

CHALMERS



Framdrivningssystem för LNG-tankfartyg

Användning av gasturbin för elektrisk framdrivning

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

Isabelle Moberg

Jimmy Alfredsson

Institutionen för sjöfart och marin teknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige, 2014

Rapportnr. Si-14/126

RAPPORTNR. Si-14/126

Framdrivningssystem för LNG-tankfartyg
Användning av gasturbin för elektrisk framdrivning

ISABELLE MOBERG
JIMMY ALFREDSSON

Institutionen för sjöfart och marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2014

Framdrivningssystem för LNG-tankfartyg

Användning av gasturbin för elektrisk framdrivning

Propulsion system for LNG-carriers

Utilization of gas turbines for electric propulsion

Isabelle Moberg

Jimmy Alfredsson

© I. Moberg, J. Alfredsson, 2014.

Rapportnr. Si-14/126

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag

LNG-tankfartyg med membrantank (Wikipedia 2014)

Tryckt av Chalmers

Göteborg, Sverige 2014

Framdrivningssystem för LNG-tankfartyg

Användning av gasturbin för elektrisk framdrivning

Isabelle Moberg

Jimmy Alfredsson

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

I den här litteraturstudien jämförs för- och nackdelar med gasturbinelektrisk och dual fuel-diselelektrisk framdrivning av LNG-tankfartyg. LNG är naturgas som kylts ned till vätskeform för att underlätta transport. Som framdrivningsbränsle används den avdunstande LNG-lasten som är ett miljövänligare bränslealternativ än tjockolja.

Resultatet visar att valet av framdrivningssystem bland annat beror på verkningsgrad, bränsleförbrukning, disponibelt lastutrymme, systemens tillgänglighet och tillförlitlighet. Hanteringen av lastens avdunstande gas är en central fråga för framdrivningssystemens tillförlitlighet.

Det finns idag inget LNG-tankfartyg med gasturbinelektrisk framdrivning. Studien visar däremot att gasturbinelektrisk framdrivning i kombination med en ångturbin har goda förutsättningar för att konkurrera med de kommersiella framdrivningssystemen; ångturbindrift och lågvarvig dieselmotor med återkondenseringsanläggning. Gasturbinelektriskt framdrivningssystem med ångturbin är mer fördelaktigt än dual fuel-diselelektrisk framdrivning eftersom gasturbiner kan använda den avdunstade gasen som bränsle under alla driftlägen.

Nyckelord: LNG

Gasturbin

DFGE

Gasturbinelektrisk

COGES

DFDE

Dual fuel

Diselelektriskt

BOG

Återkondenseringsanläggning

Abstract

In this literature study, the advantages and disadvantages for gas turbine electric propulsion are compared with those for dual fuel diesel electric propulsion of LNG carriers. LNG is natural gas that has been liquefied to facilitate the transportation. The boiling off gas is used as primary fuel since it is more environmentally friendly than heavy fuel oil.

The result show that the choice of prime mover for LNG carriers depends on i.a. degree of efficiency, fuel consumption, available cargo space and the reliability and availability of the systems. The ability to dispose the boil off gas is a central matter for the availability of the prime mover.

Currently, there are no LNG carriers using gas turbine electric as a prime mover. The study however shows that gas turbine electric propulsion in combination with steam turbines has good qualifications to compete with the commercial propulsion systems; steam turbines and slow speed diesel engines with reliquefaction plant. Gas turbine electric propulsion in combination with a steam turbine is more beneficial than dual fuel diesel electric propulsion, since gas turbines are able to use the boil off gas at all running situations.

Keywords: LNG
Gas turbine
DFGE
Gas turbine elektrik
COGES
DFDE
Dual fuel
Diesel elektrik
BOG
Reliquefaction plant

Förord

Författarna skulle vilja tacka handledaren Cecilia Gabrielii som har varit ett mycket stort stöd under arbetets gång. Hon har varit ett utomordentligt bra bollplank genom ett visat intresse och en god kunskap inom området.

De övriga lärarna på Institutionen för Sjöfart och Marinteknologi samt Institutionen för Signaler och system som har bidragit med kunskap och råd tillägnas också ett hjärtligt tack.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Förord	iii
Innehållsförteckning	iv
Figurförteckning	v
Tabellförteckning	vi
Beteckningar	vi
1. Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte.....	2
1.3 Frågeställning	2
1.4 Avgränsningar	2
2. Teori.....	3
2.1 LNG.....	3
2.2 LNG-tankfartyg.....	3
2.3 Ångturbindrift	5
2.4 Lågvarviga dieselmotorer med återkondenseringsanläggning.....	5
2.4.1 Kaskadanläggning	5
2.4.2 Kvävgasanläggning	6
2.5 Dual fuel-dieselelektrisk framdrivning (DFDE)	6
2.5.1 Dual fuel	7
2.5.2 Dieselelektrisk framdrivning	7
2.6 Gasturbinelektrisk framdrivning	8
2.6.1 Gasturbiner med kombianläggning	8
2.6.2 Mekanisk gasturbindrift.....	11

2.6.3	Gasturbiner.....	12
3.	Metod.....	14
4.	Resultat.....	16
4.1	Systemens verkningsgrad och bränsleförbrukning	16
4.1.1	Gasturbiner.....	17
4.1.2	DFDE.....	18
4.1.3	Jämförelse av verkningsgrad och bränsleförbrukning.....	18
4.2	Systemens tillgänglighet och tillförlitlighet.....	20
4.2.1	Tillgänglighet och tillförlitlighet för gasturbiner	20
4.2.2	DFDE tillgänglighet och tillförlitlighet	21
4.2.3	Jämförelse av systemens tillgänglighet och tillförlitlighet	21
4.3	Disponibelt lastutrymme med DFGE, COGES eller DFDE.....	22
5.	Diskussion	23
5.1	Resultatdiskussion.....	23
5.2	Metoddiskussion	25
6.	Slutsats	26
6.1	Förslag på framtida examensarbeten	26

Figurförteckning

Figur 1.	Schematisk bild över frågeställningen.....	2
Figur 2.	LNG-tankfartyg med membrantank (Wikipedia 2014).....	3
Figur 3.	En oberoende tank och en membrantank för transport av LNG (Wikipedia 2014)	4
Figur 4.	LNG-tankfartyg med oberoende tankar (Wikipedia 2014)	4
Figur 5.	Kylanläggning och kaskadanläggning (egna bilder)	6
Figur 6.	Gasturbinanläggning med far- och sonarrangemang (efter tillstånd av Rolls-Royce 2014).....	8
Figur 7.	COGES (efter tillstånd av Rolls-Royce 2014).....	9

Figur 8. Princip för CODAG (Wikipedia 2014)	10
Figur 9. Princip för CODOG (Wikipedia 2014)	10
Figur 10. Princip för COGAG (Wikipedia 2014)	10
Figur 11. Princip för COGES (Wikipedia 2014)	11
Figur 12. Arbetsprincip för gasturbin samt dess ideala processer. (Wikipedia 2014)	12

Tabellförteckning

Tabell 1. Förkortningar för olika framdrivningskombinationer.....	9
Tabell 2. Prestanda för COGES och DFGE.....	17
Tabell 3. Prestanda för DFDE.....	18
Tabell 4. Bränsleförbrukning för COGES och DFDE.....	19
Tabell 5. Bränsleförbrukning för DFDE.....	19

Beteckningar

Barö	Övertryck, manometertryck
BOG	Boil Off Gas
CODAG	Combined Diesel And Gas
CODOG	Combined Diesel Or Gas
COGAS	Combined Gas And Steam
COGES	Combined Gas turbine Electric and Steam
DERL	Two stroke slow speed Diesel Engine with Re-liquefaction plant
DFDE	Dual Fuel Diesel Electric
DFGE	Dual Fuel Gas turbine Electric
Dual fuel	Flerbränsle-
ECA	Emission Control Area
F-BOG	Forced Boil Off Gas
GCU	Gas Combustion Unit
LNG	Liquified Natural Gas
N-BOG	Natural Boil Off Gas
NO _x	Kväveoxider
SECA	Sulphur Emission Control Area
SO _x	Svaveloxider

1. Inledning

Bakgrund

Inom sjöfartsindustrin har de ekonomiska faktorerna spelat en allt större roll vid val av framdrivningssystem för fartyg. Det beror på att bränslekostnaderna utgör mer än hälften av ett fartygs framdrivningskostnader (Morsy El-Gohary, 2012). Tjockolja har länge dominerat valet av framdrivningsbränsle då det har varit ett billigt alternativ, men det ger dock upphov till luftföroreningar. Bunkerpriserna har dessutom stigit (Bunkerworld 2014) och tillsammans med en ökad miljömedvetenhet har detta lett till att valet av framdrivningsbränsle diskuteras (Yeo et al. 2012). Regelverk utfärdade av International Maritime Organization (IMO) och en del regionala utsläppsregler ställer också allt högre krav på att sjöfarten skall minska sina utsläpp (Morsy El-Gohary 2012).

Det blir följaktligen allt vanligare att fartygen drivs med ett renare bränsle (Morsy El-Gohary 2012) eller att avgaserna till exempel renas från svavel- och kväveoxider. LNG, Liquefied Natural Gas, såväl som Marine Diesel Oil (MDO), är renare bränslealternativ än tjockolja (Woodyard 2009). Mer specifikt för LNG-tankfartyg diskuteras olika alternativ för framdrivningssystem ur ett miljömässigt, ekonomiskt och tekniskt perspektiv (Gilmore et al. 2005).

LNG-tankfartyg har i dagsläget tre kommersiella lösningar (Chang et al. 2008) för framdrivning:

- Ångturbindrift
- Lågvarviga dieselmotorer
- Dual fuel-dieselmotorer

Ångturbiner har tidigare varit dominerande för framdrivning av LNG-tankfartyg. Det beror främst på att den förångade lasten med enkelhet kan användas som fartygets bränsle. Ungefär 0,15 % av lasten i ett LNG-tankfartyg förångas per dygn när gasen transporteras i flytande form vid sin kokpunkt på -162°C . (McGuire och White 2000). Ångturbindrift har en verkningsgrad på 30-35 %, vilket är relativt lågt jämfört med de andra framdrivningsalternativen som varierar mellan 40-50 % (Sinha och Wan Nik 2012).

Fartyg med lågvarviga dieselmotorer använder inte den last som naturligt förångas som bränsle, istället används vanligtvis tjockolja eller dieselolja. Den gas som naturligt förångas får inte släppas ut i atmosfären enligt gällande miljökrav. Fartygen med lågvarviga dieselmotorer är därför utrustade med en återkondenseringsanläggning eller en brännkammare. En återkondenseringsanläggning kyler gasen till flytande form och för den tillbaka till lasttankarna. Till skillnad från återkondenseringsanläggningen förbränner brännkammaren gasen utan att energin tas till vara (Morsy El-Gohary 2012).

Dual fuel-dieselmotorer är motorer som kan köras på flera bränslen. De utnyttjar den förångade gasen som bränsle och använder diesel för antändning. De kan även drivas enbart med diesel eller tjockolja (Overgaard 2013).

Ett ytterligare framdrivningsalternativ för LNG-tankfartyg som diskuteras är gasturbinelektrisk drift, men det finns idag inget LNG-tankfartyg med den lösningen (Morsy El-Gohary 2012). Möjligheten att införa gasturbinelektrisk framdrivning av LNG-tankfartyg

utvärderas genom olika projekt mellan gasturbintillverkare och skeppsbyggare (Haun 2013). Eftersom de båda använder den förångade gasen som bränsle blir det därför intressant att följa upp och se hur gasturbinelektrisk framdrivning kan konkurrera med dual fuel-dieselelektrisk framdrivning.

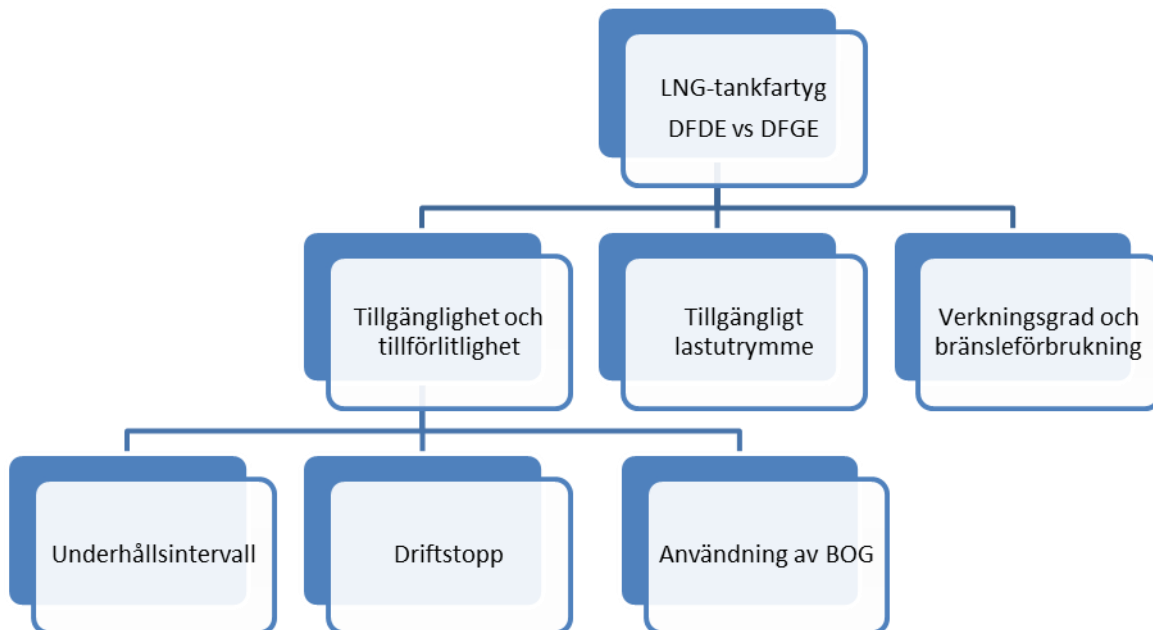
1.1 Syfte

Syftet med studien är att, genom en analys av faktorer och parametrar som påverkar valet, utvärdera om gasturbinelektrisk framdrivning är mer fördelaktigt än dual fuel-dieselelektrisk framdrivning av LNG-tankfartyg.

1.2 Frågeställning

Vilka för- respektive nackdelar har gasturbinelektrisk framdrivning av LNG-tankfartyg jämfört med dual fuel-dieselelektrisk framdrivning?

- Hur ser bränsleförbrukning och verkningsgrad ut för de båda alternativen?
- Hur ser alternativens tillgänglighet ut med avseende på driftstopp, underhållstimmar och/eller möjligheterna att använda den avdunstande gasen som bränsle?
- Hur påverkas fartygets tillgängliga lastutrymme av de båda alternativen?



Figur 1. Schematisk bild över frågeställningen

1.3 Avgränsningar

Rapporten berör LNG-tankfartyg som uppfyller de kommande miljökraven gällande NO_x och SO_x för operation inom SECA/ECA-områden men inga andra miljöhänsyn tages. Det innebär i den här studien att huvudbränslet är LNG och att diesololja används som reservbränsle för både gasturbiner och dual fuel-dieselmotorer. Rapporten fokuserar på gasturbinelektrisk framdrivning och dual fuel-dieselelektrisk framdrivning enligt forskningsfrågan. Investerings- och underhållskostnader undersöks inte. Stabilitet nämns men inga beräkningar görs. Den här studiens avgränsningar angående bränsleanvändning är viktiga eftersom de gynnar miljön och visar på en förståelse ur ett etiskt perspektiv.

2. Teori

2.1 LNG

Flytande naturgas är kyld kondenserad naturgas som används som energikälla. Den är känd som LNG, Liquefied Natural Gas, och tillhör kategorin flytande gas tillsammans med till exempel Liquefied Petroleum Gas (LPG) och Natural Gas Liquid (NGL). Flytande gaser innehåller ämnen som normalt skulle vara i gasform vid rumstemperatur och atmosfärstryck (McGuire och White 2000). En flytande gas definieras av International Maritime Organization (IMO) som: ”vätskor med ett ångtryck överstigande 2,8 bar absoluttryck vid en temperatur på 37,8°C” (McGuire och White 2000, s. 1).

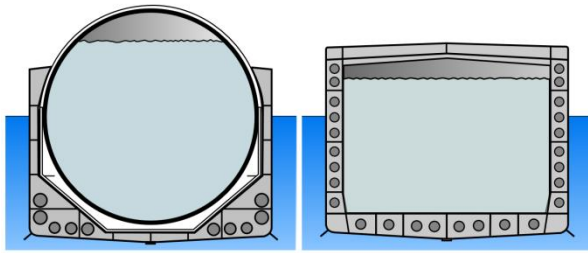
LNG som produceras från naturgas genomgår en reningsprocess för att säkerställa dess kokpunkt och renlighet. I reningsanläggningen urskiljs bland annat tyngre kolväten, vatten, koldioxid, svavelväte och kväve från naturgasen. Den naturgas som kyls och övergår till LNG består mestadels av metan, 70 – 99 % beroende på gasens ursprungskälla. Metan har en kokpunkt på -161,5°C vid atmosfärstryck (McGuire och White 2000). Metanhalt och mängden tyngre kolväten i LNG:n påverkar kokpunkt och andra egenskaper. LNG i gasfas upptar 600 gånger mer plats än vad den gör i vätskefas. I vätskefas har LNG densiteten 440 kg/m³ (Mathiasson och Friberg 2008).

2.2 LNG-tankfartyg



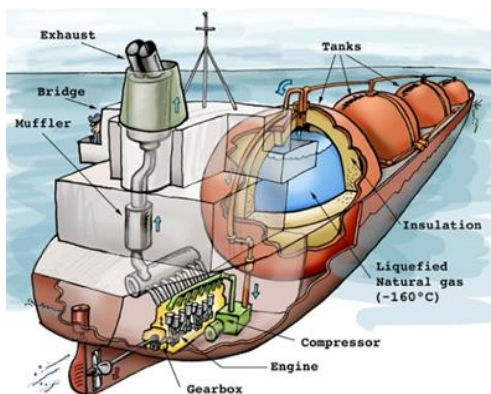
Figur 2. LNG-tankfartyg med membrantank (Wikipedia 2014)

De första LNG-tankfartygen togs i bruk år 1964, däremot sjötransporterades den första LNG-lasten sex år tidigare (McGuire och White 2000). LNG-tankfartyg transporterar LNG i oberoende tankar eller membrantankar. När gasen transporteras i flytande form upptar den, som tidigare nämnts, mindre plats och kräver således inte lika stort lastutrymme. LNG-tankfartyg transporterar lasten vid atmosfärstryck och har välisolerade lasttankar för att upprätthålla en temperatur som motsvarar lastens kokpunkt på -162°C, det vill säga gränsen för att gasen skall vara i flytande form (ibid.).



Figur 3. En oberoende tank och en membrantank för transport av LNG (Wikipedia 2014)

LNG-tankar är antingen oberoende från skrovet eller av membrantyp som figur 3 visar. LNG-tankfartyg som transporterar gasen i oberoende tankar är lätta att urskilja från andra tankfartyg, eftersom de cylindriska eller sfäriska tankarna sträcker sig ovanför däck som synes i figur 4. På samma sätt skiljer sig LNG-tankfartyg med prismatiska membrantankar (se figur 2) från oljetankfartyg då de har högre fribord på grund av att lasten har lägre densitet (McGuire och White 2000).



Figur 4. LNG-tankfartyg med oberoende tankar (Wikipedia 2014)

Den gas som bildas i fartygets lasttankar till följd av att lasten förångas kallas BOG (Boil Off Gas) eller N-BOG (Natural Boil Off Gas). BOG uppstår vid värmeförlust eller tryckfall. Villkoren för vätskeform kan inte upprätthållas eftersom lasttankarna inte kan göras helt värmeisolerade. Förångningen uppstår både vid sjöresor och vid hamnoperationer och mängden LNG som förångas per dygn varierar mellan 0,10 – 0,15 % av lastvolymen (McGuire och White 2000). Takten för förångningen påverkas av yttre faktorer som vatten- och lufttemperatur, väderförhållanden och bildandet av densitetsskikt i tanken (Castel och Leriche 2013).

BOG:en kan användas som framdrivningsbränsle eller för produktion av ånga eller elektricitet till fartygets ång- och elförbrukare. Alternativt återförs BOG:en till lasttankarna genom en återkondenseringsanläggning. Hur BOG:en används eller hanteras påverkar de ekonomiska och tekniska aspekterna för val av framdrivningssystem (Chang et al. 2008).

I de fall när mängden BOG inte täcker hela bränslebehovet är ett alternativ att använda så kallad forcerad BOG (F-BOG), vilket innebär att en del av lasten värms upp för att få tillräckligt med gas. Forceringen sker genom att LNG pumpas till en förångare med åtta bars

övertryck, där vattenånga används för att förånga LNG:n. Den forcerade BOG:en blandas med den naturliga BOG:en innan gasen når förbränningsrummet (Castel och Leriche 2013).

LNG innehåller en mindre del kväve, i storleksordning uppemot 1 mol%. Andelen ökar i BOG-sammansättningen, där kvävet motsvarar ungefär 30 mol% (Romero, Orosa och Oliveira 2012). Detta förklaras genom att kväve har en kokpunkt på -198°C , vilket resulterar i att det förångas först av LNG-sammansättningen.

Vid ballastresor sparas en beräknad mängd LNG i botten av tankarna för att säkerställa att tankmaterialet inte utsätts för temperaturpåfrestningar. Därmed undviks uppvärmning och kylning av tankarna mellan lastresorna (Shearer och Tusiani 2007). Med hjälp av den här lösningen sparas både tid och pengar eftersom lasttankarna inte behöver kylas på nytt efter en ballastresa. En ytterligare anledning till den sparade LNG-lasten är att den används som framdrivningsbränsle även under ballastresor (ibid). Under ballastresan förångas cirka 0,06 % N-BOG per dygn (Morsy El-Gohary 2012).

2.3 Ångturbindrift

Ångturbindrift, med N-BOG och tjockolja eller F-BOG som bränsle, har tidigare varit ett ledande alternativ för framdrivning av LNG-tankfartyg. Ångturbinanläggningar kan med fördel använda BOG som bränsle, maskineriet har hög tillgänglighet och avger låga vibrationsnivåer (Koren och Richardsen 2007). Den totala verkningsgraden är dock låg, cirka 30 %, vilket leder till höga driftkostnader (Morsy El-Gohary 2012). En återkommande svårighet för ångturbindrift är att finna kvalificerad personal. För de nya, större LNG-tankfartygen kan inte heller ångturbinerna leverera tillräckligt hög effekt för framdrivningen (Koren och Richardsen 2007).

Framdrivningssystemet består vanligen av två pannor som levererar ånga till en låg- och högtrycksturbin via en ångcykel (Gilmore et al. 2005). Ångturbinerna driver propelleraxeln via en reduktionsväxel (Andersson 2008). Vidare finns dieselgeneratorer som extra säkerhet vid manövrering, hamnoperationer och vid kallstart av fartyget (Gilmore et al. 2005).

2.4 Lågvarviga dieselmotorer med återkondenseringsanläggning

LNG-tankfartyg med lågvarviga dieselmotorer använder inte BOG:en som bränsle, istället återkondenseras den och förs tillbaks till lasttankarna (Sinha och Wan Nik 2012).

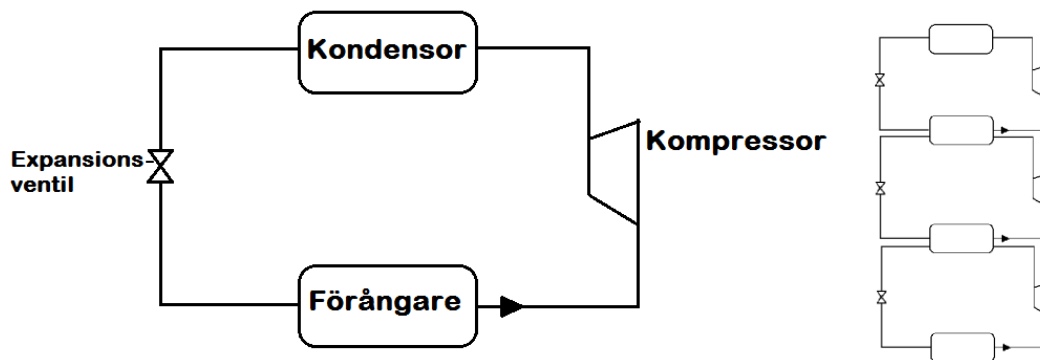
Återkondenseringen av BOG till flytande form sker genom en återkondenseringsanläggning som består antingen av en kaskadanläggning eller av en kvävgasanläggning. Kylning med kvävgas är vanligast för LNG-tankfartyg (Shearer och Tusiani 2007).

Återkondenseringsanläggning förekommer ibland även i de andra framdrivningsalternativen, exempelvis då LNG-lasten vill bevaras och framdrivning istället sker med tjockolja.

2.4.1 Kaskadanläggning

En kaskadanläggning består av flera kompressordrivna kylanläggningar i serie som figur 5 visar. Den kompressordrivna kylanläggningen består av fyra huvudkomponenter: förångare, kompressor, kondensator och expansionsventil (Alvarez 2006). Den förångade gasen sugas in i kompressorn där tryck och temperatur höjs. Den nya temperaturen tillåter kondensering i

kondensorn. Värmeutbytet sker mot ett kallare medium, exempelvis sjövattnen. Därefter sjunker trycket i expansionsventilen och vätskan förs tillbaka till förångaren.



Figur 5. Kylanläggning och kaskadanläggning (egna bilder)

Komprimering kan ske i flera steg genom att installera kompressorer i serie. Mellan kompressorstegen kyls gasen i en mellanstegskylare, kompressoreffekten blir då högre. Mellanstegskylning möjliggör en tryckhöjning som kan vara ett krav för kondenseringen beroende på köldmedium (McGuire och White 2000).

För laster med låg kritisk temperatur, som LNG, måste en kaskadanläggning användas eftersom temperaturen på lasten är för låg för att kunna kondenseras direkt mot havsvattnet. Exempel på kaskadkondensering är att LNG kondenserar mot etylen, vilket kondenserar mot propylen, freoner (exempelvis R22) eller propan, som slutligen kondenserar mot sjövattnet. Kompressionen för varje kylanläggning sker i flera steg (Shearer och Tusiani 2007).

2.4.2 Kvävgasanläggning

Återkondenseringen av BOG sker genom värmebortförsl i en sluten kvävecykel (Hamworthy 2012). Detta sker genom kompression och expansion där kvävet är köldmedium. Den komprimerade BOG:en kondenserar mot kvävet i en plattvärmväxlare. Därefter separeras icke kondenserad gas bort innan den återkondenserade gasen förs tillbaka till tanken med hjälp av trycket från separatoren (ibid.).

2.5 Dual fuel-dieselelektrisk framdrivning (DFDE)

En kombination av dieselelektrisk drift och dual fuel-dieselmotorer bildar dual fuel dieselelektrisk drift. Installationen förkortas DFDE (Chang et al. 2008).

De tre första LNG-tankfartygen med DFDE levererades 2006-2007 (Castel och Leriche 2013) och är följande:

- Provalys: 3st Wärtsilä 12V50DF + 1st 6L50DF. 154 500 m³ LNG, 4 tankar.
- GDF Suez Global Energy: 4st Wärtsilä 6L50DF. 74 500 m³ LNG, 4 tankar.
- Gaselys: 3st Wärtsilä 12V50DF + 1st 6L50DF. 154 500 m³ LNG, 4 tankar.

2.5.1 Dual fuel

För att kunna köra en dieselmotor på gas måste gasen antändas för att erhålla förbränning. Gasen kan inte, på samma sätt som diesel, antändas genom kompression. Det sker istället med ett tändstift eller med hjälp av en så kallad pilotlåga. Vid pilotlåga används diesel som pilotbränsle och antändningen sker genom kompression. Dieselförbrukningen motsvarar ungefär 1 % av bränsleförbrukningen (Castel och Leriche 2013). Förbränningen av dieseln antänder sedan gasen. Tändstift slits snabbt (Haraldsson 2013), så i marina sammanhang används pilotlåga.

Bränsleventilerna styrs individuellt elektroniskt (common rail) och det är möjligt att under drift reglera vid vilken vevinkel bränslet skall sprutas in i cylindern. När motorn går på gas arbetar den enligt ottoprincipen och när den går på diesel arbetar den enligt dieselprincipen. Det är möjligt att när som helst under maskinens gång byta bränsle, och då även arbetsprincip (Overgaard 2013).

När dual fuel-dieselmotorn drivs med gas förblandas gasen med förbränningsluften. Förblandningen skickas till cylindrarnas förbränningsutrymme med turbokompressorn via en reglerventil som säkerställer rätt tryck. Gas- och pilotbränslet kan skickas in i varsin eller en gemensam insprutningsventil, beroende på fabrikat. Vid gasläge kontrolleras förbränningen noggrant genom inställningar för pilotbränslet för att förhindra missantändning eller motorknackning som följd av för tidig antändning. Vid dieselkörning sprutas dieseln in med högt tryck via bränslepump. Pilotlågan finns kvar för att säkerställa en antändning ifall förbränningen övergår till gasläge (Castel och Leriche 2013). Framdrivningssystemet är också utrustat med en brännkammare, en så kallad Gas Combustion Unit (GCU), som förbränner överskottet av BOG samt reglerar trycket i lasttankarna (Castel och Leriche 2013).

2.5.2 Deselelektrisk framdrivning

Elproduktionen ombord på ett fartyg sker i allmänhet genom att flera mellan- eller högvarviga dieselmotorer driver var sin generator som genererar elektricitet (Kuiken 2008). Dieselmotorns varvtal beror både på vilken frekvens som önskas på växelspanningen ombord (50 eller 60 Hz) och antalet poler i generatoren. Spänningen transformeras ned till de elförbrukare som kräver lägre spänning (ibid.).

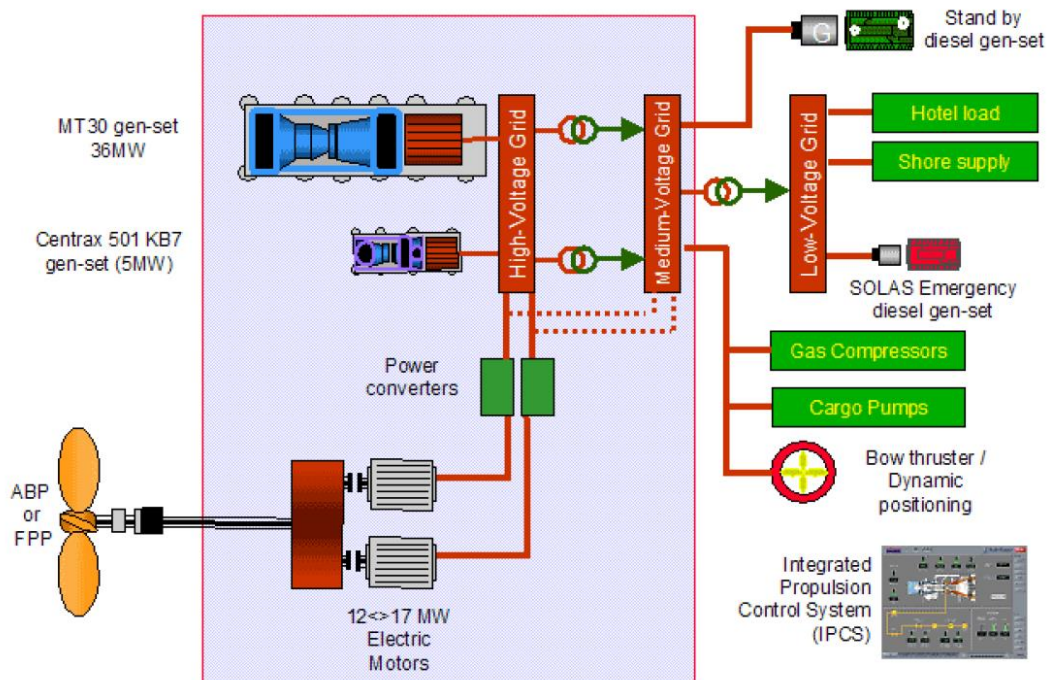
Vid deselelektrisk framdrivning av fartyg driver en elmotor propellern. Varvtalet på elmotorn måste kunna styras för att reglera fartygets hastighet. Eftersom en växelströmsmotor roterar med proportionerligt varvtal mot generatoren, kan varvtalet regleras med dieselmotorn som driver generatoren (Harvey och Thau 1925). Detta medför att om dieselmotorn går långsammare, går också elmotorn långsammare. Metoden är dock inte ideal eftersom det då blir svårt att koppla samman flera generatorer. En dieselmotor bör dessutom arbeta på konstant varvtal för att uppnå maximal verkningsgrad. Därför varierar istället magnetiseringsspänningen till elmotorn. Samma metod används även vid drift med likströmsmotorer (ibid.).

En modernare, mer flexibel lösning med högre totalverkningsgrad erhålls genom att använda en frekvensomvandlare. Den går att applicera på såväl synkron- som asynkronmotorer och

kräver ingen ombyggnation av motorn. En växelströmsmotors varvtal är i normala fall beroende av nätfrekvensen. Genom att först likrikta spänningen och sedan växelrikta den igen elektroniskt, går det att välja en godtycklig frekvens. När denna sedan matas till elmotorn kommer varvtalet att vara proportionellt mot frekvensen vid bibehållen spänning och strömstyrka (Alfredsson et al. 1996).

2.6 Gasturbinelektrisk framdrivning

Vid elektrisk gasturbindrif används gasturbiner med generatorer för att generera elektricitet. En elmotor driver sedan propellern så som beskrevs i avsnitt 2.5.2. Uttrycket för denna installation förkortas till DFGE (Chang et al. 2008).

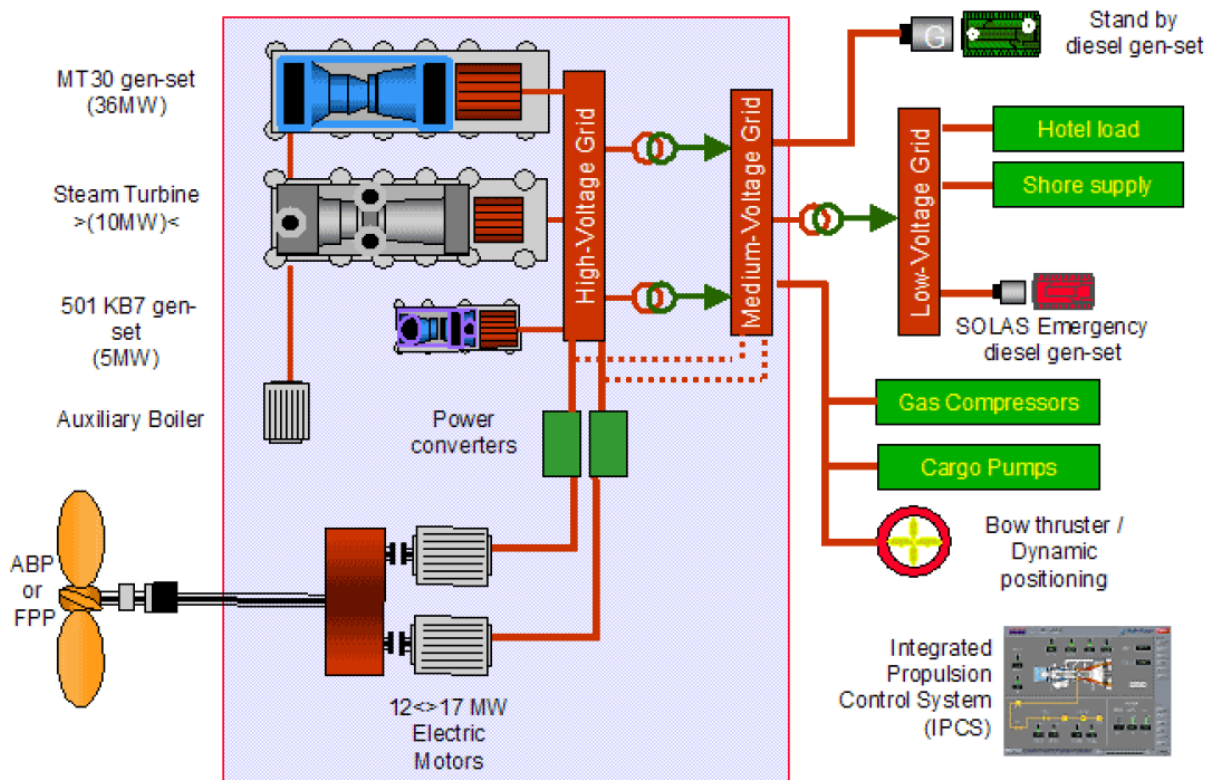


Figur 6. Gasturbinanläggning med far- och sonarrangemang (efter tillstånd av Rolls-Royce 2014)

I Figur 6 visas en gasturbinanläggning med far- och sonarrangemang, vilken består av en stor och en liten gasturbin (Morsy El-Gohary 2012). De kan tillsammans eller enskilt producera elektricitet till huvudtavlans förbrukare. Gasturbinuppsättningen kallas ”suggested advanced cycle marine gas turbine”, alltså förslag på avancerad marin gasturbincykel och förkortades ACGT. Det fanns år 2012 ingen sådan anläggning på något LNG-tankfartyg (ibid.).

2.6.1 Gasturbiner med kombianläggning

Gasturbiner kan kombineras med ångturbiner, ångpannor och/eller dieselmotorer. Avgaserna som kommer från gasturbiner har i förhållande till dieselmotorer en relativt hög temperatur (Träff 2013). Karakteristiskt för en kombianläggning är att en ångcykel utnyttjar restvärmen som finns i avgaserna, vilket höjer anläggningens verkningsgrad. Den producerade ångan kan användas till att driva en ångturbin som visas i figur 7.

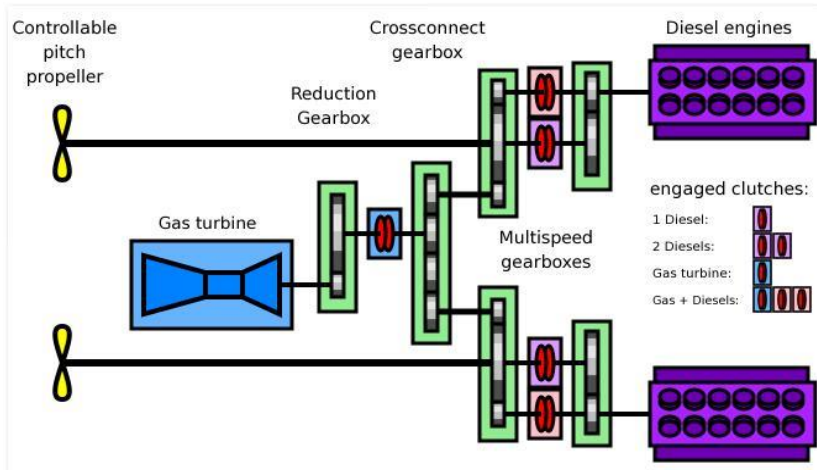


Figur 7. COGES (efter tillstånd av Rolls-Royce 2014)

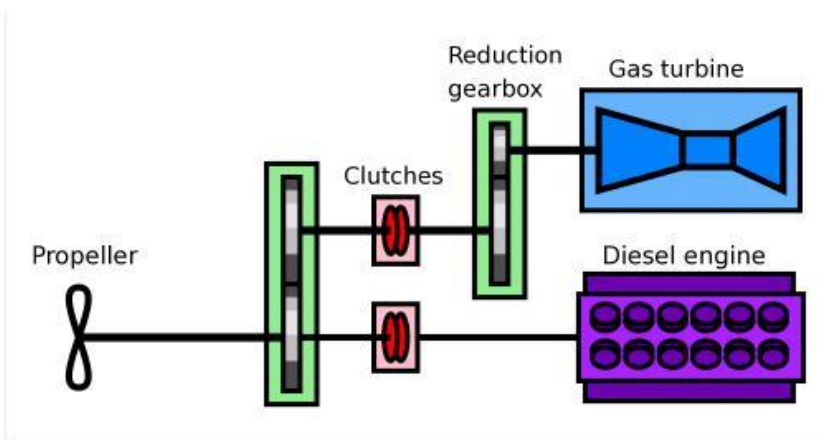
Det finns en rad olika framdrivningskombinationer, med eller utan ångturbin. Till exempel CODAG (figur 8), CODOG (figur 9), COGAG (figur 10) och COGES (figur 11) (Cohen et al. 1996). Förkortningarna för kombianläggningarna kan tydas med hjälp av tabell 1.

Tabell 1. Förkortningar för olika framdrivningskombinationer

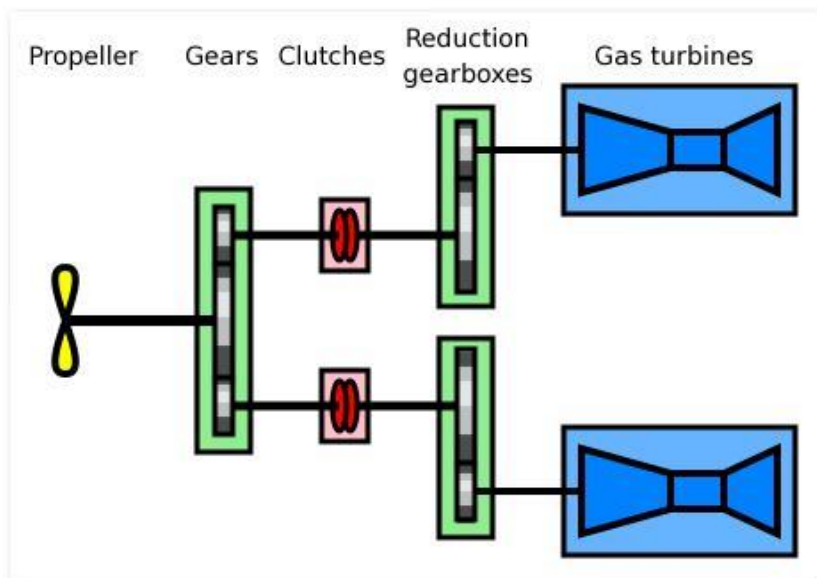
CO- Combined (kombinerad)	A- And	G- Gas
S- Steam (ånga)	O- Or	
D- Diesel	E- Elektriskt	



Figur 8. Princip för CODAG (Wikipedia 2014)



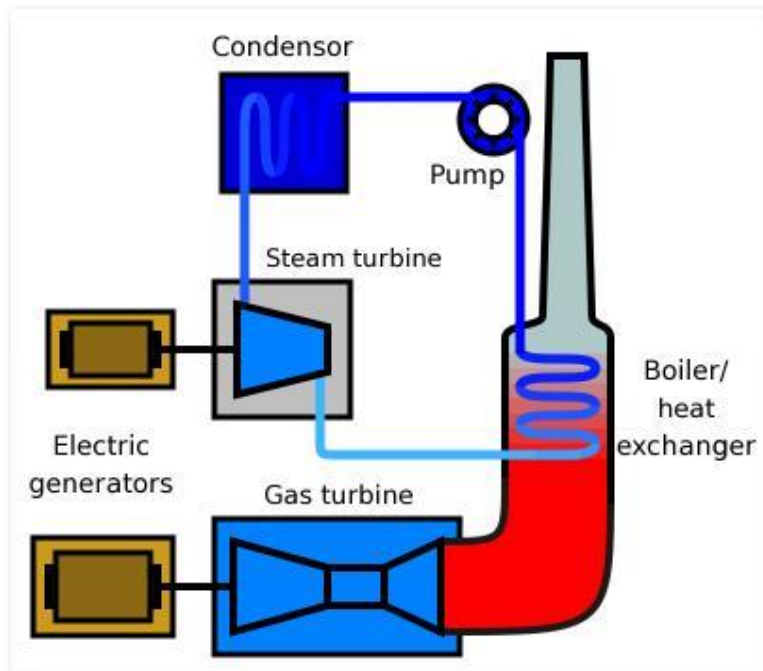
Figur 9. Princip för CODOG (Wikipedia 2014)



Figur 10. Princip för COGAG (Wikipedia 2014)

I ett tidigare examensarbete (Höyer och Persson 2013) jämfördes huruvida en gas- eller dieselkombianläggning kan vara ett bättre alternativ än enbart en lågvarvig dieselmotor vid framdrivning av ett containerfartyg. Det visade sig att verkningsgraden för de båda lösningarna med kombianläggning var likvärdiga. Valet berodde på faktorer som anläggningens bränsleförbrukning vid dellast, bränslealternativ och bränslepris.

Drivs propellern direkt av gas- och ångturbiner kallas det för COGAS, COmbined Gas And Steam (Andersson 2008). Drivs propellern däremot av producerad elektricitet så kallas det för gaskombielektrisk framdrivning eller COGES, COmbined Gas and Steam Electric (Kalyanaraman och Jeffs 2005). Figur 11 ger en schematisk översikt av COGES uppbyggnad.



Figur 11. Princip för COGES (Wikipedia 2014)

Redan år 1979 gjordes en design för LNG-tankfartyg med COGES som framdrivning (Peters och Hansen 1979). Det var då inte ekonomiskt konkurrenskraftigt mot konventionella ångturbiner eftersom de kunde gå på tjockolja som var ett billigare bränslealternativ. Samtidigt som det inte fanns några miljökrav som reglerade avgaserna från tjockolja (ibid.).

Framdrivningsförslaget bestod av tre stycken LM 2500 dubbelskrivs-gasturbiner från General Electric med en avgaspanna för ångproduktion. Gasturbinerna matade växelström till en gemensam eltavla via varsin synkrongenerator. Vidare från eltavlan försågs synkronmotorer med elkraft som drev propelleraxlarna. Propellervarvtalet, och därmed fartygets hastighet, reglerades genom frekvensstyrning (Peters och Hansen 1979).

2.6.2 Mekanisk gasturbindrift

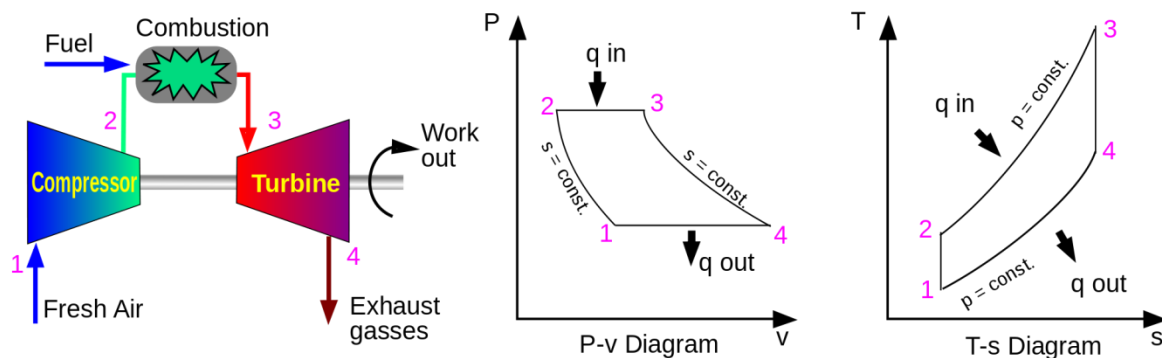
Ett exempel på mekanisk gasturbindrift är Siemens Industrial Turbomachinery ABs SGT-500 (förr GT-35) som är i bruk på höghastighetsfärjan Stena Carisma (Andersson 2008). Den är treaxlig och består av två kompressorer och tre turbiner. En högtrycksturbin driver en

högtryckskompressor och en lågtrycksturbin driver en lågtryckskompressor genom mekaniskt oberoende axlar. Den tredje axeln driver en kraftturbin som driver vattenjetaggregatet via en växel. Arrangemanget med en hög- och en lågtrycksdel tillåter gasturbinen att arbeta vid olika varvtal och påverkar dellastverkningsgraden positivt (ibid.).

2.6.3 Gasturbiner

Gasturbiner började sin historia som flygmotorer och har därefter utvecklats till bland annat marina tillämpningar där tillverkarna Rolls-Royce, General Electric och Siemens Industrial Turbomachinery AB är representativa (Andersson 2008).

De tre huvudkomponenterna i en gasturbinanläggning är kompressor, brännkammare och turbin (Alvarez 2006). I en axialkompressor komprimeras förbränningsluften i flera steg, vilket ökar trycket och temperaturen. Förbränningen sker i brännkammaren när bränslet tillförs till den komprimerade förbränningsluften. Bränsleluftblandningen expanderar under förbränningen. Energin från expansionen överförs till turbinaxeln genom skovlarna (turbinblad), som i sin tur driver både kompressorn och lasten via rotation där lasten räknas som den nyttiga energin. Den nyttiga energin i förhållande till tillförd energi utgör gasturbinens verkningsgrad. Brännkammare och turbin utsätts för högre temperaturer och kallas därför för den varma sidan (ibid.).



Figur 12. Arbetsprincip för gasturbin samt dess ideala processer. (Wikipedia 2014)

1-2 Isentropisk kompression (entropi $s = \text{konstant}$).

2-3 Isobar värmeförsel (tryck $p = \text{konstant}$) q_{in} .

3-4 Isentropisk expansion.

4-1 Isobar värmeförsel q_{out} .

Den ideala processen är teoretisk och tar därför inte hänsyn till några förluster (Alvarez 2006). Gasturbinprocessen beskrivs enklast i fyra arbetssteg som visas i de ovanstående P-v- (tryck-volym) och T-s- (temperatur-entropi) diagrammen i figur 12. Entropi är en tillståndsstorhet som mäter värmemängd.

En gasturbins verkningsgrad och/eller uteffekt kan förbättras genom införandet av mellankylning, mellanförbränning och/eller regenerering (Alvarez 2006). En mellankylare installeras för att öka uteffekten. Den placeras mellan kompressorstegen och underlättar en högre kompression då den efterliknar en teoretisk isoterm kompression. Med mellanförbränning menas att gasen förbränns i två stycken brännkammare, exempelvis att en efterbrännkammare installeras, detta ökar uteffekten men sänker verkningsgraden något.

Regenerering sker genom att en värmväxlare, så kallad rekuperator, installeras efter kompressorn, där den komprimerade förbränningsluftens temperatur ökar med hjälp av turbinens avgaser (Alvarez 2006). Vid full last krävs inte denna åtgärd eftersom kompressionen genererar tillräckligt mycket värme (Andersson 2008). Vid delast däremot gör den stor nytta då kompressionsluften inte kommer upp i lika hög temperatur. Rekuperatorn bidrar till en lägre bränsleförbrukning men den är dock ovanlig ombord på fartyg eftersom den är skrymmande (ibid.).

Den verkliga gasturbinprocessen skiljer sig åt från den ideala processen i P-v- och T-s-diagrammen på grund av de förluster som uppstår vid de olika arbetsstegen (Alvarez 2006). Det mesta av arbetet från turbinen åtgår som sagt till kompressionen. Exempel på verkningsgrader för gasturbiner:

- 40 % för MT 30 (Rolls Royce 2014)
- 37 % för LM 2500 (General Electric 2012)
- 34 % för SGT 500 (Siemens 2014)
- 40 % för SGT 750 (Siemens 2014)

3. Metod

Forskningsfrågorna är av jämförande karaktär med en specifik inriktning som behöver skildras. Därför valdes en jämförande och beskrivande litteraturstudie (Höst, Regnell och Runeson 2006). Materialet består av kursmaterial och genom databaser sökta vetenskapliga artiklar och relevanta böcker för studien. Sökmotorerna för de olika databaserna finns listade nedan. För att finna väsentlig litteratur påbörjades först en sökning med ett för undersökningen brett sökområde. Allt eftersom djupare kunskap utvanns minskades sökområdets bredd för att få en djupare inblick i specifika områden.

Sökorden nedan har använts såväl tillsammans som separat, i singular och i plural. Svenska och engelska synonymer användes vid olika sökningar för att på så sätt förfina sökområdet efter litteratur. För att ytterligare höja relevansen hos sökresultaten har begränsningarna nedan använts. Vissa av sökmotorerna klarar av att direkt hantera kommandon i söksträngen, hos andra måste resultaten i efterhand begränsas i menyer. Tillvägagångssätt och resultat dokumenterades under sökningens gång. Vad artiklarna överskådligt innehåller finns presenterat i Bilaga 1 – Övergripande innehåll i artiklarna.

Urval av litteratursökningarna skedde genom en manuell granskning av relevans, aktualitet och tillförlitlighet. Relevansen bedömdes utifrån till vilken grad artikeln berör denna studies frågeställning. Aktualiteten bedömdes utifrån tillförlitlighet och vilket år artikeln skrevs. Tillförlitligheten ansågs god om det på framsidan framgår att artikeln har blivit granskad (eng. reviewed) samt om artikeln inte har skrivits till förmån för ett enskilt företag (Höst, Regnell och Runeson 2006). För att öka aktualiteten har artiklarnas publiceringsår beaktats under sökningen.

Den framtagna litteraturen studerades sedan genom noggrann läsning. Artiklarna sammanfattades och viktiga stödord antecknades för att möjliggöra jämförelsen. För vidare läsning har materialets källor följts upp.

För att enklare kunna behandla data som framtagits ur litteraturstudien har de angivna enheterna räknats om för att möjliggöra en jämförelse.

Sökmotorer:

Google

Summon

TRID (Transportation Research Integrated Database)

Scopus

MTA (Marine Technology Abstracts)

Sökord:

Ballast voyage, brayton cycle cooling, carrier, cascade, COGAS, COGES, combined gas steam, delta marin, design, diesel electric, dual fuel, electric propulsion, faryg, framdrivning, frequency, future propulsion, gas, gas turbine, gasturbinelektrisk, general electric, kaskad, liquiefied natural gas, LNG, marine, natural gas, propulsion, reliability, reliquification plant, Rolls Royce, ships, steam, study, vessels, återkondenseringsanläggning

Exempel på begränsningar:

publication year >2006	Visar endast resultat publicerade efter år 2006.
NOT env*	Exkluderar resultat som innehåller miljöfrågor, därför olika böjningar av "environment".
DOCTYPE(ar)	Visar endast resultat av typen "artikel".
NOT DOCTYPE(e-book)	Exkluderar resultat som visar elektroniska böcker.
NOT DOCTYPE(book)	Exkluderar resultat som visar böcker.

4. Resultat

Resultatet baseras på följande sex vetenskapliga artiklar. De finns även schematiskt presenterade i Bilaga 1 – Övergripande innehåll i artiklarna.

Vetenskaplig artikel som jämför DFDE med DFGE:

Morsy El-Gohary jämförde år 2012 dieselelektrisk framdrivning med en typ av gasturbinanläggning där ett far- och sonarrangemang upprättats för elektrisk drift (ACGT). Båda framdrivningsalternativen kan drivas med antingen diesel eller BOG. Studien gjordes matematiskt med ett referensfartyg som utgångspunkt för att kunna jämföra med tillgängliga data från befintliga dual fuel-dieselmotorer.

Vetenskapliga artiklar som berör DFDE och COGES:

Sinha och Wan Nik studerade år 2012 skillnader mellan anläggningarna genom att presentera tabeller med termisk effekt, bränsleförbrukning, antalet driftstopp och total livscykelkostnad. Tabellvärdena togs fram genom en undersökande litteraturstudie. Efter en konferens i Hamburg, Tyskland presenterades också tabeller över tidigare nämnt av Kivelä och Nurmi år 2001. De diskuterade dessutom för- och nackdelar med DFDE och COGES.

Chang m.fl. undersökte år 2008 tillgängligheten hos DFDE och COGES med hänsyn till säkerhetsproblemen som kan uppstå i de nämnda anläggningarna, risker som inte finns hos konventionella framdrivningssystem. Data över felfrekvenser samlades in för att sammanställa undersökningen.

Artikeln skriven av Kalyanaraman och Jeffs (2005) väger för- och nackdelar med de nya framdrivningssystemen gentemot de konventionella. De diskuterar ett förslag med COGES som framdrivningssystem för LNG-tankfartyg från Rolls-Royce, General Electric och Siemens Industrial Turbomachinery AB utifrån en konferens. Bland annat nämns maskineriets placering på fartyget samt drift- och underhållskostnader.

År 2013 undersökte Castel och Leriche möjligheten hos DFDE att hantera BOG. De fokuserade bland annat på hur kvalitén på gasen påverkar motorn, hur reglering av gasen sker och olika problem som kan förekomma. Undersökningen baseras på erfarenheter från rederierna till de tre första LNG-tankfartygen med DFDE.

COGES och DFGE kommer delvis att behandlas gemensamt när de ställs mot DFDE i de kommande kapitlen. De kommer då att benämnas gasturbiner. Artiklarna berör även andra framdrivningsalternativ men de presenteras inte här eftersom de saknar relevans för frågeställningen i den här rapporten.

4.1 Systemens verkningsgrad och bränsleförbrukning

I detta kapitel jämförs verkningsgrad, som är förhållandet mellan nyttig och tillförd energi. Med bränsleförbrukning menas tillförd energi i form av N-BOG, F-BOG eller diesel. Sinha och Wan Nik (2012) understryker att det ännu inte är fullt möjligt att samla in driftparametrar för de nya framdrivningssystemen, vilket försvårar en rättfärdig jämförelse.

4.1.1 Gasturbiner

I rapporten av Morsy El-Gohary (2012) studeras ACGT teoretiskt, men det är enligt honom i praktiken fullt genomförbart. Det poängteras att ACGT alltid behöver BOG för att vara ekonomiskt lönsamt, vilket förklaras med att BOG har ett högre värmevärde och ett lägre pris än MDO. Värmevärdet för de båda bränslena är 50 MJ/kg respektive 42 MJ/kg. Framdrivningssystemets verkningsgrad beräknades för dieseldrift till 40 %, effekten till 25 MW och bränsleförbrukningen till 225 g/kWh (ibid.).

Enligt Kalyanaraman och Jeffs (2005) medför Rolls-Royce förslag på framdrivning med COGES en verkningsgrad på 49 %. Framdrivningssystemet består av Rolls-Royces gasturbin MT30 på 36 MW som tillsammans med en ångturbin på 10 MW ger den sammanlagda effekten 46 MW. De redogör för att COGES har en specifik bränsleförbrukning på 205 g/kWh, vid dieselläge (ibid.). Ett värde för gasläge presenteras inte.

Sinha och Wan Nik (2012) bevisar att gasturbiner (gt) med fördel kan användas tillsammans med en ångturbin (åt) för att öka verkningsgraden. Anläggningarnas verkningsgrader (η) adderas enligt följande formel, där enheten är angiven i decimalform:

$$\eta_{\text{kombinerad}} = \eta_{\text{gt}} + \eta_{\text{åt}} - (\eta_{\text{gt}} \times \eta_{\text{åt}})$$

I deras kalkyl har de räknat med en COGES-anläggning där verkningsgraden fastställdes till 50 %, effekten till 45-55 MW och bränsleförbrukningen till 245 g/kWh. Kivelä och Nurmi (2001) beskriver att effekten ligget mellan 20-24 MW.

En sammanställning av artiklarnas redovisade prestanda presenteras i tabell 2. Samtliga artiklar presenterar bränsleförbrukningen i dieselläge.

Tabell 2. Prestanda för COGES och DFGE

Källa	Verkningsgrad %	Bränsleförbrukning g/kWh	Effekt MW
Kalyanaraman, Jeffs	49	205	36
Morsy El- Gohary	40*	225*	25*
Sinha, Wan Nik	50	245	50
Kivelä, Nurmi	-	-	20-24

* Gasturbinelektrisk framdrivning utan ångcykel

4.1.2 DFDE

Den DFDE-anläggning Morsy El-Gohary (2012) presenterar har en verkningsgrad på 42 % och en effekt på 34 MW. Samma verkningsgrad redovisas av Sinha och Wan Nik (2012) tillsammans med en bränsleförbrukning på 243 g diesel/kWh och en effekt på 30-40 MW. Kiveläs och Nurmi (2001) nämnda effekt är lägre, 26 MW. Likaså är Castels och Leriches (2013) presenterade effekter på 19 MW och 26 MW.

En sammanställning av redovisade prestanda från artiklarna presenteras i tabell 3. Bränsleförbrukningen presenteras för dieselläge.

Tabell 3. Prestanda för DFDE

Källa	Verkningsgrad %	Bränsleförbrukning g/kWh	Effekt MW
Morsy El-Gohary	42	-	34
Sinha, Wan Nik	42	243	38
Kivelä, Nurmi	-	-	26

Castel och Leriche (2013) återger hur de tre första LNG-tankfartygen med DFDE-framdrivning har körts i gasläge med BOG som bränsle vid 90 % av drifttiden. Vidare beskriver de att bildningen av BOG svarar för 100 ton/dag och tillåter då en hastighet på 18-19 knop. Vid lägre hastigheter förbränns enligt Castel och Leriche (2013) överskottsgasen i en GCU som alltid är i beredskap med en dieselförbrukning på 10kg/h.

4.1.3 Jämförelse av verkningsgrad och bränsleförbrukning

Morsy El-Gohary (2012) påpekar att verkningsgraden är högre för DFDE än för en gasturbin utan kombianläggning. I jämförelsen visas vidare att ACGT var mer lönsamt vid resor kortare än 4000 sjömil medan DFDE var det vid längre resor. Detta förklaras genom att gasturbinerna som används vid ACGT väger förhållandevis lite och möjliggör mer lastvikt (se avsnitt 4.3). DFDE drar 2 - 2,5 % mindre bränsle än ACGT. Vid rutter över 4000 sjömil överväger denna minskade bränsleförbrukning den större lastkapacitet som ACGT erbjuder. Kivelä och Nurmi (2001) instämmer delvis i tankegången. Deras beräkningar visar att sjöresor överstigande 1700 sjömil inte påverkar valet av framdrivningsmaskineri. Vid kortare sjöresor är DFDE klart överlägsen DFGE vilket främst beror på DFGE lägre verkningsgrad vid dellaster. Kalyanaraman och Jeffs (2005) och Sinha och Wan Nik (2012) förklarar att med en kombianläggning ökar verkningsgraden avsevärt.

Morsy El-Goharys referensfartyg har en lastkapacitet på 150 000m³ medan Kiveläs och Nurmis referensfartyg har 135 000 m³. Med en lastavdunstning på 0,15 % per dygn erhålles 225m³ respektive 202,5m³ N-BOG per dygn. Vikten beräknas med en densitet på 0,44 ton/m³ till 99 samt 89 ton N-BOG per dygn.

Genom att, utifrån värdena som presenterats i tabell 2 och 3, beräkna den teoretiska bränsleförbrukningen per dygn för de olika maskinerna går det att kontrollera om den naturliga BOG:en räcker till för att driva anläggningarna. I beräkningen antogs driften ske med fullt effektuttag, det vill säga den effekt som är angiven för respektive anläggning.

Tabell 4. Bränsleförbrukning för COGES och DFDE

Källa	Verkningsgrad %	Bränsleförbrukning g/kWh	Effekt MW	Bränsleförbrukning ton/dygn
Kalyanaraman, Jeffs	49	205	36	177
Morsy El- Gohary	40*	225*	25*	135*
Sinha, Wan Nik	50	245	50	180 (givet i rapporten)
Kivelä, Nurmi	-	-	20-24	-

Tabell 5. Bränsleförbrukning för DFDE

Källa	Verkningsgrad %	Bränsleförbrukning g/kWh	Effekt MW	Bränsleförbrukning ton/dygn
Morsy El- Gohary	42	-	34	-
Sinha, Wan Nik	42	243	28	146
Kivelä, Nurmi	-	-	26	-
Castel, Leriche		-	19	100 N-BOG (givet i rapporten)
			28	

Tabellerna 4 och 5 visar att 89-99 ton N-BOG per dag inte räcker för att driva anläggningarna på full effekt för ett LNG-tankfartyg i samma storlek som referensfartyget. Värdena i tabellerna är presenterade i dieselläge och eftersom LNG har ett högre energiinnehåll, kommer bränsleförbrukningen att minska något med gasläge.

* Gasturbinelektrisk framdrivning utan ångcykel

Enligt Kalyanaraman och Jeffs (2005) är det ekonomiskt lönsamt för större LNG-fartyg (kapacitet 200 000 m³) att enbart använda gas som bränsle eftersom det blir större mängder av BOG att ta hand om.

4.2 Systemens tillgänglighet och tillförlitlighet

Tillgänglighet beskrivs av Chang m.fl. (2008) som den tid av den totala tiden som kan användas till framdrivning, med hänsyn till underhållsavbrott och driftstopp. Därför presenteras underhållsintervall som en del av resultatet. Det konstateras att ett framdrivningssystemets tillförlitlighet hör samman med hur det svarar på förändrad motorbelastning och möjligheterna till att använda BOG (ibid.). Även Sinha och Wan Nik (2012) menar att hanteringen av BOG är en central säkerhetsfråga för framdrivningssystemets tillförlitlighet.

4.2.1 Tillgänglighet och tillförlitlighet för gasturbiner

Underhållsintervall för COGES enligt Kalyanaraman och Jeffs (2005):

- Diesel som bränsle: 12 000h (varma sidan); 24 000h (hela gasturbinen)
- Gas som bränsle: 24 000h (varma sidan); 48 000h (hela gasturbinen)

Varma sidan, turbin och brännkammare, utsätts för högre temperaturpåfrestningar än kompressorn. Underhållsrutiner uppgår till maximalt åtta timmar per månad, skriver Kalyanaraman och Jeffs (2005). De redogör även för att ett byte av gasturbinen är beräknad till maximalt 12 timmar vid hamnbesök.

Underhållsintervallet enligt Sinha och Wan Nik (2012) uppgår till:

- 8 000–10 000h för inspektion
- 35 000–40 000h för total överhaling

Sinha och Wan Nik (2012) anser att en nackdel med gasturbiner är att turbinbladen har kort livslängd, medan fördelarna är att:

- de är pålitliga
- de har kort uppstartningstid
- de klarar plötsliga förändringar i belastningen
- förbränning av gas och diesel kan ske samtidigt oavsett mängd

Chang m.fl. (2008) presenterar en felfrekvens för gasturbiner som uppnår till 756,8 feltillfällen per miljoner timmar. Det innebär att ett fel i genomsnitt inträffar efter 1321 drifttimmar. De menar, precis som Sinha och Wan Nik (2012), att en fördel med gasturbiner är att de klarar av att hantera plötsliga belastningsförändringar.

För ACGT används i nödfall diesel som bränsle till den mindre gasturbinen, som då levererar tillräckligt med kraft för att ta fartyget till hamn, enligt Morsy El-Gohary (2012). Ett nödfall kan vara om den större gasturbinen inte längre går att använda på grund av haveri eller om inte tillräckligt med BOG levereras. Den större gasturbinen kan också köras på diesel men då åtgår en större mängd än vad det gör i gasläge. Den mindre gasturbinen levererar lagom effekt

för hamnoperationer, såsom drift av lastpumpar vid lossning. Det är då inte nödvändigt att ha den större gasturbinen i drift.

4.2.2 DFDE tillgänglighet och tillförlitlighet

Enligt Chang m.fl. (2008) är dual fuel-dieselmotorer tillgängliga för framdrivning trots att bara ett av bränslesystemen (BOG eller MDO) finns tillgängligt.

En fördel med dieselelektrisk framdrivning är att samma maskineri kan användas till både framdrivning och lasthantering. Då behövs ingen ytterligare kraftkälla ombord, menar Sinha och Wan Nik (2012). De ger också exempel på en dual fuel-dieselmotor från Wärtsilä vars driftstopp inträffade efter 32 161 drifttimmar.

Vid ballastresor används ca 30 % F-BOG för att kompensera för den mindre mängden N-BOG. Den höga andelen F-BOG medför att dual fuel-dieselmotorns gasläge kan fallera och övergå till dieselläge. Enligt Castel och Leriche (2013) beror detta på F-BOG:ens höga kvävehalter och en överhettad BOG. De menar att styrningen av förbränningen då blir komplicerad när motorn skall anpassas till olika laster och yttre förhållanden. Övergång mellan gas- och dieselläge medför risker för stopp eller motorknackning. Vidare redogör Castel och Leriche (2013) för hur rederierna till de första LNG-tankfartygen med DFDE upplevde problem med LNG- och BOG-kvalitén. Rederierna menade att den varierade kvalitén på BOG:en berodde på naturgasens ursprungskälla och att det hade en negativ effekt på dual fuel-dieselmotorns verkningsgrad och möjlighet till optimering (ibid.).

På liknande sätt anser Sinha och Wan Nik (2012) att det finns risk för misständning under ett ökande effektuttag. Om inte BOG:en räcker till för att driva dual fuel-dieselmotorerna måste de drivas med diesel eller tjockolja. De påpekar att den lilla mängd gas som fortfarande dunstar av inte är tillräcklig för att driva motorerna och måste istället förbrännas i GCU:n utan att energin tas till vara. Bränseleffektiviteten för DFDE påverkas negativt av detta, vilket i stort sett beror på det faktum att de inte kan köra på gas och diesel samtidigt (ibid.). På samma sätt anser Kivelä och Nurmi (2001) att den varierande mängden BOG som bildas ger problematik vid dimensionering av DFDE-anläggningen.

4.2.3 Jämförelse av systemens tillgänglighet och tillförlitlighet

Enligt Chang m.fl. (2008) har COGES en högre tillgänglighet än DFDE när det gäller förmågan att klara förändrad motorbelastning. Detta beror på att ångturbinen har väldigt låg felintensitet. Samtidigt har DFDE som ofta består av fyra dual fuel-dieselmotorer i sig en lägre tillgänglighet. Detta eftersom tillgängligheten är definierad som omvänt proportionell mot antalet komponenter, förutsatt att alla komponenter har samma felintensitet. Samtidigt påpekar Chang m.fl. (2008) att DFDE har något högre tillgänglighet vid nödgenerering eller vid driftstopp av en av motorerna jämfört med COGES.

Kalyanaraman och Jeffs (2005) menar att dual fuel-dieselmotorer är enklare att hantera av maskinrumspersonalen än vad gasturbiner är. Det finns bland annat skillnader mellan bränslesystemen tillhörande DFGE och DFDE. Chang m.fl. (2008) poängterar att dual fuel-dieselmotorer kräver att BOG:ens leveranstryck är sex barö vid gasläge och för gasturbiner krävs 40 barö. Båda systemen använder diesel som pilotlåga men kan slå över till dieselläge

om pilotlågan inte tänder. Gasturbiner kräver dieseln bara vid uppstart, medan DFDE kräver det hela tiden. För att förhindra gasläckage i de trycksatta rören använder dual fuel-dieselmotorer dubbelmantlade sådana. I DFGE-systemet är rören som en säkerhetsåtgärd installerade inuti gasturbinens hölje (ibid.).

Gasturbiner kan med fördel förbränna gas och diesel samtidigt till skillnad från dual fuel-dieselmotorer som antingen måste köras i gas- eller dieselläge. Detta medför att DFGE har en högre bränsleeffektivitet än DFDE enligt Sinha och Wan Nik (2012). Chang m.fl. (2008) instämmer och visar att DFGE har cirka fem procent högre möjlighet att använda BOG än DFDE, vilket påverkar tillgängligheten positivt. Sinha och Wan Nik (2012) menar att COGES nämnda fördelar i det här avsnittet medför en bra konkurrenskraft i jämförelse med de andra framdrivningssystemen.

4.3 Disponibelt lastutrymme med DFGE, COGES eller DFDE

Kalyanaraman och Jeffs (2005) förklarar att turbinerna för COGES med fördel kan placeras på akterdäck för att spara utrymme i skrovet, vilket ger ökad lastkapacitet av LNG. Morsy El-Gohary (2012) påpekar samma sak och menar att valfriheten vid placeringen medför en ökad lastkapacitet. Kalyanaraman och Jeffs (2005) påpekar även att membrantankar utnyttjar skrovutrymmet optimalt, vilket i sin tur ökar lastkapaciteten med uppemot 10 %. Sfäriska tankar har dock tidigare varit vanligare då de anses vara säkrare än membrantankar då deras symmetri tillåter en bättre lastfördelning (ibid.). Sinha och Wan Nik (2012) anser att fördelarna med gasturbiner är att de är små och lätta samt har en hög effekt i förhållande till sin storlek.

En ytterligare fördel med placeringen av turbinerna på akterdäck är enligt Kalyanaraman och Jeffs (2005) att det vid behov går att lyfta av dem vid hamnbesök och ersätta med en reservturbin. All elektrisk utrustning är fortfarande under däck och maskinrumskontrollrummet är placerat för om turbinerna. Förtöjningsutrustningen placeras vid sidan om maskinerna på samma sätt som hos kryssningsfartyg med liknande framdrivning (ibid.).

5. Diskussion

5.1 Resultatdiskussion

Bränsleförbrukningen som presenterades i tabellerna 2 och 3 skiljer sig åt sinsemellan. Detta kan förklaras genom att varje fartyg har sin specifika bränsleförbrukning som beror på fler faktorer än framdrivningsmaskineriets effekt. Det kan som exempel bero på fartygets storlek och skrovutformning. De här omständigheterna försvårar en djupare diskussion om bränsleförbrukningen. Inte heller är den teoretiska bränsleförbrukningen tillräckligt säkerställd för en rättfärdigad jämförelse.

Storleken på LNG-tankfartygen som har granskats framgår endast i artiklarna av Morsy El-Gohary och Kivelä & Nurmi. Utifrån de presenterade effekterna kan emellertid fartygens storlek till en viss del utläsas. Ett större fartyg kräver ett starkare maskineri, lasttankarna borde därför också bli större. Med större lasttankar följer en större mängd N-BOG. Som tabellerna 4 och 5 visar är den naturliga BOG:en inte tillräcklig för att driva LNG-tankfartygen. Det betyder att det är nödvändigt att forcera BOG för att tillgodose maskinernas bränsleförbrukning. Beräkningarna är dock gjorda för full maskinbelastning. I normal drift belastas inte maskinerna fullt ut, utan 80-85 % av maskinstyrkan brukar användas för de flesta fartyg i allmänhet. Detta medför möjligtvis inte att den naturliga BOG:en räcker till, men att inte allt för stora mängder BOG behöver forceras.

Ur tabellerna 2 och 3 framgår det också att verkningsgraden för COGES är högre än för DFGE. Sinhas och Wan Niks presenterade COGES-anläggning har en bränsleförbrukning som är snarlik den för ACGT, men den har dubbelt så stor effekt och en avsevärt högre verkningsgrad. Det här visar på att formeln för den sammanlagda verkningsgraden som Sinha och Wan Nik presenterar har stor trovärdighet. När det gäller gasturbinelektrisk framdrivning är alltså COGES mer fördelaktigt jämfört med enbart gasturbiner med avseende på bränsleförbrukning, effekt och verkningsgrad.

Ett exempel på när avgasernas värme går till spillo är vid ACGT som bara består av gasturbiner. ACGT är därför inte ultimata ur ett miljöperspektiv eftersom energi går förlorad. Genom att kombinera anläggningen med en ångcykel skulle verkningsgraden ha blivit högre. På så vis kunde det också blivit lönsamt att driva fartyg med kombianläggning längre än 4000 sjömil, där bränsleförbrukningen för DFDE annars var lägre.

För en vidare diskussion av COGES- och DFDE-framdrivning granskas deras tillgänglighet och tillförlitlighet. Det framgår ur litteraturstudien att gasturbiner har högre tillgänglighet eftersom de bättre klarar av stora belastningsförändringar och har längre underhållsintervall. DFDE har dock fördelen att maskinrumsbesättningen har mer erfarenhet av dieselmotorer och tiden för underhåll kan därför reduceras. Samtidigt har DFDE till viss del större redundans och underhåll kan ske på en maskin samtidigt som de andra är i full drift. För gasturbiner som saknar redundans kan underhåll endast ske i hamn, eller genom att fartyget går med reducerad hastighet medan underhållsarbetet utförs. Att underhåll sker iland kan vara ett billigare alternativ eftersom tiden i hamn reduceras, dessutom kan maskinrumsbesättningen då vara

mindre. En nackdel med det här upplägget visar sig däremot vid maskinhaveri på oceanfart. I närfartsområden stärker den genomtänkta lösningen med utbytbara turbiner tillgängligheten för DFGE och COGES i jämförelse med DFDE. För att förbättra redundansen skulle gasturbiner och dual fuel-motorer kunna kombineras som en elektrisk version av CODAG. Det krävs emellertid fler aspekter för att motivera detta framdrivningssystem, varav den tankegången lämnas härvid.

Driftstoppen som presenteras i avsnitt 4.2 är inte jämförbara. För att möjliggöra en rättfärdig jämförelse krävs det att fler av artiklarna presenterar driftdata och att begreppet driftstopp definieras. Med enbart två källor kan värdena anses som en tillfällighet och därmed inte nödvändigtvis representativa. Driftstopp kan betyda totalt maskinhaveri eller problem med en enstaka komponent, som inte nödvändigtvis behöver påverka driften. Det finns även planerade driftstopp för underhållsarbeten.

Tillgängligheten för gasturbiner är avsevärt större än för dual fuel-dieselmotorer när det gäller möjligheterna att ta tillvara på BOG:en eftersom de kan använda den under hela framdrivningen. Avsaknaden av den här förmågan för dual fuel-dieselmotorer är en klar nackdel ur ett miljöperspektiv. En annan märkbar skillnad mellan systemen är att gasturbiner behöver ett högre tryck på gasen fram till bränsleinjektorerna. Att höja trycket på gasen till 40 barö kräver en stor kompressor som drar mycket elektrisk effekt. Det framgår inte om den effekten är medräknad i gasturbinanläggningarnas verkningsgrad. En ytterligare nackdel med ett så högt tryck på gasen är de säkerhetsproblem som uppstår vid ett eventuellt läckage.

En likhet mellan gasturbinelektrisk och dieselektrisk framdrivning som framgår ur litteraturstudien, är att de upptar förhållandevis lite skrovutrymme jämfört med mekaniska framdrivningssystem eftersom de inte behöver placeras i anknytning till propelleraxeln. Den främsta fördelen med elektrisk framdrivning är följaktligen möjligheterna till ökat lastutrymme i skrovet. Mer specifikt för gasturbinelektrisk framdrivning är att DFGE tar mindre plats än COGES eftersom det i COGES ingår ytterligare en (ång-) turbin med generator och en kondensator i ångcykeln.

Dieselmotorer placeras inne i skrovet eftersom deras tyngd kräver ett stadigt fundament. Gasturbinerna å andra sidan kan placeras på akterdäck tack vare att de är mindre och lättare. Ett fartygs stabilitet påverkas generellt av tyngre komponenters placering och för en ökad stabilitet placeras de längre ner i skrovet. Stabiliteten för större LNG-tankfartyg påverkas inte lika mycket av en högre placering av huvudmaskineriet som den gör för mindre LNG-tankfartyg. Placeringen är ett medvetet val till förmån för en ökad lastkapacitet. En jämförelse av stabiliteten för gasturbiner och DFDE, gynnar gasturbinerna eftersom de har en lägre vikt och på så sätt inte påverkar stabiliteten i lika stor grad.

De nämnda fördelarna gör DFDE och COGES till starkt konkurrenskraftiga gentemot lågvarviga dieselmotorer och ångturbindrift. Även det faktum att lågvarviga dieselmotorer kräver en återkondenseringsanläggning (som kräver utrymme och har en relativt hög elförbrukning) samt ångturbiners låga verkningsgrad, bedöms som en betydande faktor för erkännandet av COGES och DFDE som kvalificerade framdrivningsalternativ.

5.2 Metoddiskussion

Metodvalet bedöms som mycket relevant för att besvara frågeställningen genom ett objektiva förhållandesätt, vilket stärker studiens validitet. Den största nackdelen med en litteraturstudie är svårigheterna med att finna rätt material och data inom det valda ämnet för att säkerställa studiens tillförlitlighet. Om studien skulle göras om skulle kanske ett annat resultat presenteras beroende på vilket material som har förekommit och granskats men resultatet bedöms trots det ha en god reliabilitet.

Författarna har i efterhand reflekterat över huruvida intervjuer skulle påverkat studien och eventuellt givit en större förståelse över hur valet kring framdrivningsalternativ blir verklighet. Tillämpning av intervjuer kritiserar hårt eftersom resultatet kommer direkt från en person eller ett företag och som inte granskas på samma sätt som för vetenskapliga artiklar. Det här skulle påverka studiens tillförlitlighet till det sämre.

6. Slutsats

Studien visar att COGES med hänsyn till verkningsgrad och bränsleförbrukning är den enda konkurrenskraftiga lösningen för gasturbinelektrisk framdrivning av LNG-tankfartyg. COGES har dessutom en högre verkningsgrad än dual fuel-dieselelektrisk framdrivning. Det går inte genom den här studien att dra en slutsats om huruvida bränsleförbrukningen skiljer sig åt mellan de båda framdrivningssystemen, däremot är COGES betydligt bättre på att utnyttja BOG:en.

COGES har en högre tillgänglighet än DFDE med avseende på underhållstimmar medan DFDE å andra sidan har en högre redundans. Studien bekräftar inte vilket av framdrivningsalternativen som påverkas mest av driftstopp. Ett LNG-tankfartyg med COGES erhåller ett större tillgängligt lastutrymme än ett likvärdigt fartyg med dual fuel-dieselmotorer.

De här för- och nackdelarna resulterar i att valet av framdrivningssystem beror på vilka egenskaper som är prioriterade. Författarna anser att COGES har goda förutsättningar för att konkurrera med DFDE-framdrivning av LNG-tankfartyg.

6.1 Förslag på framtida examensarbeten

- Författarna ser en fortsatt studie kring verkliga data (om eller när de blir tillgängliga) från LNG-tankfartyg med COGES som aktuellt inom ämnesområdet.
- Vidare skulle en djupare studie kring ett integrerat elektriskt framdrivningssystem, det vill säga en elektrisk version av CODAG, vara intressant för att se dess potential.

Referenser

Alfredsson, A., Jacobsson, K. A., Rejminger, A. och Sinner, B. (1996) *Elmaskiner*. Andra upplagan. Stockholm: Liber AB.

Alvarez, H. (2006) *Energiteknik*. Tredje upplagan. Lund: Studentlitteratur AB. (Del 1).

Alvarez, H. (2006) *Energiteknik*. Tredje upplagan. Lund: Studentlitteratur AB. (Del 2).

Andersson, T. (2002) *Maskinsystem ombord*. [Elektronisk] Upplands Väsby: TA-driftteknik.

Bunkerworld (2014) <http://www.bunkerworld.com/prices/> (2014-03-26).

Castel, J.F. och Leriche, J. *Feedback on the operation of the dual fuel diesel electric propulsion on LNG carriers: Impact of gas fuel quality on propulsion efficiency*. 16-19 april, 2013, Houston.

Chang, K, Chang, D, Rhee, T, Nam, K, Lee, D, Jeong, Samheon. (2008). A study on availability and safety of new propulsion systems for LNG carriers. *Reliability Engineering and System Safety*, vol 93, nr 12, ss. 1877 – 1885. DOI: 10.1016/j.ress.2008.03.013.

Cohen, H., Rogers, G.F.C. och Saravanamuttoo, H.I.H. (1996) *Gas turbine theory*. Fjärde upplagan. Harlow: Longman.

General Electric (2012) <http://www.geaviation.com/engines/marine/lm2500.html> (2014-04-02).

Gilmore, R., Hatzigrigoris, S., Mavrakis, S., Spertos, A. och Vordonis A. (2005) *LNG carrier alternative propulsion systems*. SNAME Greek Section (2005).

Hamworthy. (2012) *LNG systems for marine application*. Oslo: Hamworthy.

Haraldsson, Lennart (chefsingenjör, Wärtsilä) gästföreläsning Chalmers, Göteborg 8 november 2013.

Harvey, Jr, H.F., Thau, W.E (1925) Electric Propulsion of Ships. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol XLIV, ss. 497 - 522. DOI: 10.1109/T-AIEE.1925.5061130

Haun, E. (2013) Gas Turbine-Powered LNG Carrier Joint Design Announced. *MarineLink*, 3 december 2013. <http://www.marinelink.com/news/turbinepowered-carrier361623.aspx> (2014-02-25)

Höst, M., Regnell, B., Runeson, P. (2006) *Att genomföra examensarbete*. Lund: Studentlitteratur AB.

Höyer, A. och Persson, J. (2013) *Gaskombianläggningar på fartyg*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (Examensarbete inom institutionen för Sjöfart och Marin Teknik. Sjöingenjörsprogrammet).

Kalyanaraman, K. och Jeffs, E. (2005) New applications for Trent. *Turbomachinery International*, september - oktober. <http://search.proquest.com/docview/209798921> (2014-02-01)

Kivelä, T. och Nurmi, J. *Machinery selection from an operator's point of view: alternatives to steam turbine on an LNG carrier*. 10 oktober, 2001, Hamburg.

Koren, J, Richardsen, P.W. (2007) LNG shipping world changing: Gas carriers expanding rapidly. *Oil & Gas Journal*. 2007.
<Http://search.proquest.com.proxy.lib.chalmers.se/docview/274553678/abstract?accountid=10041> (23 januari 2014)

Kuiken, K. (2008) *Diesel Engines I*. Onnen: Target Global Energy Training.

Kuiken, K. (2008) *Diesel Engines II*. Onnen: Target Global Energy Training.

Mathiasson, A. och Friberg, H. (2008) *LNG för fartygsdrift i Sverige*. Stockholm: Sweco.

McGuire, G. och White, B. (2000) *Liquefied gas handling principle on ships and in terminals*. Tredje upplagan. London: Witherby och Company Limited.

Morsy El-Gohary, M, (2012) The future of natural gas as a fuel in marine gas turbine for LNG carriers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol 226, nr 4, ss. 371-377. DOI: 10.1177/1475090212441444

Overgaard, Jørgen (informationsansvarig, MAN B&W) föreläsning under studiebesök MAN B&W, Köpenhamn 19 september 2013.

Peters, W.F. och Hansen, K.A. *A Gas Turbine-Electric Propulsion System for an LNG Carrier*. 25-28 april, 1979, Houston.

Rolls Royce (2014) http://www.rolls-royce.com/marine/products/diesels_gas_turbines/gas_turbines/mt30.jsp (2014-04-02).

Romero, J., Orosa, J.A. och Oliveira, A.C. (2012) Research on the Brayton cycle design conditions for reliquefaction cooling of LNG boil off. *Journal of Marine Science and Technology*, vol 17, nr 4, ss. 532-541. DOI: 10.1007/s00773-012-0180-3

Siemens (2014) <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/gas-turbines/> (2014-04-02).

Shearer. G., och Tusiani, M.D. (2007) *LNG a nontechnical guide*. Tulsa: Pennwell corporation.

Sinha, R.P., Wan Nik, W.M.N. (2012) Investigation of propulsion system for large LNG ships. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 36. 7 december 2011.
<http://iopscience.iop.org.proxy.lib.chalmers.se/1757-899X/36/1/012004/> (2014-01-22).

Träff, Bo (utbildningsansvarig, Siemens Industrial Turbomachinery AB) föreläsning under studiebesök på Siemens, Finspång 12 november 2013.

Woodyard, D.F. (2009) *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. [Elektronisk] Nionde upplagan. Burlington: Elsevier Ltd.

Yeo, D., Ahn, B., Kim, J., Kim, I. (2012) *Propulsion alternatives for modern LNG carriers*. 24-27 april, 2007, Barcelona.

Bilaga 1 – Övergripande innehåll i artiklarna

Artikel		Innehåll					
Titel	Författare	År	Ångturbiner	DERL	DFDE	COGES	DFGE
The future of natural gas as a fuel in marine gas turbine LNG carriers	M Morsy El-Gohary	2012	x	x	x		x
Investigation of propulsion system for large LNG ships	Sinha, R.P., Wan Nik, W.M.N.	2012	x	x	x	x	
Alternatives to steam turbines in an LNG carrier	Kivelä, T., Nurmi, J.	2001	x	x		x	
Feedback on the operation of the dual fuel diesel electric propulsion on lng carriers: impact of gas fuel quality on propulsion efficiency	Castel, J-F., Leriche, J.	2013			x		
New applications for Trent	Kalyanaram an, K., Jeffs, E.	2005		x	x	x	
A study on availability and safety of new propulsion systems for LNG carriers	Chang, D., Rhee, T., Nam, K., Chang, K., Lee, D., Jeong, S.	2008			x	x	x