

Evaluering av potensiale for hybride fremdriftsløsninger i fritidsbåter

Masteroppgave i Energiteknologi
Termiske Maskiner

Dan Shiva Mjåseth Shanker



Universitetet i Bergen
Geofysisk institutt



Høgskulen på Vestlandet
Institutt for maskin- og marinfag

Bergen, 31.05.2021



Evaluering av potensiale for hybride fremdriftsløsninger i fritidsbåter

Dan Shiva Mjåseth Shanker

Universitetet i Bergen (UiB)
Det matematisk-naturvitenskapelig fakultet
Geofysisk institutt
Postboks 7803
5020 Bergen, Norge

I samarbeid med:

Høgskulen på Vestlandet (HVL)
Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap
Institutt for maskin- og marinfag
Postboks 7030
5020 Bergen, Norge

English title: Evaluation of the potential of hybrid propulsion solutions for pleasure crafts

Forfatter, studentnummer: Dan Shiva Mjåseth Shanker, UIB/HVL 287054/152080

Studieprogram: Energiteknologi, Termiske Maskiner

Dato: 31.05.2021

Veileder ved HVL: Peter Edgar Koch

Veileder ved UiB: Finn Gunnar Nielsen

Oppdragsgiver: HVL

Oppdragsgivers referanse: Peter Edgar Koch

Antall filer levert digitalt: 1

Forord

Denne oppgaven har vært et prosjekt ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL). Veileder ved HVL er Peter Edgar Koch, ved UIB Finn Gunnar Nielsen. Oppgaven setter søkelys på å bruke kunnskap om termiske maskiner, elektriske systemer og datasimuleringer for å evaluere mulighetene for en miljøorientert utvikling blant fritidsbåter.

En stor takk utrettes til Peter Edgar Koch for sin positive innstilling til prosjektidé og kontinuerlig gode veiledning og oppfølging. Takk til Milan Cvetkovic for flere hyggelige møter, og hans arbeid og veiledning i Ricardo IGNITE. Takk til forelesere som underviser med engasjement og en positiv innstilling, som viser interesse og engasjerer studenter. En takk rettes også til venner og medstudenter for gode opplevelser igjennom studietiden.

Takk til familie og venner for støtte og motivasjon gjennom masterstudiet og tidligere utdanningsforløp.

Dan Shiva Mjåseth Shanker

Bergen, 31.05.2021

Sammendrag

Utviklingen av fremdriftssystemer for landbasert transport og skipsfart har ført til flere gode løsninger som reduserer utslipp fra bil og skip. I Norge, med sin utstrakte kyst, er det et stort antall fritidsbåter som fremdeles benytter seg av fossile brennstoff som primær energikilde for fremdrift. Denne oppgaven evaluerer potensiale for hybriddrift i et segment av fritidsbåter og hvordan en kan bruke simuleringverktøyet Ricardo IGNITE (fra bilindustrien) til å bedre designe et hybrid fremdriftssystem for mindre båter. Målet er å finne løsninger som kan redusere forbruk og utslipp fra en fritidsbåt.

Benytter man en forbrenningsmotor vil det være en fordel om spillvarme fra motor kan gjenvinnes og benyttes for fremdrift eller andre formål. Spillvarmegjenvinningssystemer som kan være aktuelle er beskrevet i kapittel 2. I simuleringmodellen er det inkludert et spillvarmegjenvinningssystem (WHR-system) for å vise effekten av dette på resultatene fra simuleringen.

I kapittel 3 er de ulike komponentene i et parallellhybrid presentert, og et fremdriftssystem er sett sammen for denne oppgaven. Modellen baserer seg på en moderne dieselmotor og en børsteløs elektromotor for et 48V batterisystem. En oversikt over innkjøpskostnad er også presentert i kapittel 3.

Kapittel 4 består av oppbygningen av en simuleringmodell i IGNITE. Beskrivelsen av de ulike komponentene og oppbygningen av hybridmodellen er ment som grunnlag for videre bruk av dette programmet i utviklingen for fritidsbåter. Den fungerende simuleringmodellen benytter en eksisterende kjøretøyskontrollenhet, fra IGNITE, for å bestemme driftsforholdet mellom diesel- og elektromotor. Målet med modellen er, på sikt, å bruke den til å kunne implementere optimaliseringsstrategier i det hybride fremdriftssystemet og velge gunstige parameter og komponenter for systemet.

Resultatene fra simuleringen viser hvordan modellen oppfører i et driftsmønster basert på virkelig båtbruk. De viktigste resultatene er forbruket av drivstoff og elektrisk energi, og her viser simuleringen lovende resultater for hybrid fremdrift i fritidsbåter. Fordelene baserer seg på lavere drivstofforbruk og gunstigere lastområde for forbrenningsmotor. Reduksjonen i drivstofforbruk medfører også reduserte driftskostnader for båten. Forholdet mellom innkjøpspris av et hybridsystem og besparelser ved drift er diskutert i kapittel 6.

Alternative drivstoff og avgassrensing ses også på i oppgaven for å diskutere hvordan disse kan bidra til reduksjon av utslipp i dagens fritidsflåte. Resultatene viser til at den mest kostnadseffektive metoden for å redusere utslippene fra en eksisterende fritidsbåt er å konvertere til et fornybart drivstoff fra bærekraftige kilder.

Abstract

The recent development of drivelines and propulsion systems for automotive and maritime applications have led to the implementation of several environmentally friendly technologies. In Norway, with its long coastline and maritime history, there is a large number of pleasure boats that still uses fossil fuels as primary energy source for propulsion. In the coming years it is expected that also the pleasure boats will get in the focus of environmental regulation and undergo development to reduce fuel consumption and emissions. This master thesis evaluates the potential of hybrid propulsion in a segment of pleasure boats and shows how the simulation software Ricardo IGNITE can be used in the design and optimisation of a hybrid propulsion system for smaller maritime vessels. The main goal of the thesis is to find solutions that can reduce the consumption and pollution from pleasure boats.

Whenever an internal combustion engine is used there will be waste heat coming from the engine. Utilizing this waste heat will be advantageous to increase the overall efficiency of the engine. Selected waste heat recovery (WHR) systems are described and discussed in chapter two. In the simulation model a WHR-system is included to show the effects of such a system on the operation of the modelled boat.

Chapter 3 shows the design of a parallel hybrid propulsion system for a pleasure boat, based on components already available in the market. The design is based on a modern diesel engine and a 48V brushless electric motor with a lithium battery pack. Component and system costs are presented and compared in chapter three and six.

In chapter four the development and build of the IGNITE simulation model are described. The different components and the construction of the hybrid simulation model are meant as a basis for further development with the software for propulsion systems specific to pleasure boats and other small maritime crafts. The functional model uses an automotive hybrid controller from the IGNITE library to control the combustion engine and electric motor. Further development, and the design of a bespoke hybrid controller, will allow the model to be implemented with optimization strategies.

The results from the simulations shows how the model behaves for a selected drive pattern based on operational expectance. The most important results are those related to the usage of fuel and electrical energy. With the use of a hybrid system the fuel consumption reduces, and the engine load becomes more optimal. This reduces the operational cost of the boat but increases the initial cost when purchasing the boat/propulsion system. Example of relations between savings and expenses are shown in chapter six.

Alternative fuels and exhaust aftertreatment are also investigated to achieve a cleaner and more environmentally friendly boating experience. The economic results shows that the most efficient way to reduce the release of carbon dioxide may be the use of a renewable fuel from a sustainable source in an existing engine.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	1
1.1	Mål for oppgaven	2
1.2	Metode	2
2	Teoretisk bakgrunn.....	4
2.1	Fremdriftssystemer	5
2.2	Pantry og varme	6
2.3	Hybride fremdriftssystemer på markedet.....	8
2.4	Eksisterende løsninger for reduksjon av utslipp i transportsektor	12
2.4.1	Maritim fremdrift	12
2.4.2	Lette kjøretøy: motoreffekter opp til 200kW.....	13
2.5	Energilagring.....	16
2.6	Energibalanse	17
2.7	Spillvarmegjenvinning	21
2.7.1	Stirling motor.....	22
2.7.2	Termoelektrisk element	22
2.7.3	Organisk Rankine-syklus	24
3	Oppbygningen av et hybridanlegg	26
3.1	Modell	29
3.2	Energiflyt i båten	34
3.3	Beregningsmodell.....	36
3.4	Komponentliste	42
3.5	Estimert kostnad	44
4	Simulering.....	48
4.1	Ricardo IGNITE.....	48
4.2	Simuleringsmodell	48
4.3	Komponenter	49
4.4	Styring av systemet	62
4.5	Spillvarmegjenvinning	65
4.6	Driftsmønster	67
4.7	Driftsmodi.....	68
4.8	Forenklinger i simuleringsmodellen	69
5	Resultater	71
5.1	Elektrisk	71
5.2	Diesel.....	73
5.3	Hybrid	77

6	Diskusjon	84
6.1	Feilkilder	84
6.2	Sammenligning av forbruk og belastning.....	84
6.3	Innkjøpskostnad, vekt og volum.....	87
6.4	Driftskostnad- og utslippseksempel	89
7	Konklusjon	94
7.1	Videre arbeid	94
	Referanser	96
	Liste over figurer	100
	Liste over tabeller.....	102
	Vedlegg A.....	103
	Vedlegg B.....	104
	Vedlegg C.....	105
	Vedlegg D.....	107
	Vedlegg E.....	110
	Vedlegg F.....	114
	Vedlegg G	130
	Vedlegg H	131
	Vedlegg I.....	132
	Vedlegg J.....	133
	Vedlegg K.....	137
	Vedlegg L	138
	Vedlegg M.....	139

Forkortelser

BMS:	«Battery Management System» Batteriovervåkningssystem
BSFC:	«Brake Spesific Fuel Consumption» Spesifikt brennstofforbruk
CCGT:	«Combined Cycle Gas Turbine» Kombikraftverk/Kogenerasjon med gass og damp
CFD:	«Computational Fluid Dynamics» Strømningsmodellering
CO:	Karbonmonoksid
CO ₂ :	Karbondioksid
DOC:	«Diesel Oxidation Catalyst» Diesel oksidasjons katalysator
DOD:	«Depth Of Discharge» Utladningsgrad av batteriet/operativ kapasitet
DPF:	«Diesel Particulate Filter» Partikkelfilter
EGR:	«Exhaust Gas Recirculation» Eksos resirkulering
FAME:	«Fatty Acid Methyl Ester» Biodiesel basert på forestring av fettsyrer
H ₂ O:	Vann
HVO:	Hydrogenert Vegetabilsk Olje
LNG:	«Liquefied Natural Gas» Flytende naturgass
MGO:	Marine Gassolje
N ₂ :	Nitrogen
NG:	Naturgass/metan
NO:	Nitrogenmonoksid
NO _x :	Nitrogenoksider
O ₂ :	Oksygen
ORC:	«Organic Rankine Cycle» Organisk Rankine syklus/dampkrets med organiske medier
PID:	Proporsjonal-Integral-Derivat kontroll
PM:	«Particulate Matter» Partikler
RCD:	«Recreational Craft Directive» Fritidsfartøy direktiv
RME:	Raps-Metylester
RPM:	“Revolutions per Minute” Rotasjoner per minutt/turtall
SCR:	«Selective Catalytic Reduction» NO _x -katalysator
SOC:	«State Of Charge» Nivået av oppladning til et batteri
TEG:	«Thermoelectric Generator» Termisk-Elektrisk Generator
UHC:	«Unburned Hydrocarbons» Uforbrente hydrokarboner/drivstoff
VAC:	Vekselspenning
VDC:	Likespenning
WHR:	«Waste Heat Recovery» Spillvarmegjenvinning

1 Introduksjon

Majoriteten av fritidsbåtene har i dag en forbrenningsmotor som eneste fremdriftskilde. Problemet med denne fremdriftsmetoden er utslippet av klima- og miljøgasser. I hovedsak nitrogenoksider (NO_x), uforbrente hydrokarboner (UHC) og karbondioksid (CO₂). Utslippene er med på drive klimaendringene gjennom blant annet: global oppvarming, syring av havet og lokale forurensninger [1]. Estimater viser til at utslippet fra norske fritidsbåter ligger i området 400-600.000 tonn CO₂ per år [2-5]. Ifølge Parisavtalen skal Norge i det minste halvere sine utslipp (sammenlignet med 1990-nivå) fram mot 2030 [6]. For å klare dette må en se på nye veier for å finne renere energi til fremdrift, også for fritidsflåten.

Stadig strengere utslippskrav har ført til en viss bedring for nyere motorer når det kommer til utslipp fra motoren. De må følge kravene om utslipp som er satt av styresmaktene og kontrollorganer (EURO, EPA, CARB, RCD). Et eksempel på dette er forbudet mot å selge 2-takts forgassermotorer i Norge og flere andre land fra 2007 [7].

Det finnes per i dag ingen klare teknologiske trender for videre utvikling av båtene i fritidsflåten. Ser en til bilindustrien er det hybridisering og elektrifisering som leder veien videre. Ser en til skipsindustrien er det også hybridisering, hydrogen, spillvarmegjenvinning (WHR) og batteriløsninger som en ser mer av i dagens skipsindustri [8]. Fremdeles er det rent fossildrivstoff som er primærdrivstoffet for fritidsflåten. Alternative drivstoff er et en god mulighet for å redusere forbruket av fossile drivstoff. Velger man et alternativt drivstoff fra fornybare kilder vil en kunne nærme seg CO₂-nøytral drift.

Det har blitt gjort flere forsøk med helelektriske løsninger for fritidsbåter [9]. For små saktegående båter er dette i dag en brukbar løsning for noen. Skal en reise over lengre strekninger kan dette fort bli uaktuelt grunnet batterienes vekt og pris. Med dette som bakgrunn kan det være gunstig å studere hybride fremdriftssystemer, siden disse kan være et godt kompromiss mellom den elektriske fremdriftens miljøvennlighet og rekkevidden en forbrenningsmotor tilbyr.

Innenfor kategorien fritidsbåter er det segmentet i størrelsesområde 14-32 fot, med et fartspotensiale opp til 9 knop, som er aktuelle ifra båtlivsundersøkelsen 2018 [10] gjennomført i regi av Kongelig Norsk Båtforbund (KNBF) i 2018. En finner følgende statistikk om antallet fritidsbåter i dette segmentet:

- 70,0% av fritidsbåtene er i størrelsesområde 14-32 fot
- 25,6% av fritidsbåtene har en makshastighet mellom 0 og 9 knop
- 26,2% av fartøyene med maks hastighet 0-9 knop, er kategorisert som motorbåter
- 62,6% av motorbåter har motoreffekt 0-99hk (0-73kW)
- 15,8% har diesel innenbordsmotor (48,6% av 505 090 båter i 2011)

I undersøkelsen er det 686 683 fritidsbåter som utgjør 100% (2017).

Båtens hastighet og effektbehov er direkte korrelert og en kan anta at systemene i denne oppgaven kan direkte relateres til 15,8% av fritidsbåtene som er i Norge. Større og raskere fartøy vil også kunne relateres til flere av forslagene diskutert i oppgaven. Løsninger som fornybare drivstoff og avgassrensing har blitt mer utbredt de siste årene, og kan bli mer aktuelle for fritidsbåter i fremtiden.

1.1 Mål for oppgaven

Denne oppgaven har som mål å designe et hybrid fremdriftssystem med spillvarmegjenvinning for fritidsbåter med innenbordsmotor (strak aksling). For de fleste båteiere er det per i dag ikke aktuelt å gå over til ren elektrisk fremdrift. Det er ønskelig å designe et komplett system som har som mål å utnytte mest mulig energi på den mest effektive måte. Dette for å kunne sikre fremdrift samtidig som en kan dekke andre behov som varme og elektrisk forbruk ombord.

Eksisterende systemene i markedet består typisk av en forbrenningsmotor som sammen med en elektrisk motor/generator kan drive båten fremover. I denne oppgaven vil en se på mulighetene for å optimalisere/utvide dette systemet til å gi mer fleksibilitet.

Det skal kjøres 1-dimensjonale simuleringer (tid og distanse) som sammenlignes med reell driftsdata for å se på potensiale for reduksjon av drivstofforbruk. Innkjøps- og driftskostnader vil også bli vurdert for å se hvor aktuelt det presenterte systemet blir for en båteier i dag.

Til slutt blir det vurdert virkningen av alternative drivstoff og avgassrensing. Dette kan bli aktuelt for å møte fremtidige krav og vil kunne medføre redusert sjenanse fra eksos når båten ligger i havn.

Oppgavens spesifikke mål:

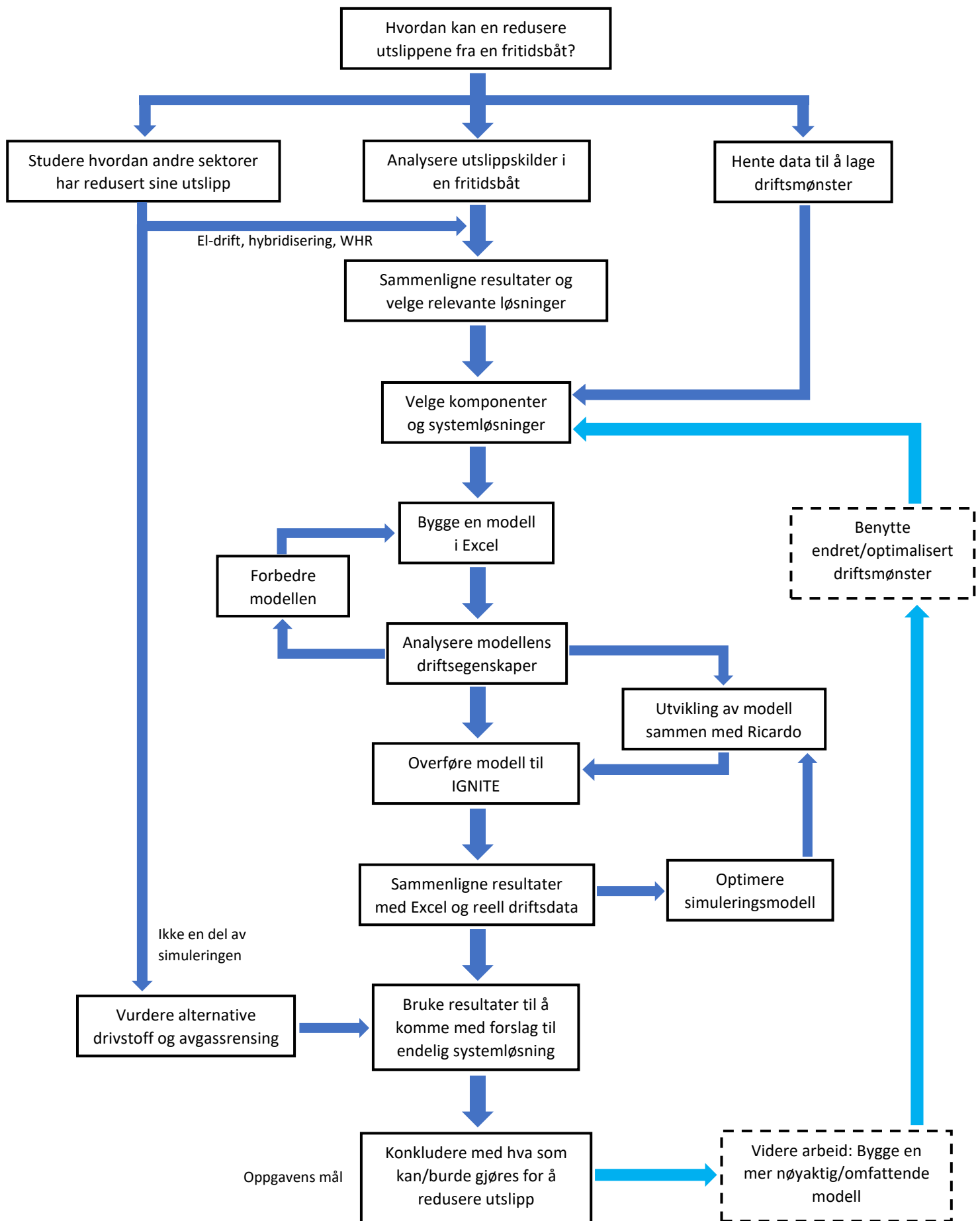
- ❖ Undersøke aktuelle løsninger og teknologier
- ❖ Designe et hybrid fremdriftssystem
- ❖ Simulere fremdriftssystemet for å sammenligne forbruk med eksisterende system
- ❖ Vurdere alternative drivstoff og avgassrensing
- ❖ Evaluere tiltak for å redusere utslipp og forbruk basert på oppgavens resultater

1.2 Metode

Med grunnlag i eksisterende fremdriftssystemer blir det utviklet et alternativ for å forbedre systemet med hensyn på miljø og effektivitet. Gjennom å studere løsninger fra skipsindustrien og landbasert transportsektor vil det bli utledet hvordan disse kan overføres og benyttes i systemet omtalt i denne oppgaven.

Ved hjelp av en egen kalkulator i Excel vil det bli presentert en måte å kalkulere de mest grunnleggende verdiene i systemet. Denne fungerer som en veiledende mal for de videre simuleringene i Ricardo IGNITE. Resultatene vil bli sammenlignet oppimot reelle verdier basert på erfaringer fra dagens båtbruk. Til sist blir det sett på hvordan alternative drivstoff og avgassrensing kan videre hjelpe med å redusere utslippene av klimagasser.

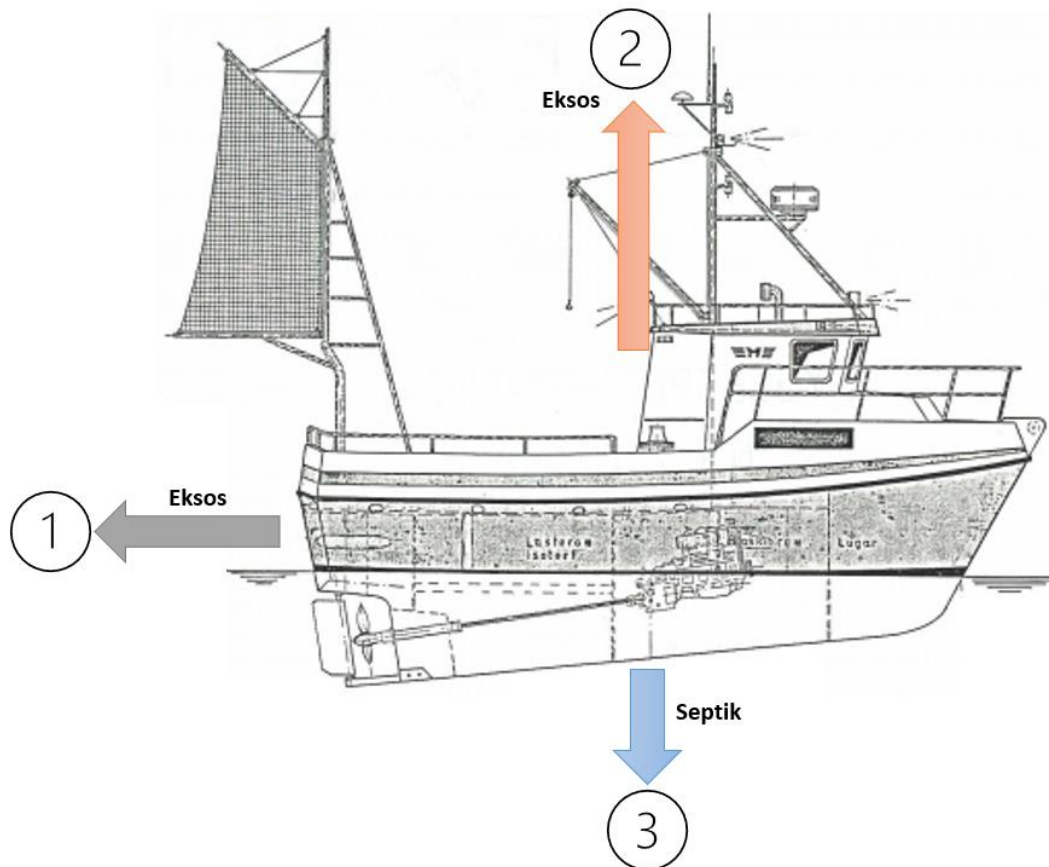
En oppsummering av prosessen kan sees i Figur 1, de stiplede boksene og lyseblå pilene indikerer tiltak for videre arbeid.



Figur 1: Flytdiagram for metode

2 Teoretisk bakgrunn

For å redusere utslippene fra en fritidsbåt må en først kartlegge alle kilder til utslipp. Primær bidragsyter er eksosen fra fremdriftsmotor. Også oppvarming (til forskjellige formål) vil i mange tilfeller slippe ut CO₂, en oversikt er vist i Figur 2.



Figur 2: Utslipp fra fritidsbåt [11]

De forskjellige utslippene er:

1. Eksos fra fremdriftsmaskineri
2. Eksos fra varmeapparat/ovn og pantry (kokeplate)
3. Septik/overvann

Hvert av de tre punktene er et eget tema når det kommer til vurdering av reduksjonspotensiale. I denne oppgaven vil det i hovedsak bli sett på punkt 1- eksos fra fremdriftsmaskineri. Punkt 2 kan variere fra båt til båt da det ikke er noen standard på kokeapparat relatert til utslippskrav [12]. Både gass, diesel, lampeolje og sprit/alkohol er brukt som drivstoff til dette formålet avhengig av hvilken løsning en har i båten. I kapittelet om pantry er det nevnt hvordan en kan kombinere et hybrid fremdriftsmaskineri med elektrisk- oppvarming og kokeplate.

2.1 Fremdriftssystemer

De mest vanlige fremdriftssystemene i fritidsbåter er per i dag:

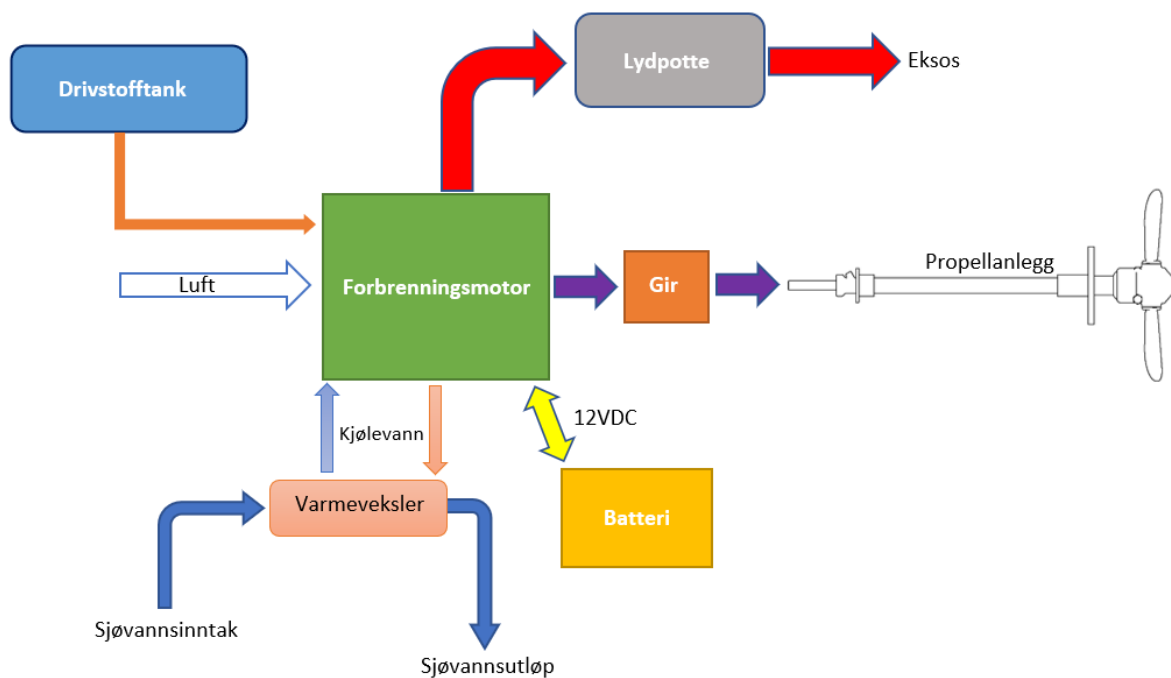
1. Hekkaggregat
2. Seildrev
3. Utenbordsmotor
4. Vannjet
5. Innenbordsmotor (strak aksling)

I denne oppgaven vil det bli jobbet med et fremdriftssystem som benytter seg av strak aksling (punkt 5). Historisk sett har dette systemet vært det mest utbredte blant skip og båter. I dagens fritidsbåter består det av en forbrenningsmotor montert inne i båtens skrog med en aksling som går akterover gjennom en hylse og med en propell i enden. Et marine-gir sørger for forover-nøytral-revers kontroll ved å skifte propellens dreieretning. En kan også benytte seg av et vribart propellanlegg, da endrer vinkelen på propellens blader i motsetning til å endre propellens dreieretning når en skal reversere fremdriften. I de fleste tilfeller vil giret også redusere turtallet på propellen i forhold til motoren sitt turtall. Med unntak av racing applikasjoner, vil det være mer effektivt å rotere en større propell med et lavere turtall enn en mindre propell med høyere turtall.

Kjøling, eksos og elektriske anlegg er helt separat fra selve fremdriftslinjen. Dermed kan en benytte flere ulike løsninger for hvert av disse undersystemene. Det vil være begrensninger til plass i motorrommet for å montere inn flere komponenter siden de fleste motorrom er gjort så kompakte som mulig for å få mer plass i båten til lagring, opphold og annet utstyr.

Miljøaspektet er gjerne den største pådriveren til å utvikle hybride fremdriftsanlegg. Det kan være flere fordeler med slike systemer utenom det rent miljøtekniske. I kapittel 2.2 er det beskrevet hvordan en kan benytte seg av elektrisk pantry og oppvarming når en har en større batteripakke om bord (med spenning over 12VDC). Et annet område der en elektrisk motor kan ha store fordeler er ved langvarig bruk i lave hastigheter. Spesielt for båter med fast propell da de ofte har en nedre hastighetsgrense ved innkoblet propell: 2,5-4 knop alt etter båtens form, lengde og fremdriftsmaskineriets størrelse. I Figur 3 er det to muligheter for å implementere en motor/generator: imellom forbrenningsmotor og gir og mellom gir og propellaksling.

Om båten skal brukes til dorging (fiske i lav hastighet) eller finmanøvrering i lave hastigheter, benyttes det gjerne et såkalt «sluregir». Dette er et gir som har muligheten til å slure innkoblingen av propellakslingen ved hjelp av å redusere koblingstrykket på lamellene i giret [13]. Dette, sammen med økt oljestrøm over lamellene, fører til at en kan få lavere hastigheter enn det som ellers ville vært praktisk mulig. Slike gir er kostbare og krever som oftest en egen oljekjøler for å fjerne varmen som blir skapt når en slurer innkoblingen. Med en elektrisk motor kan en rotere propellakslingen med særdeles lave turtall. Den vil også kunne gå i det nedre lastområdet over lengre tid uten problemer gitt at batteriet har nok kapasitet og er oppladet. Det er ikke gunstig for en forbrenningsmotor å gå for lenge på tomgang/lavlast, da det kan medføre sot-oppygning og forurensing av motorolje grunnet lav driftstemperatur.



Figur 3: Forbrenningsmotorens ulike tilknytninger i båten

2.2 Pantry og varme

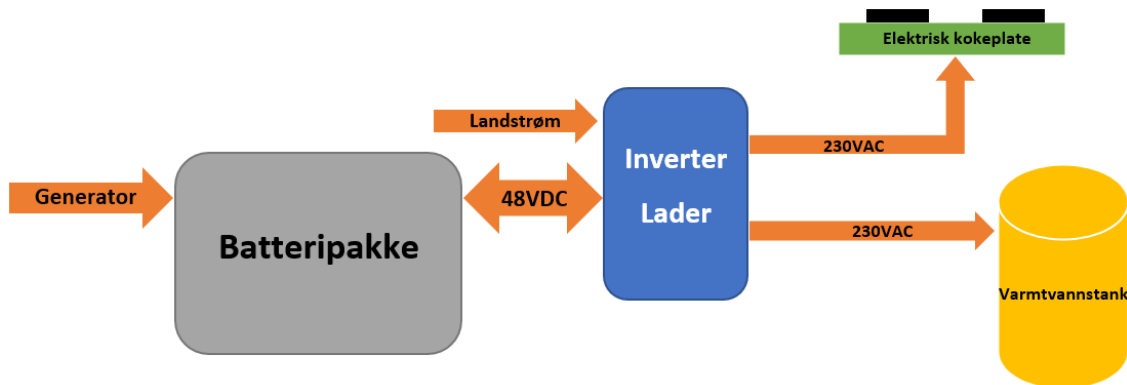
Dette kapittelet er med for å vise kilder til sekundære forbrukere i en moderne fritidsbåt. Særlig oppvarming av båt, matlaging og varmtvann er forbrukere av energi. Dieselvarmer er mye brukt til oppvarming og et gass-/sprit apparat til matlaging (som vist i Figur 4). Bruk av hybride løsninger kan åpne for å erstatte disse forbrukerne med elektriske alternativ.



Figur 4: Pantry i båt med et typisk sprit-kokeapparat under passasjersele [14]

Kombinert med landstrøm og generator på hovedmotor kan en minimere forbruket av diesel/gass/sprit som går med til oppvarming. De fleste mindre kokeapparat kan være en kilde til eksos som er uønsket inne i båten. Bruker man elektriske alternativ, som i Figur 5, unngår man dette ved å

la motoren gå med en konstant generatorlast i perioder slik at den kan effektivt lade opp batteriene. Ladingen kan økes ved å bruke et spillvarmesystem for å gjenvinne termisk energi fra eksos og kjølevann.



Figur 5: Forslag til elektrisk pantry

Både biler og båter benytter i dag varmen fra motorens kjølevann for å varme opp cabinen, ved hjelp av et varmeapparat som vist i Figur 6. Denne formen for spillvarmeutnyttelse er godt utbredt i dag. En kan få kjøpt ulike defrostere/varmeapparat i varierende størrelser hos de fleste maritime utstursbutikker. Ved å utbedre denne eksisterende løsningen, slik som i Figur 7, kan en i flere tilfeller hente ut mer varme fra kjølekretsen. På en kald dag kan det være aktuelt å ta ut like mye effekt som en kjøler ellers ville hentet ut fra kjølevannet (sett at det er behov for å ha det). På denne måten får en varme i båten uten ekstra driftskostnad, som en dieselvarmer ellers ville ha medført. I båter der det er montert varmtvannstank har denne vanligvis tilkoblinger til motorens kjølevann. Inne i tanken er det et rør (spiral) der kjølevannet kan overføre varme til ferskvannet i varmtvannstanken.

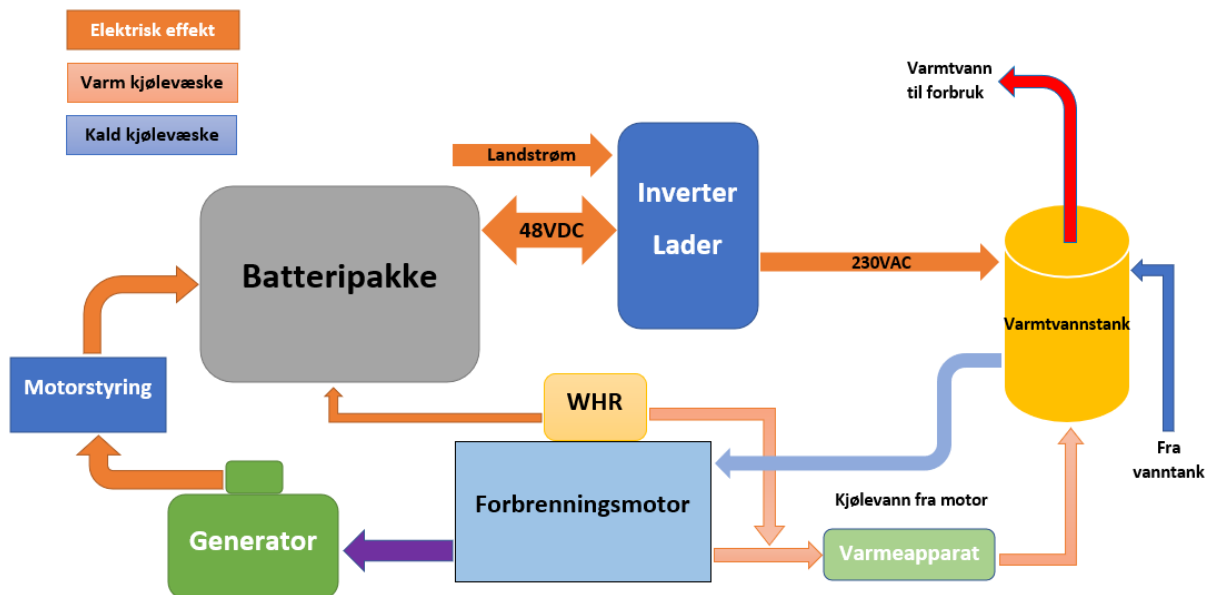


Figur 6: Eberspächer defroster/varmeapparat 12V/10 kW fra maritim båtutstyr

Når det ikke er behov for oppvarming på varme dager, får man ikke brukt denne varmen til noe nyttig. Derav vil dette prinsippet alene ikke være til stor nytte annet enn de dagene det er behov for oppvarming.

En god middelvei kan være å bruke en varmeveksler til å hente ut avgassvarme fra eksosen etter den har blitt kjølt ned over en organisk rankine syklus (ORC) eller Stirling maskin som konverterer det til mekanisk/elektrisk energi. Dermed har en fremdeles mulighet for «gratis» oppvarming av cabin. Dette kan kombineres med kjølevannsvarmen fra motoren for å få mer effekt ut av ORC-kretsen. En kan deretter bruke eksosvarmen til å heve temperaturen på vannet, noen ekstra grader, før det blir sendt til varmeapparatet.

Utfordringen er å få en god varmeveksler siden den må skape minimalt med mottrykk i eksosen, overføre mest mulig varme, tåle de høye eksostemperaturene, være korrosjonsbestandig og kompakt. Samtidig som en slik veksler ikke skal bli for dyr.



Figur 7: Alternativ varmtvannskrets i båt

2.3 Hybride fremdriftssystemer på markedet

Tabell 1 viser en oversikt over noen av de mer kjente leverandørene for fremdriftsmotorer for dagens fritidsbåtmarked. Flere firmaer leverer ulike former for hybride løsninger med variasjoner i type hybridssystem (serie, parallell, kombinasjon) og størrelse. Ikke alle leverer slike løsninger til det minste segmentet.

Et utvalg av motorer for fritidsbåter tilgjengelig for det norske markedet					
Firma navn:	Nasjonalitet:	Effektområde:	Basemotorer:	Norsk forhandler:	Kommentar:
<i>Nanni</i>	Fransk	7-236 kW	Kubota, Toyota	NOGVA	Har hybridløsninger
<i>Vetus Marine</i>	Nederlandsk	8-155 kW	Mitsubishi, Deutz, Hyundai, Fiat(FPT)	Univa	Leverer elektrisk fremdrift
<i>Beta Marine</i>	Britisk	7-85 kW	Kubota	Beta Marine Norge	Har hybridløsninger
<i>Yanmar</i>	Japansk	6-324 kW	Yanmar, BMW, Toyota	Yanmar	Har hybridløsninger
<i>Volvo Penta</i>	Svensk	9-551 kW	Volvo, Deutz, Perkins	Volvo Penta	Har hybridløsninger for større båter
<i>Lister-Petter</i>	Britisk	5-37,5 kW	Lister-Petter	Frydenbø	Leverer generatorer
<i>Hatz</i>	Tysk	1,5-62 kW	Hatz	Indutrimotor	Leverer generatorer
<i>Hyundai Seasall</i>	Sør-Koreansk	51-200 kW	Huyndai	Telemark-Trade	Kjem med hybridløsning
<i>Cummins Marine</i>	Amerikansk	172-2013 kW	Cummins	Cummins, Nogva	Leverer generatorer
<i>Perkins</i>	Britisk	24-218 kW	Perkins	Universal Diesel AS	Leverer generatorer
<i>Deutz</i>	Tysk	35-450 kW	Deutz	Frydenbø	Deutz har elektrifiserte drivlinjer i konsernet
<i>TD Power</i>	Kinesisk	10-294 kW	TD	Telemark-Trade	Enkelte motorer kan være lisensproduserte
<i>Solè Diesel</i>	Spansk	11-200 kW	Kubota, Mitsubishi, Deutz	Bolga Maritime AS	Har også generatorer
<i>Craftsman Marine</i>	Nederlandsk	11-60kW	Mitsubishi, Hyundai	Craftsman Marine	Kan leveres som hybrid via Junker Marine AS
<i>Bukh A/S</i>	Dansk	17-736 kW	Bukh, Volvo Penta	Bukh AS (Danmark)	Leverer motorer primært til livbåter

Tabell 1: Oversikt over noen motorleverandører til fritidsmarkedet, data hentet fra produsentenes nettsider

Leverandører som bl.a. Beta Marine, i samarbeid med Hybrid marine UK [15], har allerede levert flere hybridløsninger til bla. kanalbåter i England [16]. I samarbeid med andre selskaper kan de også levere løsninger som gir strøm til eksternt forbruk om bord.

Fremdriftssystemet som blir presentert her i oppgaven vil ikke skille seg drastisk fra de systemene som en kan anskaffe seg (per) i dag. Men det vil forsøke å dekke et bredt bruksområde med hensyn på flere aspekter enn bare fremdrift. Benytter en ulike komponenter og systemløsninger er det mulighet for å få utvidete muligheter når det kommer til internt forbruk i selve båten. Dette uten å benytte seg av en ekstern generator eller varmer/ovn. Hybridsystemene som er i markedet i dag, har fremdeles et ubenyttet potensial når det kommer til å bruke spillvarme fra den eksisterende forbrenningsmotoren.

I Figur 8, Figur 9 og Figur 10 blir det presentert tre systemer som kan kjøpes i dag.

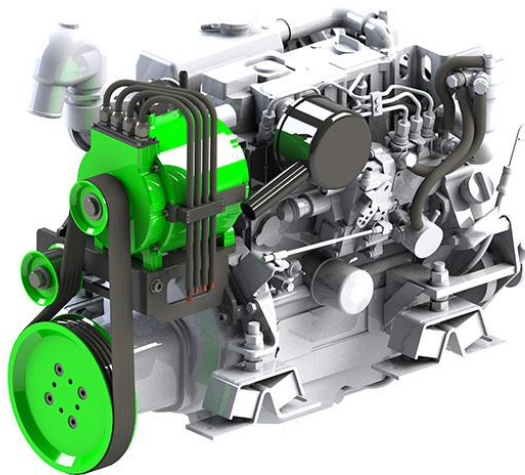
➤ **Junker Marine: E-Tech**



Figur 8: E-Tech parallellhybrid for fritidsbåter [17]

Her er det en elektrisk motor koblet imellom gir og propellanlegg. De leveres i effektområde fra 4-35kW ifølge Junker Marine AS.

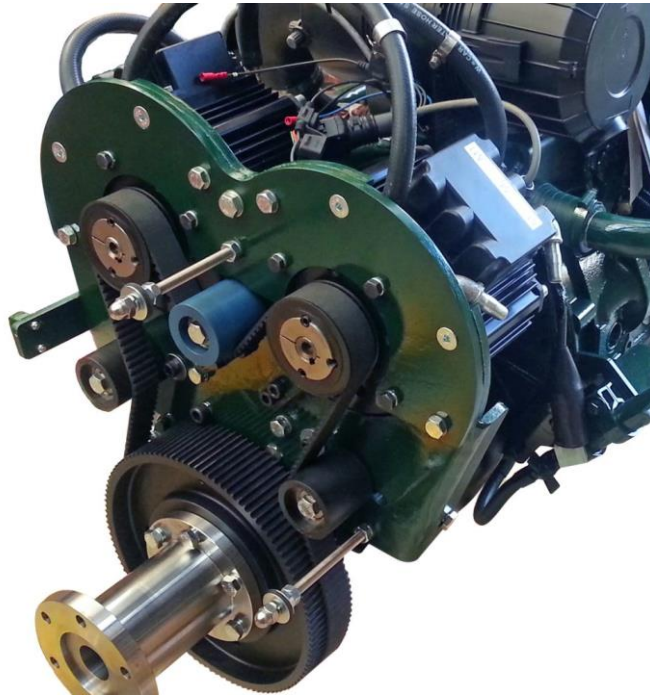
➤ **Combi Outboards: CH6**



Figur 9: Combi Outboards sin hybride løsning [18]

Dette systemet benytter seg av en tannreim for overføring av effekt fra og til den elektriske motoren. Elektrisk effekt er oppgitt til 6kW. Den elektriske motoren kan også fungere som generator.

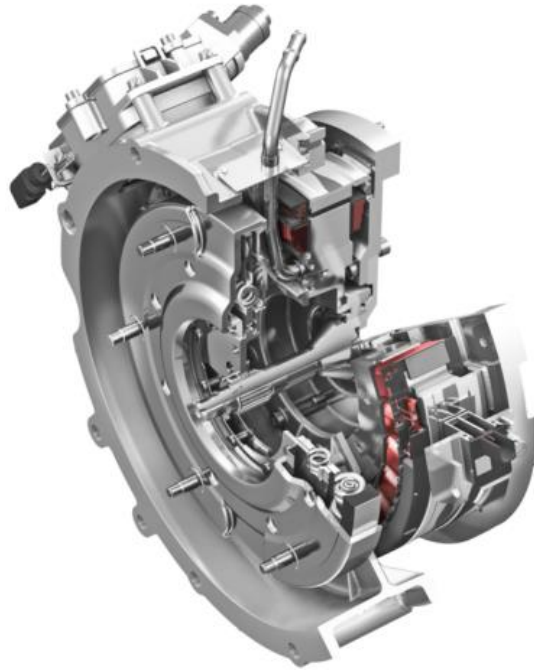
➤ **Beta Marine Hybrid**



Figur 10: Beta Marine sitt hybridsystem [19]

Beta Marine (i samarbeid med Hybridmarine UK) leverer dieselmotorer for hybrid drift i størrelsesorden 43-115hk, med elektrisk effekt opp til 20kW. Systemet bruker tannreim til å overføre kraften fra de elektriske motorene. På de mindre systemene har de en elektrisk kobling mellom elektromotor og reimskive. El-motorene kan også brukes som generatorer.

De fleste eksisterende fremdriftssystem kan oppgraderes til et hybridsystem ved å montere inn en ekstern elektromotor som i Figur 8, Figur 9 og Figur 10. Den mest kompakte løsningen vil ligne på det som er vist i Figur 13 en integrert elektromotor (med kobling) som er montert mellom motorblokk og marine gir. Dette vil i stor grad redusere plassbehovet av fremdriftsenheten i båten. Slike integrerte elektromotorer har, som regel, et snevrere marked og er derav mindre tilgjengelige for anskaffelse for privatpersoner. Spesielt om en tar hensyn til at en også trenger en tilpasset motorstyring. Et fremtidig system kunne med fordel benytte en elektromotor slik som denne fra ZF vist i Figur 11.



Figur 11: "DynaStart" elektrisk motor fra ZF [20]

2.4 Eksisterende løsninger for reduksjon av utslipp i transportsektor

Inspirasjonen for hvordan en kan redusere utslippet fra en moderne fritidsbåt er i stor grad hentet fra skips- og bilindustrien. Utvalgte løsninger er beskrevet i de påfølgende underkapitler. Det finnes flere gode systemer som ikke er omtalt i denne oppgaven, her er bare tatt med de systemer som er ansett som mest aktuelle for bruk i en fritidsbåt.

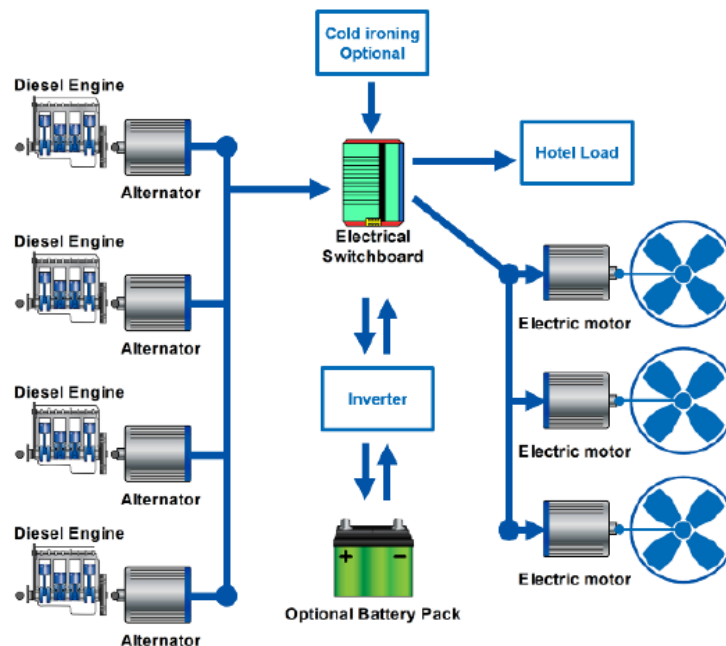
2.4.1 Maritim fremdrift

I skipsindustrien er det flere endringer som er blitt testet og gjennomført for å redusere utslippene av CO₂, NO_x og andre uønskede utslipp. Et av de første tiltakene som kom var kravene til renere drivstoff med lavere svovelinnhold. Dette sammen med gode rensesystemer for avgass har ført til en betraktelig reduksjon av de mest uønskede utslippene fra eksosen. Grunnet størrelsen til et skip kan en benytte seg av mer omfattende systemer for rensing av avgassen fra forbrenningsmotorene om bord. Slike system vil bli for store for mindre båter, derfor må en se til industrien for bil/lastebiler for å finne mer passende utstyr til en fritidsbåt.

Drivstoff er ikke eneste området der har vært en utvikling, hybride systemer er også et kjent for større skip. Med slike systemer kan de gå med elektrisk fremdrift i havner eller kulturarv-fjorder. Grunnet størrelsen og effekten fra skipsmotorene er det relativt enkelt å hente tilbake store effekter fra eksosen. De fleste store skip har allerede en eksoskjel til oppvarmingsformål som kan utvides om man monterer inn en spillvarme krets. Dette gjør til at eksosvarmen, til en viss grad, kan lade opp batteripakken mens en kjører hovedmotorene.

Diesel-elektrisk fremdrift egner seg godt for konvertering til hybriddrift da en bare trenger å montere inn en batteripakke og en omformer/inverter. Batteriet kan også drive eventuell hotell-last (lys, varme, matlaging, vannpumper, underholdning, osv.) om det er behov for det. På denne måten slipper en å la

hjelpemotorer gå når en ligger i havn (avhengig av hvor stor kapasitet batteriene har). I Figur 12 kan en se deler av en simuleringsmodell for et skip med et seriehybrid fremdriftssystem.



Figur 12: Hybrid modell av en større ferge i Ricardo IGNITE [21]

De elektriske motorene er kompakte, effektive og har høy ytelse. Batteriene krever stor plass, god ventilasjon/kjøling og tilfører mye vekt til skipet. Å få ønsket elektrisk rekkevidde uten at det i for stor grad påvirker lastekapasiteten til skipet er en utfordring. Pris er også en viktig faktor siden batterier av den størrelsesordenen som er nødvendig her er ganske omfattende. Her kan også hydrogen være en meget aktuell kandidat når det kommer til energilagring, ved hjelp av en brenselcelle. Fordelen er da at en kan lagre mye energi og utslippet vil være i form av vann. Riktignok er lagring av hydrogen en utfordring, beskrevet i kapittel 2.5.

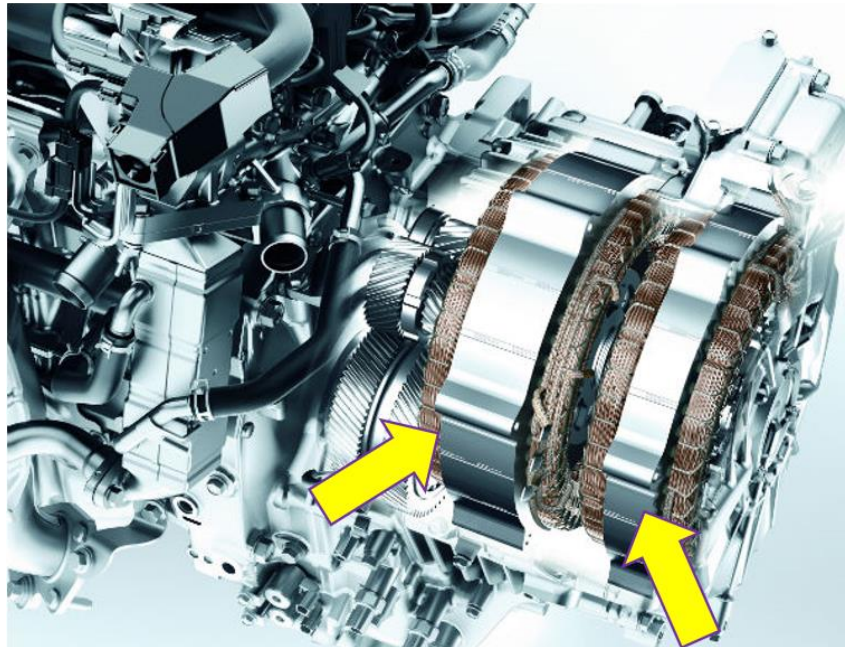
Ideer/løsninger fra skipsindustrien som er interessante å vurdere videre i denne oppgaven kan listes opp i følgende punkt:

- Hybridisering
- Spillvarmegjenvinning (WHR)
- Alternative drivstoff
- Rensing av avgass

2.4.2 Lette kjøretøy: motoreffekter opp til 200kW

Denne sektoren er meget aktuell med tanke på størrelsesorden, pris, effektområde og vekt. Elektrifisering og hybridisering av bilparken har hatt hovedfokus i media de siste årene. Dette har medført en stor utvikling av systemer, løsninger og komponentpriser. Mye av teknologien kan benyttes i flere sektorer enn bare bil/transport. Et eksempel på dette kan være at en benytter seg av gamle elbilbatterier til å forsyne hytter, eller andre fritidsboliger, med strøm gjerne kombinert med et solcelleanlegg.

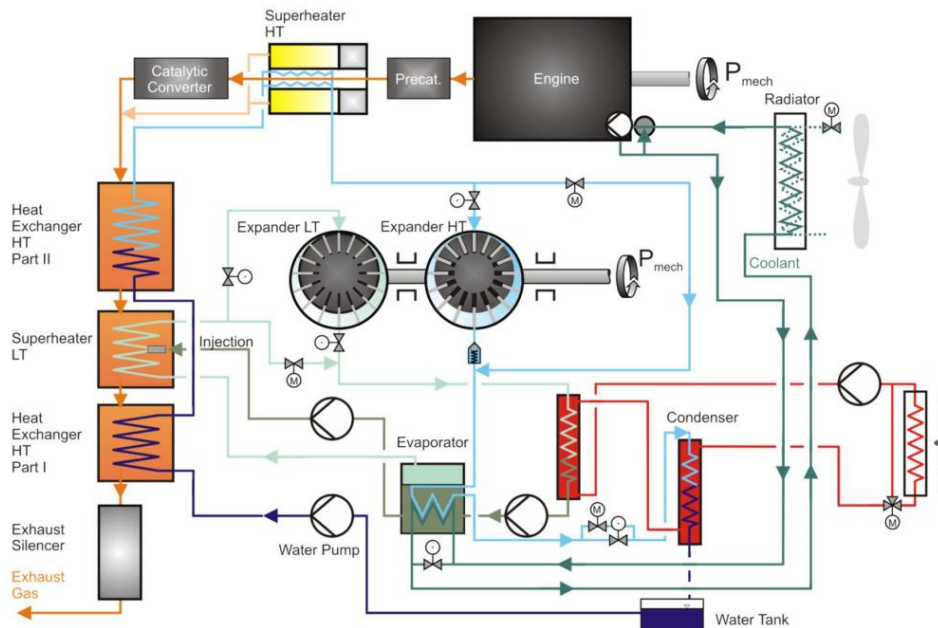
På den elektriske siden av et hybridsystem kan en gjerne bruke komponenter og systemløsninger nærmest direkte fra biler (motor og generator vist i Figur 13). Spesielt litiumbatterier, i størrelse- og effektområder aktuelle for å benytte i fritidsbåter, har sett en kraftig utvikling grunnet den økte populariteten av elektriske biler.



Figur 13: Motor og generator (gule piler) fra en 2014 Honda Accord Hybrid [22]

Innenfor landbasert transportsektor har det også vært en spennende utvikling av spillvarmegjenvinning-systemer, dessverre er ikke disse like utbredt som de hybrid systemene. Selv om utviklingen har vært lovende har ikke løsninger med varmegjenvinning funnet veien til markedet enda. Det kan være flere årsaker til dette, men en årsak som går igjen er at virkningsgraden ikke er høy nok i forhold til den ekstra kostnaden og vekten som blir tilført kjøretøyet [23].

Systemer med ORC (se kapittel 2.7.3), eksempel vist i Figur 14, har vært prøvd av blant annet BMW og Honda [23]. Ifølge selskapene skal de har klart mellom 4 og 15% økning i den totale virkningsgraden til bilen. Siden personbiler og lastebiler vanligvis går med transient last er spillvarme teknologi fra disse aktuelle å vurdere for bruk i en fritidsbåt med en mindre motor. Det kan tilsa at en kan få hentet ut effekt selv om en ikke går med full belastning over lengre tid. For en tilsvarende motorstørrelse i en båt kan en forvente å se en økning i effekten som WHR-systemet kan hente ut siden det vil være mer spillvarme å hente energi fra.



Figur 14: BMW sitt Turbosteamer system med lav- og høytrykkskrets og to ekspandere [24]

I tilfeller der en ikke har elektrisk fremdrift eller batterier kan det være aktuelt med mekanisk spillvarmegjenvinning, også kjent som «Mechanical turbocompound». Her bruker en eksos fra forbrenningsmotor til å drive en turbin som er mekanisk tilkoblet motorens drivverk. På denne måten kan en ekspandere og kjøle avgassen over turbinen og sende den ekstrakterte energien tilbake til drivverket.

En annen løsning for å redusere utslipp fra forbrenningsmotoren i et hybrid fremdriftssystem er å endre driftsmønsteret til motoren, slik Nissan sitt «e-power» konsept [25]. Her vil forbrenningsmotoren gå med konstant turtall og last, noe som tillater at en kan optimalisere motoren for drift i ett snevert driftsområde.

Her er det flere prosent (termiskvirkningsgrad) som kan hentes inn. Nissan selv sier de har som mål å nå en termiskvirkningsgrad på hele 50%, en meget imponerende verdi for en tre-sylindret bensinmotor med 1,5 liter slagvolum. Også her har de basert seg på å utnytte spillvarme fra forbrenningsmotoren. Nissan har medregnet at 5% poeng i økning av virkningsgrad kommer fra et WHR-system.

For å benytte denne sistnevnte metoden i en båt er det en del som må legges til rette, motoren vil da fungere utelukkende som en generator. Denne løsningen er mest aktuell for et seriehybrid fremdriftssystem. En må også få konstruert en unik motor for størrelsesklassen en behøver. En har ikke mulighet til å velge andre motorer enn de som er presentert på markedet i dag, derfor kan dette være et alternativ for fremtidige løsninger.

Om en bruker den elektriske motoren til å handtere seg av lavlast-området og toppene i høy-ytelses regionen kan en sørge for at forbrenningsmotoren kan gå mer i det gunstigste driftsområdet.

Løsninger og systemer fra bil og lastebil som er aktuelle å vurdere for bruk i fritidsbåt:

- Hybridisering
- Spillvarmegjenvinning
- «Turbocompounding»
- Optimalisert driftsmønster

2.5 Energilagring

Det mest utbredte metoden er lagring av flytende drivstoff i en drivstofftank. En kan da kalkulere hvor langt en kan reise ut ifra volumet til tanken og drivstoff parametere. Drivstoff som bensin og diesel har en god energitetthet på volum- og massebasis i forhold til drivstoff i gassform. Lagring av gasser skjer vanligvis på en av to måter ved lagring på tank: komprimert eller nedkjølt. På denne måten øker tettheten til gassen og den krever et mindre volum for lagring av samme masse. Nedkjøling er energikrevende og krever tanker med spesiell legering for å håndtere den lave temperaturen. Tankene må også godt isoleres for å hindre oppvarming av gassen. Ved ren komprimering av gassen må en opp i meget høye trykk for å få tilfredsstillende energitetthet, dette medfører øket risiko for lekkasje og eksplosjon.

Ut ifra tetthet og brennverdi i Tabell 2 er det fremdeles flytende drivstoff som er å foretrekke til bruk i fritidsbåt. Et godt alternativ er biologiske- eller syntetiske drivstoff fra fornybare kilder. Disse kan ha tilsvarende egenskaper som fossile drivstoff når det kommer til brennverdi og tetthet. De vil også, i de fleste tilfeller, kunne benyttes av den eksisterende infrastrukturen som allerede er etablert langs kysten for drivstoff distribusjon.

		Bensin	Biodiesel/FAME	Hydrogen*	LNG**	Diesel	HVO
Tetthet	kg/m ³	745	888	82.7	468	837	779
Brennverdi	MJ/kg	43	38	50	55	43	43
Karbon innhold	%	87	77	0	75	86	77
CO ₂ utslipp	g/MJ	67-73	75	0	50	72-74	75

*1 bar, 293K **109,7K

Tabell 2: Oversikt over noen drivstoff, legg merke til tetthet og brennverdi [26-29] (karbon innhold i vektprosent)

Kommersiell skipsfart ser på alternative drivstoff med lavere karbonintensitet som for eksempel LNG og hydrogen (ammoniakk). Dette er ikke en opsjon for fritidsbåter og privatpersoner pga kostnader, infrastruktur, sikkerhet, størrelse av systemer (lagring) og kompleksitet. Derfor tas det ikke hensyn til det i denne oppgaven heller batteri og hybrid.

I et hybridssystem har en to former av energi som lagres. I denne oppgaven vil disse to være: flytende brennstoff og elektrisk energi. Batterier er mest utbredt for lagring av elektrisk energi, en lagringsform som de siste årene har hatt en stor utvikling.

Det er et pågående ønske om å øke energitettheten til batterier samtidig som en ikke bør benytte seg av miljøskadelige materialer eller prosesser i tilvirkningen. Per i dag er det litium-baserte batterier som er det alternativet med høyest energitetthet (se Tabell 3). Disse batteriene krever en sofistikert overvåkning for å være trygge til å bruke. Både spennings- og temperaturnivåer må alltid være innenfor visse verdier for å unngå forringelse av batteriets levetid. Enkelte litium-baserte batterier medfører en betydelig brann/eksplosjonsfare om de opplever tilstander utenfor de gitte spennings- og temperaturområdene.

Slike overvåkningssystemer blir kallet «Battery management systems» (eller BMS) og har som funksjon å begrense maksimal utladning og oppladning av batteriene. Også balansering av cellespenning er en viktig oppgave for et BMS-system. Ved over- eller underspenning vil BMS kutte forbindelsen til forbruker, eller varsle om at spenningsnivå er farlig høyt eller lavt.

Baserer man seg på bly-batterier blir vekten stor, mens prisen er forholdsvis lav (for nye batterier) [30]. I enkelte båter går dette fint, da det er nok plass og behovet for ballast er stort. For et bredere forbrukersegment vil litiumbatterier være en mer allsidig løsning. Her blir prisen en utfordring om en benytter nye batterier.

Batteritype	Energi tetthet	Fordeler	Ulemper
Blybatterier	80 Wh/kg	Kjent teknologi, lav pris	Levetid, vekt, utladningskapasitet berre 50%
Litium Titanate	50-80 Wh/kg	Levetid, stabilitet	Energitetthet, kostnad
Litium Koboltoksid	150-200 Wh/kg	Energitetthet	Kostnad, følsomt
Litium Nikkel Mangan Koboltoksid	150-220 Wh/kg	Energitetthet	Kostnad, stabilitet
Litium Jern Fosfat	90-160 Wh/kg	Stabilt, lang levetid	Energitetthet

Tabell 3: Tabell med energitetthet over ulike batterier [31, 32]

En annen mulighet er å benytte seg av utrangerte batterier fra elbiler. Da dreier det seg om litium-baserte batterier som skal sendes til gjenvinning. Mange av disse batteriene er fremdeles i god stand og har mange sykluser igjen før de må gjenvinnes. Dette er ansett som det beste alternativet når det kommer til lagring av elektrisk energi i hybridsystemer for elektriske fritidsbåter, per dags dato, både med hensyn på miljø og pris.

For å kunne benytte batteriene må de demonteres, cellene må separeres og et nytt BMS system må tilpasses. Da det er en viss risiko å jobbe med slike batterier er det tryggeste alternativet å la faglærte utføre akkurat denne ombyggingen. Firma som Chainpro [33] leverer batteripakker med innebygget BMS for bruk til forskjellige formål.

2.6 Energibalanse

En kan begynne med å analysere den generelle virkningsgradformelen for en varmekraftmaskin. Denne kommer fra den ideelle Carnot-syklusen [34], og baserer seg på temperatur differansen til temperaturkilden og -sluket.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.1)$$

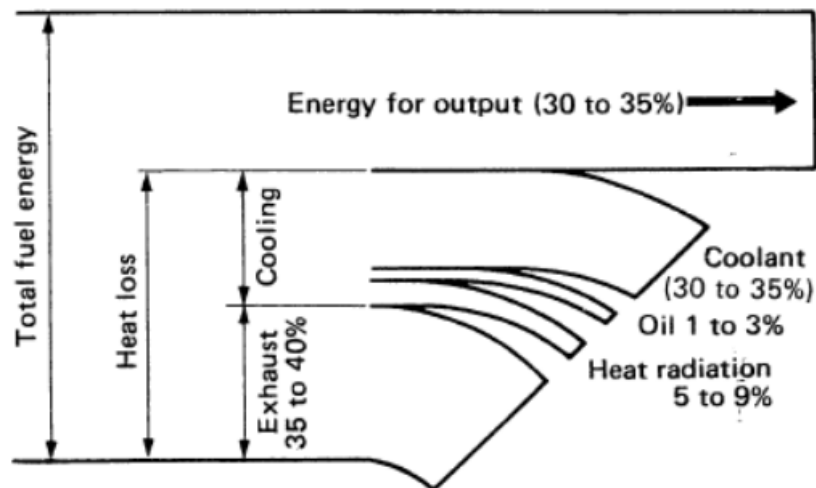
En forbrenningsmotor kan aldri nå den samme virkningsgraden som vi får fra Carnot-syklusen. Denne viser den teoretisk maksimale virkningsgraden en varmekraftmaskin kan oppnå. En bruker denne for å sammenligne hvor god en aktuell maskin er i forhold til den teoretisk øvre grensen.

Utrekninger som gir mer reelle virkningsgrader baserer seg gjerne på faktorer som tilført varmeenergi og avgitt nyttig arbeid [35]:

$$\eta_{th} = \frac{W_{avgitt}}{\dot{Q}_{tilført}} \quad (2.2)$$

Moderne 4-takts dieselmotorer (avhengig av størrelse og teknologi) ligger i området 30-42% termisk virkningsgrad [36]. Det tilsier at rundt 40% av energien i brennstoffet blir omgjort til nyttig arbeid på utgående aksling. De resterende 60% går tapt til friksjon, pumpetap, ufullstendig forbrenning og varmetap.

For de mindre dieselmotorene er det mer spillvarme per tilførte energienhet enn for de større 4-takts dieselmotorene. Figur 15 viser at 30-35% av tilført energi går til kjølevannet mens 35-40% går tapt til eksos. Noen av årsakene til dette er at i en større dieselmotor ofte benytter mer teknologi enn de mindre motorene. I tillegg spiller effektene av forbrenningsvolum og overflater inn: øker en forbrenningsvolumet vil dette øke kubisk, mens overflatene (varmetap og friksjon) øker kvadratisk.



Figur 15: Sankeydiagram fra Kubota: energiflyt for mindre dieselmotorer [37]

De mindre motorene har fremdeles en viktig rolle trass den noe lavere virkningsgraden, sammenlignet med de større motorene. Et teoretisk eksempel, presentert i Tabell 4, viser et bilde over energiflyten i en mindre motor. Grunnlaget for eksempelet er basert på Sankeydiagrammet fra Kubota vist i Figur 15.

Innfyrteffekt	36,6 kW
Akseleffekt	12,0 kW
Varme tilført kjølevann	10,6 kW
Varme til eksos	11,7 kW
Varme til olje	1,1 kW
Strålingsvarme	1,2 kW

Tabell 4: Eksempel: 12kW vannkjølt dieselmotor

Her er tall for en tenkt dieselmotor med en kontinuerlig effekt på 12kW. Innfyrt effekt (effekt tilført motor fra drivstoffet, basert på nedre brennverdi) er på 36,6kW. Dette er effekten som er bundet kjemisk i tilført drivstoffmengde. For disse mindre dieselmotorene er det to energikilder som er interessante for spillvarmegjenvinning: kjølevann og eksos.

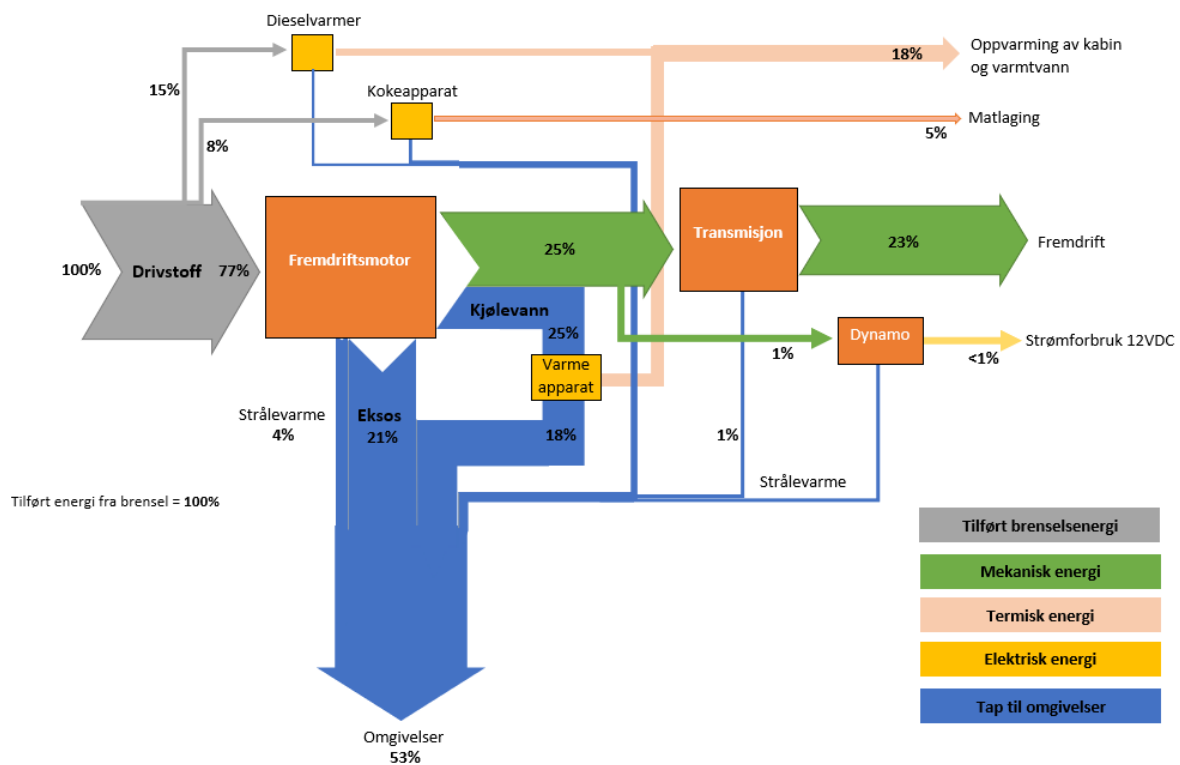
Strålingsvarme er meget utfordrende å hente siden dette vil være varmestråling i det infrarøde spekteret, og derav ikke direkte overførbart til en enkel innretning. For små motorer er det heller ikke

så mye varmeeffekt å hente i smøreoljen siden strømningsvolumet, og total volumet av motorolje, er relativt lavt. De minste motorene har ikke oljekjøler siden kjøleeffekten av luftkonveksjonen rundt selve bunnpannen er nok til å hindre at oljetemperaturen blir for høy.

Kjølevannsvarmen kan enkelt brukes til oppvarming siden temperaturen er i området 70-90°C ut fra motor. Ser vi tilbake til Carnot-virkningsgraden i formel 2.1, så ser en at det ikke er så stort potensiale å hente ut mekanisk energi fra kjølevannet da det ikke vil kunne gi en stor nok temperatur differanse med sjøvann som kjølevæske på en varm sommerdag (høyere temperatur i sjøen/kjølemediet).

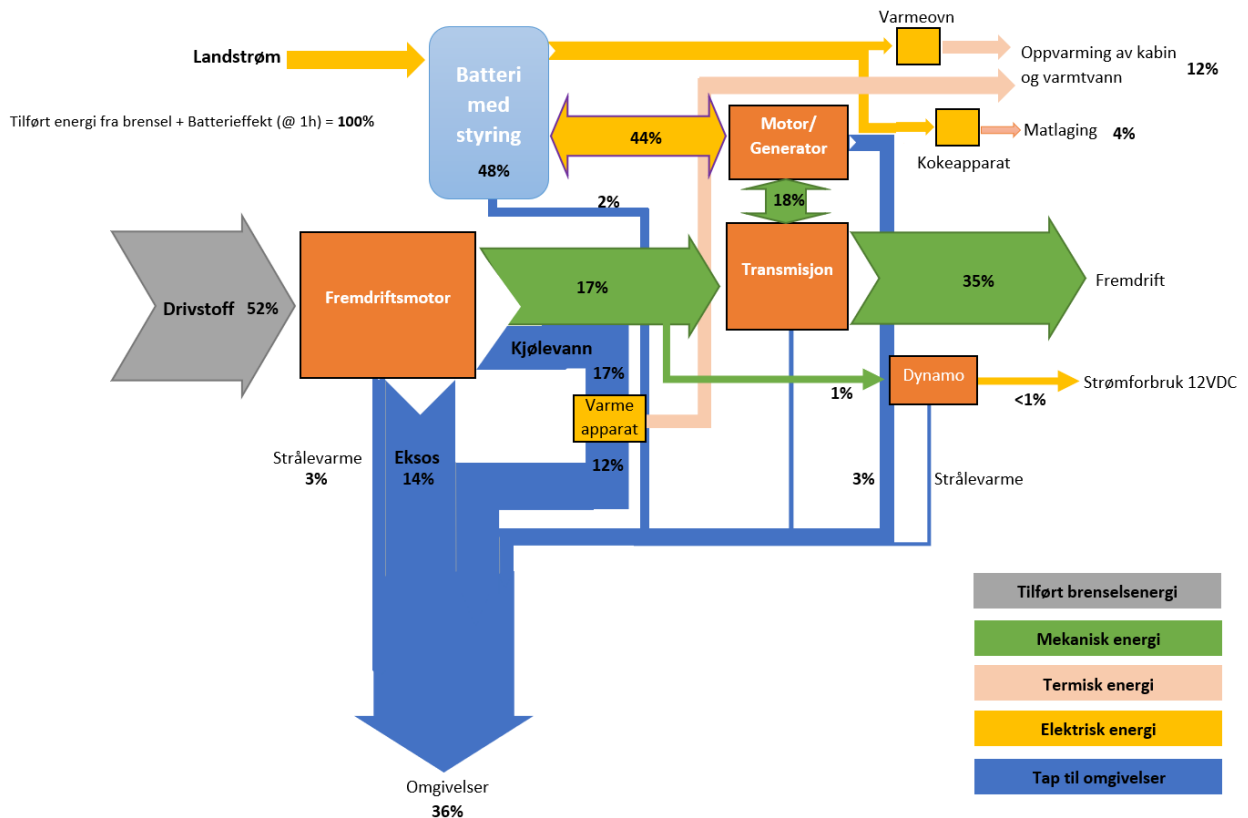
Eksosvarmen har mye høyere temperatur, typisk ~250-350°C for ikke turboladede motorer [38]. Her vil det være aktuelt å se på hvordan en kan hente ut energi og konvertere det til elektrisk energi som kan sendes tilbake til batteriet.

For å vise energiflyten i et system kan det benyttes et flytdiagram for energi, som kan gi en god oversikt over hvordan den tilførte energien blir fordelt i systemet. Verdiene i Figur 16 og 17 er basert på den totale tilførte energien fra drivstoff og batteripakke. Verdiene er estimerer basert på verdier fra Excel kalkulatoren, omtalt i kapittel 3.3.



Figur 16: Energi flytdiagram for et vanlig fremdriftssystem med dieselvarmer og kokeapparat

Figur 16 viser diagrammet for et ordinært fremdriftssystem uten hybriddrift. En andel av drivstoffet blir brukt til oppvarmingsformål. 53% av den tilførte energien fra drivstoffet går tapt til omgivelsene. Dette vil være omtrent likt for begge diagrammene, men siden den totale tilførte energien er mindre i Figur 16, og majoriteten omsettes av forbrenningsmotoren alene, vil andelen av energi tapt til omgivelsene være høyere (prosentvis) enn for det hybride diagrammet.



Figur 17: Energi flytdiagram for et hybrid fremdriftssystem

I Figur 17 er det presentert hvordan energiflyten kan se ut for et parallellhybrid fremdriftssystem med et drivstofftankvolum på 40 liter (også brukt i kapittel 5.2). Den tilførte totale energien i kW er større siden en kan hente energi fra både drivstoffet og batteripakken. Andelen som tilføres fra landstrøm kan variere fra 0-100%, alt etter hvor stor andel elektrisk fremdrift en velger å benytte. En kan også bruke forbrenningsmotoren til å lade opp batteripakken i perioder der en ikke har behov for stor fremdriftskraft. Hvordan en kjører/bruker systemet har stor påvirkning på energiflyten og CO₂-utslippet. Verdiene vil kunne variere basert på hva en velger som den totale tilførte energimengden. Verdiene kan studeres nærmere i vedlegg A.

Det er ønskelig å vite den faktiske belastningen på motoren under drift, i utgangspunktet vet en bare hva turtall forbrenningsmotoren går med i et gitt driftstilfelle. I motsetning til Otto-motorer så er det ingen luftregulering nødvendig på en enkel dieselmotor. Derav kan en benytte seg av drivstofforbruksmålere for å kalkulere motorens ytelse/last. Denne funksjonen er viktig om en vil kjøre motoren i det mest effektive driftsområde. For mindre dieselmotorer kan en benytte seg av en enkel strømningsmåler (flowmeter), som vist i vedlegg B. Større motorer trenger to strømningsmålere: en for tilførsel og en for retur.

2.7 Spillvarmegjenvinning

Spillvarmegjenvinning handler om å utnytte energi som vanligvis går til tapt (ubrukt til omgivelsene). I de fleste sammenhenger vil det være snakk om termisk energi som forlater et system, men som har potensiale for videre konvertering. Dette kan bli et meget aktuelt satsingsområde så lenge termiske maskiner er i utbredt bruk. Kombinasjonsanlegg vil kunne gi bedre totale virkningsgrader enn en enkelt termisk maskin alene.

Bare en del av den tilførte energien i brennstoffet blir omgjort til nyttig mekanisk arbeid fra en gitt maskin. Resten av energien «forsvinner» via forskjellige varmestrømmer ut av maskinen [39]. Det er derfor viktig at en kjenner energifordelingen til maskinens ulike systemer (Figur 15). Energibalansen, eller varmebalansen, for en maskin vil være utgangspunktet for dimensjonering av kjølesystem, ventilasjon og mulig spillvarmegjenvinning fra maskinen.

For mindre fremkomstmidler som personbiler, lastebiler og fritidsbåter er det særlig to metoder for innhenting av energi fra spillvarme som er interessante: regenerering av spillvarme for å levere effekt direkte tilbake til fremdriftssystemet, og regenerering der en driver en generator for opplading av et batteri.

Teknologier som utnytter energien som ellers ville gått til spille er kjernen i et spillvarme-system [39]. Denne typen teknologi er blitt mer aktuell i dag med økende drivstoffkostnader og skjerpet søkelys på utslipp og grenseverdier for disse. Spillvarme utnyttelse brukes spesielt for anlegg som har en høy avgasstemperatur og arbeider med jevn høy belastning [39]. Aktuelt for ulike industrier og fartøy [39]:

- Prosessindustrien: Eksempelvis avgassen fra en smelteovn kan nyttes til å drive en eksoskjel og forsyne et anlegg med damp.
- Gassturbin kraftanlegg: Beste eksempelet her er såkalte «Combined Cycle Gas Turbines» (CCGT).
- Større motordrevne kraftanlegg
- Store skipsmotorer

Denne teknologien har også blitt brukt i transportkjøretøy på land, men i mindre grad. Både BMW og Mahle har systemer som kan brukes i landbaserte kjøretøy [40, 41]. Kommersialisering av spillvarmegjenvinning vil komme godt med for teknologiens modenhet og utbredelse. Jo flere systemer som blir utviklet jo bredere bruksområde får denne typen systemer.

Spillvarme fra et system har ulike temperaturer og mengder noe som gjør til at det ikke er så lett å hente ut all energien i ett og samme system. Vanligvis kan en utnytte spillvarme direkte til oppvarming, eller omgjøre den til elektrisk energi.

En skiller mellom lavtemperatur- og høytemperatur spillvarme [39, 42]:

- Lavtemperaturvarme: Under 230°C
- Medium temperaturvarme: mellom 230 og 650°C
- Høytemperaturvarme: over 650°C

Graden av utnyttelse vil også avhenge av mengden og varmekapasitet av det gitte mediet. En varmestrøm vil kunne gi energi etter formelen:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Forkortelser:

Q = Varmemengde [J]

m = Masse [kg]

C_p = Spesifikk varmekapasitet [J/kgK]

ΔT = Temperaturdifferanse [K]

Ved overføring fra en varmestrøm til en annen kan en bruke formelen på følgende måte:

$$m_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T_1 = m_2 \cdot C_{p2} \cdot \Delta T_2 \quad (2.4)$$

Her forutsetter en tapsfri varmeoverføring mellom de to varmestrømmene.

Nedre temperatur i den påhengte kretsen er også avgjørende for å oppnå en høy temperaturdifferanse (ΔT). Komponentene som blir benyttet er også avgjørende for systemets totale virkningsgrad, kritiske komponenter vil være [39]: varmevekslere, kjeler, ekspander og prosess-medie (vann, ammoniakk, R134a...)

Tre utbredte metoder for å vinne tilbake spillvarme er:

- Stirling motor
- Termoelektrisk generator (TEG)
- Dampsyklus/ORC

En fjerde metode er å benytte en varmepumpe for å hente tilbake termisk energi fra et fluid som har for lav temperatur til å ellers kunne nyttes. Slike systemer egner seg best til oppvarmingsformål, og krever en del plass.

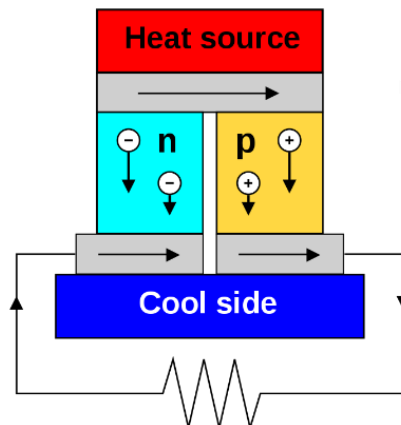
2.7.1 Stirling motor

Denne typen varmekraftmaskin har ytre varmetilførsel og arbeider med et sirkulerende gass-medie i et lukket kretsløp [34]. Maskinen har en varm- og en kald del som er respektivt varmetilførsel og varmesluk. Stirling-motoren har ikke hatt den helt store utbredelsen så langt, mer forbeholdt spesielle markedssegment og systemer (ubåter, solenergi, varmepumper...). Denne typen varmekraftmaskin er ikke så mye brukt i lignende industri (bil og skip) for å gjenvinne spillvarme grunnet vekt, volum og virkningsgrad. Det er ikke modellica komponenter i IGNITE for å simulere en stirlingmotor per i dag. Dette er årsakene til at stirling baserte WHR-systemer ikke er videre vurdert i denne oppgaven.

2.7.2 Termoelektrisk element

En annen måte å hente ut nyttbar energi fra forbrenningsmotorens spillvarme er ved å konvertere den termiske energien direkte til elektrisk strøm. Dette kan gjøres ved hjelp av termoelektriske elementer også kalt termoelektrisk generator (TEG), prinsipp vist i Figur 18. Denne teknologien er basert på

halvleder teknologi på samme måte som solceller og dioder. Blant annet brukt i satellitter som sendes så langt ut i verdensrommet at solceller ikke lenger er et alternativ [43].



Figur 18: Oppbygningen av et termoelektrisk element [44]

Ser en til bilindustrien har det vært en spennende utvikling når det kommer til bruken av TEG. I Figur 19 er det vist hvor TEG-enheten kan plasseres i en personbil. Flere bilselskaper har vist sin interesse for denne teknologien, og gjennomført ulike eksperimenter med mål om å gjenvinne energi fra avgassen. Et prosjekt gjennomført av Volvo og Renault sine lastebil-divisjoner setter seg som mål å gjenvinne en effekt på 1000W fra en lastebil i konstant fart ved hjelp av TEG [45]. Klarer de å få dette ut på markedet kan en nok forvente seg å kunne klare mellom 2-500W under flere forhold. For et lite hybridanlegg i en fritidsbåt kan TEG da være et interessant alternativ enten som primær WHR-generator eller sekundær enhet. Spesielt siden systemet ikke består av bevegelige deler og dermed vil være et meget kompakt og driftssikkert system.



Figur 19: TEG brukt i en personbil for å konvertere termisk energi til elektrisk energi [45]

Dette er også en aktuell teknologi å bruke i kombinasjon med andre for å hente ut spillvarme. Særlig fra sekundære varmespill som oljekjøling og kjølevann, eller restvarme fra eksos etter en annen spillvarme-enhet.

Teknologien er fremdeles i utviklingsfasen for bruk i kjøretøy, og det er ikke levert noen komplette løsninger. Nærmeste alternativ er å kjøpe enkle TEG-celler for så å lage sin egen TEG-enhet som konverterer termisk energi til elektrisk strøm.

2.7.3 Organisk Rankine-syklus

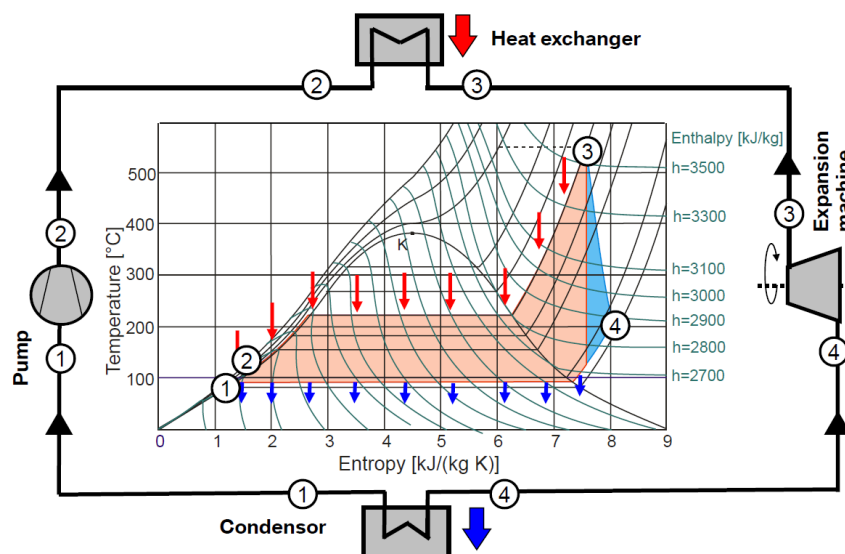
Også kalt dampsyklus, virker på samme måte som dampkretsen i et større kraftverk eller som et damplokomotiv. En varmer en væske i en kjele til det koker/fordamper, deretter ekspanderer dampen over en ekspander som henter ut mekanisk energi. Videre føres væsken gjennom en kjøler før det pumpes inn i kjelen igjen. Organisk-delen kommer av at en ikke bruker vann i kretsen, ved å heller bruke andre organiske væsker kan en forbedre systemets virkningsgrad over andre temperaturområder enn for vann.

I beregninger benytter en den ideelle Rankine-syklusen som består av følgende komponenter [46]:

- **Dampgenerator** (kjelen): Her tilfører en energi som varmer opp og fordamper mediet.
- **Media**: Overfører energien tilført i dampkjelen. Oftest vann eller en R-væske.
- **Ekspander**: Kan være en turbin, stempel- eller en vinge-motor. Funksjonen er å omsette energien i mediet til mekanisk energi.
- **Kondenser**: Denne har som funksjon å kjøle ned mediet etter ekspandereren slik at det er utelukkende i flytende fase.
- **Fødevannspumpe**: Pumper mediet til dampkjelen med et gitt trykk.

I Rankine-syklusen er det følgende fire delprosesser (ref. Figur 20) [46]:

- 1 → 2: Isentrop kompresjon (i fødepumpen)
- 2 → 3: Varme tilført ved konstant trykk (i dampkjel)
- 3 → 4: Isentrop ekspansjon (i turbin)
- 4 → 1: Varme bortført ved konstant trykk (i kondenser)



Figur 20: Rankine-syklus: Komponenter og T-S diagram [47]

Det er særdeles viktig at en ikke får utfelling av væske (kondens) i turbinen, da dette kan medføre store skader på turbinens komponenter. Derfor vil det ofte være nødvendig å overhete dampen før den blir ekspandert over ekspanderen. Dette kan være en utfordring for mindre WHR-anlegg, derfor er det i de fleste tilfeller mer aktuelt å bruke organiske væsker med en annen metningskurve og lavere kokepunkt, for å sikre god dampkvalitet (i det gitte temperaturområdet) til ekspanderen. I småskala anlegg, som er aktuelt for denne oppgaven, brukes det ofte volumetriske ekspandere (stempelmotorer, roterende skrue ekspander- eller vinge motorer) istedenfor turbin som ekspander. Den forventede effekten er under 10kW, og da er ikke alltid en turbin beste løsning da de passer best til applikasjoner med forventet effekt fra 20kW og oppover [48].

Når en skal evaluere virkningsgraden til et damp-anlegg ser en på tilført energi og nyttig arbeid ut av systemet:

$$\eta_{th} = \frac{W_{turbin} - W_{pumpe}}{Q_{tilført}} \quad (2.5)$$

Denne formelen kan og skrives med de ulike entalpiene i systemet:

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (2.6)$$

Forventede verdier for virkningsgrad er i området 25-40% for større anlegg som jobber under høyt trykk og høy temperatur [46]. For mindre anlegg, typisk brukt til varmegjenvinning, er forventet virkningsgrad under 20% [46]. Det finnes metoder for å forbedre virkningsgraden til den enkle Rankine-syklusen som fore eksempel intern varmegjenvinning, overoppheting av damp, samt ekspandere over flere steg med gjenoppvarming av damp.

Rankine-syklusen følger samme teoretiske betingelser for maksimal energiomsetning som omtalt tidligere. Temperaturen til kilden og sluket, samt varmevekslerne brukt i kretsen, er avgjørende for å få et godt system.

Implementering i en fritidsbåt vil basere seg på å utnytte den termiske energien ifra avgassvarmen til motoren. Alt etter hvilken motor som er i båten, kan det også være aktuelt å benytte seg av kjølevannsvarme til for eksempel oppvarming av fødevann til dampkjelen.

Det er flere anerkjente selskaper som har vist stor interesse for ORC-systemer til varmegjenvinning. Også bilprodusenter har jobbet med dette siden ORC er ansett som det mest lovende systemet for spillvarmegjenvinning i kjøretøy [48]. Et av de mer kjente resultatene er BMW sitt «Turbosteamer» konsept. Der ble det brukt to ORC-kretser for å hente tilbake energi fra eksosen. Effekten ble så levert tilbake til drivverket via ekspandere som konverterte den termiske energien til mekanisk effekt [47, 49].

Selv om en per i dag ikke kan bla i en katalog å kjøpe et system etter ønske, så er det noen aktører som kan være verdt å nevne om en velger å benytte et ORC-system:

- Mahle [50]
- Bosch [51]
- Turboden [52]
- Rank [53]

3 Oppbygningen av et hybridanlegg

Hybride fremdriftssystemer er systemer med to- eller flere ulike energikilder. I denne oppgaven blir det satt søkelys på elektrisk energi fra et batteri og kjemisk lagret energi i drivstoffet. Det er forskjellige drivlinjer en kan benytte seg av når en skal designe et hybridssystem, avhengig av hvordan en vil benytte den elektriske energien i systemet [54].

Den elektriske delen av systemet består av generator, motor, batteri, motorstyring og nødvendig antall kløtsjer/koblinger for at systemet får de driftsmessige frihetsgradene som kreves. Med en elektrisk motor kan en dra nytte av de gode dreimomentegenskapene til enkelte elektromotorer (høyt dreiemoment allerede ved meget lave turtall) [54]. I biler og andre landbaserte kjøretøy er dette en ønsket egenskap for å gi god akselerasjon fra start. I båt kan en benytte seg av samme egenskap ved for eksempel manøvrering.

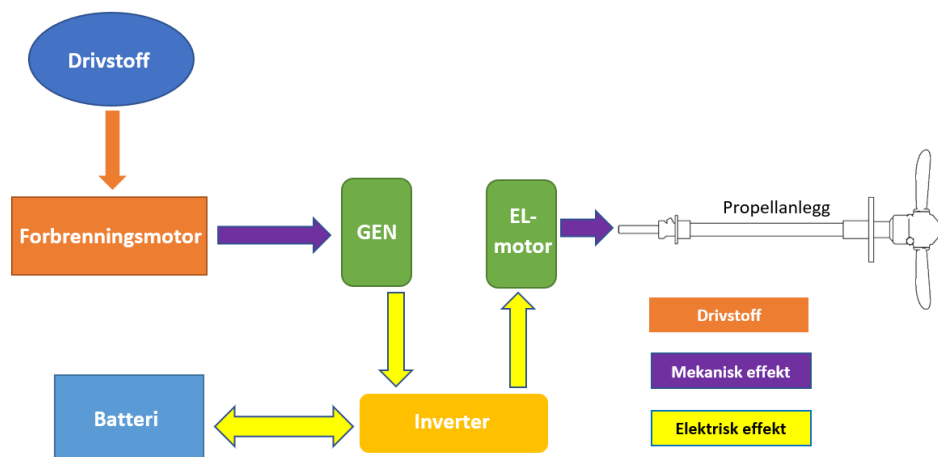
Følgende to hybridssystemer er ansett som mest aktuelle for bruk i fritidsbåt:

- Seriehybrid (Figur 21)
- Parallellhybrid (Figur 22)

Er elektrisk energi ønskelig som primær energibærer kan et seriehybridsystem være fordelaktig, da dette baserer seg rundt en, eller flere, sentrale generatorer. Vil en ha redundans i fremdriftssystemet vil et parallellhybridsystem kunne oppfylle det kravet. Forskjellige konfigurasjoner og kombinasjoner av de to systemene finnes, f.eks. «Power-split hybrid drive», disse systemene har noen flere komponenter (motor, generator, styring og koblinger). Det medfører også ekstrakostnad og kompleksitet. I denne oppgaven er det ansett som en fordel å holde systemet så enkelt som mulig, men opprettholde så mange funksjoner som nødvendig.

Seriehybrid

Dette systemet minner om diesel-elektrisk fremdrift, kjent fra skipsindustrien og tog. Forskjellen er at en ikke bare produserer elektrisk energi ved hjelp av en forbrenningsmotor, men en lagrer også energien i en batteribank. Fordelene med systemet er at en har god tilgang på elektrisk energi, forbrenningsmotor kan optimaliseres for å gå med konstant turtall og belastning, en trenger ikke mekaniske koblinger som kløtsjer i systemet. Ulempen er at en må konvertere elektrisk energi to ganger i systemet, se Figur 21.



Figur 21: Seriehybridsystem

Bruksområder for denne type hybridsystemer er i lokomotiver og busser [55]. Enkelte biler har begynt å benytte seg av systemet, det kan da ses på som en rekkeviddeforlenger (range extender).

Effekten overført til propellen kan beskrives ved hjelp av formel 3.1. Merk at i formelen er det summert effekt fra dieselmotor og batteri siden en av de settes lik null for å regne ut propelleffekten [kW] om en går med batteri- eller generatordrift. En kan også gå med økt effekt ved å benytte både batteri og generator. Men dette vil være et mer uvanlig alternativ da det krever overkapasitet på motorstyring og elektromotor.

$$P_{propell} = P_{diesel} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{motor} + P_{bat} \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{motor} \quad (3.1)$$

Forkortelser:

$P_{Propell}$: Propelleffekt [kW]

$P_{diesel1,2}$: Dieselmotoreffekt

η_{gen} : Generatorvirkningsgrad

η_{esc} : Motorstyring virkningsgrad

η_{motor} : Elektromotor virkningsgrad

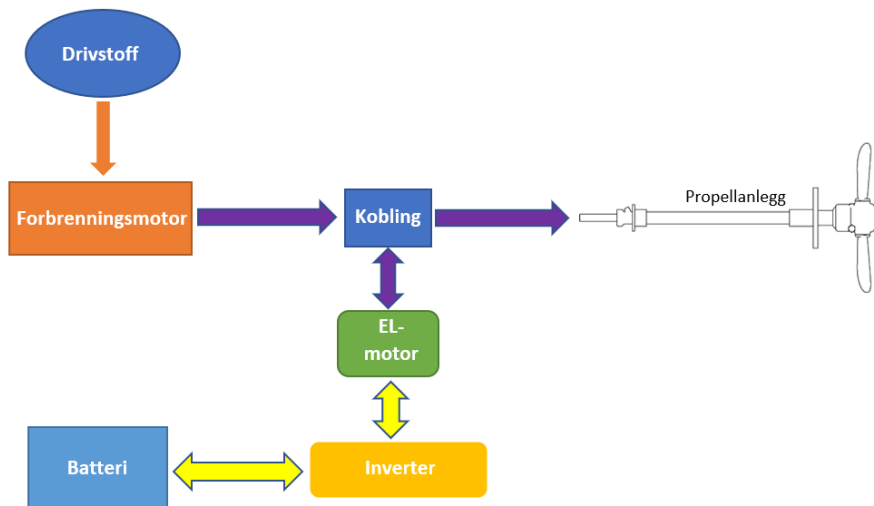
P_{bat} : Batterieffekt [kW]

η_{gir} : Transmisjonens virkningsgrad

Parallellhybrid

I et parallellhybridsystem jobber forbrenningsmotor og elektromotor sammen om å levere effekt til en felles drivlinje. De kan kjøres separat eller kombinert for ulike funksjoner. Energistrømmene fra motorene løper parallelt, og den samlede effekten kan summeres fra de to motorene. Det er generelt sett mindre tilpasning mellom et ordinært fremdriftssystem og et med en parallellhybridløsning implementert [55].

Antallet koblinger i systemet er en sentral faktor når det kommer til konfigurasjonen av en parallell drivlinje. De enkleste formene trenger ikke noen ekstrakoblinger, men da kan en ikke benytte seg av ren elektrisk drift. Er det en eller to koblinger langs drivlinjen kan en også kjøre systemet med bare elektromotor eller bare dieselmotor. I mange tilfeller vil elektromotor også fungere som generator i et parallell system. I biler vil da generatoren omsette bremseeffekt til elektrisk lading for batteriet. I båt kan en benytte seg av samme funksjonen når en skal lade opp batteriet fra forbrenningsmotor men da er det dieselmotor som må drive generatoren.



Figur 22: Parallellhybridsystem

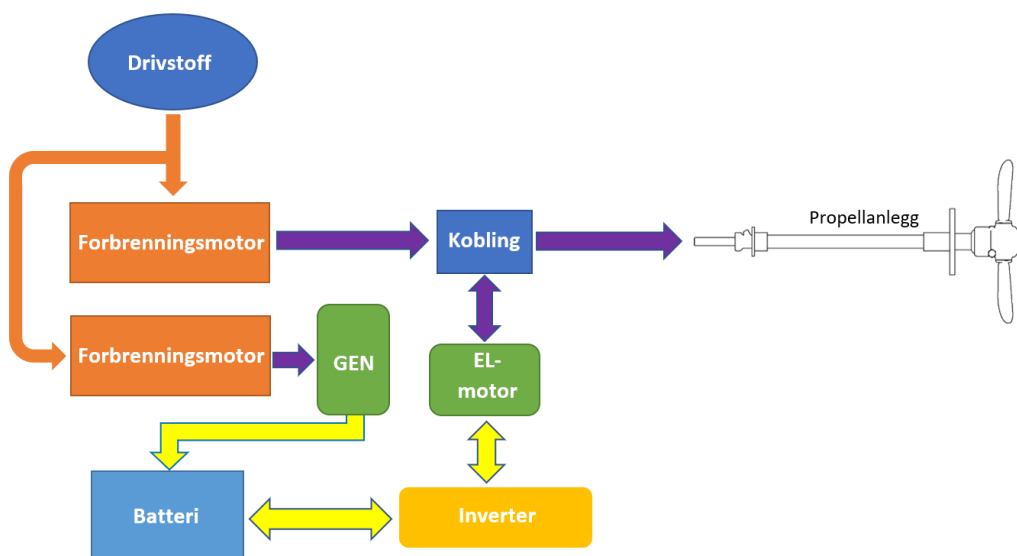
Propelleffekten kan utregnes fra formel 3.2. Her er også effekten fra dieselmotor og elektromotor summert. Men i denne konfigurasjonen kan en benytte begge kraftkilder samtidig for å få en økt propelleffekt.

$$P_{propell} = P_{diesel} \cdot \eta_{gir} + P_{bat} \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{motor} \quad (3.2)$$

Slike systemer kan også oppdateres til et serie/parallellhybridsystem i etterkant, se Figur 23. Om det senere skulle bli et øket effektbehov i båten kan en utvide fremdriftssystemet med en ekstra generator og forbrenningsmotor. Dette vil være særlig aktuelt om det er overkapasitet på den allerede installerte elektromotoren i den parallelle drivlinjen.

Ytelsen på propellen kan da utregnes med den utvidede formelen 3.3.

$$P_{propell} = (P_{diesel1} \cdot \eta_{gir} + P_{bat} \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{motor}) + P_{diesel2} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{motor} \quad (3.3)$$

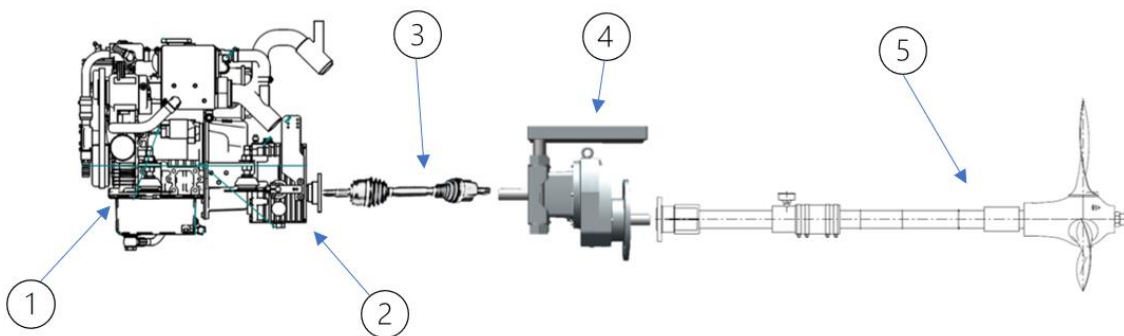


Figur 23: Serie/parallellhybridsystem

3.1 Modell

For å kunne utføre simuleringer i Ricardo IGNITE måtte det først bygges en modell av et hybridssystem. Det ble valgt å ta utgangspunkt i et ordinært fremdriftssystem av typen som kan forventes å være montert i mindre snekker og lignende båter i dag. Et parallellhybrid system ble det naturlige valget siden det skal monteres rundt et eksisterende fremdriftssystem (Figur 24).

Forbrenningsmotor er basert på Beta marine sin 16 hk marinemotor. Denne benytter en Kubota Z602 som basemotor, en motorkonstruksjon som benyttes i landbruk, industri, marine og til automotive formål. Se vedlegg C for mer detaljerte motorspesifikasjoner fra et salgsprospekt. Tilgangen på informasjon om motoren, og utstyrs-fleksibilitet fra marine leverandør, gjorde til at denne motor ble valgt i dette designet. På samme måte ble det undersøkt og gjort et valg når det kommer til de andre komponentene som transmisjoner, propellanlegg og drivlinje.



Figur 24: Fremdriftslinje med forbrenningsmotor

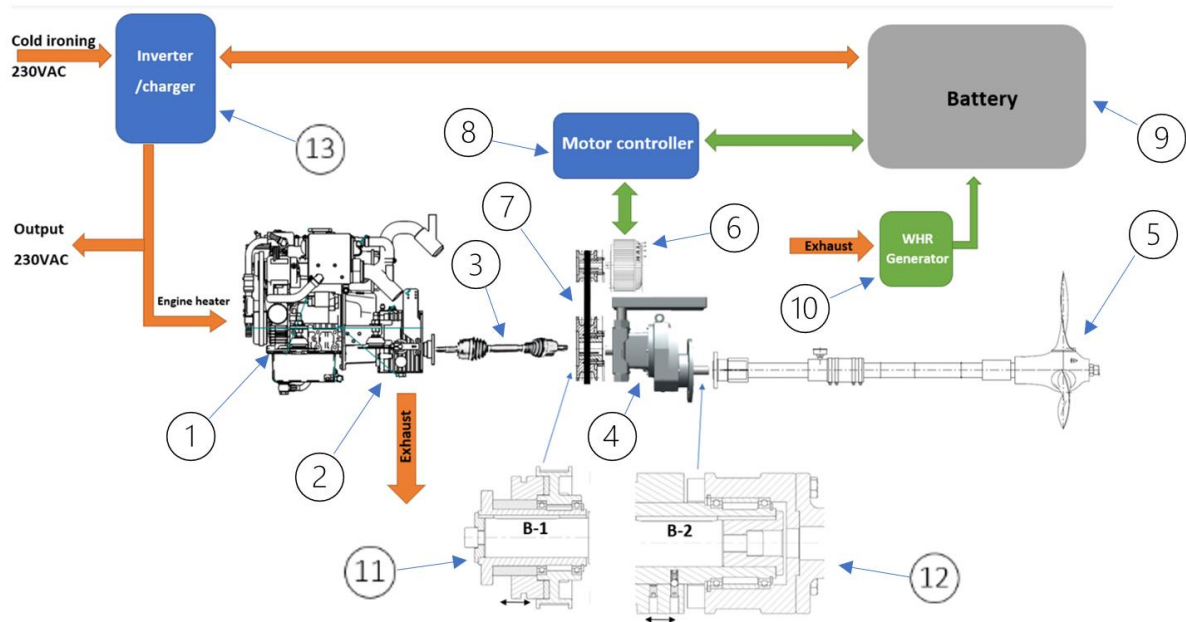
Det opprinnelige systemet består av følgende komponenter:

1. Dieselmotor
2. Marine gir
3. Mellomaksling (siden motor står på fleksible motorlabber)
4. Ekstra reduksjons gir
5. Propellanlegg

Punkt nummer fire, ekstra reduksjons gir, er en komponent som strengt tatt ikke er nødvendig, og heller uvanlig å se i båter i dag. Tidligere var det mer utbredt når en ville ha mer trekkraft i en større båt med en forholdsvis liten motor. Flere motorprodusenter hadde lignende løsninger for sine motorer på 70- og 80 tallet (Marna, Sabb, Volvo Penta ...). Denne konfigurasjonen er tatt med i modellen da det gir mulighet for å lettere inkludere en ekstra fremdriftsmotor (elektrisk). En stor vribar propell kan en ta ut mer effekt uten å måtte øke turtallet. Dette vil være en fordel om en kjører systemet i parallell modus, der både dieselmotor og elektrisk motor leverer effekt til propellen.

De hybride komponentene kan også implementeres uten det ekstra giret, men da på bekostning av enten den maksimale ytelsen av systemet, eller ytelsen en kan kjøre med om en bare går med dieselmotoren.

Målet er at systemet kan gå med ren elektrisk fremdrift i lengre perioder. Det skal også kunne sørge for energi til oppvarming og eksternt elektrisk forbruk. På denne måten får en flere gevinster fra systemet siden en kan utelukke komponenter som dieselvarmer, sluregir og gass/sprittkokeapparat. I Figur 25 ser en det samme fremdriftssystemet med de hybride komponentene lagt til.



Figur 25: Modell av et hybrid fremdriftssystem

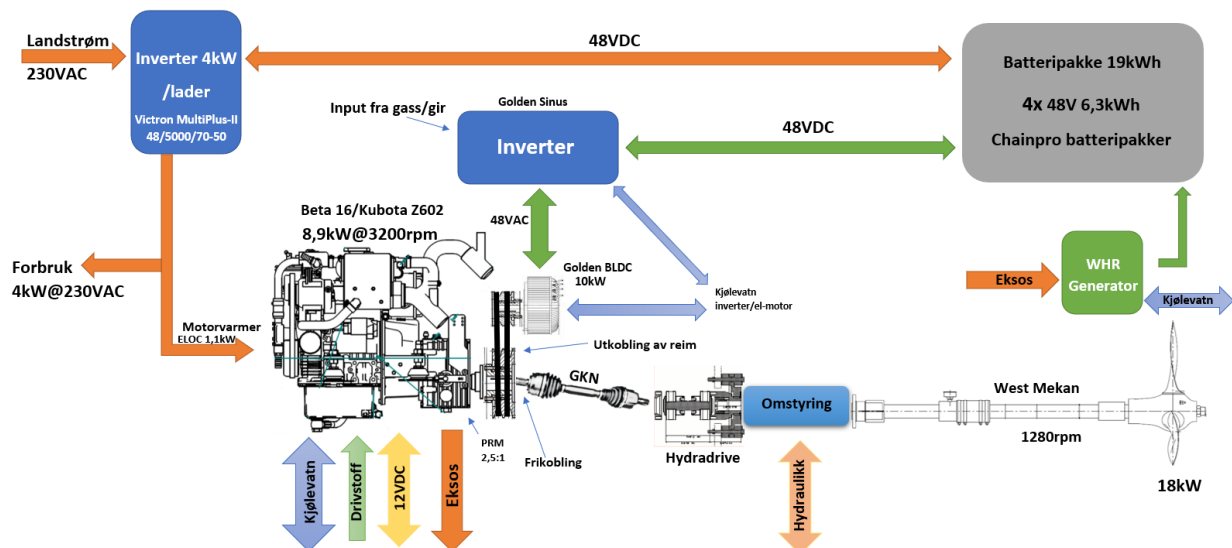
Det komplette fremdriftssystemet består av følgende komponenter:

1. Forbrenningsmotor
2. Marine gir
3. Mellomaksling
4. Ekstra reduksjons gir
5. Propellanlegg
6. Elektrisk motor/generator
7. Tannreim
8. Motorstyring (ESC)
9. Batteri
10. Spillvarmegjenvinning
11. Mekanisk klokobling B-1 (Vedlegg D)
12. Mekanisk klokobling B-2 (Vedlegg D)
13. Inverter/lader

I flytskjemaene i kapittel 3.2 er det også inkludert sidepropeller/truster. Baug- og aktertruster er ikke nødvendig for det hybride systemet, disse er inkludert for å bygge opp et fremdriftssystem med gode manøvreringsegenskaper og et bredt bruksområde med mål om å gi en god brukeropplevelse.

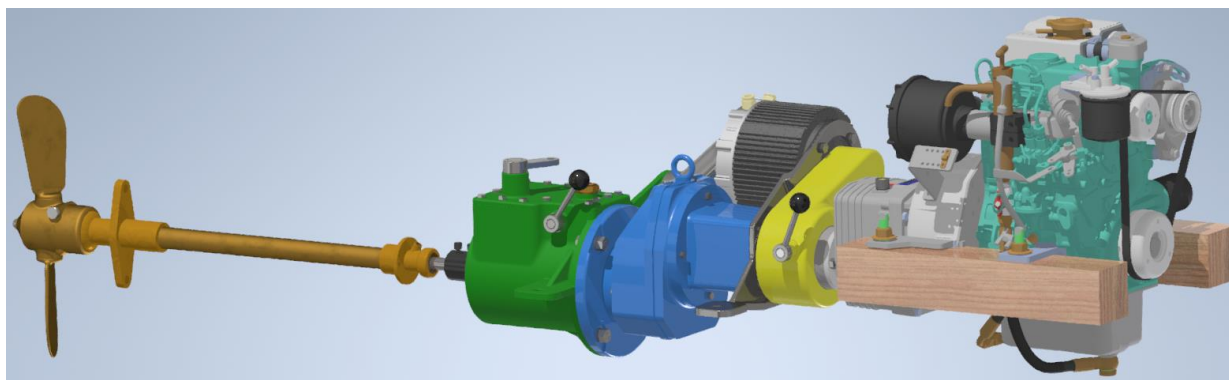
En enklere versjon av fremdriftssystemet kan sees i Figur 26. Her er systemet vist på sin enkleste form for å oppnå de samme mulighetene som i systemet i Figur 25. Fjerner man det ekstra reduksjonsgiret kan en oppnå en mer kompakt installasjon. Ulempen er at en må benytte seg av en mindre propell som går med høyere turtall.

Dette systemet kan være fordelaktig i en liten båt med liten motor for å oppnå høyere hastighet. For større deplasement båter vil det derimot være å foretrekke å ha en større propell siden, den gir bedre grep i vannet noe som sikrer god trekraft og gode manøvreringsegenskaper.

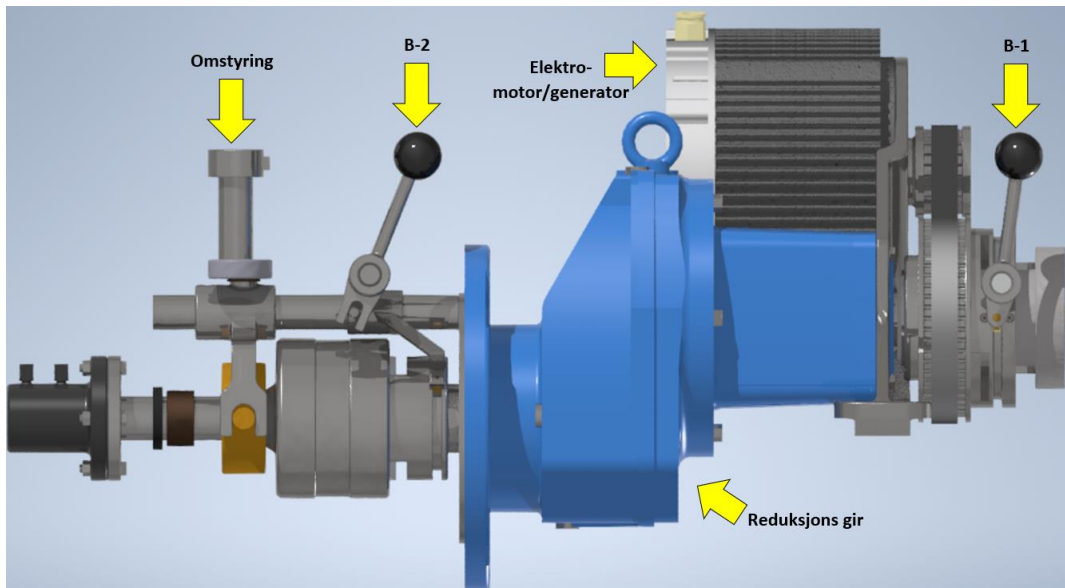


Figur 26: Forenklet fremdriftssystem

Størrelsen på installasjonen vil variere alt etter hvilket propellanlegg en benytter, hvor stor plass det er i båtenes motorrom og hvordan dieselmotoren er montert (faste eller fleksible motorfeste) vil størrelsen på installasjonen variere. I Figur 27, Figur 28 og vedlegg E kan en se en kompakt versjon. Her har en med koblingene B-1 og B-2, fastmontert dieselmotor og et vribart propellanlegg av typen med trekstang og aksial opplagring av skyvekraft i selve propellhodet (SABB-propell).



Figur 27: 3D-modell av et hybrid fremdriftsanlegg (se vedlegg E for mer detaljer). Modellen av forbrenningsmotor kommer fra Beta Marine UK



Figur 28: 3D-modell av omstying, koblinger, elektromotor og reduksjons gir. Modell av gir og -elektromotor kommer fra leverandørens nettsider [56, 57]

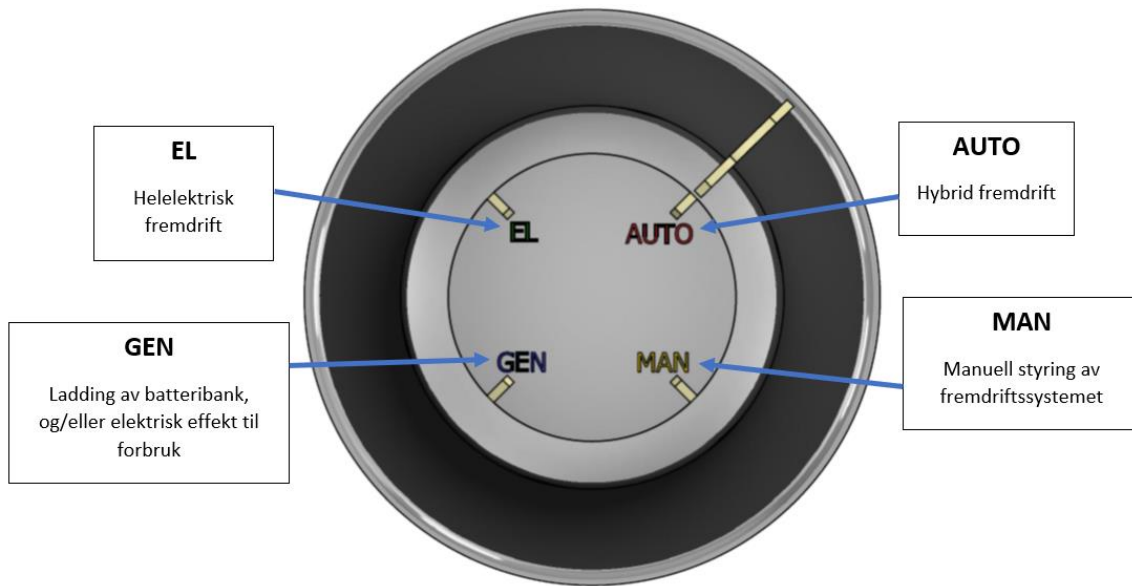
De mekaniske koblingene er til for at en kan kjøre systemet på ulike måter. Inkluderer man disse kan man oppnå følgende driftsmoduser:

- ❖ Dieselfremdrift
- ❖ Elektrisk fremdrift
- ❖ Hybrid fremdrift
- ❖ Generator modus

Videre i oppgaven blir disse driftsmodusene representert ved disse driftsvalgene:

- ❖ EL (elektrisk fremdrift)
- ❖ AUTO (Hybrid fremdrift)
- ❖ MAN (manuell styring, bla. Dieselfremdrift)
- ❖ GEN (Generator drift)

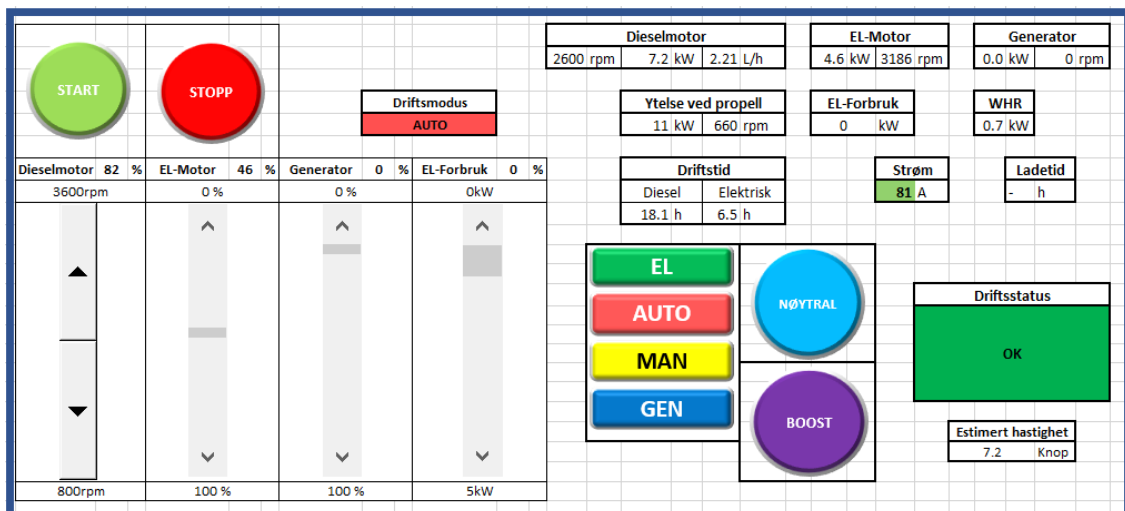
Valget av driftsmoduser er inspirert fra lignende moduser fra en hybridbil. Et eksempel på hvordan en driftsmodusvelger kan se ut i en båt er vist i Figur 29.



Figur 29: Driftsvelger

Utkobling av kobling B-1 tillater systemet å gå utelukkende med dieselmotor for fremdrift. Kobler man ut kobling B-2 kan en drive den elektriske generatoren fra dieselmotoren. Se vedlegg F for en utvidet oppbygning og forklaring av systemet.

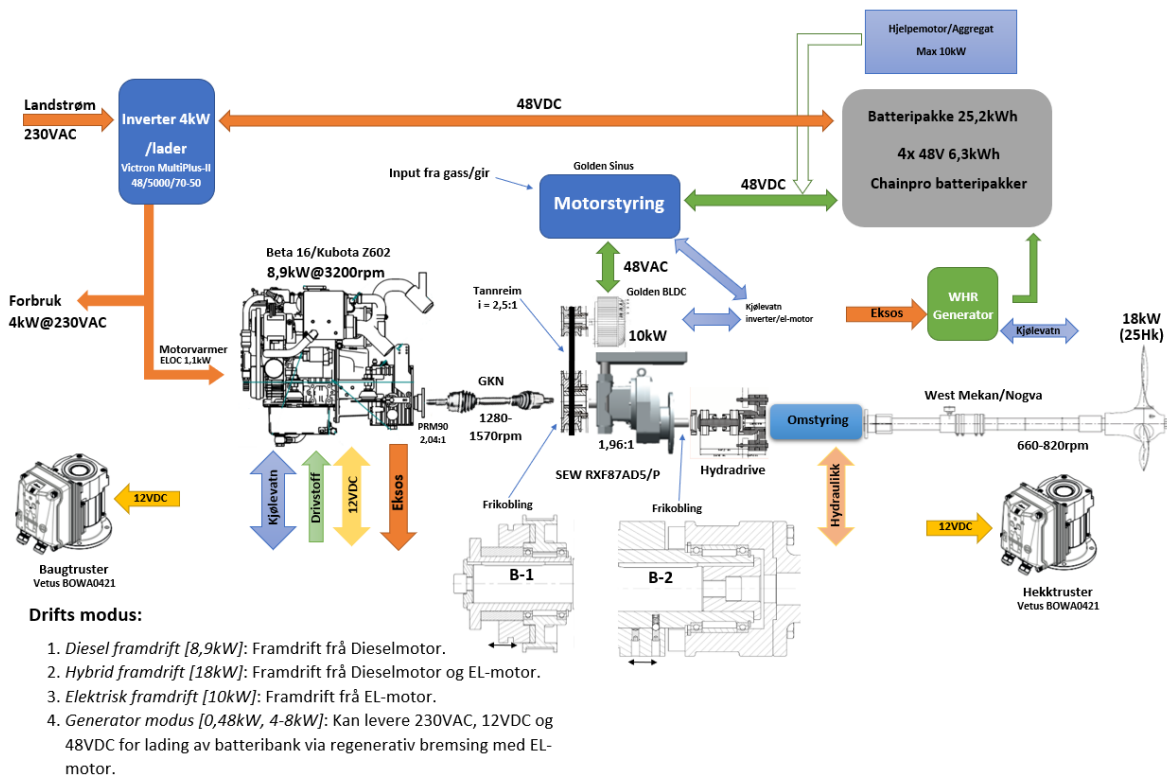
I første omgang kan systemet kjøres manuelt, der båtfører selv styrer alle driftsparametere. På sikt vil en i tillegg til de ovenfornevnte komponentene også trenge et kontrollpanel og en overordnet styring av systemet. Et forslag til hvordan et slik kontrollpanel kan se ut er vist i Figur 30.



Figur 30: Driftspanel i Excel

3.2 Energiflyt i båten

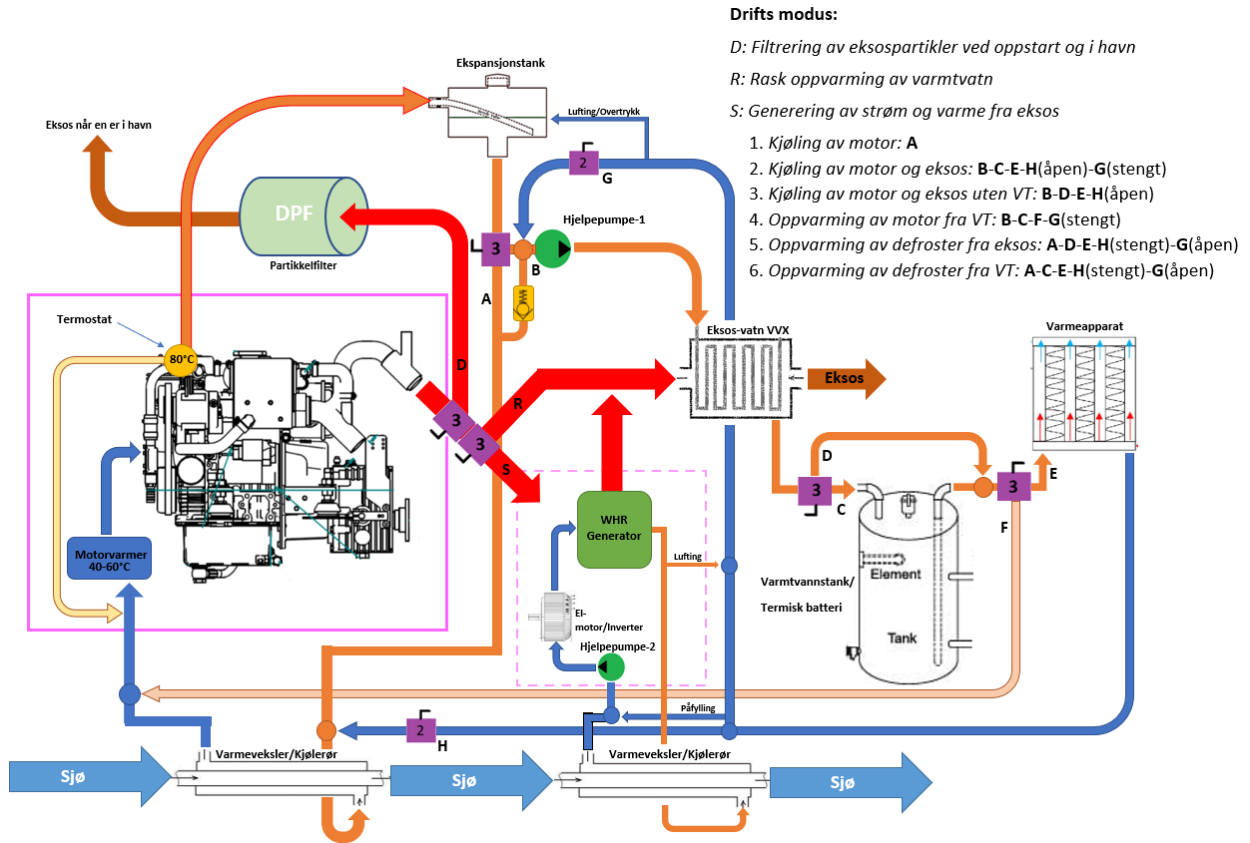
Ved hjelp av et flytskjema kan en lettere se de ulike energistrømmene i anlegget. Det er laget tre flytskjemaer (Figur 31, Figur 32 og Figur 33) for å få med nok detaljer innenfor områdene: fremdriftseffekt, termiske energi og elektrisk energi. Se vedlegg G, H og I for større versjoner av skjemaene.



Figur 31: Hybrid fremdriftssystem med komponentnavn

Figur 31 viser et oversiktsbilde over de ulike komponentene i hybridsystemet. Modellen baserer seg på enkeltkomponenter som er tilgjengelige i markedet i dag. Dette for å ha et realistisk forhold til plassbehov, pris, effekt, kjøretid og systemoppsett. Systemet kan utvides med tilleggs komponenter som sidepropeller og ekstern generator.

Termisk flytskjema

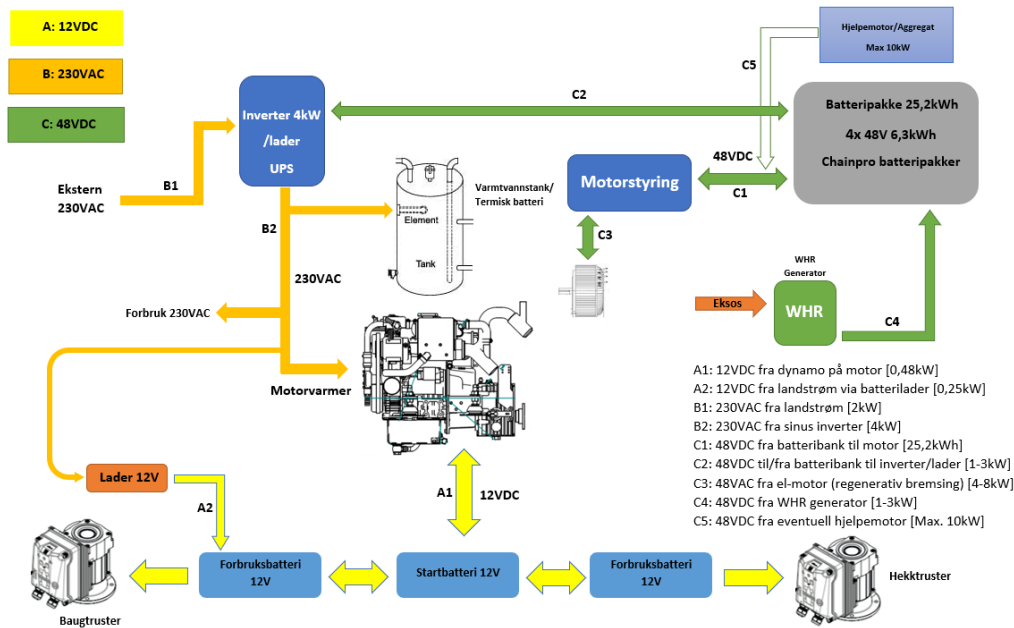


Figur 32: Flytskjema for kjølevann og eksos

Kjølesystemet er bygd opp slik at en kan varme opp kabin og varmtvannstank med motorens kjølevann. Det er lagt vekt på at motoren også kan gå med en enkel kjølekrets, i tilfeller der det ikke er behov for noen form for oppvarming. Da de fleste motorer i denne størrelsesorden benytter seg av en sentrifugalpumpe for å sirkulere kjølevannet, er det viktig å ta hensyn for å minimere trykktapet i kretsen for å ikke strupe ned strømmingen av kjølevæske inn og ut fra motoren. Derav er det montert inn en hjelpesepumpe (hjelpesepumpe-1). En kan bruke all kjølevæske sendt ut fra motoren (når termostaten åpner) til oppvarmingsformål. Eventuell overkapasitet på hjelpesepumpe blir kompensert for av tilbakeslagsventilen som tillater overstrømmingen til å gå i retur.

Ved hjelp av treveisventiler er det også lagt inn funksjoner for å øke komforten og brukervennligheten. Varmtvann fra varmtvannstank kan benyttes for oppvarming av kabin og dieselmotor.

Varmevekslerne i bunnen av figuren representerer utvendige kjølerør som danner en lukket krets uten sjøvann, med de fordelene det medbringer (unngår tæring, interne anoder og frostfare). I båter der det ikke egner seg med utenpåliggende kjølerør på skroget, kan det benyttes en eller flere ordinære rørvarmevekslere (f.eks Bowman-type [58]). Dette krever en sjøvannspumpe i systemet.



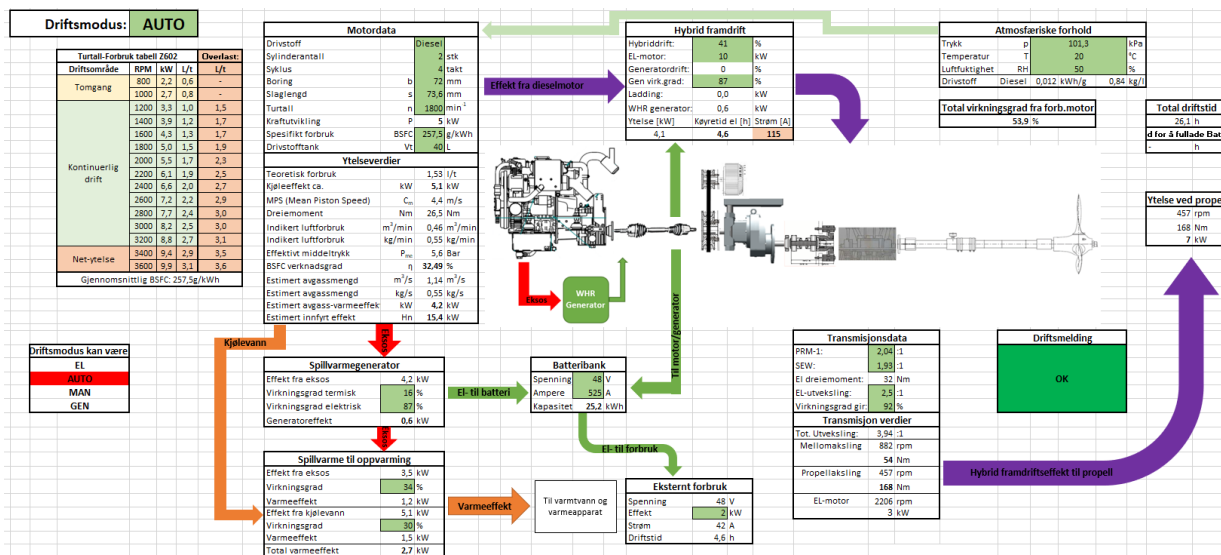
Figur 33: Oversiktsbilde over det elektriske systemet

Den elektriske kretsen er delt inn i tre deler A, B og C, der «A» er 12V kretsen i båten som forsyner de vitale styringssystemene, startbatteri og 12V forbruk. Denne kretsen er ikke tatt med i simuleringen av fremdriftssystemet siden det vanligvis ikke er et kontinuerlig stort forbruk av 12V strøm om bord under gange. Store forbrukere som sidepropeller og lyskastere går normalt sett i kortere perioder, dermed vil det konstante forbruket være lavt. «B» er 48V kretsen som den elektriske fremdriften går på. Det inkluderer elektrisk motor, motorstyring, batteripakke (hybrid) og tilførsel til inverter. Til slutt har en «C» kretsen, denne representerer 230V systemet om bord. Det inkluderer landstrøm og strøm fra inverter (48VDC til 230VAC). En inverter med avbruddsfri strømforsyningfunksjon (UPS) kan gi en sømløs overgang fra landstrøm til internstrøm om bord og kan med dette drive kjøleskap, kokeplate og andre apparater som krever 230VAC.

3.3 Beregningsmodell

Under utviklingen av flytskjemaene ble det parallelt laget en kalkulator i Excel for å hente ut forventede resultater fra systemet. Disse resultatene ble så brukt for å velge verdier for utvekslinger i drivlinjen og størrelsen på de elektriske komponentene. På denne måten kunne systemet forbedres gjennom flere iterasjoner. Om en eventuelt vil endre en av komponentene, eksempelvis at en ønsker en større forbrenningsmotor, så kan en raskt finne ut hvilke andre endringer som også må gjøres for å få et tilfredsstillende system.

Målet med kalkulatoren er at den vil gi rettleidende verdier å sammenligne med simuleringsresultatene fra IGNITE. På denne måten kan en enklere oppdage om noen av simuleringsverdiene er urealistiske. I Figur 34 vises det et bilde av kalkulatoren i Excel. De forskjellige matematiske formlene som ligger til grunn for kalkulatoren kan sees i vedlegg J.



Figur 34: Kalkulator i Excel

Det er 8 områder der det kan legges inn data. I hver boks er det hvite ruter for resultater/beregnete verdier, og grønne ruter der bruker kan legge inn verdier.

Transmisjon

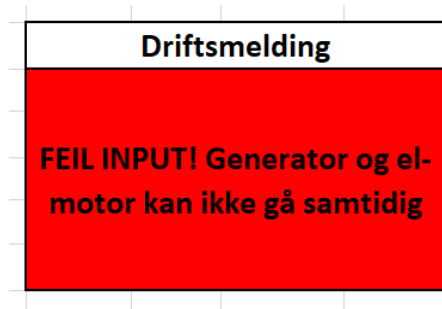
En særlig viktig verdi for dimensjonering er det høyeste dreiemomentet som oppstår i drivlinjen. Ved hjelp av denne verdien kan en velge gir, mellomaksling, trustlager og propellanlegg som passer til formålet. Det gir også mulighet til å se hvordan ulike parameter påvirker systemet. Det er tre transmisjoner: marinegiret på motoren, ekstra giret og tannreimen til elmotor/generator. Figur 35 viser boksen for transmisjonsdata i kalkulatoren. Legger man inn de tre utvekslingene, og en virkningsgrad for de mekaniske utvekslingene, kan en finne turtall og dreiemoment i drivlinjen. Dette er viktig for valg av propell, men også for å oppnå et gunstig turtall for elmotoren (2000-6000 RPM).

Transmisjonsdata	
PRM-1:	2.04 :1
SEW:	1.93 :1
El dreiemoment:	32 Nm
EL-utveksling:	2.5 :1
Virkningsgrad gir:	92 %
Transmisjonsverdier	
Tot. Utveksling:	3.94 :1
Mellomaksling	392 rpm
	54 Nm
Propellaksling	203 rpm
	103 Nm
EL-motor	980 rpm
	0 kW

Figur 35: Transmisjonsdata i Excel kalkulator

Logiske funksjoner

Det ble dedisert en egen boks med logiske setninger (Driftsmelding) som skal hjelpe brukeren av kalkulatoren å unngå å legge inn feil data. Ved hjelp av «HVIS», «ELLER», «OG» samt «IKKE» funksjonene i Excel ble det gradvis bygget opp en kode som kan gi beskjed om feil ved ulike ugyldige verdier (se vedlegg J). Et eksempel på brukerfeil (Figur 36) er at en i manuell modus (MAN) prøver å aktivere både generator og elektromotor. Siden elektrisk motor og generator er en og samme komponent kan en ikke få elektrisk fremdrift og lading av batteriet samtidig.



Figur 36: Driftsstatus i Excel kalkulator

Flere forriglinger er lagt inn for å forhindre brukeren å kunne legge inn feil input. Dette ble særlig effektivt når makrofunksjonene i Excel ble benyttet for å lage et driftspanel med mer intuitive måter å endre de ulike driftsparameterne på.

Hybrid- og elektrisk fremdrift

En egen boks, vist i Figur 37, er tilegnet styring av elektromotoren/generatoren. Her er det også vist hvor stor strøm systemet trekker, og estimert driftstid med et gitt strømforbruk. Ruten som viser strømforbruk skifter farge fra grønn til rød etter hvert som forbruket øker for å gi en visuell indikator av strømforbruket. Det er også lagt inn effekten fra en WHR-generator.

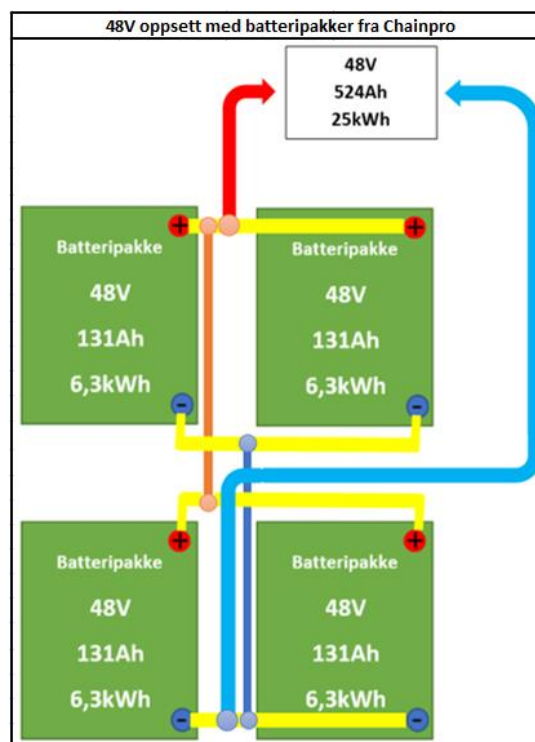
Hybrid framdrift		
Hybriddrift:	41	%
EL-motor:	10	kW
Generatordrift:	0	%
Gen virk.grad:	87	%
Ladding:	0,0	kW
WHR generator:	0,6	kW
Ytelse [kW]	Køyretid el [h]	Strøm [A]
4,1	4,6	115

Figur 37: Hybrid fremdrifts parameter

Generatordriftparameteren kan endres i % fra 0- 100. Skalaen har kontinuerlig effekt fra forbrenningsmotor som grunnlag. Dette for å unngå overlast av forbrenningsmotor. En kan dermed

bruke all effekt fra forbrenningsmotor om en vil hurtigst mulig ladde opp batteriene. Setter en generatordrift til 100% vil en ikke ha overskuddseffekt fra forbrenningsmotor å sende til propellen for fremdrift.

Batteripakken i Figur 38 er modellert med tanke på å bruke batteripakker fra firma som driver med gjenbruk av elbilbatterier [33]. Opprinnelig var det tenkt å benytte et 96V-system for å tillate bruk av en kraftigere elektromotor, men da enkelte komponenter som lader og inverter hadde et bredere og bedre utvalg i 48V konfigurasjon ble det valgt å gå for dette spenningsnivået. Ulempen er høyere strøm i kablene til og fra batteriet. Derav er den elektriske motoreffekten begrenset til 19kW i denne modellen. I simulering- og beregningsmodellene er det lagt inn en 10kW elektromotor da dette passer til systemets forventede ytelse.



Figur 38: Oversikt over parallellkobling av 48V batteripakker til hybrid fremdrift

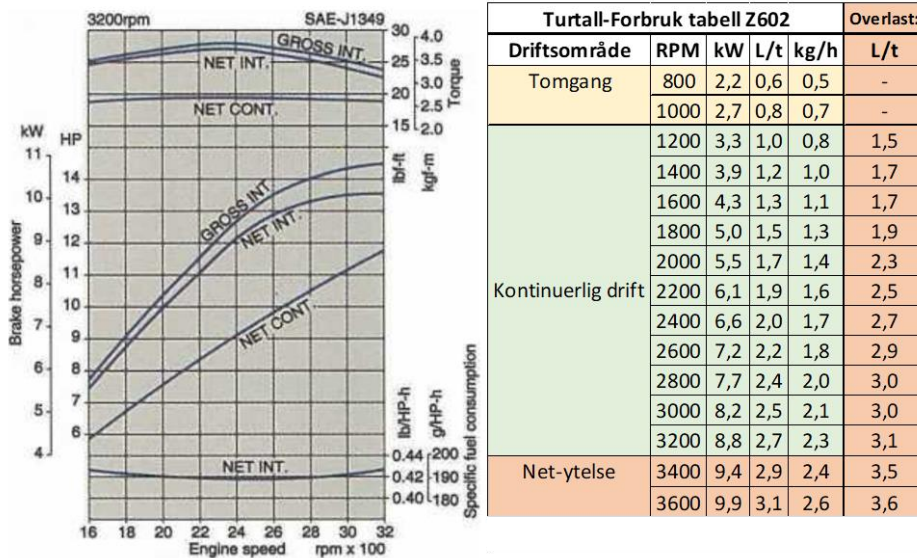
Forbrenningsmotor

Data om den valgte forbrenningsmotoren (Kubota Z602) legges inn i kalkulatoren og nyttige resultater om forbruk, last, luftforbruk, stempelhastighet, effektivt middeltrykk, termisk virkningsgrad, estimert avgassmengde, kjøle- og eksosvarme kan hentes ut. Resultater ved 1800 RPM og 5kW motoreffekt er presentert i Figur 39.

Motordata			
Drivstoff		Diesel	
Sylinderantall		2	stk
Syklus		4	takt
Boring	b	72	mm
Slaglengd	s	73,6	mm
Turtall	n	1800	min ⁻¹
Kraftutvikling	P	5	kW
Spesifikt forbruk	BSFC	257,5	g/kWh
Drivstofftank	Vt	40	L
Ytelseverdier			
Teoretisk forbruk		1,53	l/t
Kjøleeffekt ca.	kW	5,1	kW
MPS (Mean Piston Speed)	C _m	4,4	m/s
Dreiemoment	Nm	26,5	Nm
Indikert luftforbruk	m ³ /min	0,46	m ³ /min
Indikert luftforbruk	kg/min	0,55	kg/min
Effektivt middeltrykk	P _{me}	5,6	Bar
BSFC verknadsgrad	η	32,49	%
Estimert avgassmengd	m ³ /s	1,14	m ³ /s
Estimert avgassmengd	kg/s	0,55	kg/s
Estimert avgass-varmeeffekt	kW	4,2	kW
Estimert innfyrt effekt	H _n	15,4	kW

Figur 39: Motordata og ytelsesverdier fra Excel kalkulator

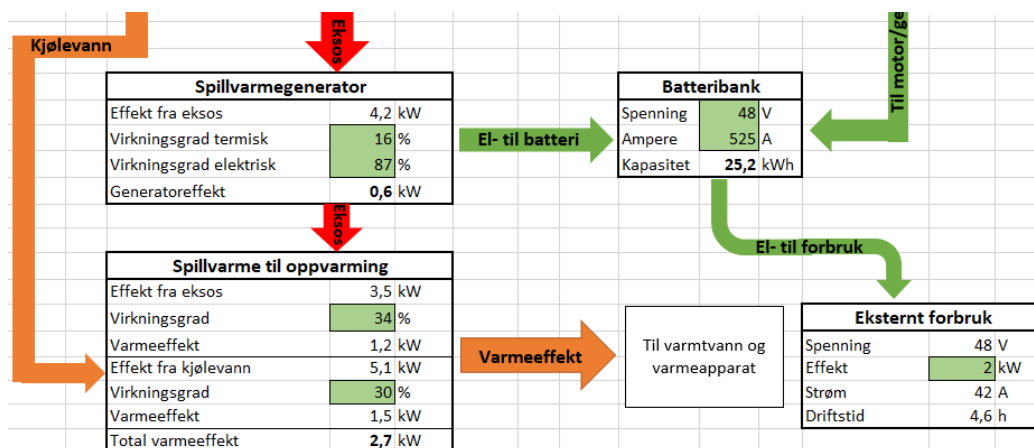
Den faktiske effekten som motoren yter kan en finne ved å se på drivstofforbruket. Tabell 5 viser ytelsesgrafene for dieselmotoren, og en tabell som inneholder forbruket ved ulike turtall. Forbrukskurven som viser det spesifikke forbruket til motoren, er nærmest flat over det relevante last- og turtallsområdet. Fra denne kurven kan en lese av hvilke effekter motoren kan yte ved ulike turtall, basert på maks kontinuerlig ytelse. De fleste motorer for fritidsbåter er oppgitt med maksimal motorytelse (intermittent power output) for en gitt periode.



Tabell 5: Ytelsesgraf fra en spesifikk modell av Kubota Z602 og Turtall-forbruk tabell brukt i Excel kalkulatoren

Spillvarme

Systemene for spillvarmegjenvinning er representert i en sterkt forenklet form i kalkulatoren (se Figur 40). Ved hjelp av eksterne simuleringer kan en komme fram til ulike verdier (alt etter hvilket WHR-prosess eller media en benytter) som kan settes inn i denne kalkulatoren. Fra eksosen er det tenkt at en primært henter ut effekt som går til en elektrisk generator. Eventuelt overskudd av nyttbar termisk energi kan sendes videre til en varmeveksler for oppvarming av vann. For avgassen må en være oppmerksom på at temperaturen ikke faller under 100°C. Dette for å unngå at vandampen i eksosen kondensere i eksosystemet da det kan skade de ulike etterbehandlingssystemene.

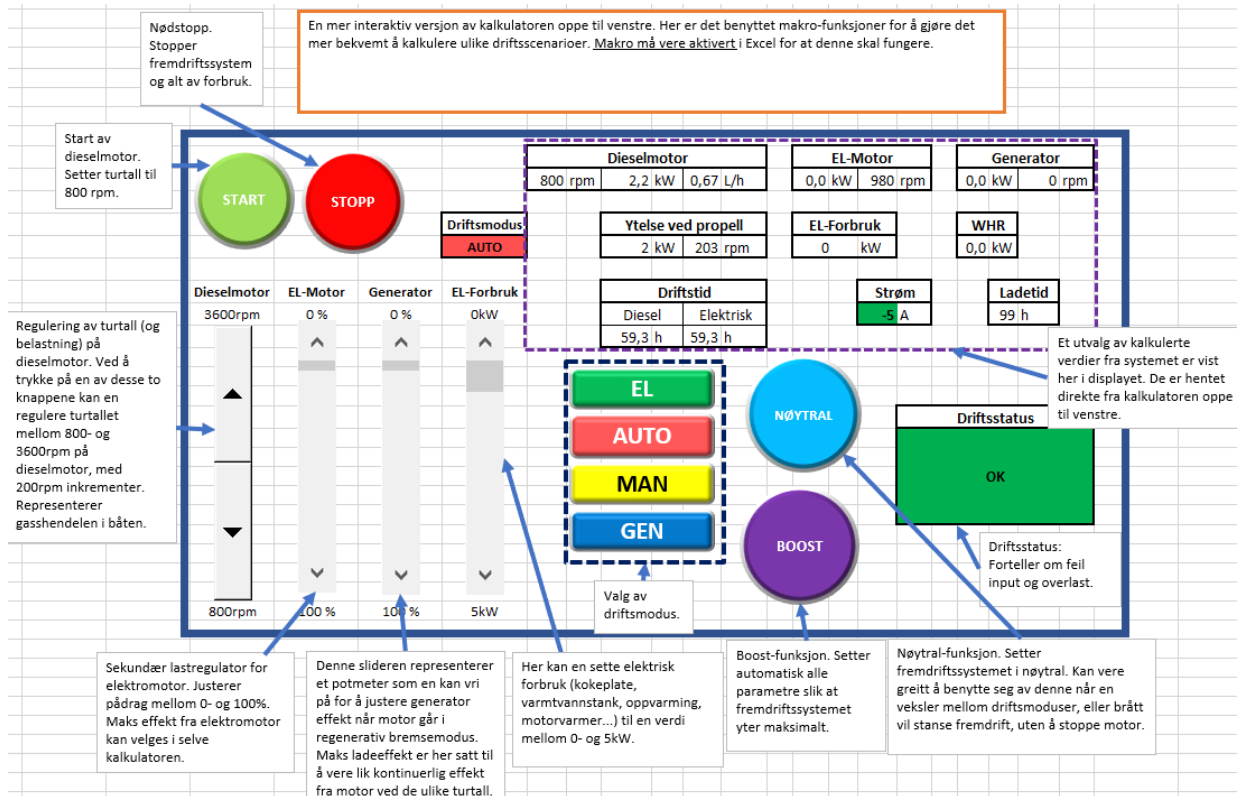


Figur 40: Spillvarme i Excel kalkulatoren

Kjølevannsvarme kan også brukes ved å la den gå igjennom en varmeveksler. Her er det bare ett parameter som representerer hele det systemet, den totale termiske virkningsgraden til varmeveksleren. Verdiene for kjølevannsvarme og avgassvarme er hentet fra utvidet teknisk informasjon fra motorleverandør [59].

Driftspanel

Excel sine makrofunksjoner ble brukt for å lage en versjon av kalkulatoren som hadde et mer intuitivt brukergrensesnitt, sett fra båteiers synspunkt. Her vil en kun vise informasjon som er interessant ved drift, noe som også gir et enklere oppsett. Driftsparameter blir justert ved knapper eller glidebrytere, som igjen representerer brytere og gasshendler som en kan finne i de fleste fritidsbåter. Figur 30 viser hvordan dette ser ut. I Figur 41 ser en samme panel med forklaringstekst.



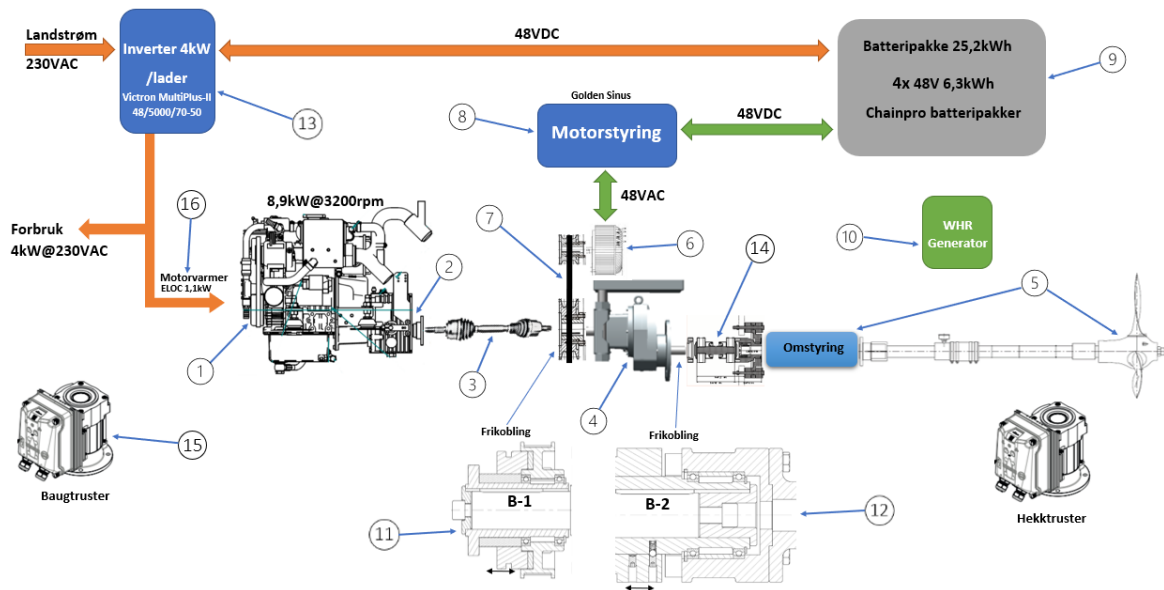
Figur 41: Driftspanel i Excel med forklaringstekst

Slik som kalkulatoren er nå, kan en hente ut en del interessant data om driftstid og tilgjengelig effekt. Verdier som trekkraft og faktisk hastighet er ikke mulig å hente ut på nåværende tidspunkt. For å få disse resultatene må en tilegne et spesifikt båtskrog og propellanlegg. De fleste båtfabrikanter og leverandører har mye informasjon om forventet fart om en oppgir effekt. På samme måte kan en få anbefalt et passende propellanlegg om en har effekt og utgående turtall på propellaksling.

3.4 Komponentliste

Det omtalte fremdriftssystemet består av komponentene vist i Tabell 6. Dette er merket som alternativ 1 (Figur 42) og er den opprinnelige modellen. For å senere få et bedre kostnadsbilde for sammenligning er det også lagt ved en tabell for et litt enklere system. Denne versjonen er vist i alternativ 2.

Alternativ 1:



Figur 42: Oversiktsbilde med de ulike komponentene i fremdriftssystemet

Komponent	Beskrivelse	Spesifikasjoner	Antall
1	Fremdriftsmotor	Beta 16 Greenline	1
2	Marine gir	PRM90 2,04:1	1
3	Mellomaksling	GKN CV Aksling	1
4	Ekstra gir	SEW RXF87AD5/P	1
5	Propellanlegg med omstyring	NOGVA vridbart anlegg 1100-50	1
6	Elektromotor/Generator	Golden 10KW BLDC Motor vannkjølt	1
7	Tannreim med hjul	HTD tannrem og skiver med fast nav	1
8	EL-Motorstyring	Golden VEC500-48	1
9	Batteripakke	Chainpro48V 7kWh Li-bat.pak	4
10	WHR-Generator	Avhengig av valg	1
11	Frikobling B-1	See vedlegg D	1
12	Frikobling B-2	See vedlegg D	1
13	Inverter/Lader	Victron MultiPlus-II 48/5000/70-50	1
14	Trustlager	Hydradrive HD113 Frei	1
15	Sidepropell	Vetus BOWA0421	2
16	Motorvarmer	ELOC 1100W	1

Tabell 6: Komponentliste for fremdriftssystemet

Total vekt med 4 batteripakker blir ca. 500kg. 280kg (batteriene [33]) av denne vekten kan fordeles rundt om i båten. Selve fremdriftsenheten (motor, gir, generator, koblinger og akslinger/ledd) veier omtrent 195kg. Se kapittel 6.3 for mer informasjon om vekt, volum og pris.

Alternativ 2:

Se Figur 26 for oversiktsbilde. Tabell 7 viser komponentene for alternativ 2.

Komponent	Beskrivelse	Spesifikasjoner	Antall
1	Fremdriftsmotor	Beta 16 Greenline	1
2	Marine gir	PRM90 2,04:1	1
3	Mellomaksling	GKN CV Aksling	1
5	Propellanlegg med omstyring	Westmekan 25	1
6	Elektromotor/Generator	Golden 10KW BLDC Motor vannkjølt	1
7	Tannreim med hjul	HTD tannrem og skiver med fast nav	1
8	EL-Motorstyring	Golden VEC500-48	1
9	Batteripakke	Chainpro48V 7kWh Li-bat.pak	4
11	Frikobling B-1	See vedlegg D	1
13	Inverter/Lader	Victron MultiPlus-II 48/5000/70-50	1
14	Trustlager	Hydradrive HD108 Balder	1
16	Motorvarmer	ELOC 1100W	1

Tabell 7: Komponentliste for det forenklete fremdriftssystemet

I alternativ to er følgende komponenter utelatt:

- Ekstra gir (punkt 4)
- WHR-generator (punkt 10)
- Sidepropeller (punkt 15)

Disse komponentene er ikke nødvendig får å lage et hybridssystem. Fordelen med disse komponentene er at en kan oppnå bedre trekraft (større propell), høyere virkningsgrad (WHR-generator) og bedre manøvreringsegenskaper (sidepropeller). Om lav vekt er å foretrekke burde en velge alternativ 2, da det ekstra giret veier ca. 50 kg [56]. Vekten, og plassbehovet, av WHR-generatoren vil også unngås ved å velge dette alternativet.

3.5 Estimert kostnad

Alternativ 1:

Prisen for dette anlegget er estimert til å bli 284 600 kr (se Tabell 8). Merk at enkelte av prisene er estimater basert på liknende komponenter eller eldre priser. Vær oppmerksom på at mange av prisene svinger med markedet.

Komponent	Beskrivelse	Spesifikasjoner	Antall	Pris	Kommentar
1	Fremdriftsmotor	Beta 16 Greenline	1	kr 60 000	Estimert pris
2	Marine gir	PRM90 2,04:1	1	Inkl. i motor	
3	Mellomaksling	GKN CV Aksling	1	kr 6 000	
4	Ekstra gir	SEW RXF87AD5/P	1	kr 7 000	Estimert pris
5	Propellanlegg med omstyring	NOGVA vridbart anlegg 1100-50	1	kr 70 000	Estimert pris
6	Elektromotor/Generator	Golden 10KW BLDC Motor vannkjølt	1	kr 6 900	
7	Tannreim med hjul	HTD tannrem og skiver med fast nav	1	kr 4 500	Estimert pris
8	EL-Motorstyring	Golden VEC500-48	1	kr 5 200	
9	Batteripakke	Chainpro48V 7kWh Li-bat.pak	4	kr 66 000	
10	WHR-Generator	Avhengig av valg	1		
11	Frikobling B-1	See vedlegg D	1	kr 3 000	Estimert pris
12	Frikobling B-2	See vedlegg D	1	kr 3 000	Estimert pris
13	Inverter/Lader	Victron MultiPlus-II 48/5000/70-50	1	kr 20 500	
14	Trustlager	Hydradrive HD113 Frei	1	kr 4 500	
15	Sidepropell	Vetus BOWA0421	2	kr 26 000	Estimert pris
16	Motorvarmer	ELOC 1100W	1	kr 2 000	
Sum				kr	284 600

Tabell 8: Komponenttabell med prisliste for alternativ 1

Prisene som ikke er estimerte er hentet fra leverandører [33, 57, 60, 61]

Alternativ 2:

Tabell 9 viser at kostnaden for alternativ 2 er redusert med ca. 60 000kr i forhold til alternativ 1. Her har en ikke med det ekstra giret eller sidepropeller, denne summen er den som vil bli brukt til sammenligning i kapittel 6.3. Kostnaden av WHR-generator er ikke tatt med i noen av alternativene siden dette systemet vil kunne variere i pris og omfang. Det er heller ikke et utbredt utvalg av små WHR-systemer for salg til privatpersoner.

Komponent	Beskrivelse	Spesifikasjoner	Antall	Pris	Kommentar
1	Fremdriftsmotor	Beta 16 Greenline	1	kr 60 000	Estimert pris
2	Marine gir	PRM90 2,04:1	1	Inkl. i motor	
3	Mellomaksling	GKN CV Aksling	1	kr 4 000	
5	Propellanlegg med omstyring	Westmekan 25	1	kr 50 000	
6	Elektromotor/Generator	Golden 10KW BLDC Motor vannkjølt	1	kr 6 900	
7	Tannreim med hjul	HTD tannrem og skiver med fast nav	1	kr 4 500	Estimert pris
8	EL-Motorstyring	Golden VEC500-48	1	kr 5 200	
9	Batteripakke	Chainpro48V 7kWh Li-bat.pak	4	kr 66 000	
11	Frikobling B-1	See vedlegg D	1	kr 3 500	Estimert pris
13	Inverter/Lader	Victron MultiPlus-II 48/5000/70-50	1	kr 20 500	
14	Trustlager	Hydradrive HD108 Balder	1	kr 3 500	Estimert pris
16	Motorvarmer	ELOC 1100W	1	kr 2 000	
Sum				kr	226 100

Tabell 9: Komponenttabell med prisliste alternativ 2

Standard innenbordsmotor:

Prisen for bare dieselmotor med et enkelt propellanlegg vil komme på ca. 82 000kr (se Tabell 10). En betydelig lavere pris enn for de to ovenfornevnte systemene. I dette tilfellet vil det ikke være mulighet

for å lagre energi eller levere annet enn 12VDC strøm (ikke ideelt for oppvarming eller matlaging). Effekten er også lavere siden en ikke har den elektriske motoren. Om en velger en større dieselmotor for å kompensere for den totalt sett lavere effekten vil prisen passere 100 000 kr. En tilleggs kostnad på ca. 22.000kr (dieselvarmer og gassfyrte kokeplate) må medregnes. Selv med alt ekstra utstyr ligger en fremdeles rundt 100 000kr lavere enn for de hybride systemene. Mye av dette er grunnet batteripakken som vil koste ca. 70 000kr (Tabell 8), og det vribare propellanlegget som kan koster mellom 30 000- 40 000kr mer enn et tilsvarende fast propellanlegg.

Beskrivelse	Spesifikasjoner	Antall	Pris	Kommentar
Fremdriftsmotor	Beta 16 Greenline	1	kr 60 000	Estimert pris
Marine gir	PRM90 2,04:1	1	Inkl. m. motor	
Propellanlegg	Sleipner	1	kr 20 305	Komplett
Motorvarmer	ELOC 1100W	1	kr 2 000	
Sum			kr 82 305	

Tabell 10: Komponenttabell med prisliste for innenbordsmotor uten hybrid fremdrift

Tilsvarende utenbordsinstallasjon:

Som et ekstra sammenligningsalternativ er det her tatt med det som er ansett som det aller rimeligste alternativet for fremdrift med tilsvarende motorkraft (vist i Tabell 11). En bensindrevet utenbordsmotor som monteres på båtens akterspeil. Bruker en bensin som drivstoff vil driftskostnad bli høyere enn for tilsvarende diesel forbruk. Årsaken er at det ikke selges avgiftsfri bensin på lik linje med avgiftsfri diesel til fritidsbåter.

«High Thrust» er Yamaha sine modeller med økt skyvekraft for deplasement skrog. De fleste andre produsenter av utenbordsmotorer har tilsvarende modeller i sitt sortiment. En stor ulempe er at dette er sjøvannskjølte motorer der det ikke er noen mulighet for å benytte seg av spillvarme fra motor.

Beskrivelse	Spesifikasjoner	Antall	Pris	Kommentar
Fremdriftsmotor	Yamaha FT25 High Thrust	1	kr 57 500	For depl.båt
Fjernstyring	Kontrollboks og kabel	1	Inkl. m. motor	
Sum			kr 57 500	

Tabell 11: Komponenttabell med prisliste for utenbordsmotor

Kostnaden av batteripakken vil i alle elektriske og hybride fremdriftssystem være avgjørende for den endelige prisen på systemet. Det aller rimeligste alternativet vil være å kjøpe batterier rett fra en gjenvinningsstasjon for biler. Da må imidlertid vedkommende som skal jobbe med batteriet ha kjennskap til slike batteripakker for å kunne demontere de på en forsvarlig måte. En må også sette opp egne batteripakker med passende batteriovervåkningssystemer (BMS). Alt dette medfører kostnad og tidsbruk. Et estimat er at prisen vil kunne reduseres fra om lag 70 000kr ned til ca. 50- 60 000kr for en tilsvarende batteripakke med 28kWh kapasitet. Basert på at prisen for en passende batteripakke fra en elektrisk bil ligger på ca. 25.000-30.000 kr [62].

Komponenter og systemer for spillvarmegjenvinning vil tilføre en ytterlig kostnadsøkning. Det er fare for at kostnad vil skygge over besparelsene en får under drift (kapittel 5.3). Dette spesielt for de minste anleggene siden prisen på et WHR-anlegg (kr/kW) øker for de små anleggene.

Erfaringer fra bilindustrien tilsier at en kan forvente seg en prisreduksjon på batterier og WHR-systemer til fritidsbåter om noen år, gitt at det blir et stort marked for dette.

4 Simulering

Simuleringsmodeller benyttes i bilindustrien for å utvikle nye og optimaliserte systemer og løsninger. For båter vil det da være naturlig å starte i samme retning siden simulering må til for å få optimalisert et system, og da spesielt en kontrollenhet for AUTO/Hybrid-modus. Ved hjelp av slike verktøy kan det evalueres løsninger som ellers er for dyrt og komplisert til å undersøke i praksis.

4.1 Ricardo IGNITE

Ricardo IGNITE er et fysikkbasert utviklerverktøy for modellering og simulering av kjøretøy. Det består av et omfattende «modelica» bibliotek som gir brukeren rask tilgang på nøyaktige modeller av komponenter for å bygge opp komplekse kjøretøysystemer. Dette inkluderer også hybride-, elektriske- og fossilt-drevne kjøretøy [63].

Programmet består av en kombinasjon av modeller for forskjellige undersystemer med delt datagrunnlag. Ved å utføre flere utregninger for ulike scenarioer (f.eks. driftsprofiler) eller for parameterendringer over tid, kan en få ut resultater for komplekse driftsforhold. Resultater som opplyser om systemets forventede ytelse, utslipp og karakteristikk. Programvaren har sin opprinnelse i bilindustrien, men ble etter hvert utviklet til å dekke et bredt bruksområde også innenfor andre sektorer som infrastruktur, marine og annen landbasert transport.

Det er lett å bygge opp modeller og samarbeide med andre programmer i Ricardos portefølje, som WAVE (dynamisk simulering av f.eks. motorer) og VECTIS (strømningssimulering). På denne måten kan en bygge opp en større detaljkompleksitet og simulere både kjøretøy og forbrenningsmotor i detalj. Implementering av strømningsanalyseverktøy og andre data-assisterte utviklerverktøy gjør dette til en allsidig plattform for flere sektorer.

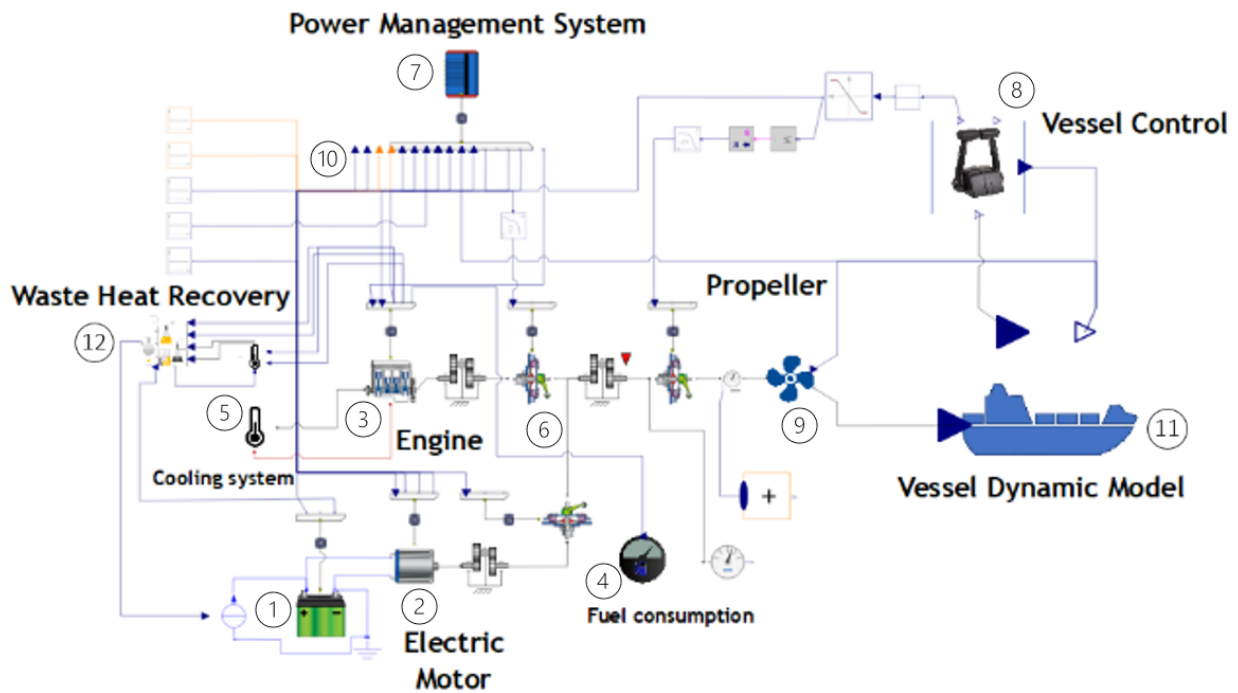
«Modelica» er et objektorientert, åpen-kilde modelleringsspråk basert på matematiske modeller for å kunne simulere komplekse systemer. Det inneholder modeller for flere ulike systemer: mekanisk, elektrisk, elektronisk, hydraulisk, termisk, kontroll, kjemisk og kraftproduksjons komponenter.

4.2 Simuleringsmodell

Det fantes ingen eksisterende hybrid marinemodell for mindre marinefartøy i IGNITE bibliotekene til Ricardo. På CIMAC congress i 2019 [21] ble det presentert en provisorisk modell for et hurtiggående passasjerskip (delvis vist i Figur 12). Denne modellen er bare delvis overførbart til fritidsbåter, det måtte derfor lages en ny modell med utgangspunkt i noen utvalgte undermodeller.

Siden dette krevde endringer i IGNITE på basekode-nivå ble programmeringsarbeidet utført i samarbeid med Ricardo.

Figur 43 viser den endelige hybridmodellen i IGNITE. Komponentene er nummerert med forklaring i kapittel 4.3



Figur 43: Modell av det hybride fremdriftssystemet i IGNITE

Modell for propell, skrog og kontrollpanel (vessel control) ble hentet fra CIMAC modellen. Hoveddrivlinjen går direkte fra forbrenningsmotor til propell, med en parallell drivlinje koblet til den elektriske motor/generatoren. Ønsket hastighet blir sendt fra kontrollpanel til kontrollenhet i form av et pådragssignal (mellom 0 og 1). Pådragssignalet blir behandlet i kontrollenheten og videresendt til forbrenningsmotor og/eller elektromotor. Propellen tar opp effekten og gir skroget skyvekraft (thrust) for å skape fremdrift. Hastigheten skroget oppnår blir sendt tilbake til kontrollpanelet, og et nytt pådragssignal blir sendt til kontrollenheten. Denne syklusen går helt til en har oppnådd ønsket hastighet.

Mer detaljerte forklaringer over de ulike komponentene kommer i kapittel 4.3.

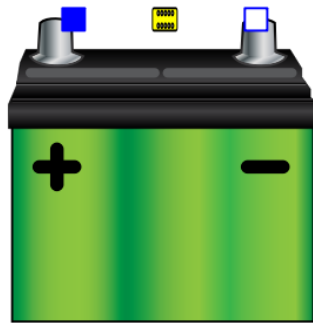
4.3 Komponenter

Følgende hovedkomponenter (ref. Figur 43) vil bli beskrevet i nærmere detalj:

1. Batteripakke
2. Elektromotor/Generator
3. Forbrenningsmotor
4. Forbruksmåler
5. Kjølesystem
6. Koblinger og transmisjoner
7. Kontrollenhet
8. Kontrollpanel
9. Propell
10. Ryggrad/CANbus
11. Skrog
12. Spillvarmegjenvinning (WHR)

Batteripakke

Denne modellen ble hentet fra modellica biblioteket i IGNITE. Figur 44 viser batteripakken, her kan en legge inn flere parameter om ytelse, utladning, aldring, termisk påvirkning, intern motstand og mer. I denne oppgaven ble det ikke brukt aldringsmodell eller termisk påvirkning. Disse er mer aktuelle når en skal studere selve batteripakken nærmere over et lengre tidsforløp. Batteripakken er modellert etter Figur 38 med 48V spenning og en kapasitet på 525Ah (25,2kW eller 1890000 Coulomb).



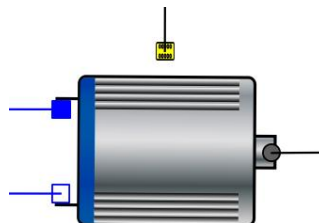
Battery_2Pin_1

Figur 44: Batteripakken representert i IGNITE

Elektromotor/Generator

Den elektriske motoren i hybridsystemet, som også fungerer som generator, vil bli simulert ved hjelp av standardkomponenten «MotoGenerator_2Pin». Den har følgende fire tilkoblingspunkt:

- Batteriterminaler: Blå er positiv og hvit er negativ. Kobles direkte til batteripakken.
- CANbus: Den gule boksen på toppen av komponenten (Figur 45). Denne er tilkoblet ryggraden i modellen. Styring kommer fra den hybride kontrollenheten, der signalet bestemmer om motoren skal yte effekt, eller generatoren skal oppta effekt. Siden elektromotor og generator er en og samme komponent kan den ikke fungere som generator og motor samtidig.
- Mekanisk tilkobling: Akslingen ut av motoren, vist med den grå linjen til høyre, er koblet til den mekaniske frikoblingen B-1 og videre til drivlinjen inn på reduksjonsgiret.



MotorGenerator

Figur 45: Elektrisk motor/generator i IGNITE

Parameterne for elektromotor/generator vises i Figur 46.

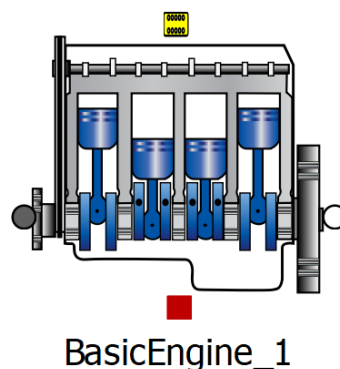
Figur 46: Parameter for "MotorGenerator_2Pin"

Forbrenningsmotor

Dieselmotoren i båten kan en finne igjen i IGNITE modellen som komponenten «BasicEngine» (punkt 3 i Figur 43). Ikonet kommer frem i Figur 47. Denne komponenten benytter seg av tabellerte verdier for motorens ytelse, forbruk og varme overført til kjølevann. Inn til komponenten trenger en start/stopp signal (KEY_ON) og pådrag begge to mottatt via den gule CANbus porten. Ut fra komponenten har en to flenser som kan overføre mekanisk effekt, en i hver ende av motoren (grå til venstre og hvit til høyre). Den til venstre leverer effekt til hjelpesystemer som kjølevannspumpe og dynamo. Den til høyre leverer hovedeffekten til drivlinje og propell.

Fra «BasicEngine» sendes det turtall (RPM) og dreiemoment (Nm) til WHR-systemet som velger en effekt (kW) som systemet mottar fra eksosen basert på motorens driftspunkt.

I underkant av komponenten er en rød varmeport som er tilknyttet kjølesystemet. Her får en overført termisk energi fra motoren til kjølesystemet. En kan også utvide resultatene ved å legge inn tabeller for de ulike avgasskomponentene.



Figur 47: "BasicEngine" i IGNITE, en kan merke seg den røde varmeporten i underkant og den gule CANbus porten i toppen

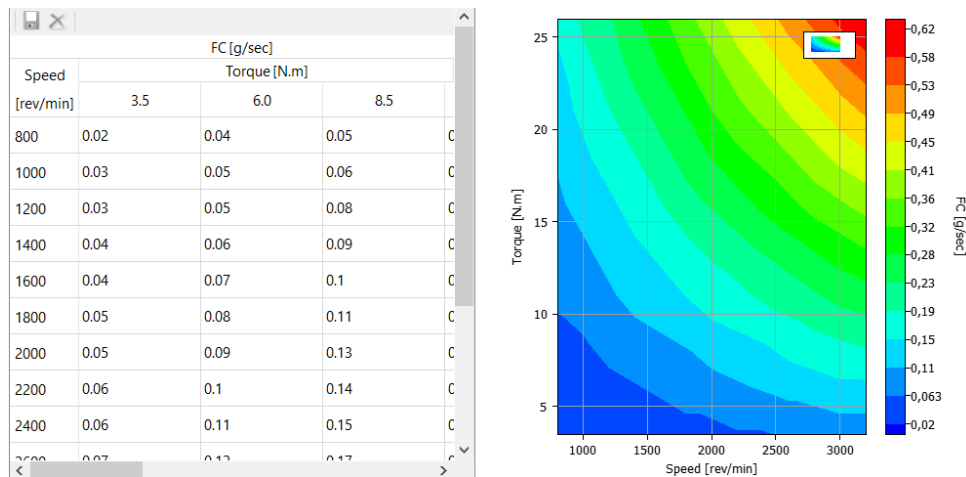
De nødvendige tabellene for å representere den tiltenkte motoren, en Kubota Z602, måtte lages ved hjelp av den data som vart tilsendt av forhandler [59]. Da det ikke var tabeller som dekket et bredt turtall-dreiemoment-område, måtte det interpoleres data imellom faste punkt (maks kW, maks Nm) og avlesning av grafer (se Tabell 5). Dette ble gjort i Excel, og utvidet til å dekke ytelse, kjølevannsvarme, eksosvarme og forbruk.

Fra IGNITE ble det hentet en Matlab-fil fra et eksempel som følger med programvaren. I denne filen var der matriser med informasjon om ytelse, forbruk og varmeenergi for en eksempelmotor. Verdiene fra Excel, vist i Tabell 12, ble overført til Matlab-filen for å kunne enkelt implementeres og redigeres i IGNITE sin egen redigeringsfunksjon. Figur 48 viser en visuell representering av forbrukstabellen.

Ytelse [kW]										
Turtall [rpm]	Dreiemoment [NM]									
	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26
800	0.29	0.50	0.71	0.92	1.13	1.34	1.55	1.76	1.97	2.18
1000	0.37	0.63	0.89	1.15	1.41	1.68	1.94	2.20	2.46	2.72
1200	0.44	0.75	1.07	1.38	1.70	2.01	2.32	2.64	2.95	3.27
1400	0.51	0.88	1.25	1.61	1.98	2.35	2.71	3.08	3.45	3.81
1600	0.59	1.01	1.42	1.84	2.26	2.68	3.10	3.52	3.94	4.36
1800	0.66	1.13	1.60	2.07	2.54	3.02	3.49	3.96	4.43	4.90
2000	0.73	1.26	1.78	2.30	2.83	3.35	3.87	4.40	4.92	5.45
2200	0.81	1.38	1.96	2.53	3.11	3.69	4.26	4.84	5.41	5.99
2400	0.88	1.51	2.14	2.76	3.39	4.02	4.65	5.28	5.91	6.53
2600	0.95	1.63	2.31	2.99	3.68	4.36	5.04	5.72	6.40	7.08
2800	1.03	1.76	2.49	3.23	3.96	4.69	5.42	6.16	6.89	7.62
3000	1.10	1.88	2.67	3.46	4.24	5.03	5.81	6.60	7.38	8.17
3200	1.17	2.01	2.85	3.69	4.52	5.36	6.20	7.04	7.87	8.71

Forbruk [g/s]										
Turtall [rpm]	Dreiemoment [NM]									
	3.5	6	8.5	11	13.5	16	18.5	21	23.5	26
800	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16
1000	0.03	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
1200	0.03	0.05	0.08	0.10	0.12	0.14	0.17	0.19	0.21	0.23
1400	0.04	0.06	0.09	0.12	0.14	0.17	0.19	0.22	0.25	0.27
1600	0.04	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31
1800	0.05	0.08	0.11	0.15	0.18	0.22	0.25	0.28	0.32	0.35
2000	0.05	0.09	0.13	0.17	0.20	0.24	0.28	0.32	0.35	0.39
2200	0.06	0.10	0.14	0.18	0.22	0.26	0.31	0.35	0.39	0.43
2400	0.06	0.11	0.15	0.20	0.24	0.29	0.33	0.38	0.42	0.47
2600	0.07	0.12	0.17	0.21	0.26	0.31	0.36	0.41	0.46	0.51
2800	0.07	0.13	0.18	0.23	0.28	0.34	0.39	0.44	0.49	0.55
3000	0.08	0.14	0.19	0.25	0.30	0.36	0.42	0.47	0.53	0.59
3200	0.08	0.14	0.20	0.26	0.32	0.38	0.44	0.50	0.56	0.62

Tabell 12: Tabeller med estimert data over ytelse og forbruk for en Kubota Z602

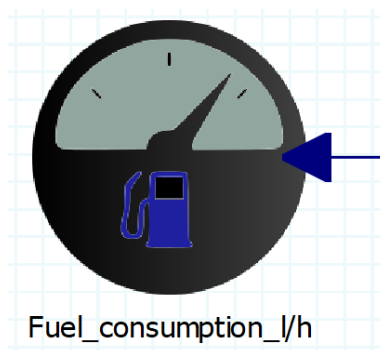


Figur 48: Visualisert forbrukstabell i IGNITE

Det er ikke mulig å hente ut andre verdier fra motoren enn de som er lagt inn i tabellene. For å få data, ifra simuleringen, om utslipp fra forbrenningsmotor må det legges inn tabeller for utslippskarakteristikk.

Forbruksmåler

Forbruket til motoren blir gitt i gram per sekund fra «BasicEngine» modellen. I maritim sammenheng er det mer praktisk å ha verdien i liter per time, og totalt forbrukt drivstoffmengde for en gitt reise. Komponentene «Gain» ble benyttet til å konvertere signalet. Dette er en komponent som multipliserer en konstant med verdien på inngangssignalet. Ikonet fra simuleringmodellen er vist i Figur 49.



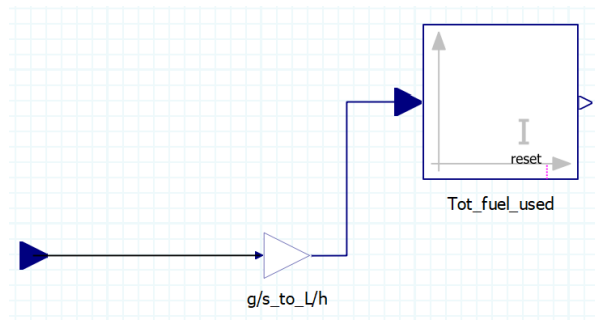
Figur 49: Forbruksmåler i IGNITE

Utleddning av verdi for konvertering fra g/s til L/h:

$$1 \frac{g}{s} \cdot \frac{3600s}{1h} \cdot \frac{1kg}{1000g} \cdot \frac{1L}{0,84kg} = \frac{30 L}{7 h} \quad (4.1)$$

For beregningen ble det antatt en egenvekt for diesel på 0,84kg/L [28].

Integratoren (den største blokken i Figur 50) summerer opp forbruket for hvert sekund og dividerer det med simuleringstid for å få total mengde forbrukt, i liter, i løpet av en simulering.



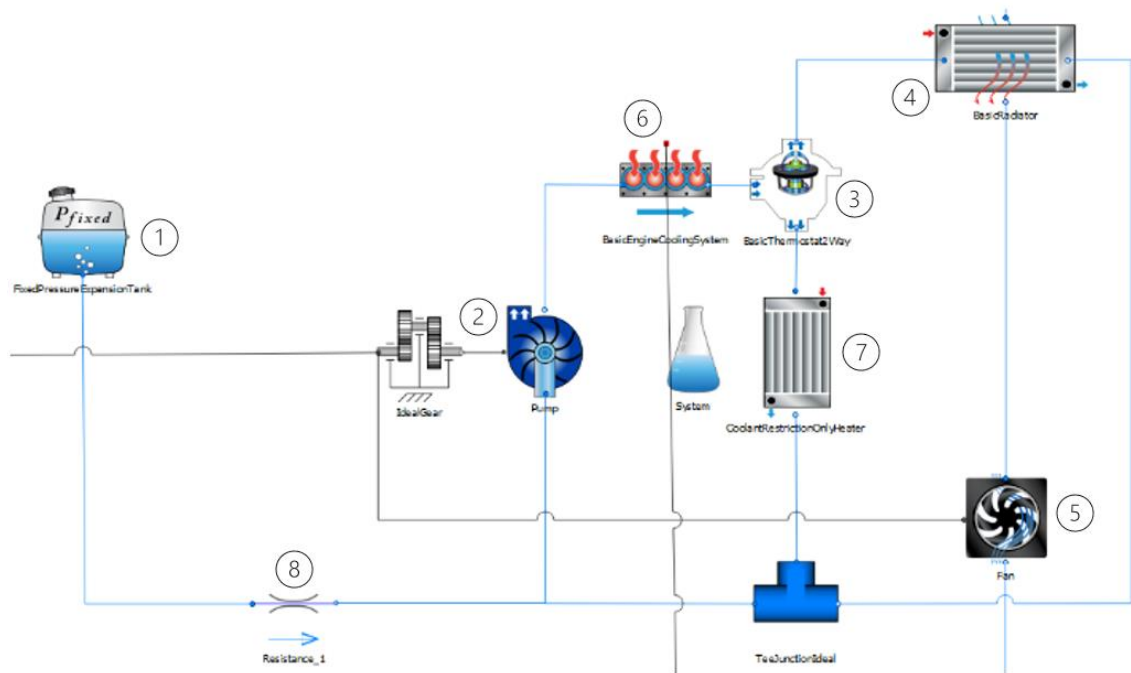
Figur 50: Komponentene i forbruksmåleren: "Gain" og "Integrator"

Kjølesystem

For modelleringen av kjølesystemet ble det brukt en eksisterende IGNITE-modell. Eksempelmodellen er nær identisk med den virkelige motoren sitt kjølesystem. Forskjellene vil være at det i båt er benyttet en rør-varmeveksler eller utvendige kjølerør istedenfor vann til luft radiator. Volumstrømmen til kjølepumpen ble endret slik at den bedre tilsvarer den virkelige verdien for motoren brukt i denne oppgaven. Verdiene ble hentet fra et utvidet informasjonshefte for Kubota Z602, levert av Beta Marine i England [59].

Figur 51 viser modellen for kjølesystemet bestående av følgende komponenter:

1. Ekspansjonstank
2. Kjølevannspumpe med utveksling
3. Termostat
4. Radiator
5. Kjølevifte for radiator
6. Varme-bro (for overføring av termisk energi fra motorblokk til kjølevann)
7. Varmeapparat (ble benyttet for å simulere varmetap fra motorblokken)
8. Strømningsfriksjon

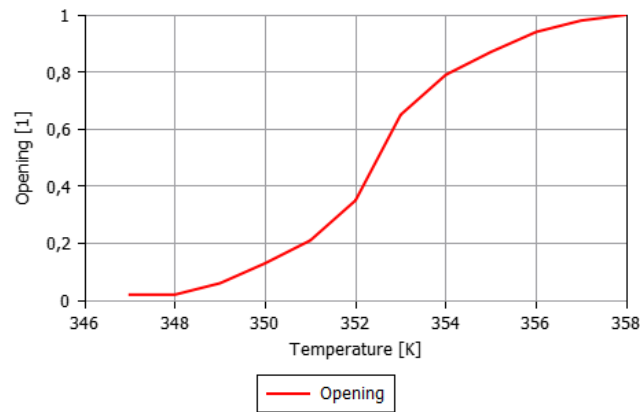


Figur 51: Kjølesystemet til motoren i IGNITE modellen

Systemet virker på følgende måte:

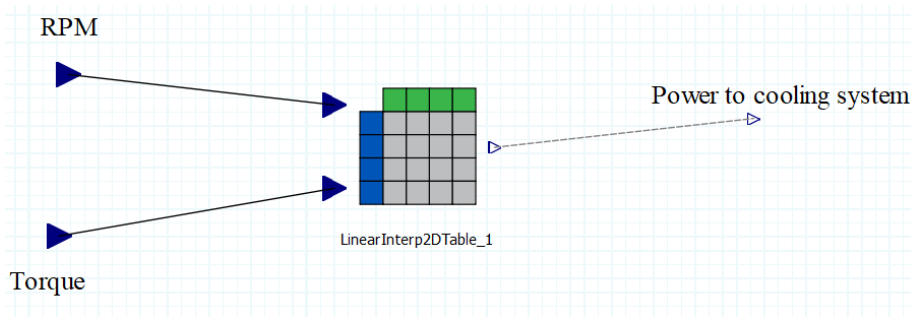
- Ved kjølevannstemperatur under 74°C: Kjølevannet sirkulerer fra pumpen gjennom motorblokk og topplukk så videre til termostat og tilbake til pumpen.
- Ved kjølevannstemperatur mellom 74°C og 85°C: Kjølevannet sirkulerer i hovedsak bare gjennom motorblokken. Etter hvert som temperaturen øker, vil gradvis mer og mer kjølevann bli sendt ut fra termostat til radiator/kjøler. Fra kjøler blir kjølevannet sendt tilbake til pumpen.
- Ved kjølevannstemperatur over 85°C: Alt kjølevannet blir sirkulert gjennom kjøler og tilbake til kjølevannspumpen på motor.

Åpningskurven til termostaten, vist i Figur 52, ble redigert i Matlab slik at den blir mer lik termostaten som står i den virkelige motoren. Data om termostaten ble hentet fra en verkstedshåndbok for den aktuelle motoren [64].



Figur 52: Åpningskurven for termostaten vist i et redigeringsvindu i IGNITE

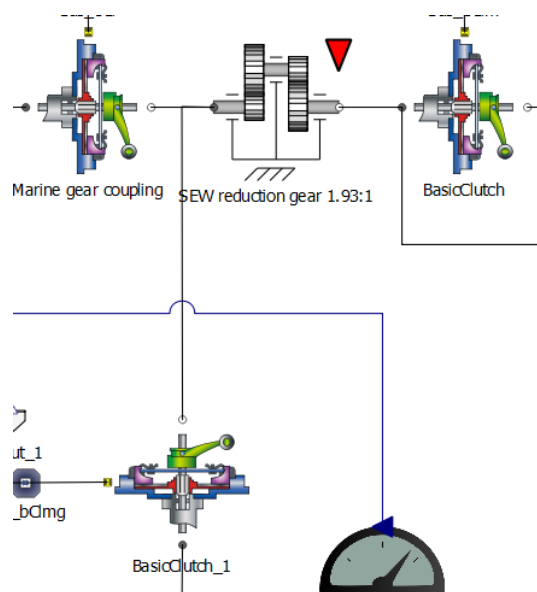
Det ble lagt inn en todimensjonal tabell som gir (via interpolering) motorens kjøleeffekt som resultat av turtall og dreiemoment (se Figur 53 for tabellens tilkoblinger i IGNITE). Dermed er det mulig å få informasjon om hvor mye energi som er tilgjengelig fra motorens kjølesystem for bruk til oppvarming eller spillvarmegjenvinning.



Figur 53: Tabellmodell for å få effekt overført til kjølesystem

Koblinger og transmisjoner

De ulike utvekslingene mellom kraftkomponenter er representert ved modelica blokken «IdealGear». Denne endrer rotasjonshastigheten til utgående aksling basert på et valgt utvekslingsforhold. Treghetsmomenter er lagt inn for de større komponentene for å få en reell akselerasjon av de roterende massene. Verdiene som er benyttet for de fleste komponenter er gitte verdier fra IGNITE som er representative for komponenter fra bilindustrien. Figur 54 viser «IdealGear» og «BasicClutch» komponentene.



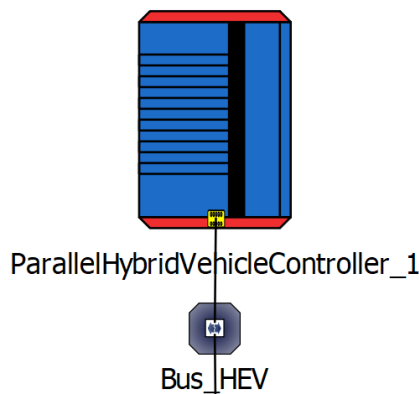
Figur 54: Koblinger i IGNITE

I den fysiske modellen vil det være totalt tre koblinger for å bestemme hvordan effekt fordeles i fremdriftssystemet. Komponenten «BasicClutch» ble benyttet for å representere en mekanisk kløtsj/kobling mellom gir og aksling for både dieselmotor, elektromotor og propell. Ved å sende enten '0' eller '1' til CANbus porten på koblingen kan en koble inn eller ut de ulike akslingene. De blir styrt av den hybride kontrollenheten.

En har også muligheten for å slure innkoblingen, men det vil ikke være aktuelt å benytte i denne modellen. Ved behov kan en justere stivheten til koblingen for å få en demper i drivlinjen om den skulle vise seg å bli ustabil.

Kontrollenhet

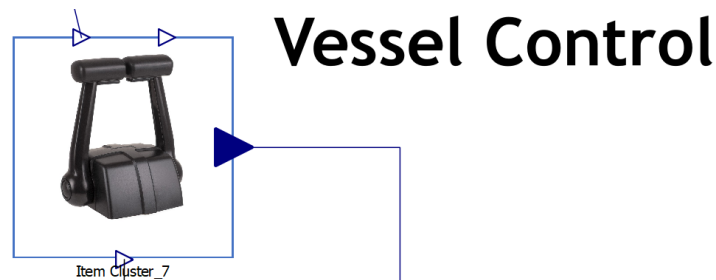
Styring eller kontrollenhet, se Figur 55 for ikon, har som oppgave å regulere forbrenningsmotor, elektromotor/generator, batteri og alle koblingene basert på informasjon fra kontrollpanelet og systemets driftsstatus (pådrag, hastighet, SOC). I modellen ble det primært benyttet en parallellhybrid kontrollenhet fra IGNITE. Styringen av systemet er nærmere forklart i kapittel 4.4.



Figur 55: Parallellhybrid kontrollenhet

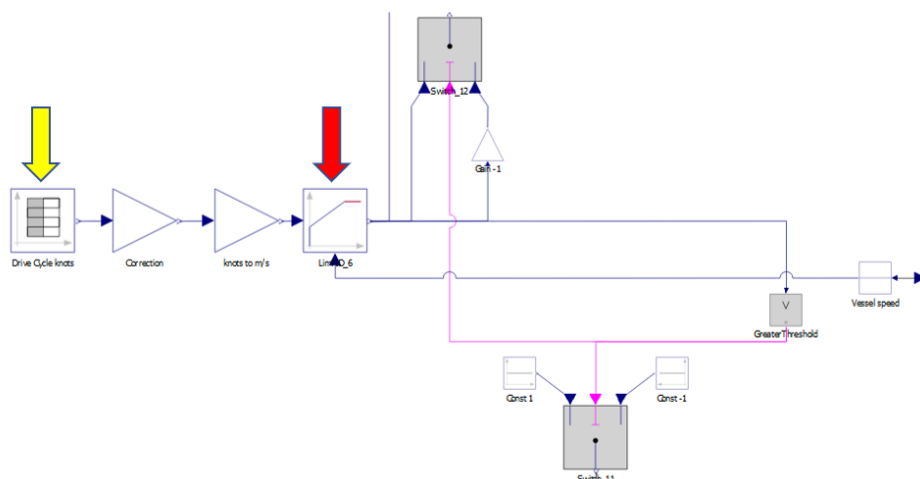
Kontrollpanel

Kontrollpanelet kan sammenlignes med gass- og girhendel i en båt, som også er ikonbilde til komponenten (Figur 56). Denne komponenten forteller systemet hvilken fart båten skal ha. Modellen leser av en tabell, som inneholder driftsprofilen, der det er tid [s] i ene kolonnen og hastighet [knop] i den andre. En PID-kontroller sørger for at signalet ut fra kontrollpanelet oppfører seg som et faktisk pådragssignal (ikke bare null og full). Denne komponenten ble hentet fra CIMAC-modellen.



Figur 56: Kontrollpanelets ikon-bilde

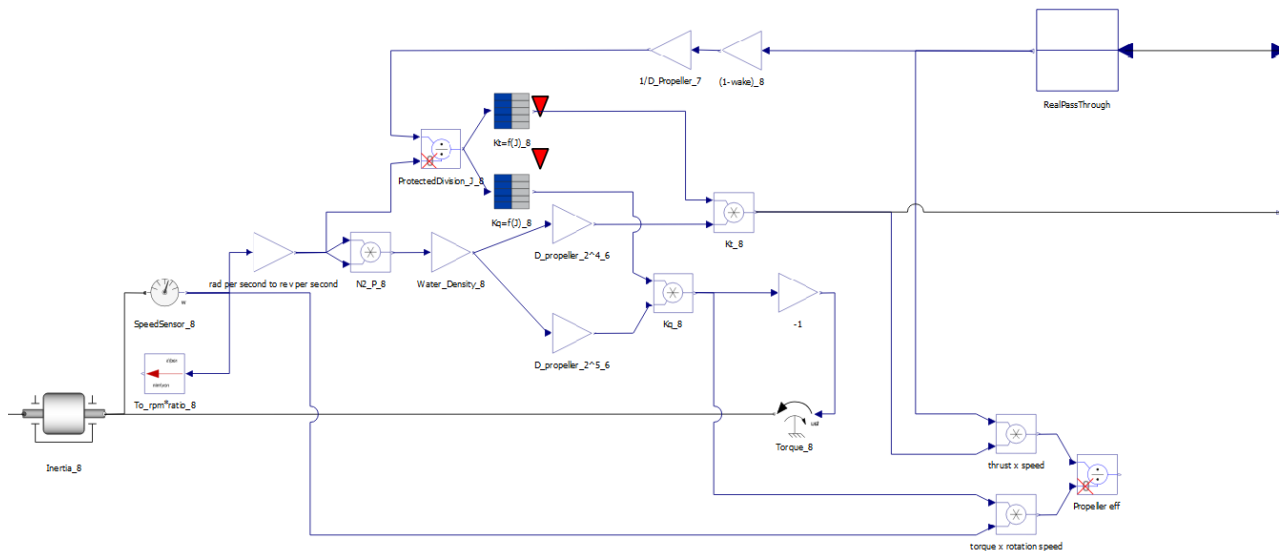
Figur 57 viser kontrollpanelets indre funksjoner. Det er lagt inn brytere for å handtere eventuelle negative signal fra tabell som kan indikere at båten skal reversere (switch 11 og 12). Denne funksjonen ble ikke benyttet i denne simuleringen da det setter krav til mer kompleks logikk i styringen av propell. I Figur 57 kan en legge merke til PID-blokken, markert med en rød pil, og tabell-blokken (gul pil).



Figur 57: Kontrollpanelets logiske-krets

Propell

Her ble det benyttet en eksisterende modell (fra CIMAC modellen) siden det er en egen prosess å representere en reell propell i modellica. Propellikonet kan en finne i Figur 43, punkt 9. Figur 58 viser hvordan propellen er oppbygd i IGNITE.



Figur 58: Propell-modellen i Ignite

Propellen arbeider med tre forskjellige faktorer: turtall, dreiemoment og skyvekraft. Teorien for en slik propellmodell baserer seg på samspillet mellom tre faktorer [65]:

- Dreiemomentfaktoren K_Q
- Fremstøts koeffisient K_T
- Fremdriftskoeffisienten J

Turtallet er bestemt av motor og transmisjoner, og vil balansere seg etter hvor mye dreiemoment som trengs for å rotere propellen ved et gitt tidspunkt.

Dreiemomentet som propellen krever, er bestemt av koeffisienten K_Q som er dreiemomentfaktoren til propellen. Dette er en kurve som gir ut en verdi for K_Q basert på avanseringskoeffisienten J (også kalt fremdriftskoeffisient). Resulterende verdi benyttes til å beregne dreiemomentet som behøves for å drive propellen under de gitte forhold.

Skyvekraften beregnes ved hjelp av fremstøts koeffisienten K_T som på samme måte som K_Q vil gi en verdi basert på J .

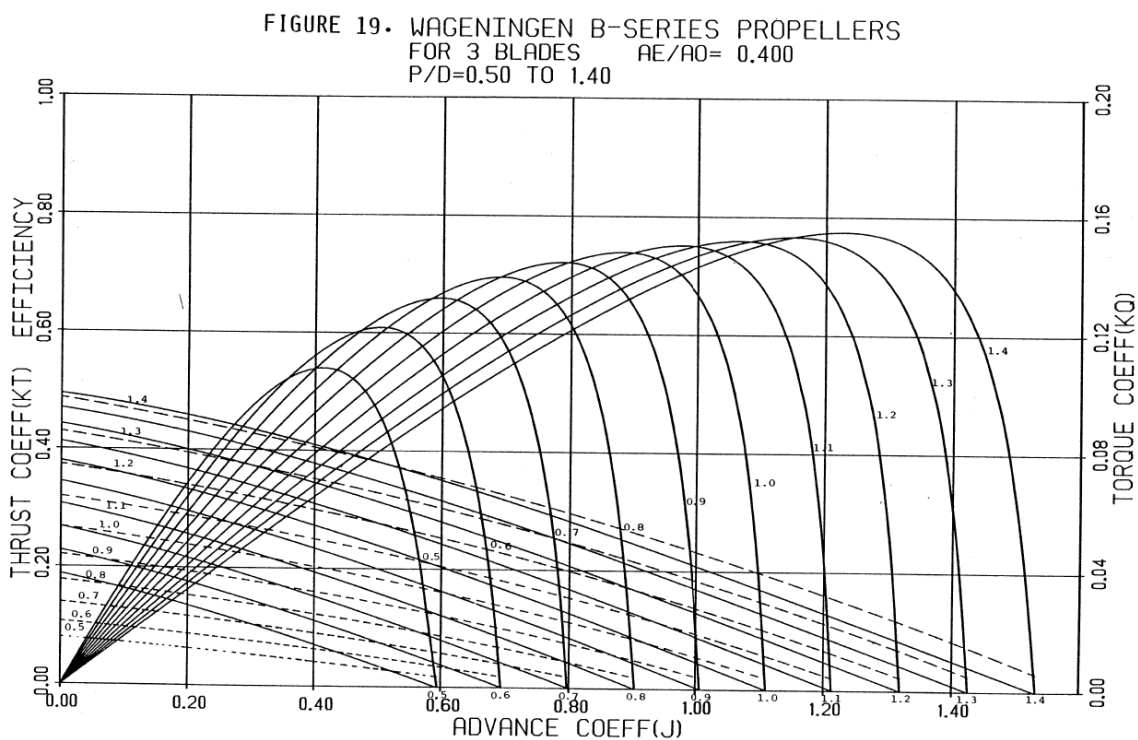
Formlene for de ulike koeffisientene er vist i vedlegg J. For å regne ut de nødvendige koeffisientene må en først ha propellkurver for den aktuelle propellen. I modellen som blir beskrevet i kapittel 3 blir det benyttet en vribar propell. Siden en ikke har en eksisterende modell for en vribar propell ble det heller benyttet kurver (Figur 59) som var tilgjengelige for en fast propell i et forventet størrelsesområde (basert på erfaringsdata fra et lignende fremdriftssystem) [65]. Turtallet på propellen ble endret via transmisjonens utveksling når en byttet mellom diesel-, elektrisk- og hybriddrift. En fast propell vil rotere med et gitt turtall ved en gitt hastighet, ved de samme eksterne faktorene (vind, vannstrøm, last i båt). Reduserer en turtallet på propellen kan det benyttes samme propellmodell for to ulike effekter (diesel og hybrid).

Data om en spesifikk propell ble hentet fra Michigan Wheels sin propellkalkulator [66] presentert i Tabell 13.

Diameter:	0.53 m
Stigning:	0.30 m
P/D:	0.57
Ae/Ao:	0.4

Tabell 13: Propelldata

P/D er stigning dividert med diameter og Ae/Ao er en faktor som forteller hvor stor del av det sirkulære arealet som dekkes av propellbladenes areal. Dette er faktorer som benyttes når en skal velge propellkurve. Se vedlegg K for flere propellverdier.



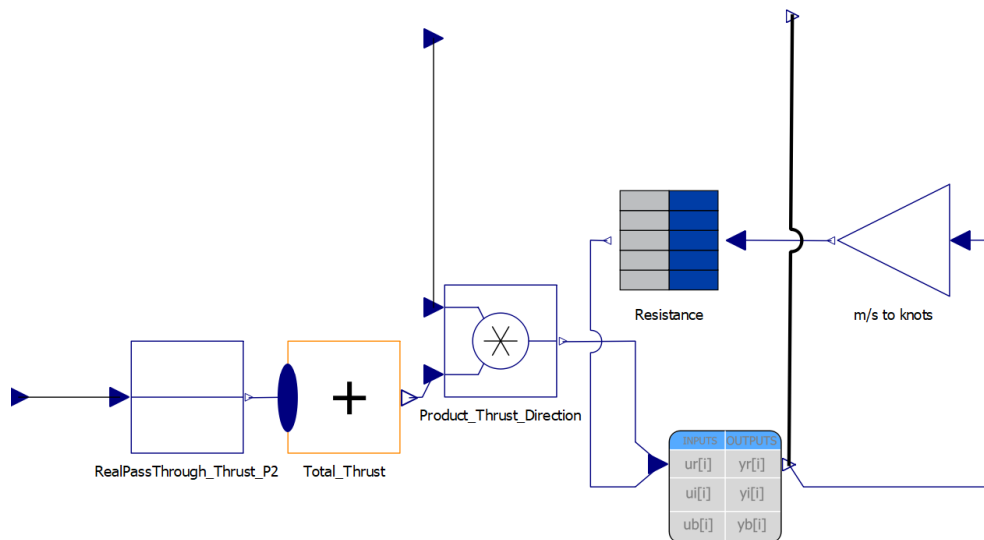
Figur 59: Propellkurve for å hente ut verdier brukt i propellmodellen i IGNITE. Modellen viser en 3-blads propell [65]

Ryggrad/CANbus

Kommunikasjonen mellom de ulike komponentene foregår via et CANbus «ryggrad» nettverk. Ved å benytte et CANbus-system kan en ha en enkelt tilkobling imellom de ulike komponentene i motsetning til flere analoge tilkoblinger. Enkelte funksjoner, som for eksempel spillvarmegjenvinningssystemet, benytter seg av enklere signaler direkte tilknyttet til objektet det henter informasjon fra.

Skrog

Skroget er modellert ved hjelp av tabellerte verdier for skrogets motstand i vannet. Ikonet for skroget finner en i Figur 43 punkt 11, mens de underliggende logiske funksjonsblokkene er vist i Figur 60. Skroget får informasjon om skyvekraften fra propellen og ønsket hastighet fra kontrollpanelet. Ut fra denne modellen får en informasjon om skrogets faktiske hastighet i vannet.

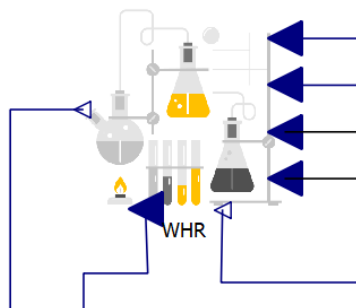


Figur 60: Komponentene som utgjør båtenes skrog

Siden en motstandskurve for et passende skrog ikke var tilgjengelig, ble det estimert en kurve basert på erfaringsdata behandlet i Excel-kalkulatoren. Verdiene ble så brukt i en empirisk formel, vist i vedlegg J, som gav en ny hastighet basert på faktisk effekt tilført propellen. Verdiene ble sammenlignet med en tabell [67] for forventet skroglengde av et displasement skrog. Ut ifra dette kunne en beregne/estimere flere punkt som gir forventet hastighet ved en gitt ytelse. Det ble det kjørt flere simuleringer og gjort iterasjoner der en endret motstandskurven til en fikk hastigheter som var innenfor det forventede området.

Spillvarmegjenvinning

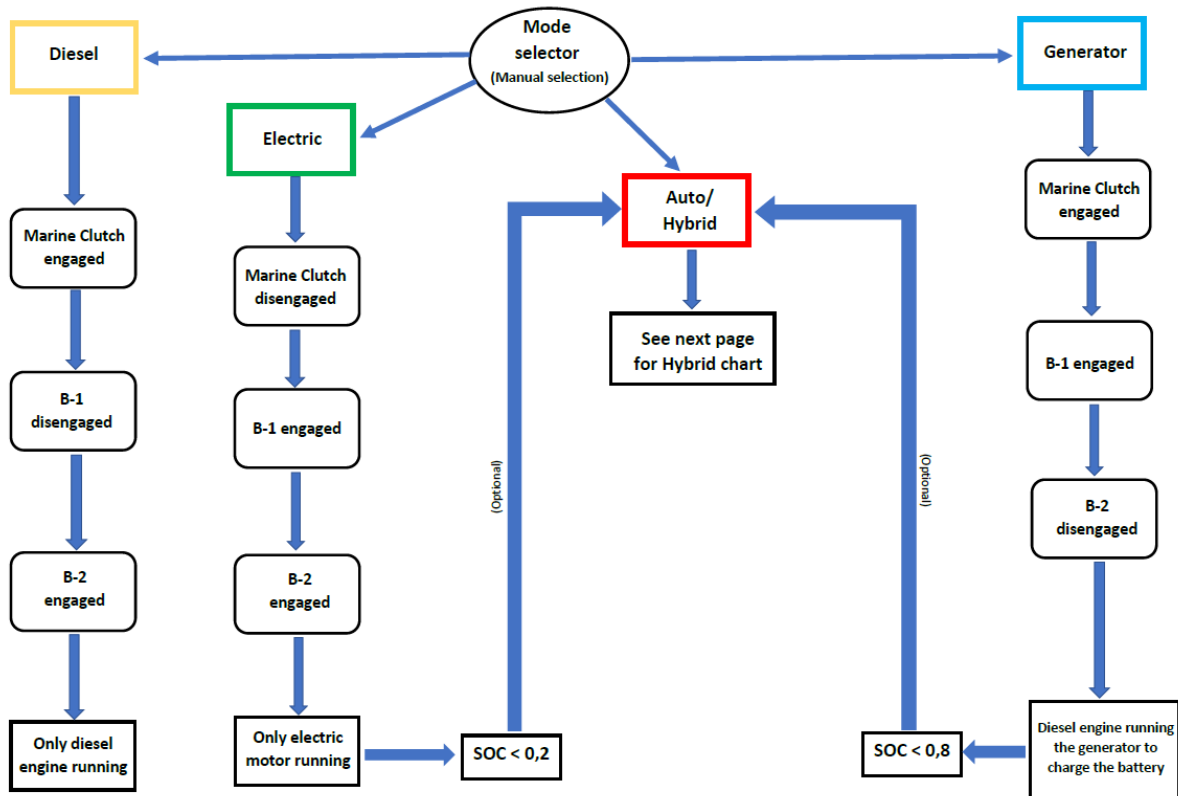
Hele spillvarmesystemet er representert med en enkelt blokk i modellen (se punkt 12 i Figur 43). Blokken (Figur 61) er tilkoblet forbrenningsmotorens turtall- og dreiemomentsignal for å beregne den tilførte eksosvarmen fra en tabell i WHR-modellen. Kjølesystemet er også tilkoblet, ved en separat tabell, for å hente ut varme fra motorens kjølevæske. Modellens utgang er koblet til batteripakken for bruk til opplading. Nærmere detaljer om spillvarmegjenvinningssystemet kan en finne i kapittel 4.5.



Figur 61: WHR-ikon i simuleringmodellen

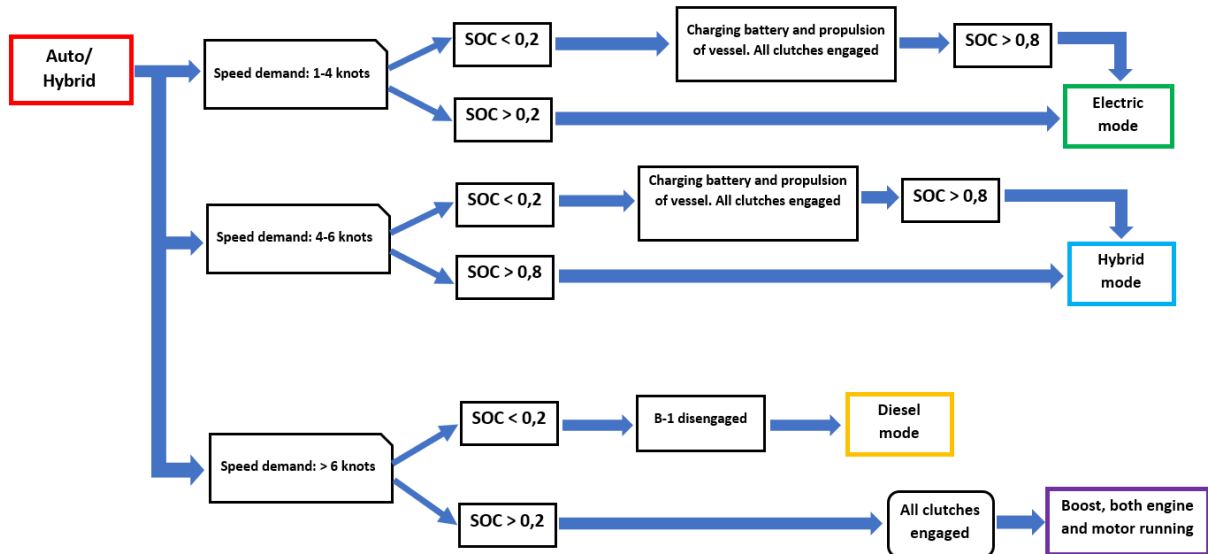
4.4 Styring av systemet

Dette inkluderer koblinger, pådrag til forbrenningsmotor, pådrag elektromotor og generatordrift. Det ble laget et logikk kart over hvordan de ulike komponentene skulle samarbeide basert på driftsmodus, batteriets status og båtens fartsområde, vist i Figur 62 og Figur 63.



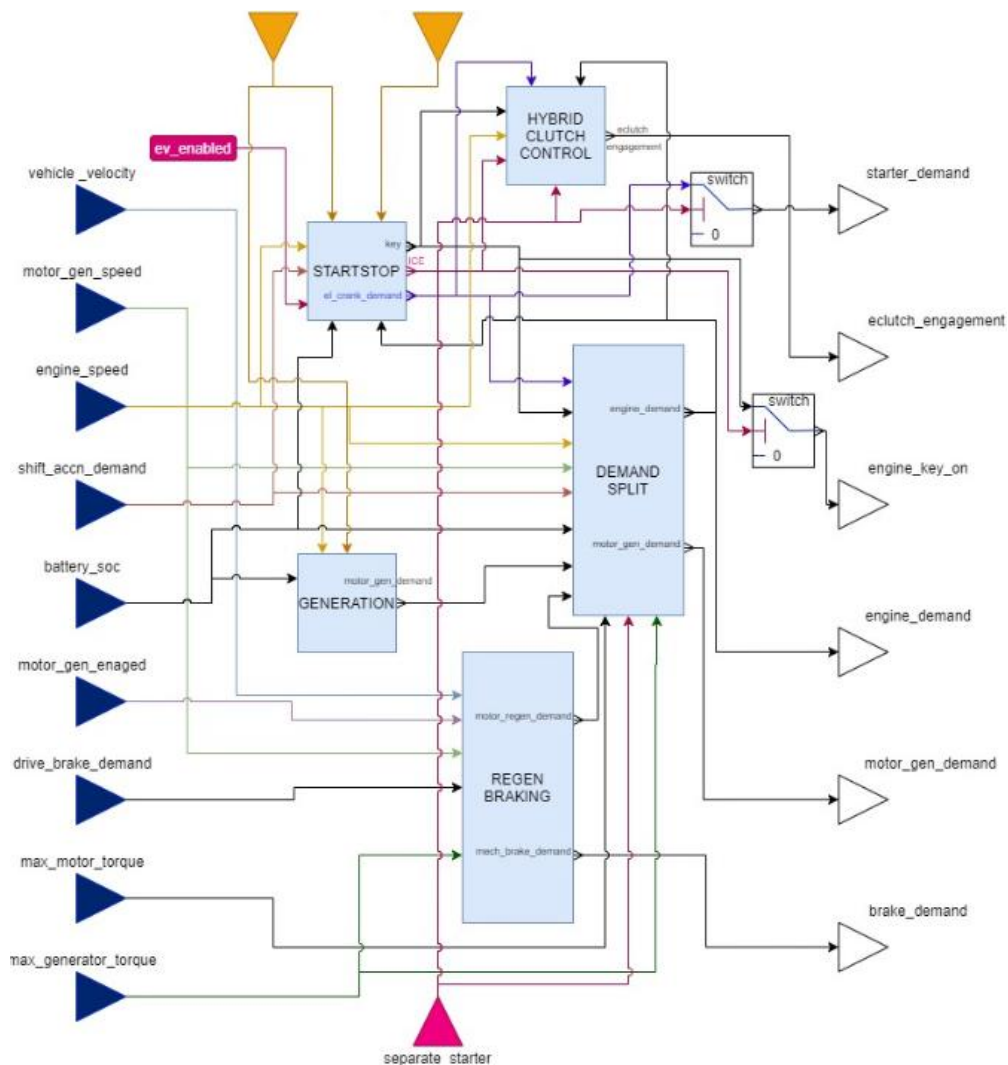
Figur 62: Logikk kart over de ulike driftsmodusene

Her er motorens eget marine gir omtalt som «Marine Clutch». Verdiene for batteriets SOC er valgt for å optimere batteriets levetid. Anbefalinger tilsier at ved å redusere lade- og utladningsområdet til å ligge mellom 20-80% vil en kunne oppnå dobbelt så mange sykluser som ved 100% utnyttelse av batteriets kapasitet [68].



Figur 63: Logikk kart for hybriddrift

Med logikkartene ble det diskutert hvilke muligheter som var aktuelle for å lage en hybrid kontrollenhet. Det ble valgt å gå for en av de inkluderte kontrollenhetene i IGNITE: en P2 parallellhybrid kjøretøy-kontrollenhet (ikon vist i Figur 55, indre krets vist i Figur 64). Ved å manipulere grenseverdiene i denne kontrollenheten kunne en kjøre systemet i diesel- og elektrisk modus. Forbrenningsmotor følger en belastningskurve valgt av kontrollenheten, mens den elektriske motoren supplerer med effekt for å oppnå ønsket effekt. Optimaliseringer som BSFC-optimering vil ikke kunne benyttes med denne kontrollenheten, og en kan heller ikke bestemme ved hvilken hastighet en skal benytte elektrisk fremdrift.



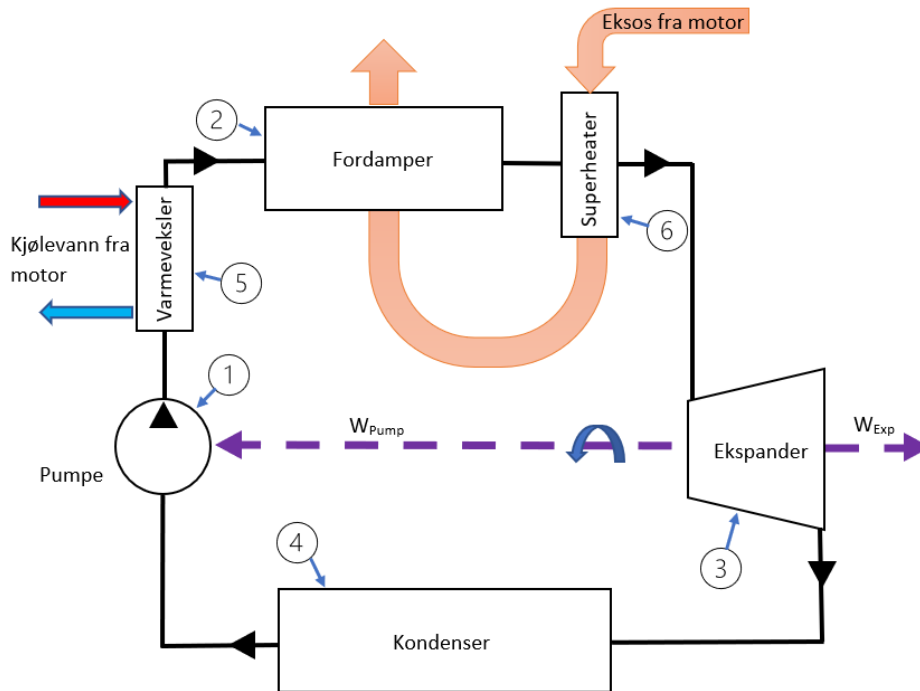
Figur 64: P2 parallellhybrid kontrollenhet for mindre kjøretøy, indre krets. Bilde er hentet fra IGNITE

Det to inngangssignaler (gir og brems), kunne ikke tilkobles siden den skal benyttes i en båt. Det måtte lages et eget grensesnitt, unikt til denne modellen, for å få kontrollenheten til å kommunisere med de ulike komponentene. En fikk heller ikke inkludert en mulighet for å lade opp batteriet slik som tiltenkt i Figur 62 og Figur 63. Men dette gav en mulighet for å kjøre simuleringen med hybriddrift. For å forsøke å vise hvordan en kontrollenhet basert på Figur 63 ville fungert kan en se til vedlegg L for en tabell som viser en to timers tur der systemets pådrag/styresignalverdier er lagt inn manuelt.

Når dieselmotoren går på tomgang, kan en lade batteriet gjennom funksjonen «Idle Charging» (tomgangslading). Dette er en funksjon som tillater motoren å generere strøm tilbake til batteripakken ved tomgangskjøring. Justerer en opp tomgangsturtallet kan det genereres mer strøm til lading av batteriet.

4.5 Spillvarmegjenvinning

WHR-systemet ble bygget opp av tabeller som gir ut en verdi for de ulike lastpunktene til forbrenningsmotoren. Det ble benyttet tre tabeller med ulike parametere for virkningsgrader (to for varmeveksling og en for ORC-kretsen). Systemet er modellert etter ORC-kretsen vist i Figur 65. I kapittel 2.4.2 kan en finne forventede virkningsgrader for WHR-systemer brukt i forsøk fra bilindustrien. I den generelle modellen er det antatt at mediet er R-134a siden dette finnes i IGNITE for simulering av kjølesystemer (Air Condition i bil). Målet med den generelle modellen i denne simuleringen er å vise effekten av et WHR-system på forbruket.

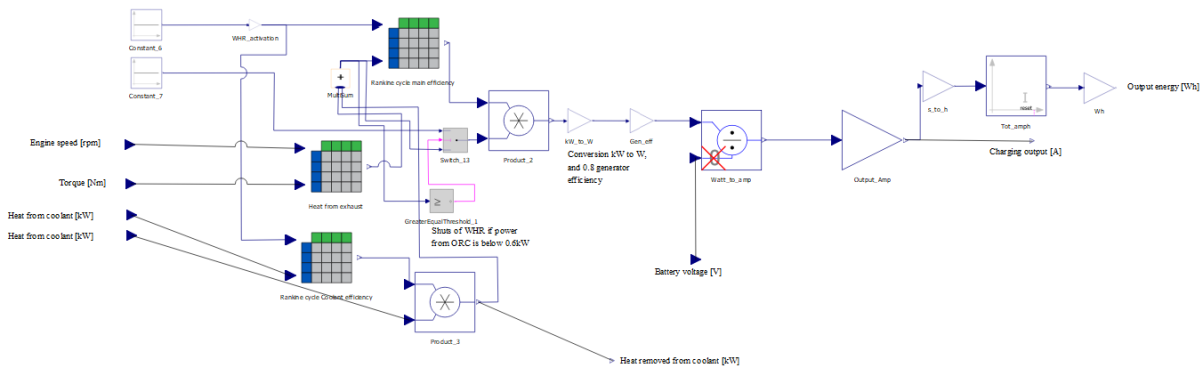


Figur 65: ORC-krets med energitilførsel fra både eksos og kjølevann

Figur 65 består av følgende komponenter:

1. Pumpe
2. Fordamper
3. Ekspander
4. Kondenser
5. Varmeveksler
6. Overheter for damp

Dette er en generell modell som viser hvordan en kan konvertere termisk til mekanisk energi. Vist i Figur 66 er de ulike komponentene som bygger opp WHR-systemet i IGNITE.



Figur 66: WHR-systemet med tabeller og logiske funksjonsblokker

Både eksos- og kjølevannsvarme er sendt til WHR-modellen fra forbrenningsmotor. ORC-kretsen har en variabel total virkningsgrad, som endrer seg basert på den omsette energien i kretsen. Den totale virkningsgraden varierer mellom 1% og 16% [47, 49], høyest når systemet får tilført maksimalt med termisk energi fra forbrenningsmotor.

Helt til høyre i Figur 66 er modellica komponentene som konverterer den termiske energien til elektrisk energi. Disse representerer en generator med konstant virkningsgrad på 80%.

De to grå blokkene i senter av Figur 66 har som oppgave å slå av WHR-systemet om den leverte effekten fra ORC-kretsen (sin ekspander) til generator er under 600W. Dette for å gi en modell med mer realistiske egenskaper siden en reell krets vil ikke kunne levere ut nyttig effekt i de nedre effektområdene fra en mindre dieselmotor. I lavlastområder er det relativt få kW med varmeenergi som kan hentes ut fra eksosen, og sammen med ORC-kretsen sine interne tap vil en kunne anta at det ikke er mye energi igjen for konvertering til elektrisk energi.

Modellen gir ut ytelse som er innenfor et estimert ytelsesområde basert på lignende teknologi fra andre kilder (kapittel 2.4.2). Den totale økningen i termisk virkningsgrad for andre generasjons Turbosteamer var 6% poeng [47]. Simuleringen i denne oppgaven oppnår en økning på 4% poeng ved hjelp av spillvarmegjenvinning. Ytelsen fra WHR-systemet følger dieselmotorens ytelse tett, forsinkelser grunnet oppvarming, treghet og varmeoverføring blir ikke representert. Maksimal mekanisk effekt fra ORC-kretsen til generator er 1,47kW og maks 1,1 kW fra generator til batteri. Tilført termisk energi er 7kW fra eksos + 1kW fra kjølevann, noe som gir en termisk virkningsgrad (for ORC-kretsen) på 15%. Om en sammenligner med den totale termiske energien tilgjengelig fra motorens eksos og kjølevann (7kW + 8 kW) blir virkningsgraden knappe 10%.

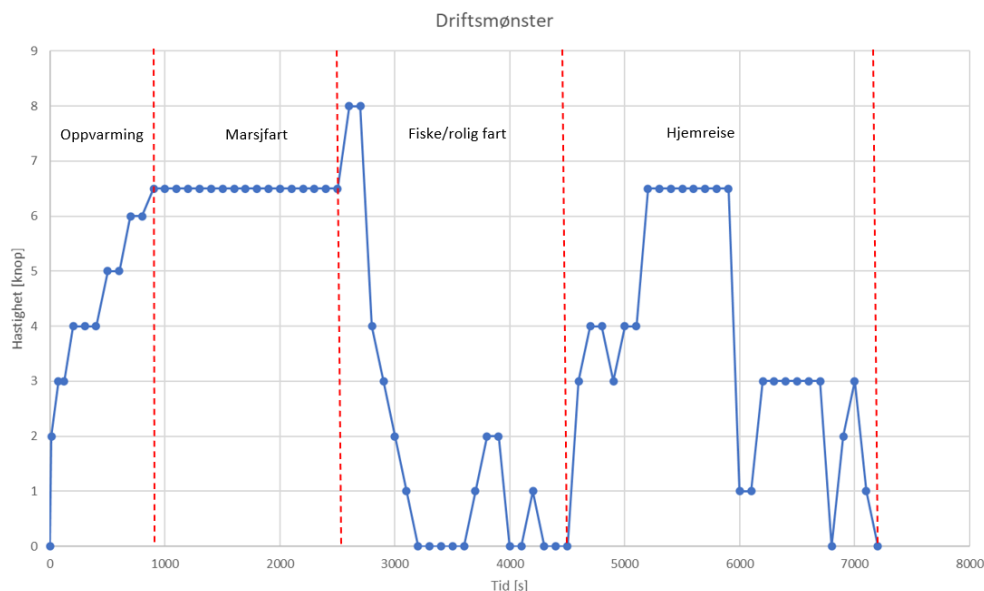
4.6 Driftsmønster

Utgangspunktet for å lage et driftsmønster til simuleringsmodellen var loggboken fra en fritidsbåt ifra båtsesongen 2012. I denne perioden ble det loggført 264,4 timers gangtid med båten. Tabell 14 viser hvordan gangtiden er fordelt over lastområdet til motoren i båten.

% av tot driftstid	Sum [h]	Gjennomsnittlig durasjon for en tur [h]	Lastområde	Durasjon i timer [h] hver kolonne er en tur											
12	32	0.6	Tomgang	0.75	0.5	0.5	0.4	0.5	2	0.5	1.5	0.5	1		
17	45	0.8	20 %	0.5	1	2	1.5	0.75	1	1.5	1	0.5	0.5		
18	48	0.9	50 %	1	0.5	0	2.5	1.5	0.5	3	1.5	0.5	0.2		
47	124	2.3	75 %	2	5	0	1	6	1	0.4	3	0	0.3		
6	15	0.3	100 %	0.3	0.2	0	0	0.5	0.1	0	0.7	0	0		
		Gjn.snitt tur [h]:	Driftstid [h]	4.55	7.2	2.5	5.4	9.25	4.6	5.4	7.7	1.5	2		
		4.9	Tot driftstid i 2012 [h]	264.4											

Tabell 14: Resultater fra loggboken

I kontrollpanelet i IGNITE er det en tabell med tid-hastighet-verdier som følger driftsmønster vist i Figur 67, en fisketur på to timer. Lengre turer med konstant belastning vil ikke fremheve dynamikken i hybridsystemet, de vil vise rammeverdiene til systemet slik som rekkevidde, hastighet og forbruk. Dette ble gjort ved å legge inn en konstant hastighet og se hvor langt båten kan kjøre før batteriet er utladet.



Figur 67: Driftsmønster for IGNITE sin kontrollpanel-komponent

Driftsmønsteret i Figur 67 har en marsjhastighet på 6,5 knop og for å kunne benytte seg av «Boost»-funksjonen til den hybride kontrollenheten ble det lagt inn en liten periode med en hastighet på 8 knop. Ifølge Excel-kalkulatoren kan en teoretisk oppnå en maks hastighet på 7,5 knop for en båt i størrelsesorden 23 fot. Her er det begrensinger på hvilke båtskrog en kan utregne estimert hastighet

for, som for eksempel data fra reelle båter der en kjenner motorkraft og kan måle gjennomsnittlig maksimalhastighet ved hjelp av kartplotter (satellitt/GPS).

4.7 Driftsmodi

Driftsmodi er en del av parametre inne i modellen og disse kan deles inn i forskjellige grupper blant annet de som er vist i Tabell 15 og de som er forklart på komponentnivå i kapittel 4.3.

For å velge mellom de ulike driftsmodusene ble det laget tre nær identiske simuleringsmodeller, der en i hver modell har endret de ulike parameterne for å oppnå elektrisk-, diesel- eller hybriddrift. På denne måten kan en enklere kombinere resultater fra de ulike simuleringene i programmet R-post.

	Name	Type	Units	Group	Comment	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1	Water_Density	Real				1030	1030	1030	1030
2	D_propeller_2	Real			Propeller diameter	0.6	0.6	0.6	0.6
3	wake	Real			0.20 to 0.45	0.2	0.1	0.3	0.2
⚠ 4	Vessel_Mass	Real	kg			4000	4000	4000	4000
⚠ 5	P	Real				1	1	1	1
⚠ 6	I	Real				1.5	1.5	1.5	1.5
⚠ 7	D	Real				0.01	0.01	0.01	0.01
8	WHR_activation	Real				0	0	0	0
9	SOC_battery	Real				1	0.2	0.2	0.2
10	Reduction_rate	Real				3.5	3.5	3.5	3.5
11	EV_SOC_TH	Real				0.2	0.2	0.2	0.2

Tabell 15: Parameter i IGNITE, her vist for elektrisk modus

Tabell 15 viser de 11 parameterne som blir benyttet i simuleringens parametriske definisjonstabell. Parameter 1-7 er verdier som benyttes i skrog- og propellmodell og kommer fra CIMAC-modellen [21].

Parametrene 8-11 i Tabell 15 er tilegnet driftsmodusene. Den første «WHR_activation» er en enkel verdi som enten er `0` eller `1`. Disse verdiene bestemmer om WHR-systemet skal være aktivert eller ikke.

Linje 9, «SOC_battery», forteller hvilken grad av oppladning batteriet har i starten av simuleringen. For elektrisk- og hybridmodus er denne verdien sett til `1`. Når en skal kjøre systemet kun ved hjelp av forbrenningsmotor kan en sette dette parametere til 0,2 eller lavere. Da vil ikke kontrollenheten tillate den elektriske motoren å bidra til fremdriften.

Siden en ikke har en vribar propell, men varierende effekt tilgjengelig, ble det valgt å endre reduksjonen i reduksjonsgiret (ekstra gir, ref. kapittel 3). Endringen gjøres for at dieselmotor skal oppnå riktig maksturtall når båten drives med ren mekanisk fremdrift eller hybriddrift. Parameteren «Reduction_rate» (linje 10 i Tabell 15) endres mellom verdiene i=2 for hybrid og i=3,5 for EV- og Diesel modus.

Den siste raden inneholder en parameter som benyttes for å bestemme ved hvilken nedre SOC den elektriske motoren assisterer dieselmotoren.

4.8 Forenklinger i simuleringsmodellen

For modellen i denne oppgaven ble det lagt vekt på at simuleringsmodellen kjører stabilt og gir repeterbare resultater ved flere simuleringer. Videre følger en forklaring over de forenklingene som ble gjort for de viktigste komponentene som vil direkte påvirke resultat av simuleringene.

Propell og skrog

Propellmodellen i oppgaven er basert på en fast propell med konstante skyvekraft- og dreiemomentskurver. For å bedre kunne tilpasse lasten til forbrenningsmotor ved optimeringsstrategier burde det benyttes en vribarpropell.

I IGNITE-modellen ble de ulike parameterne for propell og skrog manipulert til å gi resultater som stemte overens med resultater og data fra reelle båter. Dette ble ansett som akseptabelt siden modellen skal vise frem et fremdriftssystem og ikke en spesifikk båt. De viktigste verdiene vil være relatert til forbruk av drivstoff og elektrisk energi.

Kjølesystem

Kjølesystemet er simulert endimensjonalt, men med tilfredsstillende kompleksitet for å kunne gjenskape mye av karakteristikken fra et virkelig kjølesystem for en lignende motor. En høyere nøyaktighet kan oppnås ved å erstatte det endimensjonale systemet med en modell laget i et strømningssimuleringsprogram (CFD) der en simulerer med tofasestrømning. For denne oppgaven og de forutsette fremtidige mulighetene (kombinert med undermodell for WHR-system) vil den presenterte metoden for å simulere kjølesystemet være tilstrekkelig. Varme kan hentes ut for å benyttes til oppvarming eller energigjenvinning fra kjølesystemet slik som det er modellert.

Forbrenningsmotor

En egen undermodell av forbrenningsmotoren i Ricardo WAVE ville ha gitt større nøyaktighet og åpnet for flere muligheter når det kommer til å simulere motor sammen med spillvarmesystem. En WAVE-modell inneholder mer detaljert informasjon om forbrenningsmotoren (bla. geometri av innsugs- og eksosystemet) og baserer seg ikke utelukkende på tabellverdier.

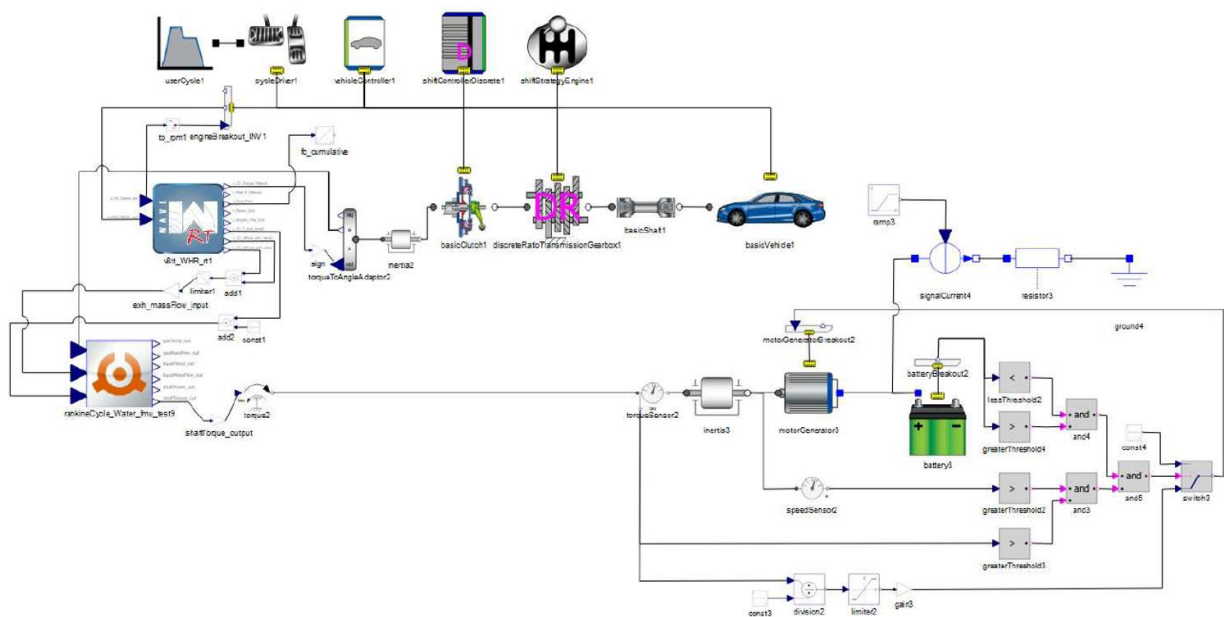
For dette formålet er det nøyaktig nok med en tabellbasert motormodell for å gi simuleringsmodellen opplysninger om effekt fra motor og forbruk av drivstoff.

Spillvarmegjenvinning

For WHR-systemet ble det valgt å benytte en enkel modell som henter effektverdier fra tabeller basert på motorens varme fra eksos og kjølevann. Dette medfører at en ikke får simulert selve ORC-kretsen og hvordan den fungerer i detalj.

Basert på forsøksverdiene fra kapittel 2.4.2 ble det brukt termisk virkningsgrad i samme størrelsesområde for å vise fordelene av å inkludere et WHR-system.

En løsning som Ricardo anbefalte for fremtidig utvikling av modellen er at en benytter seg av underprogrammer fra eksterne leverandører som f.eks. TLK-Thermo GmbH [69]. Dette er et resultat fra et større utviklingsamarbeid mellom Ricardo og TLK-Thermo. I denne modellen ble det benyttet en WAVE-modell for forbrenningsmotoren, en undermodell fra TLK-Thermo for WHR-systemet, og IGNITE for kjøretøyet som disse var montert i. Eksempelmodellen fra Ricardo er vist i Figur 68. I WAVE- og TLK-modellen ble det benyttet tofasestrømningssimulering med modellerte varmevekslere, pumper og ekspandere for å se hvor mye energi en kunne fra de ulike varmestrømmene ut fra forbrenningsmotor. På denne måten kan en få langt mer realistiske resultater fra simuleringen relatert til forbrenningsmotor og WHR-systemet.



Figur 68: Modell fra VAG der det er benyttet undermodeller fra WAVE og TLK [69]

Kontrollenhet

Modellbiblioteket til IGNITE inneholder ikke komponenter rettet direkte til maritimt bruk, noe som gjør til at alle komponentene som skal benyttes til båt må lages ved å modifisere eller sette sammen eksisterende komponenter fra modelica biblioteket. Kontrollenheten er laget for personbiler, dette medfører at en ikke får tilpasset enheten til å velge mellom elektrisk- og dieseldrift basert på hvordan effektforbruket i en båt opptrer. For simuleringssmodellen klarte kontrollenheten å kontrollere systemet uten å gi feilkoder. Feilkoder som oppstod i starten dreide seg mye om de ulike koblingene og kontrollen av disse. Signaldempere ble lagt inn mellom kontrollenhet og koblingens elektriske tilkobling. I selve kontrollenheten måtte grensesnittet mellom den indre logikken i enheten og de ytre tilkoblingspunktene modifiseres for å tillate styring av alle tre koblingene. Dette gav mulighet til å simulere modellen for å se hvordan systemet fungerer. En egen kontrollenhet laget unikt for fritidsbåter ville gitt muligheten til å endre på hvordan fremdriftssystemet velger mellom elektro- og dieselmotor basert på last, pådrag eller hastighet.

5 Resultater

Det presenterer resultater for tre forskjellige driftsmoduser:

1. Elektrisk
2. Diesel
3. Hybrid

Rammeverdier som rekkevidde og forbruk i de ulike modusene blir presentert i tabellform før en ser nærmere på resultatene fra IGNITE. De tre driftsmodusene blir sammenlignet i kapittel 6.

5.1 Elektrisk

For ren elektrisk drift har systemet følgende data:

- Maksimal effekt: 10 kW
- Batterikapasitet: 20,1 kWh (48V, 525Ah, 80%DOD)
- Toppfart: 5,1 knop

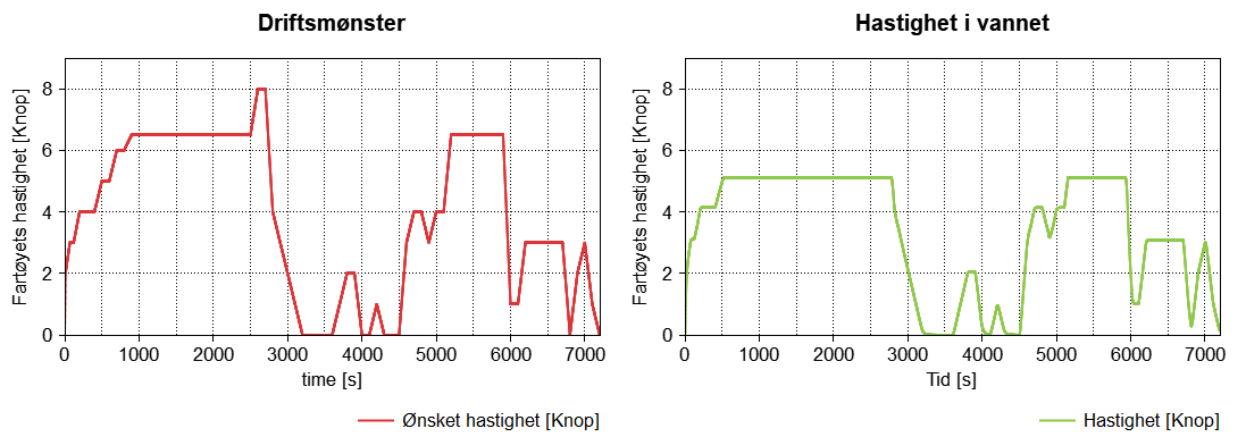
Rekkevidden vil variere etter hvor mye kraft en henter ut fra systemet, verdier for hastigheter mellom 1 og 5,1 knop kan sees i Tabell 16.

Verdier fra IGNITE			
Hastighet	Rekkevidde	Ytelse	Forbruk
Knop	Nautiske mil	kW	kWh/nm
1	190	0.13	0.13
2	137	0.345	0.17
3	90	0.785	0.26
4	37.5	2.5	0.63
5.1	9	10	1.96

Tabell 16: Rekkevidde ved ulike hastigheter i EV-modus

Rammeverdiene ble hentet fra IGNITE ved å kjøre båten med en konstant hastighet der rekkevidden ble avlest som en distanseverdi summert over hastighet og tid. Dette vil være rammeverdiene for hvordan båten kan brukes ved elektrisk fremdrift. Forbruket av energi per nautiske mil er også en god indikator på hvor effektivt båten forflytter seg i vannet. For deplasement skrog vil forbruket stige proporsjonalt med hastigheten på båten.

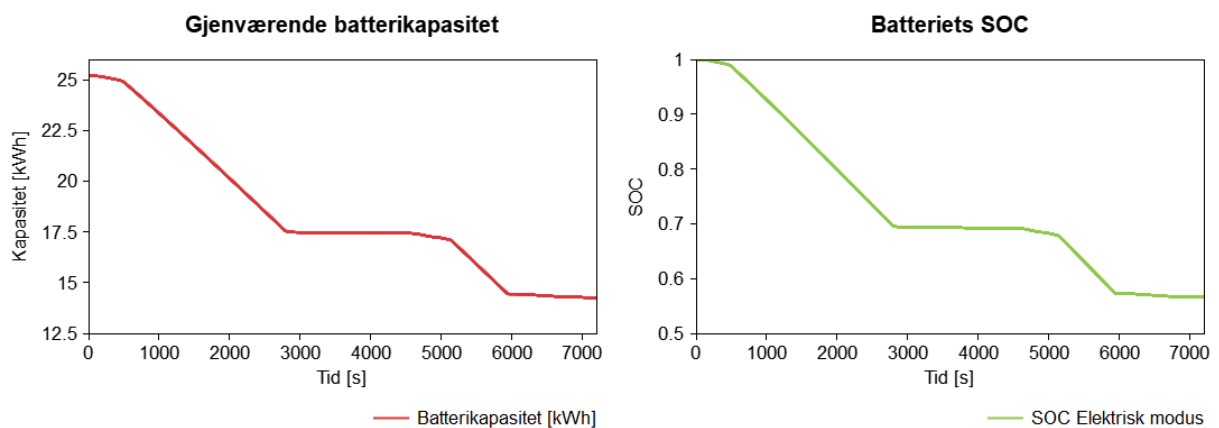
Ved å legge inn driftsmønsteret vist i Figur 67 kan en hente ut følgende data om fartøyets hastighet (vist i Figur 69).



Figur 69: Plot over ønsket- og reell hastighet for simuleringsmodellen i elektrisk-modus

Ønsket makshastighet oppnås ikke ved ren elektrisk drift siden skrogets motstandskurve er den samme for alle tre simuleringene og vil tillate at en har en større fremdriftseffekt i hybridmodus.

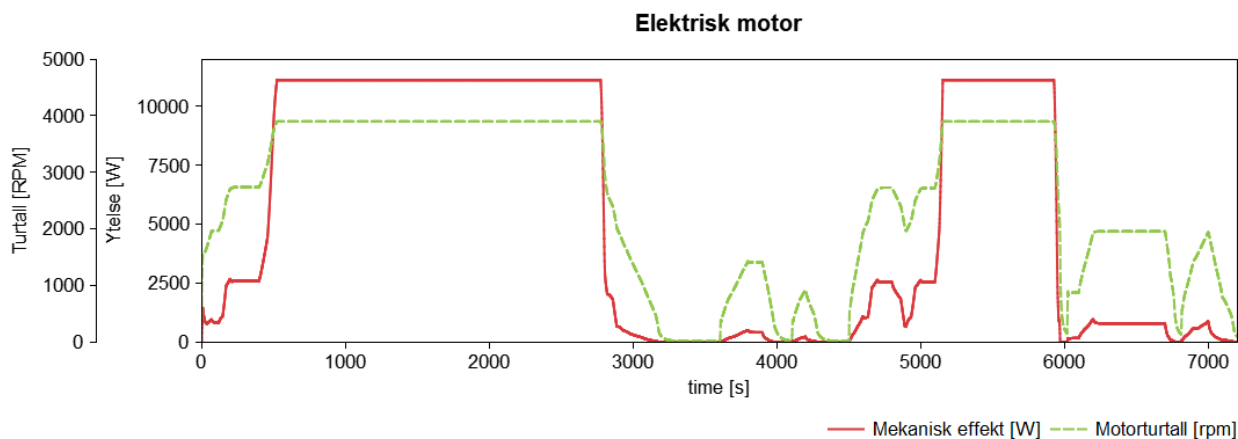
Batteriets SOC (Figur 70) har falt med 44% poeng fra 1,0 til 0,56 SOC. Med en utnyttingsgrad på 80% av total batterikapasitet, kan en videre benytte 36% poeng (9 kWh) av batterikapasiteten.



Figur 70: Batteri-data ved kjøring

Total energimengde brukt på denne ruten er 11 kWh. Distanse er 6,7 nautiske mil, som igjen gir et gjennomsnittlig forbruk på 1,64 kWh/nm.

I nesten halvparten av tiden ligger den elektriske motoren på maksimal belastning (se mekanisk effekt i Figur 71) for å forsøke nå ønsket hastighet. Resten av fartsspekteret holder belastningen på et lavt-til moderat nivå. Den elektriske motoren er oppgitt med et turtallsområde som skal ligge mellom 2000- og 6000 RPM. I modellen oppnår elektromotoren 4000 RPM ved maks ytelse.



Figur 71: Belastning av den elektriske motoren i elektrisk modus

5.2 Diesel

Dieseldrift har systemet følgende data:

- Maksimal effekt: 8,8 kW
- Høyeste turtall: 3315 RPM
- Toppfart: 5 knop

Rekkevidden vil variere alt etter hvor stor drivstofftank en har i båten. Tabell 17 viser rekkevidde for et fartøy med en drivstofftank på 40 liter. Forbruksverdiene fra IGNITE er basert på at man kjører med en konstant hastighet f.eks. ved 3,5 knop bruker motoren 0,67 liter i timen. Med gitt tankstørrelse på 40 liter blir rekkevidden 208 nautiske mil.

Verdier fra IGNITE					
Hastighet	Rekkevidde	Ytelse	Forbruk		
Knop	Nautiske mil	kW	L/h	L/nm	kWh/nm
3.5	208	2.2	0.67	0.19	1.93
4	158	3.3	1.01	0.25	2.54
4.6	120	5	1.53	0.33	3.34
5	99	6.6	2.02	0.40	4.06
5.1	82	8.8	2.7	0.53	5.32

Tabell 17: Verdier fra Dieselmodus, hentet fra IGNITE

I dette tilfelle kunne en ikke velge hastigheter for fartøyet på samme måte som for elektrisk modus. En dieselmotor med et typisk tomgangsturtall på 700-900 RPM, sammen med en fast propell setter en nedre fartsgrense for fartøyet.

Forbruk med enhet kWh/nm er her beregnet med nedre brennverdi til drivstoffet tilført dieselmotor.

Utrekningen fra liter pr nautiske mil til kWh pr nautiske mil, for et dieselfartøy kan utregner ved følgende formel:

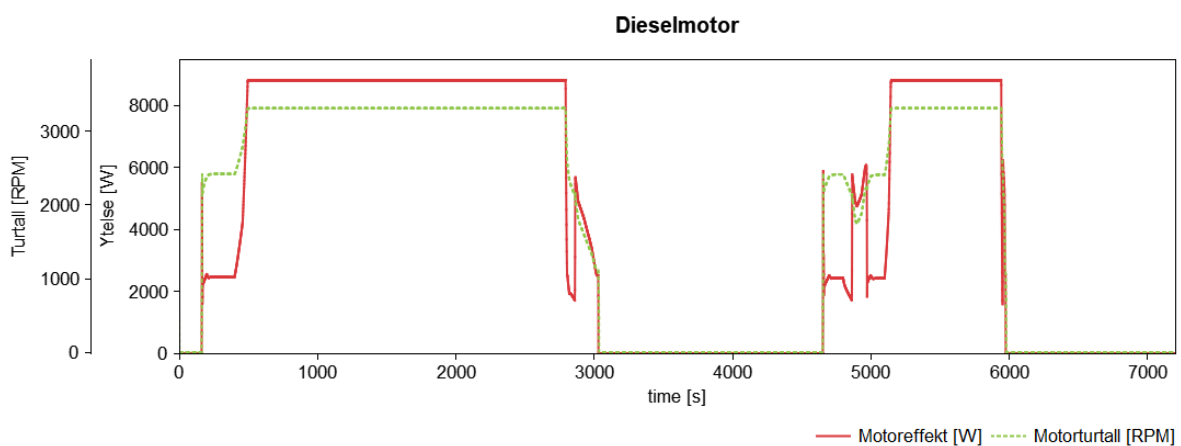
$$\frac{kWh}{nm} = \frac{R \cdot \rho_d \cdot H_n \cdot 1h}{3600s} \quad (5.1)$$

Der R er liter pr nautiske mil, ρ_d er drivstoffets tetthet og H_n er drivstoffets nedre brennverdi. Videre kan en sette inn verdiene for f.eks. 4,6 knop:

$$\frac{kWh}{nm} = \frac{0,33 \frac{L}{nm} \cdot 0,84 \frac{kg}{L} \cdot 43100 \frac{KJ}{kg} \cdot 1h}{3600s} = 3,34 \frac{kWh}{nm} \quad (5.2)$$

Hastighetskurve for båten i simuleringsmodellen vil være nær identisk med den fra elektrisk modus. Forskjellen er at det her er 0,1 knop lavere toppfart siden dieselmotoren har en lavere kontinuerlig ytelse enn elektromotoren.

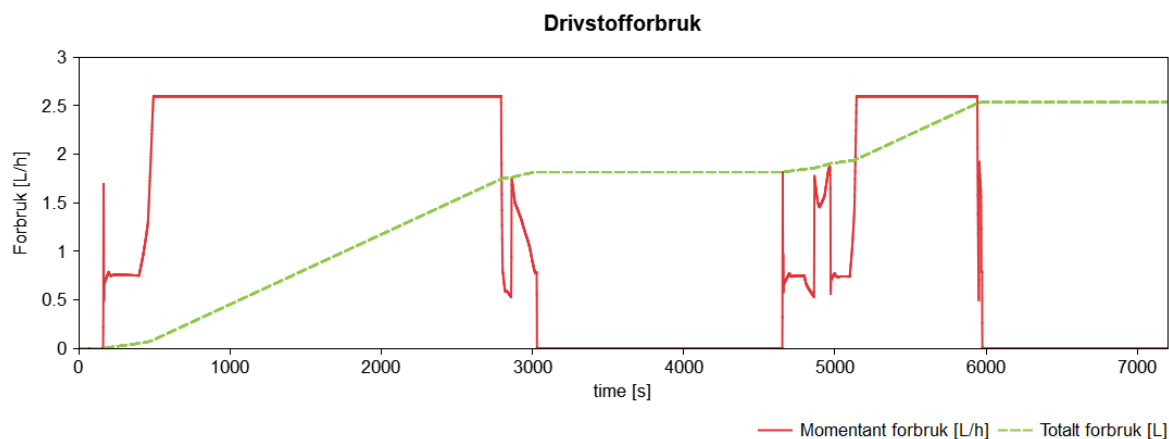
Figur 72 viser dieselmotorens ytelse og turtall.



Figur 72: Effekt og turtall for dieselmotor i simuleringsmodell

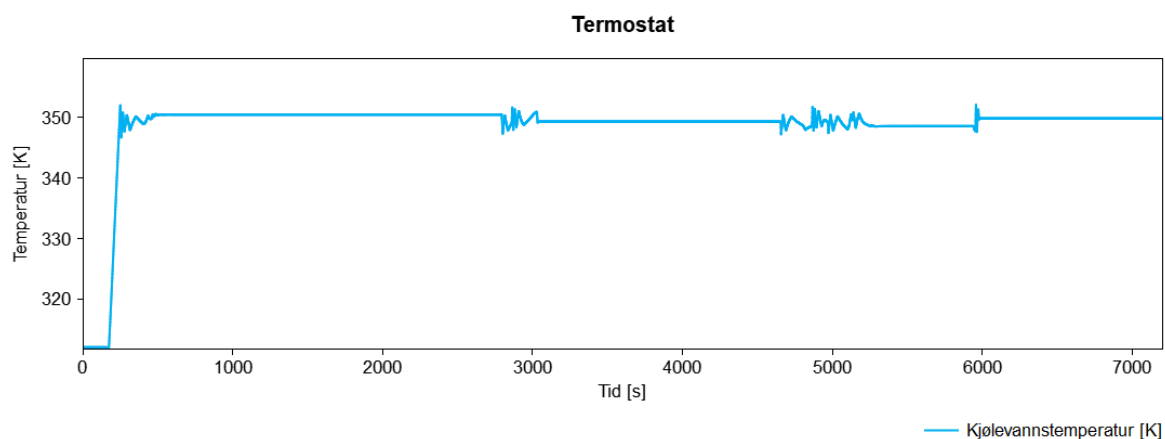
Dieselmotoren går med 100% belastning (8,8 kW) i store deler av driftssyklusen, noe som fører til at forbruket (L/h) i disse periodene vil bli forholdsvis høye.

Figur 73 presenterer forbruket for motoren ved ulike tidspunkt langs ruten. Høyeste verdi er 2,6 L/h som stemmer bra med verdiene fra Excel. Den grønne linjen viser akkumulert dieselforbruk som totalt forbrukt mengde av diesel i liter. På denne ruten ble det forbrukt 2,54 liter drivstoff, distansen er 6,7 nautiske mil, som igjen gir et gjennomsnittlig energiforbruk på 0,4 L/nm eller 3,82 kWh/nm.



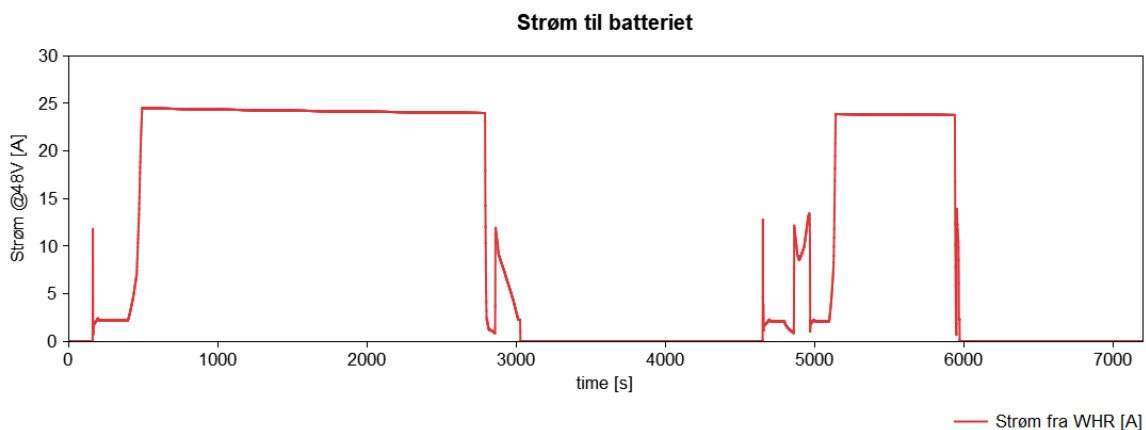
Figur 73: Drivstoffforbruk og totalt forbrukt drivstoffmengde for simulert rute

Med de mulighetene som er i IGNITE-modellen kan en også se på andre interessante verdier om motoren, som f.eks. kjølevannstemperatur. Figur 74 viser temperaturen til kjølevæsken i motoren. Den simulerte driftstemperaturen er 350K, eller ca. 77°C, som er under den maksimal tillatte temperaturen på 85°C.



Figur 74: Kjølevannstemperatur for dieselmotor i simuleringsmodell

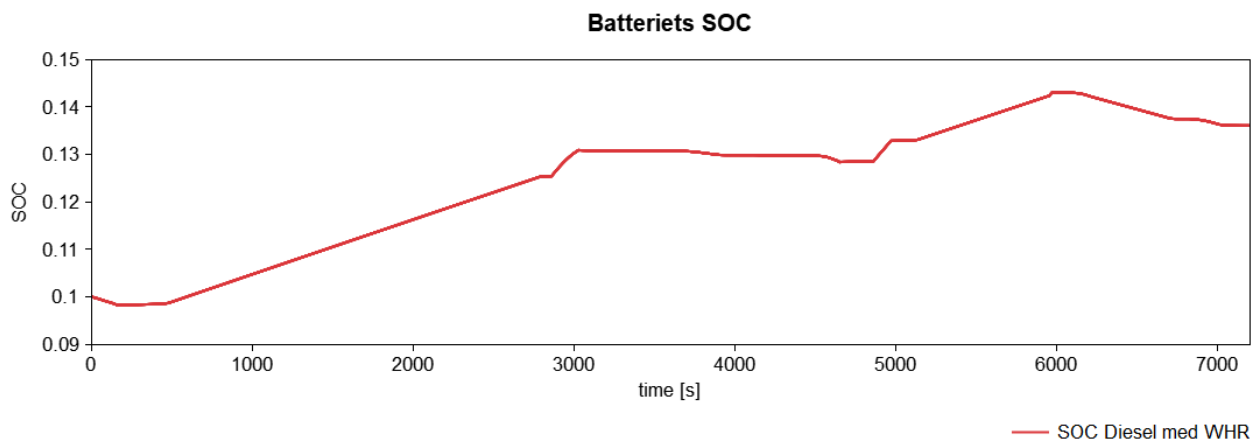
Selv om en vanlig dieseldreven fritidsbåt ikke har et WHR-system, kan det være av interesse å se hvilke ytelser en kunne ha fått med et slikt system. Det kan relateres til om man kjører i diesel-modus med et hybridssystem. Med et WHR-system kan en lade batteripakken, uten at det påvirker fremdriften. I Figur 75 er det vist strømmen som WHR-systemet leverer til et batteri, maksimal strøm er ca. 24 A som ved 48 V tilsvarer 1152 W.



Figur 75: Strøm fra WHR til batteripakke, ved drift under driftsmønster vist i fig. 66

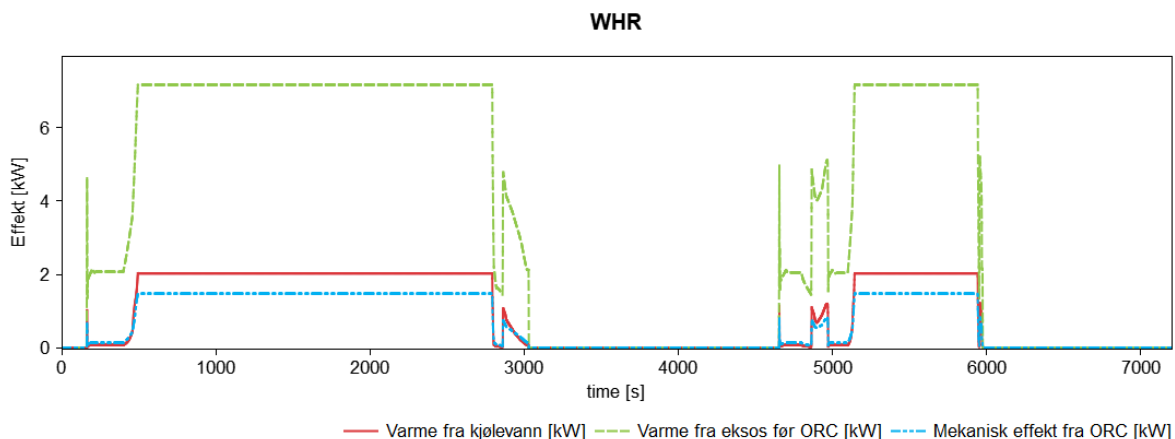
Ut ifra Figur 75 kan en se at strøm blir levert fra WHR-systemet i perioder med høy motorbelastning. I de nedre lastområdene vil det ikke bli levert elektrisk energi fra WHR-systemet til batteripakken.

Ved hjelp av WHR-systemet vil batteriets SOC stige under drift, også i dieselmodus, vist i Figur 76.



Figur 76: Batteriets ladestatus under drift i dieselmodus

Maksimal elektrisk effekt fra WHR-systemet er 1,1 kW (Figur 75). Den mekaniske effekten fra ORC-kretsen er vist ved den stiplede blå linjen i Figur 77. Den tilførte varmen kommer fra eksos (grønn stiplet linje) og kjølevann (rød heltrukken linje), disse er vist i Figur 77.



Figur 77: De ulike effektene inn- og ut av ORC-kretsen

Den røde linjen viser termisk energi fra kjølevann konsumert av ORC-kretsen, ca. 2kW. Den grønne linjen er den tilgjengelige eksosvarmen på 7 kW. Og den blå linjen er den mekaniske ytelsen til fra ORC-kretsen sin ekspander til generator, 1,4 kW. Virkningsgraden, sett fra tilgjengelig termisk effekt og faktisk mekanisk effekt, er ca. 10 %. Innenfor de verdiene som er å forvente for ORC-forsøkene omtalt i kapittel 2.4.2.

5.3 Hybrid

Her kan en få benyttet både elektromotor og forbrenningsmotor til fremdrift. Det totale fremdriftskraften blir nær doblet i forhold til de to andre driftsmodusene.

Hybriddrift har følgende data:

- Maksimal effekt: 18,8 kW (10 kW + 8,8 kW)
- Generator effekt: Max. 8 kW
- Toppfart: 9 knop

Rammeverdiene for hybridmodus er vist i Tabell 18. Her ser man hvordan den hybride kontrollenheten velger mellom elektrisk og hybrid fremdrift ved ulike hastigheter opptil 9 knop.

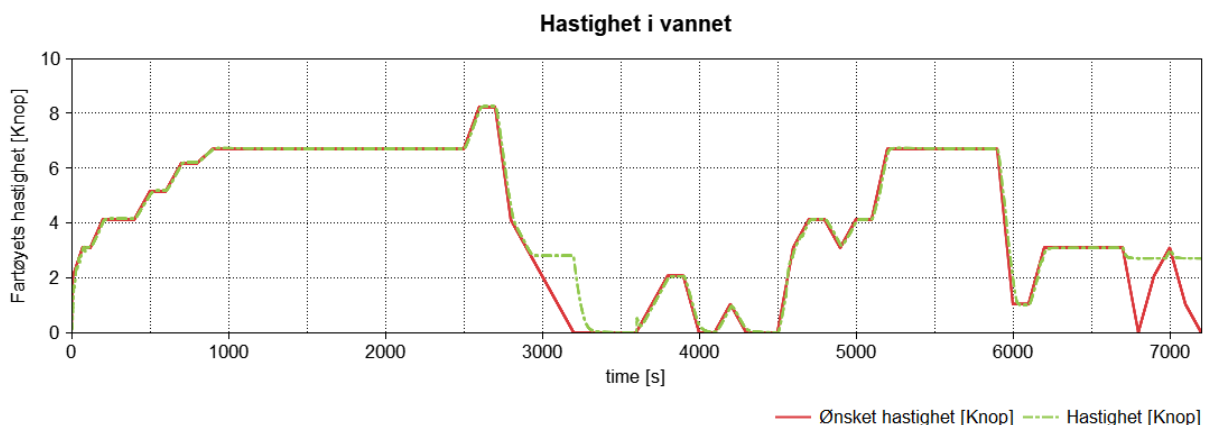
Verdier fra IGNITE						
Hastighet Knop	Fremdrift EL/HYB	Ytelse EL kW	Ytelse DI kW	Forbruk		
				L/h	L/nm	kWh/nm
1	Elektrisk	0.13	-	-	-	0.13
2	Elektrisk	0.345	-	-	-	0.17
3	Hybrid	0.1	0.7	0.23	0.08	0.80
4	Hybrid	2.5	0.68	0.2	0.05	1.13
5	Hybrid	8.7	4	1.25	0.25	4.25
6	Hybrid	9.2	4.8	1.5	0.25	4.05
7	Hybrid	9.8	5.7	1.76	0.25	3.93
8	Hybrid	10	6.7	2	0.25	3.76
9	Hybrid	10	7.7	2.4	0.27	3.79

Tabell 18: Rammeverdier for fremdrift i hybrid modus

Ytelse EL viser hvor mye effekt som leveres fra batteriet. Ytelse DI viser hvor mye effekt som kommer fra dieselmotoren. For dieselmotoren er forbruket i kWh pr nautisk mil utregnet basert på L/nm og etter formel 5.1. Dette for å vise den totale energimengden brukt basert på drivstoffets energiinnhold. Dette ble summert med elektromotoren sitt forbruk av elektrisk energi med samme enhet. Summen er en verdi for den totale energimengden i kWh som blir brukt av fartøyet per nautisk mil, slik at en får en sammenligningsverdi for de ulike modusene.

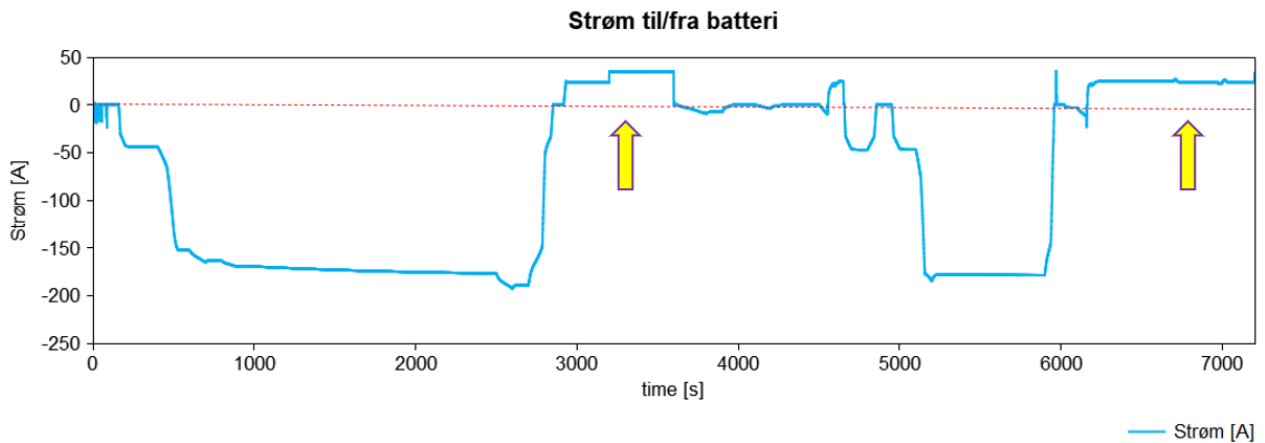
De høye verdiene i fartsområdet 5-6 knop viser at her kunne det med fordel vært valgt en annen fordeling av effekt mellom forbrenningsmotor og elektromotor. Kontrollenheten har valgt en effekt fra dieselmotor som gir en nær konstant forbruksverdi på 0,25 liter drivstoff pr nautiske mil. Maksimal motoreffekt ved hybriddrift er 7,7 kW, det tilsvarer 87,5% av maksimal belastning (8,8kW). Også modellen av skrogets motstandskurve vil ha direkte innvirkning på effektbehovet ved de ulike hastighetene.

Hastighetsgrafen (Figur 78) viser at fartøyet oppnår ønsket hastighet. De to avvikene ved tidspunkt 3000s og 6800s har med lading av batteriet å gjøre. Kontrollenheten aktiverer «idle charging», men kobler ikke ut propellakslingen (kobling B-2 i Figur 25). Dermed blir det også levert fremdrift i disse periodene.



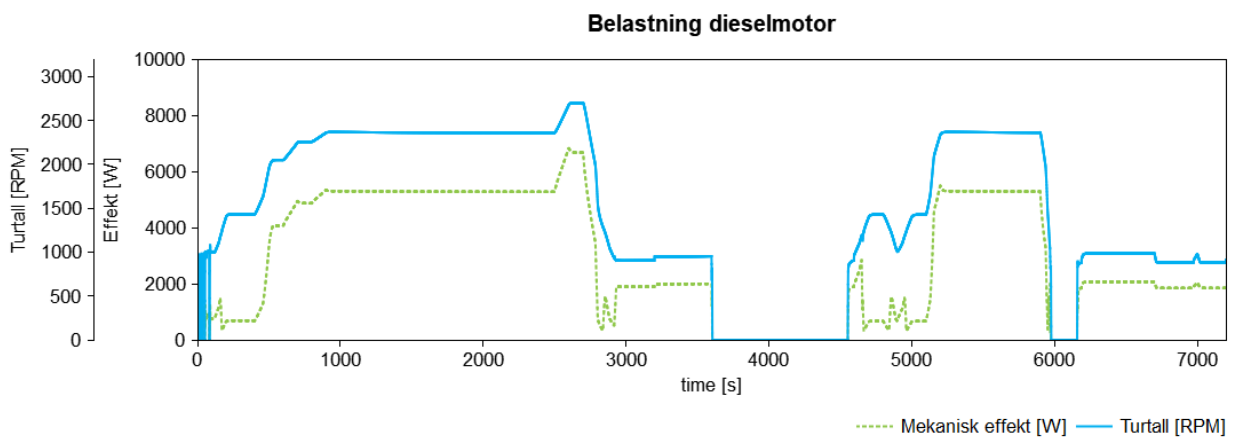
Figur 78: Hastighetsplot for fartøyet ved hybriddrift

Funksjonen «Idle Charging» blir brukt for å få en viss lading av batteriet i perioder med lite effektbehov til fremdrift. Maksimal ladeeffekt ved «Idle charging» er 1700 W. De to situasjonene der dieselmotoren leverer effekt til batteriet presenteres i Figur 79, Figur 81 og Figur 82.



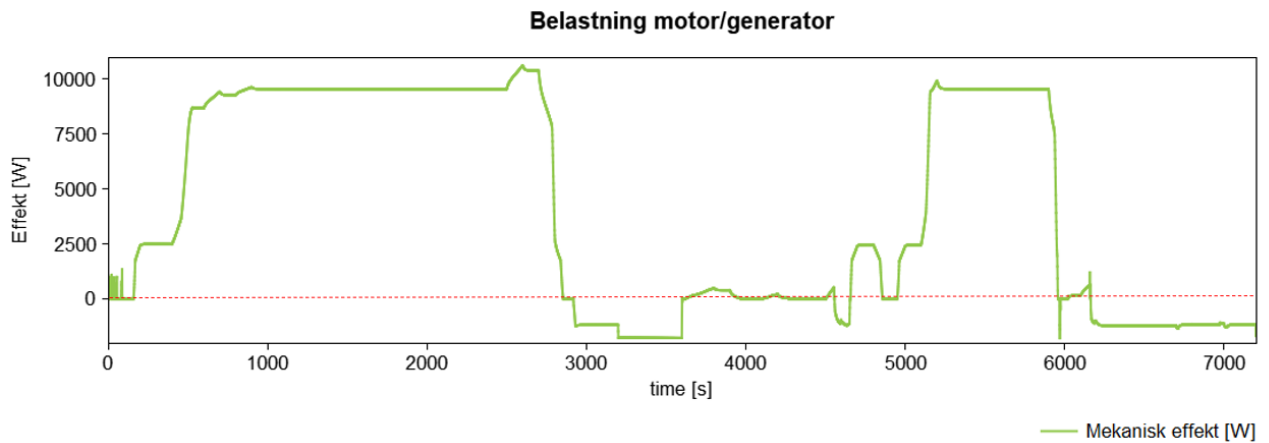
Figur 79: Strøm fra eller til batteriet. Pilene viser til de to situasjonene der lading forekommer

Den blå kurven viser strømmen til og fra batteriet og de to pilene i Figur 79 viser de to områdene når batteriet lades i løpet av fisketuren. Negativt fortegn er forbruk av strøm og positivt fortegn er lading av strøm. Belastning og turtall på dieselmotor er vist i Figur 80.



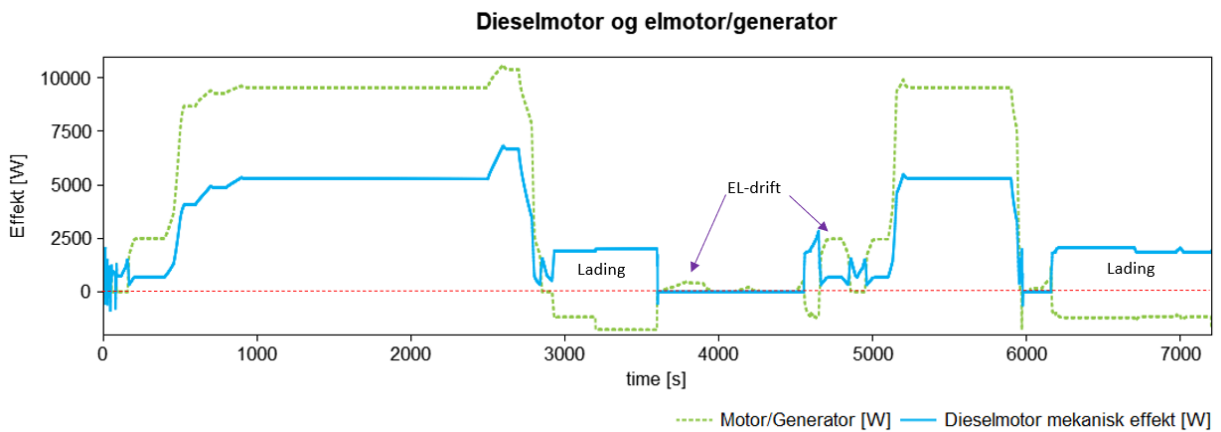
Figur 80: Belastningskurve for dieselmotor

Mekanisk effekt til motor/generator er vist i Figur 81. Maksimal effekt og turtall for den valgte forbrenningsmotoren er 8,8 kW ved 3200 RPM. Områdene som ligger under den røde null-linjen er de samme områdene som er markert i Figur 79. Her leverer generatoren strøm tilbake til batteriet.



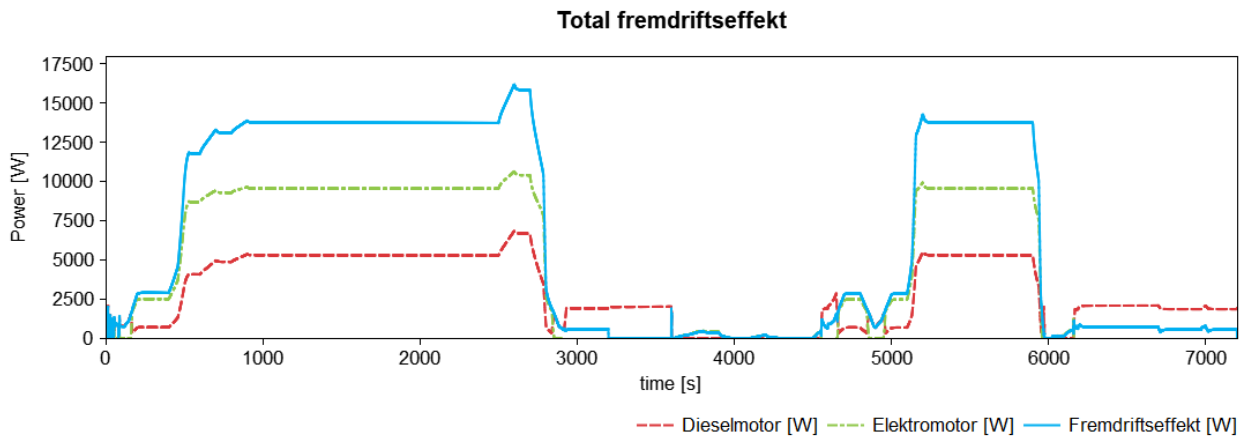
Figur 81: Belastningskurve for elektromotor

Samspillet mellom dieselmotor og elektromotor/generator er bedre vist i et plot som inkluderer effekten fra begge komponentene (Figur 82).



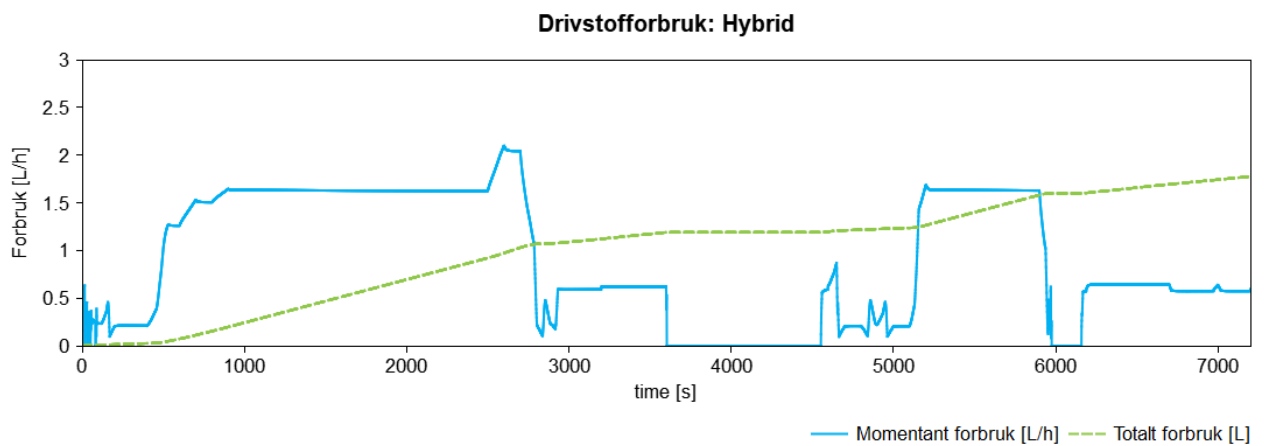
Figur 82: Belastning av diesel- og elektromotor

Den totale fremdriftseffekten fra dieselmotor og elektromotor er vist i Figur 83. I løpet av ruten ble det brukt en maksimal fremdriftseffekt på 16,2kW, eller 87% av maksimal tilgjengelig effekt som er 18,8 kW. I områdene 3000 til 3500 s og 6200 til 7200 s viser den røde kurven at dieselmotoren leverer effekt til generator, det er ingen fremdriftseffekt i disse periodene.

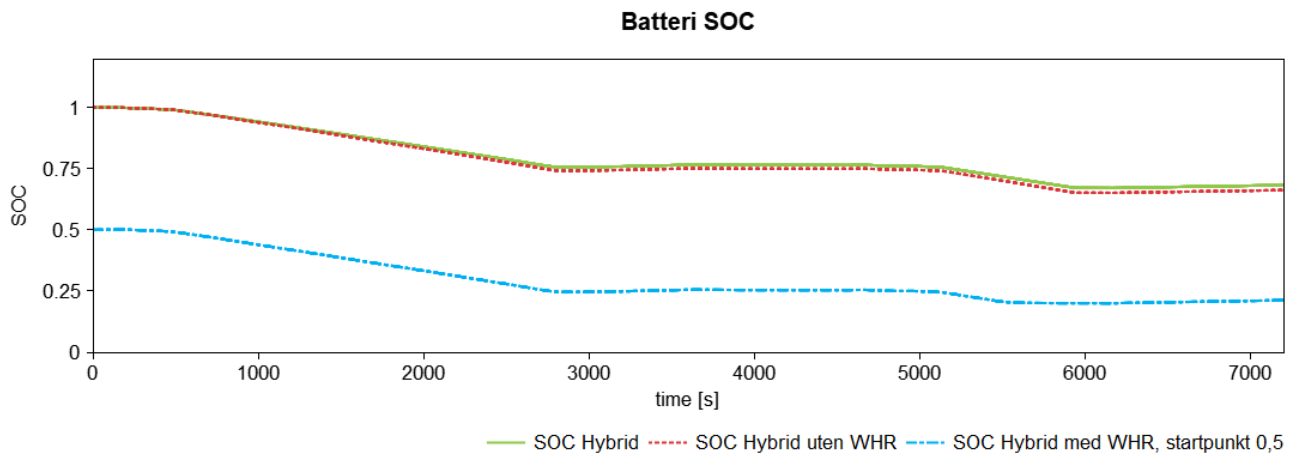


Figur 83: Total fremdriftseffekt ved hybriddrift

Ved utregning av gjennomsnittlig energiforbruk trenger man verdier for totalt drivstoff- og elektrisk forbruk. Forbruket av drivstoff vises i Figur 84 og batteriets SOC i Figur 85. Totalt forbruk av drivstoff er 1,8L.



Figur 84: Drivstoffforbruk ved hybriddrift



Figur 85: Batteriets SOC ved hybriddrift

I Figur 85 viser den grønne linjen batteriets gjenværende kapasitet i løpet av den simulerte ruten/fisketuren når WHR-systemet er aktivert. Den stiplede røde linjen viser batterikapasiteten når en kjører uten WHR-systemet. Helt nederst er det en blå linje som viser batterikapasitet for samme rute men med SOC lik 0,5 ved rutens startpunkt. Nedre grense for bruk av hybrid fremdrift er SOC 0,2.

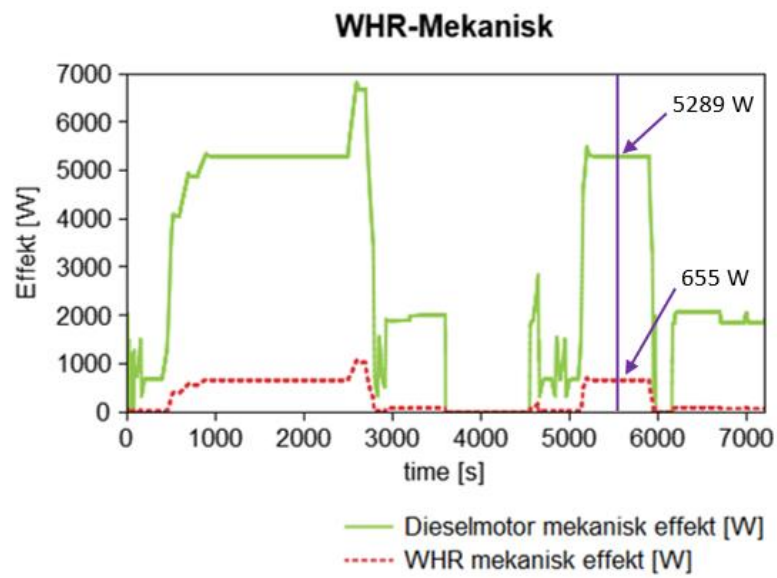
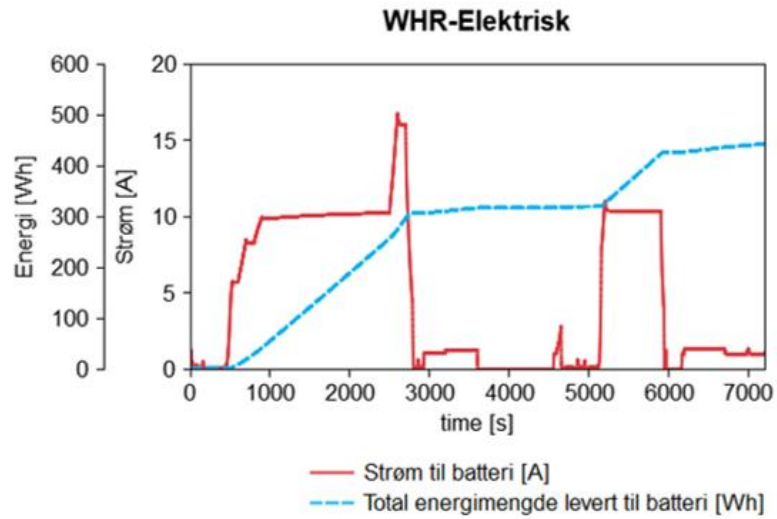
Totalt forbrukt batterikapasitet er 34% poeng uten WHR og 32% poeng med WHR dette kan videre skrives som 6,86 kWh og 6,45 kWh henholdsvis. WHR-systemet tilfører 0,41 kWh energi til batteriet i løpet av denne ruten.

Distanse er 6,7nm, dermed vil det totale energiforbruket ligge på 3,76 kWh/nm uten og 3,66 kWh/nm med WHR henholdsvis.

WHR-systemet vil altså redusere energiforbruket pr nautiske mil med 0,1 kWh. Forbedringer i virkningsgrad for WHR-systemet har en positiv effekt på det totale forbruket av energi i båten. I Figur 86 vises det en relativt liten mekanisk effekt omsatt av WHR-systemet sammenlignet med den totale effekten til motoren. Det finnes et stort potensial siden det er bare 32% av brennstoffenergien som blir overført til mekanisk energi og 68% går tapt med eksosvarme og andre tap.

Elektrisk effekt (øverst i Figur 86) viser den røde linjen strømmen (A) fra WHR-generator til batteri mens den blå stiplede linjen viser total energimengde tilført batteriet. I løpet av den simulerte ruten blir det tilført 442 Wh elektrisk energi til batteriet. Dette tilsvarer 1,75 % av den totale batterikapasiteten på 25,2 kWh.

Mekanisk effekt (nederst i Figur 86) viser den røde stiplede linjen den mekaniske effekten fra ORC-kretsen. Dette er effekten som blir sendt fra en ekspander til generator. Den grønne linjen er den mekaniske effekten fra dieselmotor. Eksempelvis leverer WHR-systemet en mekanisk effekt på 655 W ved tidspunkt 5500 s (ved den vertikale lilla linjen). Dieselmotoren leverer 5289 W ved samme tidspunkt, summert effekt blir 5944 W.



Figur 86: Elektriske- og mekaniske verdier for WHR-systemet

6 Diskusjon

6.1 Feilkilder

Ricardo IGNITE er primært laget for landbaserte kjøretøy og ikke maritime fartøy. Bruken av dette verktøyet i marine applikasjoner er fremdeles i en tidlig fase. Det fantes ikke en kontrollenhet for maritime hybridfartøy i IGNITE sitt bibliotek og derfor måtte det velges blant ulike kjøretøys kontrollere og benytte den som passet best med hensyn på tilkoblingspunkt og funksjonalitet. Dette medførte at styringen av diesel- og elektromotor ikke kunne optimaliseres med tanke på raske lastendringer (som vist i Figur 86 i områdene 0 til 250 s, 2800 til 3000 s og 4500 til 5000 s).

Tabellene for forbrenningsmotoren i IGNITE ble laget ut ifra den begrensede dataen om motoren som var tilgjengelig fra leverandør (Beta Marine, Kubota Europa). Den mest detaljerte informasjonen om motorens spesifikke brennstofforbruk er grafen knyttet til Tabell 5. Grunnet grafen sin relativt flate profil i område der motoren arbeider mest, 1200-3200 RPM, ble det benyttet en konstant verdi for det spesifikke brennstofforbruket (BSFC) til motoren (g/kwh). Med tilgang på mer utfyllende informasjon og komplette kart for det spesifikke brennstofforbruket over ulike hastighet- og lastområder kunne det lages mer detaljerte tabeller for «BasicEngine».

Mer nøyaktige tabeller for skrog- og propell vil gjøre det lettere å bygge en bedre modell, med lavere sannsynlighet for at simuleringen gir feilkoder. Et spesifikt skrog med de korrekte kurver og data ville gitt simuleringsmodellen en mer presis respons på hastighet og motstand i vannet som igjen vil føre til et mer presist effektopptak fra motorene.

Hastighetsberegningen i Excel ble brukt for å sammenligne hastighetene som ble oppnådd i IGNITE og Excel. Denne kalkuleringen baserer seg på en empirisk formel fra Båteierboken 1984 [67], se likning (L-4.1) i vedlegg J. Denne formelen gir en estimert verdi for en ny hastighet, basert på data fra en eksisterende båt. Den tar ikke hensyn til skrogform eller andre eksterne faktorer (skroglengde, vekt, motortype, propell ...). Disse faktorene vil påvirke hvilken hastighet en båt oppnår med en gitt effekt som igjen påvirker forbruket per nautiske mil.

6.2 Sammenligning av forbruk og belastning

I Tabell 16, Tabell 17 og Tabell 18 står det utvalgte rammeverdier for hvordan forbruket av elektrisk energi og drivstoff endrer seg med ulike driftsmoduser og hastigheter. I Tabell 19 er det visst lignende verdier basert på styringsideen fra Figur 62 og Figur 63 med verdier hentet hovedsakelig fra IGNITE ved å kjøre fartøyet i en konstant hastighet.

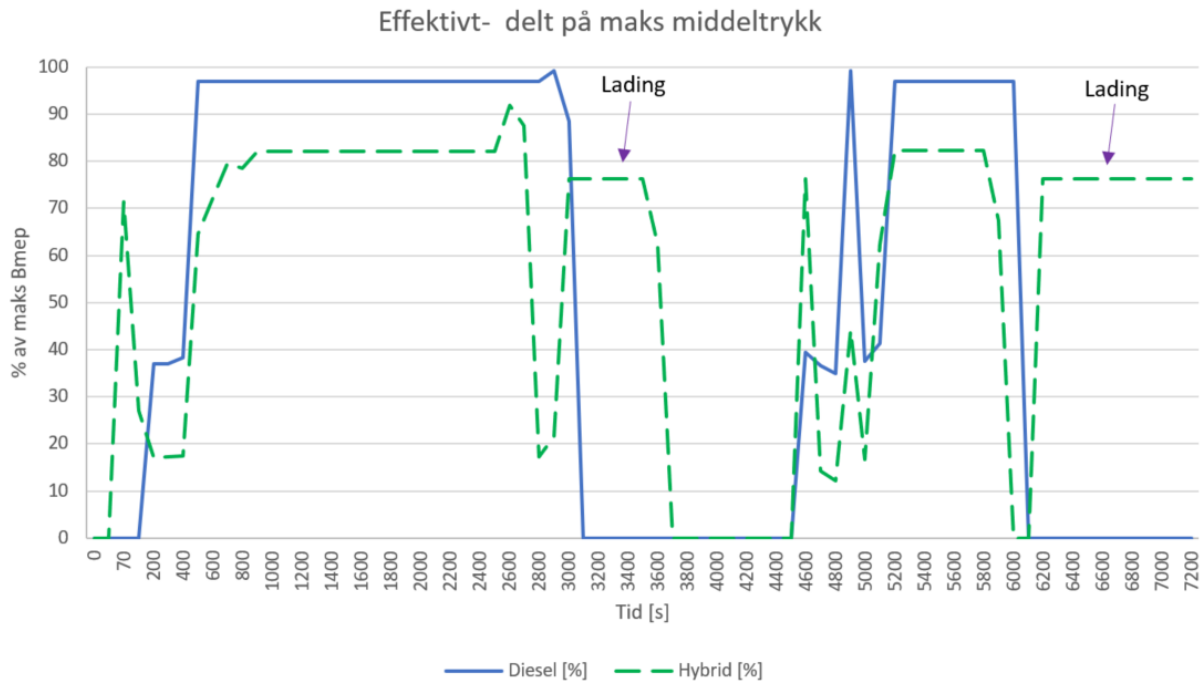
Verdier fra hybridkalkulator								
Hastighet	Rekkevidde	Total ytesle	Elektrisk	Diesel	Forbruk			
Knop	Nautiske mil	kW	kW	kW	L/h	L/nm	kWh/nm (WHR)	kWh/nm
1	201.0	0.1	0.1	Elektrisk fremdrift			0.1	0.10
2	80.4	0.5	0.5				0.25	0.25
3	60.3	1	1				0.33	0.33
4	32.2	2.5	2.5				0.63	0.63
5	40.2	5.8	2.5	3.3	1.01	0.20	2.53	2.53
6	30.2	9	4	5	1.53	0.26	3.13	3.23
7	23.5	12.6	6	6.6	2.02	0.29	3.64	3.76
8	19.6	16.7	8.2	8.5	2.51	0.31	4.06	4.18
8.4	16.9	18.8	10	8.8	2.7	0.32	4.29	4.42

Tabell 19: Verdier for hybriddrift fra hybridkalkulator

I forbrukskolonnen markert med kWh/nm (WHR) i Tabell 19 vises det kWh per nautisk mil med WHR-systemet aktivert. I de to kolonnene til høyre (kWh/nm) er det summert forbruket av elektrisk energi fra batteriet og kjemisk energi fra drivstoffet. Verdiene i denne kolonnen i hastighetsområde 1 til 4 knop inneholder kun det forbruket av elektrisk energi fra batteriet. Først ved 5 knop og høyere hastigheter kan en sammenligne kWh/nm med og uten WHR for å se på forskjellen i energiforbruk.

Ved overgangen til hybriddrift er det en markant økning i forbruket basert på kWh/nm. Dette skyldes overgang fra elektrisk fremdrift med en typisk total virkningsgrad på 75-85% (motor, styring, gir), til å også inkludere en forbrenningsmotor med en termisk virkningsgrad på ca. 32% (kun motor). Når dieselmotoren kommer inn går verdiene opp og det blir en markant økning i forhold til ren elektrisk drift.

Forskjellen i belastning av dieselmotor kan også vises ved å se på motorens effektive middeltrykk (Bmep beregnet med formel L-1.6 i vedlegg J), Figur 87 viser motorens middeltrykk som en prosentverdi av maksimalt kontinuerlig middeltrykk. Maks kontinuerlig Bmep for motoren er 5,5 bar ifølge data fra Kubota [59]. Den stiplede heltrukne blå linjen viser motorens belastning i dieselmodus og den stiplede grønne linjen viser belastning i hybridmodus.



Figur 87: Effektivt- delt på maks middeltrykk for diesel- og hybriddrift

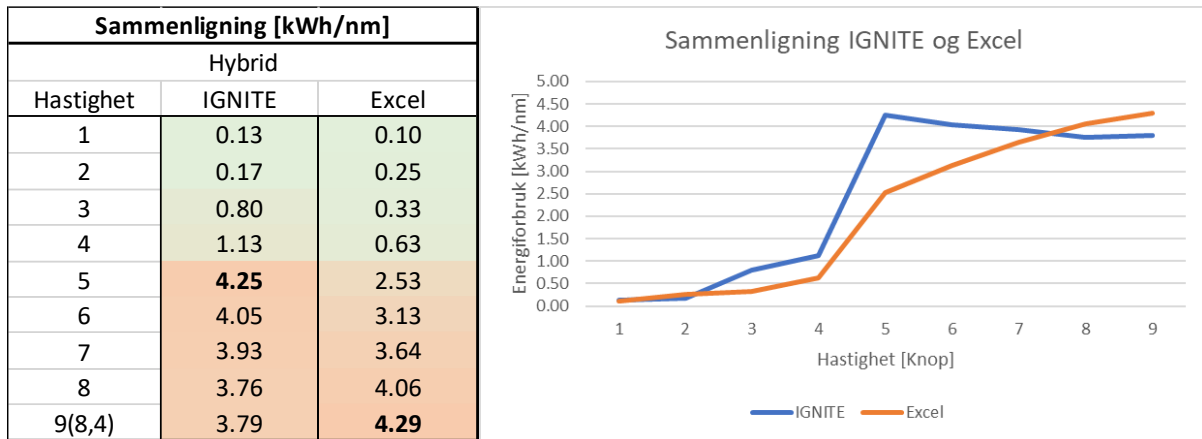
Områder med lading av batteriet (IdleCharging) er markert i Figur 87, på samme måte som i Figur 82.

Gasspådraget følger formen som kommer fram i Figur 87 siden middeltrykket er direkte relatert til motorens belastning. Maksimalt pådrag er 100% som tilsvarer en belastning på 8,8kW. Regner en ut gjennomsnittet av de relative Bmep kurvene får en følgende resultater:

- Dieselmodus: 50% lastpådrag
- Hybridmodus: 57% lastpådrag

Selv med et gjennomsnittlig lastpådrag som er 7% poeng høyere ved hybriddrift, bruker motoren mindre drivstoff i løpet av ruten i simuleringen. Motoren arbeider mer i områdene med 70-80% pådrag, og mindre med 100%. Det er også perioder der motoren driver generatoren for oppladning av batteriet, i disse periodene belaster kontrollenheten motoren med ca. 72-76% av maksimal belastning. Denne belastningen foregår ved lavt turtall og vil derfor gi et høyt middeltrykk, men lavt forbruk (L/h) siden effekten er lav.

Det høyeste energiforbruket er uthevet i Tabell 20 og for IGNITE modellen er det tilfellet ved 5 knop. Dette henger sammen med den ugunstige fordelingen mellom elektro- og forbrenningsmotor i dette fartsområdet. Kontrollenheten tolket dette som en krevende lastsituasjon og belastet dieselmotor mer enn det som var gunstig uten at det var mulighet å endre på dette i de parametrene som er i brukergrensesnittet til enheten. Som nevnt tidligere er det forventet at høyeste forbruk av energi vil ligge ved høyeste hastighet for et displasement skrog.



Tabell 20: Sammenligning mellom energiforbruk i hybridmodus (8,4 knop er maks hastighet for modellen i Excel)

Forskjellen i energiforbruk kommer godt frem i grafen vist i Tabell 20, her vises det en forskjell i hvordan kurvene mellom de to ulike programmene avviker fra hverandre. Excel kalkulatoren har ikke mulighet å ta hensyn til skrogets motstandskurve eller propellens egenskaper. For optimalisering av fremdriftssystemer er det fordel å benytte en programvare som implementerer undermodeller for fysiske regimer slik som IGNITE.

Når en sammenligner hybride-systemer med fremdriftssystemer som bare benytter diesel som drivstoff, er det viktig at en ikke glemmer termodynamikkens første lov: «Energi kan ikke forsvinne eller skapes, men bare gå over fra en form til en annen.». Energien som brukes for å redusere forbruket av drivstoff må komme fra en annen kilde. I denne modellen vil den kilden være batteriet (som lades i forkant av turen med landstrøm). Det ideelle vil være landstrøm som blir kommer fra fornybare kilder som solceller, vann- eller vindkraft. Med landstrøm fra fossile kilder blir ikke reduksjonen av klimagasser på langt nær så stor som ved bruk av fornybar energi. Forbruket av energi for fartøyet forblir det samme, men energiens opphav kan endres mellom diesel og elektrisk.

6.3 Innkjøpskostnad, vekt og volum

De tre forskjellige fremdriftssystemene (elektrisk, diesel og hybrid) vil ha ulike priser, vekter og volumer. En sammenligning er presentert i Tabell 21, hvor komponentpriser er hentet fra kapittel 3.5. Vekten er summert opp for de ulike komponentene (se kapittel 3.4), inkludert en fast vekt på 30kg for propellanlegg. Volumet vil vise hvor mye volum som blir opptatt av fremdriftssystemet i motorrommet. Her er volumet av enkeltkomponenter som motor, batteri, gir, motorstyring lagt sammen til et felles volum. I en faktisk båt vil volumbehovet være større siden en må dedikere en del av selve motorrommet til hver komponent for å sikre tilkomst for service, ventilasjon, avstand mellom varme komponenter og funksjonell plassering i forhold til drivlinjen.

	Fremdriftssystem	Pris	Vekt av fremdriftssystem	Volum optatt i motorrom
1	Standard innenbordsmotor	kr 82 305	125 kg	0.15 m ³
2	Elektrisk fremdrift	kr 102 905	300 kg	0.30 m ³
3	Hybrid fremdrift	kr 226 100	500 kg	0.48 m ³
4	Standard innenbordsmotor med eksosrensing	kr 90 305	131 kg	0.16 m ³

Tabell 21: Pris, vekt og volum av 4 ulike fremdriftssystem

Fremdriftssystem nummer fire i Tabell 21 er nesten identisk med nummer en, forskjellen er at det er inkludert komponenter for rensing av eksosgass. Lydpotte og eksosslange/rør er ikke medregnet i verdiene for Tabell 21. Se vedlegg M for mer informasjon om avgassrensing. Pris, vekt og volum av komponentene for avgassrensingen er estimert ved å hente data fra lignende komponenter (kun partikkelfilter) brukt i personbiler [70] er inkludert.

Volumet av det elektriske fremdriftssystemet inneholder også volumet av batteripakken. En typisk batteripakke kan bestå av flere mindre batteripakker som igjen består av sammensatte celler. De mindre batteripakkene kan plasseres rundt om i båten (motorrom, lasterom, lugar, under dørk, i hekken eller i styrehus under en benk). Dermed vil det ikke være rett å bare se på det totale volumet opptatt av systemet, men heller hvordan volumet kan fordeles blant det tilgjengelige volumet i båten.

Størrelsen på motorrom i fritidsbåter varierer mellom de ulike båttypene og -størrelsene. En individuell vurdering må gjøres basert på båtens oppbygning for å vurdere om det er plass til et hybrid fremdriftssystem. Til sammenligning er det følgende motorromsvolum presentert for tre fritidsbåter i tre størrelsesområder 23 til 26 fot:

- 23 fot tresjark: 0,31 m³
- 24 fot tresjark: 0,975 m³
- Grimsøy 26 Sjark: 0,76 m³

Vekten av de ulike fremdriftssystemene er i utgangspunktet ikke problematisk for det fleste fritidsbåter, men kan presentere seg som en utfordring for de minste fartøyene med hensyn til lastekapasitet og plassering av vekt i båten. Lastbegrensninger er en del av informasjonen i CE-merkingen av nyere båter [71]. Fartøy som er registrerte i fiskeriregisteret har fartøyinstruks som inneholder mer detaljert informasjon om vektbegrensninger og plassering av vekt. De fleste fritidsbåter har ikke fartøyinstruks noe som fører til at det er lite detaljert informasjon å hente rundt dette. For de minste båtene med smale skrog kan det være ugunstig å ha mye last plassert på ett punkt. Vekten av f.eks. et hybrid fremdriftssystem må da fordeles i båten på en gunstig måte med hensyn til sjøegenskaper. Den økning på 200-300 kg vil også medføre reduksjon i lastekapasiteten til båten som igjen kan føre til at maksimalt antall personer som kan være med om bord må reduseres.

For å få et forhold til prisene presentert i Tabell 21 presenteres også priser for en ny båt og en ny fremdriftsmotor i ulike størrelser i Tabell 22. Prisene for båt A-F er hentet fra Båtguiden 2015 [72]. Data og pris for båt G er hentet fra Tobias Båt AS [73].

Båtmodell		Motor	Lengde	Skrogtype	Kostnad	
A	Polar 20	11 kW Dieselmotor	6.2 m	Snekke	kr	299 000
B	Polar 20 Elektro	6 kW Elektromotor	6.2 m	Snekke	kr	359 000
C	Tobias 22 Admiral	53 kW Dieselmotor	6.65 m	Motorbåt	kr	555 000
D	Tobias 22 Kombi	53 kW Dieselmotor	6.65 m	Motorbåt	kr	660 000
E	Polar 22	28 kW Dieselmotor	6.8 m	Snekke	kr	545 000
F	Skager 660	7.4 kW Dieselmotor	6.85 m	Snekke	kr	299 000
G	Tobias 23 Kaptein	53 kW Dieselmotor	7.0 m	Motorbåt	kr	1 268 750

Tabell 22: Data og pris for utvalgte fritidsbåter

Prisene hentet fra Båtguiden 2015 vil være høyere i dag grunnet inflasjon og endringer i markedet. De kan likevel gi en god indikasjon over hva en fritidsbåt kan koste. Kostnaden for fremdriftsmaskineri er inkludert i prisene. For båt B, Polar 20 Elektro, er det inkludert en batteribank på 11 kWh.

Sammenligner en kostnad for de forskjellige fremdriftssystemene i Tabell 21 med båt D, som er en turbåt, kan en se at kostnaden av et hybrid fremdriftssystem vil utgjøre 35% av den totale kostnaden for båt med en dieseldrevet fremdriftsmotor. En standard innenbordsmotor vil utgjøre 12% av båtens kostnad, mens elektrisk fremdrift utgjør 16%.

Det elektriske anlegget alene koster 102.000 kr (Tabell 21), en kostnad som kan gi flere års drift (3 til 32 år avhengig av forbruk og bruksmønster fra Tabell 23) med biodrivstoff for en fritidsbåt. Argumenter for å velge en hybridløsning vil være mer i form av fleksibilitet når det gjelder strøm om bord, elektrisk drift i stedet for gir med slurefunksjon, muligheten til å kjøre med både elektrisk- og dieselmotor (Boost-funksjon) eller ren elektrisk drift med tanke på støy om bord. Kostnadmessig vil det være rimeligere å benytte et alternativt drivstoff på en eksisterende båt kontra å konvertere til hybriddrift.

6.4 Driftskostnad- og utslippseksempel

En kan også bruke et fornybart drivstoff for å redusere CO₂-utslippet fra en forbrenningsmotor. I vedlegg M kan en lese mer om alternative drivstoff og avgassrensing. Ved overgang til et fornybart drivstoff som HVO100 medfølger det en økning i drivstoffkostnader. Se Figur 88 for en oversikt over drivstoffpriser, anleggsdiesel (avgiftsfri) og HVO100 er markert med rød sirkel.

Kvalitet	Produkt	Pris eks. mva.	Pris inkl. mva.	Valuta / måleenhet	Gjeldende fra
	Diesel	12,40	15,50	nok/l	2021-03-31
	Anleggsdiesel	9,60	12,00	nok/l	2021-03-31
	HVO100	18,75	23,44	nok/l	2021-03-10
	Anleggsbio HVO100	15,13	18,91	nok/l	2021-03-10
	Biodiesel B100	16,24	20,30	nok/l	2021-03-31

Figur 88: Drivstoffpriser fra Circle K [74]

Avhengig av bruksmønster og hvor stort snittforbruket er, vil denne prisdifferansen kunne utgjøre en betydelig forskjell på den årlige driftskostnaden. I Tabell 23er det vist et generelt eksempel med 200 og 500 driftstimer pr år med et snitt forbruk på 2 og 12 liter pr time.

Årlig forbruk [t]	200		500	
	2	12	2	12
Snittforbruk [L/t]	2	12	2	12
Diesel forbruk [L]	400	2400	1000	6000
HVO forbruk [L]	421	2526	1052	6315
Kostnad Diesel [kr]	4800	28800	12000	72000
Kostnad HVO [kr]	7961	47767	19903	119416
Differanse [kr]	3161	18967	7903	47416

Tabell 23: Differanse i årlig drivstoffkostnad for fire ulike driftsscenarioer, basert på prisene i Figur 88

Grunnet forskjell i egenvekt og brennverdi vil det bli en endring i det volumetriske drivstofforbruket (se vedlegg M for nærmere detaljer). Tabell 24 viser differansen i volumetrisk forbruk for motoren omtalt i vedlegg C.

Turtall-Forbruk tabell Z602-HVO100				
Driftsområde	RPM	kW	Diesel: L/t	HVO: L/t
Tomgang	800	2.2	0.6	0.7
	1000	2.7	0.8	0.9
Kontinuerlig drift	1200	3.3	1.0	1.0
	1400	3.9	1.2	1.2
	1600	4.3	1.3	1.4
	1800	5.0	1.5	1.6
	2000	5.5	1.7	1.8
	2200	6.1	1.9	2.0
	2400	6.6	2.0	2.1
	2600	7.2	2.2	2.3
	2800	7.7	2.4	2.5
	3000	8.2	2.5	2.6
Net-ytelse	3200	8.8	2.7	2.8
	3400	9.4	2.9	3.0
	3600	9.9	3.1	3.2

Tabell 24: Forskjell i volumetrisk drivstofforbruk mellom diesel og HVO100

Ut ifra Tabell 24 vil et snittforbruk på 2 liter pr time representere den totale drivstoffkostnaden og vil med bruk av biodrivstoff øke med ca. 66% (ref. Tabell 23). En reduksjon av drivstofforbruk ved å la en andel av fremdriftsenergien komme fra landstrøm (via oppladning av batterier) kan føre til at det blir mer aktuelt å benytte seg av biodrivstoff selv om kostnaden er høyere. Dette vil minne mye om «Plug-in hybrid» konseptet som er utbredt blant hybridbiler.

Tabell 25 presenterer hvordan kostnaden pr nautisk mil blir ved et ordinært og et hybrid fremdriftssystem med både anleggsdiesel og HVO100.

Kostnad pr nautisk mil [kr/nm]				
	Anleggsdiesel		HVO100	
Hastighet	Hybrid	Diesel	Hybrid	Diesel
3	0.92	2.30	1.45	3.62
4	0.60	3.03	0.95	4.77
5	3.00	3.99	4.73	6.29
6	3.00	4.85	4.73	7.64

Tabell 25: Kostnad pr nautisk mil

Her er det bare sett på drivstoffkostnaden, for de hybride fartøyene vil det også medfølge en kostnad for elektrisk strøm (se Tabell 26).

Driftskostnaden for en båtsesong kan regnes ut ved å ta utgangspunkt i en driftstid på 265 timer per sesong (tall fra loggbok). Med en snittfart på 4,8 knop (Tabell 14) gir dette en distanse på 1277 nautiske mil.

I Tabell 26 er denne verdien brukt til å beregne driftskostnad. Ytelsesverdier er hentet fra kapittel 5, og drivstoffpriser fra Figur 88. Antatt strømpris er 1 kr/kWh.

Fremdrift	Distanse [nm]	EL-andel [kWh/nm]	El-kostnad [kr]	Drivstoffkostnad [kr]	Totalkostnad [kr]
Diesel	1277	0.0	0.0	5095	5095
Hybrid		0.8	1021.6	3831	4853
HVO100		0.0	0.0	8032	8032
HVO-Hybrid		0.8	1021.6	6040	7062

Tabell 26: Driftskostnad, basert på verdiene fra simulering, for driftsmønsteret i tabell 14

I rangert rekkefølge, fra lavest til høyest, er driftskostnaden for en sesong følgende:

1. Hybrid fremdrift med avgiftsfri diesel som drivstoff: 4853 kr
2. Dieselfremdrift: 5095 kr
3. Hybrid fremdrift med HVO100 som drivstoff: 7062 kr
4. HVO100 fremdrift: 8032 kr

Det hybride fremdriftssystemet kommer ut med lavest driftskostnad. Differansen mellom plass 1 og 3 er 2209 kr/sesong. Det vil si at kostnaden for å bruke båten en sesong vil øke med 2209 kr om en velger det fornybare drivstoffet HVO100 i dette eksempelet.

Differansen mellom diesel og hybriddrift (med anleggsdiesel) er på 242 kr per sesong. Sammenlignet med den ekstra kostnaden på 143795 kr et hybridssystem medfører vil ikke et slikt system kunne spare inn sin egen kostnad innenfor et praktisk tidsperspektiv.

Kan batteriet lades med fornybar energi vil det hybride systemet kunne redusere utslippene av CO₂ med 30% poeng basert på reduksjonen av drivstofforbruk. Circle K oppgir en reduksjon med oppimot 90% poeng ved overgang til HVO100 fra anleggsdiesel [75]. Tas det med i betraktningen så gir kombinasjonen av hybriddrift og biodrivstoff ytterligere reduksjon av CO₂ utslipp. I Tabell 27 vises utslippene i gCO₂ per nautiske mil.

Utslipp ved ulike hastigheter og fremdriftsalternativer									
Hastighet Knop	Total ytesle kW	Elektrisk kW	Diesel kW	Forbruk		Utslipp [gCO ₂ /nm]			
				L/h	L/nm	Hybrid	Diesel	HVO100	HVO-Hybrid
1	0.1	0.1	Elektrisk fremdrift			0	266	27	0
2	0.5	0.5				0	266	27	0
3	1	1				0	399	40	0
4	2.5	2.5				0	665	67	0
5	5.8	2.5	3.3	1.01	0.20	537	1064	106	54
6	9	4	5	1.53	0.26	678	1330	133	68
7	12.6	6	6.6	2.02	0.29	768	-	-	77
8	16.7	8.2	8.5	2.51	0.31	835	-	-	83
8.4	18.8	10	8.8	2.7	0.32	855	-	-	86

Tabell 27: Utslipp ved ulike hastigheter, fremdriftssystem og drivstoff

Med en antatt verdi på 2,66 kg CO₂ for hver brukte liter diesel [76], er det laget en oversikt over estimert utslippsreduksjon i Tabell 27. Ved å bare gå over til HVO100 vil reduksjonen av klimautslipp være på 90% poeng. Ved å også benytte et hybrid system blir reduksjonen ca. 95% i forhold til ren dieseldrift, dette med WHR-systemet. Sammenligningene er gjort med verdiene fra 6 knops hastighet i Tabell 27. Dette er estimater basert på at en bruker landstrøm fra fornybare kilder til å lade batteripakken med.

Reduksjonsverdiene for CO₂ utslipp kan en sammenligne med verdier fra en av klima- og miljødepartementet sine underlag for handlingsplan for grønn skipsfart, utarbeidd av DNV GL [77]. Her er begrepene «nullutslipp» og «lavutslipp» definert på følgende måte:

- Nullutslipp: mer enn 95% reduksjon sammenlignet med konvensjonell teknologi
- Lavutslipp: mer enn 40% reduksjon sammenlignet med konvensjonell teknologi

Et hybrid fremdriftssystem som benytter et fornybart drivstoff vil klare å bli klassifisert som et lavutslipps-fartøy. For å nå opp til nullutslipp kravet må det gjøres videre utvikling/forbedringer. I det beste scenarioet fra Tabell 27 kan det oppnås en reduksjon av CO₂ utslipp med oppimot 95% poeng. Dette er innenfor kategorien nullutslippsfartøy, grunnet usikkerhetene og forenklingene i denne oppgaven kan det ikke fastslås at en slik reduksjon kan oppnås for et reelt fartøy. Videre forbedringer burde gjøres for å ytterligere redusere utslippet av CO₂. Et bedre WHR-system og større andel elektrisk fremdrift kan bidra til dette.

I Turbosteamer systemet til BMW ble den totale termiske virkningsgraden forbedret med 6% poeng [47] mens simuleringsmodellen i denne oppgaven oppnådde en forbedring på 4% poeng. Turbosteamer konseptet benyttet etanol som media i første generasjons ORC-krets, dette vil gi andre resultater enn for en tilsvarende krets som bruker R-134a. I en typisk BMW personbil er motoreffekten over 80 kW mens det i denne oppgaven er en dieselmotor med ytelse rundt 8 kW. Med små motorer er det mindre energi å hente fra spillvarme og det er forventet at økningen av den totale virkningsgraden vil være mindre enn for større motorene. Den nedre grensen på 600W (mekanisk effekt fra ekspander) ble valgt for å ikke få ytelser fra ORC-kretsen når motoren går i det nedre

lastområde da det her er betydelig mindre energi som er tilgjengelig for konvertering. Alle forbedringer relatert til WHR-systemet vil ha en gunstig påvirkning på CO₂ utslippet fra fartøyet.

I Figur 86 kommer det frem at i løpet av de 7200 sekundene (2 timene) simuleringen kjører så er det bare ca. 3000 sekunder (50 minutter) der WHR-systemet leverer en betydelig mengde elektrisk energi tilbake til batteriet. Optimalisering av WHR-systemet med tanke på bl.a. komponenter, media, prosess (eks. forvarming) og applikasjon kan gi en høyere utnyttelsesgrad og bedre bruk av spillvarme.

Om det blir brukt drivstoff til oppvarming i løpet av den to timers lange fisketuren kan det estimeres med at det går 2 kWh (varme-) energi til dette formålet (2kW dieselvarmer brukt i 1 time). Dette energiforbruket kan sammenlignes med den totale energien som blir gjenvunnet av WHR-systemet og sendt tilbake til batteriet; 442 Wh. Dette tilsvarer 22,1 % av energien brukt til oppvarming av kabin. Bedre utnyttelse av spillvarme for oppvarmingsformål sammen med WHR-systemet og en elektrisk varmer vil trolig kunne dekke behovet i dette eksempelet.

7 Konklusjon

Oppgaven viser at for ikke planende fritidsbåter er det mulig å redusere drivstofforbruket med oppimot 30% poeng ved å implementere hybriddrift. Basert på utslipp av CO₂ er det forbedringer oppimot +95% poeng om man i tillegg benytter et fornybart drivstoff (HVO).

Ut ifra resultatene og informasjonen i oppgaven kan oppsummeres følgende kjernepunkter for å redusere klimautslippene fra en fritidsbåt:

- ✓ Elektrisk fremdrift i lavlastområder
- ✓ Minimer tomgang på forbrenningsmotor, kjøre høyere belastning i lavlastområder for å lade batterier
- ✓ Benytt WHR for å bedre utnytte energien i drivstoffet
- ✓ Benytt strøm fra batteripakke for oppvarming av kabin, varmtvann, pantry og forbrenningsmotor (unngå kaldstart)
- ✓ Om mulig benytt et fornybart drivstoff (kan være utfordringer med tilgjengelighet/distribusjon for båter)

Hybridmodellen som er designet i, kapittel 3, er basert på komponenter og løsninger inspirert fra bilindustrien og liknende løsninger som eksisterer i dagens båtmarked. Det mest nyskapende med modellens kjerne er tanken om å benytte det hybride systemet på en mer heilhetlig måte i båten. Oppvarming, matlaging og elektrisk pantry er muligheter ved å ha en solid batteripakke og generator ombord.

Simuleringsmodellen som ble laget er en ny modell som krevde oppbygging og implementering av funksjoner og undermodeller som ikke fantes for å gjennomføres. Programvaren er ikke laget for marine systemer og krever en del tilpasninger og forenklinger i modellen siden det ikke finnes standardkomponenter for marine systemer. IGNITE er et verktøy som bygger på et modellbibliotek (modellica), noe som gjør det utfordrende å lage modeller med komponenter som ikke er i programvarens bibliotek. Modellen åpner for å bruke simuleringsverktøy i fremtidig utviklingsarbeid for hybridisering av fritidsbåter. Med en dedikert kontrollenhet kan en kjøre flere simuleringer for å optimalisere det hybride systemet basert på forskjellige driftsprofiler og båttypen.

Kostnadmessig kan det være utfordrende å forsvare innkjøpskostnaden for et hybridssystem, basert på forventede innsparinger i dette båt-segmentet. Overgangen til et biodrivstoff vil kunne gi gode klimagevinster til en betydelig lavere kostnad. Dette er en løsning som kan gjøres på de fleste eksisterende fremdriftsmaskineri som allerede er montert i dagens fritidsbåter.

7.1 Videre arbeid

Fremtidig arbeid og videreutvikling av konseptet i oppgaven kan deles opp i tre ulike deler:

- Programvare: simuleringsmodell, funksjoner og undermodeller
- Fysiske komponenter: girkasser, varmevekslere og konfigurasjoner
- WHR-system: undersøke reelle systemer både som konsept og i simulering

På modell/simuleringssiden er det neste og viktigste steget å lage en tilpasset kontrollenhet. Neste trinn kan være skrog- og propellmodell for å få disse til å bedre gjenspeile virkelige komponenter. En vribarpropell-modell ville ha bedret utnyttelsen av motorene og åpnet for flere optimaliseringsstrategier slik som BSFC-optimalisering med en mer detaljert motormodell.

Blant de fysiske komponentene er det i hovedsak transmisjonen som kan utvikles for mindre marine hybridsystemer. En enkel transmisjon, som inneholdt alle de mekaniske koblingene i systemet, hadde tillatt en mye mer kompakt og enklere montering i båt. I vedlegg E er det vist en versjon med omstyring av propell og reduksjonsgir kombinert for et hybrid fremdriftssystem. En mer kompakt løsning kan oppnås om motor/generator har et eget kraftuttak (tilkobling) på selve giret, eller festet til motorens svinghjulsåpe. Alle de nødvendige koblinger og motor/generator konfigurasjoner, som er av interesse, kan en finne i bilindustrien (f.eks. Figur 11 og Figur 13). Men det må lages en unik transmisjonsenhet for å oppnå en bedre tilpasning til båt.

Spillvarmegjenvinning-systemet burde simuleres med flerfasestrømning. Gjerne ved å benytte undermodeller i IGNITE for å få en mer realistisk modell som kan ta hensyn til oppvarming, varmetap, tid, treghet og friksjon i WHR-systemet. Også simulering med ulike fluider for å se på effekten disse har på virkningsgraden til kretsen. Angående fluider må det også foretas en vurdering oppimot sikkerhet og regler rundt det å ha et slikt fluid om bord (vann, ammoniakk, alkohol, R-134a).

En fysisk modell av et slikt hybridsystem hadde også kunne gitt verdifulle erfaringer. Sett at en hadde en testbenk med en variabel last en prøvestand for å utføre flere ulike målinger for å se hvordan systemet oppfører seg. Da fikk en også virkelig prøvd den hybride kontrollenheten og dens programvare/kode.

Referanser

I flytskjema og funksjonsdiagram er det benyttet bilder og skisser fra offentlig publiserte kataloger for å representere de aktuelle komponentene på en mer frembringende måte. Fabrikantens navn er oppgitt, og i flere av skjemaene er også komponentens typebetegnelse oppgitt. Skjemaer og diagrammer som er laget selv består av tilgjengelige figurer fra Microsoft Word sitt interne bibliotek.

- [1] Svanemerket. "Forsuring av havet." <https://www.svanemerket.no/miljo/klima/forsuring-av-havet/> (accessed 23.09, 2020).
- [2] A. Nissen-Lie. "Fritidsbåter slipper ut mer CO2 enn landets ferger." <https://www.batliv.no/elbat-elbatforeningen-klimagasser/fritidsbater-slipper-ut-mer-co2-enn-landets-ferger/226272> (accessed 23.09, 2020).
- [3] J. Falnes. "AP vil ha fritidsbåtene over på strøm." NTB. <https://e24.no/naeringsliv/i/b5Rb8g/ap-vil-ha-fritidsbaatene-over-paa-stroem> (accessed 23.09, 2020).
- [4] H. Berglihn. "Tallkrangel om utslipp fra fritidsbåter: – Det er hårreisende galt." Dagens næringsliv. <https://www.dn.no/statistisk-sentralbyra/norboat/stein-harald-jorgensen/tallkrangel-om-utslipp-fra-fritidsbater-det-er-harreisende-galt/2-1-633074> (accessed 23.09, 2020).
- [5] J. M. Moberg. "Det er på tide å snakke om båtskam. Motorbåten er en versting." Teknisk Ukeblad. <https://www.tu.no/artikler/det-er-pa-tide-a-snakke-om-batskam-motorbaten-er-en-versting-br/469614> (accessed 17.09.2020, 2020).
- [6] Regjeringen. "Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent." Regjeringen. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-forsterker-klimamalet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/> (accessed 23.09, 2020).
- [7] P. Manly and R. Holmes, *Båt vedlikehold for alle*. Cappelen Damm AS, 2012. The Boat Maintenance Bible.
- [8] ENOVA. "Hydrogen- og batteriteknologi for innovative drivlinjer i skip (hybridskip)." <https://www.enova.no/pilot-e/hydrogen--og-batteriteknologi-for-innovative-drivlinjer-i-skip-hybridskip/> (accessed 07.10, 2020).
- [9] Miljødirektoratet. "Elektrifisering av fritidsbåter." <https://www.miljodirektoratet.no/tjenester/klimatiltak/klimatiltak-for-ikke-kvotepiktige-utslipp-mot-2030/sjofart-fiske-og-havbruk/elektrifisering-av-fritidsbater/> (accessed 07.10, 2020).
- [10] O. AS, "Båtlivsundersøkelsen 2018 Fritidsbåtlivet i Norge 2018," Kongelig Norsk Båtforbund (KNFB), sdir.no, 2018. [Online]. Available: https://www.sdir.no/globalassets/sjofartsdirektoratet/fartoy-og-sjofolk---dokumenter/fritidsbatkonferansen/2018/knbf_hoved_2018.pdf?t=1546497754357
- [11] "Myra 800 Sjark." TB Marine. <https://tbmarine.no/produkt/myra-800-sjark/> (accessed 14.02, 2021).
- [12] J.-o. beredskapsdepartementet. "Forskrift om gassapparater." Lovdata. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2018-06-26-1025> (accessed 01.03, 2021).
- [13] P. i. AS. "Transmisjoner." <https://progressing.no/transmisjoner/gir/> (accessed 01.03, 2021).
- [14] "Inter 9000 Nor-Line." Inter Trading AS. https://www.intertrading.no/INTER_MODELLER/content-9.html (accessed 12.02, 2021).
- [15] "Hybrid propulsion systems for small marine craft." <https://www.hybrid-marine.co.uk/> (accessed 05.02, 2021).
- [16] "Keel Cooled Hybrid Propulsion." <https://betamarine.co.uk/kc-hybrid-propulsion/> (accessed 04.03, 2021).
- [17] "E-Tech elektrisk og hybrid framdrift." Junker Marine AS. <https://www.junkermarine.no/batmotor/e-tech-elektrisk-og-hybrid-framdrift/> (accessed 16.10, 2020).

- [18] "Hybrid." Combi Outboards. <https://combi-outboards.com/en/products/hybrid> (accessed 16.10, 2020).
- [19] "Beta Hybrid Propulsion." Beta Marine Ltd. <https://betamarine.co.uk/kc-hybrid-propulsion/> (accessed 16.10, 2020).
- [20] "Dynastart." https://www.zf.com/products/en/cars/products_29308.html (accessed 22.03, 2021).
- [21] B. Rogers, M. Sires, P. Davies, D. Rawlins, and M. Cvetkovic, "Simulation of marine hybrid systems: An effective tool in streamlining design, operation and classification," presented at the Cimac Congress 2019, Vancouver, Canada, 2019, 7.
- [22] "2014 Honda Accord Hybrid – First Drive Video." https://www.hybridcars.com/2014-honda-accord-hybrid-first-drive/2014_accord_hybrid_tech_1/ (accessed 10.02, 2021).
- [23] A. M. Noor, S. Rajoo, and R. C. Puteh, "Waste Heat Recovery Technologies In TurbochargedAutomotive Engine – A Review," *Journal of Modern Science and Technology*, vol. 2, pp. 108-119, 2014.
- [24] R. S. Freymann, Wolfgang and A. Obieglo. (2008) The Turbosteamer: A System Introducing the Principle of Cogeneration in Automotive Applications. *MTZ*. 8.
- [25] O. R. Valmot. (2021, 08.03.2021) Nissan skal nå 50 prosent virkningsgrad med bensinmotor. *Teknisk Ukeblad* [Elektronisk artikkel]. Available: https://www.tu.no/artikler/nissan-skal-na-50-prosent-virkningsgrad-med-bensinmotor/507635?p=d5a06fd4&fbclid=IwAR2lrbOZb9vPd74GP14_drT_Ily1MOUNOlnzR23j_fQJ90LwL97XLRe2weY
- [26] C.-w. C. Hsieh and C. Felby, "Biofuels for the marine shipping sector," 2017. [Online]. Available: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf>
- [27] A. Lund, *Termodynamikk og strømningslære*. Bergen Fagbokforlag, 1999.
- [28] K. Skårdalsmo, "Fossile og fornybare drivstoffer - Muligheter og utfordringer," presented at the SPT Temadag, Gardermoen, 2017. [Online]. Available: <https://www.sptass.eu/sites/default/files/fossile-og-fornybare-drivstoffer.pdf>.
- [29] UNITROVE. "LNG Density Calculator." <https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/liquefied-natural-gas-density> (accessed 31.05, 2021).
- [30] "Battery Types." <https://www.hybrid-marine.co.uk/index.php/hybrid-info/what-is-the-best-battery-for-a-hybrid-system> (accessed 04.03, 2021).
- [31] M. Cloud. "What is the Energy Density of a Lithium-Ion Battery?" Flux Power. <https://www.fluxpower.com/blog/what-is-the-energy-density-of-a-lithium-ion-battery> (accessed 11.02, 2021).
- [32] "BATTERY CELL COMPARISON." eptec Engineered Technologies. <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html> (accessed 01.03, 2021).
- [33] "48V 7kWh lithium batteripakke." Chainpro Energy. <https://chainpro.no/produkter/48v-7kwh-lithium-batteripakke> (accessed 29.01, 2021).
- [34] L. M. Nerheim, "Del 6: Varmluft-motoren ("Stirling-motoren")," in *Termiske maskiner MAS 104_T*. Høgskulen på Vestlandet: Høgskulen på Vestlandet, pp. 2, 5, 6-8, 10-14, 16.
- [35] K. Reif and K.-H. Dietsche, *Automotive Handbook*, 9 ed. Robert Bosch GmbH, 2014, p. 400.
- [36] K. Reif and K.-H. Dietsche, *Automotive Handbook*. Robert Bosch GmbH, 2014, pp. 398-399.
- [37] Kubota, *Application manual Kubota Z482*. Kubota Corporation.
- [38] P. E. Koch and L. M. Nerheim, "Forbrenningssystemer 2.1 "Combustion air flow"." Høgskulen på Vestlandet: Høgskulen på Vestlandet, p. 65.
- [39] L. M. Nerheim, "Del 17: Om varmebalanser og spillvarmeutnyttelse," in *Termiske maskiner MAS 104_T*. Høgskulen på Vestlandet: Høgskulen på Vestlandet, pp. 2, 6, 8-9.
- [40] L. A. Hammond. "bmw-heat." <https://www.drivingthenation.com/bmw-heat/> (accessed 09.10, 2020).

- [41] Amovis. "HEAT RECOVERY SYSTEMS / STEAMCELL."
<http://www.amovis.de/kompetenzen/abwarmenutzung-steamcell/?lang=en> (accessed 09.10, 2020).
- [42] M. Poerner and A. Rimpel, "Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles," *Waste heat recovery*,
- [43] "Velkommen til en termoelektrisk verden!" <https://termoelektrisitet.no/> (accessed 09.10, 2020).
- [44] K. Brazier. "Thermoelectric effect."
https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect#/media/File:Thermoelectric_Generator_Diagram.svg (accessed 09.10, 2020).
- [45] H. Zervos. "Waste heat recovery systems in vehicles." Off grid energy independence.
<https://www.offgridenergyindependence.com/articles/3754/waste-heat-recovery-systems-in-vehicles> (accessed 20.02.2021, 2021).
- [46] L. M. Nerheim, "Del 5: Litt om dampanlegg," in *Termiske maskiner MAS 104_T*. Høgskulen på Vestlandet: Høgskulen på Vestlandet, pp. 2, 10, 14.
- [47] R. Freymann, J. Ringler, M. Seifert, and T. Horst. (2012) The Second Generation Turbosteamer *MTZ*.
- [48] T. Endo *et al.*, "Study on Maximizing Exergy in Automotive Engines " presented at the SAE International 2007 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 16-19.04.2007, 2007.
- [49] R. S. Freymann, Wolfgang and A. Obieglo. (2008) The Turbosteamer: A System Introducing the Principle of Cogeneration in Automotive Applications. *MTZ*. 8.
- [50] A. Arnold, "MAHLE invests in future technologies to reduce CO₂: acquisition of Amovis GmbH," ed. mahle.com, 2015.
- [51] *Green power from waste heat: Bosch ORC Systems*, BOSCH GmbH, 2013. [Online]. Available: https://d3pcsg2wjg9izr.cloudfront.net/files/30302/download/723465/3-201305161412260.ORC_Broschuere_EN.pdf.
- [52] TURBODEN. "ORC System." <https://www.turboden.com/products/2463/orc-system> (accessed 01.02, 2021).
- [53] Rank. "Rank. MICRO." <https://www.rank-orc.com/rank-micro-2/> (accessed 03.02, 2021).
- [54] K. Reif and K.-H. Dietsche, *Automotive Handbook*, 9 ed. Robert Bosch GmbH, 2014.
- [55] K. Reif and K.-H. Dietsche, *Automotive Handbook*, 9 ed. Robert Bosch GmbH, 2014, pp. 730-731.
- [56] "Konfigurer ditt individuelle produkt." https://www.sew-eurodrive.no/os/c/main.do?country=NO&language=no_NO&addon=BASKET&viewset=BASKET&action=READ_TRANSFER_SERVICE&g=F4E9D4089E681EDBA6A01D9E109D20DC (accessed 09.04, 2021).
- [57] "Clean, Efficient, Light Weight, Powerful BLDC Motor Drive Kits for Electric Car, ATV, Go-Kart, Golf Buggy." <https://www.goldenmotor.com/> (accessed 09.04, 2021).
- [58] "Shell and tube marine heat exchangers." <https://ej-bowman.com/products/electric-and-hybrid-coolers/> (accessed 04.03, 2021).
- [59] B. M. UK. *Technical information for Z602*, 5 ed., 2011, p. 22.
- [60] Flak. "Drivaksel HD 113 Frei." <https://www.flak.no/produkter/motortilbehoer/drivlinjer-og-aksel/drivaksel-hd-113-frei-p9300545> (accessed 11.05, 2021).
- [61] j. handel. "ELOC Motorvarmer - Sirkulasjon slangevarmer med kabelsko." https://www.jahandel.no/catalog/product_info.php?products_id=168 (accessed 11.05, 2021).
- [62] "Batterier."
https://www.bruktdel.no/nbf/S%C3%B8k/?model_id=0&brand_id=0&member_id=0&haspictures=False&ø=Batteri&partgroup=El.system&start=3 (accessed 10.01, 2021).
- [63] "IGNITE." <https://software.ricardo.com/products/ignite> (accessed 08.03, 2021).
- [64] *Aixam Repair manual Kubota Z*, 2013, p. 13.

- [65] M. M. Bernitsas, D. Ray, and P. Kinley, "KT, KQ and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers," University of Michigan, 1981.
- [66] M. Wheel. "Calculate Inboard Propeller Size." <https://www.miwheel.com/inboard-propellers/prop-it-now/> (accessed 17.04, 2021).
- [67] K. Z. Lundquist and T. Nordanger, *Båteierboka*, 7 ed. Sjøfartsdirektoratet: Nordanger forlag, 1988, p. 172.
- [68] B. University. "How to Prolong Lithium-based Batteries." <https://batteryuniversity.com/learn/article/how-to-prolong-lithium-based-batteries> (accessed 17.04, 2021).
- [69] Ricardo PLC, "Waste Heat Recovery Optimization For Drive Cycle Using Real-Time Transient Engine Model," *IGNITE/WAVE-RT/TIL-Suite*, p. 22
- [70] "Partikkelfilter." <https://www.skruvat.no/Partikkelfilter-C700.aspx> (accessed 13.05, 2021).
- [71] S. F. o. H. AS, "Innføringskurs - Båt i havbruk," 2001. [Online]. Available: https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/B%C3%A5t_i_havbruk-kompendium_2001.pdf
- [72] *Båtguiden 2015*, Norsk Maritimt Forlag AS, 42, 2015.
- [73] "Tobias 23 Kaptein." Tobias Båt AS. <http://xn--arbeidsbt-d3a.com/wp-content/uploads/2021/04/Tobias-23-Kaptein.pdf> (accessed 12.05, 2021).
- [74] "Drivstoffpriser." Circle K. <https://www.circlek.no/bedrift/drivstoff/drivstoffpriser> (accessed 12.04, 2021).
- [75] CircleK. "milesBIO HVO100 – fornybar diesel med miles additiv." Circle K. <https://www.circlek.no/bedrift/drivstoff/milesbio%C2%AE-hvo100> (accessed 20.09, 2020).
- [76] Miljødirektoratet. "Tabeller for omregning fra energivare til utslipp." <https://www.miljodirektoratet.no/myndigheter/klimaarbeid/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabeller-for-omregning-fra-energivarer-til-kwh/> (accessed 04.05, 2021).
- [77] (2019). *Barometer for grønn omstilling av skipsfarten*. [Online] Available: https://www.regjeringen.no/contentassets/00f527e95d0c4dfd88db637f96ffe8b8/dnv-gl-underlagsrapport_endelig-versjon.pdf
- [78] B. Marine, *Operator's maintenance manual Beta 10-25*. Beta Marine Ltd, 2014.
- [79] E. Toolbox. "Fuels - Densities and Specific Volume." https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-densities-specific-volumes-d_166.html (accessed 22.05, 2021).
- [80] I. A. Resitoglu, K. Altinisik, and A. Keskin, "The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems," p. 13
- [81] K. Reif, *Diesel engine management*. Bosch: Springer Vieweg, 2014, p. 17.
- [82] *Directive 2013/53/EU of the European parliament and of the council of 20 November 2013 on recreational craft and personal watercraft and repealing directive 94/25/EC*, EUR-Lex, 2013.
- [83] K. Reif and K.-H. Dietsche, *Automotive Handbook*, 9 ed. Robert Bosch GmbH, 2014, pp. 716-722.
- [84] Isuzu. "CO₂ Reduction Technologies." https://www.isuzu.co.jp/world/technology/clean/cleaner01.html?fbclid=IwAR28C8u1_olU8OV_hbtq1gJEP19o6urBUSluV5iauC8xvJfBz3CayB4hYQ (accessed 08.10, 2020).
- [85] *BS EN590 standard for diesel fuel*, E. C. f. Standarization, 2007. [Online]. Available: <https://www.ipu.co.uk/en590/>
- [86] P. Koch and L. Nerheim, "Fuels, Lubes and Tribology MOE250," in *Del 3.1 Diesel-oljer*. HVL Bergen, 2020, pp. 36-46.
- [87] "Operating fluids - fuels," in *Bosch Automotive Handbook*, 9th ed.: Robert Bosch GmbH, 2014, pp. 309-317.
- [88] NAF. "Alt du må vite om drivstoff." <https://www.naf.no/tips-og-rad/bilhold/teknisk-om-bilen/alt-du-ma-vite-om-drivstoff/> (accessed 09.10, 2020).
- [89] Energifabriken. "HVO100." <https://energifabriken.se/nb/hvo100/> (accessed 09.04, 2021).

Liste over figurer

Figur 1: Flytdiagram for metode.....	3
Figur 2: Utslipp fra fritidsbåt [11].....	4
Figur 3: Forbrenningsmotorens ulike tilknytninger i båten.....	6
Figur 4: Pantry i båt med et typisk sprit-kokeapparat under passasjersele [14].....	6
Figur 5: Forslag til elektrisk pantry.....	7
Figur 6: Eberspächer defroster/varmeapparat 12V/10 kW fra maritim båtutstyr.....	7
Figur 7: Alternativ varmtvannskrets i båt.....	8
Figur 8: E-Tech parallellhybrid for fritidsbåter [17].....	10
Figur 9: Combi Outboards sin hybride løsning [18].....	10
Figur 10: Beta Marine sitt hybridsystem [19].....	11
Figur 11: "DynaStart" elektrisk motor fra ZF [20].....	12
Figur 12: Hybrid modell av en større ferge i Ricardo IGNITE [21].....	13
Figur 13: Motor og generator (gule piler) fra en 2014 Honda Accord Hybrid [22].....	14
Figur 14: BMW sitt Turbosteamer system med lav- og høytrykkskrets og to ekspandere [24].....	15
Figur 15: Sankeydiagram fra Kubota: energiflyt for mindre dieselmotorer [36].....	18
Figur 16: Energi flytdiagram for et vanlig fremdriftssystem med dieselvarmer og kokeapparat.....	19
Figur 17: Energi flytdiagram for et hybrid fremdriftssystem.....	20
Figur 18: Oppbygningen av et termoelektrisk element [43].....	23
Figur 19: TEG brukt i en personbil for å konvertere termisk energi til elektrisk energi [44].....	23
Figur 20: Rankine-syklus: Komponenter og T-S diagram [46].....	24
Figur 21: Seriehybridsystem.....	26
Figur 22: Parallellhybridsystem.....	28
Figur 23: Serie/parallellhybridsystem.....	28
Figur 24: Fremdriftslinje med forbrenningsmotor.....	29
Figur 25: Modell av et hybrid fremdriftssystem.....	30
Figur 26: Forenklet fremdriftssystem.....	31
Figur 27: 3D-modell av et hybrid fremdriftsanlegg (se vedlegg E for mer detaljer). Modellen av forbrenningsmotor kommer fra Beta Marine UK.....	31
Figur 28: 3D-modell av omstyring, koblinger, elektromotor og reduksjons gir. Modell av gir - elektromotor kommer fra leverandørens nettsider [55, 56].....	32
Figur 29: Driftsvelger.....	33
Figur 30: Driftspanel i Excel.....	33
Figur 31: Hybrid fremdriftssystem med komponentnavn.....	34
Figur 32: Flytskjema for kjølevann og eksos.....	35
Figur 33: Oversiktsbilde over det elektriske systemet.....	36
Figur 34: Kalkulator i Excel.....	37
Figur 35: Transmisjonsdata i Excel kalkulator.....	37
Figur 36: Driftsstatus i Excel kalkulator.....	38
Figur 37: Hybrid fremdrifts parameter.....	38
Figur 38: Oversikt over parallellkobling av 48V batteripakker til hybrid fremdrift.....	39
Figur 39: Motordata og ytelsesverdier fra Excel kalkulator.....	40
Figur 40: Spillvarme i Excel kalkulatoren.....	41
Figur 41: Driftspanel i Excel med forklaringstekst.....	42
Figur 42: Oversiktsbilde med de ulike komponentene i fremdriftssystemet.....	43
Figur 43: Modell av det hybride fremdriftssystemet i IGNITE.....	49

Figur 44: Batteripakken representert i IGNITE	50
Figur 45: Elektrisk motor/generator i IGNITE.....	50
Figur 46: Parameter for "MotorGenerator_2Pin"	51
Figur 47: "BasicEngine" i IGNITE, en kan merke seg den røde varmeporten i underkant og den gule CANbus porten i toppen.....	51
Figur 48: Visualisert forbrukstabell i IGNITE.....	53
Figur 49: Forbruksmåler i IGNITE	53
Figur 50: Komponentene i forbruksmåleren: "Gain" og "Integrator"	54
Figur 51: Kjølesystemet til motoren i IGNITE modellen	55
Figur 52: Åpningskurven for termostaten vist i et redigeringsvindu i IGNITE.....	56
Figur 53: Tabellmodell for å få effekt overført til kjølesystem.....	56
Figur 54: Koblinger i IGNITE.....	57
Figur 55: Parallellhybrid kontrollenhet	57
Figur 56: Kontrollpanelets ikon-bilde	58
Figur 57: Kontrollpanelets logiske-krets.....	58
Figur 58: Propell-modellen i Ignite	59
Figur 59: Propellkurve for å hente ut verdier brukt i propellmodellen i IGNITE. Modellen viser en 3-blads propell [64].....	60
Figur 60: Komponentene som utgjør båtens skrog.....	61
Figur 61: WHR-ikon i simuleringsmodellen	61
Figur 62: Logikk kart over de ulike driftsmodusene	62
Figur 63: Logikk kart for hybriddrift	63
Figur 64: P2 parallellhybrid kontrollenhet for mindre kjøretøy, indre krets. Bilde er hentet fra IGNITE	64
Figur 65: ORC-krets med energitilførsel fra både eksos og kjølevann	65
Figur 66: WHR-systemet med tabeller og logiske funksjonsblokker.....	66
Figur 67: Driftsmønstre for IGNITE sin kontrollpanel-komponent.....	67
Figur 68: Modell fra VAG der det er benyttet undermodeller fra WAVE og TLK [68].....	70
Figur 69: Plot over ønsket- og reell hastighet for simuleringsmodellen i elektrisk-modus	72
Figur 70: Batteri-data ved kjøring.....	72
Figur 71: Belastning av den elektriske motoren i elektrisk modus	73
Figur 72: Effekt og turtall for dieselmotor i simuleringsmodell	74
Figur 73: Drivstofforbruk og totalt forbrukt drivstoffmengde for simulert rute.....	75
Figur 74: Kjølevannstemperatur for dieselmotor i simuleringsmodell	75
Figur 75: Strøm fra WHR til batteripakke, ved drift under driftsmønster vist i fig. 66.....	76
Figur 76: Batteriets ladestatus under drift i dieselmodus.....	76
Figur 77: De ulike effektene inn- og ut av ORC-kretsen	77
Figur 78: Hastighetsplot for fartøyet ved hybriddrift.....	78
Figur 79: Strøm fra eller til batteriet. Pilene viser til de to situasjonene der lading forekommer.....	79
Figur 80: Belastningskurve for dieselmotor	79
Figur 81: Belastningskurve for elektromotor	80
Figur 82: Belastning av diesel- og elektromotor	80
Figur 83: Total fremdriftseffekt ved hybriddrift	81
Figur 84: Drivstofforbruk ved hybriddrift	81
Figur 85: Batteriets SOC ved hybriddrift	81
Figur 86: Elektriske- og mekaniske verdier for WHR-systemet.....	83
Figur 87: Effektivt- delt på maks middeltrykk for diesel- og hybriddrift.....	86
Figur 88: Drivstoffpriser fra Circle K [73].....	89

Liste over tabeller

Tabell 1: Oversikt over noen motorleverandører til fritidsmarkedet, data hentet fra produsentenes nettsider	9
Tabell 2: Oversikt over noen drivstoff, legg merke til tetthet og brennverdi [26-28]. Karbon innhold i vektprosent	16
Tabell 3: Tabell med energitetthet over ulike batterier [30, 31]	17
Tabell 4: Eksempel: 12kW vannkjølt dieselmotor	18
Tabell 5: Ytelsesgraf fra en spesifikk modell av Kubota Z602 og Turtall-forbruk tabell brukt i Excel kalkulatoren.....	41
Tabell 6: Komponentliste for fremdriftssystemet	43
Tabell 7: Komponentliste for det forenklede fremdriftssystemet	44
Tabell 8: Komponenttabell med prisliste for alternativ 1	45
Tabell 9: Komponenttabell med prisliste alternativ 2	45
Tabell 10: Komponenttabell med prisliste for innenbordsmotor uten hybrid fremdrift	46
Tabell 11: Komponenttabell med prisliste for utenbordsmotor	46
Tabell 12: Tabeller med estimert data over ytelse og forbruk for en Kubota Z602.....	52
Tabell 13: Propelldata	60
Tabell 14: Resultater fra loggboken	67
Tabell 15: Parameter i IGNITE, her vist for elektrisk modus	68
Tabell 16: Rekkevidde ved ulike hastigheter i EV-modus.....	71
Tabell 17: Verdier fra Dieselmodus, hentet fra IGNITE	73
Tabell 18: Rammeverdier for fremdrift i hybrid modus	77
Tabell 19: Verdier for hybriddrift fra hybridkalkulator	85
Tabell 20: Sammenligning mellom energiforbruk i hybridmodus (8,4 knop er maks hastighet for modellen i Excel)	87
Tabell 21: Pris, vekt og volum av 4 ulike fremdriftssystem	88
Tabell 22: Data og pris for utvalgte fritidsbåter	89
Tabell 23: Differanse i årlig drivstoffkostnad for fire ulike driftsscenarioer, basert på prisene i Figur 88	90
Tabell 24: Forskjell i volumetrisk drivstofforbruk mellom diesel og HVO100.....	90
Tabell 25: Kostnad pr nautisk mil	91
Tabell 26: Driftskostnad, basert på verdiene fra simulering, for driftsmønsteret i tabell 14	91
Tabell 27: Utslipp ved ulike hastigheter, fremdriftssystem og drivstoff.....	92

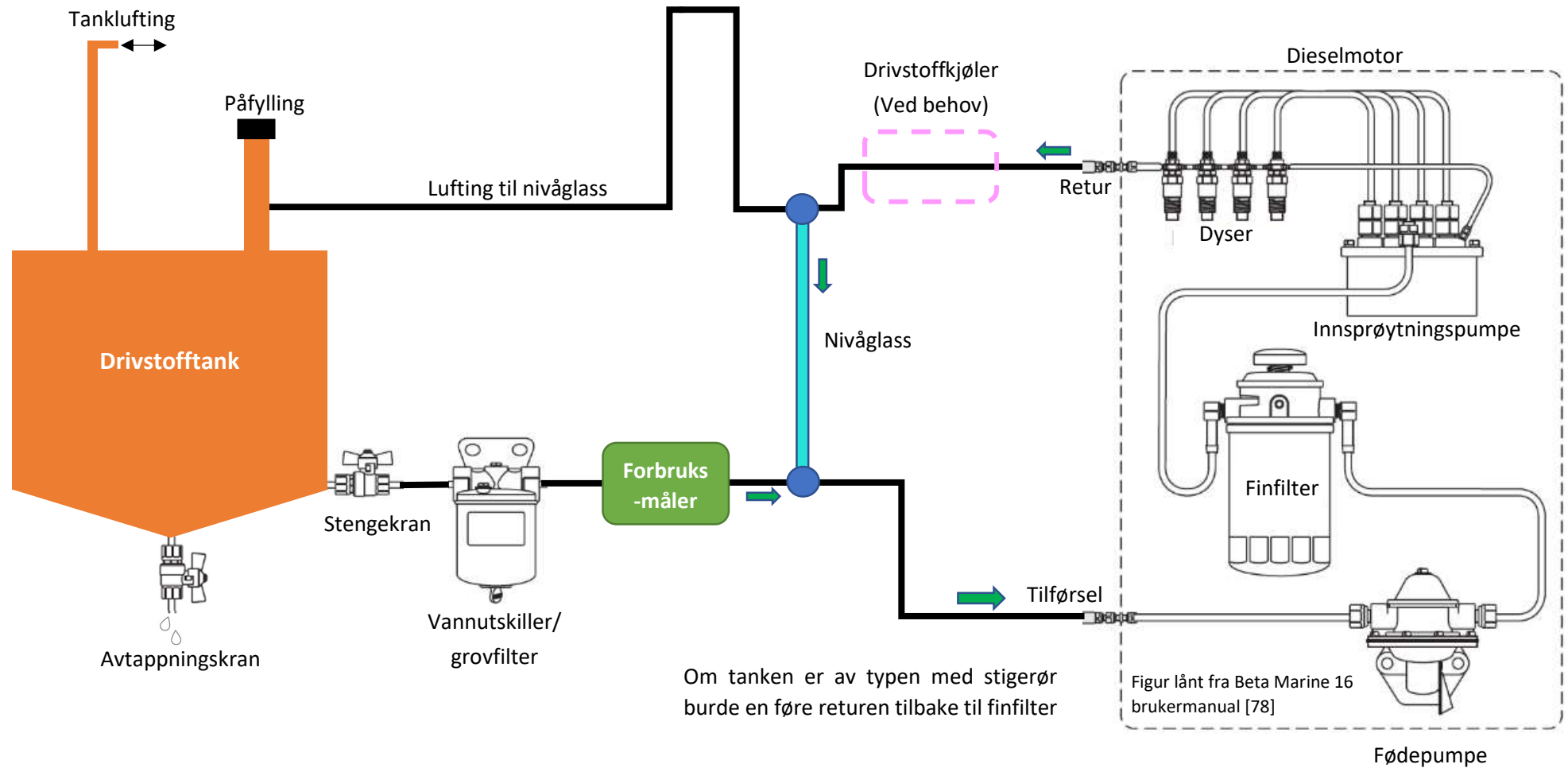
Vedlegg A

Verdier for energi-flytdiagram

Energi flytdiagram				
Drivstoff				
	Totalt forbruk	3.53 L	100 %	
Z602	Dieselmotor	2.7 L	76 %	
4kW EB	Dieselvarmer	0.53 L	15 %	
Estimat	Kokeapparat	0.3 L	8 %	
Dieselmotor				
				Prosent av 76%
	Tilført energi	27.1 kWh	100 %	76
	Mekanisk energi	8.8 kWh	32 %	25
	Avgassenergi	7.3 kWh	27 %	21
	Kjølevannsennergi	8.9 kWh	33 %	25
	Strålevarme	1.5 kWh	6 %	4
	Dynamo	0.5 kWh	2	1
	Varmeapparat	2.5 kWh	-	7% av 25%
				Antar at varmeapparat/defroster kan

Hybrid energi flytskjema				
Total energimengde			52.3 kWh	100 %
Batteri			25.2 kWh	48 %
Forbruk @ 1h	2.7 Liter		27.1 kWh	52 %
Mekanisk energi			8.8 kWh	17 %
Avgassenergi			7.3 kWh	14 %
Kjølevannsennergi			8.9 kWh	17 %
Strålevarme			1.5 kWh	3 %
Dynamo			0.5 kWh	1 %
Varmeapparat			2.5 kWh	5 %
Tot varmeenergi			6.5 kWh	12 %
El-motor			9.4 kWh	18 %
Hybrid fremdrift			18.2 kWh	35 %
Kokeapparat			2 kWh	4 %
Tap i elmotor			1.8 kWh	3 %
Termisk tap i batteri			0.94 kWh	2 %

Drivstoffsystem-oppsett for bruk av enkel mengdemåler på system med retur



INDUSTRIAL DIESEL ENGINE

Kubota Super Mini Series (2-Cylinder)

Z602-E4B



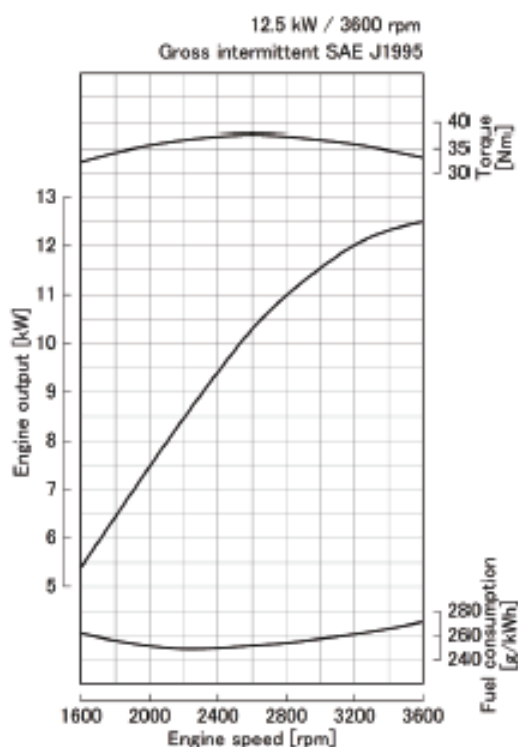
Rated Power

12.5 kW @ 3600 rpm



Photograph may show non-standard equipment.

Performance Curves



Features and Benefits

Emissions

The Kubota Super Mini Series features compact multi-cylinder liquid cooled industrial diesel engines which comply with EPA / CARB Tier 4 emissions regulations.

Durable Power

The Kubota Z602 engine is a high-power density engine that delivers maximum output using a 2-cylinder configuration.

By expanding the bore and stroke, Kubota has increased engine displacement while maintaining the same footprint as the Z482 engine. The use of an extended shallow oil pan keeps the engine height lower than that of the Z482, providing a compact engine package.

The cooling water passages between the cylinder bores features Kubota's original casting technology as a countermeasure against the heat load caused by high power density, providing both superior endurance and reliable engine performance.

This engine offers a seamless transition from E3 to E4 by maintaining the same level of performance and physical characteristics.

Clean and Quiet Power

Kubota's original E-TVCS (Three Vortex Combustion System) has been further improved for cleaner emissions. The piston recess has been optimized to achieve lower particulate matter (PM) levels at an extremely small size. The half-float valve cover and MoS₂-coated pistons reduce noise levels and decrease vibrations transmitted from the valve area.

Z602-E4B

Engine Specifications

Engine model		Z602-E4B
Emission regulation		EPA/CARB Tier 4 (NRTC/NTE test mode) + EU Stage V
Type		Vertical, water cooled 4-cycle diesel engine
Cylinders		2
Bore and stroke	mm (in)	72.0 x 73.6 (2.83 x 2.90)
Displacement	L (cu.in)	0.599 (36.55)
Aspiration		Naturally aspirated
Aftertreatment		-
Rated output / speed ^{*1}	kW (HP) / rpm	12.5 (16.8) / 3600
Maximum torque / speed ^{*1}	Nm (lb-ft) / rpm	37.8 (27.9) / 2600
Combustion system		Indirect injection
Fuel system		In-line pump
Length x Width x Height ^{*2} (without aftertreatment unit)	mm (in)	351 x 401 x 544 (13.8 x 15.8 x 21.4)
Length x Width x Height ^{*3} (with aftertreatment unit)	mm (in)	-
Dry weight ^{*3}	kg (lbs)	57 (120)

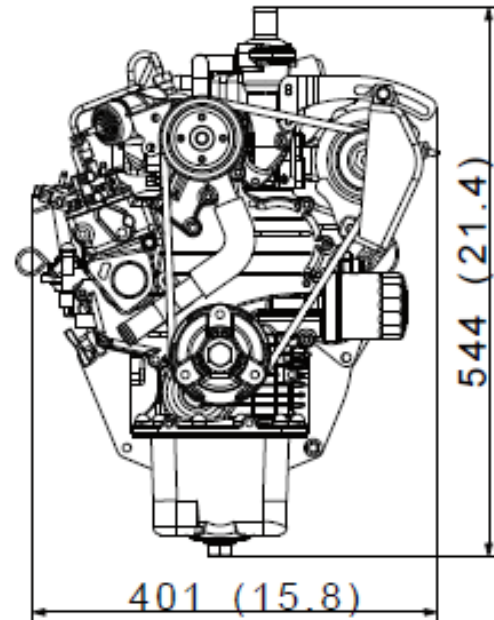
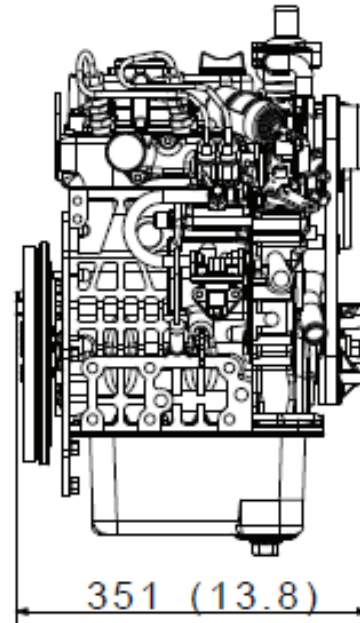
Specifications are subject to change without notice.
Dimensions and dry weight are according to Kubota's standard specification.
Dimensions and weight depend on completed specifications.

*1: SAE J1995 gross Intermittent

*2: Exclude cooling fan and exclude aftertreatment unit

*3: Exclude cooling fan and include aftertreatment unit on engine

Dimensions



Kubota Corporation

2-47, Shikitsuhgashi 1-chome Naniwa-ku, Osaka, 556-8601 Japan

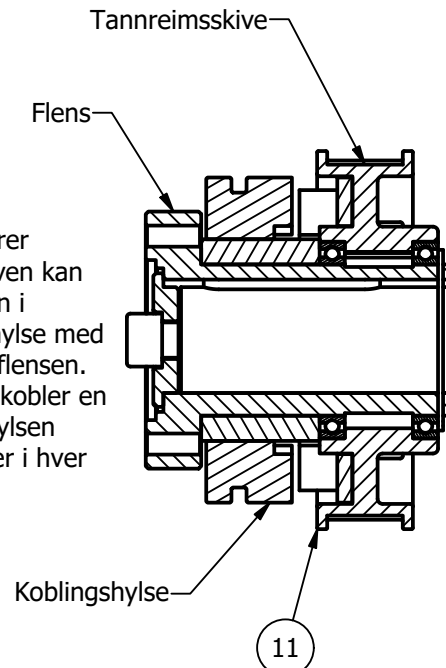
<https://global.engine.kubota.co.jp/en/>

ASPZ602-E4B1902-R1-I-178040

Vedlegg D-1

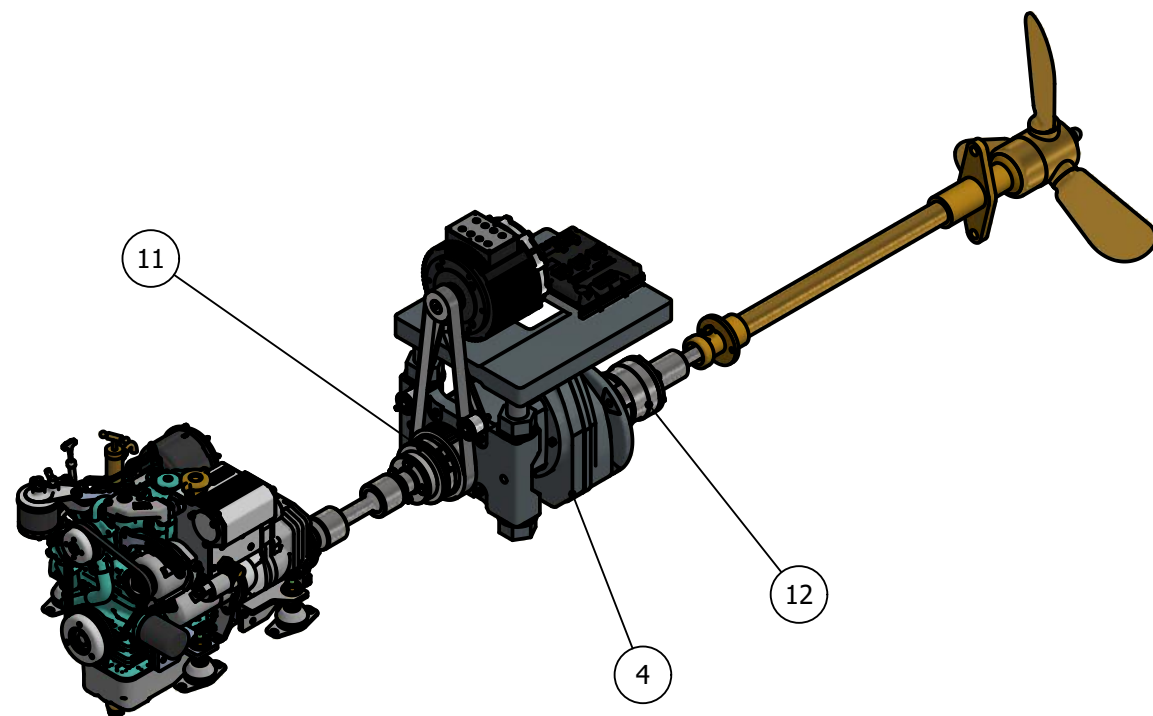
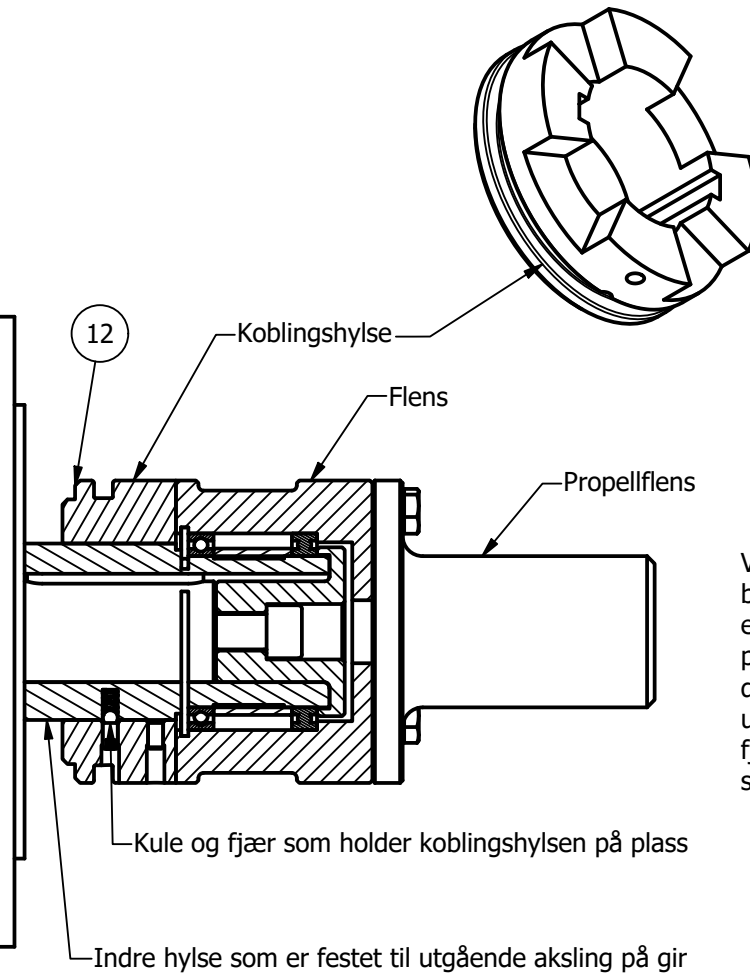
B-1

Solid flens som via kile overfører kraften til giret. Tannreimsskiven kan rotere fritt på halsen til flensen i utkoblet tilstand. En koblingshylse med utfresninger glir på 2 kiler på flensen. Ved å flytte denne mot høyre kobler en til tannreimsskiven. Koblingshylsen holdes på plass av kule og fjær i hver av sine to posisjoner.




B-2

Virkemåten er den samme for begge frikoblingene. Men for B-2 er målet å kunne koble ifra propellakslingen. Her er flensen den delen som roterer fritt ved utkobling. Her ser en kule og fjæren som holder koblingshylsen stabil i en posisjon.

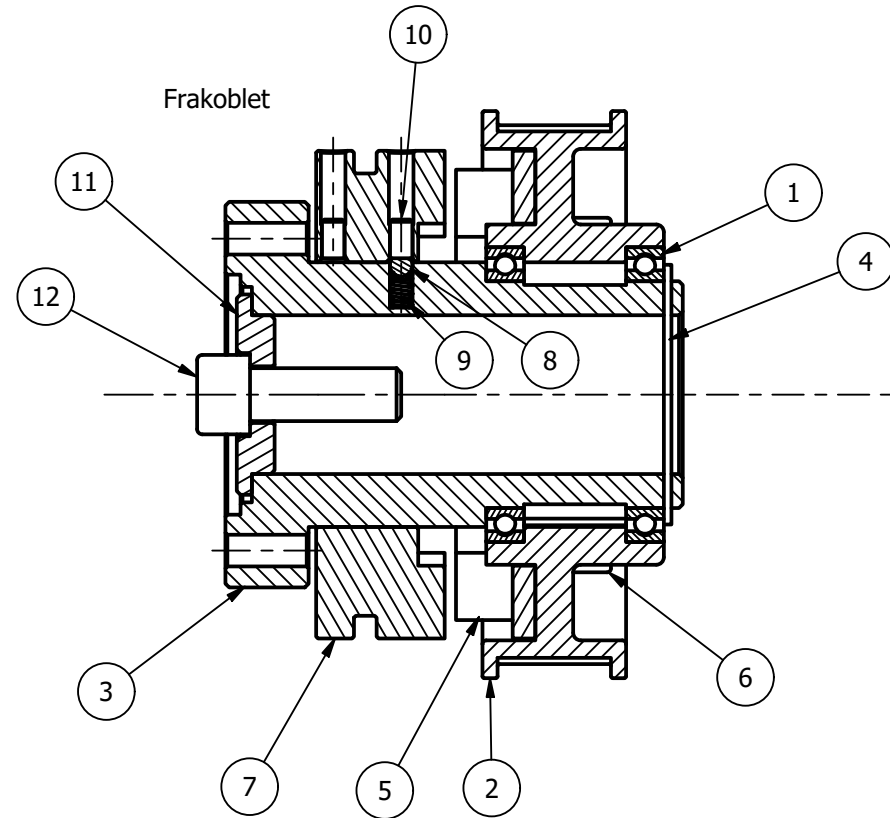


Oversiktstegning

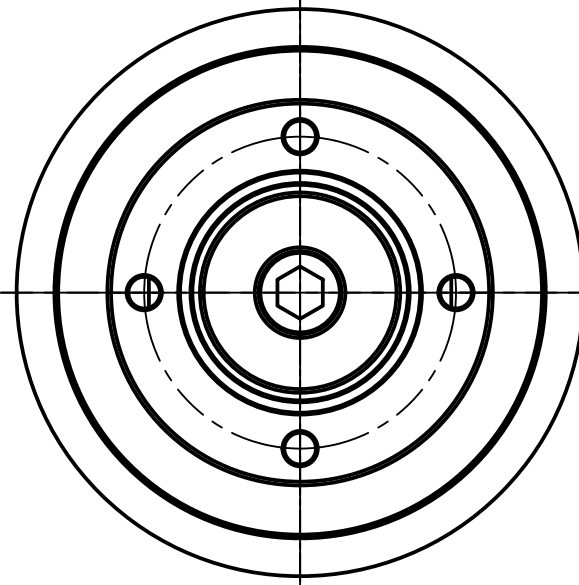
12	1	Kobling B-2	Samensett enhet	
11	1	Kobling B-1	Samensett enhet	
4	1	Ekstra gir		
Pos	Ant.	Beskrivelse/Dimensjon	Materiale	Vekt
Toleranser for ikke toleransesatte mål:		Utførelse og krav til sveis:	Overflatebeskaffenhet:	
NS-ISO 2768-1x				
Tegningsformat:	Prosjekt nr.:	Måleenhet:	Geometriske toleranser etter:	
A3		mm		
Dato:	Konstr./Tegnet:	Tracet:	Målestokk:	
02.03.2021	DSMS	NN	1:3	
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:		
Tittel:			Erstatning for:	Erstattet av:
Masteroppgave 2021				
Hybrid fremdrift			Tegningsnummer = filnavn:	
Drivlinje			Kobling B-1 & B-2	
Henvisning:		Beregning:	Elev:	Dan Shanker

Vedlegg D-2

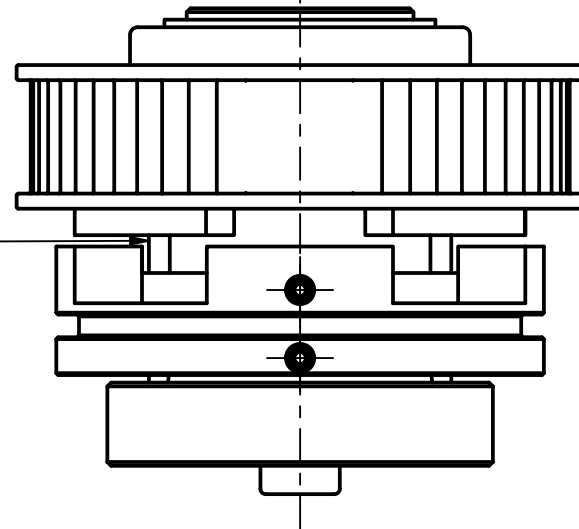
B-B (1:2)



C ← B

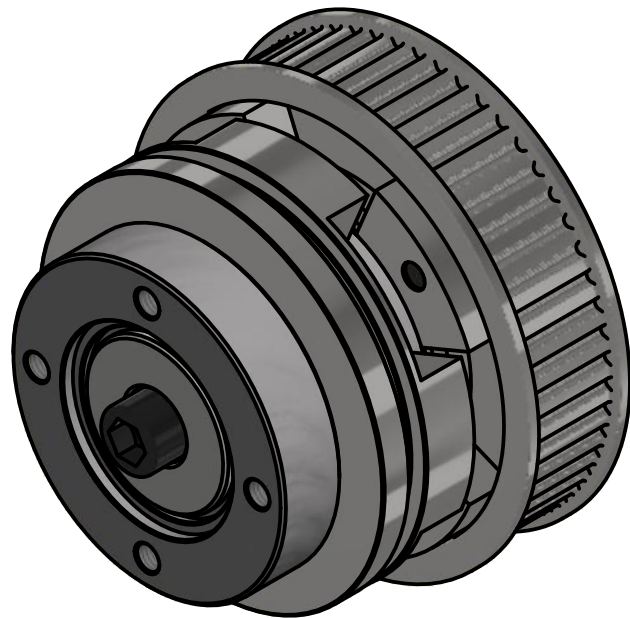
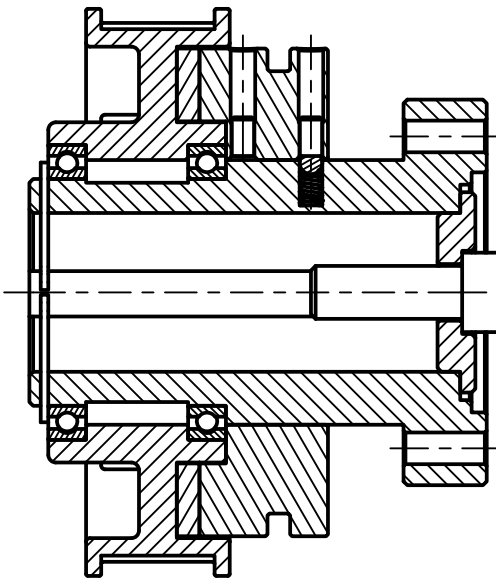


C ← B




C-C (1:2)

Innkoblet



Pos	Ant.	Beskrivelse/Dimensjon	Materiale	Vekt
13	2	Glidekile	Kilstål	0 kg
12	1	M14x40 Unbrakobolt	8.8 eller 10.9 klasse	0,1 kg
11	1	Endeplate for aksial fastsetting	Stål, S235J	0,1 kg
10	2	M6x10 Unbrako settskrue	8.8 eller 10.9 klasse	0 kg
9	1	Fjær	Fjærstål	0 kg
8	1	Kule Ø6	Stål	0 kg
7	1	Koblingshylse	Stål, S355J	1,6 kg
6	4	M10x30 Unbrakobolt	8.8 eller 10.9 klasse	0 kg
5	1	Koblingsring	Stål, S355J	0,7 kg
4	1	Seegerring DIN471-60x2	Stål	0 kg
3	1	Inngående flens	Stål, S235J	2,4 kg
2	1	Tannremskive 56-8-M30	Stållegering	2,1 kg
1	2	Kulelager SKF 61812-2RS1	Stål	0,1 kg

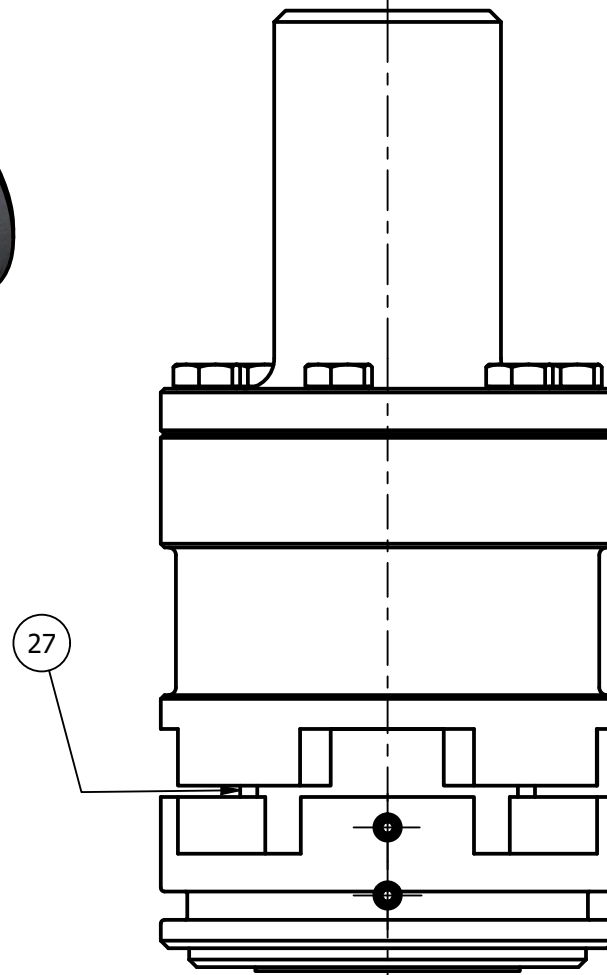
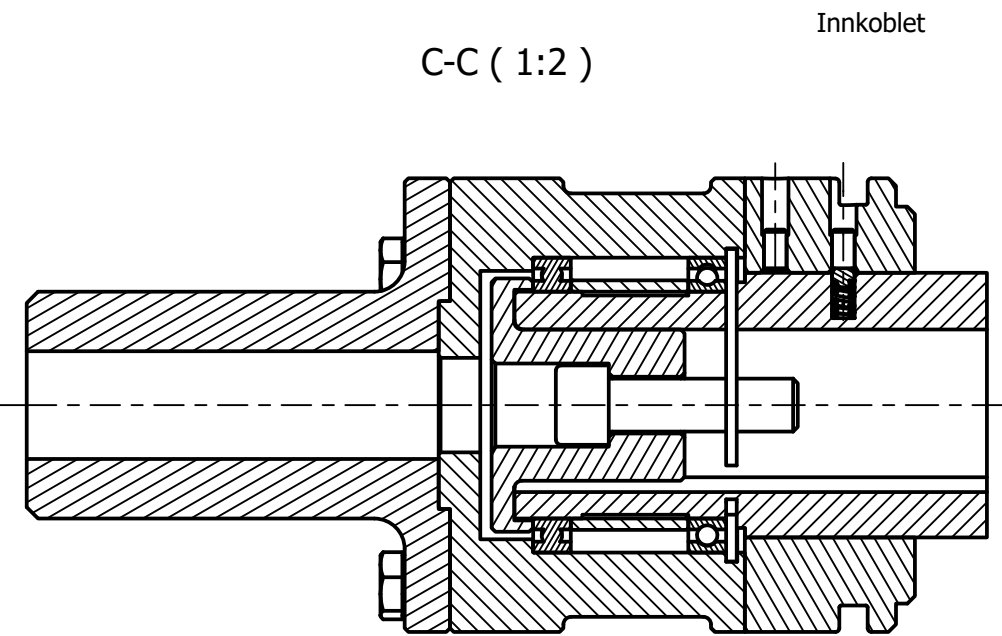
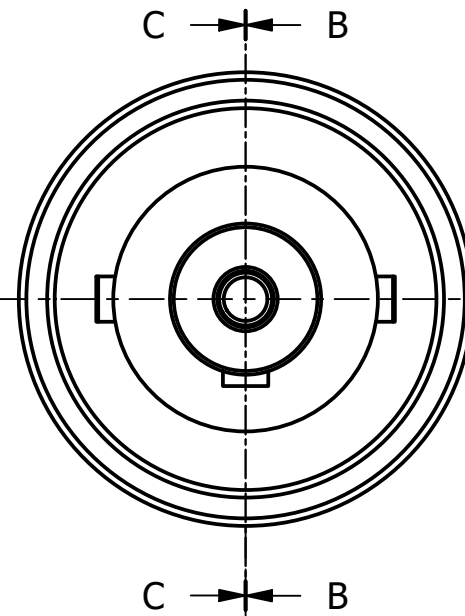
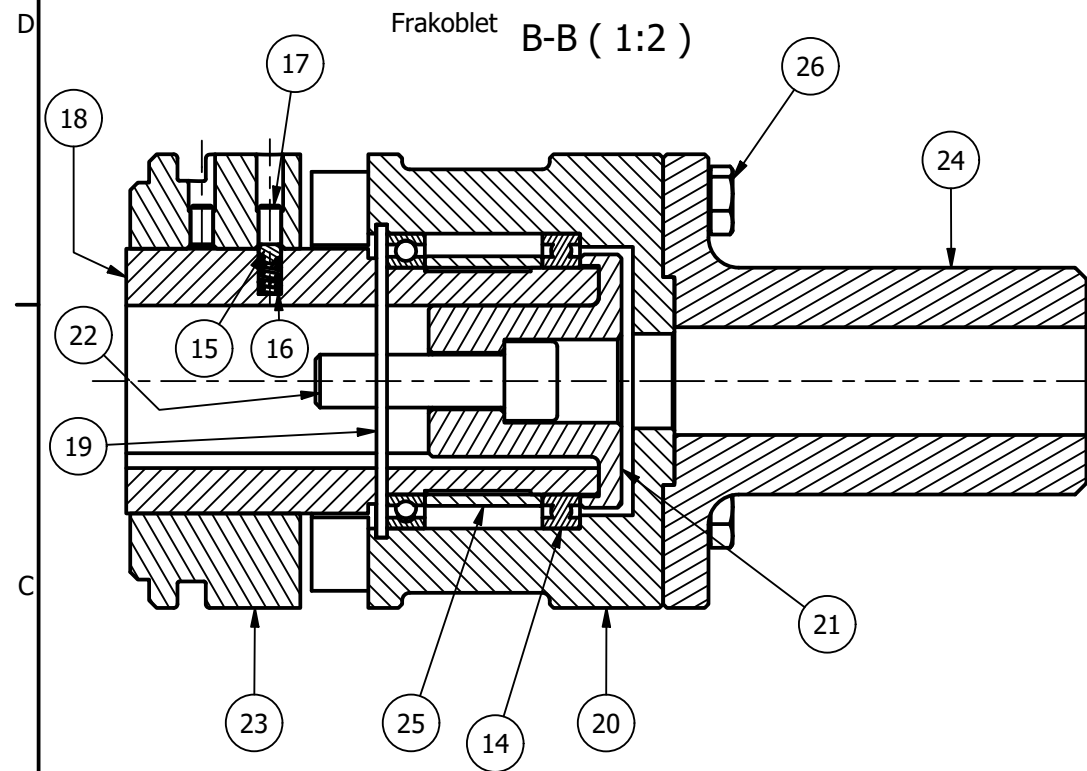
Toleranser for ikke toleransesatte mål: NS-ISO 2768-1x		Utførelse og krav til sveis:	Overflatebeskaffenhet:
---	--	------------------------------	------------------------

Tegningsformat: A3	Prosjekt nr.:	Måleenhet: mm	Geometriske toleranser etter:
Dato: 02.03.2021	Konstr./Tegnet: DSMS	Tracet: NN	
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:	



Tittel: Masteroppgave 2021 Hybrid fremdrift Drivlinje		Erstatning for:	Erstattet av:
		Tegningsnummer = filnavn: Frikobling B-1	

Henvising:	Beregning:	Elev: Dan Shanker
------------	------------	----------------------

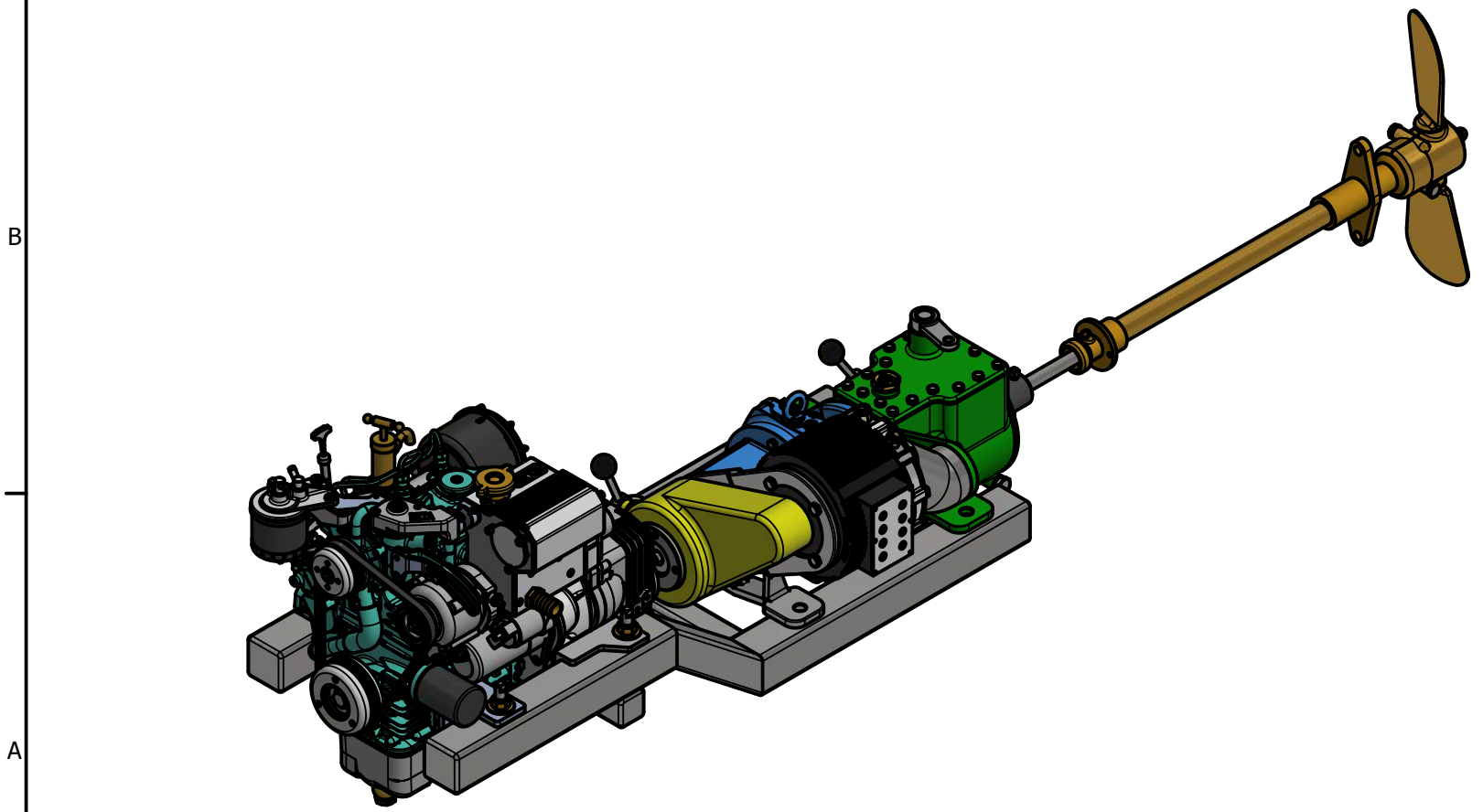
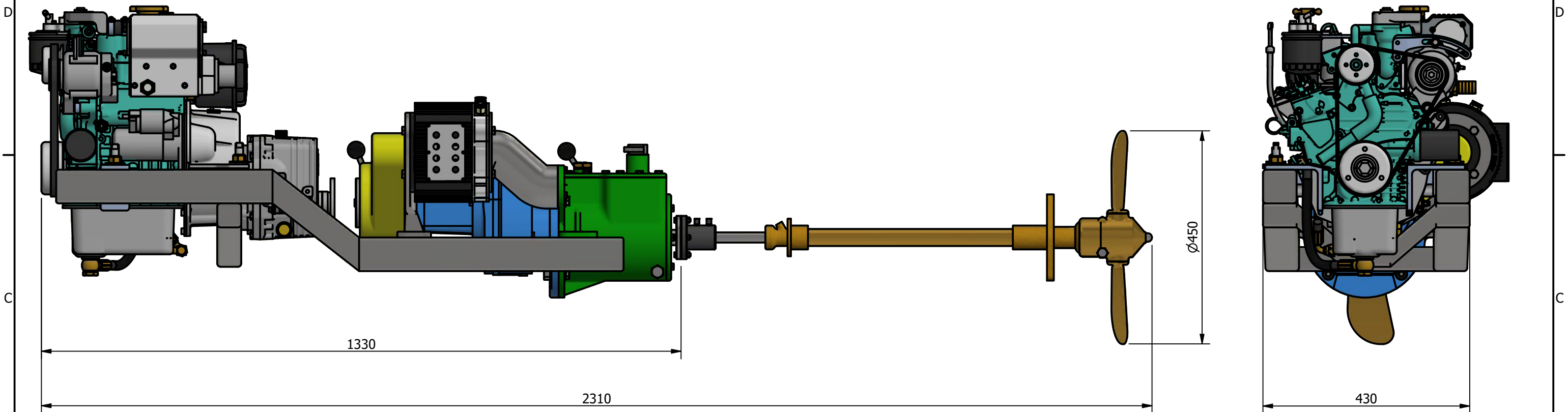
Vedlegg D-3




Pos	Ant.	Beskrivelse/Dimensjon	Materiale	Vekt
27	2	Glidekile	Kilstål	0 kg
26	6	M10x30 Maskinbolt	8.8 klasse	0 kg
25	1	Avstandshylse	Stål, S235J	0,1 kg
24	1	Propellflens	Stållegering	2,6 kg
23	1	Koblingshylse	Stål, S355J	1,9 kg
22	1	M14x50 Unbrakobolt	8.8 eller 10.9 klasse	0,1 kg
21	1	Endehylse for aksial fastsetting	Stål, S235J	0,5 kg
20	1	Utgående flens	Stål, S355J	4,3 kg
19	1	Seegerring ANSI B 27.7M-3BMI 78	Stål	0 kg
18	1	Inngående hylse	Stål, S235J	1,9 kg
17	2	M6x10 Unbrako settskrue	8.8 eller 10.9 klasse	0 kg
16	1	Fjær	Fjærstål	0 kg
15	1	Kule Ø6	Stål	0 kg
14	2	Kulelager SKF 61812-2RS1	Stål	0,1 kg

Toleranser for ikke toleransesatte mål: NS-ISO 2768-1x		Utførelse og krav til sveis:		Overflatebeskaffenhet:	
Tegningsformat: A3	Prosjekt nr.:	Måleenhet: mm		Geometriske toleranser etter:	
Dato: 02.03.2021	Konstr./Tegnet: DSMS	Tracet: NN	Målestokk: 1:2		
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:			
Tittel: Masteroppgave 2021 Hybrid fremdrift Drivlinje				Erstattet av:	Erstattet av:
Hvisning:				Tegningsnummer = filnavn: Frikobling B-2	
Beregning:		Elev:		Dan Shanker	

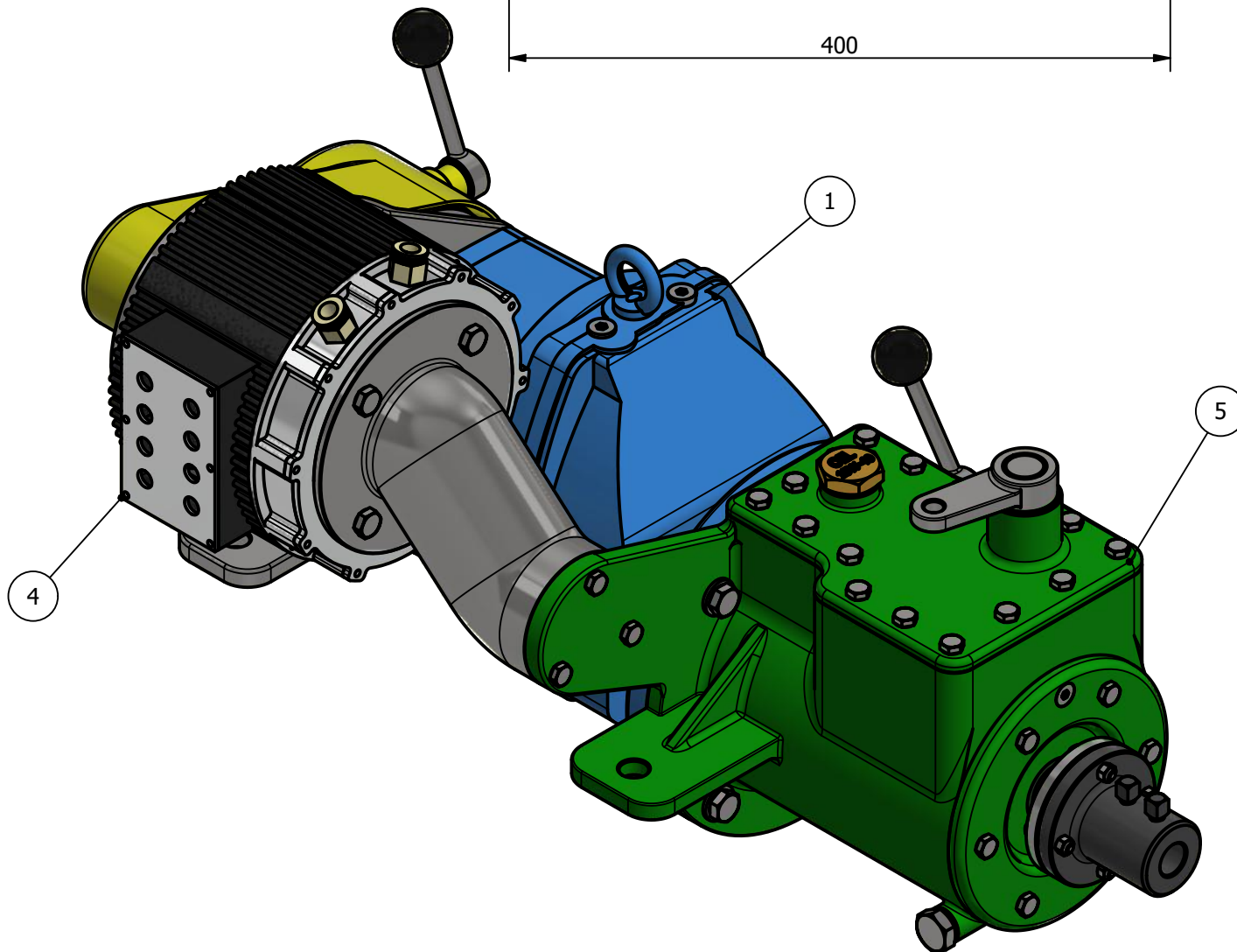
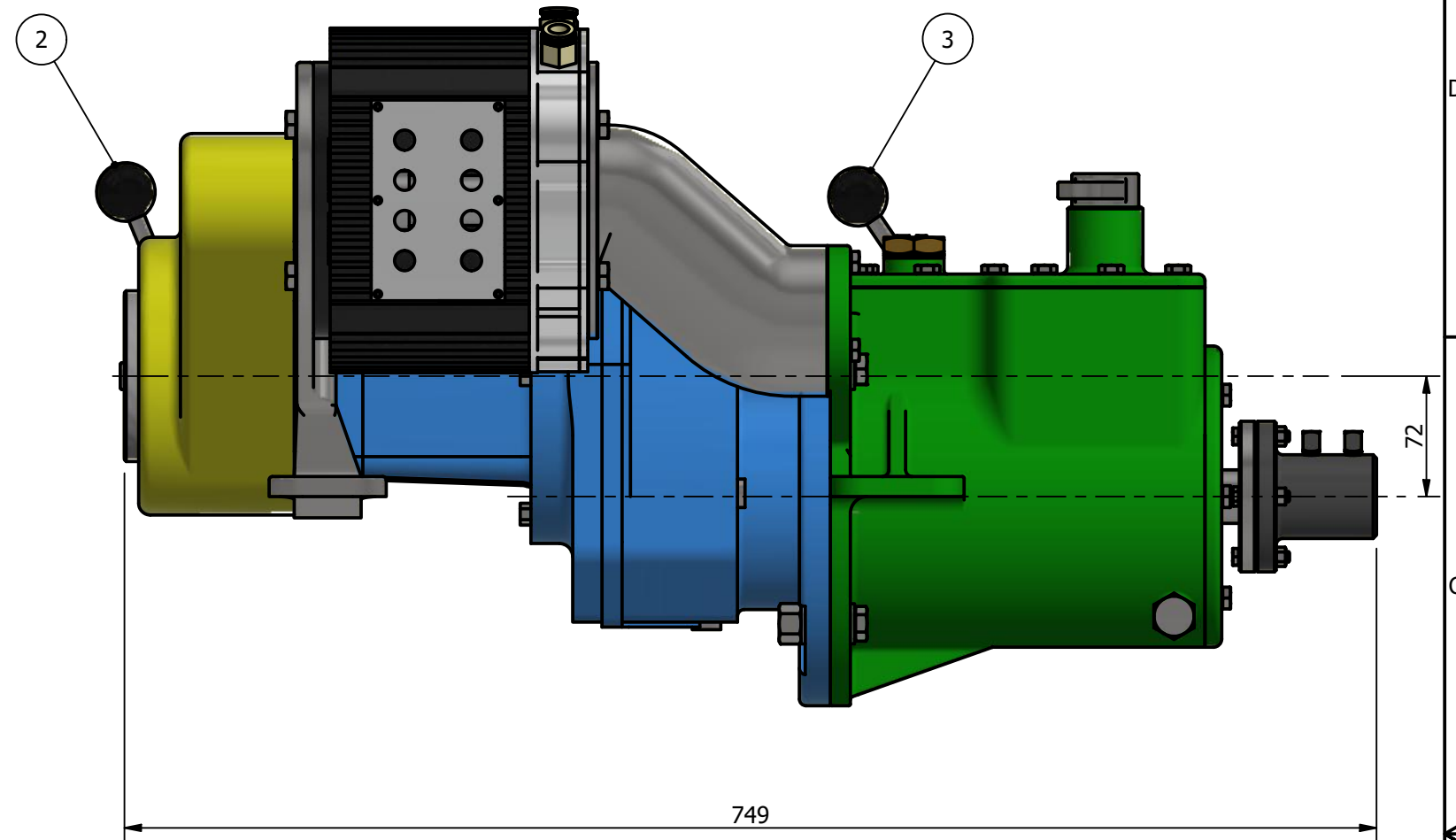
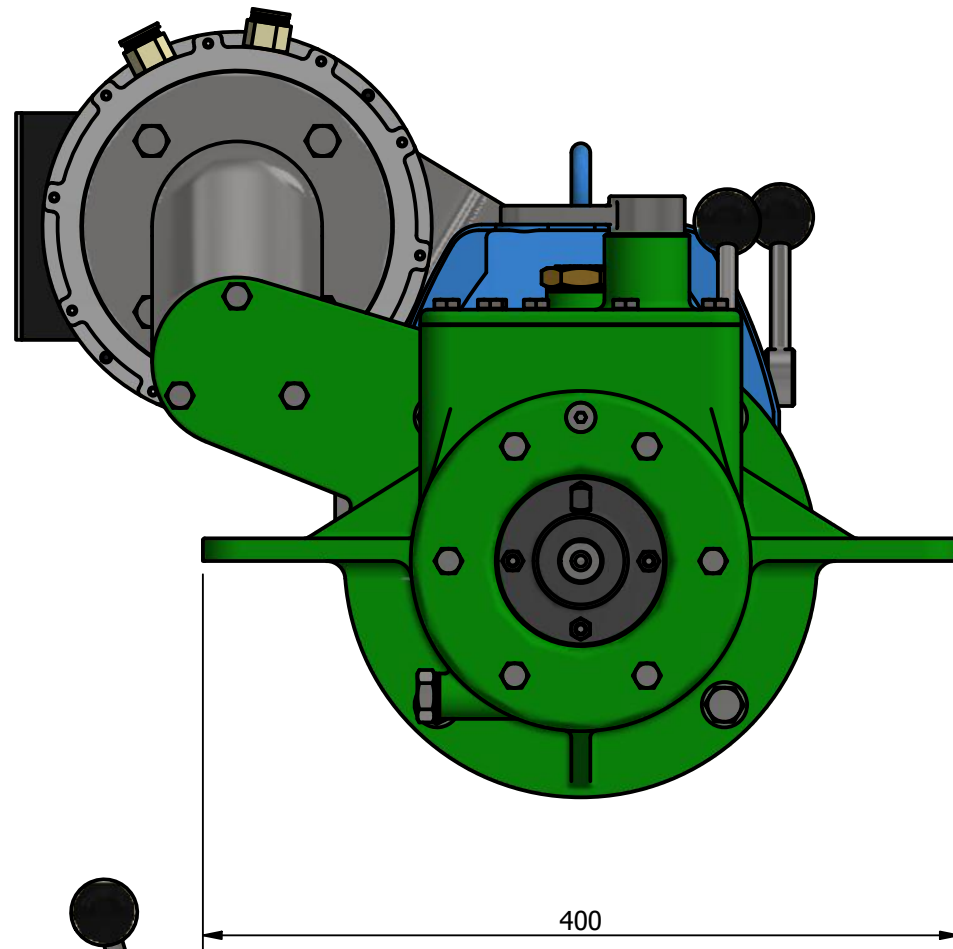
Vedlegg E-1




Toleranser for ikke toleransesatte mål: NS-ISO 2768-1x		Utførelse og krav til sveis:		Overflatebeskaffenhet:	
Tegningsformat: A3	Prosjekt nr.:	Måleenhet: mm		Geometriske toleranser etter:	
Dato: 03.05.2021	Konstr./Tegnet: DSMS	Tracet: NN	Målestokk: 1:8	 HVL Bergen	
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:			
Tittel: Masteroppgave 2021 Hybrid fremdrift Eksempel på tilpasset konstruksjon				Erstattning for:	Erstattet av:
				Tegningsnummer = filnavn: Modell J	
Henvising:		Beregning:		Elev: Dan Shanker	

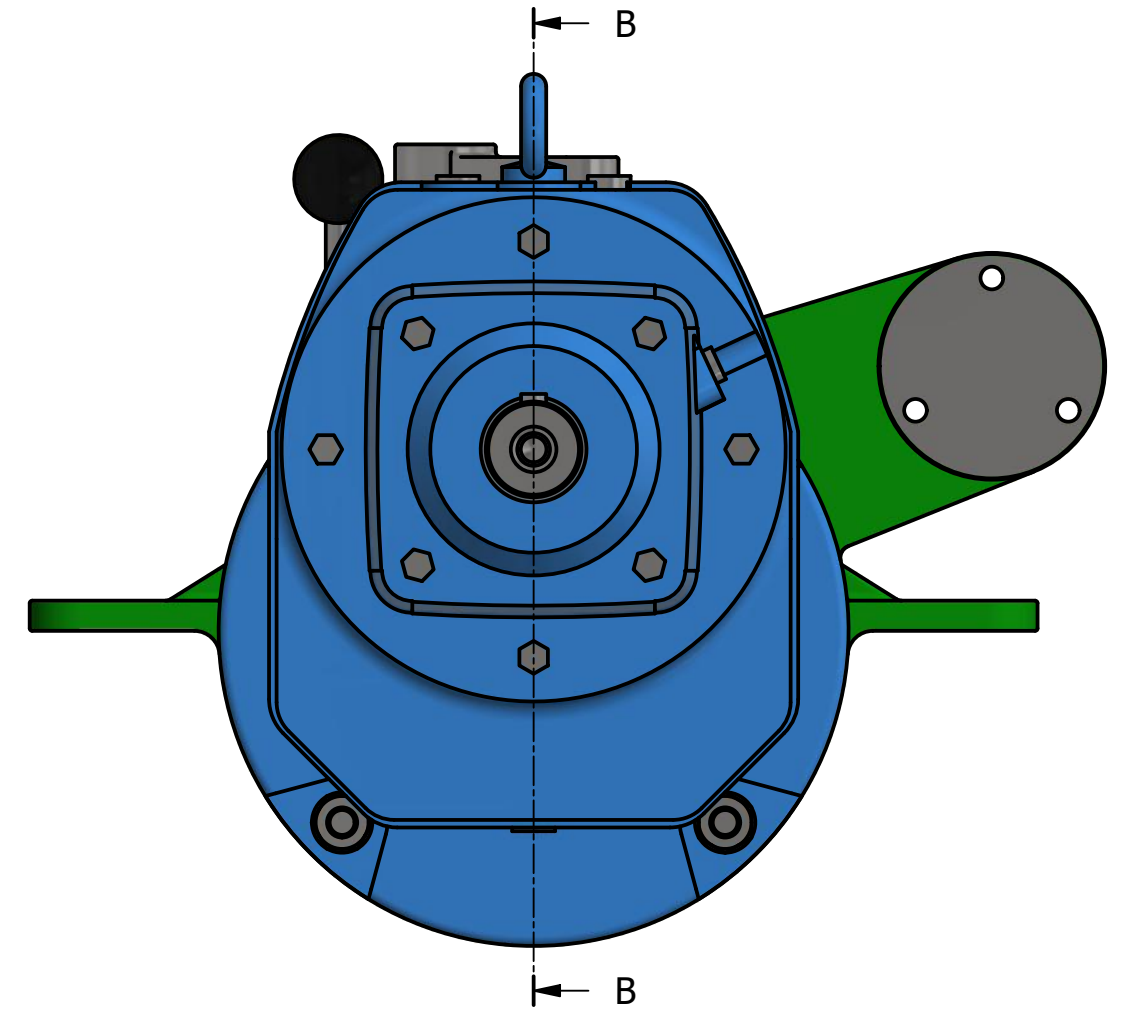
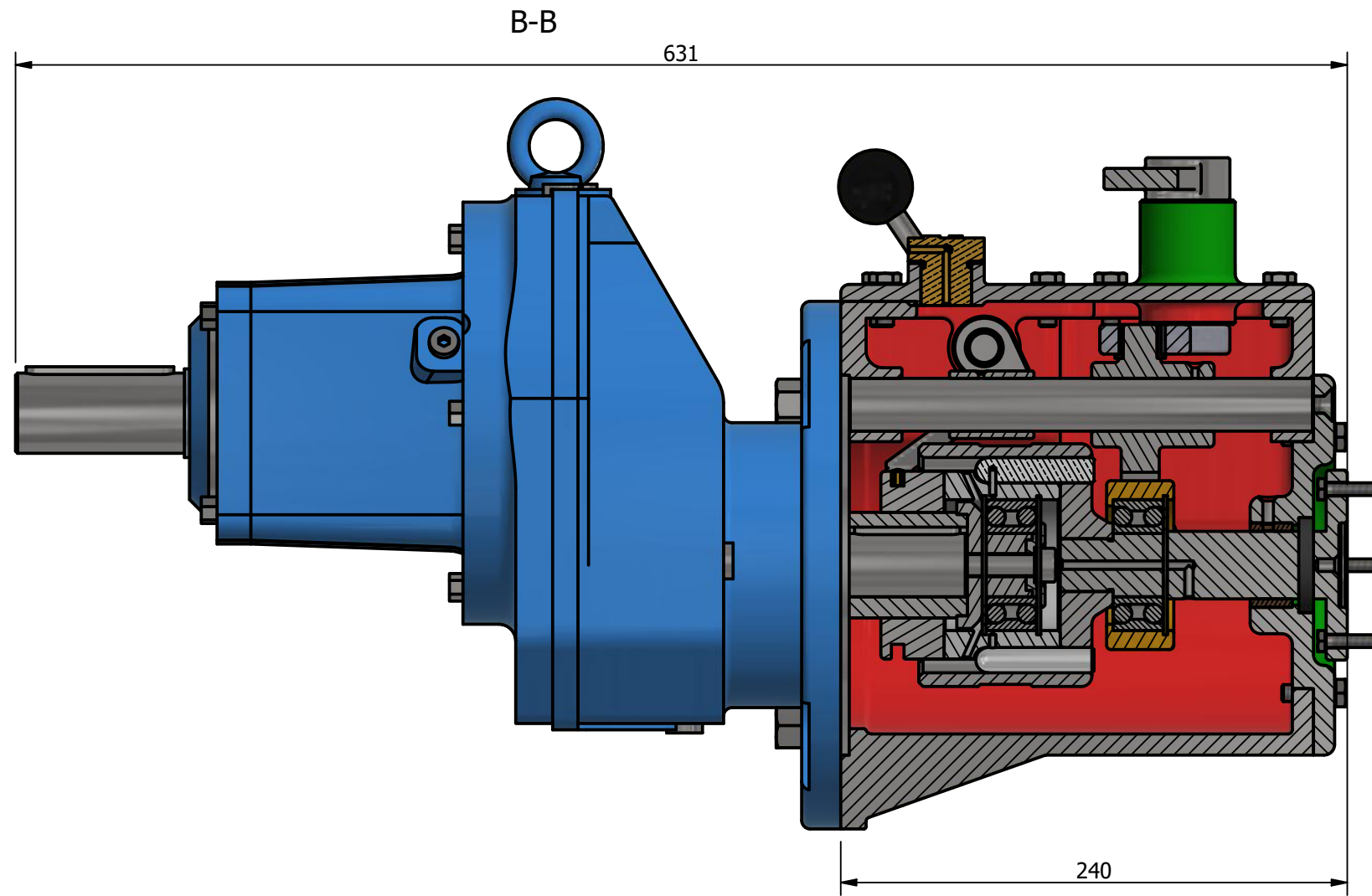
D:\Motor\Prosjekt\Teikningar\Hybrid fremdrift-6\Hybrid fremdrift-6-J.iam


Vedlegg E-2



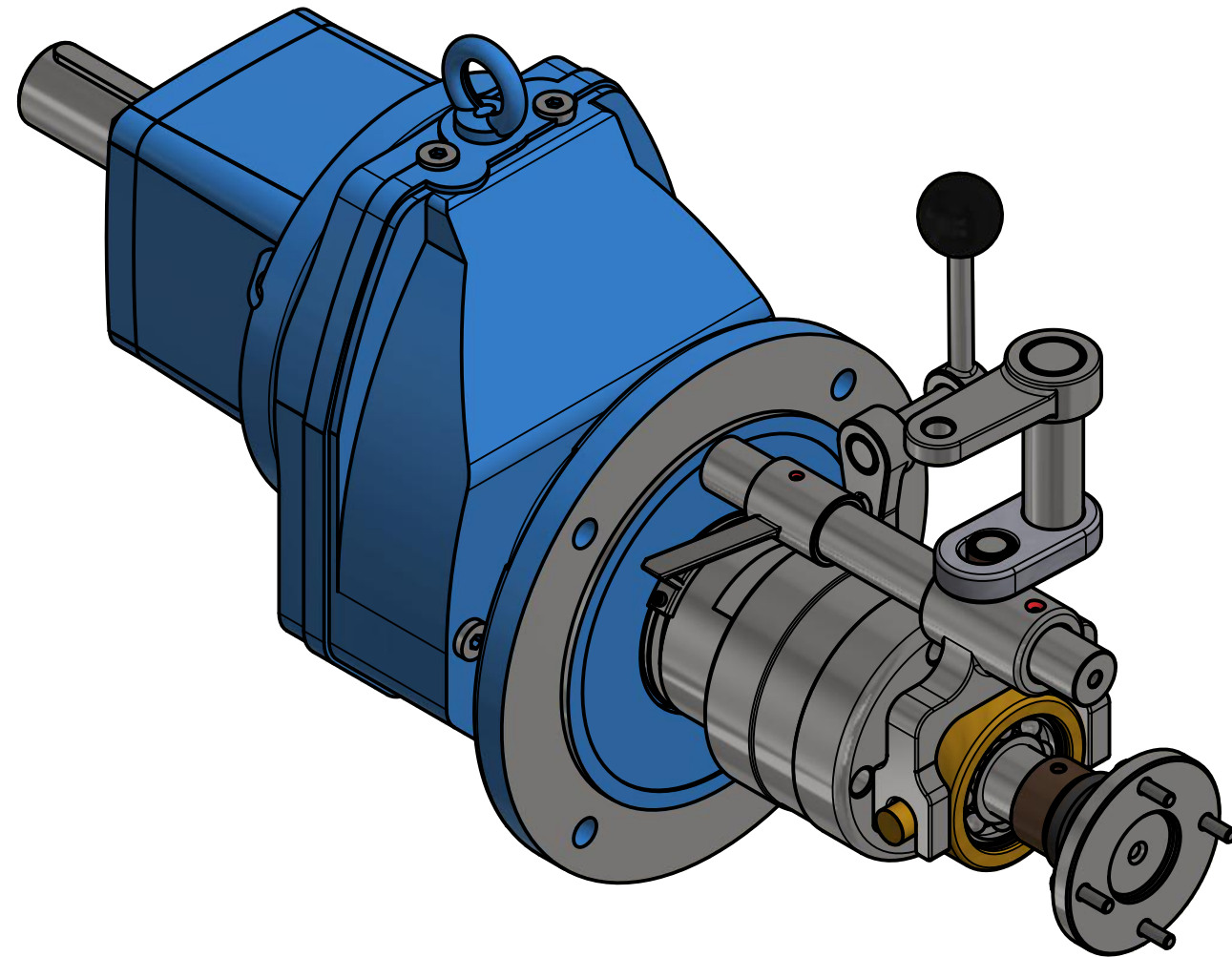
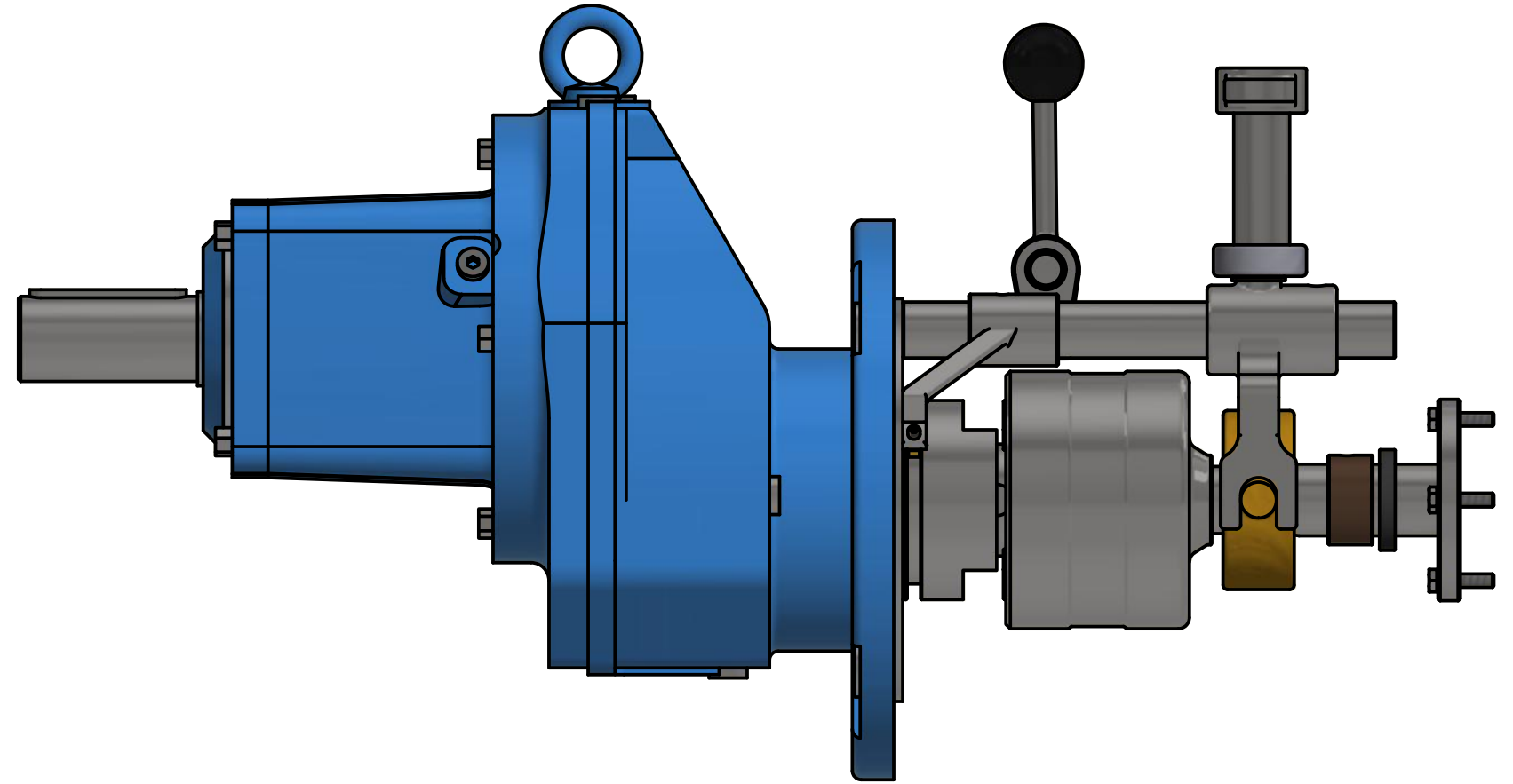
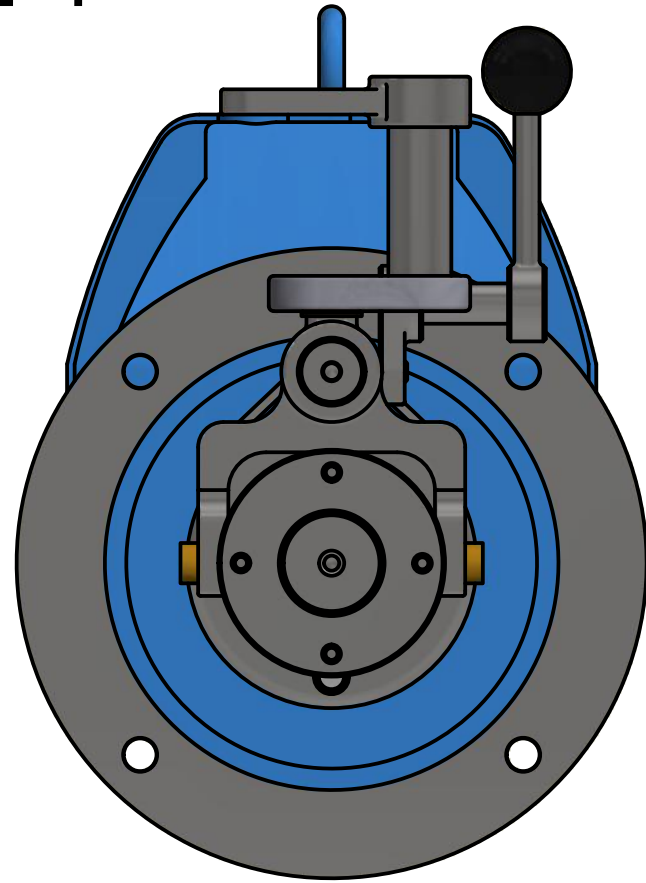
5	1	Omstyring		
4	1	Motor/Generator		
3	1	Kobling B-2		
2	1	Kobling B-1		
1	1	Ekstra gir		
Pos	Ant.	Beskrivelse/Dimensjon	Materiale	Vekt
Toleranser for ikke toleransesatte mål:		Utførelse og krav til sveis:	Overflatebeskaffenhet:	
NS-ISO 2768-1x				
Tegningsformat:	Prosjekt nr.:	Måleenhet:	Geometriske toleranser etter:	
A3		mm		
Dato:	Konstr./Tegnet:	Tracet:	Målestokk:	
08.04.2021	DSMS	NN	1:4	
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:		
Tittel:			Erstatning for:	Erstattet av:
Masteroppgave 2021				
Hybrid fremdrift			Tegningsnummer = filnavn:	
Omstyring med reduksjonsgir, frikoblinger og motor/generator			Omstyring-Hybrid	
Henvising:		Beregning:	Elev:	Dan Shanker


Vedlegg E-3



Toleranser for ikke toleransesatte mål: NS-ISO 2768-1x		Utførelse og krav til sveis:		Overflatebeskaffenhet:	
Tegningsformat: A3	Prosjekt nr.:	Måleenhet: mm		Geometriske toleranser etter:	
Dato: 07.04.2021	Konstr./Tegnet: DSMS	Tracet: NN	Målestokk: 1:3		
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:			
Tittel: Masteroppgave 2021 Hybrid fremdrift Omstyring med reduksjonsgir og frikobling				Erstatning for:	
				Erstattet av:	
				Tegningsnummer = filnavn: Omstyring-snitt	
Henvisning:		Beregning:		Elev: Dan Shanker	

Vedlegg E-4

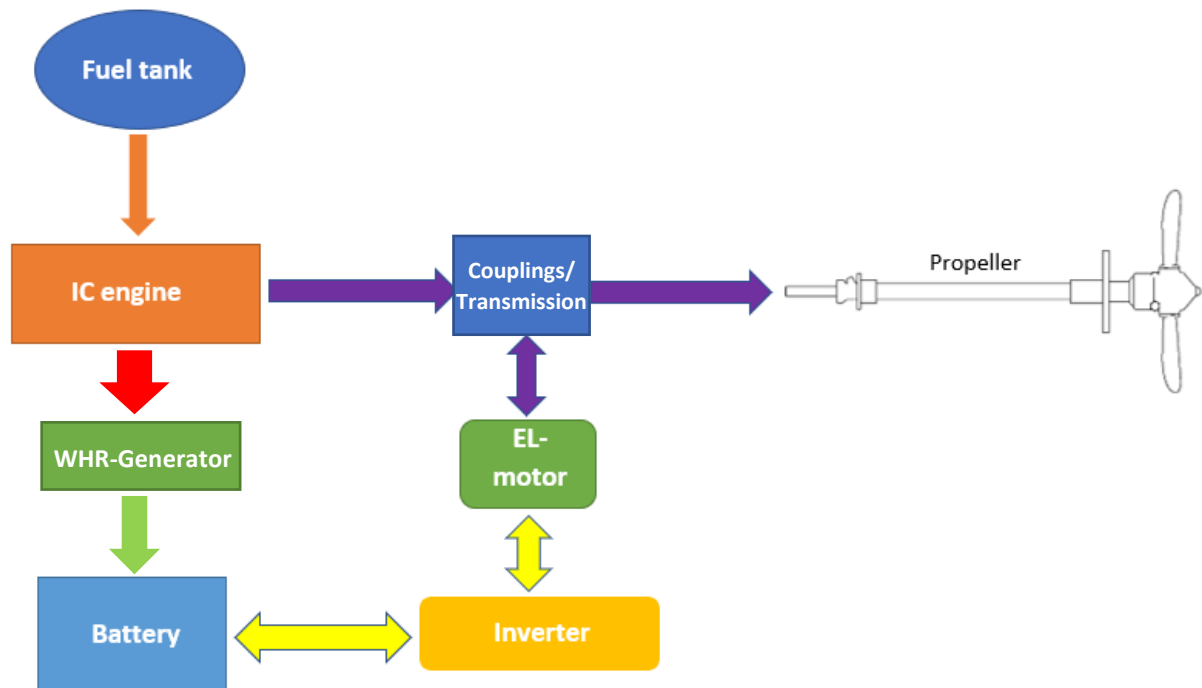


Toleranser for ikke toleransesatte mål: NS-ISO 2768-1x		Utførelse og krav til sveis:		Overflatebeskaffenhet:	
Tegningsformat: A3	Prosjekt nr.:	Måleenhet: mm		Geometriske toleranser etter:	
Dato: 07.04.2021	Konstr./Tegnet: DSMS	Tracet: NN	Målestokk: 1:3	 Høgskulen på Vestlandet HVL Bergen	
Kontr.:	Stand. kontr.:	Godkjent:			
Tittel: Masteroppgave 2021 Hybrid fremdrift Omstyring med reduksjonsgir og frikobling				Erstatning for:	
				Erstattet av:	
				Tegningsnummer = filnavn: Omstyring-detalj	
Henvising:		Beregning:		Elev: Dan Shanker	

Vedlegg F

System description

Design of parallel hybrid propulsion system in Ricardo IGNITE



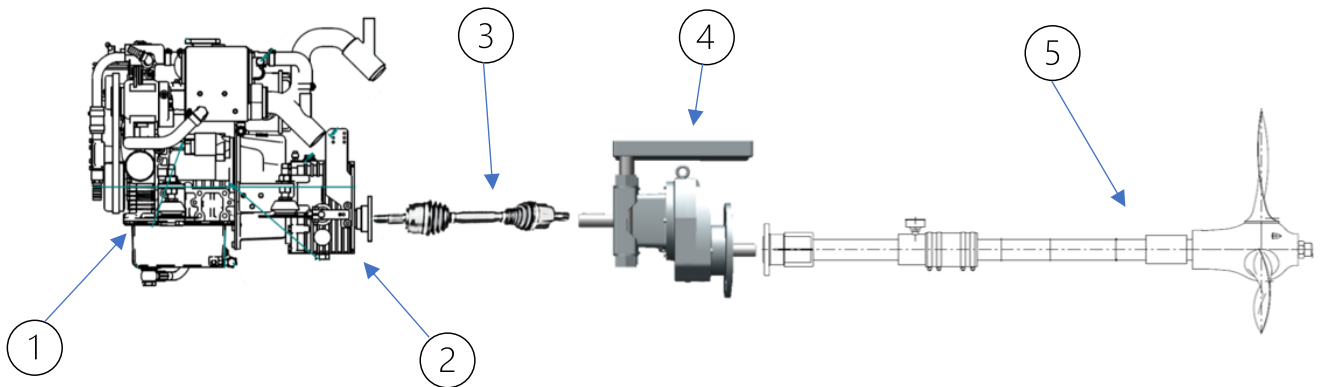
The proposed hybrid system is based on a conventional IC-engine driveline with a standard marine transmission and propeller. The only additional component to the main driveline is an additional gear reduction. Providing both a platform and input for the electric motor/generator and reduces the speed of the propeller. By reducing the rotational speed of the propeller, the propeller itself can be larger, thus offering a greater thrust in low-speed applications.

Being a parallel hybrid system, it can operate in several modes: only IC-engine, hybrid, generator mode and pure electric propulsion.

The hybrid components: electric motor/generator, inverter (motor controller), battery and waste heat recovery generator.

Building the system

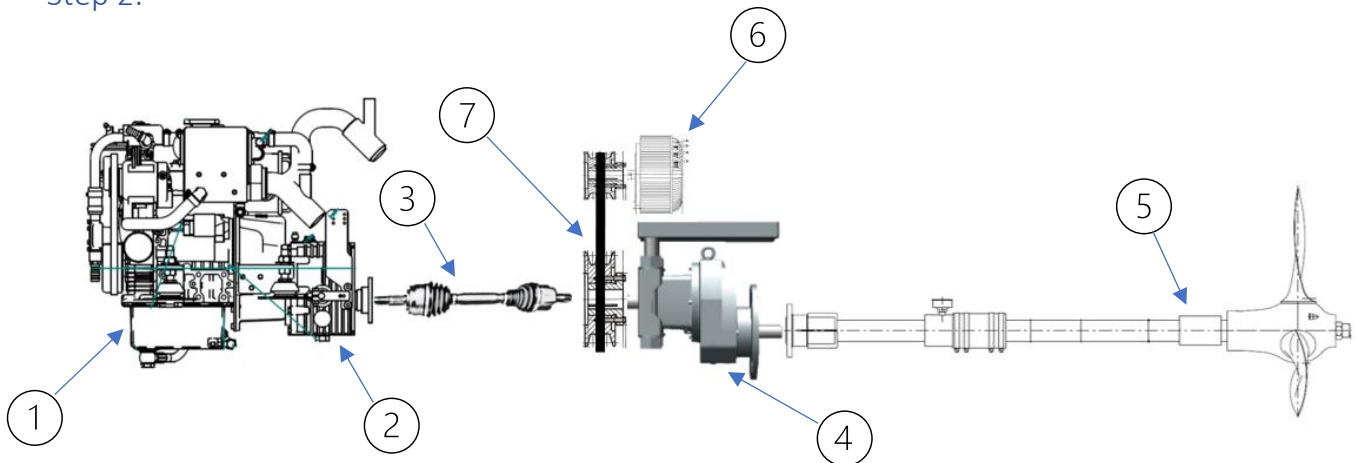
Step 1:



By building the system based on the conventional IC-engine driveline, it may become easier to adapt existing propulsion system with hybrid components. As shown in the picture above the system consists of the following components:

1. Internal Combustion engine
2. Standard marine transmission (F-N-R)
3. Intermediate shaft with CV-joints
4. Additional reduction gear
5. Shaft and propeller (Fixed pitch for the simulation model)

Step 2:

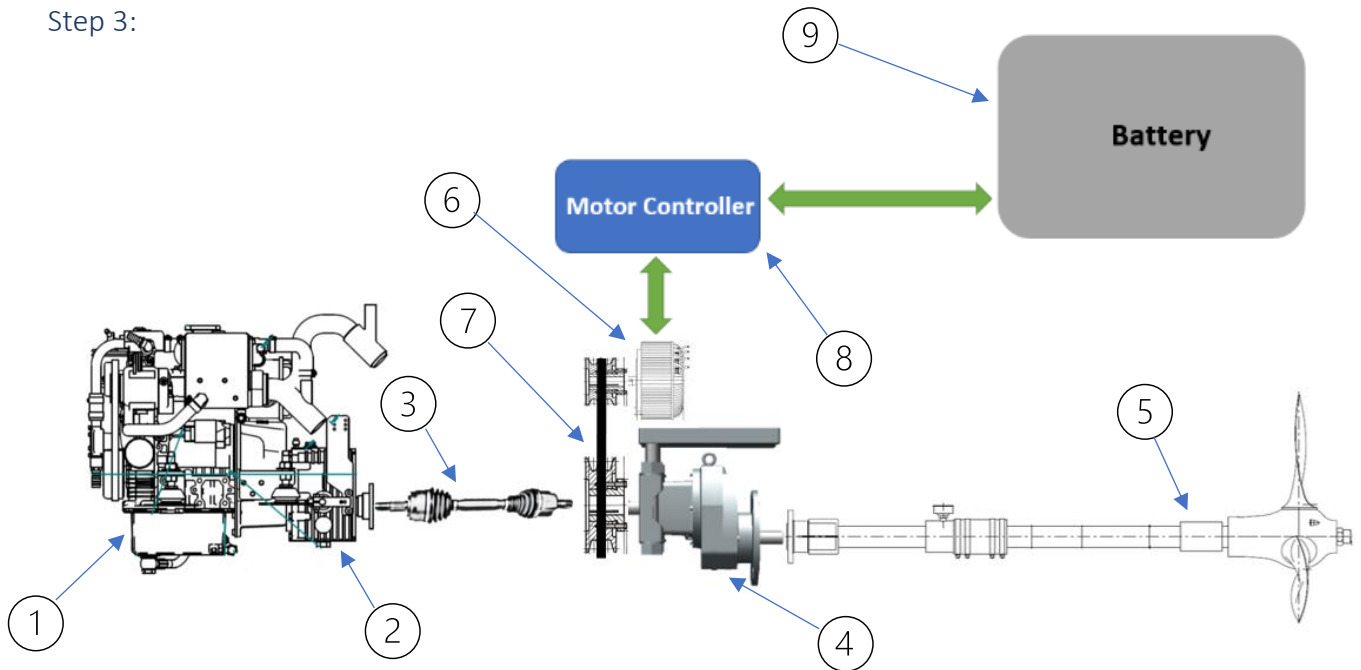


The next step is to add the electric motor/generator, and belt drive between the motor and the intermediate shaft. Power from the electric motor is delivered by a toothed belt with a reduction of 2,5:1 with respect to the intermediate shaft. With this the complete mechanical driveline is completed.

Component list:

1. Internal Combustion engine
2. Standard marine transmission
3. Intermediate shaft with CV-joints
4. Additional reduction gear
5. Shaft and propeller
6. Electric motor/generator
7. Toothed belt with pulleys

Step 3:

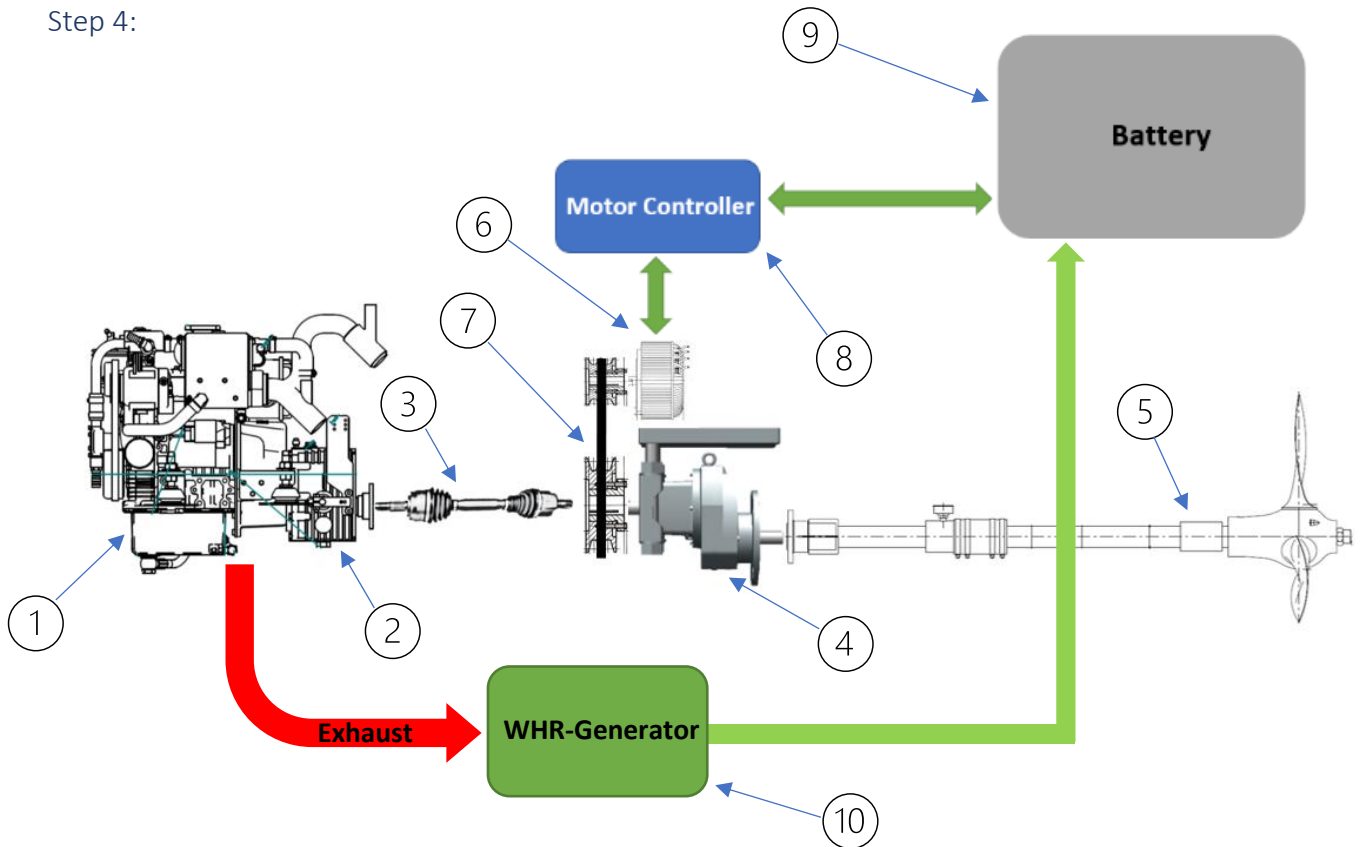


For the electric motor to deliver power, a motor controller and battery is needed. Input for the e-motor controller are 0-5V or 4-20mA input signal that regulates the e-motors torque.

Component list:

1. Internal Combustion engine
2. Standard marine transmission
3. Intermediate shaft with CV-joints
4. Additional reduction gear
5. Shaft and propeller
6. Electric motor/generator
7. Toothed belt with pulleys
8. Motor controller
9. Battery

Step 4:

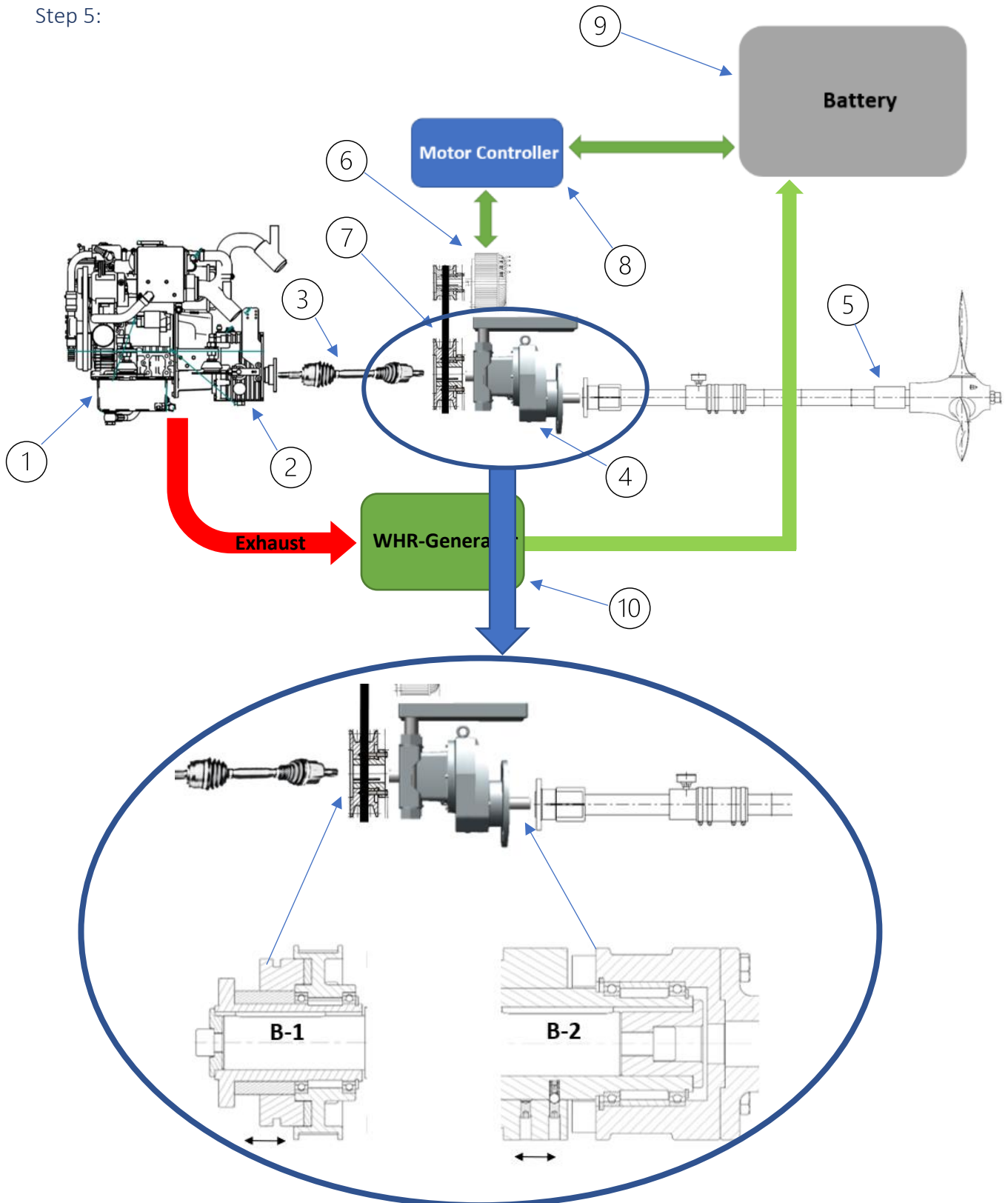


Addition of the waste heat recovery system with an electric generator (WHR-Generator). With this additional system it can be possible to recover some of the exhaust energy in form of electric charge to the main battery pack.

Component list:

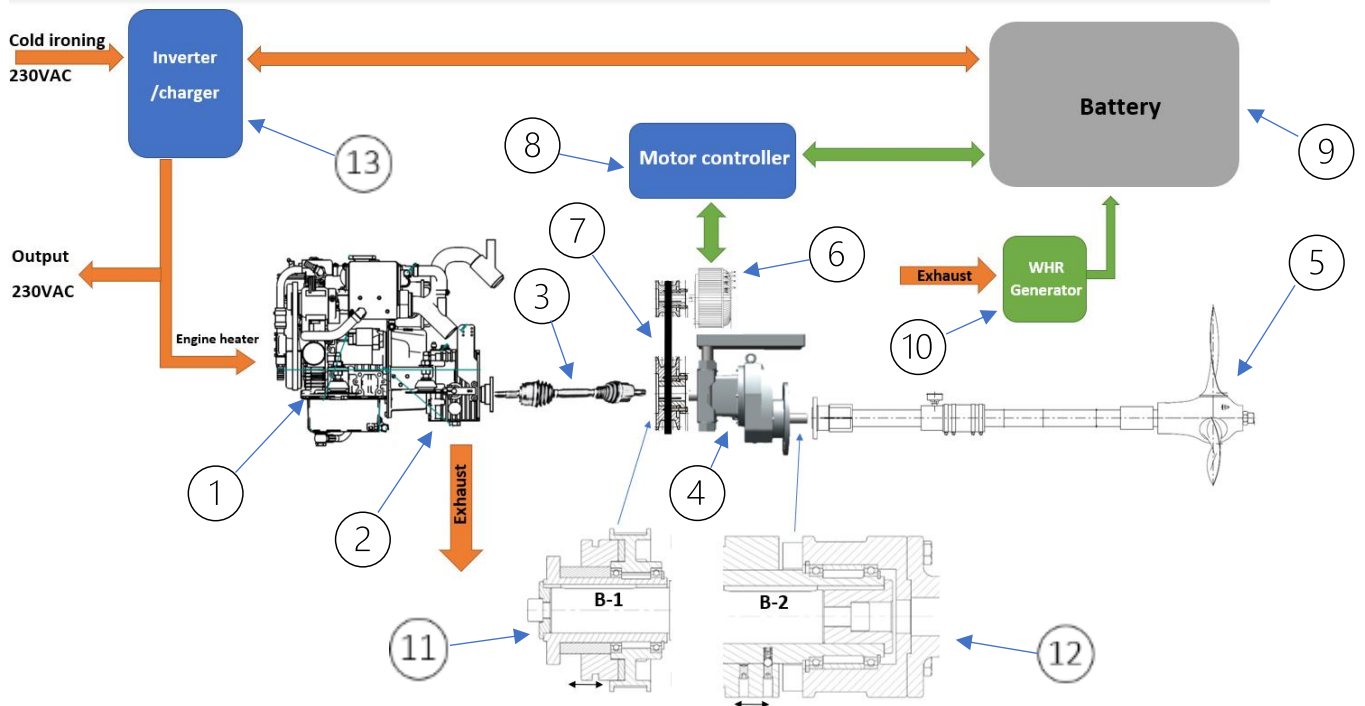
1. Internal Combustion engine
2. Standard marine transmission
3. Intermediate shaft with CV-joints
4. Additional reduction gear
5. Shaft and propeller
6. Electric motor/generator
7. Toothed belt with pulleys
8. Motor controller
9. Battery
10. WHR-Generator

Step 5:



To ensure flexibility in selecting between the different drive modes, two additional couplings will be added. B-1 connects the electric motor/generator to the main driveline. B-2 disconnects the propeller shaft if the system is to be used purely as a generator. In the simulation these two couplings can be represented with “eClutch”-models. B-1 is only disconnected if the system is to run solely by the IC-engine, to minimise losses in the driveline.

Step 6:



With addition of an inverter and charger, the parallel hybrid propulsion system driveline is completed.

Component list:

1. Internal Combustion engine
2. Standard marine transmission
3. Intermediate shaft with CV-joints
4. Additional reduction gear
5. Shaft and propeller
6. Electric motor/generator
7. Toothed belt with pulleys
8. Motor controller
9. Battery
10. WHR-Generator
11. Coupling B-1
12. Coupling B-2
13. Inverter/charger

Specifications table:

Component	Description
1	Kubota Z602 8,8kW @ 3200rpm
2	PRM 90 i=2,04:1
3	Intermediate shaft with CV-joints
4	SEW RXF87AD5/P i=1,93:1
5	Shaft and propeller
6	Golden motor 20kW
7	Toothed belt i=2,5:1
8	Golden sinus motor controller
9	Battery 96V 200Ah
10	WHR-Generator: Stirling or Rankine
11	Coupling B-1
12	Coupling B-2
13	Inverter/charger module

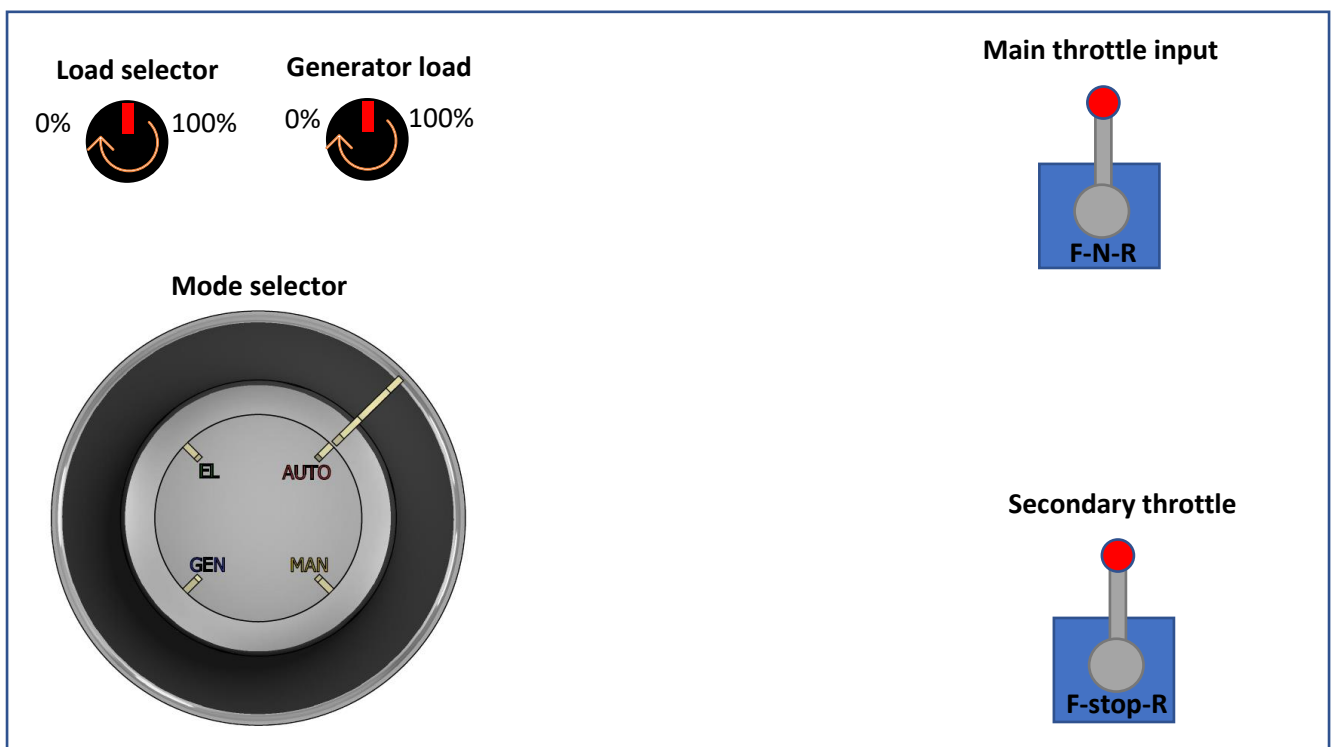
Simulation

In the simulation the system can be built step-by-step starting with the primary IC-engine driveline. From that the additional system can be added to derive the complete driveline. The most complex part/system will be the controller unit. In the following pages, a system description of the different modes is provided.

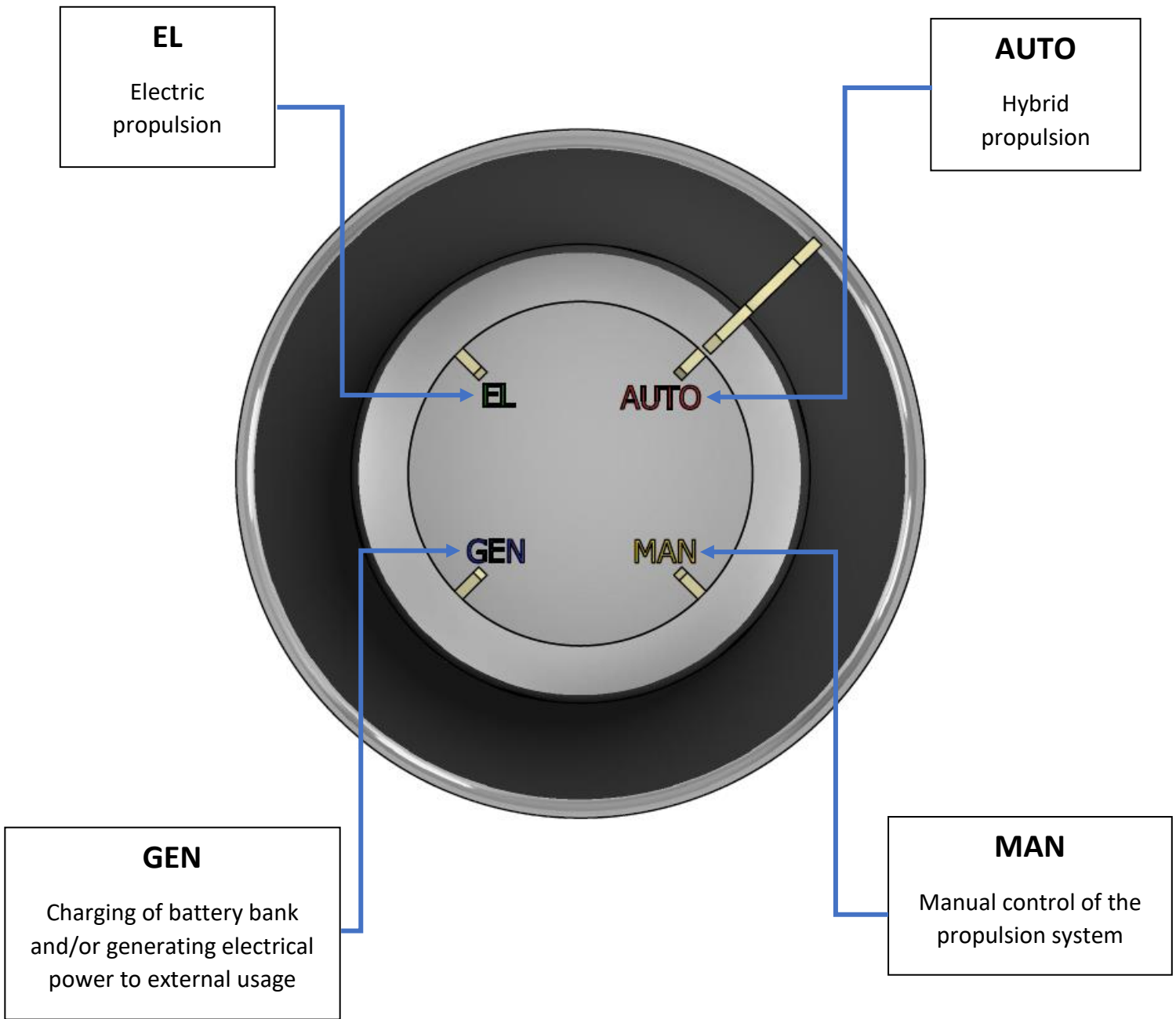
Input:

Five input controls are necessary to run the system.

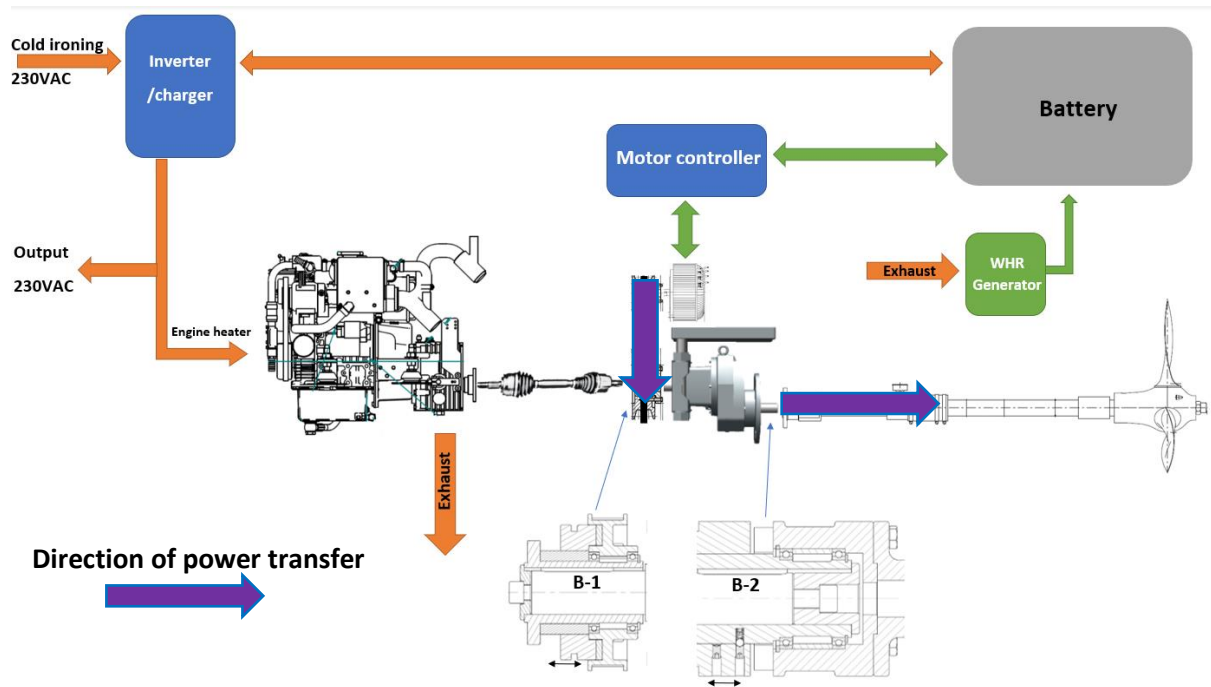
1. Mode selector (see picture on next page). This tells the controller which mode the system should run.
2. Main throttle input for the IC-engine. For selecting the load on the IC-engine. This can be an electronically operated system with an actuator on the engine throttle lever. This will also signal with direction the propulsion is directed (forward-neutral-reverse).
3. Secondary throttle. This is only for the electric motor when the MAN-mode is selected. Typically, a potentiometer.
4. Load selector for the electric motor. This regulates the amount of power from the electric motor when driving in hybrid mode. The electric motor load follows the IC-motor throttle input. At 100% IC-engine throttle the electric motor delivers $20\text{kw} \cdot \text{load selector factor} = x \text{ kW}$ to the propulsion system.
5. Generator load. A potentiometer that selects how much the generator load should be in GEN-mode.



Mode selector:

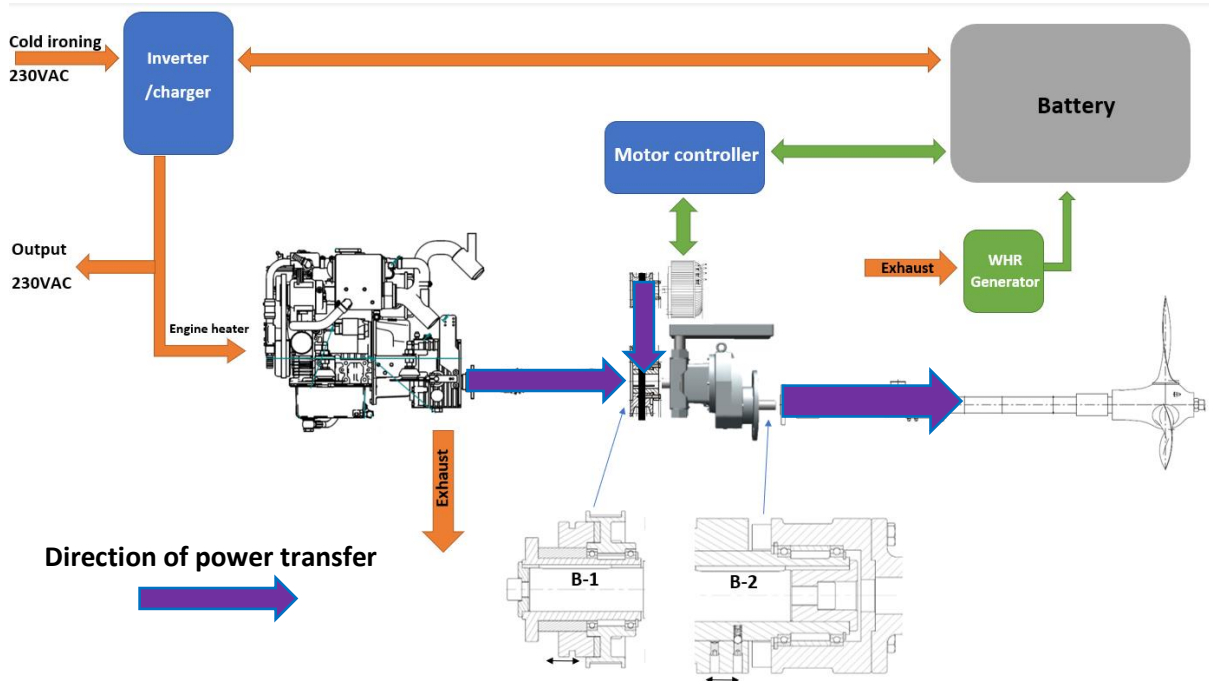


EL:



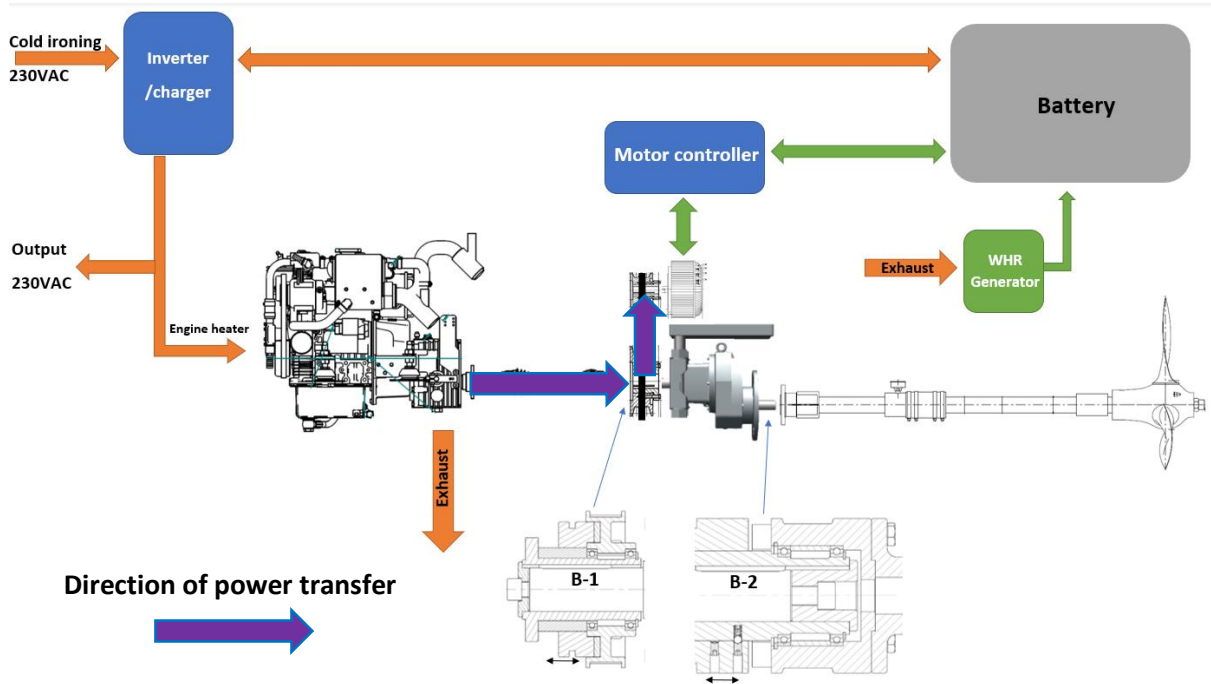
In this mode, the propulsion power comes solely from the electric motor and battery. Both couplings B-1 and B-2 are engaged. The transmission on the engine must be in neutral (most marine transmissions allows freewheeling).

AUTO:



Hybrid propulsion with power from both the IC-engine and the electric motor. Throttle input to IC-engine. Electric motor follows (slave style) with the selected maximum power from the load selector. Direction of the propeller is changed by engaging reverse in the marine transmission and reversing the rotation of the electric motor. B-1 and B-2 are engaged.

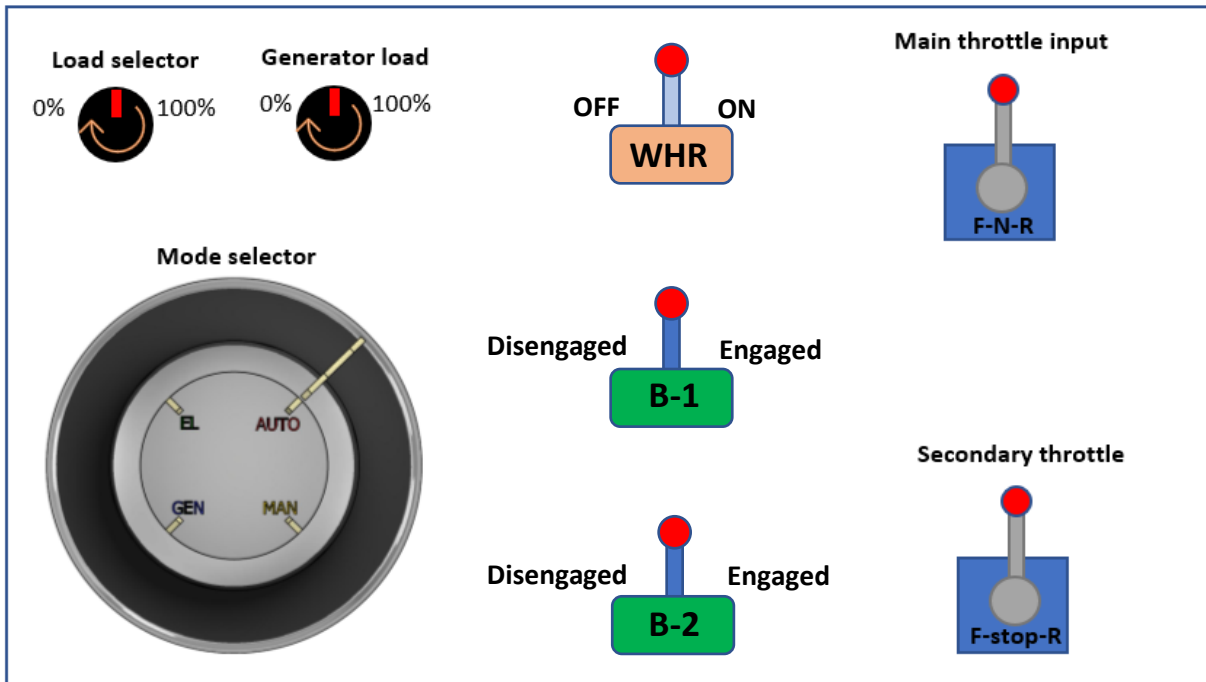
GEN:



The IC-engine drives the electric motor as a generator. This mode is for charging the battery or to deliver power to the electrical output. B-1 is engaged, but B-2 is disengaged. In this mode all the available power from the IC-engine can be used for generation of electrical power.

MAN:

Here one can control each power unit separately, also the couplings. Enabling other drive modes, like charging and propulsion at the same time. For this to be achieved, the control panel also needs two manual switches for the two couplings: B-1 and B-2. One should also consider including a switch for the WHR-system.



Editor's note:

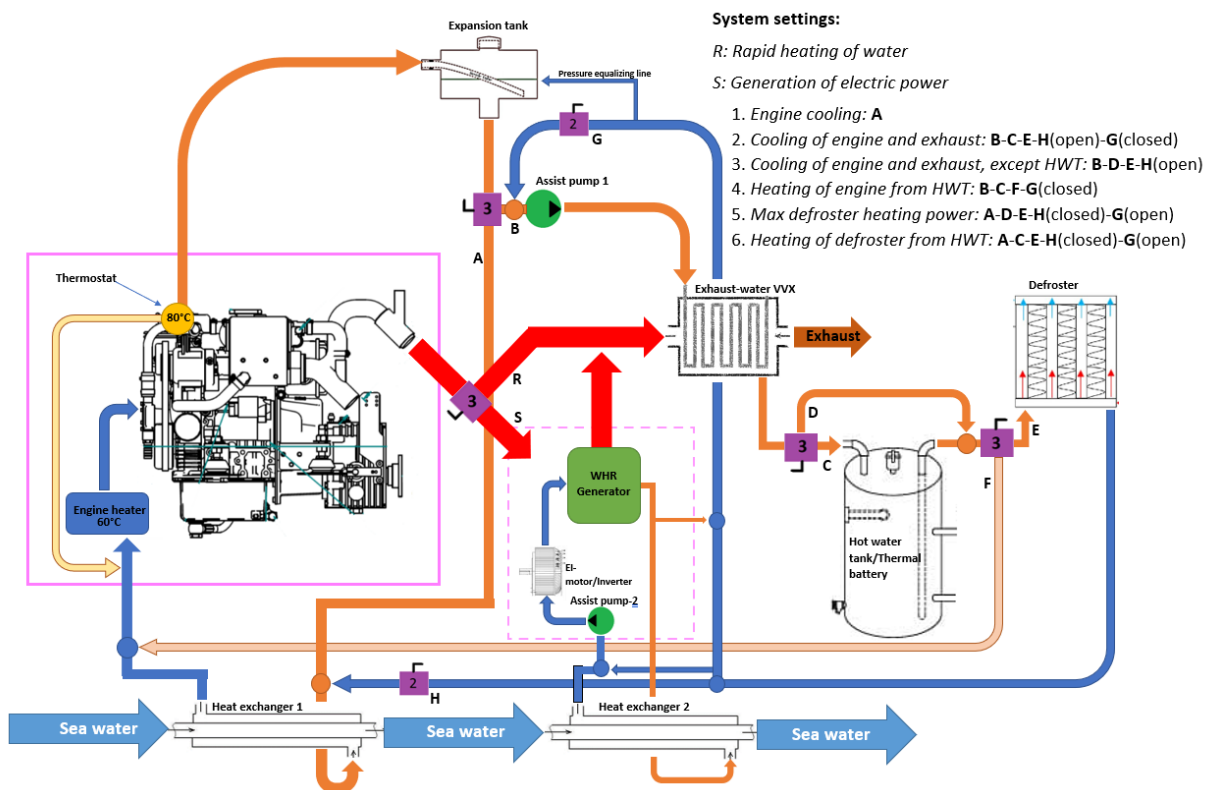
When using a fixed pitch propeller, it may be impossible to select a single propeller that fits the power delivered from the hybrid system, and the IC-engine alone. If this should become a challenge, one option is to include a variable pitch propeller in the model immediately. Thus, using the engines fuel consumption as the guiding parameter for propeller pitch when running in hybrid mode (AUTO). A lower pitch setting based on the combustion engine running alone. Then adjusting the pitch as one increases the load on the electric motor.

The provided description in this document was used as the foundation of the initial design work in Ricardo IGNITE. Simplifications were made in order to create a model with the existing components in IGNITEs internal library.

Thermal energy

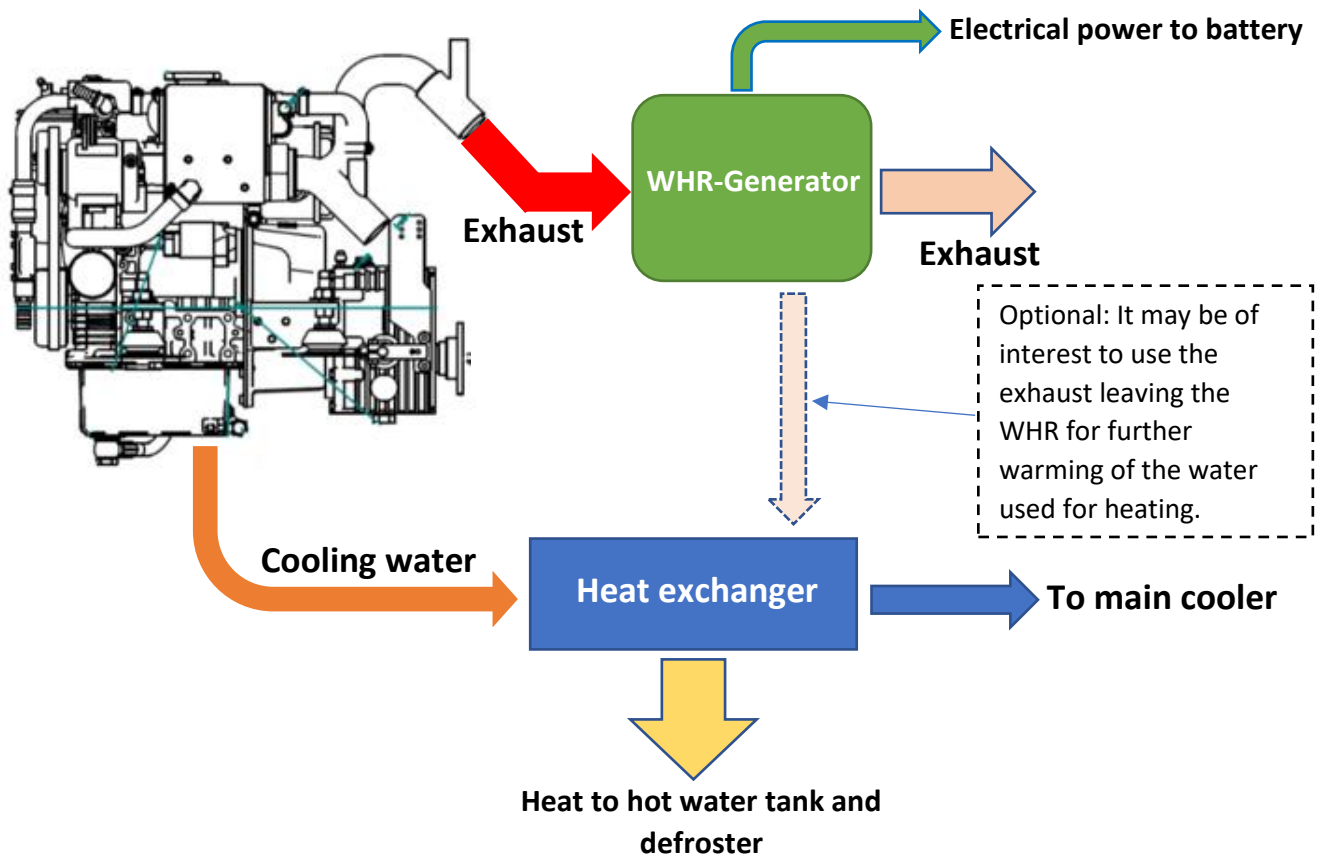
In this project it is of interest to make use of the thermal energy coming from the IC-engine. This energy is usually sent to a thermal drain (the sea). Converting the energy to electrical energy is considered the best option for improving the thermal efficiency of the IC-engine. A secondary usage of the thermal energy is heating. That includes both heating of freshwater, and heating of the air inside the boat cabin.

The proposed cooling- and exhaust system looks like this:

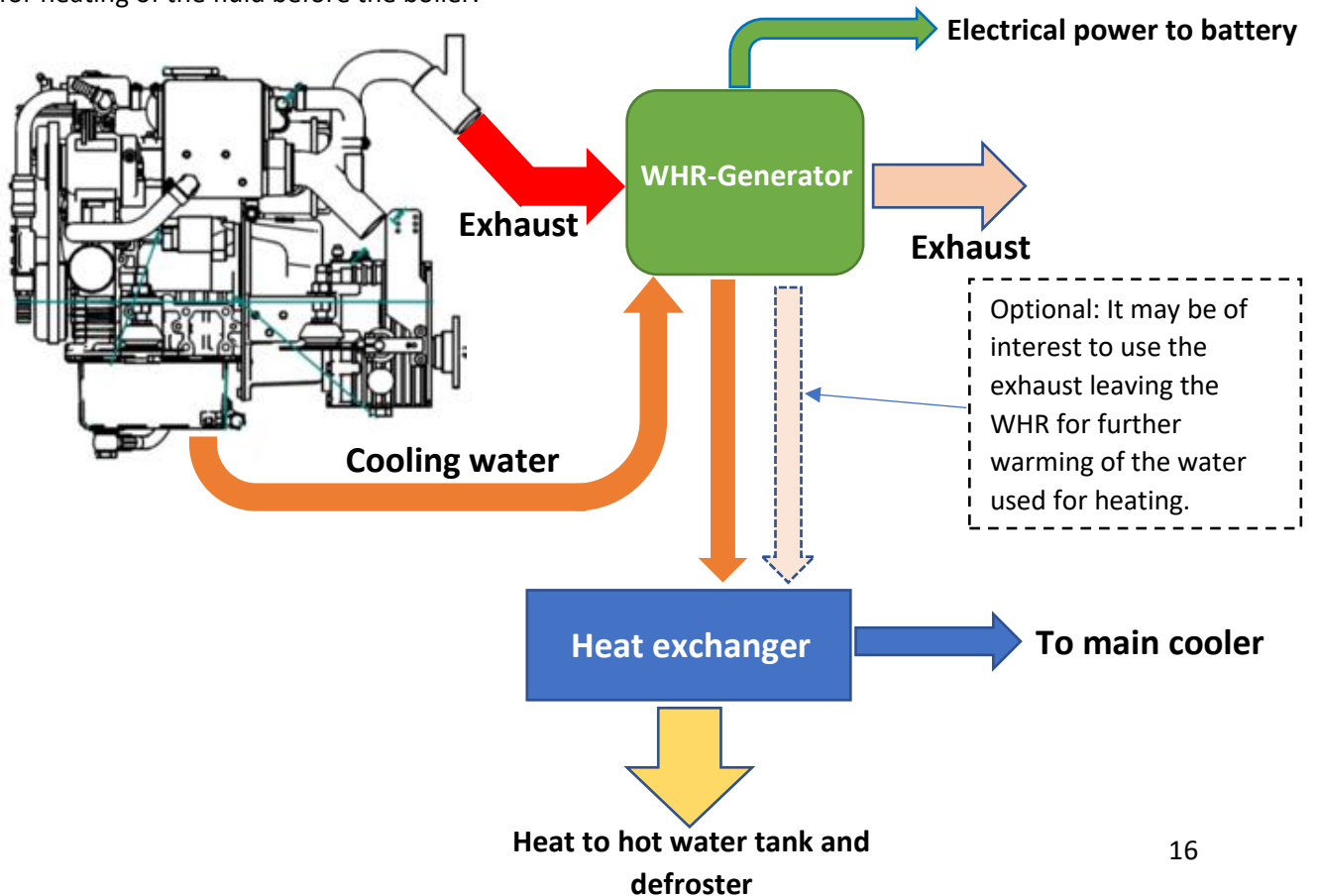


Several simplifications can be done to the simulation model. This because many of the functions presented in the picture above are purely to increase the comfort inside the cabin of the boat and thus not influential for the simulation.

Thermal setup of the simulation

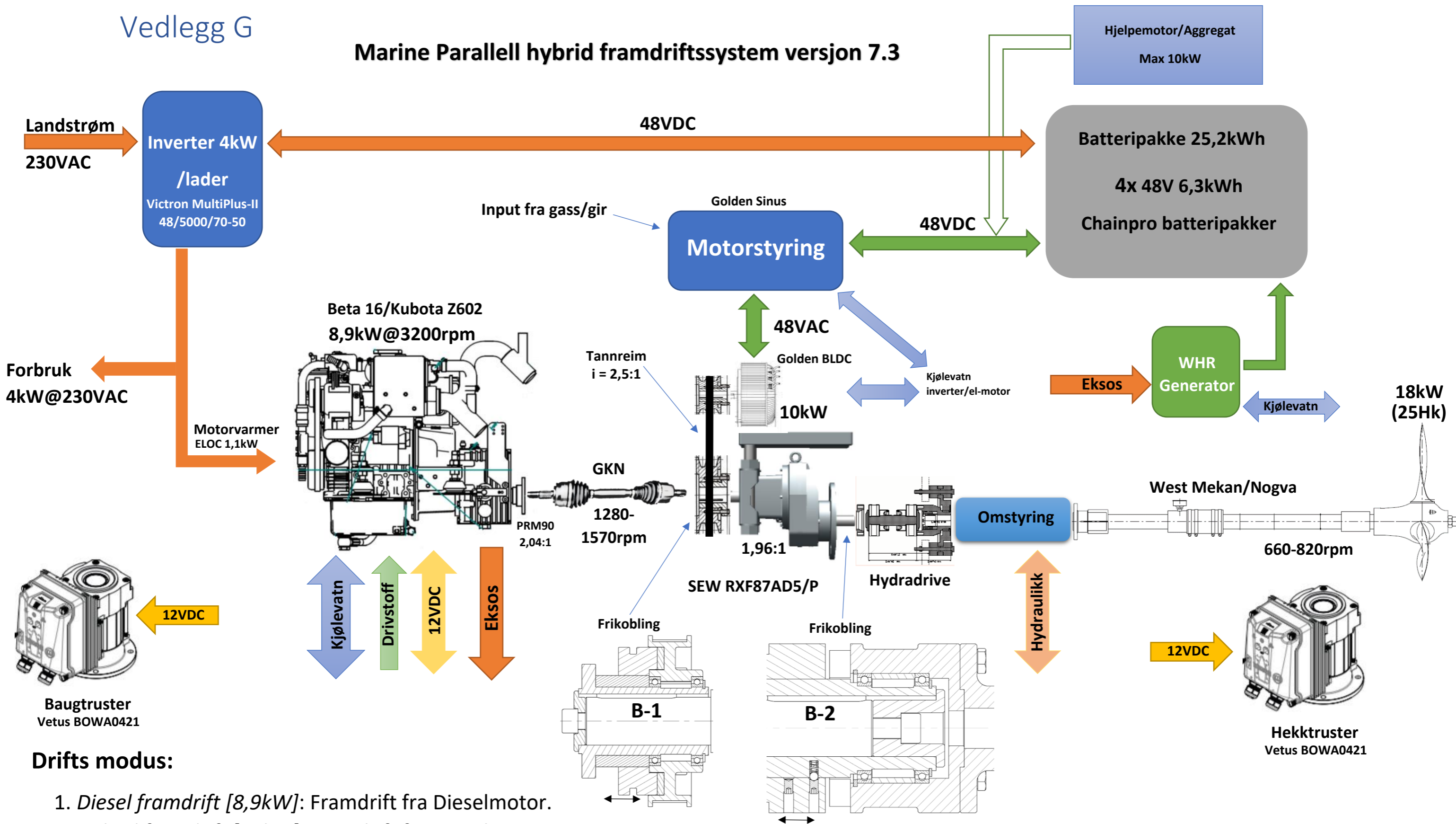


In the case of a Rankine-cycle recovery system, heat from the coolant can also be used in the WHR for heating of the fluid before the boiler:



Vedlegg G

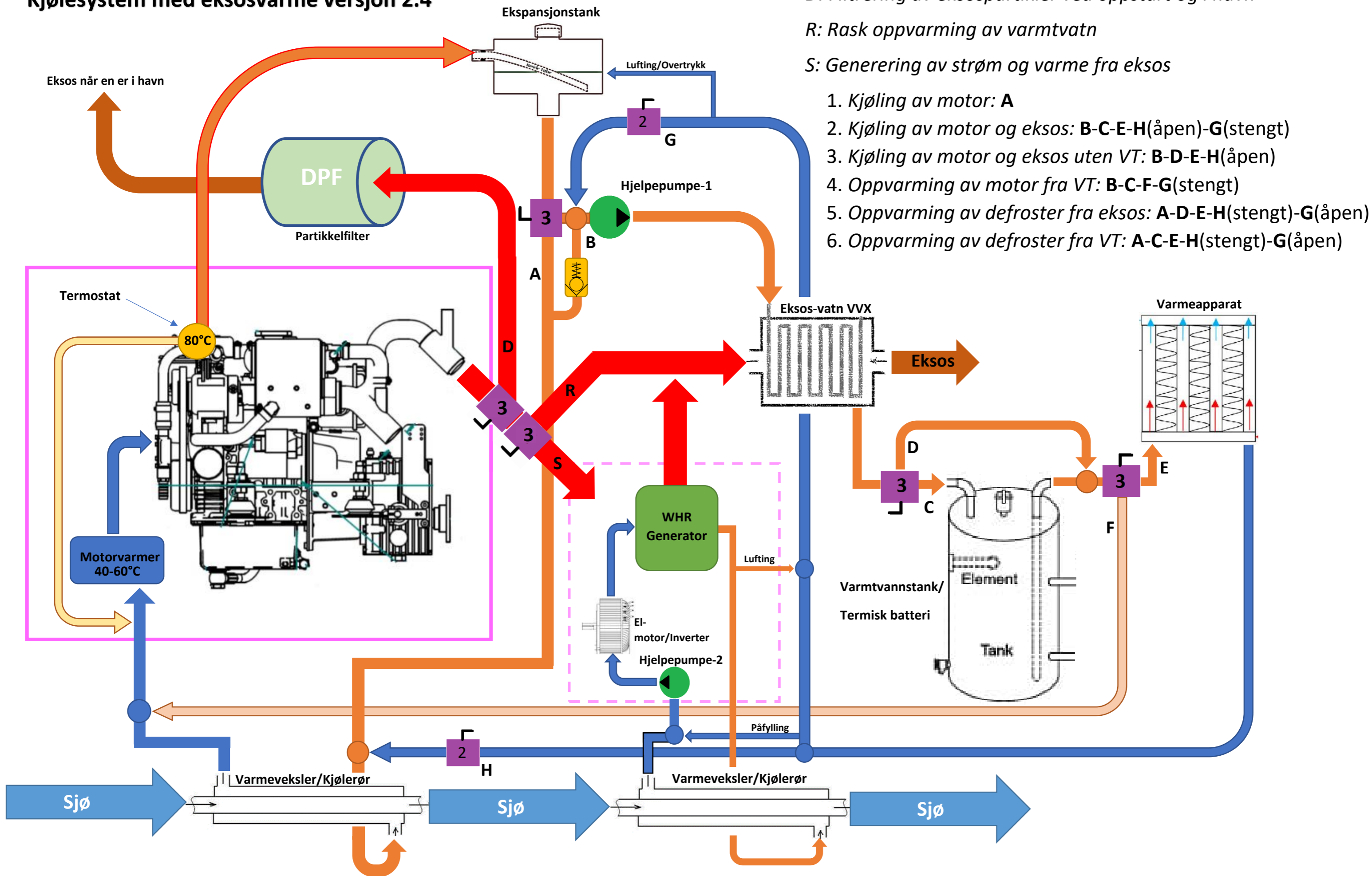
Marine Parallell hybrid framdriftssystem versjon 7.3



Drifts modus:

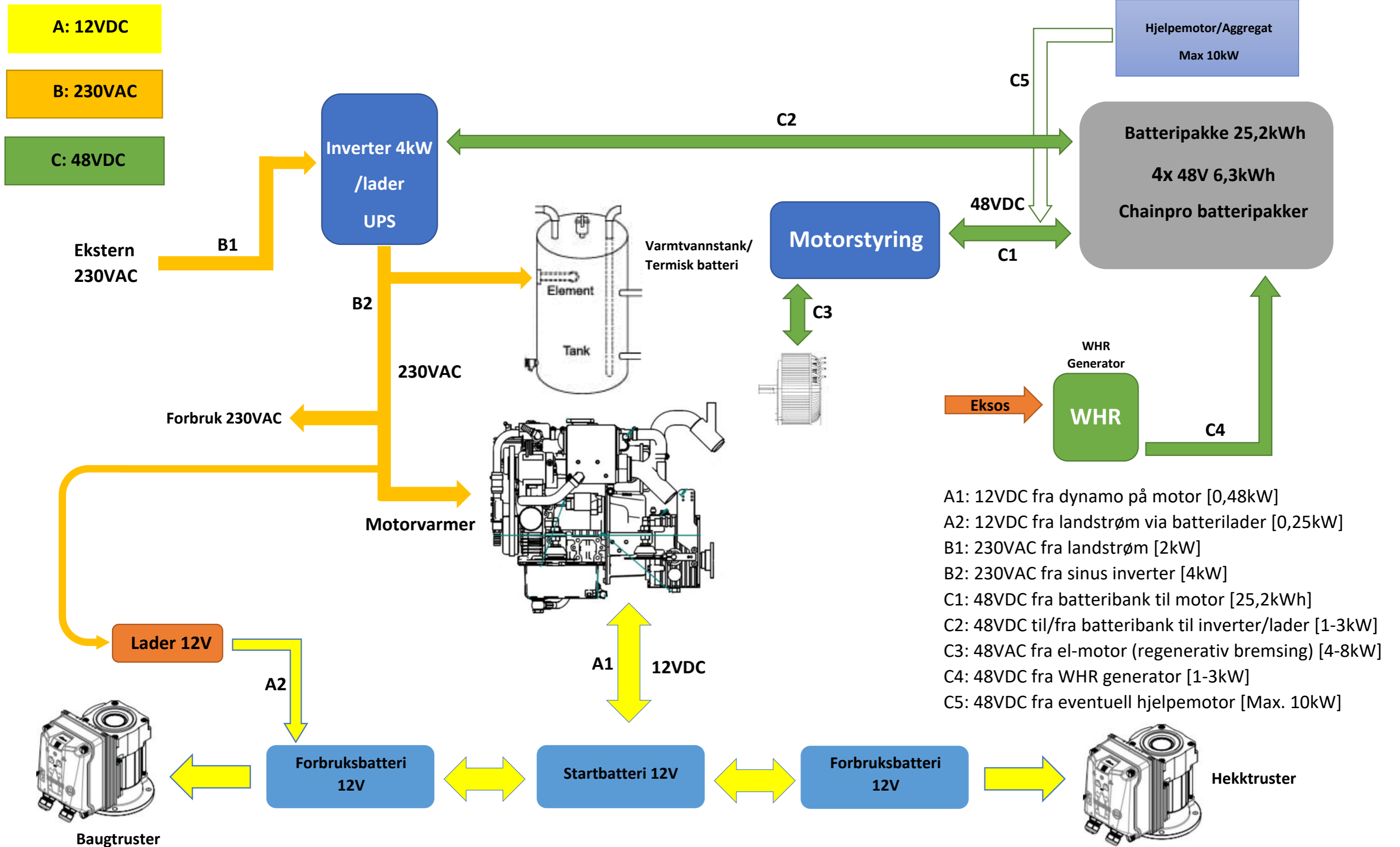
1. *Diesel framdrift [8,9kW]:* Framdrift fra Dieselmotor.
2. *Hybrid framdrift [18kW]:* Framdrift fra Dieselmotor og EL-motor.
3. *Elektrisk framdrift [10kW]:* Framdrift fra EL-motor.
4. *Generator modus [0,48kW, 4-8kW]:* Kan levere 230VAC, 12VDC og 48VDC for lading av batteribank via regenerativ bremsing med EL-motor.

Kjølesystem med eksosvarme versjon 2.4



Vedlegg I

Elektrisk flytskjema versjon 4.2



Vedlegg J

Motorberegninger

$$\text{Mekanisk effekt: } P_E = \tau \cdot \omega = \tau \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n \quad (\text{L-1.1})$$

$$\text{Forbruk: } \dot{V}_{br} = \frac{BSFC \cdot P_e}{\rho_{diesel} \cdot 1000 \frac{g}{kg}} \quad [\text{L/h}] \quad (\text{L-1.2})$$

$$\text{Kjøleenergi: } P_k = P_{in} \cdot 0,33 \quad [\text{kW}] \quad (\text{Tall fra motorleverandør}) \quad (\text{L-1.3})$$

$$\text{Stempelhastighet: } C_m = \frac{2 \cdot S \cdot n}{60 \frac{s}{min}} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{L-1.4})$$

$$\text{Dreiemoment: } \tau_m = \frac{P_e \cdot 1000 \frac{W}{kW}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60 \frac{s}{min}}} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{L-1.5})$$

$$\text{Effektivt middeltrykk: } MEP_{4T} = \frac{P_e \cdot 1200}{V_s \cdot n} \quad [\text{bar}] \quad (\text{L-1.6})$$

$$\text{Termisk virkningsgrad: } \eta_{th} = \frac{1}{BSFC \cdot H_n} \quad (\text{L-1.7})$$

$$\text{Innfyrt effekt: } P_{in} = \frac{P_e}{\eta_{th}} \quad [\text{kW}] \quad (\text{L-1.8})$$

$$\text{Avgass - varmeeffekt: } P_{av} = P_{in} - P_e - P_k - P_{rad} \quad [\text{kW}] \quad (\text{L-1.9})$$

$$\text{Luftforbruk: } \dot{V}_l = V_s \cdot n \cdot 0,5 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}^3/\text{min}] \quad (\text{Formel fra Kubota}) \quad (\text{L-1.10})$$

$$\text{Avgassmengde: } \dot{m}_{av} = \dot{m}_L + \dot{m}_{br} \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{L-1.11})$$

Forkortelser:

P_e : Akseffekt [kW]

BSFC: Spesifikt brennstofforbruk [g/kWh]

τ : Dreiemoment [Nm]

ω : Vinkelhastighet [rad/s]

ρ : Tetthet [kg/m³]

P_k : Kjøleeffekt tatt opp av kjølevann [kW]

P_{in} : Innfyrt effekt fra brennstoff [kW]

S: Slaglengd [m]

η_{th} : Termisk virkningsgrad

H_n : Drivstoffets nedre brennverdi [kWh/g]

P_{av} : Termisk effekt i avgass [kW]

P_{rad} : Strålingsvarme [kW]

\dot{m}_{av} : eksosmengd [kg/s]

\dot{m}_L : luftforbruk [kg/s]

\dot{m}_{br} : brennstofforbruk [kg/s]

n: Turtall [rpm]

V_s : Slagvolum [dm³]

Drivstoff- og luft tetthet hentet fra tabeller [79]

Elektrisk

$$\text{Generell virkningsgrad: } \eta = \frac{\text{Nyttig effekt}}{\text{Tilført effekt}} \quad (\text{L-2.1})$$

$$\text{Elektrisk effekt: } P = U \cdot I \text{ [kW]} \quad (\text{L-2.2})$$

$$\text{Batterikapasitet: } B_e = \frac{U_{bat} \cdot Ah_{bat}}{1000 \frac{W}{kW}} \text{ [kWh]} \quad (\text{L-2.3})$$

Forkortelser:

P: Elektrisk effekt [kW]

U: Elektrisk spenning [V]

I: Elektrisk strøm [A]

B_e: Batterikapasitet [kWh]

Ah_{bat}: Batterikapasitet amperetimer [Ah]

Skrog og propell

$$\text{Fremstøt koefesient: } K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (\text{L-3.1})$$

$$\text{Dreimoment koefesient: } K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (\text{L-3.2})$$

$$\text{Fremdrifts koefesient: } J = \frac{V_A}{n \cdot D} \quad (\text{L-3.3})$$

$$\text{Åpent vann virkningsgrad for propell: } \eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \quad (\text{L-3.4})$$

Forkortelser:

T: Propellens skyvekraft [kg]

Q: Propellens dreiemoment [Nm]

ρ : Vannets tetthet [kg/m³]

n: Propellens turtall [rps]

D: Propelldiameter [m]

V_A: Båtenes hastighet [m/s]

Formler hentet fra kilde [64] i oppgaven

Estimert hastighet

$$\text{Estimert hastighet: } V_2 = \sqrt[3]{\frac{P_2 \cdot V_1^3}{P_1}} \quad (\text{L-4.1})$$

Der:

V₂: Estimert hastighet (ved ytelse P₂) [Knop]

V₁: Kjent hastighet (ved ytelse P₁) [Knop]

P₂: Ny motorytelse [Hk]

P₁: Kjent motorytelse [Hk]

Erfaringsbasert formel kun gyldig for deplasement skrog. Formel hentet fra kilde [67] i oppgaven

Driftsstatus oppbygning, Hybridkalkulator

Driftsstatus, logisk kode:

- Feil 1: "Mangler turtallsdata for forbrenningsmotor. Trykk på START eller vel EL-modus."
- Feil 2: "OVERLAST! For høg strøm fra batteripakke!"
- Feil 3: "OBS! Last på forbrenningsmotor overskrider kontinuerlig effekt."
- Feil 4: "FEIL INPUT! Turtallsområde utenfor gyldighetsområde, se tabell til venstre."
- Feil 5: "FEIL INPUT! Hybriddrift må settes til 0% i GEN-modus."
- Feil 6: "FEIL INPUT! Generatordrift må være 0% i AUTO-modus"
- Feil 7: "Generatordrift må være 0% i EL-modus"
- Feil 8: "FEIL INPUT! Generator og el-motor kan ikke gå samtidig"
- Feil 9: "FEIL INPUT! Velg driftsmodus fra tabell. Vær obs på skrivefeil."
- Feil 10: "FEIL INPUT! Turtall er ikke samsvarende med tabellverdi. See tabell til venstre."
- Feil 11: "Ugyldig input. Sjekk røde celler! Om ikke, sjekk de grønne cellene for feil verdier."

Kode i Excel:

```
=HVISFEIL(HVIS(OG(ELLER(E2="AUTO";E2="MAN";E2="GEN");L9=0);"Mangler turtallsdata for  
forbrenningsmotor. Trykk på START eller vel EL-modus.";HVIS(V11>400;"OVERLAST! For høg strøm  
fra  
batteripakke!";HVIS(ELLER(ELLER(L9=0;L9=800;L9=1000;L9=1200;L9=1400;L9=1600);ELLER(L9=1800;L  
9=2000;L9=2200;L9=2400;L9=2600);ELLER(L9=2800;L9=3000;L9=3200;L9=3400;L9=3600));HVIS(L9>3  
200;"OBS! Last på forbrenningsmotor overskrider kontinuerlig  
effekt.";HVIS(ELLER(L9<0;L9>3600);"FEIL INPUT! Turtallsområde utenfor gyldighetsområde, se tabell  
til venstre.";HVIS(OG(E2="GEN";T4>0);"FEIL INPUT! Hybriddrift må settes til 0% i GEN-  
modus.";HVIS(ELLER(E2="EL";E2="AUTO";E2="MAN";E2="GEN");HVIS(OG(E2="AUTO";T6>0);"FEIL  
INPUT! Generatordrift må være 0% i AUTO-modus";HVIS(OG(E2="EL";T6>0);"Generatordrift må være  
0% i EL-modus";HVIS(OG(T6>0;T4>0)=SANN;"FEIL INPUT! Generator og el-motor kan ikke gå  
samtidig";"OK")));"FEIL INPUT! Velg driftsmodus fra tabell. Vær obs på skrivefeil."))));"FEIL INPUT!  
Turtall er ikke samsvarende med tabellverdi. See tabell til venstre."));"Ugyldig input. Sjekk røde  
celler! Om ikke, sjekk de grønne cellene for feil verdier.")
```

Vedlegg K

Propellberegninger								
Tetthet sjø:	1033	kg/m ³						
Diameter:	0.53	m			Diameter:	21	tommer	
Stigning:	0.30	m			Stigning:	12	tommer	
P/D:	0.57				Bladareal:	0.4		
Ae/Ao:	0.4				Estimert fart:	6	knop	3.09 m/s
Dreimoment:	258	Nm	Etter gir		Antall blad:	3		
Turtall:	813	rpm	13.55	rps				
Virkningsgrad:	0.5							
Kq	0.032							
J	0.427							
		Turtall	Dreiemoment	Dreiemoment	Hastighet	J	Kq	KT
		[RPM]	[Nm]	[Nm]	[Knop]			
		70	15	60	1	0.014	0.00027453	0.062596815
		109	18	70	2	0.018	0.000132093	0.023449877
		148	20	80	3	0.020	8.18844E-05	0.01315849
		187	23	90	4	0.021	5.77024E-05	0.008786986
		226	25	100	4.2	0.018	4.38953E-05	0.007693807
		265	28	110	4.3	0.016	3.51185E-05	0.007049809
		304	30	120	4.5	0.014	2.91118E-05	0.006406107
		343	33	130	4.8	0.013	2.47736E-05	0.00576643
		382	36	140	5	0.013	2.15098E-05	0.005352956
		421	38	150	5.6	0.013	1.89741E-05	0.004646438
		460	41	160	5.8	0.012	1.69527E-05	0.004379587
		499	43	170	6	0.012	1.53067E-05	0.004146638
		538	46	180	6.2	0.011	1.39426E-05	0.00394092
		577	48	190	6.5	0.011	1.27949E-05	0.003699674
		616	51	200	5.9	0.009	1.18169E-05	0.004018799
		655	53	210	6.25	0.009	1.09742E-05	0.003746252
		694	56	220	6.6	0.009	1.02409E-05	0.003507667
		733	58	230	6.95	0.009	9.59742E-06	0.003297145
		772	61	240	7.3	0.009	9.02841E-06	0.00311007
		811	63	250	7.65	0.009	8.52183E-06	0.002942773
		850	66	260	8	0.009	8.06808E-06	0.002792309

Vedlegg L

	Tid [s]	Key_On	Dieselmotor	Motor/generator	Marine gir	B-1	B-2
Elektrisk drift	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0.2	0	1	1
	70	0	0	0.2	0	1	1
	120	0	0	0.4	0	1	1
	200	0	0	0.6	0	1	1
	300	0	0	0.6	0	1	1
	400	0	0	0.6	0	1	1
	500	0	0	0.6	0	1	1
	600	1	0	0.6	0	1	1
Hybrid drift	700	1	0.1	0.2	1	1	1
	800	1	0.5	0.5	1	1	1
	900	1	0.7	0.5	1	1	1
	1000	1	0.7	0.5	1	1	1
	1100	1	0.7	0.5	1	1	1
	1200	1	0.7	0.5	1	1	1
	1300	1	0.7	0.5	1	1	1
	1400	1	0.7	0.5	1	1	1
	1500	1	0.7	0.5	1	1	1
Generator drift	1600	1	0	0	1	1	0
	1650	1	0.7	-0.77	1	1	0
	1700	1	0.7	-0.77	1	1	0
	1800	1	0.7	-0.77	1	1	0
	1900	1	0.7	-0.77	1	1	0
	2000	1	0.7	-0.77	1	1	0
	2100	1	0.7	-0.77	1	1	0
Elektrisk drift	2200	1	0	0	0	1	1
	2250	0	0	0.5	0	1	1
	2300	0	0	0.5	0	1	1
	2400	0	0	0.7	0	1	1
	2500	0	0	0.8	0	1	1
	2600	0	0	1	0	1	1
	2700	0	0	1	0	1	1
	2800	0	0	1	0	1	1
	2900	1	0	0	0	0	0
Diesel drift	3000	1	0.2	0	1	0	1
	3100	1	0.4	0	1	0	1
	3200	1	0.5	0	1	0	1
	3300	1	0.8	0	1	0	1
	3400	1	0.9	0	1	0	1
	3500	1	1	0	1	0	1
	3600	1	1	0	1	0	1
	3700	1	1	0	1	0	1
	3800	1	0.4	0	1	0	1
	3900	1	0.2	0	1	0	1
	4000	1	0.8	-0.2	1	1	1
	4100	1	0.8	-0.2	1	1	1
Diesel med lading	4200	1	0.8	-0.2	1	1	1
	4300	1	0.8	-0.2	1	1	1
	4400	1	0.8	-0.2	1	1	1
	4500	1	0.8	-0.2	1	1	1
	4600	1	0.8	-0.2	1	1	1
	4700	1	1	-0.2	1	1	1
	4800	1	1	-0.2	1	1	1
	4900	1	1	-0.2	1	1	1
	5000	1	0.8	-0.2	1	1	1
	5100	1	0.8	-0.2	1	1	1
	5200	1	0.5	-0.2	1	1	1
	5300	1	0.5	-0.2	1	1	1
	5400	1	0.5	-0.2	1	1	1
	5500	1	0.8	-0.2	1	1	1
	5600	1	0.8	-0.2	1	1	1
	5700	1	0.8	-0.2	1	1	1
	5800	1	0.8	-0.2	1	1	1
5900	1	0.8	-0.2	1	1	1	
6000	1	0.8	-0.2	1	1	1	
6100	1	0.8	-0.2	1	1	1	
6200	1	0	0	1	1	1	
Elektrisk drift	6300	0	0	0.4	0	1	1
	6400	0	0	0.8	0	1	1
	6500	0	0	0.8	0	1	1
	6600	0	0	0.6	0	1	1
	6700	0	0	0.4	0	1	1
	6800	0	0	0.1	0	1	1
	6900	0	0	0.2	0	1	1
	7000	0	0	0.1	0	1	1
	7100	0	0	0.2	0	1	1
	7200	0	0	0	0	0	0

*Motor/gen: Positiv verdi betyr forbruk, negativ verdi er lading

*For marine gir, B-1 og B-2 betyr `1` innkoblet og `0` utkoblet

Vedlegg M

Avgassrensing

Dersom en benytter seg av en forbrenningsmotor, av en eller annen type, vil en ha utslipp av eksos som består hovedsakelig av ikke-skadelige gasser som CO₂, H₂O, N₂ og O₂. En liten del av eksosen vil bestå av skadelige gasser som: NO_x, UHC, CO, sot og andre uønskede komponenter. Disse er produkter av imperfekt/ufullstendig forbrenning [80], fenomenet kan ikke unngås bare minimeres.

Selv om CO₂ ikke er direkte skadelig, er det en drivhusgass (også kvelende) som bidrar til global oppvarming. Reduksjon av denne gassen er belyst ved å se på hybride fremdriftsalternativ.

Når det kommer til de skadelige gassene i eksosen kan disse minimeres i stor grad for en dieselmotor, ved hjelp av to strategier:

- Syklus optimering (i selve motoren): Miller-syklus, mer avansert innsprøytningssteknikk, elektronisk motorstyring, eksos gass resirkulering (EGR)
- Eksos etterbehandling: Selektiv katalytisk reduksjon (SCR), filtrering av sot og faste partikler

Den første strategien: syklus optimering er ikke så lett å få benyttet siden det er opptil motorprodusenten å gjennomføre denne strategien. Den innebærer at en setter søkelys på avgassen allerede i motorens designfase. Enkelte motorer benytter seg av en- eller flere av disse strategiene. En ser det helst på større motorer da de er underlagt strengere utslippskrav grunnet den større mengden eksos som kommer fra motoren.

Etterbehandling av eksos kan iverksettes for alle motorer i større- eller mindre grad. Basert på komposisjonen og det termiske energiinnholdet til avgassen. Det er forskjellige strategier alt etter hvilken komponent av avgassen en primært vil redusere. For en dieselmotor er det følgende uønskede komponenter som vanligvis får oppmerksomhet når det kommer til eksosens innhold [81]:

- Partikler: PM
- Karbonmonoksid: CO
- Uforbrente Hydrokarbon bindinger: UHC
- Nitrogenmonoksid: NO
- Nitrogenoksider: NO_x

En utfordring for dieselmotoren er det som også er omtalt som «The diesel dilemma». Jo bedre virkningsgrad, og dermed lavere spesifikt forbruk, motoren har jo mer NO_x produserer motoren. God virkningsgrad er assosiert med lavt utslipp av PM, CO og UHC i en dieselmotor. For motorer med elektronisk styrt innsprøytning (Common Rail) kan NO_x utslippene reduseres ved å justere innsprøytningsmønsteret (tidspunkt og mengde) slik at en oppnår lavere maks sylindertemperatur. En belager seg da på at et etterbehandlingsanlegg fjerner den økte andelen med uforbrente hydrokarboner og partikler.

For de mindre rent mekaniske dieselmotorene er, som regel, optimert for å gå så røykfritt som mulig. Dette er spesielt viktig siden de i mange tilfeller ikke har noen etterbehandling av eksosen. Mindre gravemaskiner, platevibratører eller generatorer er de ofte brukt i byer og tettbebygde strøk. Derav er det særdeles viktig at de slipper ut så lite sot og faste partikler som mulig da disse primært fører til ubehag for mennesker på kortsikt.

Vedlegg M

Nettopp disse motorene er det som i nyere tid ofte er basemotor for de mindre marinemotorene brukt til fritidsbåter (se tabell 1). Derfor er det av interesse å studere utslippskravene for både fritidsbåter og mindre landbaserte motorer.

Utslippskrav

Fremdriftsmotorer brukt i fritidsbåter i Europa er underlagt utslippskravene i «Recreational Craft Directive» (RCD). Her er det flere gjeldende retningslinjer som fabrikanter av både båt og motor må forholde seg til. Angående motorens avgass utslipp og maksimal komposisjon av skadelige gasser er det satt følgende krav (tabell 1) for motorer under nominell ytelse på 37kW.

Table 1

(g/kWh)								
Type	Carbon monoxide $CO = A + B/P_N^n$			Hydrocarbons $HC = A + B/P_N^n$			Nitrogen oxides NO_x	Particulates PT
	A	B	n	A	B	n		
Two-stroke spark ignition	150,0	600,0	1,0	30,0	100,0	0,75	10,0	Not applicable
Four-stroke spark ignition	150,0	600,0	1,0	6,0	50,0	0,75	15,0	Not applicable
Compression ignition	5,0	0	0	1,5	2,0	0,5	9,8	1,0

Where A, B and n are constants in accordance with the table, P_N is the rated engine power in kW.

Values applying from 18 January 2016:

Tabell 1: Utslippsgrenser for motorer brukt i fritidsbåt med ytelse opptil 37kW [82]

Motoren som er brukt i modellen i kapittel 3 kommer under disse kravene, spesifikt siste linjen som omfatter «compression ignition» (diesel) motorer. I tabell 2 ser en grensene for motorer med en effektiv ytelse på mer enn 37kW.

Exhaust emission limits for compression ignition (CI) engines ⁽⁺⁺⁾

Swept Volume SV (L/cyl)	Rated Engine Power P_N (kW)	Particulates PT (g/kWh)	Hydrocarbons + Nitrogen Oxides HC + NO _x (g/kWh)
SV < 0,9	$P_N < 37$	The values referred to in table 1	
	$37 \leq P_N < 75$ (*)	0,30	4,7
	$75 \leq P_N < 3700$	0,15	5,8
0,9 ≤ SV < 1,2	$P_N < 3700$	0,14	5,8
1,2 ≤ SV < 2,5		0,12	5,8
2,5 ≤ SV < 3,5		0,12	5,8
3,5 ≤ SV < 7,0		0,11	5,8
+ Alternatively, compression-ignition engines with rated engine power at or above 37 kW and below 75 kW and with a swept volume below 0,9 L/cyl shall not exceed a PT emission limit of 0,20 g/kWh and a combined HC + NO_x emission limit of 5,8 g/kWh.			
++ Any compression-ignition engine shall not exceed a Carbon monoxide (CO) emission limit of 5,0 g/kWh.			

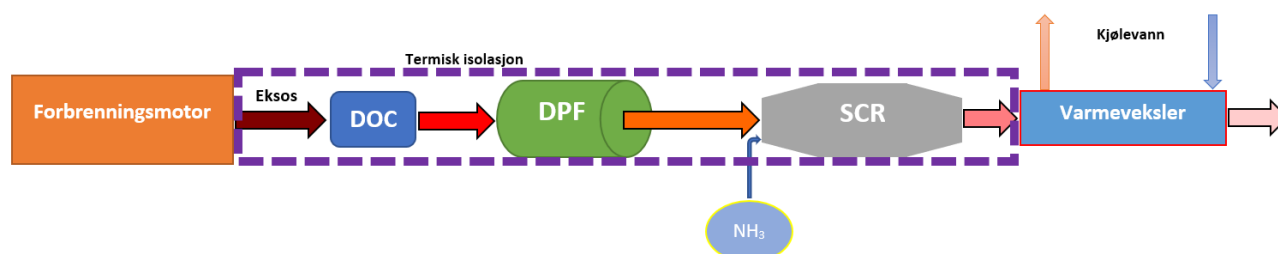
Tabell 2: Utslippsgrenser for motorer brukt i fritidsbåt med ytelse over 37kW [82]

Motorer som er basert på industrimotorer har som oftest en landbasert godkjenning i tillegg til at de er godkjent av RCD 2 for bruk i båt. Eksempler på reguleringer som omfatter motorer, utenom RCD 2:

- EPA: Environmental Protection Agency
- CARB: California Air Resources Board
- EURO: European emission standards

For de små motorene er det heller uvanlig å ha avgassrensing (DPF, SCR, DOC). Ved å benytte seg av slik rensing kan en redusere utslippene av NO_x og PM på bekostning av pris, vekt og kompleksitet av fremdriftsmaskineriet. Et etterbehandlingssystem av avgass vil kunne redusere potensiale for spillvarmegjenvinning fra avgassen. Dette fordi etterbehandlingssystemene er avhengig av viss mengde termisk energi i avgassen for å bidra til å rense den.

Større maskineri er ofte levert med etterbehandlings system av eksos. Et eksempel på hvordan et slikt system kan være oppbygd er skjematisk vist i figur 1. Her er ikke lydpotte eller eksosslange/rør vist, dette vil komme i tillegg til etterbehandlingssystemet.

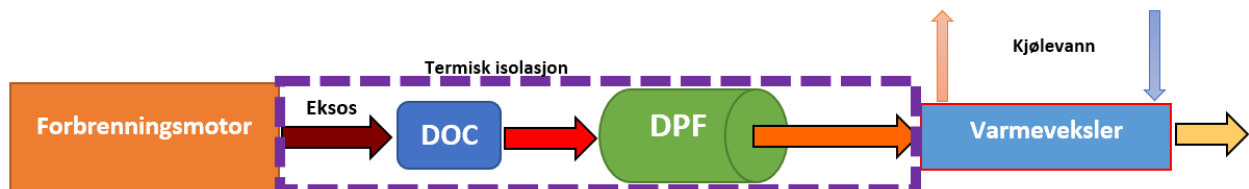


Figur 1: Eksempel på komponenter i et avgassrensesystem for dieselmotor

Innenfor den stiplede linjen finner en følgende komponenter (forenklet forklaring) [83]:

- **DOC:** «Diesel Oxidation Catalytic converter». En oksidasjonskatalysator for dieselmotorer. Her oksideres karbonmonoksid (CO) og uforbrente hydrokarboner (UHC) til karbondioksid og vanndamp. Ved hjelp av keramisk/metall katalysator overflate. Denne komponenten kan også fungere som en ekstern «brenner» for å øke temperaturen på avgassen før den entrer et partikkelfilter. Aktuelt ved regenerering av partikkelfilter. Typisk aktiveringstemperatur for DOC er 170-200°C. Nitrogenoksider og faste sotpartikler blir ikke fjernet i denne komponenten.
- **DPF:** «Diesel Particulate Filter». Keramiske filter, med mange små kanaler, som tvinger hele (eller deler av) avgassen igjennom en tynn keramisk vegg. Sot og faste partikler blir værende igjen på ene siden av vegg. Disse filtrene kan ha en filtrerings effektivitet på opp til 95% for partikler i spektrumet 10 nm – til - 1µm. Sotet må periodisk, eller kontinuerlig, brennes opp for å unngå for høyt trykkfall over filteret. Avhengig av temperaturen på avgassen inn til filteret kan forskjellige metoder benyttes for rensingen. Også kalt regenerering av partikkelfilter.
- **SCR:** «Selective Catalytic Reduction». Denne har som primær funksjon å konvertere nitrogenoksider til nitrogen. Dette gjøres normalt sett ved hjelp av en reduksjonsagent som ammoniakk. I moderne kjøretøy er urea (AdBlue) benyttet da ammoniakk er giftig. Ved hjelp av termolyse i den varme avgassen blir urea konvertert til blant annet ammoniakk. For at dette skal fungere tilfredsstillende må mengden urea, som tilsettes katalysatoren, nøye reguleres. Dette for å sikre maksimal konversjon av nitrogenoksider uten at en slipper ut urea eller ammoniakk i avgassen.

De mindre motorene vil ikke alltid kunne oppnå tilstrekkelig avgasstemperatur gjennom flere ledd i et etterbehandlingssystem. Det kan være mer aktuelt å benytte seg av et system uten SCR for disse da det også eliminerer behovet for et doseringssystem for urea.



Figur 2: Avgassrensesystem uten SCR

Ved hjelp av DOC, DPF og tilstrekkelig temperatur (>200°C) vil en kunne redusere mengden faste partikler, UHC og CO som er i avgassen fra en dieselmotor. Dette kombinert med motorproducentens strategi for å holde utslippene innenfor verdiene i RCD 2 vil bidra til en meget lite sjenerende eksos fra motoren.

For de minste motorene er det fremdeles benyttet forkammer/hvirvelkammer for å redusere utslippene på en kosteffektiv måte, men på bekostning av termisk virkningsgrad [84]. Målet med avgass-systemet er å oppnå en så ren som mulig avgass. Med ren menes at innholdet ideelt sett bare består av CO₂ og H₂O. En kan merke seg at det ikke er noen begrensninger for CO₂-utslipp i RCD-tabellene. Dette har nok mye med at det er så mange variabler når det kommer til energibehovet for hver enkelt båt. Videre kan en se på opphavet til CO₂ andelen i avgassen, og hvor karbonet kommer fra.

Alternative drivstoff

I en ideell situasjon kunne en ha erstattet alle fossile drivstoff med fornybare alternativ. Da kunne dagens motorer gått i flere år fremover, med en betydelig reduksjon av CO₂-utslipp til atmosfæren. Faktorer som forsyning/logistikk, produksjon av drivstoff, råvarer, kapasiteter og pris er med på å begrense utbredelsen av fornybare drivstoffer.

Det er flere gode alternative drivstoff som kan benyttes i en forbrenningsmotor. Noen krever at en modifierer motoren, eller kjøper en motor tilpasset drivstoffet. Et eksempel kan være etanol: et fornybart drivstoff primært for Otto-motorer (fremmedtenning). Dette drivstoffet kan benyttes på en vanlig bensinmotor uten store tilpasninger annet enn blandingsforholdet mellom luft og drivstoff. For å kunne benytte seg at det høye oktantallet i drivstoffet burde det helst benyttes i en motor som er tilpasset for å gå på bare etanol (bla. høyere kompresjonsgrad).

To drivstoff som er aktuelle for en dieseldrevet fritidsbåt og ikke krever modifiering av fremdriftsmotor er biodiesel av typen FAME og HVO100. Det skal nevnes at det ikke er utbredt med fyllestasjoner for biodrivstoff langs kystlinjen, dermed er det lite praktisk å få fylt opp drivstofftanken i en båt med biodrivstoff per dags dato.

Biodiesel er fellesbetegnelsen for dieseldrivstoffer som kommer fra en fornybar kilde (planteolje, slakteavfall eller syntetisk fra syntesegass). Med dieseldrivstoff menes drivstoffer som har lignende tennings- og forbrenningsegenskaper som vanlig (fossil) autodiesel. Felles for alle dieseldrivstoff som benyttes i en dieselmotor er at de må oppfylle kravene (eller ligge nær) som er satt i den europeiske standarden EN590 [85].

Det er særdeles viktig at råvarene kommer fra fornybare og bærekraftige kilder om det skal gi mening å benytte seg av biodrivstoff. Om råvarene går på bekostning av matproduksjon eller skogsareal kan den faktiske klimaeffekten bli verre enn for tilsvarende forbruk av fossil diesel.

FAME [28, 86, 87]

Dette er 1.generasjons biodiesel basert på vegetabiliske- og animalske oljer. Produksjonsprosessen kalles «forestring». Råvarene som blir brukt har mye å si for egenskapene til biodieselen spesielt kjent er kuldeegenskapene. Rapsolje er ansett å være av de bedre råstoffene og derav mest utbredt i Norge ofte kalt RME: Raps Metyl Ester. Pr i dag inneholder autodiesel solgt i Norge opptil 7% biodiesel av denne typen.

Rent mekaniske dieselmotorer kan som oftest bruke denne typen biodiesel uten noen form for tilpasning. Fordelene til FAME/RME drivstoff er:

- Gode smøreegenskaper
- Redusert utslipp av CO₂ (ca. 38% CO₂-ekvivalenter)
- God tilgang på råvarer
- Etablert biodrivstoff
- God blandbarhet med fossil diesel
- Kvalitet regulert i EN 14214
- Forholdsvis lav pris

Ulemper med FAME/RME:

- Dårligere lagringsegenskaper enn for fossil diesel
- Tillater høyere vanninnhold

Vedlegg M

- Relativt dårlige kuldeegenskaper
- Kan føre til høyere forurensning/uttynning av smøreolje
- Tilfredsstillende ikke EN590 ved innblanding over 7%
- Ca. 10% økning i NOx-utslipp

Er en bevisst over ulempene med FAME/RME diesel kan det fungere som et godt biodrivstoff for en dieselmotor. En får kjøpt dette drivstoffet hos stasjoner som Circle K og Shell.

HVO100 [28, 75, 86-89]

Med lignende råvarer som for FAME/RME skiller HVO seg ut i produksjonsprosessen. HVO står for «Hydrogenert Vegetabilsk Olje» og har egenskaper tett opp til fossil diesel da de er tilnærmet kjemisk like. Med unntak av kravet til egenvekt, så oppfyller HVO100 kravene i EN590 og kan derfor i de aller fleste tilfeller benyttes som vanlig diesel.

Et teknisk godt drivstoff med svært gode tennegenskaper (Cetantall over 70, i EN590 er kravet >51). Slakteavfall er ansett som et av de bedre råvarene miljømessig. Ved bruk av de rette råvarene kan reduksjonen av klimagasser nærme seg 90% sammenlignet med vanlig diesel.

Fordeler med HVO100:

- Flere råvarekilder kan benyttes
- Gode lagring- og transport egenskaper
- Gode tennings- og forbrenningsegenskaper
- Kan ha gode kuldeegenskaper
- Eksisterende infrastruktur for autodiesel kan benyttes
- Relativt høyt volumetrisk energiinnhold (4-5% lavere enn fossil diesel)
- God blandbarhet med fossil diesel

Ulemper med HVO100:

- Relativt høy pris
- Tilfredsstillende ikke EN590 grunnet lav egenvekt
- Begrenset tilgang pr i dag

HVO100 er et meget godt alternativt drivstoff for bruk i fritidsbåt. Spesielt med tanke på de gode lagring- og kuldeegenskapene. Det er også fordelaktig at en motor kan benytte dette drivstoffet uten modifikasjoner eller forkortede serviceintervaller.

Grunnet de ulike egenvektene og en mindre forskjell i brennverdi vil forbruket på volumbasis endre seg ved overgang til HVO100. Tabell 3 viser egenvekt, brennverdi og differanse i forbruk med hensyn på energiinnhold for tre dieseldrivstoff. Tabell 4 viser forbruket for motoren i oppgaven ved drift på diesel og HVO100.

Drivstoff	Egenvekt [kg/m^3]	Brennverdi H_n [MJ/kg]	Differanse i forbruk [%]
Diesel	840	43.1	0
HVO100	780	44.1	5.25
FAME	880	37.2	10.6

Tabell 3: Egenvekt og brennverdi for tre dieseloeljer

Korrigeringsfaktoren for forbruk på volumbasis basert på forbruk av fossil diesel kan regnes ut med følgende formel:

$$\text{Differanse [\%]} = \left(\frac{\left(\frac{H_{nd}}{H_{nb}} \cdot \frac{\rho_d}{\rho_b} \right) - 1}{1} \right) \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Forkortelser:

H_{nd} : Nedre brennverdi for fossil diesel [MJ/kg]

H_{nb} : Nedre brennverdi for biodiesel [MJ/kg]

ρ_d : Egenvekt fossil diesel [kg/m^3]

ρ_b : Egenvekt biodiesel [kg/m^3]

Turtall-Forbruk tabell Z602-HVO100				
Driftsområde	RPM	kW	Diesel: L/t	HVO: L/t
Tomgang	800	2.2	0.6	0.7
	1000	2.7	0.8	0.9
Kontinuerlig drift	1200	3.3	1.0	1.0
	1400	3.9	1.2	1.2
	1600	4.3	1.3	1.4
	1800	5.0	1.5	1.6
	2000	5.5	1.7	1.8
	2200	6.1	1.9	2.0
	2400	6.6	2.0	2.1
	2600	7.2	2.2	2.3
	2800	7.7	2.4	2.5
	3000	8.2	2.5	2.6
Net-ytelse	3200	8.8	2.7	2.8
	3400	9.4	2.9	3.0
	3600	9.9	3.1	3.2

Tabell 4: Forskjell i volumetrisk drivstofforbruk mellom diesel og HVO100

Ved å benytte seg av verdiene i tabell 3 og formel 1.1 kan en få en resulterende tabell med differanser i forbruk mellom fossil diesel og HVO100, vist i tabell 4. Videre kan en se på hvordan pris differansen på de to drivstoffene påvirker den årlige drivstoffkostnaden.

Vedlegg M

Prisen er pr i dag høyere for biodrivstoff enn for tilsvarende fossilt drivstoff. Eksempel på priser kan sees i figur 3.

Kvalitet	Produkt	Pris eks. mva.	Pris inkl. mva.	Valuta / måleenhet	Gjeldende fra
	Diesel	12,40	15,50	nok/l	2021-03-31
	Anleggsdiesel	9,60	12,00	nok/l	2021-03-31
	HVO100	18,75	23,44	nok/l	2021-03-10
	Anleggsbio HVO100	15,13	18,91	nok/l	2021-03-10
	Biodiesel B100	16,24	20,30	nok/l	2021-03-31

Figur 3: Drivstoffpriser fra Circle K [74]

Prisdifferansen mellom «anleggsdiesel» og «anleggsbio» er på 58%. En betydelig kostnadsøkning for de større forbrukerne. I fremtiden kan denne differansen bli mindre om det kommer nye støtteordninger for biodrivstoff, og/eller strengere skatter på fossilt drivstoff.

