca. 44 pct. HVO er derfor et tiltag, som hurtigfærgerne på Kattegat kan anvende på den korte bane for at opnå reduktion i drivhusgasudledningerne, men der vil være tale om en overgangsløsning for hurtigfærgerne da produktionen af anden generations HVO ikke kan skaleres uendeligt og drivhusgasreduktionen er begrænset.

Den største udfordring for rederiet er omkostningerne til HVO. Molslinjen oplyser, at prisen for garanteret leverance i 2023 er 4,2 gange højere end prisen for gasolie, som bruges i skibsfarten. I det nuværende marked er det meget vanskeligt overhovedet at få garanteret fremtidige leverancer af HVO.

Med Kattegatfærgernes olieforbrug (2019) på 39.293 tons olie om året vil meromkostningen ligge på op til 700 mio. kr. årligt med prisen for 2023 som udgangspunkt. Det svarer forsimplet til en gennemsnitlig meromkostning på op til 500 kr. pr. bil, som sejler med hurtigfærgerne, hvilket er en tilnærmelsesvis fordobling af den nuværende billetpris³⁷. Hvis det langsigtede prisniveau anvendes, bliver meromkostningen omkring 245 mio. kr.

³⁷ hvis rederiet vælger at lægge den fulde meromkostning over på billetprisen

Molslinjen angiver, at store prisstigninger på billetterne forventeligt vil få passagererne til at vælge den alternative rute over Storebælt. COWI har ikke til nærværende analyse vurderet, hvordan prisændringerne påvirker en ændring i efterspørgslen af transport mellem Øst- og Vestdanmark.

Konklusion

HVO kan bidrage til drivhusgasreduktioner allerede i dag. HVO kan dog ikke fjerne alle emissionerne og er af den grund ikke en langsigtet løsning.

Brug af HVO vil derudover medføre en væsentlig meromkostning for rederiet.

5.2 Elfærge

Eldrift er i udgangspunktet det mest energieffektive alternativ til olie på færgerne. Der er flere forhold, som skal være på plads, før eldrift kan være et alternativ for hurtigfærgerne på Kattegat, *jf. kapitel 3*.

Det forventede energimiks til produktion af dansk strøm forventes omkring 2030 udelukkende at bestå af vedværende energikilder. En ren eldrevet færge vil derfor fjerne alle drivhusgasudledninger i driften.

Havneanlæg og forsyning

Hurtigfærgerne på Kattegatforbindelserne skal som minimum have en forsyningsforbindelse på 50 kV for at kunne overføre den nødvendige energi til færrens batterier eller flywheel, idet der skal overføres 35 MWh på den tid, færgerne ligger i havn mellem hver overfart. Det betyder, at der skal være en ladekapacitet på op til 70 MW i hver havn. Med kortere ophold i havnen skal kapaciteten være endnu højere.

Den meget store effekt, der kræves ved ladning, kan betyde, at der ikke er tilstrækkeligt med kapacitet i elnettet, hvis det ikke udbygges. Derfor kan energien eventuelt lagres i flywheels i havnen, hvor lagringen sker løbende, og hvor strømmen overføres fra de landbaserede flywheels til færgen. Det betyder, at den strømkapacitet, der skal være til stede på havnen kan reduceres. Batterier benyttes pt. ikke til lagring af så stor en energimængde, men vil dog på sigt også være en løsning i havne med lav strømkapacitet.

I Aarhus er der fra færgelejet 1,6 km til nærmeste 60kV transformer med 32 MW kapacitet, hvorimod der fra færgelejet på Sj. Odde er 14 km til nærmeste 50kV transformer. Der vil derfor skulle trækkes kabler til området. Hertil kommer, at transformerstationen skal udbygges for at kunne levere den nødvendige kapacitet. Der vil være en teknisk udfordring med ladefaciliteterne til så store energimængder, men det vil der ikke blive redegjort for i detaljer i denne rapport.

Ud over en stor strømkapacitet skal der etableres tre ladere pr. færgeleje med ret stor kapacitet til overførsel af strøm til færgerne, når de er i havn. Det kan

kun ske ved flere parallelle ladere, idet der på nuværende tidspunkt ikke eksisterer en lader, der er kraftig nok til at kunne håndtere opgaven alene. Det vil indebære betydelige investeringer i omstilling til elektrisk hurtigfærgedrift.

Omkostninger

Omkostningerne ved omstilling til eldrift omfatter investeringer i elfærger med hhv. batteri eller flywheel, investeringer i ladeinfrastrukturen i havn og driftsudgifter til el. Elfærger skal dog hverken betale CO₂-afgift eller CO₂-kvoter.

Det er usikkert, hvor prisen på en elfærge vil ligge i fremtiden, samtidig med at der er forskel på, om der benyttes batterier eller flywheels. Hertil forventes hurtigfærger med eldrift at medføre betydelige investeringer til at etablere den nødvendige ladeinfrastruktur i de relevante havne, som færgerne anløber. Der er tale om udgifter til kabler, ladestationer, tilslutningsafgift mv.

Molslinjen har pr. januar 2023 estimeret omkostningerne ved omstilling til eldrift, *jf. Boks 6*. Investeringen skal forrentes over den tid, infrastrukturen er i drift. Baseret på Molslinjens eget overslag på omkostninger til selve laderne er det i størrelsesordenen 356 mio. kr. Meromkostningerne til batteridrevne færger er estimeret af Molslinjen til 1.300 mio. kr.

Boks 6 Molslinjens estimerer på investeringer i omstillingen til eldrift

Molslinjen har modtaget indikationer fra værfter og motorfabrikanter, der peger på en merpris ved en ny hurtigfærge med batterier på 325 mio. kr. pr. stk. og tilsvarende for ny hurtigfærge med flywheels. Det estimeres, at Express 3 og Express 4 kan ombygges til flywheels for ca. 400 mio. kr. pr. færge.

Ved nykøb af elfærger med batterier når de fire Kattegatfærger skal udskiftes svarer det til en meromkostning på ca. 1.300 mio. kr. Ved batteridrift skal batterierne udskiftes et antal gange under færgens tekniske levetid, som leder til yderligere meromkostninger³⁸.

Ved en ombygning af to hurtigfærger til flywheels og nykøb af færger med flywheels for de resterende to ligger den samlede meromkostningen på ca. 1.450 mio. kr. Flywheleknologien er mere robust end batterier og der forventes, at flywheels ikke skal udskiftes på samme måde som batterier.

Molslinjen har udarbejdet estimerer for etablering af den nødvendige ladestruktur, som indikerer en investering på 188 mio. kr. i Aarhus (62 mio. kr. til ladetårne, 71 mio. kr. til energilagring i havnen med flywheel og 55 mio. kr. til etablering af tilslutning og udvidelse af nærmeste transformator). Tilsvarende forventes investeringer på Sjælland på i alt 168 mio. kr. (42 mio. kr. til ladetårne, 71 mio. kr. til energilagring i havnen med flywheel og 55 mio. kr. til etablering af tilslutning og udvidelse af nærmeste transformator). Samlede investeringer til grøn omstilling forventes således at være ca. 356 mio. kr. for landanlæg og landfaciliteter, *se Tabel 5*.

³⁸ COWI bemærker, at eldrift på batterier først er en realistisk omstillingsmulighed på længere sigt, når batteriteknologien er udviklet tilstrækkeligt. Derfor kan omstillingstidspunktet potentielt falde sammen med at de eksisterende færger skal udskiftes og der ikke er en scrapværdi tilbage. Ved dette tidspunkt forventes batterierne ikke føre til et dødvægtstab, som leder til at flere færger skal sættes ind for at dække transportbehovet.

Tabel 5 Investeringer i ladeinfrastruktur til elektrisk hurtigfærgedrift på Kattegat. Oplyst af Molslinjen.

	Mio. kr.
Ladeinstallationer i havne	104
Energilagring på land	142
Tilslutning til elnettet	110

Driftsomkostningerne ved elektrisk drift af hurtigfærger vurderes at være på niveau (ekstra 14 mio. kr.) med driftsomkostningerne ved marinegasolie ved en pris på 1,10 kr./kWh og en gasoliepris på 4,30 kr./l (prisen i 2019, som benyttes i Molslinjens analyse, jf. også *Boks 5*).

Ved fortsat drift med dieselolie vil der skulle betales CO₂-afgift og EU-ETS kvoter. Jf. afsnit 3.2 vil de være i størrelsesordenen 150 mio. kr. om året. Ved at sejle på strøm kan til gengæld opnås en fritagelse for CO₂-afgiften og EU ETS-kvoter sammenlignet med nuværende drift på dieselolie.

5.2.1 Elfærge med batteri

Som beskrevet i afsnit 4.5, er batterivægten den største udfordring for at kunne have en hurtigfærge med nok dødvægt til at kunne transportere køretøjer som i dag. For nuværende ligger energidensiteten på omkring 10 kg/kWh og forventes at forbedres til 5 kg/kWh inden for de næste 5-8 år. COWIs beregninger viser, at energidensiteten maksimalt må ligge på 2 kg/kWh for at kunne transportere køretøjer på hurtigfærgerne i tilstrækkelig grad til at opretholde en drift som i dag.

For indenrigshurtigfærger forventes, at batterivægten med dagens teknologi ligger på ca. 550 tons (se beregning i Bilag C). Frem til 2025 vil denne vægt formentlig halveres, men det er formentlig først et stykke tid efter 2030, at batterivægtene forventes at være udviklet til ca. 2 kg/kWh, hvor en batteriløsning er inden for en teknisk realistisk rækkevidde. Derfor vurderer COWI, at det tidligst vil være omkring 2030-2035, at batterierne vil kunne anvendes på hurtigfærgerne på Kattegatruterne.

Omkostninger

Omkostningerne for en elfærge med batterier er dyrere end en konventionel færge, som drives med dieselolie, primært pga. prisen på batterier, selv om disse ud fra nationale og internationale fremskrivninger forventes at mindskes over tid. Den store batteripakke, der skal installeres på hurtigfærger for at kunne besejle Kattegat, vil derfor gøre elfærgerne noget dyrere end tilsvarende dieselfærger. Med udgangspunkt i de nuværende priser for batterier og prisen for bygningen af Express 5 (som kom i drift i april 2023) kan Molslinjen estimere en ekstra investering på 325 mio.kr. pr. hurtigfærge med batterier, svarende til i alt 1.300 mio. kr. for omstilling af alle fire hurtigfærger. Der vil være en yderligere meromkostning ved, at batteripakken skal udskiftes et antal gange under

færgernes tekniske levetid. Efter Molslinjens estimeringer stiger driftsomkostninger for drivmidlet med ca. 14 mio. kr. årligt sammenlignet med dieselolie, jf. *Boks 6* og *afsnit 6*.

Konklusion

Den nuværende batteriteknologi kan ikke lagre tilstrækkelig med energi til at kunne drive hurtigfærger på Kattegat, uden at den samlede vægt bliver for stor i forhold til at opretholde samme antal passagerer og køretøjer på færgerne, hvorfor batteridrevne elfærger ikke er et anvendeligt alternativ, før der er sket en væsentlig udvikling i batteriernes energitæthed.

Det har ikke været muligt at beregne en endelig vurdering af de samlede omkostningsmæssige konsekvenser. Det tyder dog på, at meromkostningerne ved anskaffelse af færger og landanlæg er for store til, at besparelser på drift, afgang mv. helt kan opveje dette. Hvis batterierne bliver bedre og billigere, kan det forhold godt ændres, så batteridrevne elfærger kan drives rentabelt.

5.2.2 Elfærge med flywheel

En elfærge med flywheel-teknologien til energilagring er ikke en afprøvet teknologi endnu. Molslinjen vurderer dog, at flywheel-teknologien er interessant, hvorfor rederiet har købt sig ind i WaatsUp Power, der arbejder med at udvikle flywheels til brug for skibsfart, og oplyser planer for godkendelse og tests af flywheel på hurtigfærge i løbet af 2023.

Det forventes, at flywheel-teknologien vil betyde en mindre vægtforøgelse end batterier. For det første, fordi et flywheel forventes at arbejde inden for en grænse på 15–100 pct. af max. energikapacitet, hvilket modsvarer en tilsvarende grænse på 20–80 pct. for en batteriløsning. For det andet, fordi Molslinjen i samarbejde med WattsUp Power oplyser, at de udvikler et flywheel svarende til en energitæthed på 2,6 kg/kWh, som er betydeligt lavere end de 10 kg/kWh, som batterier har i dag (jf. afsnit 4.5 og 4.6 samt *Bilag C*) og dermed er tæt på det niveau, der er vurderet relevant for at kunne opretholde en drift som i dag.

Omkostninger

Molslinjen estimerer, at merprisen for en ny hurtigfærge med flywheels vil være i størrelsesordenen ca. 325 mio. kr. pr. færge, og at Express 3 og Express 4 kan ombygges til flywheels for ca. 400 mio. kr. pr. færge. Efter Molslinjens estimeringer stiger driftsomkostninger for drivmidlet med ca. 14 mio. kr. årligt, jf. *Boks 6*.

Molslinjen oplyser, at de arbejder på at få godkendt brug af flywheels på hurtigfærger i løbet af 2023, således at rederiet har mulighed for at bestille en ny hurtigfærge med flywheel til levering i 2027. Det forudsætter at ladeinfrastrukturen kan være etableret i begge havne inden 2027, samt, at der opnås godkendelse til at benytte teknologien på færgerne

Konklusion

Flywheel-teknologien er fortsat under udvikling, hvorefter den skal godkendes af

relevante myndigheder. Det er derfor ikke muligt at omstille færgedriften til denne teknologi på nuværende tidspunkt. COWI har ikke mulighed for at vurdere økonomien for en sådan løsning ud over den information, som Molslinjen har leveret. Derfor er vurderingen behæftet med betydelig usikkerhed. Det vil være muligt at foretage en konkret vurdering af teknologien, når og hvis teknologien bliver færdigudviklet til brug for skibsfart.

Molslinjen vurderer

Molslinjens forskellige projekter vedrørende flywheels forventes allerede i løbet af 2023 at kunne føre til afgørende tests af teknologien ombord på en hurtigfærge. Efter succesfulde tests kan der bestilles ny hurtigfærge til levering i 2027. I perioden frem mod 2027 skal den krævede ladeinfrastruktur på land etableres. Molslinjen vurderer, at det forudsætter finansiel støtte.

5.3 Power-to-X

For teknologierne, som anvender PtX-brændstoffer, vurderer COWI, at det er teknologisk muligt at overgå til e-metanol og i teorien også til e-ammoniak, hvor der dog er flere aspekter, der skal løses forinden. Der er valgt at se på disse to PtX alternativer, da de er de alternativer, der forventes at få størst udbredelse i den maritime industri i fremtiden.

5.3.1 E-metanol

Det vurderes, at det er mere realistisk at bygge nye e-metanolskibe end at ombygge eksisterende skibe. Producenterne af hurtigfærger nævner, at da brændstofsyste­met skal konstrueres væsentligt anderledes. Det betyder, at denne teknologi bliver relevant ved udskiftning af de nuværende hurtigfærger med nye færger. Teknologien er tilgængelig på det kommercielle marked i dag. En potentiel udfordring er tilgængeligheden af e-metanol, som først over de næste år vil blive produceret i større skala.

I daglig drift kan Kattegatfærgerne sejle med op til 30 tons³⁹ dieselolie (MGO) til fremdrivningsmotorerne. Da energidensiteten for e-metanol (19,9 MJ/kg) er omkring det halve af energidensiteten for MGO på 42,7 MJ/kg, må man alt andet lige forvente, at en hurtigfærge drevet af e-metanol skal bruge ca. 60 tons brændstof. En vægtforøgelse på 30 tons svarer til 3 pct. af dødvægten, hvilket ikke giver væsentlige vægtmæssige problemer for hurtigfærgerne.

Forudsætningen for anvendelse af e-metanol er, at brinten, der anvendes til produktionen, er forenelig med europæiske krav til Renewable Fuels of non-Biological Origin (RNFBO). Her kan nævnes, at Europa Kommissionen har vedtaget en

³⁹ Molslinjen oplyser, at de nuværende bunkrer ved hvert havneophold for at reducere dødvægten. Det betyder at Kattegatfærgerne bunkrer ca. 6.500 liter MGO.

forordning om metode til dokumentation af brint baseret på vedvarende energikilder (RFNBO), således dette kan certificeres og anvendes under direktivet for vedvarende energi (se *afsnit 3.2* for en diskussion af disse forhold).

Det betyder, at omstillingen til e-metanol leder til en markant drivhusgasreduktion. Det skal også sikres, at den dieselolie, der skal benyttes som pilotolie også kommer fra ikke-fossile kilder for at reducere emissionerne yderligere.

Omkostninger

COWI kan ikke vurdere, om skibsteknologien er betydeligt dyrere eller det samme som for en konventionel hurtigfærge drevet på diesel. I Færgeanalysen blev det anslået, at meromkostningen til en metanolfærge var lille og i størrelsen 5 pct. mere end for en dieseldreven færge. Mærsk har betalt ca. 15 pct. mere for deres dual fuel-metanol-containerskibe. Meromkostningen ligger derfor tilsyneladende i et spænd og skal undersøges nærmere for den specifikke motortype, som en hurtigfærge har brug for. Et skøn ud fra nyprisen af en konventionel hurtigfærge vil meromkostningen ligge på ca. 40 – 120 mio. kr.

Driftsomkostningerne for en færge på e-metanol vil være højere end en færge på eldrift og for en dieseldrevet færge. Det skyldes det høje el-forbrug og energitab i e-metanolproduktionen, som gør prisen på brændstoffet høj. Som angivet i afsnit 4.8.2, er den konkrete pris svær at fastlægge endnu, da der fortsat sker udvikling af teknologi, og det stadig er ukendt, hvad prisen på CO₂ bliver. Molslinjen har angivet en merpris på 3-4 gange prisen på dieselolien, hvor prisen forventes at være faldende efterhånden som teknologien og produktionskapaciteten på verdensplan udvides. Til gengæld forventes efterspørgslen efter biogent CO₂ også at stige og medvirke til en højere pris på e-metanol.

Med de samme antagelser om forbrug og drift, som blev anvendt i vurdering af HVO-meromkostninger, vil meromkostningen til brændstof overslagsmæssigt være i størrelsesordenen 500 mio. kr. om året i gennemsnit. Der skal dog modregnes besparelsen ved ikke at skulle betale CO₂-afgift og CO₂-kvoter på omkring 150 mio. kr. om året. Størrelsen af omkostningerne er dog behæftet med betydelig usikkerhed.

Stigningen i omkostningerne er af en størrelse, der vil have betydning for konkurrenceevnen, men om og i så fald hvor meget, det påvirker muligheden for en rentabel drift, har COWI ikke vurderet.

Konklusion

Færger drevet af e-metanol kan komme i drift på Kattegatruterne i løbet af de næste 5-10 år, men meromkostningen til e-metanol er stor og på et niveau, som kan gøre hurtigfærgerne på Kattegat for dyre til at opretholde en rentabel drift.

Teknologien er kendt og kan installeres på nye hurtigfærger. Derfor bliver e-metanol tidligst relevant, når de nuværende færger skal udskiftes. Udfordringen er stadig adgang til e-metanol, idet der endnu ikke er produktionskapacitet i store mængder, hverken nationalt eller internationalt. Der er dog flere store projekter i gang, herunder i Danmark, der vil udbygge kapaciteten.

5.3.2 E-ammoniak

Motorer og andre tekniske løsninger til anvendelse af e-ammoniak er stadig under udvikling. Der er flere ukendte faktorer i relation til drivmidlet særligt omkring anvendelse i passagerfærger, som endnu ikke er afklaret. Der er endnu ikke ammoniakdrevne skibe i drift, men flere udenlandske rederier har ordrer, som forventes leveret inden for de næste år.

Produktion af e-ammoniak sker i dag i meget lille skala. På den korte og mellem lange bane er der usikkerhed om, hvorvidt der kan anskaffes tilstrækkelige mængder af brændstoffet til at drive færgerne over Kattegat.

Da energidensiteten for ammoniak (18,6 MJ/kg) ligger meget tæt på metanol, vurderes at vægtforøgelsen ved bunkring af en større mængde heller ikke vil give vægtmæssige problemer.

Omkostninger

En hurtigfærge med e-ammoniak som brændstof forventes at være dyrere end en dieselfærge. Da der endnu ikke er indgivet ordre ammoniakdrevne skibe, er det ikke muligt at afgøre, hvor meget dyrere hurtigfærgerne på Kattegatruterne vil være i forhold til en dieselfærge. Omkostningen vil sandsynligvis være sammenlignelig med metanol-færger og mindre end for en elfærge, da de fleste komponenter vil være de samme for de to typer af teknologier.

Der er endnu ikke et marked for e-ammoniak, hverken for så vidt angår udbud eller efterspørgsel. Vurderingerne af prisen på brændstoffet er særdeles usikre på nuværende tidspunkt. Driftsomkostningerne for en færge på e-ammoniak vil være højere end en færge på eldrift og for en dieseldrevet færge. Det skyldes det høje el-forbrug og energitab i ammoniakproduktionen, som gør prisen på brændstoffet høj. Som angivet i afsnit 4.8.2, er den konkrete pris svær at fastlægge endnu, da der fortsat sker udvikling af teknologien. Molslinjen har angivet en merpris på 3-4 gange prisen på dieselolien, hvor prisen forventes at være faldende efterhånden som teknologien og produktionskapaciteten på verdensplan udvides. Omkostningen kan være lavere end for e-metanol⁴⁰, hvilket overslagsmæssigt vil betyde en årlig meromkostning på omkring 500 mio. kr. Det skal dog modregnes besparelsen ved ikke at skulle betale CO₂-afgift og CO₂-kvoter på omkring 150 mio. kr. om året. Størrelsen af omkostningerne er be hæftet med betydelig usikkerhed.

Stigningen i omkostningerne er af en størrelse, der vil have betydning for konkurrenceevnen, men om og i så fald hvor meget, det påvirker muligheden for en rentabel drift, har COWI ikke vurderet.

Betydning for driften

Der er betydelige usikkerheder omkring driften, eksempelvis sikkerhedshensyn, som kan forhindre, at e-ammoniak er et reelt alternativ for en passagerfærge.

⁴⁰ Efter Mærsk-centerets vurdering kan nitrogen forventes at have en lavere pris end CO₂. I den tidligere regerings PtX-strategi illustreres også en lavere pris for e-ammoniak end metanol.

Hvis det ikke er muligt at bunkre, mens færgen lastes, betyder det et øget tidsforbrug, som påvirker driften negativt.

Konklusion

COWI vurderer, at omstilling af hurtigfærgerne til e-ammoniak først er realistisk på længere bane med bestilling af færger efter 2030. Det skyldes, at teknologien stadig er under udvikling, og flere sikkerhedselementer ikke er blevet løst endnu. E-ammoniak bliver tidligst relevant, når de nuværende færger skal udskiftes.

6 Sammenfatning

De tekniske analyser og vurderingerne af mulighederne for at anvende teknologierne til at omstille Kattegatfærgerne (og andre hurtigfærger) til de forskellige alternativer, er opsummeret herunder.

Hurtigfærgerne på Kattegat havde i 2019 en samlet årlig CO₂-udledning på 120-130.000 tons. Med de vedtagne CO₂-afgifter og indlemmelse af færgerne i EU's kvotehandelsystem vil det medføre en årlig udgift på omkring 150 mio. kr. i 2030, hvor det måske kan bevirke, at hurtigfærgesejladserne ikke kan opretholdes kommercielt, men skal i offentligt færgeudbud med tilskud. Det ligger udenfor rammerne for denne rapport at vurdere i hvilken grad det er tilfældet.

I afsnit 3.1 og afsnit 3.2 er der set på mulighederne og især udfordringerne ved lavere hastighed og færre afgang. Det konkluderes, at dette ikke kan løse udfordringerne.

De øvrige løsninger er en omstilling til alternative drivmidler, som er opstillet i Tabel 6. De er betydelig forskel i den teknologiske modenhed, fordele og ulemper ved de forskellige drivmidler og de detaljerede vurderinger fremgår i det tilsvarende teknologiafsnit. Konklusionerne herfra sammenfattes nedenfor. Uanset hvilket emissionsfrit alternativ, der bringes i anvendelse til hurtigfærgerne, vil det medføre øgede omkostninger. Alle alternativerne medfører også en større vægt til brændstoffet og som især for eldrift har betydning for den tekniske mulighed for at sejle med hurtigfærger på kattegatruten.

Tabel 6 Overordnet vurdering af indikatorer for de analyserede drivmidler

	HVO*	LBG	El - batteri	El - flywheel	Brint	E-metanol	E-ammoniak
Teknologisk modenhed i dag	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej
Regulering på plads	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej
Drivhusgasreduktion**	Lav	Medium	Høj	Høj	Høj	Høj	Høj
Investeringsomkostninger**	samme	Medium	Høje	Høje	Kendes ikke	Medium	Kendes ikke
Driftsomkostninger**	Høje	Medium	Lave	Lave	Høje	Høje	Høje

Note: For eldrift og PtX-brændstoffer antages at energikilden er 100% vedvarende. (*) 2. generation. (**) sammenlignet med MGO.

Der findes ikke i dag en alternativ teknologi, der kan lede til fuldstændig reduktion af drivhusgasser i et vugge-til-grav perspektiv. De løsninger, der kan bringes i spil på kort sigt, er begrænsede, og den løsning, der har størst reduktionspotentiale, er anvendelse af HVO eller andre biodieselprodukter, *jf. kapitel 4*. Det kan reducere drivhusgasudledningerne, men kan ikke fjerne dem, *jf. afsnit 4.3*. Der kan opstå udfordringer med tilgængeligheden af HVO, da efterspørgslen efter det biomateriale, der skal indgå, også efterspørges til andre anvendelsesformål. Den forventede fremtidige pris for HVO vil medføre meromkostninger på mere end 300 mio. kr. pr. år. Såfremt HVO-priserne er højere, som f.eks. under

energikrisen de sidste par år, vil det føre til endnu større stigninger i omkostningerne for rederiet. Det kan udfordre rentabiliteten på driften.

På længere sigt vil der være mulighed for helt at fjerne drivhusgasudledningerne fra hurtigfærgerne ved at benytte el fra vedvarende kilder eller at komme tæt på klimaneutral drift med PtX-baserede drivmidler som e-metanol og e-ammoniak.⁴¹ PtX-teknologierne til anvendelse på hurtigfærger er ikke på alle punkter færdigudviklede, og der er usikkerhed om, hvornår de kan bringes i anvendelse.

Blandt PtX-brændstofferne er e-metanol længst fremme i udvikling, og det vil være en mulig løsning ved bestilling af nye færger om cirka fem år. Der arbejdes endvidere intenst på udvikling af produktion i storskala på verdensplan, så det vil være muligt at købe e-metanol.

E-ammoniak er ikke lige så langt i udviklingen, hverken på motorteknologisiden, sikkerhedsudfordringerne eller i storskalaproduktion. Derfor ligger denne mulighed længere ude i fremtiden.

Meromkostning til PtX-drivmidlerne er store og kan påvirke konkurrenceevnen i driften af Kattegatruterne og vurderes at medføre meromkostninger på omkring 500 mio. kr. pr. år, selv med besparelserne i CO₂-afgifter og CO₂-kvoter, *jf. afsnit 4.8.2 og 4.8.3*. Det kan være i en udstrækning, så det fremover vil blive urentabelt at opretholde kommerciel færgedrift, hvilket betyder, at staten skal udbyde og subsidiere driften, *jf. Storebæltsforliget (kapitel 1)*.

Ud fra en samfundsøkonomisk vinkel kan eldrevne hurtigfærger være en god løsning, da man herved undgår det store konverteringstab på ca. 75 pct. af den grønne vedvarende elektricitet ved produktion af PtX-drivmidler.

Teknologisk er eldrevne hurtigfærger med batterier imidlertid udfordret af vægten til lagring af strømmen og omfanget af strøm, der skal være adgang til i havnene. Der skal ske en kraftig udvikling i energitætheden i batterierne, før de i praksis kan anvendes ombord på hurtigfærgerne til kattegatruterne pga. batteriernes store vægt, der pt. vil gøre det umuligt at opretholde driften med en hurtigfærge med samme antal passagerer og køretøjer, *jf. afsnit 4.5*.

En teknologi - flywheel – udvikles i øjeblikket, men er endnu ikke afprøvet og godkendt til skibstransport. Molslinjen har investeret i et firma, der udvikler teknologien og forventer, at det vil være muligt med denne form for energilagring på hurtigfærgerne. Molslinjen er i gang med at undersøge teknologien i praksis til drift af de elektriske systemer om bord. Molslinjen vurderer, at der med de fornødne godkendelser og i tilfælde af succesfulde forsøg i løbet af 2023, kan teknologien være relevant at installere på næste generation af kattegatfærger med forventet levering i 2027. Med planlagt retrofit af eksisterende hurtigfærger i 2027 kan hurtigfærgedriften på Kattegat være omstillet til grøn energi i 2028.

⁴¹ Det bemærkes, at el og VE-brændstoffer opgøres som klimaneutral op mod de nationale klimamål, når de benyttes i transportsektoren, *jf. FN's opgørelsesmetode*.

Hvis flywheelteknologien viser sig at leve op til forventningerne, vil det være den hurtigste måde at få fjernet drivhusgasudledningerne fra hurtigfærgerne. Der er flere elementer, som endnu ikke er afklarede, ligesom der skal ske en godkendelse af teknologien inden den kan komme i anvendelse. Det kan heller ikke udelukkes, at batterier til lagring af energien på eldrevne hurtigfærger på længere sigt er muligt. Meromkostningerne til eldrift med batteridrift eller flywheels er lavere end for PtX alternativerne. Teknologisk vil PtX-brændstofferne også kunne føre til fuldstændig fjernelse af drivhusgasserne, men som nævnt, med forventeligt høje omkostninger til driften.

De økonomiske konsekvenser ved omstilling af kattegatfærgerne til alternative drivmidler er behæftede med stor usikkerhed, da ikke alle teknologier er på markedet endnu, samtidigt med at ikke alle drivmidler produceres i større skala i dag. Tabel 7 opsamler de overslag på meromkostninger alternative drivmidler medfører sammenlignet med nuværende drift på dieselolie, som er beskrevet i tidligere afsnit af rapporten. Tallene er primært oplyst af Molslinjen selv. Tallene giver en indikation på størrelsesorden af engangsinvesteringer, årlige merudgifter til drivmidlerne og mulige besparelser af CO₂-afgifts og -kvotebetalinger.

Tabel 7 Skøn over **meromkostninger** for alternative drivmidler sammenlignet med dieselolie

	CAPEX – investering (mio. kr.)	Drivmiddel (mio. kr. /år)	CO₂-afgift og -kvote (mio. kr. /år)*
HVO	0	250 - 690	-150
EI – batteri**	1.650	10	-150
EI – flywheel	1.810	10	-150
E-metanol	40 - 120	450 - 650	-150
E-ammoniak	?	450 - 650	-150

Note: afrundede tal fra afsnit 3, 4 og 5. Positive tal er en meromkostning, negative tal er en besparelse sammenlignet med dieselolie. Drivmiddelpriser fluktuerer meget over tid og afspejler gennemsnitsværdier ud fra nuværende viden. (*) udgiften i 2030 og efter. (**) Selve batterierne skal udskiftes et antal gange over færgernes tekniske levetid.

Kilde: Molslinjen og COWI

Bilag A Regulering om principper for opgørelse af drivhusgasser

Der er som nævnt i afsnit 3.2, indgået en aftale om en udvidelse af EU's kvotehandelssystem, så skibstransporten kommer til at indgå. Reguleringen omkring de tilladte CO₂-kilder kan blive relevant for hurtigfærgerne, hvis de skal sejle på e-metanol, hvor oprindelsen af det CO₂, der benyttes i produktionen af brændstoffet, jf. de forskellige certificeringsordninger, er afgørende for prisen. Det er lagt ind i reguleringen, at man skal se på, hvordan der tages højde for produktionsvejen af brændstoffer under EU ETS. Dette er endnu ikke afklaret, som også nævnt ovenfor.

For de nye alternative brændstoffer, inklusive PtX-brændstofferne, er der påbegyndt et arbejde med at få udviklet certificeringssystemer for disse brændstoffer således, at de opnåede reduktioner kan handles via EU-ETS-systemerne. Her er VE II-direktivet centralt. Arbejdet er dog endnu ikke kommet så langt. Med certificeringen, hvor bæredygtigheden og klimabelastningen af PtX-brændstofferne fastlægges (og det dokumenteres, at brændstofferne opfylder de regulatoriske rammer), kan det influere på prissætningen af disse brændstoffer⁴².

Der er flere forskellige certifikater under VE II-direktivet. De forskellige certifikater vil have betydning for værdien (prisen) for de konkrete brændstoffer og vil afhænge af den endelige regulering. Grundet certificeringssystemerne vil prisen på det enkelte brændstof også blive påvirket af priser på andre typer brændstoffer omfattet af den enkelte certificering.

Boks 7 Definition af forskellige kilder til VE brændstoffer

De forskellige kilder, der kan påvirke prissætningen, er:

- > **Renewable Fuel from Non-Biological Origin (RFNBO):** Energien baseres på fornybare kilder, der ikke er biomasse. Dog forventes prisen her at falde i takt med teknologiudviklingen.
- > **Genanvendt kulstofbaserede brændstoffer:** Energien kommer fra fossilt affald.
- > **Førstegenerationsbiobrændstoffer:** Energien kommer fra fødevarer- og foderbaserede råvarer.
- > **Andengenerationsbiobrændstoffer (herunder avancerede biobrændstoffer):** Energien hentes fra restprodukter som fx savsmuld fra skovdrift og affald (biomasse). Prisen af disse vil stige i takt med en stigende efterspørgsel. VE II-direktivet definerer, hvilke råprodukter der kan anvendes til at producere avancerede biobrændstoffer.

⁴² Lignende certificering/guidelines er også ved at blive udarbejdet på globalt plan (IMO-regi)

EU har vedtaget en retsakt, der skal fastlægge anvendeligheden af de forskellige input af kulstof til produktion af PtX-brændstofferne. Af retsakten fremgår, at:

- > De endelige PtX-brændstoffer skal føre til mindst 70 pct. reduktion i drivhusgasser sammenlignet med fossile brændstoffer (svarer til maks. 28,2 gram CO₂e/MJ).
- > Emissionerne baseres på vugge-til-grav-princippet og skal indeholde de drivhusgasemissioner, der indgår i fremstillingsprocessen.

Umiddelbart betyder det, at fossilt baseret CO₂, CO₂ fra brændstoffer, der afbrændes specifikt for at producere CO₂ (i det omfang dette finder sted), samt CO₂, hvor fangsten allerede har modtaget emissions-kreditter i relation til andre love, ikke fungerer som drivhusgasreduktion⁴³. Til gengæld vil følgende kilder give mulighed for reduktioner:

- > **Biogent CO₂**. Udledninger, der kommer fra produktionen eller forbrænding af biobrændstoffer og biomasse, der opfylder VE II-direktivets krav, når de anvendes til produktion af PtX-brændstoffer.
- > **CO₂ hentet under EU ETS-rammen**. Hvis CO₂-fangsten sker under en sektor omfattet af EU-ETS, kan det medtages frem til 2035. Det omfatter således både fossilt og ikke-certificeret biogent CO₂.
- > **CO₂ fra air capture**. CO₂-fangst direkte fra atmosfæren.
- > **CO₂ fra geologiske kilder**. Kulstof, der kommer fra en geologisk kilde, og som i forvejen er naturligt udledt.

⁴³ Efter retsakten kan fossil baseret CO₂ indgå frem til 2035. CO₂ fra industri/produktion, der ikke genererer elektricitet, kan benyttes frem til 2041.

Bilag B Froude-tallet

Froude-tallet udtrykkes som forholdet mellem skibets fart og dets længde i vandlinjen. Jo højere fart man sejler ved, jo højere bliver skibets Froude-tal, der beregnes som følger:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Lvl}}$$

hvor:

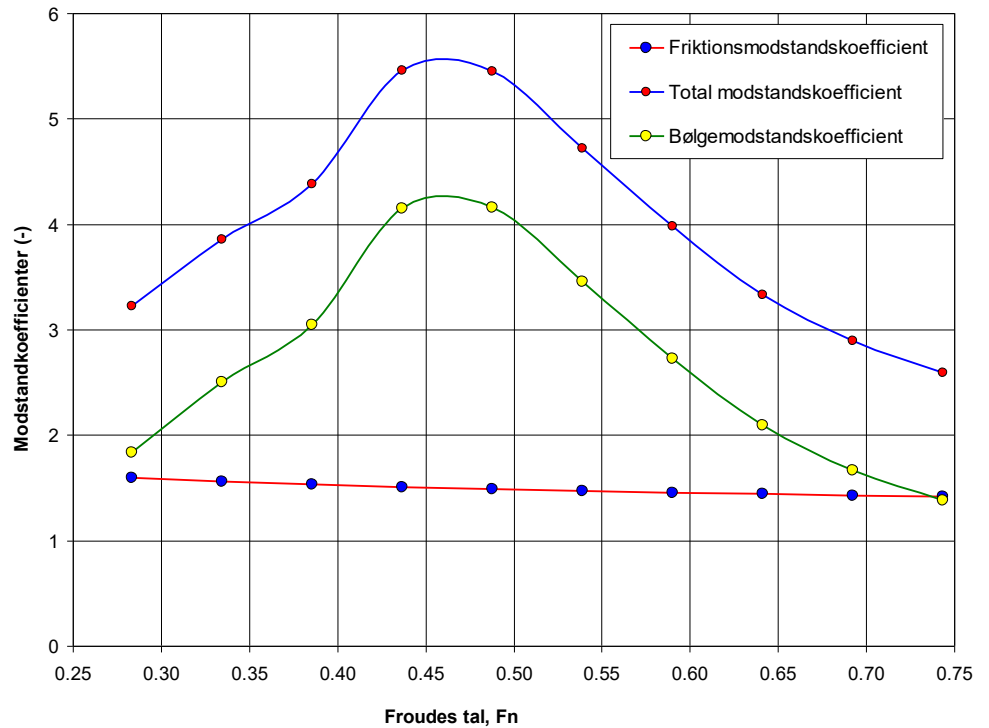
V er Skibets fart i m/s (1 knob = 0,5144 m/s)

Lvl er Skibets vandlinielængde i m

g er Tyngdeaccelerationen (9,81 m/s²)

Fremdrivningsmodstanden for hurtigfærger øges med Froude-tallet op til en vis grænse, som kaldes det såkaldte "hump" (svarende til et Froude-tal på ca. 0,46). Sejler man med en fart, der er højere end "hump"-punktet, falder den relative fremdrivningsmodstand, som primært skyldes, at et skib danner et bølgesystem, når det sejler, jf. Figur 3, der viser et eksempel baseret på HSC Max. Lignende resultater ville fremkomme for andre hurtigfærger, hvor energieffektiviteten kan være højere og derved gevinsten ved lavere hastighed lavere.

Figur 3 Dimensionsløse modstandskoefficienter for HSC Max⁴⁴ som eksempel på effekten som funktion af Froude-tallet.



Note: 39 knob svarer til et Froude-tal på 0,69, hvor friktionsmodstanden og bølgemodstanden er næsten lige store.

⁴⁴ HSC Max er benyttet til at illustrere effekten, da der har været adgang til alle relevante detaljer fra forskellige test-sejladser. Tilsvarende data har ikke været til rådighed for andre hurtigfærger for analysen. Konsekvenserne for de andre hurtigfærger er dog tilsvarende.

Bilag C Beregningsforudsætninger

Indeværende bilag redegør for beregningsforudsætninger for energilagring i batterier og flywheels (svinghjul) for fremtidig eldrift af færger.

Energilagring for el-fremdrivning af hurtigfærger kan principielt ske på flg. måder:

- > Lagring af el-energi i batterier
- > Lagring af elektrisk energi via mekanisk energi der lagres i et flywheel

Ovennævnte to løsninger er således to ækvivalente måder for opbevaring af elektrisk energi

El-energi behov

Molslinjens gennemsnitlige olieforbrug på Aarhus-Odden-ruten på ca. 5.450 kg pr. enkelt-tur (før forlængelse af sejltiden) kan omregnes til et omtrentligt effektudtag på de 4 dieselmotorer på i alt ca. 22.000 kW.

Svinghjulet vil kunne forventes at arbejde inden for en grænse på 15–100 pct. af max. energikapacitet, hvilket modsvarer en tilsvarende grænse på 20–80 pct. for en batteriløsning.

Her laves en batterianalyse svarende til det nævnte effektbehov til fremdrivning på 22.000 kW. Den nødvendige batterikapacitet med 60 pct. opladning (fra 20 pct. til 80 pct. af maks. kapacitet) er ca. 51 MWh. Tages der højde for ekstra effektbehov som følge af ekstra modstand som følge af ekstraordinære vind- og vejrforhold, må en batterikapacitet på ca. 60 MWh forudses.

Den omtrentlige specifikke batterivægt med dagens batteriteknologi er 8-10 t/MWh, så den samlede batterivægt vil dermed andrage ca. 550 tons (60 MWh * 9 ton/MWh). I relation til, at færgerne i dag er lastet med ca. 30 tons brændselsolie, vil den maksimale dødvægt på i alt 1.000 tons reduceres til 450 tons, så der ikke vil være payload (dødvægt fradraget vægt til olie, vand og anden forbrugslast) nok til den nødvendige last på færgen.

Vægten af elmotorer på i alt 60 tons samt det nødvendige elektriske udstyr vil groft sagt have samme vægt for de fire nuværende dieselmotorer tilsammen, inklusiv deres reguleringsudstyr mv.

Molslinjen har oplyst, at firmaet WattsUp Power, der udvikler svinghjulsteknologien sammen med Molslinjen, pt. forventer at kunne lagre 500 kWh i en 1.200 - 1.400 kg svinghjulsenhed, svarende til 2,4 - 2,8 tons pr. MWh, hvilket er mere gunstigt end den forventede batteriprformance i 2025 på 5 t/MWh, som flere batterileverandører samt DTU forudsiger – selvfølgelig med en vis usikkerhed grundet den hastige teknologiudvikling inden for batteriområdet.

Vægten af svinghjulet vil dermed blive ca. $60 \text{ MWh} \times 0,6/0,85 \times 2,6 \text{ t/MWh} = 110 \text{ tons}$, hvilket er væsentligt mindre end den beregnede nuværende batterivægt (540 tons) og den forventede batterivægt i 2025 på ca. 300 tons ($60 \text{ MWh} \times 5 \text{ t/MWh}$).

Svinghjulet må forventes, som følge af store interne kræfter, at skulle fastgøres til en stærk struktur i katamaranskrogene, som vurderes at øge skibets egenvægt. Uden af have foretaget konkrete beregninger vurderes strukturen at anbringe ekstra 5 pct. i forhold til batteriløsningen, dvs. ca. 20 tons, hvilket betyder, at svinghjulsløsningen vil veje ca. 130 tons, dvs. 170 tons mindre end den ækvivalente batteriløsning, vel vidende at beregningerne på nuværende tidspunkt skal betragtes som indikative for størrelsesordenen.

Et flywheel kan konkurrere med en ækvivalentspecifik batteriladecapacitet på ca. $60/85 \times 2,6 \text{ kg/kWh} = 1,8 \text{ kg/kWh}$, dvs. den kapacitet, der forventes efter 2030. Det er først her, at batteridrevne elfærger kan betragtes som en teknisk mulighed ud fra et vægtmæssigt synspunkt, da så lav batterivægt vil sikre den tilstrækkelige dødvægt.

Tabel 8 Forudsætninger for beregning af batterivægt og ladebehov

Elektricitets og brændstofforbrugs analyse		
Effektbehov til fremdrivning	kW	22.000
Effektbehov til hjælpesystemer (auxiliary power)	kW	1.100
Accelerationstid	minutter	10,0
Effektforøgelse under acceleration	pct.	0
Sejldistance	sømil	38,0
Sejldistance ved acceleration, deceleration og manøvrering	sømil	1,0
Havnemanøvre og deceleration	minutter	6,0
Overfartstid ved konstant fart	minutter	58,4
Samlet sejltid	minutter	74,4
Havnetid hvor kun hjælpesystemer anvendes	minutter	20
Antal dobbelt ture per opladning	-	0,5
Maksimal tilladelig C faktor (opladningskonstant)	-	1,2
Aktuel beregnet C faktor (opladningskonstant)		1,2
Opladningshastighed	kW timer/minut	1.015
Elektriske transmissionstab (fra batteri/generator til propeller enhed)	pct.	8,5
Elektriske transmissionstab (fra ladestander til batteri)	pct.	6,0
El-energibehov for en dobbelt-tur	kW timer	55.728
Olieforbrug for en enkelt-tur	kg	5.573
El-energibehov for en dobbelt-tur korrigeret for alle transmissionstab	kW timer	64.792
El-energibehov for en dobbelt-tur inkl. skibets transmissionstab	kW timer	60.904
El-energibehov for samlede antal ture inkl. skibets transmissionstab	kW timer	30.452
Ladetid for nødvendig batteriopladning i havn	minutter	30,0
Ladeeffekt	kW	60.904
Spænding	volt	50.000
Strømstyrke	A	703
Procentvis afladning inden ny opladning	pct.	60,0
Elforbrugs andel af maksimal batterikapacitet	pct.	60
Nødvendig batterikapacitet	kW timer	50.754

Bilag D Opgørelse af drivhusgasudledninger

Dette bilag beskriver baggrund og metode bag drivhusgasemissioner fra forskellige drivmidler, som bruges i rapporten. Der afrapporteres drivhusgasemissioner efter to opgørelsesmetoder:

- > Opgørelsesmetoden, som følger vugge-til-grav-princippet, som er en livscyklusanalyse. Det bemærkes, at alle udledninger dermed ikke nødvendigvis kan tilskrives transportsektoren eller Danmark
- > FN's opgørelsesmetode, som følger territorialprincippet, allokerer udledningen hvor den finder sted. Det kan fx være i et lands eller en sektors drivhusgasopgørelse. Det er denne metode der anvendes når der gøres status for de nationale udledninger.

D.1 Elfærger

FN's opgørelsesmetode

Efter FN's opgørelsesmetode, er der ikke udledninger ved eldrift i transportsektoren, da udledningerne tilskrives energisektoren, som producerer el.

Vugge-til-grav metode

For en elfærge, der drives 100 pct. elektrisk, skal benytte Energinets deklARATION for udledningerne fra strøm fra det danske elnet. På sigt forventes emissionerne fra energiproduktion at reduceres ved at vedvarende kilder som havvind udbygges. Målet er at have en helt vedvarende energiforsyning.

D.2 Færger, der benytter andre alternative grønne brændstoffer

FN's opgørelsesmetode

Efter FN's opgørelsesmetode opgøres udledningerne fra alle VE-brændstoffer som nul ved afbrænding i transportsektoren. Det skyldes, at udledningen fra produktionen er bogført i andre sektorer.

Vugge-til-grav metode

For færger, der benytter PtX-brændstoffer, herunder brint, e-metanol eller e-ammoniak er den aktuelle beregningssituation kompliceret, da der pt. foregår en del lovgivningsarbejde i både EU-og IMO-regi i forbindelse med bestemmelsen af emissionerne for disse brændstoftyper.

I uge 49, 2022, har der været møde i IMO's såkaldte ISWG-komité, hvor principper for livscyklusanalyser løbende behandles. Resultatet fra disse seneste forhandlinger kendes pt. ikke i deres fulde omfang, hvorfor nedenfor nævnte dokumenter må betragtes som de mest up-to-date livscyklusrelaterede dokumenter.

Man vil fremover skulle skelne mellem to led i CO₂-beregningerne:

- > CO₂-udledninger, der fremkommer i forsyningsledet fra brændstoffets tilblivelse (well – dvs. kilden) til brændstoftanken – et samlet led, som derfor kaldes "from well to tank" (WTT).
- > CO₂-udledninger forbundet med brugen af brændstoffet i skibet via motorerne til fremdrift af skibet, når propellen skubber skibet fremad, efterladende kølvandet agter, der på engelsk kaldes "wake", hvorfor dette led kaldes "from tank to wake" (TTW).

TTW-bidraget er det "normale bidrag", som i dag benyttes ved eksempel EEDI-beregninger (Energi Effektivitets Design Index).

WTT-bidraget er det bidrag, hvor der pt. endnu ikke er helt fastlagte internationale regler, hvorfor der henvises til to kilder nedenfor. Tabellen med emissionsfaktorer er beregnet ud fra metoder beskrevet i de seneste kendte officielle dokumenter om livscyklus analyser (tabellerne er udarbejdet i samarbejde med MAN Energy Solutions):

1) EU-regelforslag dateret 14. juli 2021:

Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC.

2) IMO-Dokument

ISWG 9/2: Further consideration of concrete proposals to encourage the uptake of alternative low-carbon and zero-carbon fuels, including the development of lifecycle GHG/carbon intensity guidelines for all relevant types of and incentive schemes, as appropriate.

I ovenstående dokumenter er der redegjort for beregningsmetoderne til bestemmelse af CO₂-udledningerne inklusive talværdier for de mange parametre, der skal anvendes i beregningerne. Disse er angivet i Annex II i direktivforslaget samt Annex 2 i IMO-dokumentet.

For at lette beregningsarbejdet er der i *Table 9* vist de samlede "well to wake"-værdier for CO₂, som skal anvendes i beregningerne. Værdierne er bl.a. angivet i enheden 'gram CO_{2e} pr. energienhed' i MJ, som er det samlede energiforbrug, dvs. energiindholdet i brændstoffet skal multipliceres med viste faktorer for at bestemme den totale drivhusgasudledning. Herudover fremgår drivhusgasreduktionen af drivmidlerne sammenlignet med dieselolie.

Tabel 9 Well-to-wake drivhusgasemissioner fra forskellige drivmidler

Brændstoftype	Motortype	Emission (WtW) total	CO ₂ e reduktion fra skibsmotor	CO ₂ e reduktion smln. med MGO
		[gCO ₂ e/MJ]	[pct.]	[pct.]
Fossil MGO	Alle brændselsmotorer	90,3	0,0	
Fossil LNG	Otto cycle (dual fuel medium speed)	91,0	19,4	0
Bio HVO (veg oil)	Alle brændselsmotorer	51,2	0,0	44
Bio-LNG	Alle brændselsmotorer	18,2	6,2	80
e-metanol	Alle brændselsmotorer	4,5	0,0	95
Brint	Alle brændselsmotorer	3,6	0,0	96
e-Ammoniak	Uspecificeret (1.0 for illustration)	1,0	0,0	99

Note: udledningerne er opgjort i CO₂-ækvivalenter med GWP-faktorer over 100 år (28 CO₂e for metan og 265 CO₂e for N₂O). Med GWP-faktorer for 20 år øges metan til 84-87 CO₂e, hvorfor emissionerne for LGN og LBG øger. Kilden er MAN Energy Solutions.