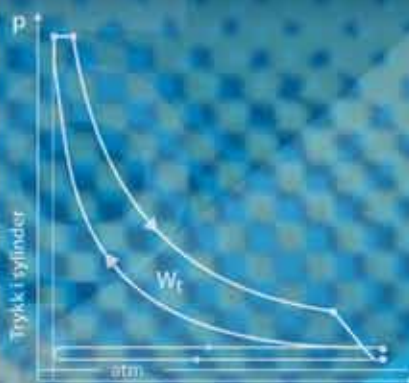


Forfattere: Leif Lundby og Vilmar Æsøy

## Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs

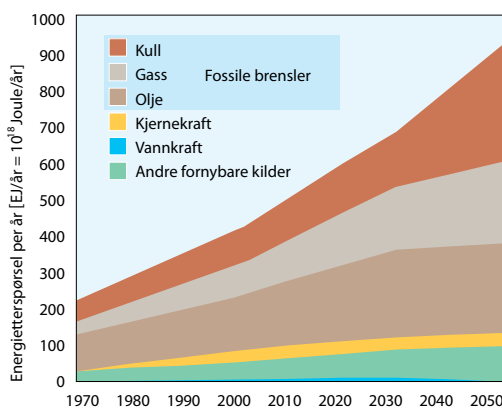


### Innhold

Innledning.....	2
Grunnleggende energifysikk.....	4
Grunnleggende termofysikk.....	6
Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs, oversikt over metoder.....	8
Varmemotorer. Definisjoner og oversikt.....	10
Stempelmotorer med indre forbrenning: otto- eller dieselmotor, totakts- eller firetaktsmotor?.....	12
Dieselmotors arbeidsmåte.....	14
Dieselmotors arbeidsevne og effekt.....	16
Valg av dieselmotor ved et gitt effektbehov.....	18
Dieselmotors brenselforbruk.....	20
Dieselmotors mekaniske påkjenning.....	22
Dieselmotors plassbehov. Gir og clutch.....	24
Brensler for diesel-, gass- og bensinmotorer. Forbrenningslære.....	26
Forbrenning i diesel-, gass- og bensinmotorer.....	28
Gassturbiner.....	30
Gassturbin og dampturbin – kombianlegg.....	33
Produksjon av elektrisk energi ved hjelp av brenselceller.....	34
Energioverføring om bord i skip.....	36
Mekanisk energioverføring.....	36
Elektrisk energioverføring.....	38
Hydraulisk energioverføring.....	40
Sammenligning mellom ulike systemer.....	42
Oppgaver.....	44
Referanser.....	48



**Kapitlet handler om hvordan skip og andre marine konstruksjoner til havs kan skaffe seg energi i former som kan utnyttes til skipets framdrift og andre formål om bord. Dette betyr at det må skaffes tilgang til mekanisk og elektrisk energi, noe som hittil har vært forbundet med store utslipp av den miljøskadelige gassen CO<sub>2</sub>. I kapitlet brukes betydelig plass på vurdering av hvordan slike utslipp kan reduseres også ved forbrenning av fossile brenslere. For øvrig vises til eget kapittel 13 om hvordan havets fornybare ressurser kan utnyttes.**



**Verdens energiforbruk siste 40 år og prognose for energibehovet i de neste 40 år, fordelt på energikilder.**

Fra IEA Reference scenario

## Energiforbruk på verdensbasis. Globale miljø/klima-problemer

All øking i levestandard og alle viktige framskritt i menneskehetens historie har blitt fulgt av en øking i energiforbruket. Sammen med at det har blitt stadig flere mennesker på jorda, har dette resultert i en stadig økende etterspørsel etter energi. Utviklingen av energiforbruket i verden siden 1970 er vist nedenfor. Figuren viser også hvordan man antar at forbruket vil fortsette å stige i de nærmeste tiårene.

Som det framgår, er det forbruket av de fossile brenslene (kull, olje og gass) som hele tiden har stått for det aller meste av energiforbruket. I dag er denne andelen i overkant av 80 %, og det synes som om bruken av disse brenslene både absolutt og relativt sett vil fortsette i de nærmeste tiårene, selv om alternative energiformer også vil bli brukt i stadig økende grad. Dette er uhyre bekymringsfullt. Det er få som i dag tviler på at utslippet av klimagassen CO<sub>2</sub> fra de fossile brenslene etter hvert vil gi enorme miljø/klima-problemer på grunn av oppvarming av jorda. Det må derfor være en forutsetning for den utvikling som er skissert i figuren, at det utvikles metoder til å kontrollere disse CO<sub>2</sub>-utslippene

Det er altså av avgjørende viktighet at det gjøres noe på global basis for å stoppe økingen av CO<sub>2</sub>-utslippene. EU har derfor satt seg følgende mål, som skal gjennomføres i disse landene innen år 2020, og som også Norge vil slutte seg til:

- Produksjonen av fornybar energi (vindkraft, vannkraft og bioenergi) skal økes med 20 %
- Utslippene av klimagassen CO<sub>2</sub> skal reduseres med 20 %
- Energiforbruket skal reduseres med 20 %

## Energiforbruk i Norge, innenriks og utenriks. Havet som energikilde.

Figuren på høyre side viser hvor mye landet vårt bruker av energi årlig, både innenriks og utenriks. Figuren er selvforklarende. Den er interessant fordi den viser at energiforbruket til norske aktiviteter knyttet til havromsteknologier (innenriks og utenriks, farget med blått), i dag utgjør mer enn det samlede industrielle og private forbruket i fastlands-Norge. Dette har to viktige konsekvenser, som beskrevet i de to første kulepunktene nedenfor. Det tredje kulepunktet peker på hvordan havromsteknologier i framtida også kan bidra til å løse de miljø/klima-problemer som i dag bekymrer hele verden.

- Havromsteknologiene er av kolossal positiv betydning for det norske samfunnet. Det er nemlig stort sett slik at et stort energiforbruk innenfor en virksomhet, normalt gir tilsvarende store nærings- /industrimessige aktiviteter.

# Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs

- Det følger meget store miljømessige utfordringer med disse teknologiene. Det er nemlig også slik at praktisk talt alt energiforbruk knyttet til aktivitetene til havs i dag kommer fra forbrenning av fossile brenslers. Som vi skal se senere, er det tilnærmet proporsjonalitet mellom fossilt energiforbruk og CO<sub>2</sub>-utslippet. Derfor er det mulig å etablere en skala for CO<sub>2</sub>-utslipp ved siden av skalaen for energiforbruket, som vist i figuren.
- Havet omfatter enorme fornybare energikilder (vind-, bølge- og havstrøm-kraft) som i framtida kan utnyttes til å redusere miljøproblemen, se kapittel 13.

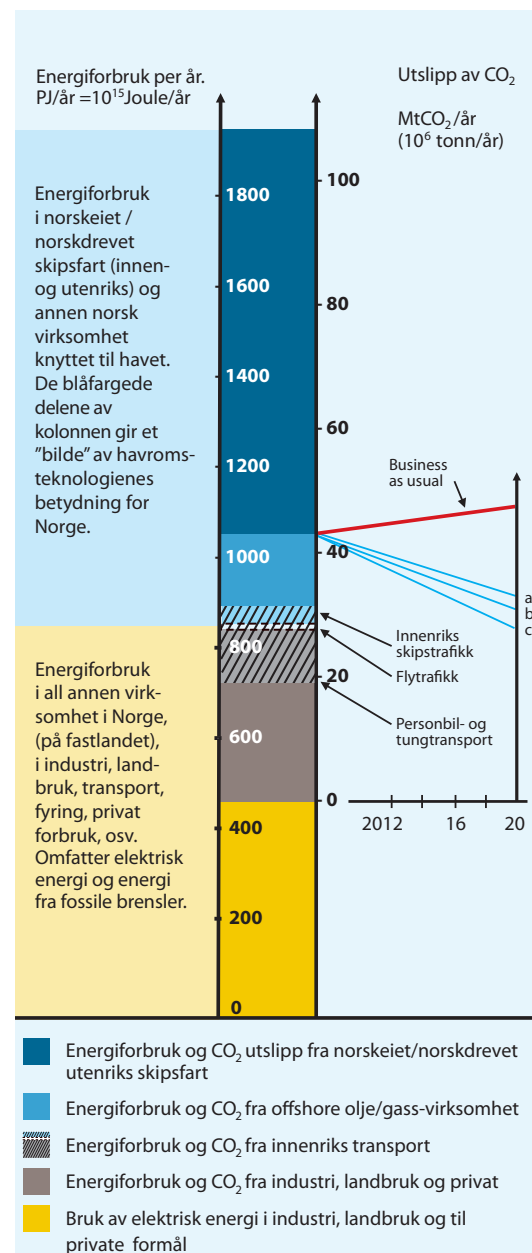
Det er disse tre punktene som er hovedgrunnene til at det har blitt laget en egen lærebok som gir smakebiter av havromsteknologiene og som viser hvordan disse teknologiene bygger på anvendelser av den viktige fysikken og matematikken som undervises i videregående skoler. Det er nemlig allerede her at utdanningen av de som skal arbeide med løsninger av miljøproblemen i framtida, egentlig starter.

## MÅL

### Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

- Ha blitt godt kjent med de viktigste temaene innen begrepet energi, som er et av de mest sentrale begreper innen naturvitenskap og teknologi.
- Ha blitt kjent med grunnleggende temaer innen termodynamikken.
- Ha blitt godt kjent med virkemåten til dieselmotorer, ottomotorer (gass og bensin) og gassturbiner. Kunne beregne disses brenslersforbruk og CO<sub>2</sub>-utslipp.
- Kjenne til kjemisk oppbygning av fossile brenslers, kjemiske reaksjoner ved forbrenning av disse og beregning av CO<sub>2</sub>-dannelse per kg brensel. Vite hvorfor CO<sub>2</sub>-utslippene er så skadelige for jordas framtidige klima.
- Ha fått god oversikt over alternative brenslers, for eksempel biobrenslers.

## Illustrasjon av energiforbruk og utslipp av CO<sub>2</sub> fra norskeide/norskdrevne virksomheter.



### Utslippene slik de skal reduseres:

- iflg. Klimaforliket i Stortinget jan. 08.
- iflg. EU krav
- iflg. Regjeringens mål når kvotehandling inkluderes

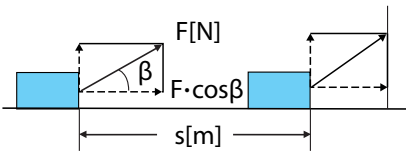
# Grunnleggende energifysikk

## 1. Forskyvingarbeid (translasjonsarbeid eller skyvekraftarbeid)

En kraft  $F$  utfører et arbeid  $W$  når den forskyves en strekning  $s$ , men det er bare komponenten  $F \cdot \cos \beta$  som bidrar

$$W = F \cdot s \cdot \cos \beta$$

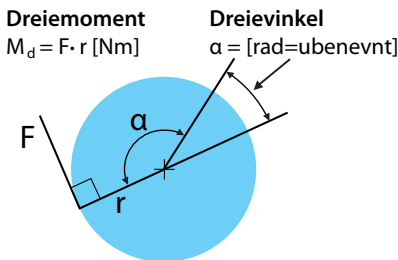
Måleenheten for arbeid er  $J = N \cdot m$  (Joule = Newton · meter)



## 2. Rotasjonsarbeid.

Dersom kraften utfører en sirkelbevegelse, gir den et rotasjonsarbeid, se side 3-24

$$W = M_d \cdot \alpha = F \cdot r \cdot \alpha$$

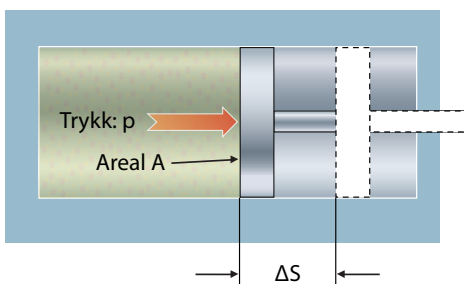


## 3. Volumendringsarbeid

Gasstrykket forskyver stemplet en strekning  $\Delta S$ . Hvis trykket er konstant, blir:

$$W = \text{kraft} \times \text{vei} = p \cdot A \cdot \Delta S = p \cdot \Delta V$$

Dersom trykket varierer, se side 7-6)



Tre definisjoner av begrepet arbeid, basert på bruk av mekaniske krefter. Også elektriske krefter kan lage arbeid, se side 7-38. Videre kan arbeid alltid defineres med utgangspunkt i effekt:  $W = P \cdot t$ , hvor  $P$  er effekt og  $t$  er tid [ $J = W \cdot s$ ]

## Grunnleggende stoff om energi, delvis repetisjon

- **Hva er egentlig energi?** Det er ikke lett å forklare dette. Mange forsøker å ta utgangspunkt i at energi er *noe som kan påvirke omgivelsene*. Mer presist kan vi si at *energi er noe som gir et legeme eller et system evne til å utføre arbeid*.

- **Hva er arbeid? Hvilken måleenhet har arbeid og dermed også energi?** Arbeid defineres og måles primært som vist i punkt 1 til venstre. Også energi må måles i Joule (J). Det vises til side 3-24 når det gjelder arbeid ved roterende bevegelse. Punkt 3 viser en tredje variant av arbeid, som er viktig i motorteknologien, se side 7-6.
- **Hva sier energiloven?** Energi kan verken skapes eller forsvinne, men den kan overføres mellom legemer eller omformes. Loven kalles også for energiprinsippet.

- **Hvilke former kan energi eksistere i?** Energi har to hovedformer: potensiell energi (stillingsenergi) og kinetisk energi (bevegelsesenergi). Den kan videreinndeles i seks energiformer:
  - 1) Mekanisk energi: Potensiell eller kinetisk energi knyttet til legemer eller partikler
  - 2) Kjemisk energi: Potensiell energi knyttet til molekylens struktur
  - 3) Indre energi: Hovedsakelig kinetisk energi knyttet til temp. bevegelser hos atomer og molekyler i en gass, væske eller et fast stoff
  - 4) Elektrisk energi: Potensiell energi i et elektrisk felt, som setter elektroner i en leder i bevegelse
  - 5) Strålingsenergi: Elektromagnetisk stråling fra sola
  - 6) Kjerneenergi: Potensiell energi knyttet til atomkjerners struktur

- **Hvordan kan energi overføres eller omformes? Hva er varme?**

Energioverføring og energiomforming kan skje på to måter:

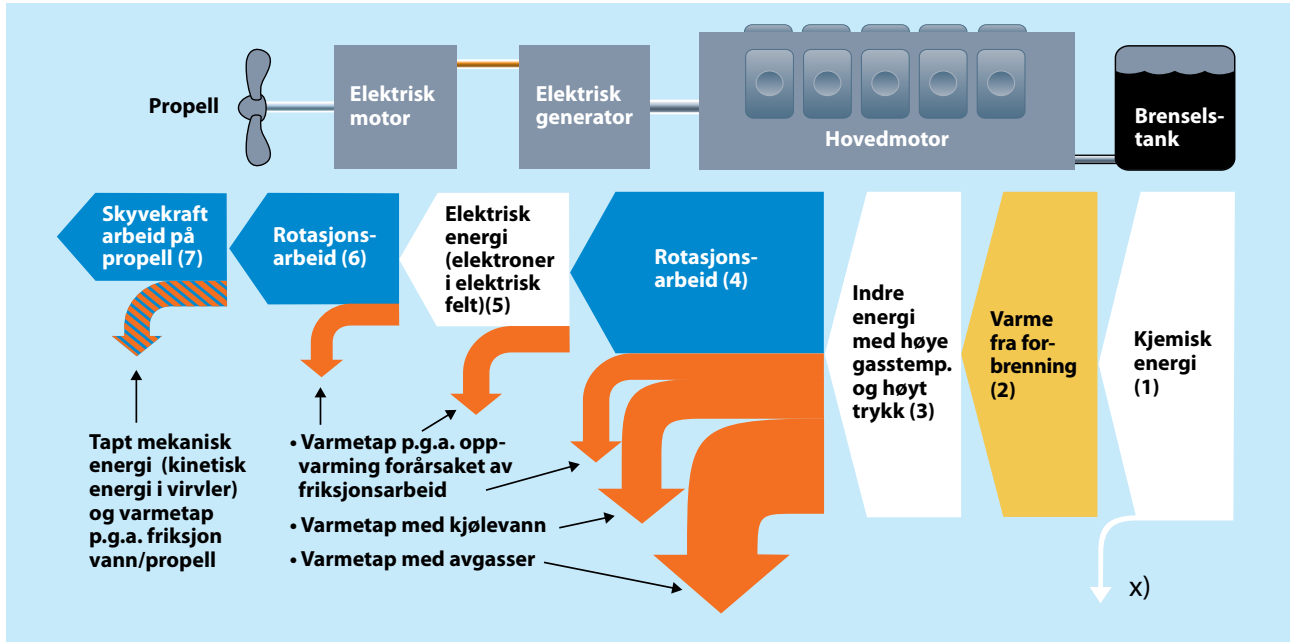
- 1) Ved hjelp av *arbeid*. Når krefter eller dreiemomenter gjør et arbeid, overføres det alltid energi fra ett legeme til et annet. Samtidig kan energien omformes.
- 2) Ved hjelp av *varme*. Mellom to systemer med forskjellig temperatur vil det overføres energi fra systemet med høy temperatur til systemet med lavere temperatur gjennom stråling eller direkte kontakt. Varme er overført energi hvor det er en temperaturforskjell som er "drivkraften" for transporten.

- **Hva er en energikjede?** Denne viser hvordan energi overføres fra et legeme eller system til et annet eller fra en form til en annen form.
- **Hva mener vi med en energikilde og en energibærer?** Kilden er den ressursen som vi henter energien fra, og bæreren er det som frakter energien.
- **Hva mener vi med fornybar energikilde og fossil energikilde?** En fornybar kilde går ikke tom, men fylles stadig opp igjen med energi som kommer direkte eller indirekte fra solas stråling. Fossile kilder er brensler som er dannet av organismer som levde for millioner av år siden og er altså *ikke fornybare*.

## Energikjede ved dielelektrisk framdrift av et skip

**Eksempel 7.1.** I et dielelektrisk skip drives propellen av en elektromotor. Denne forsynes med elektrisk strøm fra en elektrisk generator som er koblet til en dieselmotor som går på en marin dieselolje. Lag en figur hvor framdriftssystemet framstilles som en energikjede. Forklar hva som foregår i kjeden ved å bruke mest mulig av terminologien fra forrige side. Løsning er gitt i figur og nedenfor.

*Energikjede som viser hvordan arbeid og varme overfører energi i et dielelektrisk framdrifts-anlegg*



1. Energikilden er framstilt av en fossil råolje (se sidene 7-26 og 10-9) og er altså ikke fornybar. Energien er lagret i oljen som *kjemisk energi*. Dette er en potensiell energi.
2. Dieseloljen sprøytes inn i motorens sylindere hvor den forbrenner. Forbrenningsproduktene (primært CO<sub>2</sub>- og H<sub>2</sub>O-molekyler) får temperaturer på mer enn 3000 grader C og varmer opp øvrige gasser i sylindrene slik at temperaturen jevner seg ut. Den kjemiske energien resulterer altså i *varme*. En meget liten del (x, se figur) forbrenner dårlig/ikke i det hele tatt.
3. Etter forbrenningen eksisterer energien som *indre energi* i sylindreladningene, som nå holder ca. 2000 grader C. En dieselmotor er en stempelmotor, det vil si at sylindreladningene er fullstendig inne-stengt. Trykket på gassen stiger derfor til ca. 200 bar på grunn av oppvarmingen etter forbrenningen.
4. Pga. det høye trykket skyves stemplene nedover i sylindrene. Dermed utfører stemplene *forskyvningsarbeid* som omformes til *rotasjonsarbeid* vha. et veivsystem. Det opptrer tre tapsposter under prosessen.
5. Hovedmotoren er direkte koblet til en generator som produserer *elektrisk energi* i form av elektrisk felt og strøm. Det er det tilførte arbeid som muliggjør omformingen til elektrisk energi.
6. Den elektriske strømmen tilføres elektromotoren som utfører et elektrisk *arbeid*. Som i hovedmotoren, er arbeidet knyttet til et dreiemoment, altså en rotasjon
7. Rotasjonsarbeidet tilføres propellen. Her omformes dette til et *forskyvningsarbeid* slik at skipet får den nødvendige skyvekraft. Noe av det tilførte arbeidet tapes gjennom kinetisk energi i virvler.
8. *Tapsposter*. Gjennom hele kjeden opptrer diverse tap av energi, som framgår av figuren. Disse gir til slutt varmeutveksling med omgivelsene.

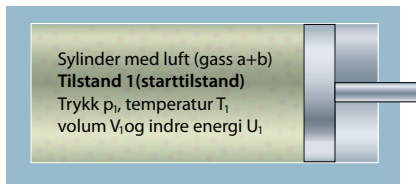
-  Diverse former for lagret energi
-  Energi omformet fra en form til en annen vha. varme (2)
-  Energi omformet fra en form til en annen v.h.j.a. forskyvnings/rotasjonsarbeid (4) og elektrisk arbeid (6)
-  Tapt energi, til slutt som varme



### Vi undrer oss på:

Ordet hybrid brukes bl.a. om noe som er en krysning av to arter. F.eks. kan en ekte hybridbil bli drevet av både en forbrenningsmotor og en elektrisk motor samtidig. Kan vi kalle et dielelektrisk skip for et hybridskip?

# Grunnleggende termofysikk



Gjennomsnittlig kinetisk energi pr. molekyl for toatomige molekyler:

$$E_k = \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_1$$

Indre energi for gass i sylinder:

$$U_1 = \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_1 \cdot N_{tot} \text{ [J]}$$

Mengder av gassene a og b:

$$m_L = m_a \cdot N_a + m_b \cdot N_b \text{ [kg]}$$

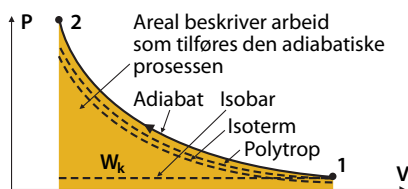
Her er:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]}$

(Boltzmanns konstant, felles for alle gasser)

$T = \text{abs. temp [K]} = 273 + \text{cel. temp}$

$m_a$  og  $m_b = \text{molekylmasser [kg]}$

$N_{tot} = \text{antall molekyler} = N_a + N_b$ , kan finnes av tilstandslign.



Tilstandsligningen:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{konstant}$$

Konstanten i denne ligningen kan uttrykkes v.h.j.a Boltzmanns konst:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = k \cdot N_{tot}$$

Adiabatisk tilstandsforandring:

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa = \text{konst.}$$

$\kappa = \text{adiabteksp.} = 1,4$  for luft (avtar med temp.)

**Begreper og ligninger for tilstandsforandringer ved kompresjon av en blanding av toatomige gasser (a + b), f. eks. luft ( $N_2 + O_2$ )**

Termofysikken er av spesiell betydning i motorteknikken, og vi må starte med en repetisjon og supplering av sentralt stoff fra dette fagområdet.

## Temperatur og indre energi

Stoffer er bygget opp av atomer og molekyler. Disse er alltid i bevegelse, enten stoffet er fast, flytende eller i gassform. I faste stoffer utsettes molekylerne for vibrasjoner, mens de i væsker og gasser får både translasjoner (forflytninger) og rotasjoner. Disse bevegelsene kaller vi **temperaturbevegelser. Temperatur er et mål for hvor stor molekylernes gjennomsnittlige kinetiske energi er.** Sammenhengen mellom denne energien og temperaturen framgår som vist til venstre.

Stoffer har også en indre *potensiell* energi fordi det virker krefter mellom molekylerne. *Den indre energien til en stoffmengde er summen av de indre kinetiske energiene (termiske energier) og den indre potensielle energien.* I gasser er den sistnevnte av liten betydning fordi det er relativt stor avstand mellom molekylerne. I væsker og faste stoffer spiller derimot de indre potensielle energiene stor rolle. Som oftest er det *forandringer* av de indre energiene som er mest aktuelle i beregninger. Figurene til venstre viser tilstandene før og etter kompresjonen av lufta i sylinderen til en forbrenningsmotor. Forandringen i indre energi under kompresjonen blir:  $\Delta U = U_2 - U_1$ .

## Gasstrykk. Tilstandsligningen for gasser. Adiabatisk tilstandsforandring

Når gassmolekylerne støter mot veggene i sylinderen, oppstår det krefter mot veggene. Med gasstrykk mener vi, som tidligere definert, kraft per flateenhet. Oftest er det mest praktisk å bruke bar som måleenhet for trykk,  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ . *Gasstrykket bestemmes av antall molekyler som treffer hver flateenhet og hastigheten til disse, altså temperaturen.* Trykket i tilstand 2 i figuren til venstre er derfor større enn i tilstand 1.

For trykk p, volum V og temperatur T i en avstengt gass gjelder at  $p \cdot V / T = \text{konstant}$ . Konstantens størrelse er avhengig av hvor stor gassmengde som er blitt avstengt. Den er proporsjonal med antall molekyler ( $N_{tot}$ ) og kan uttrykkes som  $k \cdot N_{tot}$ , hvor k er Boltzmanns konstant, som er felles for alle gasser. Dermed kan vi altså skrive:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = k \cdot N_{tot} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Tilstandsforandringen 1-2 kan foregå på forskjellige måter. Noen av disse kan for en kompresjonsprosess i en sylinder beskrives og illustreres i et p-V-diagram slik:

- **Isobar.** Tilstandsforandring med så sterk varmebortførsel at  $p = \text{konstant}$ . Dette gir en horisontal graf i p-V-diagrammet, med ligning:  $V_1 / T_1 = V_2 / T_2$
- **Isoterm.** Tilstandsforandring med en varmebortførsel som medfører at  $T = \text{konst.}$  Grafen blir en hyperbel med lign.  $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$
- **Adiabat.** Tilstandsforandring som er så rask at det ikke blir tid til varmebortførsel til omgivelsene i det hele tatt. Da gjelder ligningen  $p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa$  hvor  $\kappa$  er såkalt adiabateksponent, se fig. til venstre
- **Polytrop.** Tilstandsforandring som skjer raskt, men likevel med noe varmebortførsel. Ligning:  $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$  hvor  $1 < n < \kappa$

## Volumendringsarbeid

Arbeid som utføres av en gass i en sylinder med bevegelig stempel, kan ifølge side 7-4 beregnes av ligningen  $W = p \cdot \Delta V$ , hvor  $p$  er et konstant trykk og  $\Delta V$  er volumøkningen under stempelbevegelsen. Imidlertid varierer trykket som regel, f.eks. fra verdien  $p_3$  til  $p_4$  under ekspansjonen, som vist på figur til høyre. Vi kan da gå fram som beskrevet i figurteksten. Tilsvarende kan kompresjonsarbeidet  $W_k$  illustreres som fargelagt areal i nederste figur til venstre. Under ekspansjonen utføres arbeidet  $av$  gassen i motsetning til kompresjonsarbeidet, som gjøres på gassen.

## Termofysikkens to lover (hovedsetninger). Energikvalitet

Mens energiloven sier noe om energi generelt (se side 7-4), handler termofysikkens to lover om indre energi, varme og arbeid. Du skal ha lært om disse lovene tidligere i fysikken, men siden de er så viktige, ser vi på dem en gang til.

**Termofysikkens første lov.** Ved alle prosesser som foregår i et system, blir forandringen av systemets indre energi ( $\Delta U$ ) mellom to tilstander lik summen av arbeidet som gjøres på gassen ( $W$ ) og varmen som tilføres gassen ( $Q$ ),  $\Delta U = W + Q$ . Det må regnes med fortegn.  $\Delta U$  er positiv når den indre energien øker,  $W$  er positiv for arbeid som gjøres på systemet og  $Q$  er positiv for varme som tilføres. F.eks. får vi:

$$\Delta U_{1-2} = W_k \quad \Delta U_{1-3} = W_k + Q_{\text{til}} \quad \Delta U_{1-4} = W_k + Q_{\text{til}} - W_e$$

Av det første eksemplet ser vi at **det tilførte arbeidet under kompresjonen må resultere i økt indre energi, altså økt temperatur på gassen.** Dette er et viktig poeng for dieselmotorer.

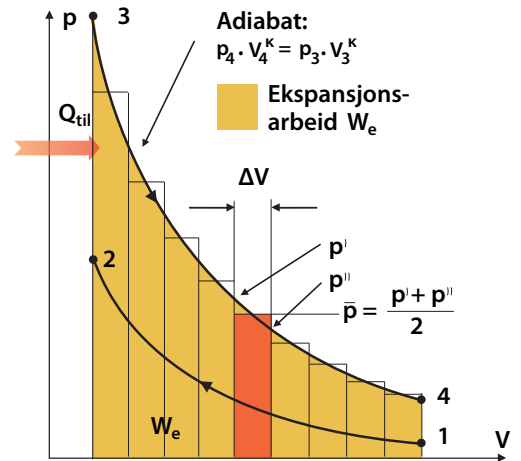
**Energikvalitet.** Generelt er det som oftest energiens *evne til å gjøre et arbeid* (drive fram f.eks. skip) som interesserer mest når vi vurderer energi. Hvis en stor del av energien kan utnyttes til nyttig arbeid i en prosess, kaller vi energien for *høyverdig*. Prosessens virkningsgrad er da høy. Dette er f.eks. tilfelle for mekanisk og elektrisk energi, som noen ganger kan omdannes til arbeid i sin helhet. I *lavverdig* energi er det bare en begrenset del som kan gjøres om til arbeid. Indre energi er eksempel på dette.

**Termofysikkens andre lov.** Denne handler om betingelsene for at indre energi kan omdannes til arbeid. Loven kan formuleres på mange ulike måter, men i forbindelse med forbrenningsmotorer er følgende formuleringer mest interessante:

- En maskin kan aldri omforme **all** tilført indre energi til mekanisk arbeid. Noe varme vil alltid gå tapt til omgivelsene. Virkningsgraden kan aldri bli 1,0
- For å oppnå høy virkningsgrad må varmetilførselen (forbrenningen) foregå ved en temperatur som på forhånd er høy. Med andre ord er den indre energien i en gass av høyere kvalitet jo høyere temperatur gassen har.

### Vi undrer oss på:

Hvordan kan vi forklare på en grei måte forskjellen mellom varme og temperatur?

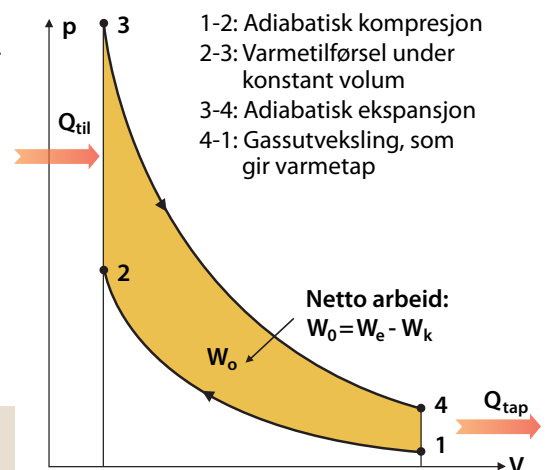


### Varmetilførsel og ekspansjonsarbeid i en stempelmotor

Mellom 2 og 3 foregår en varmetilførsel  $Q_{\text{til}}$  som er så rask at stemplet ikke får tid til å bevege seg. Her utføres ikke noe arbeid. Mellom 3 og 4 ekspanderer gassen. For den viste kolonnen med middeltrykk  $p$  kan vi tilnærmet bruke ligningen for volumendringsarbeid med konstant trykk fra side 7-4. Totalt ekspansjonsarbeid blir dermed:

$$W_e = \Sigma (p \cdot \Delta V)$$

Arbeidet framkommer som det fargelagte arealet under ekspansjonslinjen.



### Komplett arbeidsprosess under idealiserte forhold for en forbrenningsmotor av stempelmortype

Prosessens kalles *ottoprosess* og blir nærmere beregnet på side 7-12

# Produksjon av mekanisk og elektrisk energi

Utgangspunkt	Hovedformål	Framdrift av fartøy (mobile anlegg)					
	Hovedkilde	Ikke fornybar energi (kjerneenergi og fossile brensler)					
	Energiform	Kjerneenergi	Kjemisk				
	Energikilde	Uran	Olje	Olje	Olje	Olje	Naturgass Bensin
<b>Systembeskrivelser</b> Fysiske enheter som systemene er bygget opp av, er ført opp med fete typer. Virkemåtene er meget kort forklart slik at tabellen kan brukes uavhengig av øvrig tekst i kapitlet. Energi, eventuelt arbeid, som tilføres de fysiske enhetene, er markert med piler.	<b>1. Dampturbindrift med kjernekraftprodusert damp</b> <b>Fisjonsreaktor</b> Kjerneenergi omformes til termisk energi i "brensel"-elementer som varmer opp kjølevann rundt disse ↓ Indre energi (varmt vann) <b>Varmeveksler for dampproduksjon</b> ↓ Indre energi (damp) <b>Damp turbin</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Gir</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Propell</b> ↓	<b>2. Damp turbindrift med oljefyrt dampkjel</b> <b>Dampkjel</b> Kjemisk energi i brensel omformes ved kontinuerlig forbrenning til indre energi i forbr.gasser, som omdanner vann til damp (arbeidsmedium). Forbr.-gasser og arbeidsmedium er atskilt. ↓ Indre energi (damp) <b>Damp turbin</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Gir</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Propell</b> ↓	<b>3, 4 Gassturbindrift m. propell eller vannjet</b> <b>Gassturbin.</b> Strømningsmotor med kontinuerlig, indre forbrenning som gir forbr.gasser med indre energi og stor kinetisk energi. Gassene strømmer gjennom et turbinhjul og utfører dermed et arbeid ↓ Rotasjonsarbeid <b>Gir</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Propell</b> ↓ <b>Pumpe for vannjet</b> ↓	<b>5,6 Vanlig dieselmotordrift med/uten gir</b> <b>Dieselmotor.</b> Stempelmotor med gasstett sykklisk, indre forbrenning (selvtenning) som gir gasser med stor indre energi og trykkenergi. Gassene forskyver et stempel som via et veivsystem omdannes til rotasjonsarbeid ↓ Rotasjonsarbeid <b>Gir</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Propell</b> ↓ <b>Pumpe for vannjet</b> ↓	<b>7,8 Dieselelektrisk drift med/uten batteri</b> <b>Dieselmotor</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Elektrisk generator</b> ↓ <b>Elektrisk energi</b> ↓ <b>Batteri (kjemisk energi lagring)</b> ↓ <b>Elektrisk energi (strøm)</b> ↓ <b>Elektrisk motor</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Propell</b> ↓	<b>9,10. Ottomotor med naturgass/bensin-drift</b> <b>Ottomotor</b> Stempelmotor som beskrevet til venstre, men med fremmedtenning i stedet for selvtenning av brensllet) ↓ Rotasjonsarbeid <b>Gir</b> ↓ Rotasjonsarbeid <b>Propell</b> ↓	
	<b>Sluttprodukt</b>	<b>Energiform</b>	Mekanisk energi (skyvekraftarbeid fra propell, vannjet eller seil)				
	<b>Klimagasser</b>	CO2-fritt	CO2-utslipp				

## Kommentarer

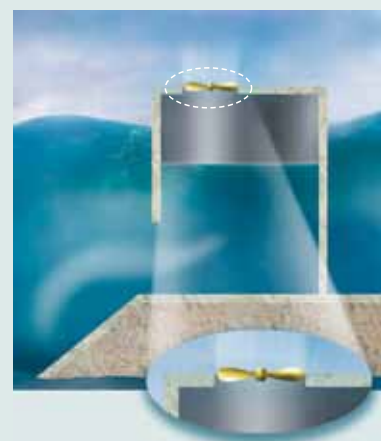
1. Anvendes kun i utenlandske militære fartøy, bl.a. pga. risiko ved kollisjoner.
2. Anvendes lite fordi forbrenning i en separat enhet utenfor arbeidsmaskinen gir dårligere virkningsgrad enn det som oppnås i en dieselmotor. Krever dessuten stor plass.
3. Krever liten plass. Anvendes derfor særlig i fartøy som må gjøres lettbygde (hurtigbåter)
4. Spesielt fordelaktig i ekstra hurtiggående fartøy som drives med vannjet.
5. Mellomhurtig dieselmotor med gir er klart det vanligste framdriftssystem for skip.
6. Langsomtgående dieselmotor koblet direkte til propellen er også svært mye brukt, særlig i store skip. Dette er *det framdriftssystem som gir best total virkningsgrad av alle*.
7. Brukes i undervannsbåter. Batteriene lades når båten går i overflatestilling. I undervannsdrift tar elektromotoren all energi fra batteriene.
8. Brukes mye i cruiseskip og store ferger. Hovedmotoren med generator kan plasseres uavhengig av elektromotoren/propellen, altså på et sted som gir lite støy og vibrasjoner om bord.
9. Bruk av naturgass reduserer CO2-utslipp. Anvendes en del i ferger.
- 10 Bensindrevet ottomotor er lettbygd og derfor typisk for hurtige båter m/ utenbordsmotor.



# energi til havs, oversikt over metoder

Produksjon av elektrisk energi (stasjonære anlegg til havs)							
Fornybar energi (biobrensler, solstråling, havenergi)							
		Elektromagn.	Mekanisk				Kjemisk
Hydrogen Naturgass	Biobrensel	Solstråling	Vind	Vind	Havstrøm Tidevann	Bølger	Naturgass Olje
11. Brenselscelledrift	12. Dieselmotor/ ottomotor med biobrensel	13. Solcelledrift	14. Seildrift	15. Vindkraftverk	16, 17. Hav- strøm/tidevann- kraftverk	18. Bølgekraft- verk m/ svingende vannsøyle	19,20. Kraftverk på plattformer for petr. utvinning
<p><b>Brenselscelle</b> Brenselscelle Hydrogen, ev. hydro- karboner og oksygen (i form av luft), til- føres cellen. I en kjemisk prosess produseres elektrisk strøm direkte. Se for øvrig sidene 7-34/35</p> <p>↓ Elektrisk energi</p> <p><b>Elektrisk motor</b></p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Propell</b></p>	<p><b>Dieselmotor Ottomotor</b> Biobrensler kan brukes i stedet for fossile i alle systemene 2 -10 foran. De kan være gass- eller væskeformige og blir behandlet på side 7.26</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Gir</b></p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Propell</b></p>	<p><b>Solcelle</b> Solcellens virke- måte er forklart i fysikken. Når lys treffer solcellen, omformes den elektromagnetiske energien direkte til elektrisk energi</p> <p>↓ Elektrisk energi</p> <p><b>Elektrisk motor</b></p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Propell</b></p>	<p><b>Seil</b> Luftas kinetiske energi utnyttes ved hjelp av seil til å gi skyvekraft- arbeid direkte</p> <p>↓</p>	<p><b>Vindturbin</b> Luftas kinetiske energi utnyttes direkte i en vindturbin til å gi rota- sjonsarbeid</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Gir</b></p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Elektrisk generator</b></p> <p>↓</p>	<p><b>Vannturbin</b> Vannets kinetiske energi utnyttes i en vannturbin til å gi mekanisk rotasjonsarbeid</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Gir</b></p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Elektrisk generator</b></p> <p>↓</p>	<p><b>Luftturbin</b> Havbølgenes energi (potensiell og kinetisk) fører til at den fri over- flata svinger i et kammer som vist i figur. Det lagres da trykkenergi i kammeret, som utnyttes i luft- turbinen til å gi rotasjonsarbeid</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Elektrisk generator</b></p> <p>↓</p>	<p><b>Dieselmotor Gassturbin</b></p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p><b>Elektrisk generator</b></p> <p>↓</p>
					Elektrisk energi (ilandføres eller utnyttes på plattformen)		
CO <sub>2</sub> -fritt						CO <sub>2</sub> -utslipp	

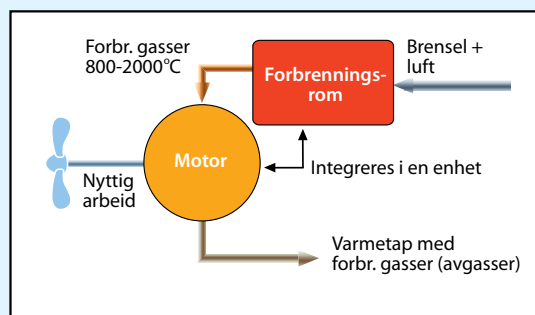
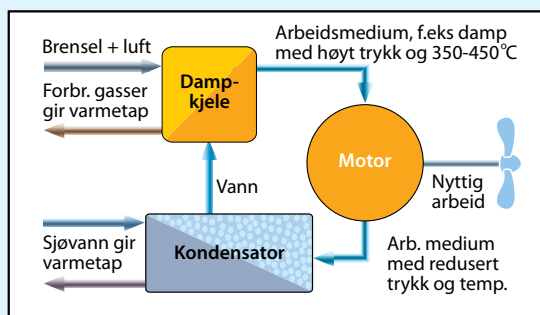
- 11, 21 Hittil lite/ikke aktuelt, men miljøvennligheten gjør prinsippet interessant på sikt. Grupperes imidlertid som fornybar energi og CO<sub>2</sub>-fritt bare dersom cellen drives med hydrogen som er produsert med fornybar energi. Kan prinsipielt også plasseres som nr.21, men produksjon av hydrogen fra olje/gass vil medføre CO<sub>2</sub>-utslipp
- 12 Blir mer og mer aktuelt i mange sammenhenger, se side 7-34)
- 13 Foreløpig for dårlig virkningsgrad på cellene, se s. 7-38. Skip er prosjektert, men ikke bygget
- 14 Det vises til side 3-34 når det gjelder virkemåte
- 15 Stadig økende interesse, se kap.13. Nyere el-generatorer for vindmøller har gjerne en utforming som gjør mekanisk gir overflødig
- 16 Foreløpig lite aktuelt pga. høye investeringskostnader
- 17 Som kommentar 16
- 18 Se kap.13
- 19 Svært mye anvendt i tidligere utbygginger, men erstattes i framtida i betydelig grad av forsyning av elektrisk energi fra fastlandet (i følge klimamål a på side 7-3).
- 20 Som kommentar 19



# Varmemotorer. Definisjoner og oversikt

I oversikten på sidene 7 - 8/9 er det de såkalte varmemotorene som praktisk talt er enerådende når det gjelder framdrift av fartøy. Disse motorene utnytter altså varme til å skaffe den nødvendige mekaniske energien. Varmen kommer fra forbrenningsgasser som dannes ved forbrenning av et brensel. Vi skal i det følgende analysere varmemotorene nærmere, særlig med tanke på hvilke som bruker minst brensel.

## Varmemotorer kan deles inn i to hovedgrupper



**Varmemotor med ytre forbrenning**  
(engelsk betegnelse: External combustion engine)

Varmen overføres fra forbrenningsgassene til et annet medium (oftest vanddamp) som utfører arbeidet. Forbrenningsgassene og arbeidsmediet er altså atskilt. Forbrenningen kan dermed skje kontinuerlig, også når arbeidsprosessen foregår syklisk.

**Varmemotor med indre forbrenning**  
(engelsk betegnelse: Internal combustion engine)

**På norsk brukes alltid betegnelsen "forbrenningsmotor".**  
Arbeidet utføres av selve forbrenningsgassene, som altså også er et arbeidsmedium. Forbrenningen skjer diskontinuerlig i stempelmotorene, kontinuerlig i strømningsmotorene.

**Stempelprinsipp**  
Den historiske **dampmaskinen** kan plasseres i denne "boksen". Den hadde en syklisk arbeidsmåte i to takter: arbeidsslaget og utstøtingslaget. Dampen kunne ha et trykk på opptil 30 bar. Dampmaskinene fikk en vesentlig betydning for transportsektoren og industrialiseringen på 1800-tallet. Denne perioden har derfor blitt kalt dampmaskinens århundre. For framdrift av skip ble dampmaskinen utkonkurrert av dieselmotoren utover på 1900-tallet. Den såkalte Stirlingmotoren hører også hjemme i denne boksen (se oppg. 7.10)

**Strømningsprinsipp**  
Damp av høyt trykk fra en dampkjel strømmer gjennom et turbinhjul og virker på samme måte som forklart for gassturbinen til høyre. Slike **damp-turbiner** ble tidligere mye brukt i skip, men har i dag bare interesse i spesielle tilfelle (f.eks. i kjerne-kraftbasert damp-produksjon).

**Stempelprinsipp**  
Kort forklaring: Baseres på en **syklisk arbeids-prosess** i en absolutt **gass tett** sylinder. Derfor blir både temp. og trykk etter den **diskontinuerlige forbrenningen** svært høye. Trykket gir en kraft på stemplet  $F = p \cdot A$  og dermed et volum-endringsarbeid når dette forskyves. Eksempler på motortyper innen denne gruppen er **dieselmotorer** og **ottomotorer**.

**Strømningsprinsipp**  
Kort forklaring: Baseres på **kontinuerlig forbrenning** i et rom som **ikke** er absolutt tett. Derfor blir både trykk og temp. mindre enn i en stempel-motor. I stedet oppstår en høyhastig strømning gjennom et eller flere turbinhjul. Når gassene her avbøyes av skovler, oppstår en tangentialkraft  $F = m \cdot \bar{a}$ . Denne gir et rotasjonsarbeid. Motorer som arbeider etter dette prinsippet, kalles **gasturbiner**.

**To arbeids-prinsipper:**  
Otto-diesel-prosess  
Ren ottoprosess

**To gassutvekslings-prinsipper:**  
Firetaktsmotor  
Totaktsmotor

**Tre turtallområder:**  
Langsomme (80-300 o/min)  
Mellomhurtige (300-1000 o/min)  
Hurtige (> 1000 o/min)

## Varmemotortyper og spesifikt brenselforbruk

Brenselforbruket er den viktigste størrelsen vi har for å evaluere varmemotorer. Ikke bare forteller denne hvor økonomisk motoren er i bruk, men den sier også mye om hvor miljøvennlig motoren er med hensyn til CO<sub>2</sub>-utslipp. Som vi har nevnt foran og som vi også kommer tilbake til senere, er det proporsjonalitet mellom brenselforbruk og CO<sub>2</sub>-utslippet.

Den vanligste måten å oppgi brenselforbruk på er det såkalte *spesifikke brenselforbruket*, se definisjonen til høyre.

Vi merker oss at størrelsen er *omvendt proporsjonal med motorens effektive virkningsgrad*. Denne bestemmes av to faktorer: arbeidsprosessens termiske virkningsgrad og motorens mekaniske virkningsgrad, se figur til høyre. Typiske tallverdier framgår nedenfor.

### Spesifikt brenselforbruk (b<sub>e</sub>) og effektiv virkningsgrad (η<sub>e</sub>) for fartøymotorer

	b <sub>e</sub> (g/kWh)	η <sub>e</sub>
Dieselmotor, langsom totaktsmotor:	160-180	0,53-0,47
Dieselmotor, mellomhurtig firetaktsmotor:	170-210	0,50-0,40
Dieselmotor, hurtig firetaktsmotor:	190-220	0,44-0,38
Ottogassmotor, mellomhurtig firetaktsmotor:		0,50-0,40
Gassturbin m / enkel arbeidsprosess:	240-280	0,35-0,30
Dampsturbin m/oljefyrt dampkjel:	275-310	0,31-0,27
Kombinert gassturbin og dampsturbin:	185-210	0,45-0,40

Verdiene gjelder ved 100% pådrag ("Maximum Continuous Rating", MCR)

## Hvorfor har gassturbiner og dampsturbiner høyt brenselforbruk?

Som vi skjønner fra forrige side, karakteriseres en gassturbin av at arbeidsmediet strømmer gjennom motoren under stasjonære forhold. Forbrenning og varmeutvikling skjer kontinuerlig, og etterfølgende turbinhjul med skovler utsettes konstant for de varme forbrenningsgassene. Samtidig er turtallet høyt og de mekaniske påkjenningene dermed meget store. Selv i konstruksjoner med de mest høyverdige materialer i skovlene må gasstemperaturene holdes under visse grenser. Det er ekstremt vanskelig å kjøle skovlene, som av strømnings-tekniske grunner må være så tynne som mulig. Dette betyr at *det disponible temperaturfallet i motorene i høyre del av tabellen på forrige side blir vesentlig mindre i en strømningsmotor enn i en stempelmotor. Dermed forteller termofysikkens andre lov oss at utviklet varme i en gassturbin blir av dårligere kvalitet enn i en stempelmotor, og brenselforbruket blir altså høyere.*

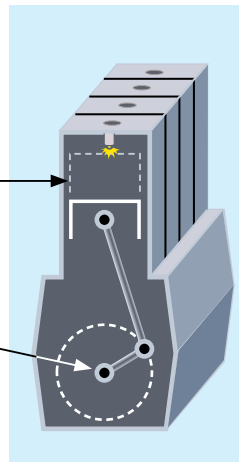
Dampsturbiner m/dampkjel er enda dårligere stillet. Maksimal damp-temperatur før turbinhjulet er mindre enn 450 °C, og resonnementet ovenfor vil bety enda mer. Dessuten opptrer det varmetap i dampkjelen. Dampsturbinanlegg installeres i dag nesten ikke i nye skip og behandles ikke nærmere i boka. For ordens skyld bør det imidlertid nevnes at det er en viss interesse for systemer som kombinerer gass-turbin- og dampsturbinanlegg, se side 7-33. Dette gir nemlig en økning i virkningsgraden.

Arbeidsprosessens virkningsgrad (også kalt termisk virkningsgrad, η<sub>t</sub>) baseres på arbeidet som utvikles i sylinderen

Effektiv virkningsgrad (η<sub>e</sub>) baseres på arbeid som står til disposisjon på **utgående aksel**. Pga. tappt friksjonsarbeid er:

$$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_t = 80-95\% \text{ av } \eta_t$$

**Forskjellen mellom termisk og effektiv virkningsgrad for en forbrenningsmotor**



### Definisjon av spesifikt brenselforbruk

En motors brenselforbruk kan oppgis pr. tidsenhet ( $\dot{m}_b$  kg/h). En tallverdi basert på en slik måleenhet ville imidlertid være avhengig av hvor stor motoren var, og den ville ikke fortalt noe om motorens brensel-økonomiske kvalitet. Derfor oppgis heller brenselforbruket pr. time og pr. kW utviklet effekt på **utgående aksel** (P<sub>e</sub> kW). Dette kaller vi **spesifikt brenselforbruk**:

$$b_e = \frac{\dot{m}_b}{P_e} \left[ \frac{\text{kg/h}}{\text{kW}} = \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right]$$

Som det framgår av måleenhetene, kan vi også si at det spesifikke brenselforbruket er et uttrykk for forbruket målt i kg pr. kWh arbeid på **utgående aksel**.

En motors spesifikke brenselforbruk (b<sub>e</sub> kg/kWh) henger nøye sammen med dens effektive virkningsgrad og brenslens energiinnhold (h<sub>n</sub> kWh/kg, se side 7-26):

$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot h_n}$$

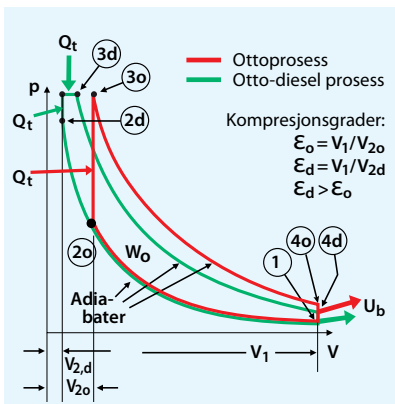


### Vi undrer oss på:

Hvordan kan sammenhengen mellom en motors effektive virkningsgrad og dens spesifikke brenselforbruk

$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot h_n} \text{ utledes?}$$

# Analyse av forbrenningsmotorer av stempeltype



## Ottoprosess

- 1-2o: Adiabatisk kompresjon
- 2o-3o: Varmetilførsel, konst. volum
- 3o-4o: Adiabatisk ekspansjon
- 4o-1: Varmebortførsel  $U_b$  (gassutveksling)

## Otto-dieselprosess

- 1-2d: Adiabatisk kompresjon
- 2d-3d: Varmetilførsel, under konst. volum og konst. trykk
- 3d-4d: Adiabatisk ekspansjon
- 4d-1: Varmebortførsel  $U_b$

## Sammenligning

Det forutsettes at begge motorene har samme maksimaltrykk, samme sylindervolum  $V_1$ , og får tilført samme varmemengde  $Q_t$ . Iflg. termofysikkens første lov må da:

$$Q_t = W_o + U_b$$

Ved arealbetraktninger innser vi at Ottoprosessen nødvendigvis må ha en ekspansjonsgraf som ligger høyere enn dieselprosessens. Ellers ville dieselprosessens gitt både størst arbeid  $W_o$  (areal innenfor lukket kurve) og størst bortført indre energi  $U_b$  for samme tilførte varme  $Q_t$ , noe som er umulig.

Iflg. tilstandsligningen må dermed:  
 $p_{4o} > p_{4d}$ ,  $T_{4o} > T_{4d}$ ,  $U_{b,o} > U_{b,d}$   
 $W_{o,o} < W_{o,d}$ .

**Resonnement som påviser hvorfor Otto- dieselprosess gir bedre termisk virkningsgrad enn Otto-prosess.** Dette gjelder ikke bare for idealiserte, men også for virkelige motorer.

## Definisjon av hovedtypene ottomotor og dieselmotor

**I ottomotorene** får lufta tilført brensel (bensinen, gassen) så tidlig at det er til stede i sylinderen under hele kompresjonen. Brenslet antennes like før øvre dødpunkt av en gnist (eller tennstråle). Siden alt brensel er til stede på forhånd, forbrennes det meget raskt, så raskt at stemplet nesten ikke får tid til å flytte seg. Det er svært viktig at brensel ikke selvtenner før gnisten kommer, og ottomotorene utføres derfor med vesentlig lavere kompresjon enn dieselmotorene.

**Dieselmotorene** utføres med høy kompresjon. Den komprimerte lufta får dermed så høy temperatur at den første delen av brensel (dieseloljen) som sprøytes inn i sylinderen mot slutten av kompresjonen, selvtenner og forbrenner meget raskt. Resten av brensel sprøytes inn i løpet av en kort periode etter øvre dødpunkt og forbrenner da etter hvert som det tilføres. Denne forbrenningen skjer så langsomt at trykket i sylinderen holder seg tilnærmet konstant.

## Teoretiske arbeidsprosesser for stempelmotorer

Når vi skal vurdere nærmere hvilken av de to motortypene ovenfor som er mest økonomisk i drift, er det pedagogisk hensiktsmessig å starte med teoretiske betraktninger over de prosesser som foregår i disse motorene. Først idealiserer vi prosessene, og så foretar vi de nødvendige, praktiske korreksjoner etterpå.

**Idealprosesser.** De idealiserte prosesser, som kalles Ottoprosess og Otto-dieselprosess, er vist til venstre. Det er først og fremst de to taktene når motorene omsetter arbeid, altså kompresjonstakten og ekspansjonstakten, som er interessante. Begge prosessene forutsetter at både kompresjonen og ekspansjonen foregår så raskt at det ikke blir noen varmeutveksling med omgivelsene. Forskjellen mellom prosessene består i at vi tenker oss at varmetilførselen skjer under konstant volum i Ottoprosessen og under både konstant volum og konstant trykk i Otto-dieselprosess (se figur). Dette passer godt med de karakteristikkene som ble gitt ovenfor av ottomotorer og dieselmotorer.

Figuren til venstre viser hvordan gasstrykket varierer som funksjon av sylindervolumet for de to prosessene. Det forutsettes at prosessene har samme maksimaltrykk, samme sylindervolum i nedre dødpunkt og får tilført samme varmemengde. Figuren er meget interessant fordi den enkelt påviser hvorfor dieselmotorene må være mer økonomisk i drift enn ottomotorene, se figurteksten.

**Dieselmotoren og termofysikkens andre lov.** Vi kan også forklare dieselmotorens gode virkningsgrad ved å bruke det samme resonnementet som på forrige side ble brukt under evalueringen av strømningsmotorene i forhold til stempelmotorer generelt. Hovedårsaken til at dieselmotoren får bedre virkningsgrad enn ottomotoren, er at den kraftige kompresjonen gir en høy temperatur (opptil 1000 °C) som startpunkt for forbrenningen og dermed for varmetilførselen. Under forbrenningen stiger temperaturen ytterligere til ca. 2500 °C. Middelttemperaturen under varmetilførselen blir dermed svært høy, noe som muliggjør et stort temperaturfall under ekspansjonen. Som forklart foran, betyr dette god kvalitet på den tilførte energien og en tilsvarende god termisk virkningsgrad. Da blir også den effektive virkningsgraden god for dieselmotoren.

## Dieselmotor eller ottomotor?

Konsekvensene av sammenligningen mellom otto- og dieselmotorer er klare: Pga. bedre virkningsgrad vil *dieselmotoren* få et lavere brensel-forbruk. Dette er hovedgrunnen til at den har fått enorm betydning innen transportsektoren, både til vanns og til lands.

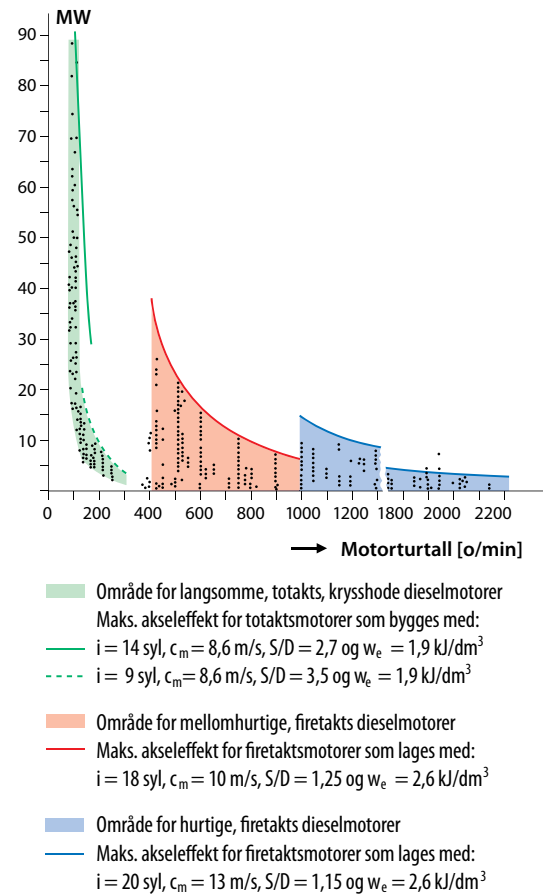
Når det gjelder ottomotoren, må vi skille mellom hvilke typer brenslere som brukes. Hovedfordelen til den bensindrevne ottomotoren er at forbrenningsprosessen foregår meget raskt slik at motoren kan gjøres svært hurtiggående. Dette gir en relativt lett motor med lite plass-behov ved en gitt effekt. Derfor passer den godt i personbiler og til sjøs som utenbordsmotor. Den gassdrevne ottomotoren har en annen, meget viktig fordel, nemlig miljøvennligheten. Som vi kan se på side 7-29, er både helse- og miljøskadelige utslipp mye mindre enn fra en dieselmotor. Gassottomotoren forutsetter imidlertid at det er mulig å finne plass til de økte volumbehov som tankanlegg med nedkjølt og/eller komprimert gass (LNG) krever i forhold til bensintanker. Dette betyr at gassmotorer først og fremst er aktuelle for drift av store motorenheter, for eksempel i skip og tunge kjøretøyer (busser med tankanlegg på taket). Gass muliggjør også bruk av høyere kompresjon enn i bensinottomotorer, slik at gassotto-motoren nærmer seg dieselmotoren når det gjelder forbruk. Men den krever tenningshjelp og er derfor ikke en dieselmotor.

## Totaktsmotor eller firetaktsmotor?

**Renspyling av sylindrene er en vanskelig prosess for en totaktsmotor.** Firetaktsmotoren bruker en ekstra motoromdreining for å skifte ut forbrenningsgassene med ny, frisk ladning, mens totaktsmotoren må bruke deler av arbeidstaktene til slik gassutveksling, se side 7-15. Man skulle kanskje tro at totakts-prinsippet dermed blir fullstendig overlegent, siden det gir "plass" til utvikling av arbeid på hver eneste motoromdreining. Men saken er ikke så enkel. Gassutvekslingen omfatter bl.a. en renspyling av sylindren for avgasser fra foregående forbrenning. En slik renspyling blir mer vellykket jo lenger tid som står til disposisjon for spyleprosessen. Derfor brukes *totakts-prinsippet i motorer med lave turtall (ca. 300 o/min).*

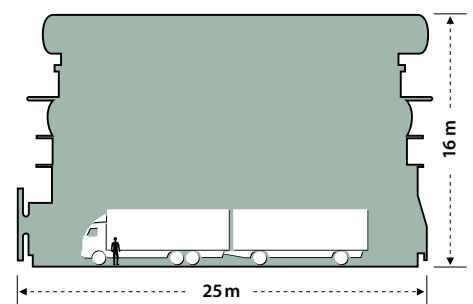
Konsekvenser av det *lave turtallet* er følgende fordeler og ulemper:

- Lave turtall *muliggjør store akseffekter per motorenhet*, se figur øverst. Hvorfor det er slik, tas opp til drøfting i oppg. 7.13
- Langsomme motorer gir et *gunstig brenselforbruk*. De kan nemlig koples direkte til propellen som dermed får et lavt turtall. Dette bedrer både kraftoverføringens og propellens virkningsgrader. I tillegg har slike motorer spesielt lavt brenselforbruk (se side 7-11).
- Motorene *krever stor plass*. Se figur til høyre.



### Oversikt over verdens fabriksjon av dieselmotortyper med ulike turtall, for framdrift av skip.

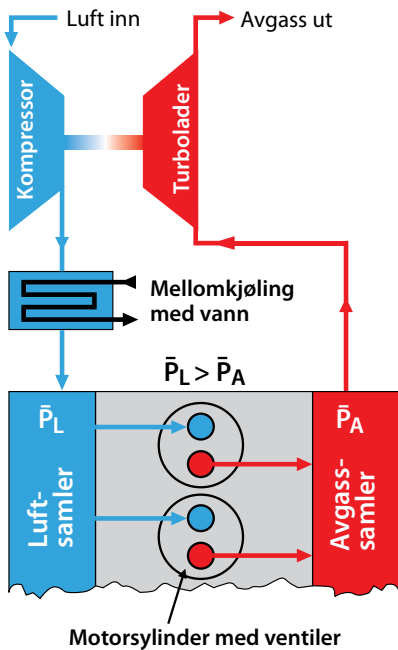
Hver enkelt motortype er markert med en prikk.



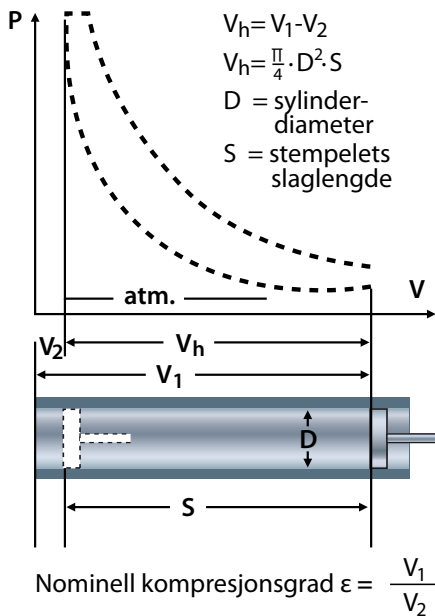
### Verdens største motor (2009)

Dette er en totakts, krysshode dieselmotor med akseffekt 87000 MW ved 97 o/min. Det lave turtallet må kompenseres med store sylindervolumer (se lign. side 7-17). Dessuten gir krysshode-prinsippet, se side 7-25, ekstra stor byggehøyde. Produksjonsprisen per enhet akseffekt er 30-50 % høyere enn for mellomhurtige dieselmotorer.

# Dieselmotorers arbeidsmåte



## Turboladning av en firetakts dieselmotor



## Definisjon av en stempelmotors slagvolum $V_h$ og kompresjonsgrad

## Virkelige arbeidsprosesser for dieselmotorer

Hittil har vi bare sett på idealiserte arbeidsprosesser i stempelmotorer. De virkelige prosessene avviker imidlertid en del fra de idealiserte. For å kunne beregne det arbeid og den effekt som f.eks. en dieselmotor yter, har vi nedenfor beskrevet de viktigste av disse avvikene.

**Overladning.** En motor trenger alltid luft for å kunne forbrenne det brenstet som tilføres. Det er derfor viktig at sylindrene fylles opp med en størst mulig luftmengde. Dette kan oppnås ved at den tilførte lufta gis et overtrykk slik at tettheten til sylindreladningen øker. Den vanligste måten å gjøre dette på er å utstyre motoren med en eller flere turboladere, og i så fall sier vi da at motoren er turboladd. En turbolader består av en avgassdrevet turbin koblet til en kompressor som leverer lufta til sylindrene.

Både turbinen og kompressoren arbeider som en gassturbin, se side 7-32. Turboladning av en firetaktsmotor er skjematisk vist i figur til venstre. Det samme prinsippet brukes også for totaktsmotorer.

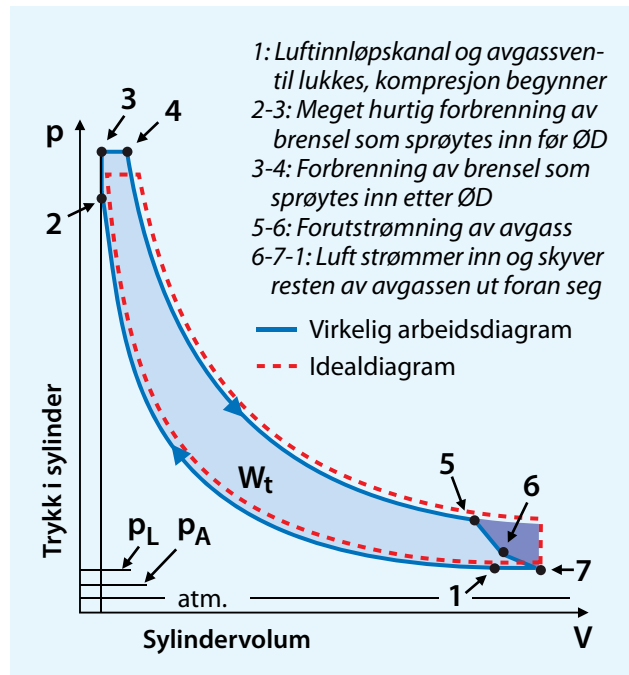
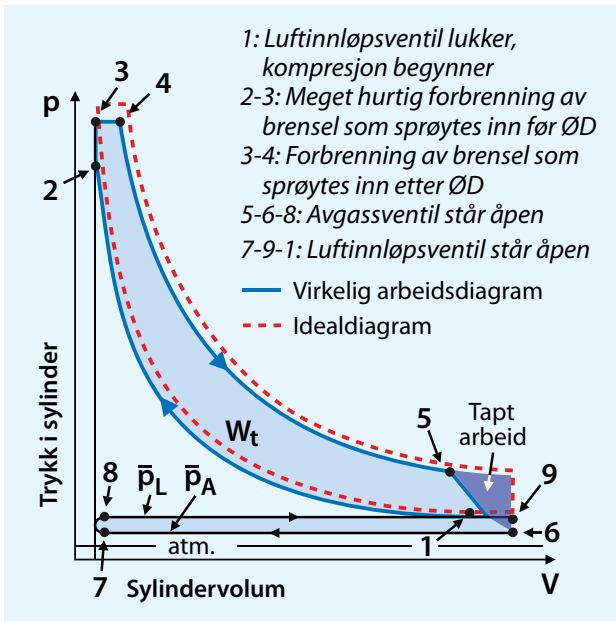
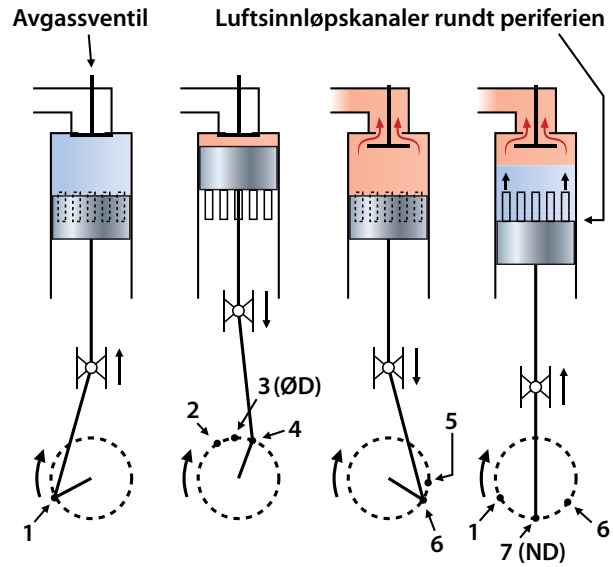
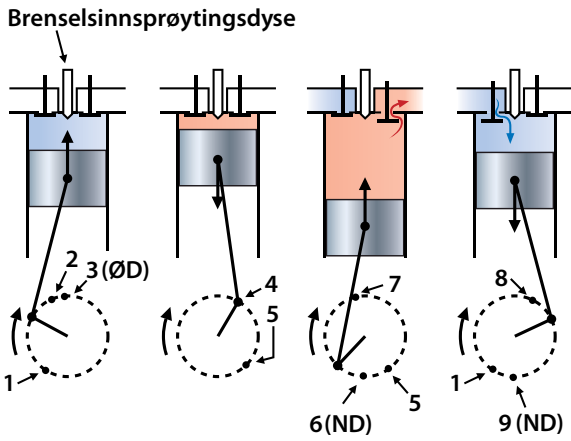
Resultatet av turboladningen er altså økt arbeid og økt akseffekt.

I arbeidsdiagrammene ( $p$ - $V$ -diagrammene) på neste side kommer dette til syne ved at kompresjonen begynner (punkt 1) med et overtrykk (2–3 bar over atmosfæretrykk). I tillegg til at prosessdiagrammene "løftes" oppover, vil altså arealene  $W_t$  bli vesentlig større enn i idealdiagrammer for normalladde motorer.

**Varmetap på grunn av kjøling.** Materialtekniske hensyn krever at godset i sylindreføring, topplokk og stempler kjøles av et strømmende kjølemedium. Dette ble det ikke tatt hensyn til i idealdiagrammene, som jo baserte seg på adiabatisk kompresjon og ekspansjon. Tar vi hensyn til virkningen av slik kjøling, vil de virkelige diagrammenes arbeidsarealer reduseres med 15–20%.

**Gassutveksling.** Som poengtert flere ganger tidligere, har stempelmotoren et syklisk arbeidsprinsipp. Dermed blir utskifting av forbrenningsgassene med en ny, frisk sylindreladning en sentral del av den totale arbeidsprosessen. Dette gjøres på helt forskjellige måter i totakts- og firetaktsmotorer. I totaktsmotorer foregår denne gassutvekslingen i løpet av korte perioder mens stemplet beveger seg til og fra nedre dødpunkt, mens prosessen i firetaktsmotorer bruker to ekstra stempelslag (takter) til den samme prosessen. Detaljer framgår av de selvforklarende figurene på neste side.

Som det framgår av figurene, skal vi videre merke oss at det tapes et "arbeidsareal" (skyggelagt) under gassutstrømningen i begge prosessene. I firetaktsmotorer kompenseres dette imidlertid delvis av at de to ekstra taktene også gir et visst arbeid. Trykket i sylindren er nemlig i gjennomsnitt større under luftfyllingen enn under avgassutstøtingen, slik at det utvikles et netto arbeid under gassutvekslingen.



Trykk—volum-diagrammer (p-V-diagrammer) for virkelige arbeidsprosesser i

- firetakts dieselmotor (ovenfor)
- totakts krysshode dieselmotorer (til høyre)

### Definisjon av spesifikk arbeidsevne

**Effektivt arbeid.** Det er arbeidet på utgående aksel som interesserer mest. Denne størrelsen kalles effektivt arbeid. Som påpekt på side 7-11, opptrer det friksjoner internt i en motor. Det tilhørende friksjonsarbeidet ( $W_f$ ) må trekkes fra det virkelige arbeid i sylinderen ( $W_t$ ).

Vi kan bruke de samme tallverdier som i figuren på side 7-11, og får:

$$W_e = W_t - W_f = 80\text{--}95\% \text{ av } W_t$$

Den minste verdien gjelder for meget hurtige motorer og den største for langsomme totaktsmotorer.

**Spesifikk arbeidsevne.** Det effektive arbeidet pr. arbeidsprosess ( $W_e$ ) vil være avhengig av motorens sylindervolum. For analyseformål er det da bedre å bruke verdier som gjelder pr. volumenhet. Som mål for motorens fysiske størrelse legger man i motorteknikken alltid til grunn det såkalte slagvolumet, se figur til venstre.

Dermed får vi følgende definisjon av det vi gjerne kaller en stempel-motors spesifikke arbeidsevne,  $w_e$ :

$$w_e = \frac{W_e}{V_h} \left[ \frac{J}{m^3} = 10^{-6} \frac{kJ}{dm^3} \right]$$

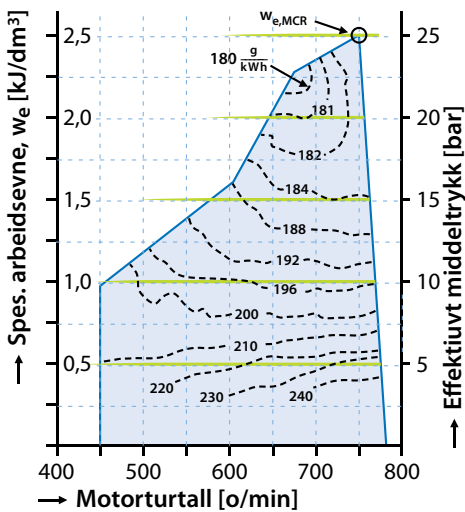
Her er  $W_e$  det arbeid (J, kJ) som hver av motorens arbeidsprosesser bidrar med på dens utgående aksel.



### Vi undrer oss på:

Hvor stort er det totale slagvolumet for verdens største dieselmotor, regnet i  $dm^3$ ? Hvor mange personbilsdieselmotorer svarer dette til hvis vi regner med et totalt slagvolum lik  $2 dm^3$  for hver av disse?

# Dieselmotorers arbeidsevne og effekt



Motor: Rolls-Royce, type Bergen B 32:40P  
 Syl.dimensjoner:  $D=320$  mm,  $S=400$  mm,  $V_h=32,15$  dm<sup>3</sup>  
 Antall sylindre: 6, 8 eller 9 i rekke, 12 eller 16 i V-form

Figuren viser aktuelt driftsområde for motorens spes. arbeidsevne ( $w_e$ ). Øvre grense for  $w_e$  beskrives av tre rette linjer som bl.a. bestemmes av turboladerens leveringskapasitet ved de forskjellige turtall. Denne øker med motorturtallet og pådraget. Maksimal spes. arbeidsevne oppnås ved turtallet 750 o/min og fullt brenselpådrag:

$$w_{e,MCR} = 2,49 \text{ kJ/dm}^3$$

Det er lagt inn koter (stiplete kurver) for diverse konstante spesifikke brenselforbruk i g/kWh. Grønne linjer gjelder for 20, 40, 60, 80 og 100% pådrag

**Spesifikk arbeidsevne (arbeid pr. dm<sup>3</sup> slagvolum og pr. arbeidsprosess) for en mellomhurtig, firetakts dieselmotor for framdrift av fartøy**

## Spesifikk arbeidsevne. Dreiemoment

**Typiske verdier for spesifikk arbeidsevne.** Det som interesserer mest, er oftest hvor stor en motors spesifikke arbeidsevne kan bli på fullt pådrag ("full gass", Max. Continuous Rating, MCR). Denne er avhengig av en rekke forhold. Først og fremst bestemmes den av graden av overladning. Typiske verdier anno 2009 er gitt nedenfor.

Motortype	Spes. arbeidsevne $w_{e, MCR}$ [kJ/dm <sup>3</sup> ]
Langsomme totakts dieselmotorer	1,9 – 2,1
Mellomhurtige firetakts dieselmotorer	2,3 – 2,6
Hurtige firetakts dieselmotorer	2,0 – 2,9
Mellomhurtige ottomotorer med gassdrift	1,8 – 2,0
Hurtige ottomot. (utenbords, bensindrift)	0,8 – 1,2

**Spesifikk arbeidsevne som funksjon av turtall.** Som eksempel tar vi for oss en norskprodusert motor med data som vist til venstre. Det spesifikke arbeidet oppnår sin maksimumsverdi bare ved det høyeste turtallet. Dette skyldes turboladeren. Ved midlere og lave motorturtall blir massestrømmen av avgass ikke stor nok til at turbinen kan levere den nødvendige effekt til turboladerens kompressor. Dermed reduseres trykket på lufta som denne leverer, og sylindreladningen av luft avtar tilsvarende. Brenselpådraget og dermed innsprøytet brenselmengde pr. arbeidsprosess må reduseres, og sluttresultatet blir at spesifikk arbeidsevne synker med turtallet, som vist.

**Spesifikk arbeidsevne uttrykt som effektivt middeltrykk.** Hvis vi analyserer måleenheten for spesifikk arbeidsevne, ser vi at den kan omformes til en trykкенhet, se oppgave 7.10 og eksempel 7.2.

**Dreiemoment på utgående aksel.** En motors arbeidsevne kan også uttrykkes ved hjelp av det dreiemoment den gir på utgående aksel. Bruker vi sammenhengen mellom arbeid  $W$ , dreiemoment  $M_d$  og akseldreining  $\alpha$  fra side 3-24, kan vi for en arbeidsprosess skrive:

$$i \cdot W_e = i \cdot w_e \cdot V_h = M_d \cdot 4 \cdot \pi \quad [\text{J}] \quad \text{for en firetaktsmotor}$$

$$i \cdot W_e = i \cdot w_e \cdot V_h = M_d \cdot 2 \cdot \pi \quad [\text{J}] \quad \text{for en totaktsmotor}$$

Disse to ligningene kan vi bruke til å finne dreiemomentet på utgående aksel for totakts- og firetaktsmotorer hvor arbeid per arbeidsprosess  $W_e$ , slagvolum per sylinder ( $V_h$ ) og antall sylindre  $i$  er kjent.

**Eksempel 7.2.** Fabrikanten for motoren i venstre marg oppgir at denne gjør et arbeid lik 80 kJ per arbeidsprosess når den kjøres med fullt pådrag ved 750 o/min. Bestem motortypens spesifikke arbeidsevne, effektive middeltrykk og totalt dreiemoment på utgående aksel for en motor med 16 sylindre. *Løsning:*

$$\text{Spesifikk arbeidsevne: } w_{e,MCR} = \frac{W_e}{V_h} = \frac{80 \text{ kJ}}{32,15 \text{ dm}^3} = 2,5 \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}$$

$$\text{Eff. middeltrykk: } p_{me} = 2,5 \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3} = 2,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = 2,5 \text{ MPa} = \underline{25 \text{ bar}}$$

$$\text{Tot. dreiemom.: } M_d = i \cdot W_e / 4 \cdot \pi = 16 \cdot 80 \text{ kJ} / 4 \cdot \pi = \underline{102 \text{ kNm}}$$



## Effekt

**Effekt forteller hvor fort en motor utfører et arbeid.** Vi har hittil hovedsakelig sett på motorers *arbeidsevne*, altså hvordan de kan produsere nødvendig mekanisk energi. Dette er viktig både for å forstå motorenes virkemåte og for å kunne vurdere virkningsgrader og dermed hvor økonomiske de er i drift. Den spesifikke arbeidsevnen ( $\text{kJ}/\text{dm}^3$ ) sier imidlertid ikke noe om hvor *fort* f.eks. et skip kan flyttes fra A til B. Selv en liten motor kan make en slik flytting hvis den har nok tid til disposisjon. Skal vi finne ut hvor lang tid motoren trenger, må vi ha tilleggsopplysninger om hvor *fort* den skaffer den nødvendige mekaniske energien, det vil si hvor mange volumenheter motoren har i arbeid pr. tidsenhet. Vi må altså trekke inn i beregningene både motorens turtall (omdr./s) og dens fysiske størrelse ( $i \cdot V_h \text{ dm}^3$ ). Alle disse opplysningene inngår i begrepet akseleffekt, som altså er den effekt motoren yter på utgående aksel.

**Beregning av akseleffekt.** Som vi skjønner av det foregående, kan vi nå uttrykke en *firetaktsmotors* effekt slik:

$$P_e = w_e \cdot i \cdot V_h \cdot n/2 \quad [\text{kJ/s} = \text{kW}]$$

Her er:

$P_e$  = akseleffekt (effekt på utgående aksel, [kW])

$w_e$  = spesifikk arbeidsevne, [ $\text{kJ}/\text{dm}^3$  pr. arbeidsprosess]

$i$  = antall sylindere [-]

$V_h$  = motorens slagvolum pr. sylinder, [ $\text{dm}^3$ ]

$n/2$  = antall arbeidsprosesser pr. sekund og pr. sylinder, [ $\text{s}^{-1}$ ]

$n$  = motorens turtall, omdr./s, [ $\text{s}^{-1}$ ]

**En totaktsmotor** har en arbeidsprosess pr. syl. og pr. omdreining og får en effekt

$$P_e = w_e \cdot i \cdot V_h \cdot n$$

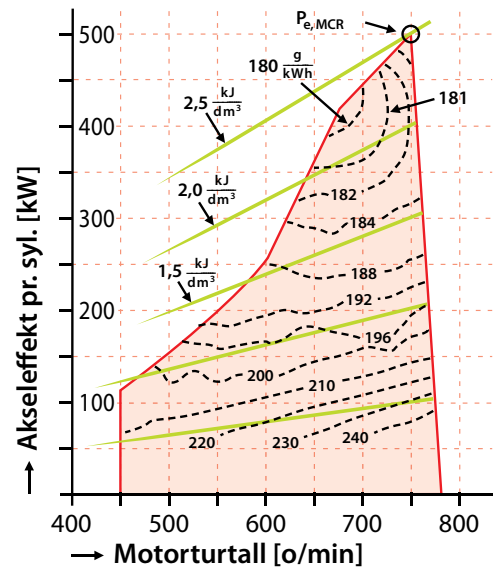
De to ligningene ovenfor gjelder generelt for sammenhengen mellom en stempelmotors spesifikke arbeidsevne og dens akseleffekt. Har vi en graf for spesifikk arbeidsevne som funksjon av turtall, kan en tilhørende graf for akseleffekt bestemmes av ligningene. På denne måten er altså figuren til høyre basert på figuren i venstre marg.

**Beregning av akseleffekt basert på dreiemoment.** Oppgis arbeidsevnen ved hjelp av motorens utgående dreiemoment, kan tilhørende akseleffekter beregnes ved å kombinere ligningene ovenfor med ligningen på forrige side. Dette gir både for firetakts- og totaktsmotorer:

$$P_e = M_{d,e} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (\text{kW})$$

når  $M_{d,e}$  er motorens utgående dreiemoment i kNm og  $n$  er turtall i  $\text{s}^{-1}$ .

Grunnen til at vi her får samme uttrykk både for totaktere og firetaktere, er at dreiemomenter alltid oppgis som gjennomsnittsverdi for alle omdreininger som utgående aksel gjør ved et gitt pådrag. Det vises for øvrig til eksempel på neste side.



*Driftsområdet uttrykt i akseleffekt (kW) pr. sylinder for den samme motoren som omtalt på venstre side.*

*Kotene for konstant, spesifikk brenselforbruk ( $\text{g}/\text{kWh}$ ) er lagt inn også i dette diagrammet. Grønne linjer angir spesifikk arbeidsevne [ $\text{kJ}/\text{dm}^3$ ] for pådrag lik 20, 40, 60, 80 og 100% av MCR.*

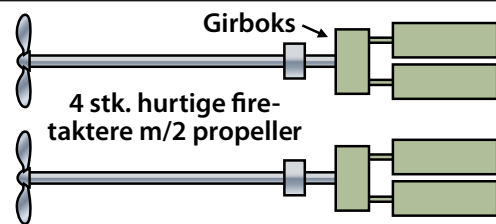
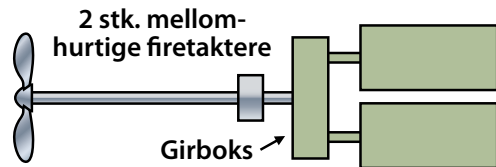
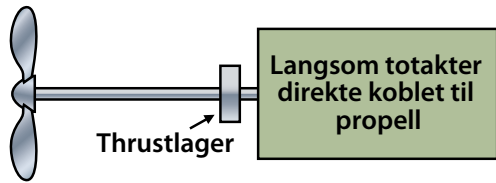
**Akseleffekt pr. sylinder for en mellomhurtig, firetakts diesel-motor for framdrift av skip.**



### Vi undrer oss på:

Motorekspert beskriver oftest en motors spes. arbeidsevne som et middeltrykk i sylindrene ( $i$  bar) i stedet for v.h.j.a. enheten  $\text{kJ}/\text{dm}^3$ . Vi undrer oss på hvordan det er mulig å omforme  $\text{kJ}/\text{dm}^3$  til bar ( $10^5 \text{ N}/\text{m}^2$ )?

# Valg av dieselmotor ved et gitt effektbehov



Tre alternative arrangementer av framdriftssystemer

For et nytt fartøy vil normalt skrogform og dermed framdriftsmotstand ( $R_{tot}$ ) og slepeeffekt ( $P_e = R_{tot} \cdot v_s$ ), ha blitt fastlagt før endelig valg av motortype og størrelse skal treffes. Det vises i denne forbindelse til sidene 3-14/17.

## Alternative motorarrangementer

Når motortype skal bestemmes, har man da ofte valget mellom langsomme totakter, mellomhurtige firetakere eller hurtige firetakere. Dette ble påpekt allerede på side 7-13. Eksempler på valgmuligheter som kan foreligge, er gitt i figur til venstre. For å finne ut hvor mange motorer som blir nødvendig, står man da ofte overfor den problemstilling som er tatt opp i eksemplet nedenfor.

**Eksempel 7.3. Hvor stor er den kraftigste firetaktsmotor som kan bygges med et turtall på 750 o/min?** Vi forutsetter at det er flere grunner til at nettopp det nevnte turtallet er det mest aktuelle. Hva er den øvre grense for akseffekt som én motor da kan yte? Erfaringer fra tidligere motorkonstruksjoner medfører at følgende motordata kan legges til grunn (typiske verdier anno 2009)

- Antall sylindre: Maksimalt  $i = 20$  (V-motor)
- Midlere stempelhastighet:  $c_m = 10$  m/s
- Slaglengde/sylinderdiameter- forhold:  $S/D = 1,25$
- Spesifikk arbeidsevne ved MCR:  $w_e = 2,6$  kJ/dm<sup>3</sup>

I tillegg til den øvre grensen for akseffekt som en firetakter kan yte ved 750 o/min, skal også motorens dreiemoment på utgående aksel beregnes. **Løsning**, se nedenfor.

$$\text{Slaglengde: } c_m = 2 \cdot S \cdot n \rightarrow S = \frac{c_m}{2 \cdot n} = \frac{10 \text{ m/s}}{2 \cdot (750/60) \text{ s}^{-1}} = 0,4 \text{ m} = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Sylinderdiameter: } D = S/1,25 = 400 \text{ mm}/1,25 = 320 \text{ mm}$$

Slagvolum pr. sylinder:

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot S}{4} = \frac{3,14 \cdot (3,2 \text{ dm})^2 \cdot 4,0 \text{ dm}}{4} = 32,15 \text{ dm}^3$$

Akseffekt:

$$P_e = \frac{w_e \cdot i \cdot V_h \cdot n}{2} = \frac{2,6 \text{ kJ/dm}^3 \cdot 20 \cdot 32,15 \text{ dm}^3 \cdot 750/60 \text{ s}^{-1}}{2} = 10450 \text{ kW}$$

Dreiemoment:

$$P_e = M_{d,e} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \rightarrow M_{d,e} = \frac{P_e}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{10450 \text{ kW}}{2 \cdot 3,14 \cdot 750/60 \text{ s}^{-1}} = 133 \text{ kNm}$$

Alternativt:

$$M_{d,e} = \frac{w_e \cdot i \cdot V_h}{4 \pi} = \frac{2,6 \text{ kJ/dm}^3 \cdot 20 \cdot 32,15 \text{ dm}^3}{4 \cdot 3,14} = 133 \text{ kNm}$$

Den kraftigste firetaktsmotoren som kan bygges med dagens teknologi, er altså på ca 10000 kW hvis vi krever at den skal gå med 750 o/min. Dette passer bra med figuren på side 7-13. Dersom skipet som motoren skal drive, har et større effektbehov, må dette enten utrustes med to mellomhurtige motorer med f.eks. turtall 750 o/min eller med en langsom totaktsmotor. Et tredje alternativ kan kanskje være en mellomhurtig firetakter med f.eks. 500 o/min.

## Tilpasning av framdriftsmotor til fartøyets behov

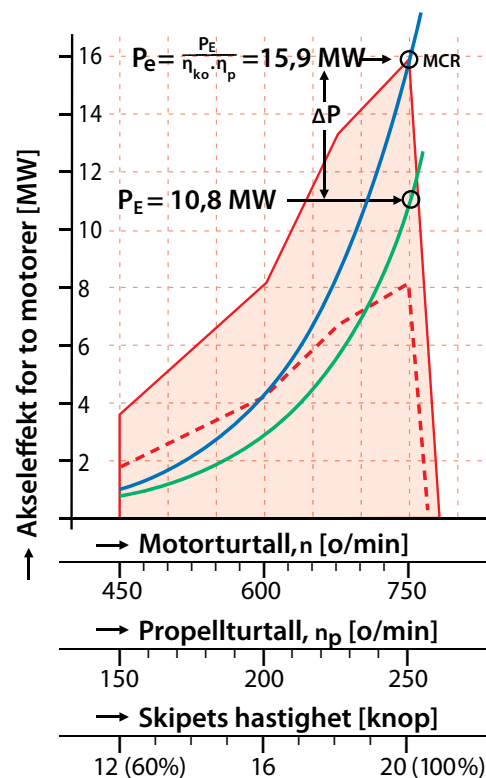
Ved hjelp av et dataprogram som arbeider etter Holtrops metode (jf. side 3-14) er slepeeffekt for et skip med volumdeplasement 25 000 m<sup>3</sup> bestemt som vist med grønn graf på figur til høyre.

Vi nå skal finne motorer som passer for et slikt skip, og vi forutsetter som eksempel at det skal brukes et to motorsanlegg. Først må det tas hensyn til kraftoverføringens virkningsgrad ( $\eta_{ko}$ ) og propulsjonsvirkningsgraden ( $\eta_p$ ). Motorene må da samlet ha en akseleffekt  $P_e = P_E / (\eta_{ko} \cdot \eta_p)$ , se blå graf i figuren til høyre. Deretter må vi velge motortype og så "spille på" de fire faktorene i hovedligningen på side 7-17 på en slik måte at det framkommer motorer som leverer passende effekter (rød og blå graf må skjære hverandre i "riktig" punkt). Driftsområdet for de valgte motorer må så sammenstilles med den beregnede grafen for det totale effekthovet, slik som vist figuren. Det forutsettes da at det er proporsjonalitet mellom skipets hastighet og propellens og motorens turtall. Det vises også til eksemplet nedenfor.

**Eksempel 7.4. Valg av motor for et gitt skip.** Et skip har en størrelse og skrogform som gir en slepeeffekt som vist i den grønne grafen til høyre. Normal hastighet er 20 knop, som svarer til en nødvendig slepeeffekt  $P_E = 10\,800$  kW. Det skal finnes fram til eksempler på passende kombinasjoner av turtall ( $n$ ), antall sylindere ( $i$ ) og slagvolum pr. sylinder ( $V_h$ ) for følgende tre alternative arrangementer med dieselmotorer: en langsom, to mellomhurtige og fire hurtige. For det mellomhurtige alternativet brukes det samme opplegget som er behandlet på side 7-17, **Løsning:** Se nedenfor:

	Langsom totakter	Mellomhurtig firetakter	Hurtig firetakter
Kraftoverføringens virkningsgrad, (lager og gir) $\eta_{ko}$ .....	0,99	0,98 · 0,99	0,97 · 0,985
Propulsjonsvirkningsgrad, $\eta_D$ .....	0,70	0,70	0,70
Behov for akseleffekt på motor, $P_{e,behov} = P_E / (\eta_{ko} \cdot \eta_D)$ [kW].....	15584	15900	16148
Spes. arbeidsevne ved MCR, $w_e$ [kJ/dm <sup>3</sup> ].....	2,05	2,49	2,84
Antall motorer x antall sylindere.....	1 x 9 (R)	2 x 16 (V)	4 x 16 (V)
Slaglengde / syl.diameter, S / D [mm/mm].....	2214/500	400/320	210/190
Slagvolum per syl., $V_h = \pi \cdot D^2 \cdot S / 4$ [dm <sup>3</sup> ].....	434	32,2	5,95
Turtall på motor, $n$ [o/min].....	117	750	1800
Akseleffekt, totalt for anlegget [kW]	15600	16000	16200
Motorfabrikant.....	MAN	Rolls-Royce	MTU

Motorene er valgt etter informasjon fra internasjonal oversikt over motorer på markedet anno 2010. Det er ikke plass til å beskrive motorene detaljert.



Driftsområde for et anlegg med to mellomhurtige dieselmotorer (Rolls Royce, type Bergen B32:40P, jf. side 7-17)

Øvre grense for samlet akseleffekt fra to motorer, som funksjon av motorturtall

Øvre grense for akseleffekt fra en av motorene, som funksjon av motortall (jf. side 7-17)

Slepeeffektbehov som funksjon av hastighet/motorturtall for skip med volumdeplasement 26 000 m<sup>3</sup>, beregnet v,hj.a. dataprogram som arbeider etter Holtrops metode (jf. side 3-14/15)

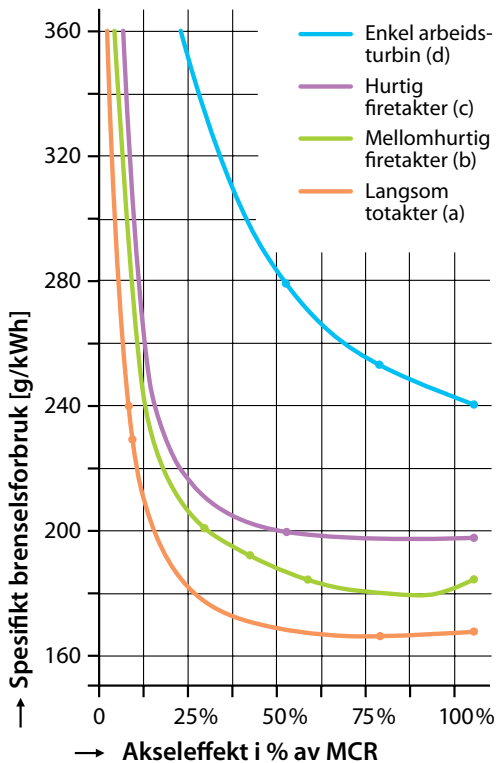
Totalt behov for effekt fra maskinerianlegget når det tas hensyn til effekttapet ΔP i kraftoverføring (inkl. girboks) og propell

Det er lagt inn alternative x-akser for

- propellturtall, forutsatt en utveksling  $n/n_p = 3,0$  i girboks
- skipets hastighet, forutsatt proporsjonalitet mellom propellturtall og hastighet

Sammenstilling av et skips behov for motoreffekt og effektleveranse fra et anlegg med to mellomhurtige dieselmotorer og girboks

# Dieselmotorers brenselforbruk



Grafene er basert på at et skips effektbehov som funksjon av turtallet følger en såkalt propellbelastningskurve, dvs. at effektbehovet antas å være proporsjonalt med 3. potens av skipets hastighet og dermed også motor-turtallene. Dette er ikke helt riktig. Som oftest reduseres effektbehovet hurtigere ved de høyeste hastighetene/turtallene. Propellbelastningskurver ( $n^3$ -kurver) brukes likevel svært ofte som referanse når brenselforbruk skal oppgis på dellaster for en motor. Aller riktigst blir det imidlertid å bruke kotekart, som vist på side 7-16 eller 7-17 sammen med innlagte grafer for henholdsvis total motstand eller motstandseffekt, beregnet som vist på side 3-14 eller 3-16.

**Eksempler på spesifikt brenselforbruk som funksjon av belastning (effekt i % av MCR) for dieselmotorer og enkel gassturbin**

I praksis er det ikke bare en dieselmotors evne til å yte arbeid og effekt som er av betydning når en motor skal vurderes nærmere. Andre forhold av interesse er dens brenselforbruk, påkjenninger som krever vedlikehold, plassbehov og utslipp av miljøskadelige avgasser. Det siste punktet skal vi komme tilbake til i et eget underkapittel om forbrenningsprosesser, se sidene 7-26 og følgende.

## Spesifikt brenselforbruk

**Spesifikt brenselforbruk varierer sterkt med en motors belastning.** Vi har allerede på side 6-11 oppgitt slike verdier for forskjellige dieselmotortyper. Verdiene var oppgitt på spesifikk form (g/kWh), og det var forutsatt at verdiene var basert på full last på motorene (MCR). Motorer kjøres selvsagt ikke hele tiden på full last, og brenselforbruket på dellaster er også av interesse. Grafer som dekker hele belastningsområdet, er vist i figur til venstre.

Vi ser at spesifikt brenselforbruk øker når belastningen synker og at forbruket blir svært høyt når belastningen er liten. Dette kommer bl.a. av friksjonen i motorens mange glideflater. Også friksjonen avtar med belastningen, men vil alltid være til stede (f.eks. også på tomgang). Det tilhørende friksjonsarbeidet vil på små belastninger "monne" relativt mye i forhold til netto utgående arbeid på motorakselen. Friksjonsarbeidet krever også et brenselforbruk som dermed vil forverre motorens spesifikke forbruk i økende grad ved synkende belastning.

Når vi studerer figuren til venstre, skal vi også merke oss at motorer kan ha sitt aller beste, spesifikke brenselforbruk ved en belastning som er noe mindre enn MCR. Særlig er dette ofte tilfelle for de langsomme totaktsmotorene.

## Brenselforbruk per seilt nautisk mil

I praksis vil selvsagt et skips brenselforbruk pr. seilt strekning, for eksempel pr. nautisk mil, være mye mer interessant enn forbruket pr. kWh på maskineriet. Dette forbruket kan vi nå bestemme slik:

$$B = \frac{\text{brenselforbruk pr. time}}{\text{seilt distanse pr. time}} = \frac{b_e \cdot P_e}{v_s} = \left[ \frac{\text{kg}}{\text{n. mil}} \right]$$

Her er

$b_e$  = spesifikt brenselforbruk [kg/kWh] ved aktuell akseleffekt, se figur til venstre

$P_e$  = aktuell akseleffekt [kW]

$v_s$  = aktuell hastighet på skipet [knop = nautisk mil /h]

**Det må også tas hensyn til energibehov om bord.** Vi har hittil først og fremst tenkt på brenselforbruket for et skips framdriftsmotor (eller hovedmotoren som den ofte kalles). Et skip har imidlertid i tillegg alltid en eller flere såkalte hjelpemotorer som driver elektriske generatorer for leveranse av elektrisk kraft til forskjellige formål om bord. Dette tilleggsbehovet er gjerne konstant og altså uavhengig av skipets hastighet. Ved små hastigheter vil skipet bruke lang tid pr. distanse, og hjelpemotorens brenselforbruk pr. nautisk mil øker derfor etter hvert som hastigheten avtar, se figur til høyre på neste side. Også totalt forbruk vil derfor øke igjen ved små belastninger.

## Eksempler

**Eksempel 7.5. Forskjell i årlig brenselforbruk for skipet i eksempel 7.4 når dette utrustes med mellomhurtige dieselmotorer i stedet for langsom totakter.** Beregn økingen når det forutsettes at motorene skal gå med maks. effekt (MCR) i 250 seilingsdøgn per år og har et spesifikt brenselforbruk som gitt i figur til venstre på forrige side.

**Løsning:** Ifølge figuren har de to nevnte motorene spes. brenselforbruk på 168 og 184 g/kWh. 16000 kW for begge motortypene gir en besparelse for totaktsmotoren på

$(0,184-0,168) \text{ kg/kWh} \cdot 16000 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/døgn} \cdot 250 \text{ døgn/år} \sim \underline{1500 \text{ tonn pr. år}}$

**Eksempel 7.6. Besparelse i hovedmotorenes brenselforbruk per nautisk mil ved reduksjon av hastigheten fra 20 til 18 knop.** Det forutsettes at skipet i eksempel 7.4 utrustes med mellomhurtige dieselmotorer. Beregn hovedmotorenes brenselforbruk per nautisk mil ved de nevnte hastigheter og besparelsen i prosent. Siden kotekart foreligger (side 7-17), brukes dette til å bestemme spes. brenselforbruk i stedet for figuren til venstre. Avmerk resultatene i figur til høyre. **Løsning** nedenfor:

Ved 20 knop:  $B_{20} = b_e \cdot P_e / v_s = 0,184 \text{ kg/kWh} \cdot 15900 \text{ kW} / (20 \text{ n.mil/h}) = \underline{146 \text{ kg/n.mil}}$

Ved 18 knop: Fra blå graf på side 7-19 finner vi et effektbehov på 8300 kW som svarer til ca. 50 % av maks. effekt. Plotter vi inn 675 o/min (18 knop) og 260 kW/syl i i figuren side 7.17, vil kotekartet her gi  $b_e = 186 \text{ g/kWh}$ , og dermed

$$B_{18} = b_e \cdot P_e / v_s = 0,186 \text{ kg/kWh} \cdot 8300 \text{ kW} / (18 \text{ n.mil/h}) = \underline{85,7 \text{ kg/n.mil}}$$

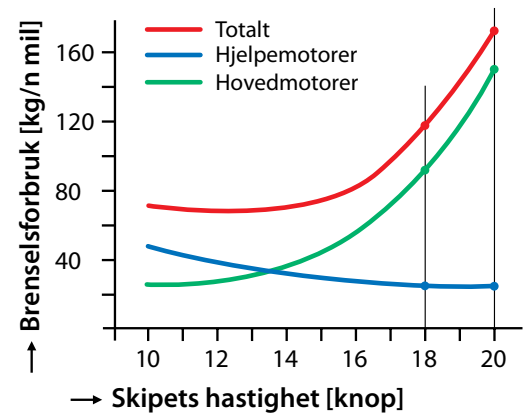
Verdiene er lagt inn på grønn graf i figuren til høyre. Reduksjon på 2 knop (10%) i hastighet gir altså  $(146-85,7)/146 \cdot 100\% \sim \underline{40\%}$  mindre forbruk på hovedmotorene. *Fart koster!*

**Eksempel 7.7. Totalt brenselforbruk pr. nautisk mil ved hastigheter lik 20 og 18 knop.** Vi skal se mer på det samme skipet som i eksemplet ovenfor. Dette er også utstyrt med en hurtig dieselmotor på 2000 kW/1500 o/min som hjelpemotor. Denne har *konstant* last og spes. forbruk 210 g/kWh. Det relativt store elektriske effektbehovet kan f.eks. skyldes store kjøleanlegg om bord. Beregn forbruket per nautisk mil for hjelpemotoren og totalt forbruk. Marker resultatene i figuren. **Løsning** nedenfor:

$$B_{20} = b_e \cdot P_e / v_s = 0,210 \text{ kg/kWh} \cdot 2000 \text{ kW} / (20 \text{ n.mil/h}) = 21 \text{ kg/n.mil}$$

$$B_{18} = b_e \cdot P_e / v_s = 0,210 \text{ kg/kWh} \cdot 2000 \text{ kW} / (18 \text{ n.mil/h}) = 23,3 \text{ kg/h}$$

Summeres disse verdiene med brenselforbrukene fra eksempel, 6 får vi 167 og 109 kg/n.mil ved hastigheter på henholdsvis 20 og 18 knop, altså 35 % besparelse. Resultatene er avmerket i figuren til høyre.



Grafene gjelder for skipet som ble behandlet i eksemplene 7.6 og 7.7. Skipet er utstyrt med mellomhurtige dieselmotorer og en relativt kraftig, hurtig dieselmotor som hjelpemotor. Avmerkede punkter for 18 og 20 knop er hentet fra eksemplene.

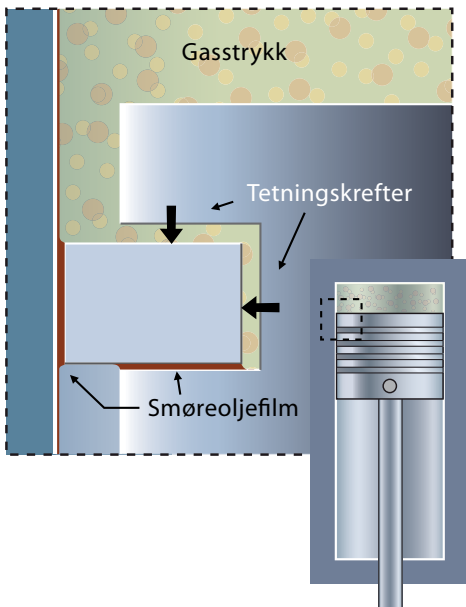
**Eksempel på et skips brenselforbruk for hovedmotorer og hjelpemotor samt totalt forbruk som funksjon av hastighet.**



### Vi undrer oss på:

Hvor store ville merkostnadene til brensel i NOK pr. år blitt hvis skipet i eksemplene ovenfor hadde vært utstyrt med de hurtige dieselmotorene som nevnt på side 7-19 i stedet for de mellomhurtige? Regn med spes. forbruk som i figur til venstre, og en pris på 350 dollar/tonn til en kurs lik 6 kr/dollar.

# Dieselmotorers mekaniske påkjenninger



*Smøreoljefilmen gir god tetning, men klarer ikke å holde ringen fullstendig atskilt fra sylinderen. Slitasje opptrer derfor i en viss grad både på stempelringen og sylindreløpebanen.*

*Gasstrykket forplanter seg til sporet hvor stempelringen ligger og gir stor tetningskraft og dermed stort flatetrykk når tetningsbehovet er størst. Systemet er altså selvregulerende. Flere ringer plasseres under hverandre slik at lekkasje forbi den øverste ringen fanges opp. Dette gir en god og elegant løsning på det viktige tetningsproblemet i stempelmotorer, og mange mener at det er stempelringen, sammen med den diskontinuerlige forbrenningen (se side 7-28) og evnen til gå på miljøvennlig brensel (se side 7-29), som vil "holde liv" i stempelmotoren til drift av skip langt utover i dette hundreåret.*

**Illustrasjon som viser hvordan gasstrykk i sylinderen bidrar til god tetning, men samtidig også stor slitasje, av sylindreløpebane og stempelring**

Som kjent, vil motorer under drift utsettes for slitasje på grunn av mekaniske påkjenninger slik at de må overhales og vedlikeholdes med visse mellomrom. I tillegg til brenselsøkonomien må derfor også behovet for vedlikehold tas med i betraktningen når en motors driftsøkonomi skal evalueres.

**Skipsmotorers driftsprofil.** I motsetning til bilmotorer kjennetegnes skipsmotorer ved at de er i drift med tilnærmet full effekt i lange perioder om gangen. For eksempel seiler et typisk containerskip i omtrent 300 døgn i året på nesten full fart, 24 timer i døgnet. Slitasjen på utsatte deler i motorene blir deretter. Verst stillet er stempelringene og sylindreløpebanene, av grunner vi skal komme tilbake til nedenfor. Det er derfor som oftest slitasjen på disse delene som avgjør hvor lang tid det går før overhaling og utbedring blir nødvendig.

## Faktorer som innvirker på slitasje av stempelringer og sylinder

**Slitasjemekanismer.** I stempelmotorer er det av avgjørende betydning å sikre en fullstendig tetning mellom den delen av sylinderen hvor arbeidsprosessen foregår og resten av sylinderen. Dette skjer ved hjelp av såkalte stempelringer med en virkemåte som framgår av figur til venstre.

Det er naturlig å tenke seg at slitasjen øker med

- økende veistrekning som en stempelring tilbakelegger på sylindreløpebanen. Denne vil være proporsjonal med stemplets midlere hastighet
- økende flatetrykk som virker mellom stempelringen og sylindreløpebanen. Dette vil være proporsjonalt med det gasstrykket som virker på innsiden av stempelringen, se figuren. Trykket er størst når stemplet befinner seg nær øvre dødpunkt, se figurer side 7-15. Selv om trykket i ringsporet blir mindre enn i sylinderen, er det på en måte maks. forbrenningstrykk som blir avgjørende for slitasjen.

Midlere stempelhastighet og maks. forbrenningstrykk er to meget viktige størrelser som er med på å bestemme slitasjen i en stempelmotor. Vi kan derfor bruke disse som uttrykk for den slitasjepåkjenning som vi forventer at motoren vil bli utsatt for.

**Midlere stempelhastighet.** Stempelhastigheten varierer i løpet av en takt. Den er null i dødpunktene og har en maks. verdi omtrent midt mellom disse. Det naturligste er å bruke gjennomsnittsverdien som mål. Hvis turtallet er  $n$  [o/s] (omdreining pr. s), vil medgått tid på en omdreining være  $t = 1/n$  sekunder. I løpet av denne omdreiningen tilbakelegger stemplet to slaglengder ( $2 \cdot S$ ). Midlere hastighet blir dermed:

$$\bar{v}_{st} = s / t = 2 \cdot S / (1/n) = 2 \cdot S \cdot n \quad [\text{m/s}]$$

### Eksempel 7.8. Midlere stempelhastighet for dieselmotortyper.

Beregn midlere stempelhastighet for de motortyper som er vurdert i eks. 7.4, side 7-19. **Løsning:**

Langsom totakter:  $\bar{v}_{st} = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 2,214 \text{ m} \cdot (117/60) \text{ s}^{-1} = 8,6 \text{ m/s}$

Mellomhurtig firetakter:  $\bar{v}_{st} = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 0,400 \text{ m} \cdot (750/60) \text{ s}^{-1} = 10 \text{ m/s}$

Hurtig firetakter:  $\bar{v}_{st} = 2 \cdot S \cdot n = 2 \cdot 0,210 \text{ m} \cdot (1800/60) \text{ s}^{-1} = 12,6 \text{ m/s}$

**Maksimalt forbrenningstrykk.** Figuren til høyre er meget interessant. Den viser karakteristiske trekk ved dieselmotorutviklingen gjennom flere tiår. Figuren tar for seg langsomme totaktsmotorer, men firetaktsmotorer har gjennomgått en helt tilsvarende utvikling. Denne pågår stadig og kan beskrives slik:

- Figuren viser at totaktsmotorer i dag har en spesifikk arbeidsevne ved MCR som er mer enn tre ganger så stor som da turboladning av motorene begynte i 1955. Dermed skjønner vi hvilken **enorm betydning turboladning har hatt for dieselmotorutviklingen.**
- Figurens graf kan også brukes sammen med den nederste x-aksen og vi ser da hvordan trykket på levert luft fra turboladeren har økt i den samme perioden. Levert luftmengde er blitt økt tilsvarende. Dette er muliggjort ved en stadig forbedring av virkningsgradene både på kompressor- og turbinsiden. Utviklingen vil fortsette, bl.a. ved overgang til tottrinns turboladning

- En konsekvens av den økte turboladningen er at også maks. forbrenningstrykk stadig har økt, tilnærmet proporsjonalt med økingen i spesifikk arbeidsevne og turboladerens lufttrykk. Hele tiden har nemlig dieselmotorens fordel med høy kompresjonsgrad vært opprettholdt. Dette har stadig gitt økte trykk også ved kompresjonens slutt og dermed et tilsvarende økt maksimalt forbrenningstrykk på toppen av dette, se figurer side 7-15.

### Mekanisk påkjenningstall

Vi er interessert i det maksimale forbrenningstrykket for å kunne evaluere påkjenningene på en motor, men det er sjelden at fabrikanterne oppgir dette trykket. På grunn av den gode proporsjonaliteten som grafen på figuren til høyre viser, kan vi imidlertid i stedet bruke den maksimale, spesifikke arbeidsevnen ( $w_{e,MCR}$ ).

Vi kan nå "samle" virkningene av de to viktige størrelsene stempel-hastighet ( $\bar{v}_{st}$ ) og maksimal arbeidsevne ( $w_{e,MCR}$ ) ved å bruke dem som faktorer i et produkt. Dette produktet kan vi gjerne kalle teknologi-parameteren for motoren:

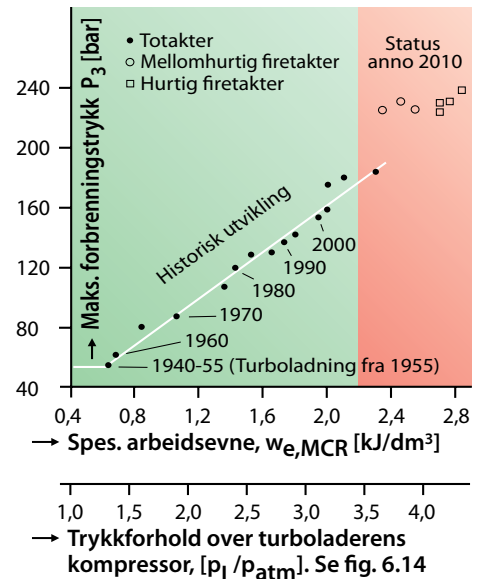
$$TP = \bar{v}_{st} \cdot w_{e,MCR} \quad [(dm/s) \cdot (kJ/dm^3) = kW/dm^2]$$

Teknologi-parameteren er et **relativt** begrep som sier noe om hvor store mekaniske påkjenninger som forskjellige dieselmotortyper utsettes for. Stort TP-tall for en motor indikerer behov for noe hyppigere ettersyn enn for en motor med lavere TP-tall. Også andre faktorer virker imidlertid inn på slitasjeforholdene i en motor, og TP-tallet alene må ikke tillegges for stor vekt.

**Eksempel 7.9. Beregn teknologi-parameteren for de tre motortypene som kan være aktuelle for skipet i eksempel 7.4, side 7-19.** Bruk verdiene for spes. arbeidsevne  $w_{e,MCR}$  fra dette eksemplet og verdier for  $\bar{v}_{st}$  fra forrige side. **Løsning:**

Langsom totakter:  $TP = 86 \text{ dm/s} \cdot 2,05 \text{ kJ/dm}^3 = \underline{177 \text{ kW/dm}^2}$   
 Mellomhurtig firetakter:  $TP = 100 \text{ dm/s} \cdot 2,49 \text{ kJ/dm}^3 = \underline{249 \text{ kW/dm}^2}$   
 Hurtig firetakter:  $TP = 126 \text{ dm/s} \cdot 2,84 \text{ kJ/dm}^3 = \underline{358 \text{ kW/dm}^2}$

Foran har vi sett at den mellomhurtige dieselmotoren representerer et kompromiss mht. brenselforbruk. Eksemplet viser at det samme er tilfelle også når det gjelder behov for ettersyn/vedlikehold.



**Maksimalt forbrenningstrykk som funksjon av spesifikk arbeidsevne. Historisk utvikling for totakterne og status anno 2009 for firetakterne.**

Grafen for historisk utvikling er basert på utførte Sulzer/Wartsila totaktsmotorer. Status anno 2009 gjelder for både totakts- og firetaktsmotorer. Grafen kan tilnærmet også brukes sammen med den nederste x-aksen som illustrerer overladningsgraden.

Innlagt linje gir en proporsjonalitetsfaktor lik ca. 80 bar/kJ/dm<sup>3</sup>.

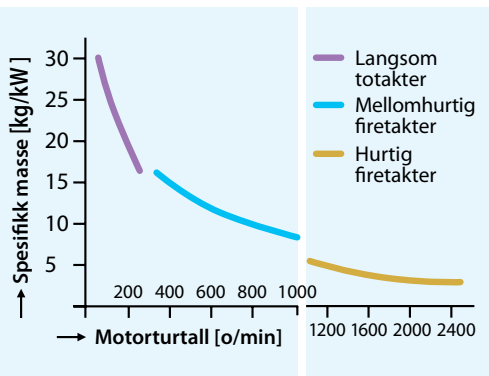
Eksempel for totaktsmotor:  
 $w_{e,MCR} = 2,2 \text{ kJ/dm}^3$  gir  $p_3 = 176 \text{ bar}$



### Vi undrer oss på:

Som nevnt foran, kan en skipsmotor være i drift på nesten full belastning i 24 x 300 timer pr. år. Hvor stor er driftstiden for en typisk personbilmotor i forhold til skipsmotorens driftstid? Regn med at personbilen årlig kjører en strekning lik 16 000 km med en fart ca. 80 km/h. Er det andre forskjeller i de to motortypenes driftsprofiler enn selve tidsfaktoren?

# Dieselmotorers plassbehov. Gir og clutch



## Spesifikk motormasse som funksjon av turtall.

Mellomhurtige og hurtige firetakere må utstyres med gir. Masser for slike gir er ikke inkludert, men vil typisk være 20-30 % av motormassen.



## Vi undrer oss på:

Hvor stor masse har verdens største motor som har en akseffekt på ca. 87000 kW ved ca. 100 o/min og som er vist på side 7-13? Hvor mange vogntog á 50 tonn svarer massen til?

Vi har foran sett at de langsomme totaktsmotorene er gunstigere enn de hurtige firetakterne både når det gjelder brenselforbruk og vedlikeholdsbehov. Til gjengjeld tar de stor plass og er svært tunge.

## Spesifikk masse

Sammenligning mellom de ulike motortypenes masser gjøres gjerne på spesifikk form. Med spesifikk masse mener vi da motorens masse per effektenhet [kg/kW]. Figur til venstre viser tydelig hvor tunge de langsomme totakterne egentlig er.

## Plassbehov

Dette er illustrert på neste side ved at de tre motorarrangementene for skipet i eks. 7.4 (se side 7-19) er illustrert i samme skala og med det antall motorer som var nødvendig ifølge skipets effektbehov. Vi ser at det særlig er i høyden at totaktsmotoren med krysshode krever så stor plass.

**Hvorfor krysshode?** Kreftene som skal overføres fra stempel til veivaksel, er proporsjonale med kvadratet av sylinderdiameteren. Dette stiller store krav til flatetrykkene i veivstangas øvre lager. Det er derfor bare i motorer under en viss størrelse at veivstanga kan lagres opp inne i selve stemplet. Slike motorer kaller vi trunkmotorer. Denne konstruktive forskjellen framgår tydeligst på side 7-15.

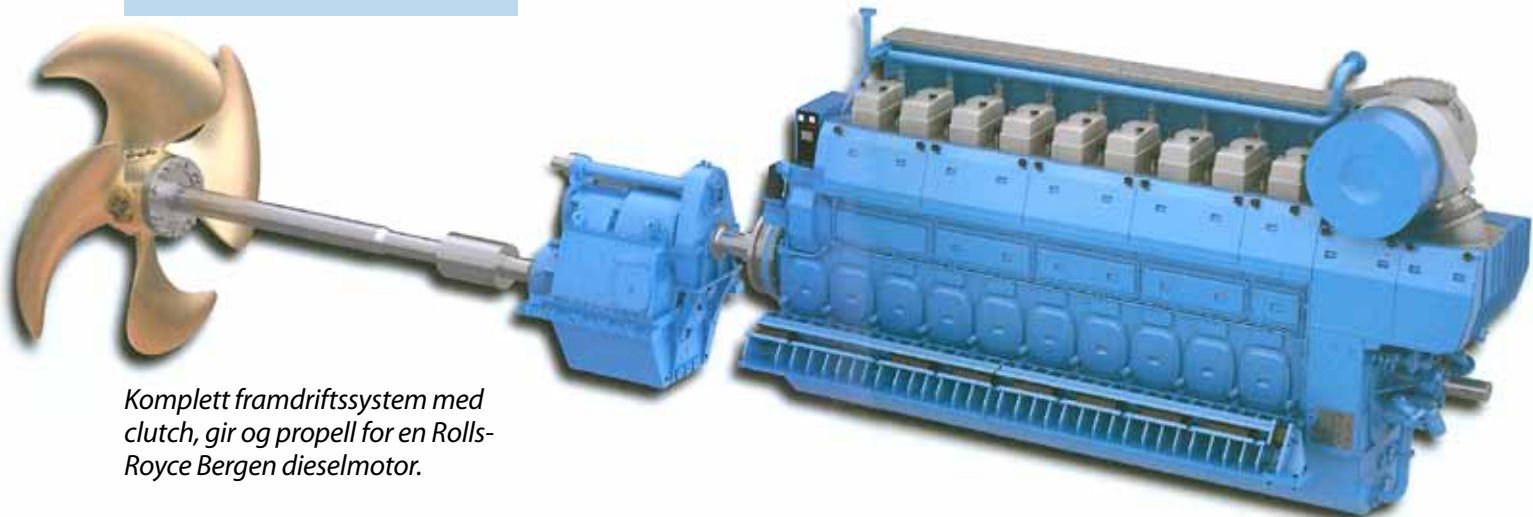
## Girboks og clutch

I prinsippet består et gir av to tannhjul som er i inngrep med hverandre. Med et girs *utveksling* ( $i$ ) mener vi forholdet mellom radiene til de to tannhjulene. Ifølge oppg t.15 gjelder da:

$$i = \frac{R_{ut}}{R_{inn}} = \frac{n_{inn}}{n_{ut}} = \frac{M_{d,ut}}{M_{d,inn}}$$

*I et gir reduseres altså turtallet, mens dreiemomentet øker.*

I f.eks. et tomotorsanlegg kan det på delast være ønskelig å kunne kople ut en av motorene. I så fall må anlegget utstyres med clutch, som vist i figur til høyre på neste side.



Komplett framdriftssystem med clutch, gir og propell for en Rolls-Royce Bergen dieselmotor.



**Tverrsnitt av tre motorarrangementer for skip i eksempel 7.4, side 7-19.**

a) En langsom MAN totakter med krysshode (motorlengde 9,8 m)

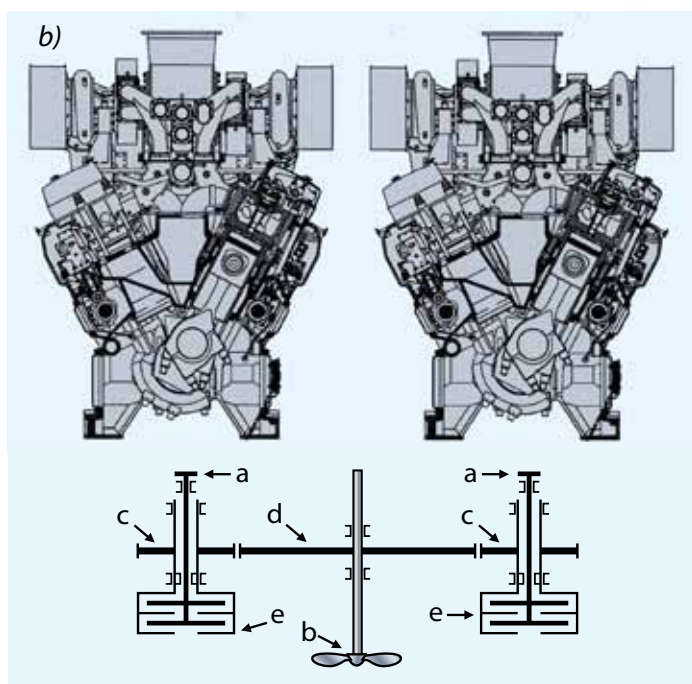
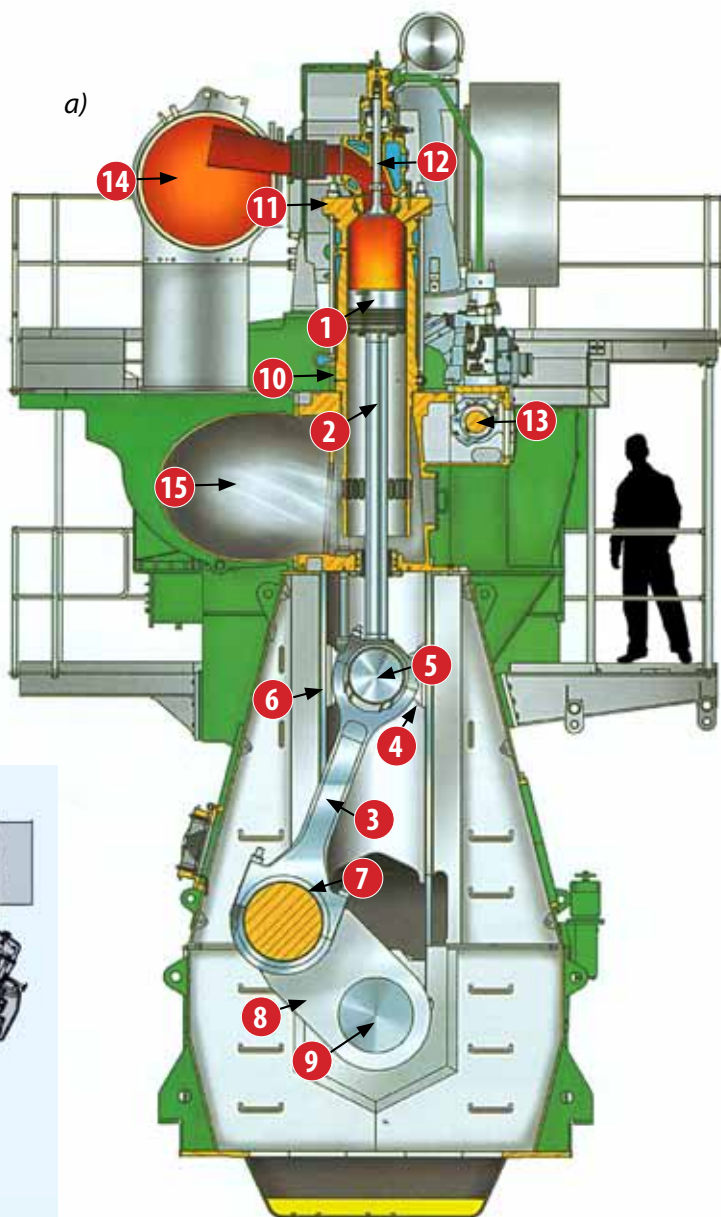
b) To mellomhurtige Rolls-Royce Bergen firetakere (trunkmotorer, lengde 7,7 m + girboks)

c) Fire hurtige MTU firetakere (trunkmotorer, lengde 4,0 m + girboks)

**Alle arrangementene er i samme skala og har samme totale akseffekt (ca. 16000 kW)**

**Sentrale deler i en totakts krysshodemotor**

1. Stempel
2. Stempelstang (oscillerende bevegelse)
3. Veivstang (også pendlende bevegelse)
4. Krysshode
5. Kryssbolt
6. Geidplan
7. Veivlager
8. Veivarm
9. Veivaksel (utgående aksel)
10. Sylinderfôring
11. Sylinderhode
12. Avgassventil (hydraulisk drevet)
13. Kamaksel (for drift av avgassventil og brenselinspr. pumpe)
14. Avgassamler (leder avgass til turboladerens avgassturbin)
15. Luftsamler (får luft fra turboladerens kompressor, turboladeren er ikke vist)



**Skjematisk illustrasjon av friksjonsplateclutch**

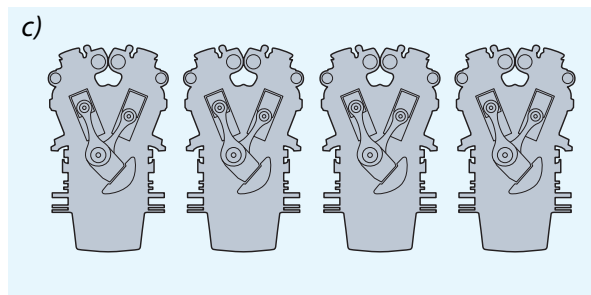
a. Fra dieselmotor

b. Propell

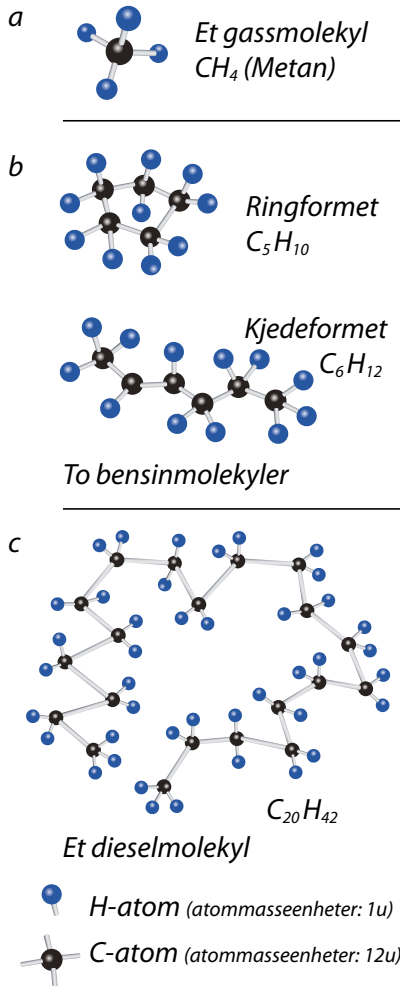
c. Tannhjul drevet av motor når clutchen er inkoplet

d. Tannhjul som driver propellen

e. Clutch-hus, som kan forskyves aksielt slik at det oppstår kontakt med clutch-platene og dermed kraftoverføring ved friksjon



# Brensler. Forbrenningsprosesser



## Kjemisk oppbygging av noen molekyler for fossile brensler.

a. Naturgass er en blanding av fire molekyltyper med 1-4 karbonatomer. Hovedbestanddelen er metan. For en typisk blanding gjelder:

Effektiv brennverdi: 48 MJ/kg  
Teoretisk luftbehov: 17 kg/kg

b. Bensiner er blandinger av kjede- og ringformede molekyler med 5-12 karbonatomer. Leveres i to hovedkvaliteter med ulike oktantal.

c. Diesellojler omfatter autodiesellojler med 13-17 karbonatomer og marine diesellojler i ulike kvaliteter med 15-20 karbonatomer, stort sett i kjedeform. Tungoljer har mer enn 20 C-atomer

## Brensler

Brensler som egner seg til bruk i forbrenningsmotorer, er:

- **Hydrogen ( $H_2$ )**
- **Hydrokarboner (HC-forbindelser)**
  - Naturgass (blanding av fire gasstyper. Se side 10-8)
  - Bensiner (for biler og utenbordsmotorer)
  - Parafiner (for gassturbiner i fly)
  - Diesellojler (for biler brukes lette "gassoljer", også kalt autodiesellolje, for skip og båter brukes tyngre kvaliteter, kalt "Marine Gas Oil", Marine Diesel Oil (MDO) eller marin diesellolje)
  - Tungoljer (Heavy Fuel Oils, flere typer med lite/mye S)
- **Biobrensler (HCO-forbindelser)**
  - Alkoholer (etyl- og metylalkoholer, som bensintilsetning)
  - Biodiesellojler

**Hydrogen ( $H_2$ )** framstilles enten ved elektrolyse av vann (krever elektrisk energi) eller ved avspalting fra HC-produkter i raffinerier (gir utslipp av  $CO_2$ ). Hovedfordelen med bruk av hydrogen som brensel er absolutt rene avgasser ( $H_2O$ ), ulempen er at den meget lave tettheten enten krever frakting på trykktanker eller i nedkjølt form.

**Hydrokarbonene** er nærmere beskrevet på sidene 10-8/9. Her framgår blant annet hvordan de er dannet og hvordan de framstilles av råoljer. Vi skjønner av dette hvorfor slike brensler egentlig er langtidslagret solenergi (fra fotosynteser for millioner av år siden) og hvorfor de dermed kalles fossile brensler. Hovedfordelen med hydrokarboner som brensel er at de er meget energirike og dermed enkle å frakte. Hovedulempen er at de ved forbrenning gir avgasser som både er skadelige for klimaet ( $CO_2$ ) og for menneskers helse (se figur på neste side). I tillegg til hydrogen (H) og karbon (C) er disse brenslene i en viss grad "forurenset" med svovel (S) fra den gang de ble dannet. Også svovelinnholdet medfører skadelige avgassutslipp. Råoljen kan også inneholde mindre mengder oksygen fra nedbrytingsprosessene.

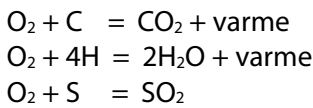
Stort sett gjelder følgende data for brenslene i lista ovenfor:

- Brennverdien synker fra 48 MJ/kg for naturgass til 40 for tungoljer
- Luftbehovet synker fra 17 kg/kg for naturgass til 14 for tungoljer
- Tettheten øker fra 0,75 kg/dm<sup>3</sup> for bensin til nesten 1,0 for tungoljer

**Biobrensler.** Disse produseres av planter eller biologiske rester og baseres altså på produkter som har framkommet av *nylige* fotosynteser. Fotosyntesen er en prosess som bruker solenergi, vann og  $CO_2$  (se side 11-7). Vi kan altså si at biobrenslene inneholder *korttidslagret solenergi*. Biobrenslene har dermed nylig tatt ut like mye  $CO_2$  fra atmosfæren som de kommer til å slippe ut igjen når de senere forbrennes i motorer. De gir altså ikke noe *netto*  $CO_2$ -utslipp (når vi ser bort fra utslippene fra innhøsting og etterfølgende prosesser). Dette er hovedfordelen med biobrenslene. Den største ulempen er at de ved store forbruk vil "konkurrere" med matproduksjonen på jorda.

## Forbrenningslære

**Teoretisk luftbehov ved forbrenning.** De kjemiske prosesser som foregår ved forbrenning av hydrokarboner og svovel, beskrives slik:



Det er relativt enkelt å vise (se oppgave 7.3) at den luftmengde som er nødvendig for å forbrenne 1 kg brensel, blir

$$(L/B)t = 1,276 \cdot 22,7 \cdot (c/12 + h/4 + s/32 - o/32) / 0,21 \quad [\text{kg luft} / \text{kg brensel}]$$

Her er *c*, *h*, *s* og *o* masseandelene av karbon, hydrogen svovel og oksygen per kg brensel. Typiske sammensetninger for de ulike brensel-typene gir teoretiske luftbehov på ca. 15 kg/kg for bensiner, 14,5 for dieseloljer (litt mindre for biodiesel) og 14 kg/kg for tungoljer. For naturgass (metan) vises til oppgave 7.3.

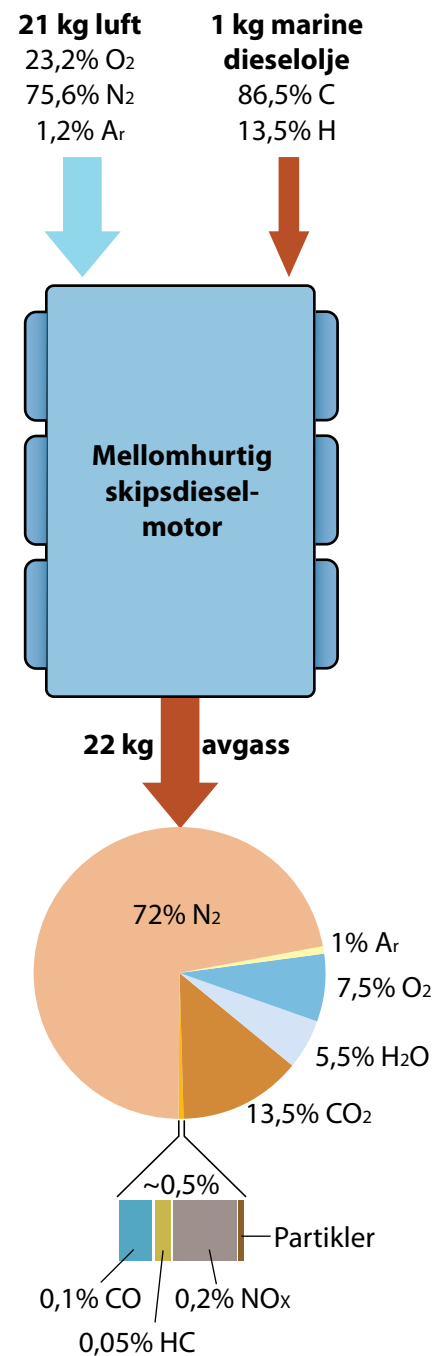
**Virkelig luftbehov.** Når det gjelder det virkelige luftbehovet, er det stor forskjell mellom ottomotorer og dieselmotorer. I dieselmotorer sprøytes brensel inn i forbrenningsrommet i løpet av noen få veivgrader rundt Ø.D. Det blir dermed for liten tid til å oppnå en perfekt blanding mellom luft og brensel. Konsekvensen av dette er at dieselmotorer må ha et visst luftoverskudd i sylindere for å oppnå en tilfredsstillende forbrenning. Det beskriver vi ved hjelp av en luftfaktor som defineres slik:

$$\lambda = \text{Virkelig blandingsforhold (L/B)}_v / \text{Teoretisk forhold (L/B)}_t$$

- For dieselmotorer vil  $\lambda = \text{ca. } 1,5\text{-}2,0$  for hurtige og mellomhurtige firetaktsmotorer og  $\lambda = \text{ca. } 2,0\text{-}2,5$  for langsomme totaktsmotorer.
- For ottomotorer for bildrift (bensinmotorer) må  $\lambda$  være meget nøyaktig lik 1,0 av hensyn til virkemåten for katalysatoren.
- For større ottomotorer for fartøy/skipsdrift er luftfaktoren ca. 1,8.
- For gassturbiner nyttes luftfaktorer  $\lambda = \text{ca. } 3$  for å holde temperaturen etter forbrenningen tilstrekkelig lav (se side 7-31)

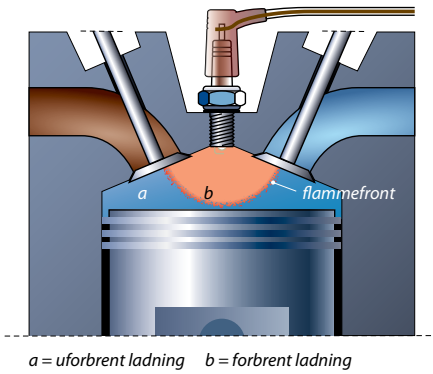
**Avgassammensetning. Skadelige utslipp.** Vi kan nå resonnerer oss fram til hva avgassen fra en dieselmotor i hovedsak består av, se figur i marginen. *Siden nitrogen (N<sub>2</sub>)* er hovedbestanddelen i den lufta som tilføres, er det klart at denne gassen også må være den største bestanddelen i avgassen fra motoren. Videre inneholder avgassen *oksygen (O<sub>2</sub>)* fordi en dieselmotor alltid går med luftoverskudd slik at all lufta ikke brukes opp under forbrenningen. Av forbrenningsligningene øverst på siden ser vi videre at *karbondioksid (CO<sub>2</sub>)*, *vanndamp (H<sub>2</sub>O)* og *svoveldioksid (SO<sub>2</sub>)* vil være til stede i avgassen.

Under forbrenningsprosessen dannes det imidlertid også stoffer som er direkte helseskadelige for mennesker. *Karbonmonoksid (CO)* dannes på grunn av ufullstendig forbrenning. En meget liten andel av brenselet forbrenner overhodet ikke og kommer ut igjen som *hydrokarboner (HC)*. Til slutt har vi imidlertid enda to, meget viktige, helseskadelige stoffer, nemlig *nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>)* og *partikler (PM)*, se neste side.



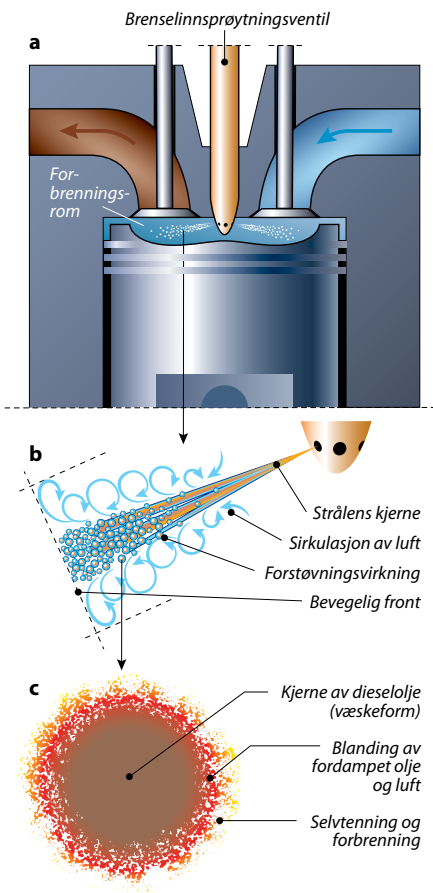
### Sammensetning av avgassen fra en mellomhurtig, firetakts dieselmotor.

Du kan lese mer om dannelse og utslipp av nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) og partikler (PM) på neste side.



a = uforbrent ladning b = forbrent ladning

**Skjematisk illustrasjon av forbrenning i en ottomotor**



**Skjematisk illustrasjon av forbrenning i en dieselmotor:**

- a) Forbrenningsrom med stråler av innsprøytet diesellole
- b) Diesellolestråle med forstøvning fra overflate (små dråper rives løs p.g.a. friksjon mot lufta)
- c) En dråpe sterkt forstørret. Forbrenning starter ved selvttenning i en blanding mellom luft og fordampet diesellole på dråpens overflate

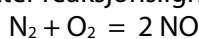
**Forbrenningsprosesser**

**Forbrenning i bensinmotorer.** Først bør du på nytt lese om forskjellen mellom otto- og dieselmotorer på side 7-12. Brensel for ottomotorer i biler eller utenbordsmotorer er som kjent bensin. Denne kan i en viss grad være blandet opp med HCO-forbindelser med høye oktantal (alkoholer og syntetiske brensler). Mellomhurtige ottomotorer for skipsdrift bruker naturgass som brensel. Forbrenningsprosessen i slike gassmotorer tas opp på neste side. Både bensinmotorer og gassmotorer er ottomotorer og kjennetegnes altså ved at forbrenningen starter med det vi kaller fremmedtenning. Dette er som regel en gnist, og denne kommer like før øvre dødpunkt.

I bensinmotorene har bensinen normalt blitt tilført allerede foran innløpsventilen, og har dermed fått god tid til å fordampe og blande seg med lufta, slik at det er blitt dannet en homogen blanding mellom luft og brensel. Blandingsforholdet er slik at luftfaktoren blir meget nøyaktig lik 1,0, noe som gir gode forhold for forbrenningsprosessen øverst på forrige side. Etter at gnisten har satt i gang forbrenningen, vil denne fullføres ved at en flammefront breder seg svært hurtig gjennom hele forbrenningsrommet, se figur i margen. I flammefronten kan temperaturen være mer enn 3000 °C.

**Forbrenningen i dieselmotorer** foregår på en helt annen måte. Figuren i margen viser et forbrenningsrom for en mellomhurtig dieselmotor. Brenslet sprøytes inn i dette rommet i form av en stråle like før stemplet når øvre dødpunkt. Da har lufta i sylindere blitt komprimert opp til et trykk på mer enn 100 bar, og temperaturen har steget til mer enn 800 °C. Det høye trykket gjør at lufta får stor tetthet. Det blir derfor stor friksjon mellom strålens overflate og lufta. Friksjonen bryter løs små dråper fra strålens overflate. På grunn av den høye temperaturen vil dråpene raskt varmes opp, og det skjer en fordamping fra overflaten. Denne brenselvæske vil blandes med den meget varme lufta. I et slikt miljø vil prosessen øverst på side 7-27 starte av seg selv. Den høye temperaturen gjør at både oksygenmolekyler og brenselvæskemolekyler har oppnådd stor kinetisk energi (både translasjoner og rotasjoner), se side 7-6. Dermed er det lagt til rette for kraftige kollisjoner mellom oksygenmolekyler og brenselvæskemolekyler. Molekylene "knuses" og erstattes av nye atomkombinasjonene, som beskrives av ligningene på side 7-27. Vi sier da at brenslet **selvtenner**. Når forbrenningen først har kommet i gang, stiger temperaturen dramatisk i forbrenningsrommet, og forbrenningen breder seg raskt gjennom alle dråpene og strålen.

**Dannelse av nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>).** Nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) er et samle navn for nitrogenoksid (NO) og nitrogendioksid (NO<sub>2</sub>). Det er imidlertid primært NO som dannes i motorer, mens NO<sub>2</sub> stort sett oppstår ved ytterligere oksidasjon i atmosfæren. Nitrogenoksid (NO) dannes etter reaksjonsligningen



Dette er en prosess som krever høye temperaturer, så høye at N<sub>2</sub>- og O<sub>2</sub>-molekylene oppnår en kinetisk energi og dermed en fart som er stor nok til at kollisjoner mellom molekylene gir det resultat som ligningen ovenfor beskriver. Samtidig skjønner vi imidlertid at stor konsentrasjon av O<sub>2</sub>-molekyler vil øke sjansene for at den nødvendige kollisjonen inntreffer. Dieselmotorer, som jo arbeider med luftoverskudd, har derfor gjerne større NO-utslipp enn ottomotorer.

*Dannelse av partikler (PM, Particulate Matter).* Dette er stoffer som er skadelige for menneskers lungefunksjon. Det er bare dieselmotorer som slipper ut partikler i mengder av betydning. Partiklene dannes ved at den innerste kjernen i enkelte av brenseldråpene vist foran, ikke "møter" nok oksygenmolekyler til å få skikkelig forbrenning. I stedet dannes partikler som stort sett består av sot. Vi skjønner straks hvor mye bedre det er med gass som brensel.

**Forbrenning i gassmotorer.** Bruk av naturgass som brensel i stedet for diesellojler har en rekke fordeler av miljømessig betydning, se nedenfor. Vi har allerede på side 7-12 pekt på at dieselmotoren oppnår sin gode virkningsgrad først og fremst fordi den arbeider med høyere kompresjon enn ottomotoren. I ottomotor med bensindrift begrenses kompresjonsgraden av bensinens oktantal, som i dag normalt er 92 eller 95. Oktantallet beskriver bensinens evne til å motstå selvtenning slik at forbrenningen ikke skal starte før gnisten kommer.

Det er dette som oppnås når vi går over til bruk av naturgass som brensel. Naturgass består hovedsakelig av metan som har et oktantal på nesten 120. Dessuten viser det seg at oktantallet til en brensel/luftblanding øker med luftfaktorer opp til 1,8. Ved å basere en gassmotor på naturgass og bruke en luftfaktor på omtrent 1,8, kan en slik motor utføres så høykomprimert at den får en virkningsgrad som kan konkurrere med en dieselmotor.

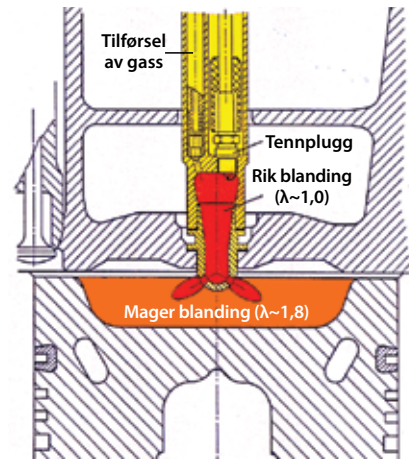
Selve forbrenningsprosessen framgår av figur og tekst øverst i margen

Og dermed har vi altså fått en gassmotor med gode ytelser og som har følgende formidable fordeler sammenlignet med en dieselmotor:

- Utslipp av svoveldioksid (SO<sub>2</sub>) er fullstendig eliminert, fordi naturgass (levert enten som CNG eller LNG) ikke inneholder svovel (S) i det hele tatt
- Utslipp av partikler er nesten lik null, fordi partikkeldannelse først og fremst opptrer ved forbrenning av brenseldråpene i dieselmotorer, se ovenfor.
- Utslipp av CO<sub>2</sub> er redusert med 26 %, fordi metan inneholder en mindre andel karbon per kg brensel enn diesellojler, se side 7-26 og oppgave 7.2.
- Utslipp av nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) er redusert med 80-90 %, fordi maksimal forbrenningstemperatur reduseres når luftfaktoren øker.

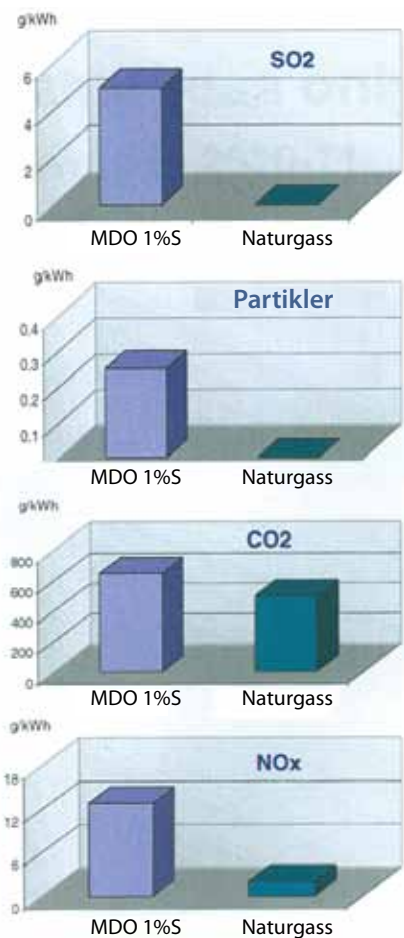
For ordens skyld bør vi nevne at bruk av naturgass ikke bare har fordeler. Lagertanker for å kunne ta med tilstrekkelige mengder med brensel betyr en vesentlig komplikasjon i forhold til de enkle diesellojetankene. Dette gjelder enten gassen oppbevares under høyt trykk (CNG) eller i nedkjølt form (LNG).

Det finnes også en variant av gassmotorer som vi kaller "dual fuel-motorer". Med disse kan man velge om det skal kjøres på diesellolje (som beskrevet på forrige side) eller gass. I siste tilfelle brukes en liten innsprøytingsdusj som "tennstråle" i stedet for den tennpluggen som er vist øverst på denne siden for "otto-mager-motoren".



**Forbrenning i Rolls-Royce "Otto mager gassmotor".**

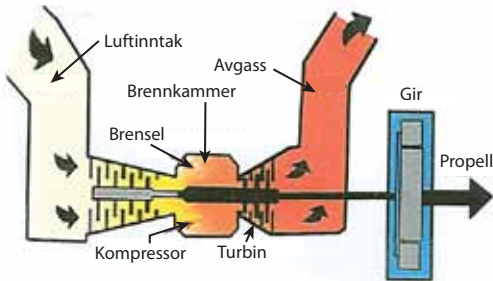
Forbrenningen starter i et for-kammer med rik blanding, og stråler med brennende gass sprøytes inn i hovedforbrenningsrommet med mager blanding hvor resten av gassen forbrenner.



**Skadelige utslipp ved drift med MDO (Marine Diesel Oil) sammenlignet med drift med naturgass.**

Fra [9.13, kilde: Rolls-Royce Marine]

# Gassturbiner



## Prinsipiell virkemåte for en gassturbin

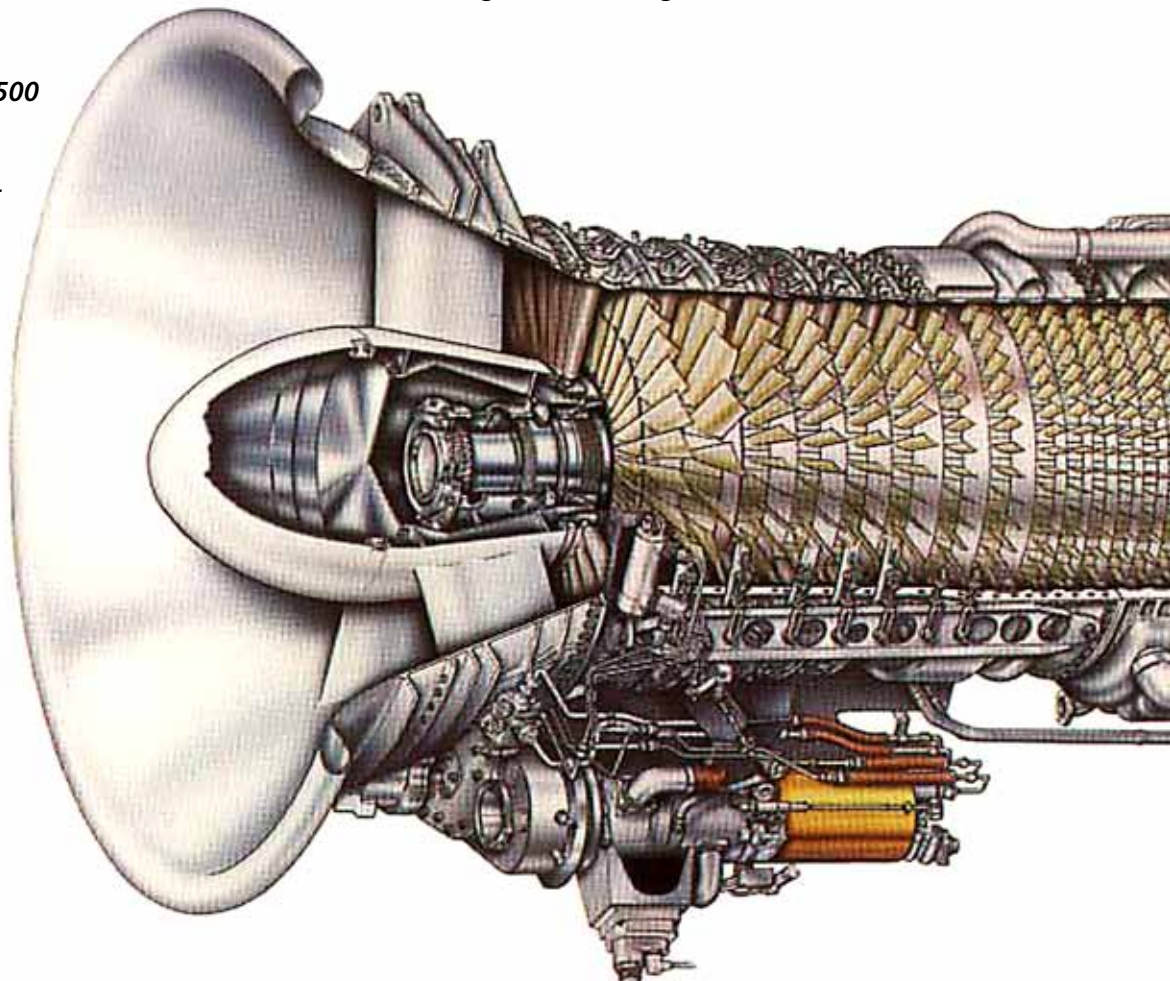
Verdens første gassturbin ble bygd i 1903 av den norske ingeniøren Ægidius Elling. Den hadde en effekt på 11 hk. Konstruksjonen var fremragende både varmeteknisk og strømningsteknisk, men materialteknikken var den gang ikke kommet langt nok til at turbinen fikk noen praktisk betydning. Blant annet var sigefastheten for dårlig for turbinskovlene.

Innledningsvis bør du på nytt se på sidene 7-8/9 hvor det framgår at gassturbiner til havs brukes til framdrift av fartøy (system nr. 3 og 4, både ved drift med propell og med vannjet). Vi ser videre av tabellen at gassturbiner også brukes sammen med elektrisk generator til kraftverk på plattformer (system nr. 20). Du bør også lese sidene 7-10/11 på nytt. Her får du prinsipielt beskrevet arbeidsprinsippet for gassturbiner, hva som skiller dem fra stempelmotorer og hvorfor de har så dårlig virkningsgrad (altså høyt brenselsforbruk).

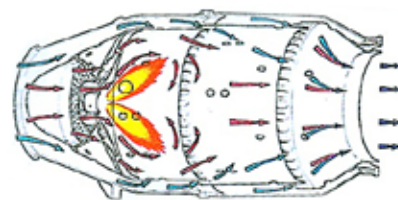
## Gassturbiners virkemåte

Vi skal se litt nærmere på hvordan gassturbiner arbeider. Arbeidsprosessen er vist sammen med arbeidsprosessen til en dieselmotor på side 7-32. Vi ser der både hva de to motortypene har felles og hva som skiller dem. Begge har en kompresjonsprosess, en forbrenningsprosess og en ekspansjonsprosess. I begge tilfelle kan disse framstilles i trykk–volum-diagrammer, hvor de lukkede flatene er uttrykk for det arbeidet som utføres. Det er imidlertid også klare forskjeller mellom gassturbinen og dieselmotoren, blant annet:

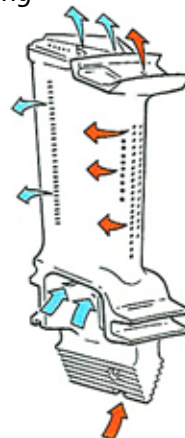
**General Electric gassturbin, type LM 2500**  
Effekt: 25000 kW  
Totrinns arbeidsturbin:  
Høytrykkstrinnet driver kompressoren, og lavtrykkstrinnet driver lasten. Det er flere brennkammere plassert rundt omkretsen



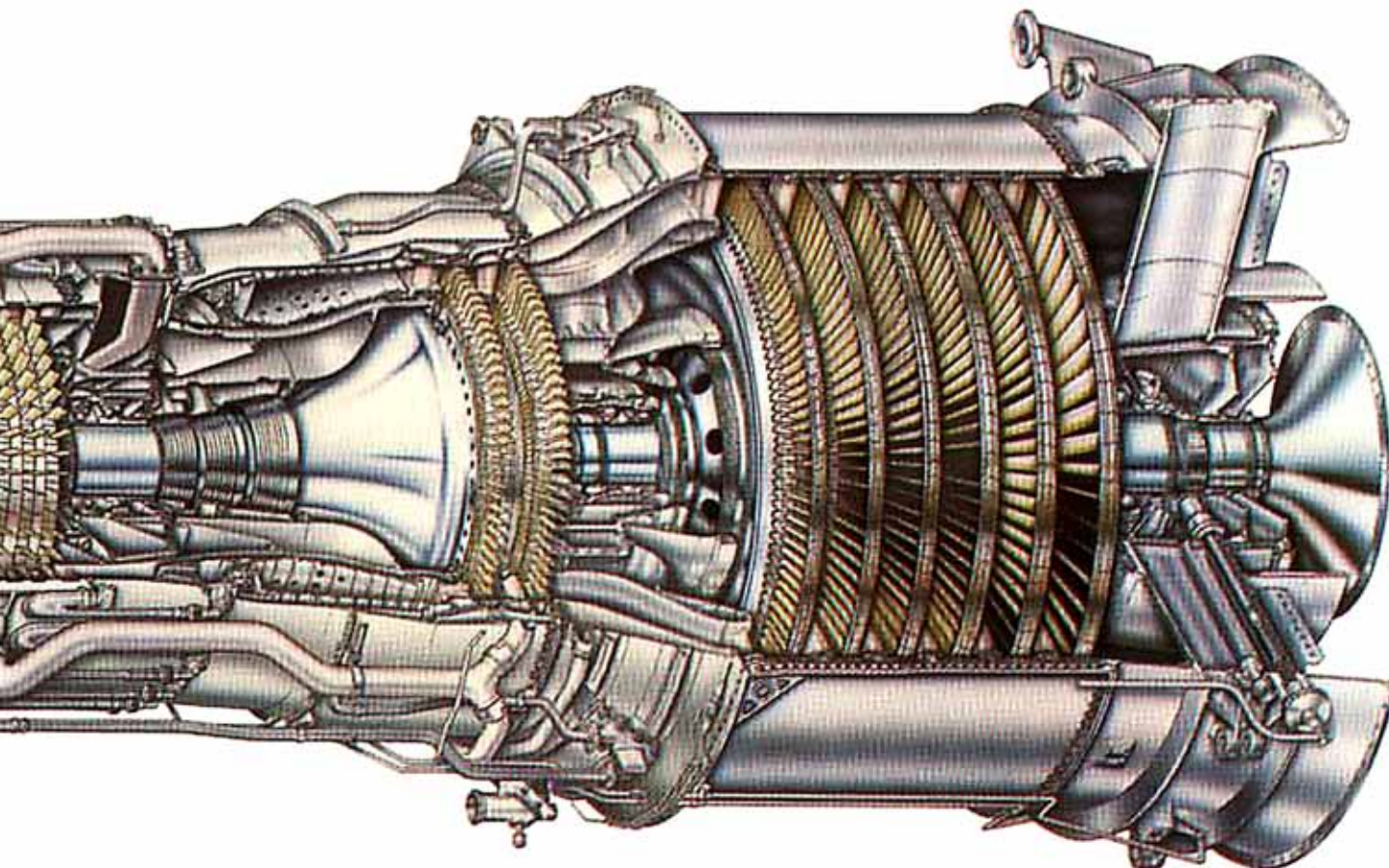
- **Vesentlig mindre kompresjon** i en gassturbin og dermed både lavere kompresjonstrykk og -temperatur. Kompresjonen skjer i et turbinhjul og ikke i sylindere.
- **Kontinuerlig forbrenning** i en gassturbin og diskontinuerlig i en dieselmotor. Dette er en meget viktig forskjell, se side 7-11.
- **Litt synkende trykk under forbrenningen** i en gassturbin. Under forbrenningen strømmer forbrenningsgassene videre til arbeidsturbinen samtidig som trykket dermed synker litt. Dette er ikke tilfelle i en dieselmotor. Her vil *første del* av forbrenningen skje meget raskt, slik at trykket stiger betydelig, se arbeidsdiagrammene på neste side. Det maksimale trykket i en gassturbin er bare 18-20 bar, mens det kan bli mer enn 200 bar i en mellomhurtig dieselmotor.
- **Relativt lave forbrenningstemperaturer** sammenlignet med en dieselmotor. Vi har flere ganger foran nevnt at det av materialtekniske grunner er meget viktig å holde temperaturene som skovlene i arbeidsturbinen utsettes for, under kontroll. Disse skovlene får stor påkjenning av formidable sentripetalkrefter under rotasjonen, og de vil begynne å "sige" hvis materialet blir for varmt. I den gassturbinen som er vist nedenfor, må derfor temperaturen på forbrenningsgassene ikke overstige 1200°C. Dette på tross av at skovlene blir kjølt ved hjelp av kjøleluft som strømmer gjennom innvendige borer i de tynne bladene, se figur. Som vi skjønner, blir framstilling av slike turbinblad komplisert og kostbart. Da er kjøling av de varmebelastede deler i en dieselmotor (stempel, topplokk, avgassventiler) vesentlig enklere. Her er forbrenningstemperaturene mer enn dobbelt så høye. Som tidligere nevnt, forklarer dette dieselmotorens gode virkningsgrad. Det relativt lave temperaturnivået i gassturbiner oppnås ved å bruke mye mer luft i forhold til brenselmengden enn i en dieselmotor, altså ved å bruke høyere luftfaktor, se side 7-27.

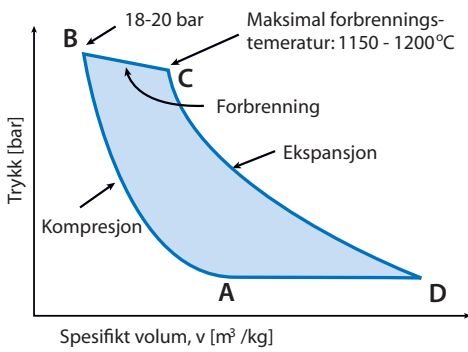


*Forbrenning og strømming i et brennkammer i en Rolls-Royce gassturbin. Røde piler viser lufttilførsel og forbrenningsgasser fra forbrenningen. Blå piler viser luftkjøling*



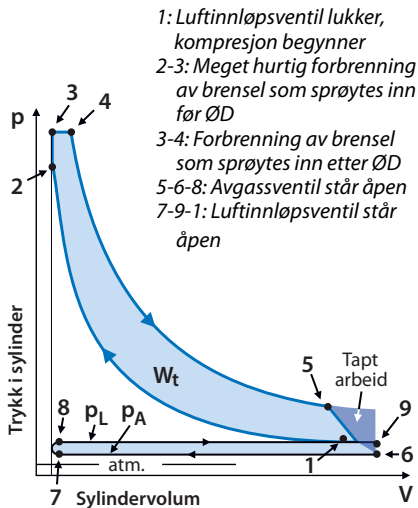
*Innvendig luftkjøling av skovl for arbeidsturbin (Rolls-Royce). Røde piler viser strømming av kjøleluft med høyt trykk og blå piler luft med lavt trykk*





## Arbeidsdiagram for en gass turbin

Arbeidsdiagrammer for en gass turbin og en dieselmotor er sammenstilt i figurene til venstre. I begge tilfelle er trykkforløpet framstilt som funksjon av volumer. For gassturbinen, som er en strømningsmaskin, brukes imidlertid spesifikt volum ( $v$ ,  $m^3/kg$ ), mens det for dieselmotorer selvsagt brukes volumer i  $m^3$  ( $V$ ) langs førsteaksen. Arbeidet som svarer til de lukkede flatene, vil dermed være Joule/kg luft for gassturbinen og Joule per sylinder for dieselmotoren. For øvrig er figurene selvforklarende.



1: Luftinnløpsventil lukker, kompresjon begynner  
 2-3: Meget hurtig forbrenning av brensel som sprøytes inn før  $\emptyset D$   
 3-4: Forbrenning av brensel som sprøytes inn etter  $\emptyset D$   
 5-6-8: Avgassventil står åpen  
 7-9-1: Luftinnløpsventil står åpen

## Anvendelser

Som tidligere nevnt, brukes gassturbiner lite til framdrift av skip med propell fordi brenselforbruket er for høyt. Unntaket er når gassturbinens beskjedne plassbehov og lave vekt spiller en viktig rolle. Dette er som kjent tilfelle i hurtiggående båter drevet med propell eller vannjet (semideplasementsfartøyer eller planende fartøyer). Figuren nedenfor viser et slikt fartøy (propelldrevet).

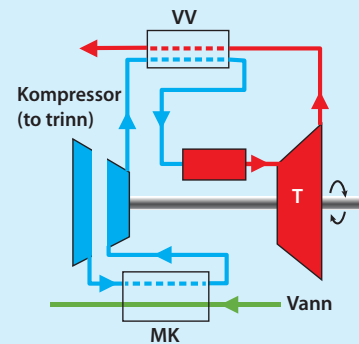
For øvrig anvendes gassturbiner i stor grad til drift av generatorer i kraftverk om bord i plattformer som ikke får elektrisk energi overført fra land. Også dieselmotorer brukes til å produsere elektrisk energi i plattformer, se figur side 8-13.

### Forbedring av virkningsgrad

To vanlige metoder:

- Mellomkjøling (MK)
- Varmeveksling (VV)

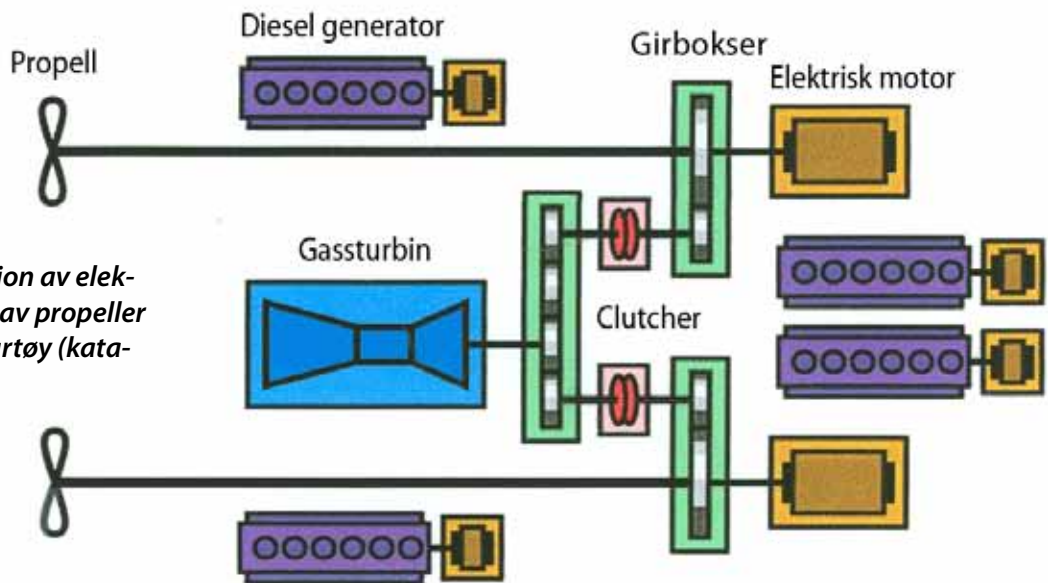
Slike tiltak gjør imidlertid anlegget både mer kostbart, komplisert og tyngre. Særlig det siste er en vesentlig ulempe



### Arbeidsdiagrammer for en gass turbin og en mellomhurtig, fire-takts dieselmotor.

For gassturbinen framgår virkemåten av påskriftene, for dieselmotoren vises til se side 7-15

### Anlegg for produksjon av elektrisk energi og drift av propeller i et hurtiggående fartøy (kataran).



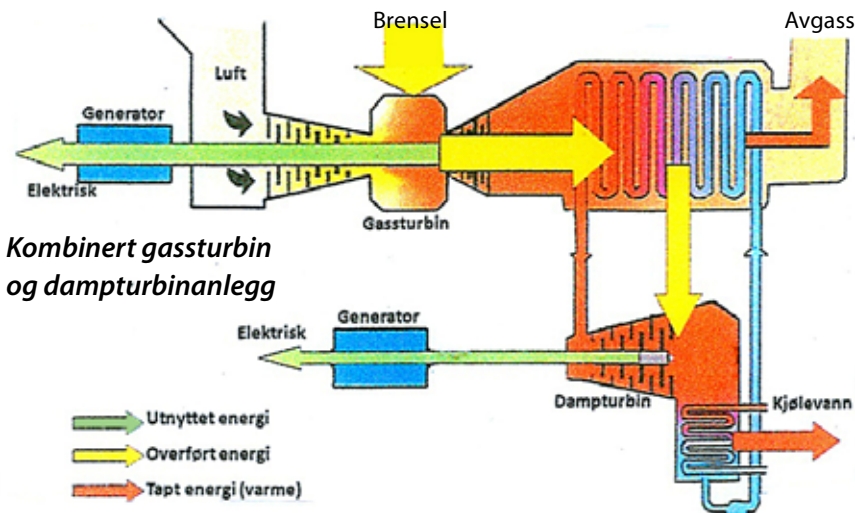


# Gassturbin og dampturbin – kombianlegg

Hver for seg har gassturbin og dampturbin relativt lave virkningsgrader. Årsaken til dette er grunnprinsippet for en varmemaskin der virkningsgraden er avhengig av temperaturspranget over prosessen. Temperaturspranget totalt sett for gassturbinen og dampturbinen blir større i et kombianlegg, og dermed oppnås en høyere total virkningsgrad. Et slikt kombianlegg kan oppnå virkningsgrad opp mot 0,5. Figuren under viser energiflyten i et slikt anlegg.

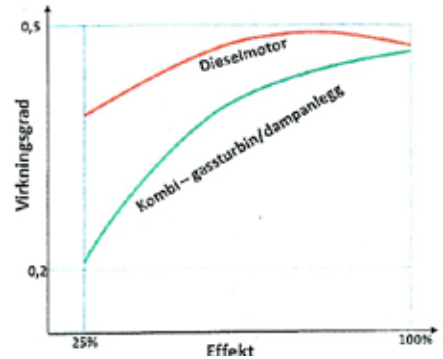
Årsaken til at slike kombianlegg i svært liten grad er benyttet for energiproduksjon om bord i skip, er tre sentrale egenskaper:

- Virkningsgraden er svært lastavhengig og avtar dramatisk når lasten avtar
- Systemet har mye tregere responstid enn en dieselmotor og har problemer med å håndtere raske lastvariasjoner, som for eksempel under manøvrering av et skip
- Systemet setter høye krav til rene brenslere. Tyngre, billige brenslere som inneholder svovel og andre urenheter, vil føre til skade på gassturbinen.

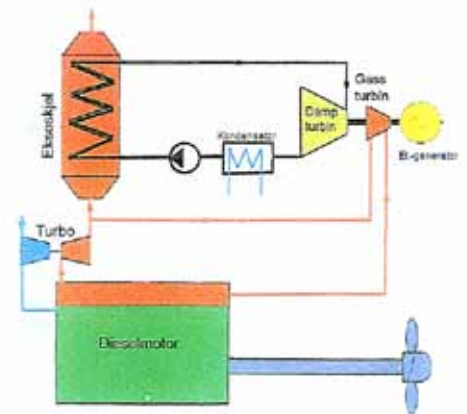


## Mulige anvendelser av gassturbin og dampturbin til energiproduksjon om bord i skip.

- For skip med ekstreme krav til lav vekt og høy effekt er gassturbin ofte den eneste løsningen.
- For skip med drift på naturgass (LNG) kan kombinert gassturbin/dampanlegg i noen tilfelle konkurrere med dieselmotorer
- For å øke virkningsgraden ytterligere for dieselmotoranlegg kombineres dette med et dampanlegg som gjenvinner noe av avgasstapene fra motorene. Dette er system som er og har vært i bruk, men kost-nytte-forholdet er kun lønnsomt på anlegg med store effekter. Et slikt anlegg kan øke totalvirkningsgraden med 5-10 %, forutsatt et relativt avansert system. Figuren i midten viser hovedprinsippene for gjenvinning av avgassenergi.



*Virkningsgrader for gassturbin/dampturbin kombianlegg sammenlignet med dieselmotor*



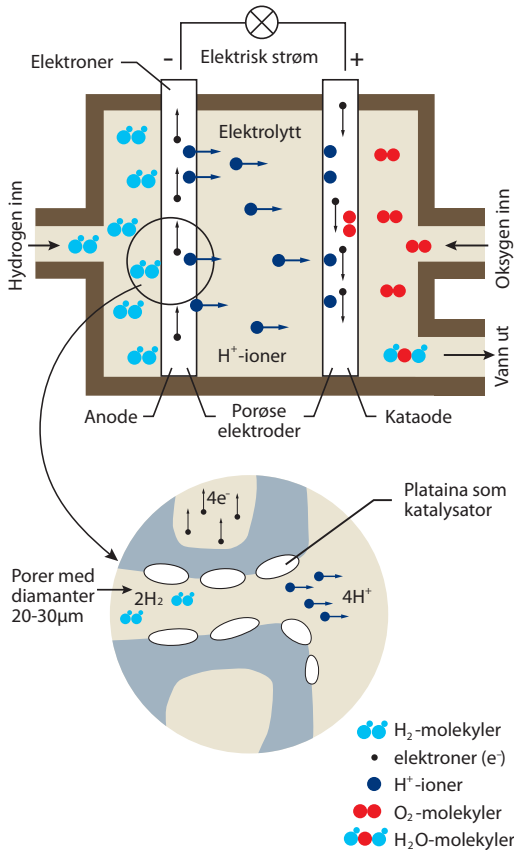
*Kombinasjon av dieselmotor og dampanlegg*



## Vi undrer oss på:

Når brenslere omformes til mekanisk energi, produseres det samtidig mye "spillvarme". Hvorfor kaller vi det "spillvarme", og hvordan kan vi utnytte denne energien på en bedre måte?

# Produksjon av elektrisk energi ved hjelp av brenselceller



## Skjematisk framstilling av virkemåten for en PEM brenselcelle.

Begge elektrodene er av grafitt og utformet slik at brenset (H<sub>2</sub>) og oksidasjonsmiddelet (O<sub>2</sub> i lufta) strømmer gjennom innvendige porer. Ved anoden ioniseres hydrogenet i:

- Elektroner, som vandrer gjennom den ytre kretsen
- Positive hydrogenioner (H<sup>+</sup>), som beveger seg gjennom elektrolytten til katoden

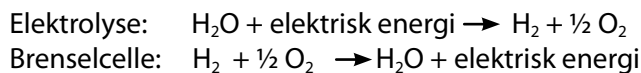
Oksygenatomene i den porøse katoden ioniseres (blir negative) ved at de her fanger opp elektronene. Disse negative oksygenionene vil så slå seg sammen med de positive hydrogenionene og danne vann.

På side 7-8/9 er det gitt en oversikt over ulike metoder for produksjon av elektrisk energi til havs. En av de oppførte metodene (nr. 11) er bruk av brenselceller. For ordens skyld skal vi nedenfor gi en nærmere beskrivelse av denne muligheten, selv om det synes å være svært "høyt opp og langt fram" før den får noen praktisk betydning til havs.

Brenselceller ble utviklet allerede i 1969 for Apollo 11 hvor det var behov for å kunne produsere elektrisk energi innenfor et lukket system. Utvikling pågår fortsatt, men i dag er motivasjonen særlig knyttet til miljøspørsmål. Teknologien har imidlertid sine begrensninger, og det store gjennombruddet har ikke kommet. Foreløpig er det bare utviklet brenselceller for relativt små effekter, og det stilles mange spørsmål til om dette er en teknologi som har særlig potensial ut over helt spesielle anvendelser.

## Hvordan virker en brenselcelle?

En brenselcelle kan vi enkelt si er et reversert elektrolyseapparat. I kjemien lærer vi at elektrolyse er en prosess der vi bruker elektrisk strøm til å forandre kjemiske forbindelser. Disse elektrokjemiske reaksjonene foregår i en elektrisk ledende væske, elektrolytten. Ved elektrolyse av vann blir vannmolekyler splittet til hydrogen- og oksygenmolekyler. I en brenselcelle går prosessen den andre veien. Hydrogen og oksygen reagerer med hverandre og danner vann. Samtidig frigjøres elektrisk energi.



Temperaturnivået under oksidasjonsprosessen i en brenselcelle er mye lavere enn det vi får ved en vanlig forbrenning av hydrogen. Ofte sier en derfor at en brenselcelle arbeider med "kald forbrenning". Dette er misvisende. Selv om vi i begge tilfelle har en oksidasjon av et brensel, er prosessene prinsipielt forskjellige. I en vanlig forbrenning i en varmemotor omdannes den kjemiske energien til *termisk energi*, mens vi i en brenselcelle får omdannet den kjemiske energien *direkte til elektrisk energi*. De grunnleggende lovene som styrer disse to prosessene, er vesensforskjellige og resulterer i forskjellig virkningsgrad. Anlegg med brenselcelle og elektromotor gir generelt bedre totale virkningsgrader enn anlegg med forbrenningsmotor av sammenlignbar størrelse.

Egenskaper til brenselceller. Den viktigste fordelen til brenselceller er miljøvennligheten. Med hydrogen som drivstoff er avgassen ren vandamp. Her må vi imidlertid merke oss at hydrogen bare er en energibærer som må lages basert på en annen energikilde. Dermed kan dette bli et spørsmål om å redusere lokale utslipp på bekostning av de globale. Unntaket er når brenselcellen bruker hydrogen som er produsert av fornybar energi.

Når energikilden er metan, et annet hydrokarbon eller metanol, må vi i tillegg til selve brenselcellen ha en reformator som skiller ut hydrogenet fra brenset. Slike prosesser gir imidlertid biprodukter som inneholder karbon (CO og CO<sub>2</sub>) og er altså ikke forurensningsfrie.

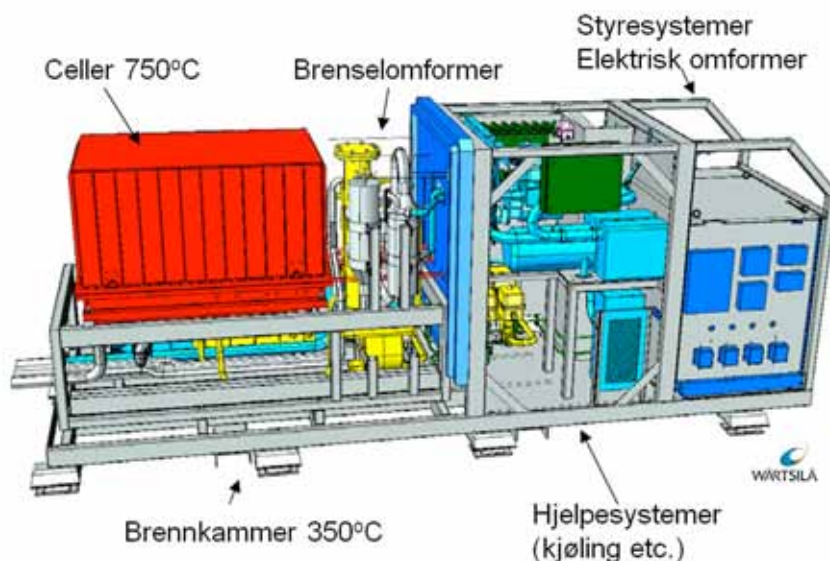
Brenselceller for høye effekter blir plasskrevende, se figur nedenfor. Totalvirkningsgraden blir heller ikke tilfredsstillende. De store og mest effektive høytemperaturcellene trenger dessuten oppvarming til svært høye temperaturer før de fungerer og blir dermed trege.

### Anvendelse av brenselceller

Brenselceller egner seg til spesielle anvendelser der det lokale miljøet er i fokus. Små lavtemperatur brenselceller er i bruk som strømforsyningsenheter til ulike formål der lave effekter er tilstrekkelig. For større effekter er det høytemperaturcellene som er aktuelle, men med eksisterende teknologi vil en brenselcelle for bare 50 kW kreve like stor plass som en forbrenningsmotor som yter 1 MW. For maritime anvendelser er det foreløpig bare aktuelt med svært små effekter, og som et hjelpesystem som benyttes i havn eller andre steder der det er strenge utslippskrav. Brenselceller som hovedmotor i store skip er lite realistisk med dagens teknologi.

	Type	Temp. (C°)	Drivstoff	Virkningsgrad	Anvendelse
Lavtemperatur	PEM	60-100	H <sub>2</sub> / Luft	0,3 - 0,4	Små 0,1 - 2kW
	AFC	60-120	H <sub>2</sub> / O <sub>2</sub>	0,3 - 0,4	Små 0,1 - 2kW
Mellomtemperatur	PAFC	150-250	H <sub>2</sub> / Luft	0,35 - 0,45	Mellomstore 0,1 - 5kW
Høytemperatur	MCFC	550-700	H <sub>2</sub> , CO, NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> / Luft + CO <sub>2</sub>	0,45 - 0,55 (0,8 - 0,9)*	Store <1MW
	SOFC	650-800	H <sub>2</sub> , CO, NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> / Luft + CO <sub>2</sub>	0,45 - 0,55 (0,8 - 0,9)*	Store <1 MW

\*Totalvirkningsgrader som kan oppnås med full utnyttelse av "spillvarme"



50 kW høytemperatur brenselcelle (Wärtsilä)

### Oversikt over forskjellige typer brenselceller

- PEM – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
- AFC – Alkaline Fuel Cell
- PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell
- MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell
- SOFC – Solid Oxide Fuel Cell



### Vi undrer oss på:

- Hydrogen er et av de reneste brenslene vi kjenner og som ved forbrenning i luft reagerer med oksygen og gir rent vann som restprodukt. Hva er grunnen til at vi ikke bruker mye mer hydrogen?
- Hva er hovedforskjellene på energiomformingen i en brenselcelle sammenlignet med en forbrenningsmotor?

## Energioverføring om bord i skip

# Mekanisk energioverføring

### Hvorkan kan energi overføres om bord i skip?

Til å drive et skip trengs relativt store mengder energi både til fram - drift og til å utføre mange andre oppgaver ombord. Som beskrevet tas energien fra lagringskilden, som er brenslet, og omdannes så til utnyttbar energi i en eller annen sentral reaksjonsmaskin (forbrenningsmotor). Videre må denne energien transporteres fram til der den skal brukes, altså der den skal utføre et arbeid eller tilføre varme. I hovedsak snakker vi om tre ulike måter å overføre energi ombord i skip:

1. Mekanisk overføring - via drivakslinger, gir og koplinger
2. Elektrisk overføring – via ledninger og kabler
3. Hydraulisk overføring – via rør og ventiler

Disse tre energioverføringsprinsippene har ulike egenskaper som gjør at vi vil velge løsning ut fra hvilke egenskaper som gir oss det beste resultatet. Dette er egenskaper knyttet til funksjoner, arrangement, virkningsgrader, sikkerhet og miljø. Vi skal i resten av kapitlet gi en kortfattet beskrivelse av de ulike energioverføringene – deres egenskaper, fordeler og ulemper.

### Mekanisk energioverføring

Det enkleste og eldste prinsippet for energioverføring er mekaniske systemer. De overfører energi i form av krefter og vrimomenter gjennom akslinger, gir, koplinger og mekanismer. I enden av akslingene omformes den roterende energien til andre bevegelsesformer og krefter. Et godt eksempel på dette er det som skjer i en veivmekanisme i en motor, der stemplenes lineære bevegelse fram og tilbake omformes til rotasjon i akslingen som går ut av maskinen. En vindusvisker er et annet nærliggende eksempel der roterende energi fra en drivmotor omformes til en pendlende bevegelse.



Hovedelementene i mekaniske systemer er:

*Akslinger* som overfører den roterende energien i form av et vrimoment (torsjon).

*Gir* transformerer roterende energi mellom to tilstander av omdreiningshastighet og vrimomentet. Gir forbinder vi hovedsakelig med tannhjuloverføringer i mange ulike varianter avhengig av utvekslingsforhold, men det finnes også mange andre varianter som for eksempel kjedeoverføringer og reimoverføringer. De fleste gir har en fast oversetting, men vi finner også mange giroverføringer som har flere trinn. Det giret de fleste av oss kjenner godt, er girutvekslingen på en sykkel der vi veksler mellom lett gir ved lav hastighet og stor motstand, og tyngre gir når motstanden er mindre og det skal gå fortere. *Koplinger* er en gruppe elementer som sørger for sikker overføring av energi mellom de andre maskinelementene. De består av flere typer: Enkle faste koplinger som sørger for å låse tilstøtende elementer sammen. Elastiske koplinger som tar opp skjevheter, demper støtlaster og reduserer overføring av vibrasjoner (støy). Av/på- koplinger som sørger for til- og frakopling (clutch).

### Vi undrer oss på:

- Hva er grunnen til at vi trenger ulike løsninger for energioverføring og energiomforming?
- Hvorfor bruker vi mye elektrisk energi på land, mens vi om bord i skip heller bruker mekaniske eller hydrauliske overføringssystemer?

*Mekanismer* er de elementene som omformer bevegelse mellom for eksempel roterende bevegelse og lineære bevegelsesformer. Dette er en svært stor og kompleks gruppe elementer som er tilpasset spesielle oppgaver. En av de mest brukte er veivmekanismen vi finner i motorer og pedalene på en sykkel.

*Lager* er elementer som styrer og holder de bevegelige elementene på plass i systemet, og overfører krefter til omgivelsene. Det mest vanlige er roterende opplagringer, men det finnes også mange andre ulike typer opplagringer for ulike bevegelsesformer.

### Ligninger for beregninger

Energien som overføres, følger svært enkle grunnleggende lover utledet fra:

Arbeid:  $W_L = \text{Kraft} \cdot \text{vei}$  for lineær bevegelse  
 $W_R = \text{Moment} \cdot \text{vinkel}$  for roterende bevegelse

Effekt:  $P_L = \text{Kraft} \cdot \text{hastighet}$  for lineær bevegelse  
 $P_R = \text{Moment} \cdot \text{vinkelhastighet}$  for roterende bevegelse

Skrevet med symboler:  $P = M \cdot \omega$

der  $M$  = vrimomentet som overføres i Nm og

$\omega$  = vinkelhastigheten i radianer/sek

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$  når  $n$  = omdreiningshastighet i omdreininger per minutt

I alle energioverførings-elementer har vi mer eller mindre tap som skyldes ulike former for friksjon som omformer mekanisk energi til varme. Når vi summerer alle tapene og definerer en virkningsgrad for maskinelementet, gjelder følgende:

Utgående effekt = Inngående effekt · virkningsgrad

$P_{ut} = P_{inn} \cdot \eta$  der  $\eta$  er virkningsgraden for maskinelementet

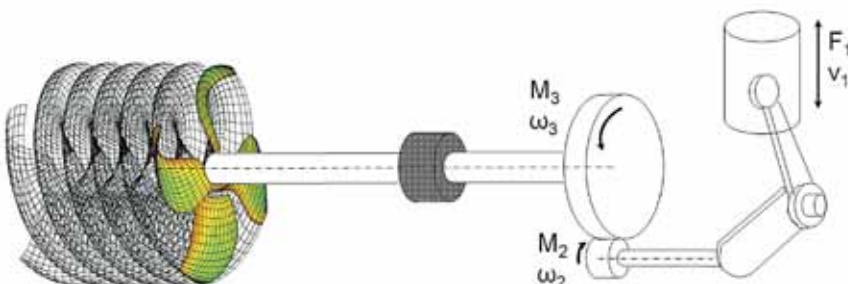
Dersom vi antar tapsfri energioverføring, kan vi skrive følgende sammenheng:

$$F_1 \cdot v_1 = M_2 \cdot \omega_2 = M_3 \cdot \omega_3$$

Dersom vi tar med tapene i hvert ledd i energioverføringen kan vi skrive følgende sammenheng:

$$M_2 \cdot \omega_2 = F_1 \cdot v_1 \cdot \eta_1 \text{ og } M_3 \cdot \omega_3 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot \eta_2$$

Og slik blir  $M_3 \cdot \omega_3 = F_1 \cdot v_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$

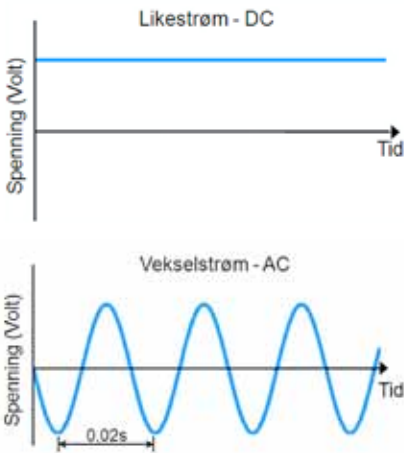


### Vi undrer oss på:

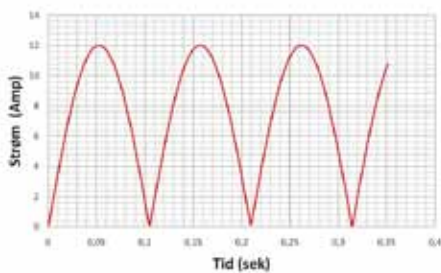
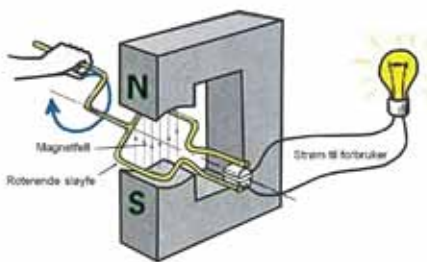
Ta for deg sykkelen din, og identifiser ulike transmisjons-elementer. Hvor mange akslinger, koplelementer, gir, lager og mekanismer finner du? Dette er til dels de samme elementene som du vil finne igjen i alle slags mekaniske maskinerisystemer. Kan du også klare å beregne hvor store krefter og momenter som noen av disse overfører?

## Energioverføring om bord i skip

# Elektrisk energioverføring



Illustrasjon av likestrøm og vekselstrøm



Illustrasjon som viser prinsippet for en helt enkel vekselstrøms-generator med tilhørende strøm

Den mest vanlige energioverføringsformen er elektrisitet, spesielt på land der elektrisk energioverføring er klart dominerende. På land har vi et felles (globalt) standardisert elektrisk overføringsnett basert på sentralisert energiproduksjon i store kraftverk. Om bord i skip og andre mobile systemer utgjør elektrisk energi en mindre andel av energioverføringen fordi man her ikke har tilgang til elektrisk energi fra et stort nettverk, men må produsere energien om bord. Da er det ofte slik at en mer direkte anvendelse av energien uten å gå gjennom elektrisitet både er mer effektivt og enklere. Likevel bygges det i dag stadig flere skip som er basert nesten fullt ut på elektrisk energioverføring. Ofte er disse skipene omtalt som "diesel-elektriske". Ombord i disse skipene installerer man altså en egen kraftstasjon som produserer elektrisk energi. Det samme gjør man ofte også i plattformer for olje og gassutvinningen i stedet for å ha en lang "skjøteledning" til land.

Elektrisk energioverføring er basert på ulike prinsipper og former. Først og fremst snakker vi om likestrøm (DC) eller vekselstrøm (AC), og høyspenning eller lavspenning.

### Likestrøm eller vekselstrøm

Likestrøm har sin bakgrunn i systemer der vi må lagre energi. Lagring gjøres i ulike former for batterier der elektrisk strøm blir laget gjennom kjemiske prosesser som binder elektriske ladninger. Vekselstrøm derimot, er energi som blir laget og brukt samtidig. Vekselstrøm er et resultat av at energien skapes i roterende maskiner der strømmen drives av magnetisk/elektrisk induksjon som vist på figurene til venstre. Når vi lager slike maskiner, vil strøm og spenning naturlig følge en svingende funksjon som veksler mellom positiv og negativ spenning. I vekselstrøm skifter spenningen mellom positiv til negativ og tilbake til positiv 50 eller 60 ganger hvert sekund. Dette kaller vi nettfrekvensen, men svingningene er så hurtige at vi ikke kan se at lysene faktisk blinker. Nettfrekvensen på land (Norge) er 50 Hz, mens det om bord i skip er mest vanlig å bruke 60 Hz.

### Lavspenning eller høyspenning

Spenningsnivået for vekselstrøm er standardisert på mange ulike nivå. Vi kjenner godt til 230 volt som er det vanlige i hus (Norge), mens det på nettet brukes mye 400 volt. Videre har vi høyspenningssystemene for overføring over lange strekninger. Her snakker vi om spenninger på 22 kV (kilovolt) og 132 kV.

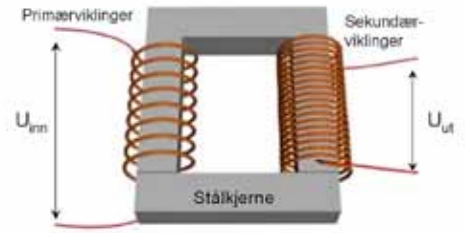
I fysikk har vi lært at elektrisk effekt er gitt som:

$$P = U \cdot I$$

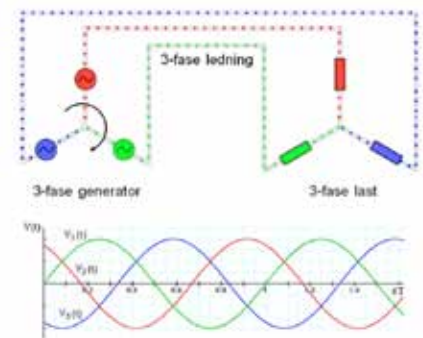
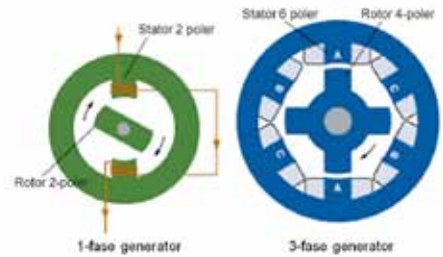
Skal vi øke energimengden (effekten) må vi derfor øke strømmen ( $I$ ) og/eller spenningen ( $U$ ). Dersom vi øker strømmen, trenger vi kraftigere ledninger som kan lede store strømmengder uten for store tap. Dersom vi øker spenningen, må vi isolere bedre for å unngå kortslutninger. Høye spenninger som kan sende strøm gjennom kroppen, er også svært farlig, og vi må derfor skjerme systemene for å unngå kontakt.

Om bord i skip finner vi alle spenningsnivåer fra 24 volt likestrøms-systemer til 6,6 kV (kilovolt) høyspenningssystemer. Mellom disse finner vi mange ulike spenninger. Disse er vanligvis standardisert og tilpasset ulike maskiner og utstyr. Vi vet at det går relativt dårlig dersom vi kople til en maskin som er beregnet for en annen spenning. I beste fall vil den da fungere dårlig, mens den i verste fall vil kortslutte og brenne opp eller eksplodere. For framdriftssystemer med store effekter brukes høyspenning for å redusere overføringstapene.

Med vekselstrøm er det også svært enkelt å omforme mellom lav og høy spenning. Til dette brukes transformatorer der magnetfeltet i en stålkjerne overfører effekten, og forholdet mellom antall viklinger på hver side avgjør forholdet mellom spenningsnivåene inn og ut av transformatoren, som vist på figuren.



**Prinsippet for en elektrisk transformator**



**Hovedprinsippene for elektriske generatorer som lager vekselstrøm.**

### 1-fase eller 3-fase

For vekselstrøm har vi systemer for 1-fase og 3-fase. Dette er knyttet til hvordan maskinene lages. 3-fase er som oftest utgangspunktet, mens 1-fase er en tredjedel av 3-fasen, basert på hvordan systemet koples. For 3-fase motorer er også dreieretning avhengig av hvordan de 3 fasene koples.

### Elektrisk overføring og hastighetsregulering med frekvensomformere

Generatorer og motorer i vekselstrømsystemer er vanligvis det vi kaller synkrone maskiner. Det betyr at de må følge frekvensen på nettet, og at de dermed vil gå med et konstant omdreiningstall som er koplet til denne frekvensen. Antall poler (eller polpar) i maskinen bestemmer hastigheten i forhold til nettfrekvensen. En typisk elektromotor på 50 Hz nett går med 1500 omdreininger pr. minutt, mens den samme motoren vil gå med 1800 omdreininger per minutt tilkople et 60 Hz nett. For å regulere hastigheten trinnløst må man enten gå veien via likestrøm, eller man kan installere frekvensomformere. Det vil si omformere som tar inn nettfrekvensen og sender ut en annen frekvens til motoren som dermed vil gå med en omdreiningshastighet som er større eller mindre enn det nettfrekvensen ville gi. Utvikling av frekvensomformere har vært svært avgjørende for å kunne bruke elektriske maskiner i systemer der variabel omdreiningshastighet er helt nødvendig.

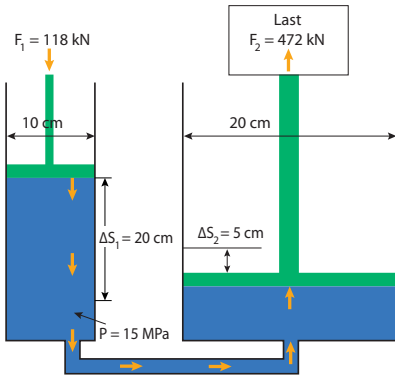


### Vi undrer oss på:

- Hva er hovedgrunnen til at det meste av elektrisk effekt finnes i form av vekselstrøm, og når er det helt nødvendig at vi har likestrøm?
- Bryting av likestrøm er en stor utfordring fordi vi da får en lysbue over kontaktene i bryteren. Hvorfor er det et mye mindre problem ved bryting av vekselstrøm?
- Geir kjøpte en elektrisk klokkeradio på ferie i USA. Da han kom hjem, viste det seg at klokken sakk 4 timer i døgnet. Hva kunne være grunnen til dette?

## Energioverføring om bord i skip

# Hydraulisk energioverføring



Prinsipp for hydraulisk overføring

### Eksempel 7.10:

I fysikken har vi lært at Kraft = trykk · areal.  
Hvis vi har en sylinder med diameter 0,1 meter og et hydraulikktrykk på 15 MPa, får vi en kraft:

$$F_1 = 15 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \cdot \pi \cdot (0,1\text{m}/2)^2 = 118 \text{ kN}$$

$$F_2 = 118 \text{ kN} \cdot (20/10)^2 = 472 \text{ kN}$$

Utførte arbeider:

$$W_1 = F_1 \cdot \Delta S_1 = 118 \text{ kN} \cdot 0,2 \text{ m} = 23,6 \text{ kJ}$$

Eller:

$$W_2 = F_2 \cdot \Delta S_2 = 472 \text{ kN} \cdot 0,05 \text{ m} = 23,6 \text{ kJ}$$



Eksempel på et offshore fartøy der dekkmaskineri drives av hydraulikk.

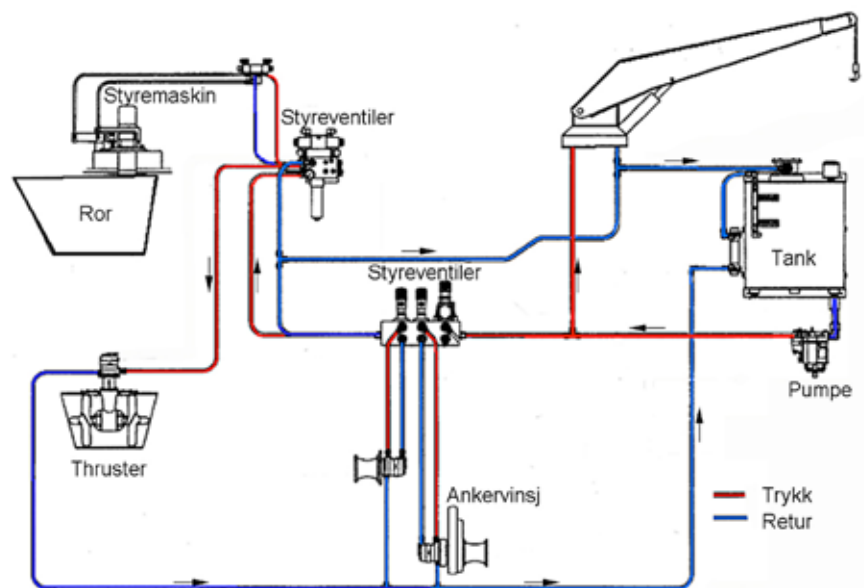
## Prinsipp for hydraulisk effektoverføring

Hydraulisk effektoverføring er basert på en væske som utøver trykk på en flate som igjen beveger seg og utfører et arbeid. I de fleste systemer er væsken en olje, men også andre væsker brukes når det er spesielle krav til det ytre miljøet. Hovedelementene i hydrauliske systemer er maskiner som omformer energien fra mekanisk til hydraulisk energi og motsatt. Videre har vi overføringselementene som består av rør og slanger som sørger for at energien overføres fra kilde til forbruker. På toppen har vi styresystemene som består av ulike ventiler som regulerer og styrer oljestrømmen i systemet.

## Anvendelser

Når vi kommer ombord i et skip, finner vi at svært mange systemer opereres av hydraulikk. Alt fra store kraner til vindusviskere drives av hydrauliske motorer eller sylindere. Både figurene til venstre, under og på neste side viser anvendelser på fartøy som er utrustet for off-shore arbeidsoperasjoner. Disse kan blant annet involvere installasjoner, løfting/senking og sleping av utstyr både på overflaten og på havbunnen.

Også andre skip enn de som arbeider innen olje- og gassutvinningen har behov for hydraulisk utstyr i en rekke sammenhenger både på og under dekk. En meget viktig skipsgruppe er da for eksempel fiskefartøyer. Du kan derfor lese mer om hydraulikksystemer i kapittel 12 om fiskeriteknologi, med blant annet et eksempel på beregning av en hydraulisk drevet vinsj for innhaling av en trål på sidene 12-22/23.



Eksempel på et hydraulisk system om bord i et skip.

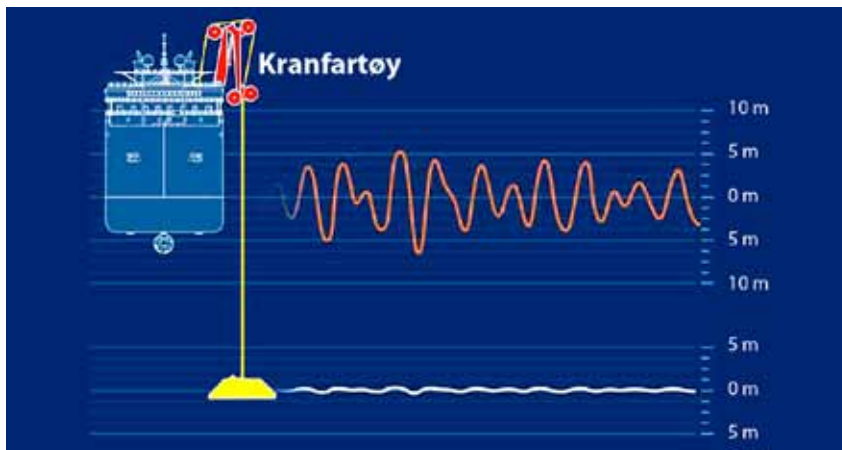


## Hvorfor velger vi hydraulisk overføring?

Hydraulisk overføring er svært sterk i forhold til størrelse på maskinene. I mange anvendelser er det nesten umulig å tenke seg løsninger basert på annen form for energioverføring på grunn av vekt og plass-behov. En av de viktigste egenskapene til hydraulisk overføring er evnen til høye statiske krefter. Det vi si stor kraft uten bevegelse. Dette er det stort sett kun hydraulikk som kan utføre. Hydrauliske systemer er også svært robuste og sikre i røffe miljøer som de vi har på dekk av et skip, der elektriske og mekaniske systemer vil ha store problemer på grunn av sjøvann, kulde/varme og korrosjon.

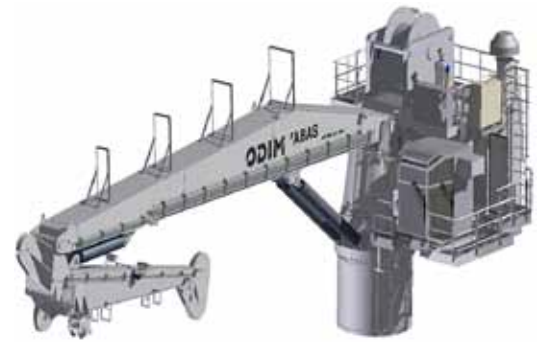
Hydrauliske systemer er lette å styre og svært nøyaktige. De behersker både rettlinjet bevegelse og roterende bevegelse med trinnløs regulering i begge bevegelsesretningene. De aller fleste hydraulikkssystem har også innebygd automatisk overbelastningsbeskyttelse som hindrer driftsstans og i verste fall havari. I mekaniske systemer fører overbelastning ofte til permanent skade og havari, og i elektriske systemer ryker sikringer slik at vi får driftsstans. Overbelastninger i hydrauliske systemer merkes knapt fordi det kun medfører at sikkerhetsventiler åpner, og straks belastningen er normal vil maskinen være tilbake i normal drift.

**Nøyaktighet og rask respons** er egenskaper som er svært viktige for mange systemer om bord i skip. Et eksempel der hydraulisk effekt-overføring er nesten eneste alternativ, er på løfteutstyr som kraner og vinsjer. På figuren under ser vi en kran som brukes til offshore operasjoner til blant annet å installere undervannsmoduler. Dette er operasjoner som krever svært stor nøyaktighet og kontroll. Spesielt krevende er det å holde modulen i ro mens båten beveger seg. Dette krever også avanserte styresystemer som overfører nødvendige krefter via et hydraulikkssystem som sørger for å bevege kran og vinsj. Mens skipet beveger seg flere meter i vertikal og horisontal retning sørger sylindere og hydraulikkmotorer for å holde modulen nesten helt i ro under vann.



### Så hvorfor bruker vi ikke hydraulikk til all effektoverføring?

Som alle andre systemer har også hydraulikk noen negative sider. Den viktigste av disse er virkningsgraden, som for de fleste hydrauliske effektoverføringer ligger i området 60-80%. For overføring av store energimengder er høy virkningsgrad så viktig at dette utelukker hydraulikk til fordel for mekanisk eller elektrisk overføring der disse kan brukes. I tillegg til dårlig virkningsgrad kan også støy og forurensing være problemer.



*Illustrasjon av en hydraulisk drevet kran for installasjon av offshore undervannsutstyr.*

### Illustrasjon av offshore kran skip som plasserer en modul på havbunnen.

*Grafen viser skipets hivbevegelser under operasjonen. Disse kompenseres automatisk av kranas reguleringsystem slik at modulen blir satt ned på bunnen med stor forsiktighet.*



### Vi undrer oss på:

Hvorfor bruker vi så mye elektrisk energi på land, mens vi om bord i skip heller bruker mekaniske eller hydrauliske overførings-systemer?

## Energioverføring om bord i skip

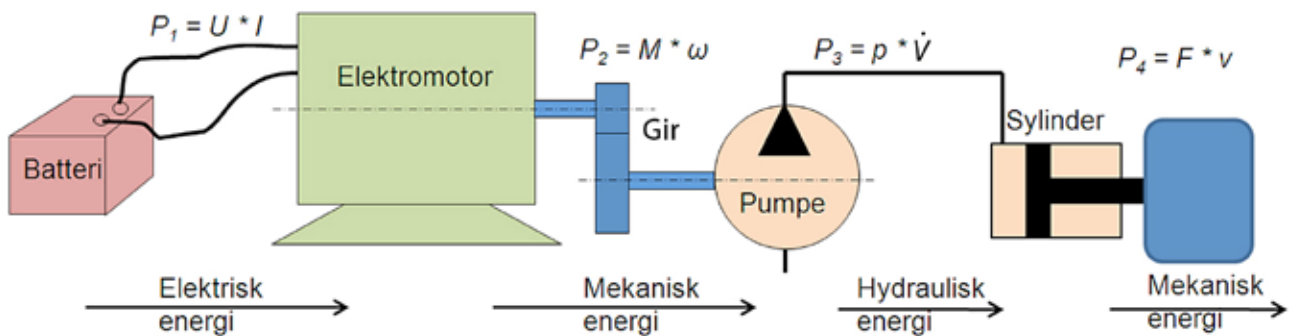
# Sammenligning mellom ulike systemer

Energioverføring følger svært enkle fysiske lover der effekt er produkt av kraft og hastighet. Generelt gjelder altså følgende ligning:

$$\text{Effekt} = \text{kraft} \times \text{hastighet}$$

der:

Overføringsystem	Kraft	Hastighet	Effekt
Mekanisk rettlinjet	F [N]	v [m/s]	F · v [W]
Mekanisk roterende	M [Nm]	$\omega$ [rad/s]	M · $\omega$ [W]
Hydraulisk	p [N/m <sup>2</sup> ]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]	p · Q [W]
Elektrisk	U [Volt]	I [Amp]	U · I [W]



I hvert ledd i denne kjeden er det en omformer som omdanner energien fra en form til en annen. Hver slik omformer har litt tap som skyldes friksjon, strømningstap osv. Dette kan vi angi som omformerens virkningsgrad ( $\eta$ ). For hver omformer gjelder da:  $\eta = P_{ut}/P_{inn}$

### Eksempel 7.11

Vi har et enkelt hydraulikksystem der en elektromotor driver en pumpe som leverer olje til en sylinder som så løfter en masse på 5000 kg. Når vi starter dette systemet, måler vi følgende: Elektrisk spenning og strøm er henholdsvis 230 V og 75 A (ampere) mens vi løfter massen med en hastighet 0,3 m/sek.

Vi kan da beregne virkningsgraden til dette systemet:

Først finner vi tilført effekt:

$$P_{inn} = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 75 \text{ A} = 17250 \text{ W} = 17,3 \text{ kW}$$

Så finner vi avgitt effekt:

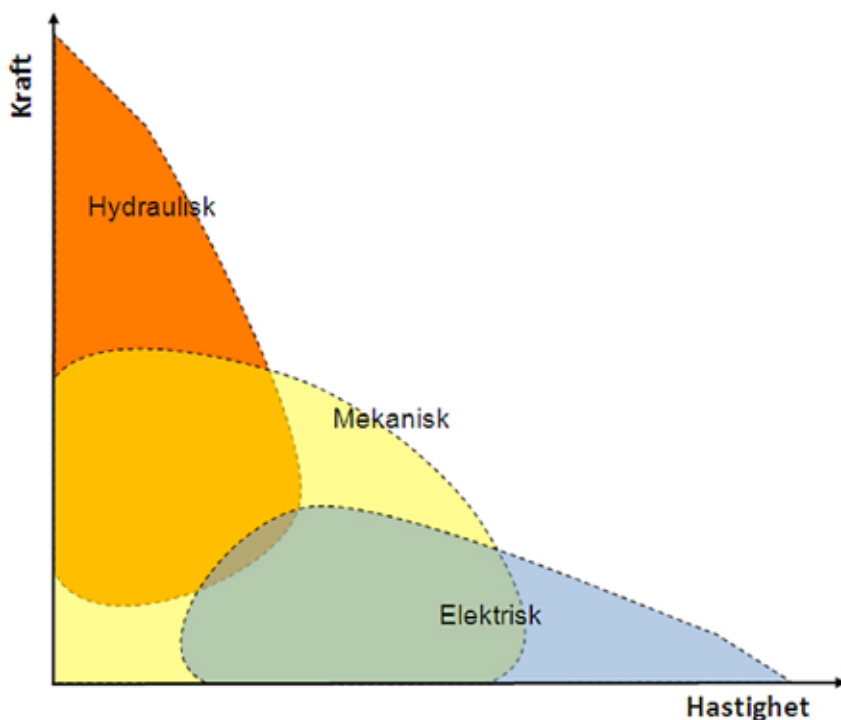
$$P_{ut} = F \cdot v = 5000 \cdot 9,81 \text{ N} \cdot 0,3 \text{ m/s} = 14715 \text{ W} = 14,7 \text{ kW}$$

Virkningsgraden blir da:

$$\eta = P_{ut} / P_{inn} = 14,3 / 17,3 = 0,85 = \mathbf{85\%}$$

## Sammenligning av de ulike systemene for energi-overføring

Når vi sammenligner effektoverføring, må vi bruke ulike vurderingskriterier. I noen tilfeller er et eller flere av alternativene utelukket på grunn av manglende funksjonalitet. Det er for eksempel en del systemer der stort sett kun hydraulikk kan brukes, slik som eksemplet med løfteutstyr. I de tilfellene der man kan velge mellom mekanisk, hydraulisk eller elektrisk, må det vurderes hva som gir det beste resultatet. Her er det snakk om funksjonalitet, sikkerhet, virkningsgrad, miljø og kostnad. Når det gjelder funksjonalitet, kan vi for eksempel se på sammenheng mellom kraft og hastighet. Her ser vi gjerne at dersom det skal gå langsomt med stor kraft, velger man gjerne hydraulikk, mens elektrisk overføring velges når det skal gå hurtig med mindre krefter. Figuren under viser i prinsippet hvordan sammenhengen er mellom hastighet og kraft for de ulike overføringene. Når det gjelder virkningsgrad, er det nesten alltid direkte mekanisk overføring som gir høyest effektivitet. Og ser man på totalsystemene om bord i et skip er det alltid en kombinasjon av mekaniske, hydrauliske og elektriske løsninger som er brukt.



*Typisk sammenheng mellom krefter og hastigheter for effektoverføring*



### Vi undrer oss på:

Vi antar at tapet i eksemplet på venstre side kan fordeles slik at  $\frac{2}{3}$  av effekten går tapt i friksjon i sylindren. Vi vet også at hydraulikk-sylindren har en diameter på 6 cm. Hvordan kan vi beregne effektetapet i hver av komponentene, og trykket i hydraulikk-røret?

# Oppgaver

## Oppgave 7.1

Det vises til figurer på side 7-26 som viser hvordan hydrokarboner er bygget opp. Atommasseenheter for hydrogen og karbon er oppgitt på figurene. Bruk disse til å bestemme:

- Andelen av karbon i naturgass, som vi her regner med består av bare metan. Gi svaret i masseprosent.
- Andelen av karbon i en marin dieselolje. (Marine Diesel Oil, MDO). Her bruker vi molekylet  $C_{20}H_{42}$  som gjennomsnitt for de molekyltyper som den marine dieseloljen består av. Svar i masseprosent.

## Oppgave 7.2

Vi tar for oss følgende to molekyltyper, som er typiske i brenslere for henholdsvis gassmotorer og dieselmotorer:

- Metan ( $CH_4$ ) som er hovedbestanddelen i naturgass
- $C_{20}H_{42}$ , som er en typisk molekyltype for marin dieselolje (MDO).

Atommasser for hydrogen, karbon og oksygen er 1u, 12 u og 16 u. Videre er brennverdien 48 og 42 MJ/kg for henholdsvis metan og MDO-molekylet.

- Bruk ligning øverst på side 7-27 til å beregne hvor mange kg  $CO_2$  som dannes per kg karbon.
- Bruk verdiene for karboninnhold per kg brensel fra oppgave 7.1 til å beregne antall kg  $CO_2$ -utslipp per kg for hvert av brenslene:
- Beregn antall kg  $CO_2$ -utslipp per MJ energi for hvert av brenslene
- Hvor mye mindre er  $CO_2$ -utslippet i prosent fra metanen enn fra dieseloljen, regnet både per kg brensel og per enhet energi?

## Oppgave 7.3 (fra kurs i 2009 for realfagslærere i vgs)

### Teoretisk og virkelig luftforbruk ved forbrenning av metan

Det vises til ligning øverst på side 7-27 for beregning av teoretisk luftbehov ved forbrenning av hydrokarboner. Du skal vise hvordan denne ligningen framkommer. Bruk forbrenning av metan ( $CH_4$ ) som eksempel. For å bestemme oksygenbehovet kunne vi nå brukt Boltzmanns konstant (felles for alle gasser, se side 7-6) samtidig som vi holdt rede på stoffenes atom- og molekylmasser, men dette er tungvint. Mer praktisk er det å bruke kmol-begrepet. Med 1 kmol mener vi så mange kg av et stoff som atom/molekylmassen til stoffet tilsier: 1 kmol C = 12 kg, 1 kmol H<sub>2</sub> = 2 kg og 1 kmol O<sub>2</sub> = 32 kg. På lignende måte som Boltzmanns konstant er felles for alle stoffer (se side 76), er også volumet av 1 kmol av en gass det samme for alle gasser ved samme trykk og temperatur (22,7 m<sup>3</sup> ved 1 bar og 0 celsiusgrader). Fra tabeller finner vi da at tettheten for luft er 1,276 kg/m<sup>3</sup> og at oksygeninnholdet er 21 volum-%.

- Sett opp reaksjonsligningene mellom oksygen og karbon og mellom oksygen og hydrogen
- Omform ligningene til kmol-basis, og vis hvordan ligningen for  $(L/B)_t$  øverst på side 7-27 framkommer.
- Beregn teoretisk luftbehov ved forbrenning av 1 kg metan.

**Oppgave 7.4**

En mellomhurtig dieselmotor går på marin dieselolje (MDO). Vi betrakter molekylet  $C_{20}H_{42}$  som typisk for gjennomsnittet av de hydrokarboner som brenset er sammensatt av. Motoren har en akseffekt på 8000 kW, og dens spesifikke brenselforbruk er 180 g/kWh. Luftfaktoren er 2,0. Beregn:

- a) Brenslets teoretiske luftbehov i kg/kg brensel
- b) Motorens virkelige luftforbruk i kg/h
- c) Motorens  $CO_2$ -utslipp i kg/h
- d) Avgassens  $CO_2$ -innhold i masse-%

**Oppgave 7.5 (fra kurs i 2009 for realfagslærere i vgs)**

**Effektiv virkningsgrad relatert til spesifikt brenselforbruk**

- a) Utled ligningen nedenfor for en motors effektive virkningsgrad

$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot h_n} \quad \text{Her er:}$$

$b_e$  = spesifikt brenselforbruk i kg/kWh

$h_n$  = brenslets brennverdi i kWh/kg

- b) Et brensels brennverdi oppgis vanligvis i MJ/kg. Hvordan kan vi regne det om til enheten kWh/kg?
- c) Den beste virkningsgraden som er oppnådd i en dieselmotor, er omtrent 0,55. Beregn motorens spesifikke brenselforbruk i kg/kWh. Brenslets brennverdi er 42 MJ/kg.

**Oppgave 7.6 (fra kurs i 2009 for realfagslærere i vgs)**

**Eksempler fra matematikk i vgs (integral- og potensregning)**

- a) Beregning av omsatt arbeid under adiabatisk og polytropisk tilstandsforandring.

Det vises til figuren øverst på side 7-7. Vi skjønner at utført arbeid under for eksempel en ekspansjon, kan skrives slik:

$$W_e = \Sigma p \cdot dV = \int p \cdot dV$$

Bruk ligningen for adiabatisk tilstandsforandring (se i margen nederst på side 7-6), og vis at integralet har denne løsningen:

$$W_e = \frac{p_4 \cdot V_4 - p_3 \cdot V_3}{\kappa - 1}$$

Dette gir et positivt arbeid. Husk at vi må skifte fortegn hvis arbeidet skal brukes i forbindelse med termofysikkens første lov. Foregår ekspansjonen polytropisk, må  $\kappa$  erstattes med  $n$ .

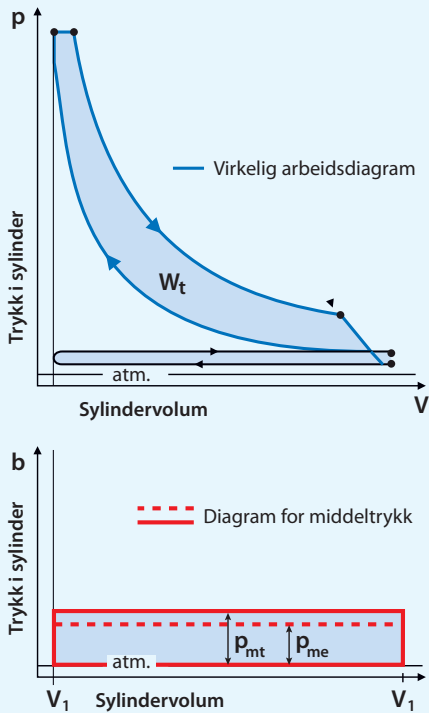
- b) Skriv opp tilsvarende ligning for adiabatisk kompresjon, og grei ut om fortegnene.
- c) Det vises til figurtekst nederst på side 7-6. Vis at ligningen

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa = \text{konst}$$

for adiabatisk kompresjon også kan skrives slik:

$$p_1 \cdot T_1^{\kappa-1} = p_2 \cdot T_2^{\kappa-1} = \text{konst}$$

# Oppgaver



## Illustrasjon av spesifikk arbeidsevne uttrykt som middeltrykk

Termisk middeltrykk ( $p_{mt}$ ) er et tenkt, konstant trykk som gir  **samme arbeidsflate (areal)**  som den termiske prosessen i sylindere (farget lyseblått).  
Effektivt middeltrykk ( $p_{me}$ ) svarer til spes.arbeidsevne på utgående aksel og tar altså hensyn til mekaniske tap (se side 7-11).

$$p_{me} = \eta_m \cdot p_{mt}$$

Middeltrykkene finnes altså etter omforming av spes. arbeidsevne ( $\text{kJ/dm}^3$ ) til et trykk (MPa). I motoroversikter oppgis middeltrykket oftest i den hyppig anvendte trykkenheteten bar. I beregninger av for eksempel akseleffekt må du imidlertid ikke bruke bar, men SI-enheter som tilpasses enhetene for volum og turtall.

### Oppgave 7.7

På side 7-16 er en dieselmotors arbeidsevne framstilt som funksjon av motorturtallet. Arbeidsevnen er uttrykt på to måter: spesifikk arbeidsevne  $w_e$  [ $\text{kJ/dm}^3$ ] og effektivt middeltrykk  $p_{me}$  [bar]. Forskjellen mellom disse to måtene er illustrert til venstre.

- a) Vis hvordan en spes. arbeidsevne  $w_e = 2,5 \text{ kJ/dm}^3$  også kan skrives som et effektivt middeltrykk  $p_{me} = 25 \text{ bar}$ .

### Oppgave 7.8

Det vises til side 7-17 om beregning av akseleffekt og dreiemoment.

- a) Hvor stor akseleffekt i kW yter en firetakts dieselmotor hvis den går med en effektiv, spesifikk arbeidsevne  $2,5 \text{ kJ/dm}^3$ , turtall  $600 \text{ o/min}$  og har 6 sylindere med slagvolum  $25 \text{ dm}^3/\text{syl}$ ?  
 b) Beregn akseleffekten for en totakts dieselmotor med 8 sylindere, slagvolum  $220 \text{ dm}^3$ , effektivt middeltrykk på  $20 \text{ bar}$  og et turtall  $200 \text{ o/min}$   
 c) Beregn dreiemoment på utgående aksel for motorene ovenfor.

### Oppgave 7.9

Det vises til figur øverst på side 7-13 og eksempel på side 7-18 vedrørende faktorer som i praksis begrenser størrelsen på dagens dieselmotorer for skipsdrift. Det er nemlig en grense for hvor stor en motor-enhet kan lages uten at investeringer og vedlikeholdskostnader blir uforvarselig høye. I den viste figuren er det lagt inn grafer for maksimal akseleffekt som funksjon av turtall for tre hovedtyper motorer. Vi ser at følgende hovedregel gjelder: *Jo lavere turtall motoren baseres på, jo større akseleffekt kan den bygges med.* For mange synes dette å være et stort paradoks, men du skal i denne oppgaven bekrefte hvorfor det må være slik. For grafene i figuren gjelder følgende uttrykk for maksimal effekt som funksjon av turtall:

$$P_e = \frac{\pi}{32(64)} \cdot w_e \cdot i \cdot c_m^3 \cdot \frac{1}{(S/D)^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Divisorene 32 eller (64) gjelder for hhv. totakts- og firetaktsmotorer

- a) Vis at ligningen ovenfor kan omformes til ligninger som er vist på side 7-17 for motorers akseleffekt.  
 b) Sett inn følgende verdier for totaktsmotorer:
- Antall sylindere,  $i_{max} = 14$
  - Midlere stempelhastighet,  $c_{m,max} = 8,6 \text{ m/s}$
  - Spesifikk arbeidsevne,  $w_{e,max} = 1,9 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$
  - Slag—diameter-forhold,  $S/D = 2,7$
- Vis at dette gir følgende ligning for totaktsmotorer

$$P_{e,max} = 228 \cdot 10^6 \frac{1}{n^2}$$

- c) Beregn  $P_{e,max}$  ved turtall  $n = 100/60 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ , og tegn inn tilhørende punkt i figuren på side 7-13  
 d) Beregn sylinderdimensjoner (D, S og  $V_h$ ) for motoren i punkt c).

**Oppgave 7.10 (fra kurs i 2009 for lærere i vgs.)****Beregning av firetakts, mellomhurtig dieselmotor for skip**

Oppgaven har to formål. For det første skal den vise at det egentlig er mulig å komme uventet langt i slike beregninger, selv når man bare anvender stoff fra fysikken i videregående skole. For det andre skal den bidra pedagogisk til forståelse av virkemåten til en dieselmotor.

En mellomhurtig dieselmotor med turtall 750 o/min har følgende data:

- Sylinderdiameter  $D = 320$  mm
- Slaglengde  $S = 400$  mm,
- Nominell kompresjonsgrad  $\epsilon = 17$
- Trykk og temp. på sylindrerladning ved kompresjonens begynnelse:  
 $p_1 = 3,0$  bar overtrykk,  $T_1 = 340$  K
- Luftfaktor under forbrenning  $\lambda = 2,4$

For brenslet (marin dieselolje, MDO) gjelder følgende:

- Nedre brennverdi  $h_n = 42,7$  MJ/kg,
- Teoretisk luftbehov  $(L/B)_t = 14,4$  kg luft / kg brensel

Basert på oppgitte data og erfaringsverdier for spesifikt brenselforbruk og dermed effektiv virkningsgrad, skal det beregnes:

- a) Luftmengde i sylindrer når kompresjonen begynner
- b) Tilført brenselmengde og tilført energi per arbeidsprosess
- c) Utført arbeid ( $W_e$ ) og spesifikk arbeidsevne ( $w_e$ ) per arbeidsprosess
- d) Dreiemoment ( $M_d$ ) og akseffekt ( $P_e$ ) på motorens utgående aksel

For å bedre forståelsen av motorens arbeidsprosess og dessuten sannsynliggjøre resultatene fra punktene c) og d), skal følgende beregnes:

- e) Trykk, volum og temperatur i tilstand 2
- f) Omsetning av arbeid og varme, og forandring i indre energi under tilstandsforandringen 1- 2a. Det forutsettes at kompresjonen skjer polytropisk med en eksponent lik 1,35
- g) Tilsvarende beregninger for tilstand 3a og tilstandsforandring 2-3a
- h) Tilsvarende beregninger for tilstand 3b og tilstandsforandring 3a-3b
- i) Tilsvarende beregninger for tilstand 4 og tilstandsforandring 3b-4. Ekspansjonen foregår polytropisk med en eksponent lik 1,45
- j) Utført arbeid og bortført varmemengde for hele arbeidsprosessen.
- k) Termisk virkningsgrad, effektiv virkningsgrad (forutsatt en mekanisk virkningsgrad lik 0,9) og spesifikt brenselforbruk. Vurder hvordan verdiene passer med resultatene fra c) og d)
- l) Nevn noen feilkilder ved beregningene

**Oppgave 7.11**

Det vises til sidene 7-36/37 om mekanisk energioverføring. Ta for deg sykkelen din, og identifiser transmisjonselementer.

- a) Hvor mange -akslinger, -innkoplingslementer, -gir, -lager og mekanismer finner du? Det er til dels de samme elementene du vil finne igjen i alle slags mekaniske maskinerisystemer
- b) Kan du også klare å beregne hvor store krefter og momenter noen av disse overfører?

## Referanser

- 7.1 Statistisk årbok 2009. Statistisk sentralbyrå. 2009
- 7.2 Statistiske data fra Norges Rederiforbund. 2010
- 7.3 Erik W Jakobsen: Norsk maritim verdiskaping 2000-2009. Rapport 10.01. 2011. Menon Business Economics. Oslo
- 7.4 Randers, Aam, Bysveen: En energi og klimaplan for Norge til 2020. [www.climate.orgstrategy](http://www.climate.orgstrategy)
- 7.4 International Maritime Organization: Second IMO GHG Study. 2009
- 7.5 Harald Valland: Primær energiomforming ved forbrenning. Elementær innføring i gassturbiner. Kompendium i fag TMR4310 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. 2008.
- 7.6 Hans Klein Wood, Douwe Stapersma: Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems. The Institute of Marine Engineering, Science and Technology. London. 2002
- 7.7 Per Magne Einang: Strategy for greener Shipping. New and renewable Fuels. MARINTEK. Trondheim. 30th International Bunker Conference Oslo. 2009
- 7.8 Maurice F. White: Marine Engineering Systems. Course Notes i fag 4310 ved Institutt for marin teknikk, NTNU. 2008.