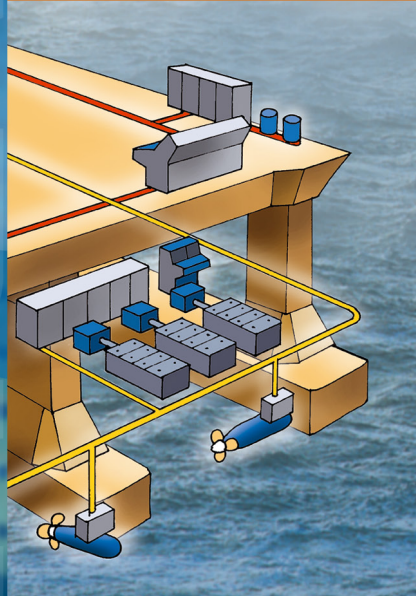


Foreløpig utgave
pr 21.10.11



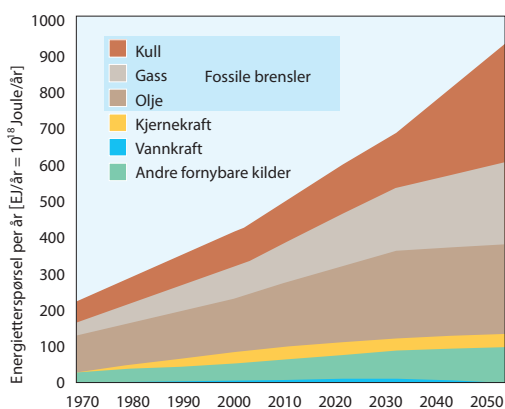
Forfattere: Leif Lundby og Vilmar Æsøy

Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs

Havromsteknologier



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 CO₂. I kapitlet brukes betydelig plass på vurdering av mer miljøvennlige alternativer til dagens metoder. Miljøspørsmål settes også i fokus gjennom beskrivelse av hvordan havet har fornybare ressurser som kan utnyttes til produksjon av elektrisk energi for bruk i offshorvirksomheten og for ilandføring.



Verdens energiforbruk siste 40 år og prognose for energi-behovet 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 pr. individ. Sammen med stigningen i jordas befolkning har dette resultert i en stadig økende etterspørsel etter energi. Utviklingen av energiforbruket i verden siden 1970 er vist nedenfor. Det framgår 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 bare 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 CO₂ 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 CO₂-utslippene

Det er altså av avgjørende viktighet at det gjøres noe på global basis for å stoppe økingen av CO₂-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 CO₂ 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 CO₂-utslippet. Derfor er det mulig (se oppg. 6.x) å etablere en skala for CO₂-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 miljøproblemenes.

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 utdanningen av de som skal arbeide med løsninger av miljøproblemenes i framtida, egentlig starter.

MÅL

Etter å ha studert dette kapitlet skal du:

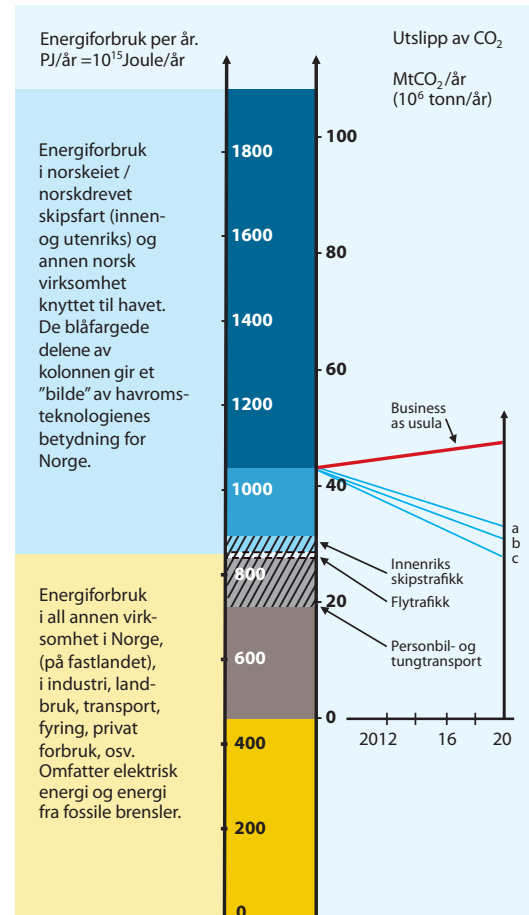
- Ha blitt godt kjent med de viktigste temaene innen begrepet energi, som er et av de mest sentrale begreper innen naturvitenskap og teknologi.
- Ha blitt kjent med grunnleggende temaer innen termodynamikken.
- Ha blitt godt kjent med virkemåten til dieselmotorer, ottomotorer og gassturbiner. Kunne beregne disses brenselforbruk og CO₂-utslipp.
- Kjenne til kjemisk oppbygging av fossile brenslers, kjemiske reaksjoner ved forbrenning av disse og beregning av CO₂-dannelse pr kg brensel. Vite hvorfor CO₂-utslippene er så skadelige for jordas framtidige klima.
- Ha fått god oversikt over alternative brenslers, for eksempel biobrenslers.
- Kjenne til metoder for utnyttelse av havet som fornybar energikilde.

Bruk internett:

På www.climatestrategy.org ligger "En energi- og klimaplan for Norge til 2020" (ENKL-Planen), laget av Randers, Aam og Bysveen. Studer denne rapporten og lag lysark til et foredrag på 10 min om hvilke tiltak som kan gjøres i Norge for å nå de mål som Stortinget har satt for 2020.

Illustrasjon av energiforbruk og utslipp av CO₂ fra norskeide/norskdrivne virksomheter. (Tall for 2007).

Kilder: ENKL-Planen, se nederst på siden, samt Statistisk årbok 2007 og rapport gitt i oppg. 6.4. Det vises forøvrig også til oppg. 6.3.



- Energiforbruk og CO₂ utslipp fra norskeide/norskdrivte utenriks skipsfart
- Energiforbruk og CO₂ fra offshore olje/gass-virksomhet
- ▨ Energiforbruk og CO₂ fra innenriks transport
- Energiforbruk og CO₂ fra industri, landbruk og privat
- Bruk av elektrisk energi i industri, landbruk og til private formål

Utslippene slik de skal reduseres:

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



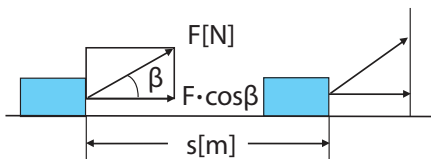
Grunnleggende energifysikk

1. Forskyvningarbeid (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

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

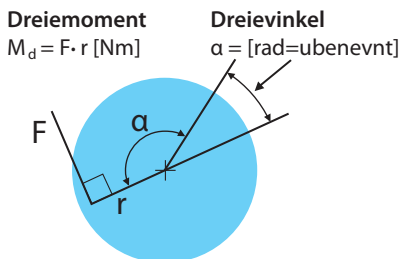
Måleenheten for arbeid er $J = N \cdot m$ (Joule = Newton · meter)



2. Rotasjonsarbeid.

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

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

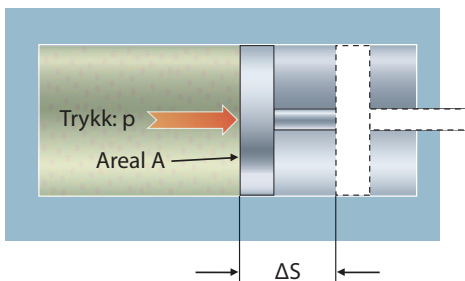


3. Volumendringsarbeid

Gasstrykket forskyver stemlet en strekning ΔS . 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 6-9)



Tre definisjoner av begrepet arbeid, basert på bruk av mekaniske krefter. Også elektriske krefter kan lage arbeid, se side 6-xx. Videre kan arbeid defineres med utgangspunkt i effekt:

$$W = P \cdot t, \text{ hvor } P \text{ er effekt og } t \text{ er tid } [J = W \cdot s]$$

Grunnleggende stoff om energi, delvis repetisjon

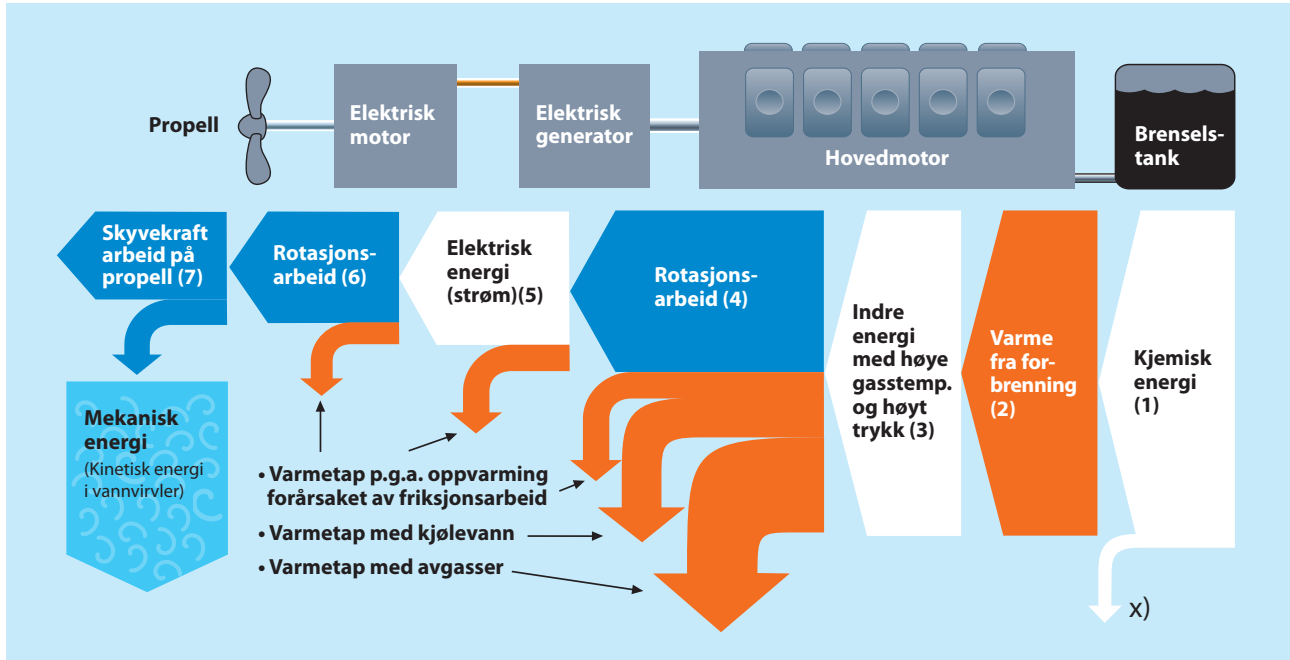
- **Hva er egentlig energi?** Det er ikke lett å forklare dette. Mange forsøker å ta utgangspunkt i at energi er *noe som kan påvirke omgivelsene*. Mer presist kan vi si at *energi er noe som gir et legeme eller et system evne til å utføre arbeid*.
- **Hva er arbeid? Hvilken måleenhet har arbeid og dermed 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 6-6.
- **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 et 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 temperaturskjell 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 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 nedenfor.

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



1. Energikilden er framstilt av en fossil råolje (se side 6-26) 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 CO₂- og H₂O-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 sylindrerladningene, som nå holder ca 2000 grad C. En dieselmotor er en stempelmotor, det vil si at sylindrerladningene 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 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 brukes til å gi vannet kinetisk energi i virvler.
8. **Tapsposter.** Gjennom hele kjeden opptrer diverse tap av energi, som framgår av figuren. De fleste av disse framkommer som varmeutveksling med omgivelsene.

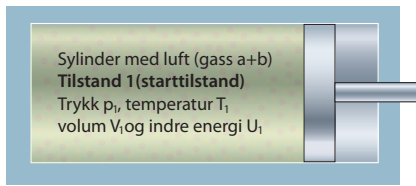
-  Diverse former for lagret energi
-  Energi omformet fra en form til en annen v.h.j.a. varme
-  Energi omformet fra en form til en annen v.h.j.a. arbeid
-  Tapt energi p.g.a. varme



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 samtidig både av en forbrenningsmotor og en elektrisk motor. 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:

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

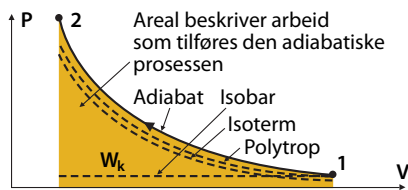
Her er: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]}$

(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:

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa$$

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

Begreper og ligninger for tilstandsforandringer ved kompresjon av en blanding av toatomige gasser (a + b), f. eks. luft (N2+O2)

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 eller 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 molekylene. **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 molekylene. 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 gassmolekylene støter mot veggene i sylinderen, oppstår det krefter mot veggene, normalt på disse. Med gasstrykk mener vi, som tidligere definert, kraft pr 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 κ 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 $1 < n < \kappa$

Produksjon av mekanisk og elektrisk energi

Utgangspunkt	Hovedformål	Framdrift av fartøy (mobile anlegg)					
	Opprinnelse	Ikke fornybar energi (kjerneenergi og fossile brensler)					
	Energiform	Kjerneenergi	Kjemisk				
	Energikilde	Uran	Olje	Olje	Olje	Olje	Naturgass Bensin
Systembeskrivelser 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.	1. Dampturbindrift med kjernekraft-produsert damp <i>Fisjonsreaktor</i> Kjerneenergi omformes til termisk energi i brensel-elementer, som varmer opp kjølevann rundt disse ↓ Indre energi (varmt vann) <i>Varmeveksler for dampproduksjon</i> ↓ Indre energi (damp) <i>Dampturbin</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Gir</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Propell</i> ↓	2. Dampturbindrift med oljefyrt dampkjel <i>Dampkjel</i> 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) <i>Dampturbin</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Gir</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Propell</i> ↓	3, 4 Gassturbindrift m/ propell eller vannjet <i>Gassturbin.</i> 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 <i>Gir Pumpe for vannjet</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Propell</i> ↓	5,6 Vanlig dieselmotordrift med/uten gir <i>Dieselmotor.</i> Stempelmotor, med gasstett syklisk, indre forbrenning (selvttenning) som gir gasser med stor indre energi og trykkenergi. Gassene forskyver et stempel som via et veivsystem omdannes til rotasjonsarbeid ↓ Rotasjonsarbeid <i>Gir</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Propell</i> ↓	7,8 Dieselelektrisk drift med/uten batteri <i>Dieselmotor</i> ↓ Rotasjonsarbeid ↓ Elektrisk generator ↓ Elektrisk energi <i>Batteri (kjemisk energi lagring)</i> ↓ Elektr.energi (strøm) <i>Elektrisk motor</i> ↓ Rotasjonsarbeid ↓ <i>Propell</i> ↓	9,10. Ottomotor med naturgass/bensin-drift <i>Ottomotor</i> Stempelmotor som beskrevet til venstre, men med fremmedtenning i stedet for selvttenning av brenset ↓ Rotasjonsarbeid <i>Gir</i> ↓ Rotasjonsarbeid <i>Propell</i> ↓	
	Sluttprodukt	Energiform	Mekanisk energi (skyvekraftarbeid fra propell, vannjet eller seil)				
	Klimagasser	CO2-fritt	CO2-utslipp				

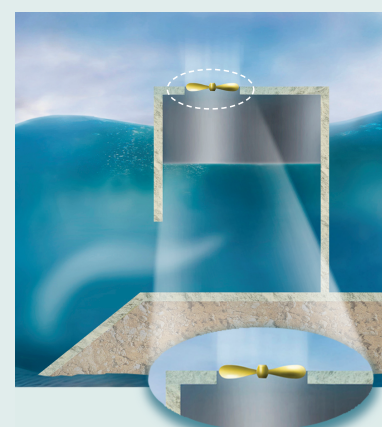
Kommentarer

- Anvendes kun i utenlandske, militære fartøy, bla. pga. konsekvensene ved kollisjoner.
- Anvendes lite, fordi forbrenning i en separat enhet utenfor arbeidsmaskinen gir dårligere virkningsgrad enn det som oppnås i en dieselmotor. Krever dessuten stor plass.
- Krever liten plass. Anvendes derfor særlig i fartøy som må gjøres lettbygde (hurtigbåter)
- Spesielt fordelaktig i ekstra hurtiggående fartøy som drives med vannjet.
- Mellomhurtig dieselmotor med gir er klart det vanligste framdriftssystem for skip.
- 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.*
- Brukes i undervannsbåter. Batteriene lades når båten går i overflatestilling. I undervannsdrift tar elektromotoren all energi fra batteriene.
- Brukes mye i cruiseskip og store ferger. Hovedmotoren m/generator kan plasseres uavhengig av elektromotoren/propellen, altså på et sted som gir lite støy og vibrasjoner om bord.
- Bruk av naturgass reduserer CO2-utslipp. Anvendes en del i innenlandske ferger.
- Bensindrevet ottomotor er lettbygde og derfor typisk for hurtige båter m/ utenbordsmotor.

energi til havs, oversikt over metoder

Produksjon av elektrisk energi (stasjonære anlegg)							
Fornybar energi							
		Elektromagn.	Mekanisk (fra havet)				Kjemisk
Naturgass Biobrensel	Biobrensel	Solstråling	Vind	Vind	Havstrøm Tidevann	Bølger	Naturgass Olje
11. Brenselscelledrift	12. Dieselmotor/ottomotor med biobrensel	13. Solcelledrift	14. Seildrift	15. Vindkraftverk	16, 17. Havstrøm/tidevann-kraftverk	18. Bølgekraftverk m/ svingende vannsøyle	19,20. Kraftverk på plattformer for petr. utvinning
<p>Brenselselle Oksygen (i form av luft) og brensel tilføres cellen. Her produseres elektrisk strøm direkte og vann og CO₂ er de eneste forbrenningsproduktene.</p> <p>↓ Elektrisk energi</p> <p>Elektrisk motor</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Propell</p>	<p>Dieselmotor Ottomotor Biobrensler kan brukes i stedet for fossile i alle systemene 2 -10 foran. De kan være gass- eller væskeformige og blir behandlet på side 6.22.</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Gir</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Propell</p>	<p>Solcelle Solcellens virkemåte er forklart i fysikken. Når lys treffer solcellen, omformes den elektromagnetiske energien direkte til elektrisk energi</p> <p>↓ Elektrisk energi</p> <p>Elektrisk motor</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Propell</p>	<p>Seil Luftas kinetiske energi utnyttes ved hjelp av seil til å gi skyvekraftarbeid direkte</p>	<p>Vindturbin Luftas kinetiske energi utnyttes direkte i en vindturbin til å gi rotasjonsarbeid</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Gir</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Elektrisk generator</p>	<p>Vannturbin Vannets kinetiske energi utnyttes i en vannturbin til å gi mekanisk rotasjonsarbeid</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Gir</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Elektrisk generator</p>	<p>Luftturbin Havbølgenes energi (potensiell og kinetisk) fører til at den fri overflata svinger i et kammer som vist i figur. Det lagres da trykkenergi i kammeret, som utnyttes i luftturbinen til å gi rotasjonsarbeid</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Elektrisk generator</p>	<p>Dieselmotor Gassturbin</p> <p>↓ Rotasjonsarbeid</p> <p>Elektrisk generator</p>
				Elektrisk energi (ilandføres eller utnyttes på plattformen)			
CO₂-fritt						CO₂-utslipp	

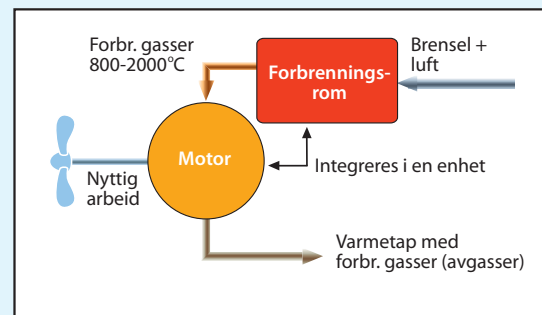
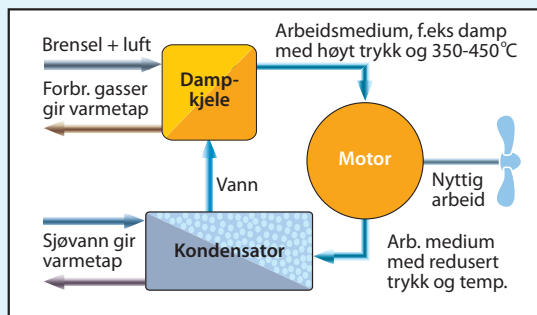
- 11 Hittil lite aktuelt, men god virkn.grad gjør prinsippet attraktivt. Se for øvrig side 6-36. Grupperes som "fornybar energi" og CO₂-fritt" bare dersom brenselscellene bruker biobrensler.
- 12 Bli mer og mer aktuelt i mange sammenhenger, se side 6-34)
- 13 Foreløpig for dårlig virkn.grad på cellene, se s. 6-38. Skip er prosjektert, men ikke bygget
- 14 Det vises til side 3-34 når det gjelder virkemåte
- 15 Stadig økende interesse, se side 6-41. 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 Luften føres inn i en tynnere kanal slik at hastigheten øker. Slik "giring" av hastigheten gjør det enklere å få høy virkningsgrad i turbin og generator. Se for øvrig side 6-42
- 19 Svært mye anvendt i tidligere utbygginger, men erstattes i framtida i betydelig grad av forsyning av elektrisk energi fra fastlandet (iflg klimamål a på side 6-3).
- 20 Som kommentar 19



Varmemotorer. Definisjoner, oversikt og brenselforbruk.

I oversikten på sidene 6-8 og 6-9 er det de såkalte varmemotorene som er praktisk talt 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 etterfølgende 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 vanndamp), 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: Arbeidslaget 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, se oppg. 6x. Den såkalte Stirlingmotoren hører også hjemme i denne boksen (se oppg. 6.y)

Strømningsprinsipp
Damp av høyt trykk fra en dampkjele 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. ifm. kjerne-kraftbasert damp-produksjon).

Stempelprinsipp
Kort forklaring: Baseres på en **syklisk** arbeids-prosess i en absolutt **gastett** 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 arbeidsprinsipper:
Otto-diesel-prosess
Ren ottoprosess

To gassutvekslingsprinsipper:
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 CO₂-utslipp. Som vi har nevnt foran og som vi også kommer tilbake til senere, er det proporsjonalitet mellom brenselforbruk og CO₂-utslippet.

Den vanligste måten som brukes til å oppgi et brenselforbruk, er det såkalte **spesifikke brenselforbruket**, se definisjonen til høyre. Vi merker oss at størrelsen er **omvendt proporsjonal med motorens effektive virkningsgrad**. Men også motorens arbeidstap pga. indre friksjon er av betydning, se figur til høyre. Typiske tallverdier framgår nedenfor.

Spesifikt brenselforbruk (b_e) og effektiv virkningsgrad (η_e) for fartøymotorer

	b _e (g/kWh)	η _e
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
Gassturbin m / regenerativ arbeidsprosess:	200	0,42
Ottomotor, mellomhurtig firetaktsmotor m/gassdrift:	200 ?	0,38 ?
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)

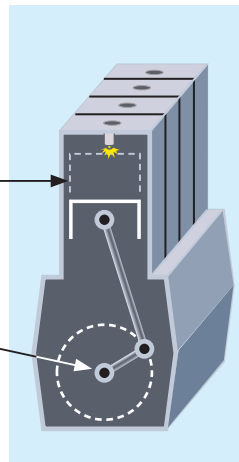
Hvorfor har gassturbiner og dampturbiner høyt brenselforbruk?

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 mulige. Dette betyr at **det disponible temperaturfallet for motoren i figuren til høyre 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 gassturbin- og dampsturbinanlegg, se side 7-30. Dette gir nemlig en økning i virkningsgraden.

Arbeidsprosessens virkningsgrad (også kalt termisk virkningsgrad, η_t) baseres på arbeidet som utvikles i sylinderen

Effektiv virkningsgrad (η_e) baseres på arbeid som står til disposisjon på utgående aksel. Pga. tappt friksjonsarbeid er:
η_e = 80-95% av η_t



Forskjellen mellom termisk og effektiv virkningsgrad for en forbrenningsmotor

Definisjon av spesifikt brenselforbruk

En motors brenselforbruk kan oppgis pr. tidsenhet (ḡ_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_e 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_e kg/kWh) henger nøye sammen med dens effektive virkninggrad og brenslens energiinnhold (h_n kWh/kg, se side 6-27):

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

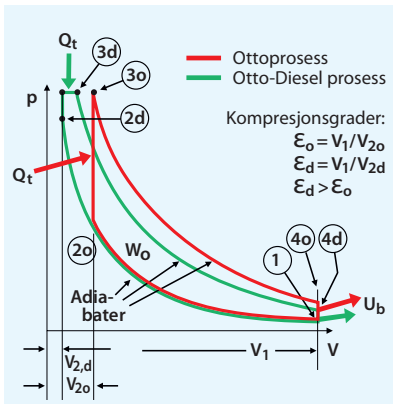


Vi undrer oss på:

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

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

Analyse av stempelmotorer. Otto- eller dieselmotor? Totakts- eller firetaktsmotor?



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: $p_{4o} > p_{4d}$, $T_{4o} > T_{4d}$, $U_{b,o} > U_{b,d}$, $W_{o,o} < W_{o,d}$. Det vises for øvrig til oppg. 6.x og 6.y.

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

Definisjon av ottomotor og dieselmotor

Det finnes to hovedtyper stempelmotorer: ottomotorer og dieselmotorer.

I ottomotorene får lufta tilført brensel så tidlig at det er til stede i sylinderen under hele kompresjonen. Brensel 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 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 brenselet, 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 av de prosesser som foregår i disse motorer. 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 utvikler 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-Dieselprosessens (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 skal ha samme maksimaltrykk, samme sylindervolum i nedre dødpunkt og få 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 stempelmotorene 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. den bedre virkningsgraden vil dieselmotoren få et lavere brenselforbruk. Dette er hovedgrunnen til at den har fått enorm betydning innen transportsektoren både til vanns og til lands. Ottomotorens hovedfordel er at den av forbrenningstekniske grunner (se side 6-30) kan gjøres mer hurtiggående og dermed mer lettbygd. Når det gjelder bruk til sjøs, "forvises" ottomotoren derfor stort sett til fritidsbåter med utenbordsmotor.

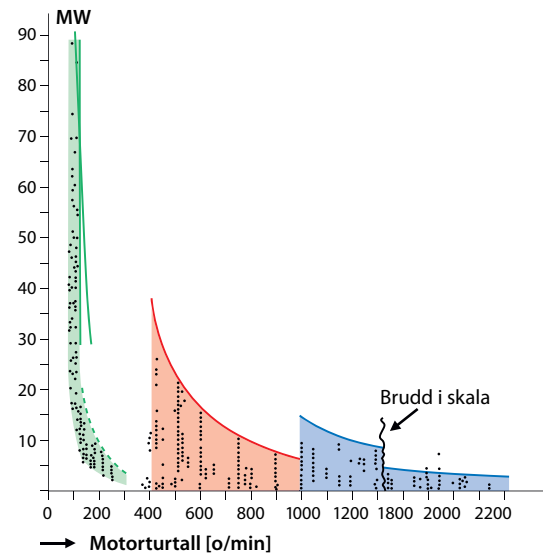
Ottomotoren har imidlertid også en annen fordel som må nevnes. Siden dette motorprinsippet *ikke* baseres på selvtenning av brenset, er det velegnet for bruk av *gass*. Gass er nemlig lite egnet til forbrenning som starter med selvtenning, se side 6-30, men er gunstig mht. skadelige utslipp. Etter hvert vil derfor gassdrevne ottomotorer delvis tvinge seg frem av miljømessige grunner på bekostning av dieselmotorer. I særlig grad vil dette bli aktuelt for innenriks skipsfart.

Totaktsmotor eller firetaktsmotor?

Renspyling av sylindrene er en vanskelig prosess for en totaktsmotor. Som vi skjønner av ordvalget bruker firetaktsmotoren en ekstra motoromdreining for å skifte ut forbrenningsgassene med ny, frisk ladning, mens totaktsmotoren må bruke deler av arbeidstaktene til slik gassutveksling, se side 6-15. Man skulle kanskje tro at totaktsprinsippet dermed blir fullstendig overlegent, siden det gir "plass" til utvikling av arbeid på hver enkelt motoromdreining. Men saken er ikke så enkel. Gassutvekslingen omfatter bl.a. en renspyling av sylinderen for avgasser fra forangående forbrenning. En slik renspyling blir mer vellykket jo lenger tid det står til disposisjon for spyleprosessen. Derfor brukes **totaktsprinsippet først og fremst i motorer med lave turtall (<300 o/min).**

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

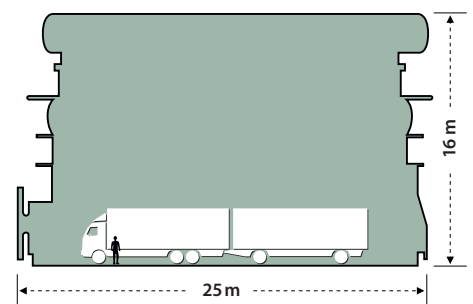
- Lave turtall **muliggjør store akseeffekter pr motorenhet**, se figur øverst. Hvorfor det er slik, tas opp til drøfting i oppg. 6.xx for spesielt interesserte. Figuren viser at skip med effektbehov på mer enn 20-25 MW kan klare seg med *en* langsom totaktsmotor. Alternativt kan skipet utstyres med *to eller flere* mellomhurtige dieselmotorer (med gir).
- 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 6-11).
- Motorene **krever stor plass**. De lave turtallene må kompenseres med store slagvolumer. Langsomme motorer må dessuten utføres som krysshodemotorer, noe som gir økt byggehøyde.
- Motorene blir **kostbarere å produsere**, med en spesifikk pris (pr. kW) som er 30-50 % høyere enn for mellomhurtige dieselmotorer.



- Motorturtall [o/min]
- Område for langsomme, totakts, krysshode dieselmotorer
Maks. akseeffekt for totaktsmotorer som bygges med:
— $i=14$ syl, $cm=8,6$ m/s, $S/D=2,7$ og $w_e=1,9$ kJ/dm³
- - - $i=9$ syl, $cm=8,6$ m/s, $S/D=3,5$ og $w_e=1,9$ kJ/dm³
- Område for mellomhurtige, firetakts dieselmotorer
Maks. akseeffekt for firetaktsmotorer som lages med:
— $i=18$ syl, $cm=10$ m/s, $S/D=1,25$ og $w_e=2,6$ kJ/dm³
- Område for hurtige, firetakts dieselmotorer
Maks. akseeffekt for firetaktsmotorer som lages med:
— $i=20$ syl, $cm=13$ m/s, $S/D=1,15$ og $w_e=2,6$ kJ/dm³

Oversikt over fabrikasjonen i verden av dieselmotortyper med ulike turtall for framdrift av skip.

Hver motortype er markert med en prikk. Se også oppg. 6.xx



Verdens største motor (2009)

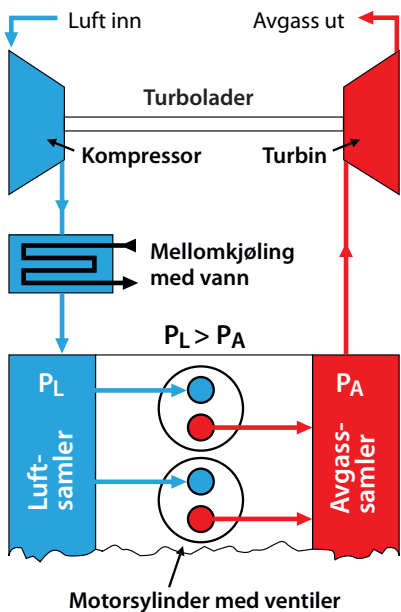
Dette er en totakts, krysshode dieselmotor med akseeffekt 87220 kW ved 97 o/min.

Vi undrer oss på:

Hvilke skipstyper er det som særlig bruker hurtige dieselmotorer?



Dieselmotorers arbeidsmåte



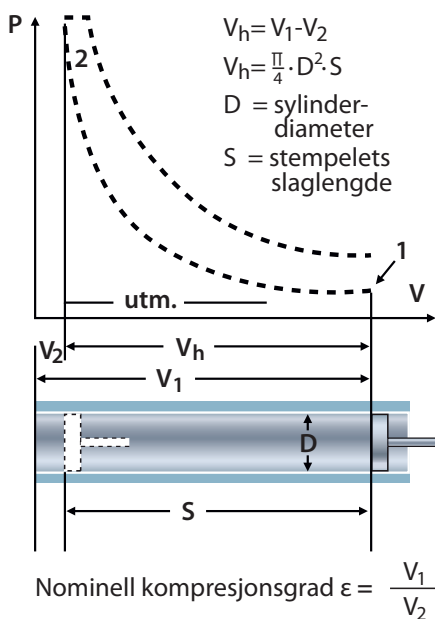
Virkelige arbeidsprosesser for dieselmotorer

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 sylindrerladningen øker. Den vanligste måten å gjøre dette på, er å utstyre motoren med en turbolader, 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 6-32. Turboladning av en firetaktsmotor er skjematisk vist i figur til venstre. Det samme prinsippet brukes også for totaktsmotorer.

Turboladning av en firetakts dieselmotor



Definisjon av en stempelmotors slagvolum V_h og kompresjonsgrad

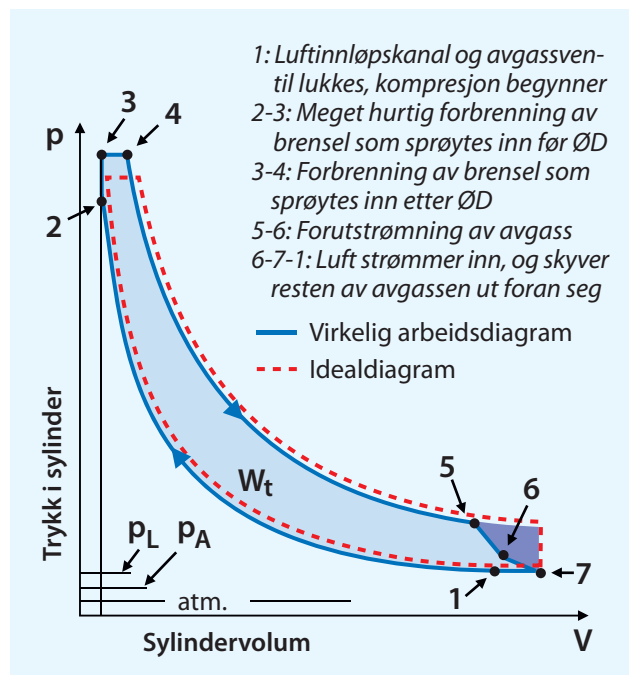
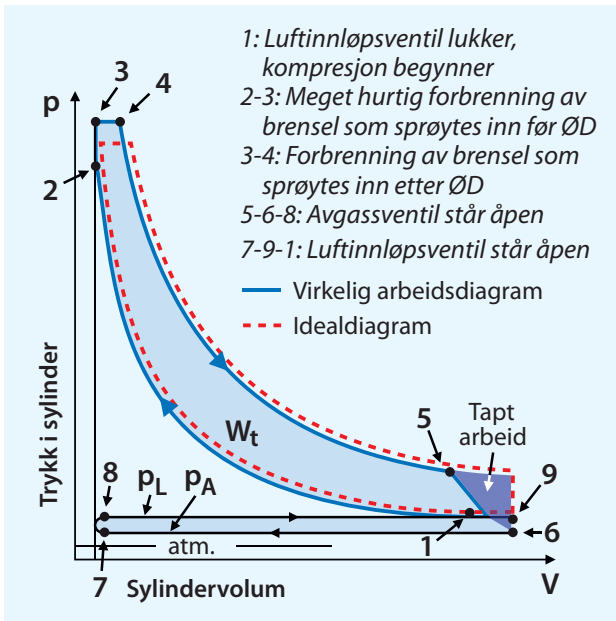
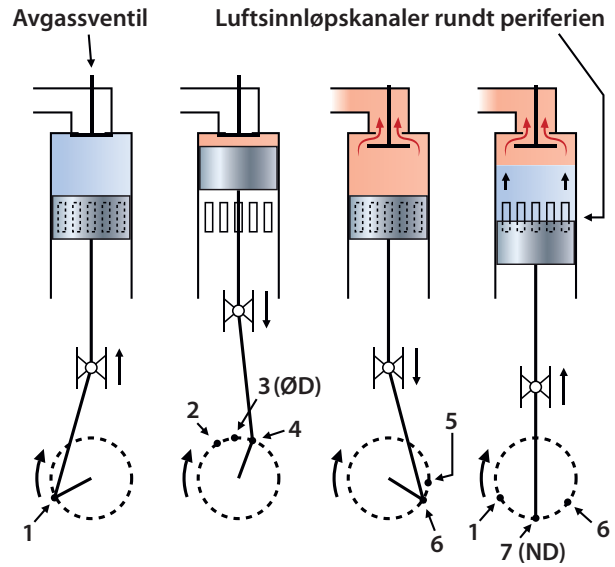
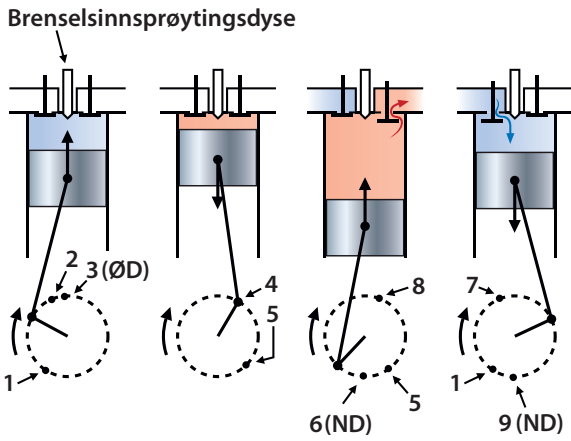
Resultatet av turboladningen er altså økt arbeid og økt akseffekt.

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 sylindreforinger, 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 sylindrerladning 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 6-11, 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 6-11, og får:

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

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 :

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

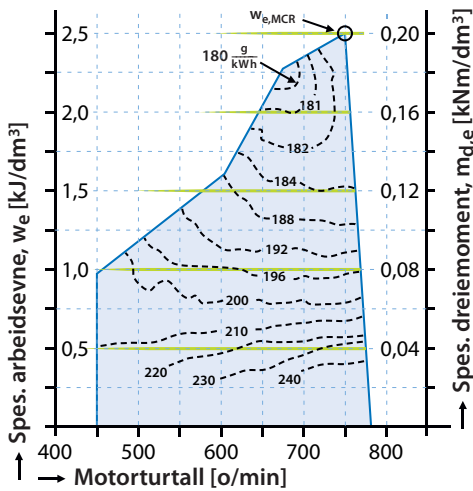
Her er W_e det arbeid (J, kJ) som hver av motorens arbeidsprosesser bidrar med på dens utgående aksel.



Vi undrer oss på:

Hvor stort er det totale slagvolumet for verdens største dieselmotor, regnet i dm^3 ? Hvor mange bil-dieselmotorer 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, $V_h=32,15$ dm³
Antall syl.: 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:

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

Den høyre "y-aksen" viser motorens arbeidsevne uttrykt som spes. dreiemoment på utgående aksel.

Videre er lagt inn koter (stiplede kurver) for diverse konstante spesifikke brenselforbruk i g/kWh.

Grønne linjer gjelder for 20, 40, 60, 80 og 100% pådrag

Spesifikk arbeidsevne (arbeid pr. dm³ slagvolum og pr. arbeidsprosess) for en mellomhurtig, firetakts dieselmotor for framdrift av fartøy

Spesifikk arbeidsevne og spesifikt 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.

	Spes. arbeidsevne w_e , MCR [kJ/dm ³]	Trykk ladeluft PL [bar overtr.]
Langsomme totakts dieselmot.:	1,9 – 2,0	
Mellomhurtige firetakts dieselmotorer	2,3 – 2,6	3,2
Hurtige firetakts dieselmotorer		
Mellomhurtige ottomotorer med gassdrift		
Hurtige ottomot. (utenbords, bensindrift)		

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 med luft avtar tilsvarende. Brenselpådraget og dermed innsprøytet brenselmengde pr. arbeidsprosess må reduseres og sluttresultatet blir at spes. arbeidsevne synker med turtallet, som vist.

Spesifikt dreiemoment. Figuren til venstre er utstyrt med to alternative y-akser. En motors spes. arbeidsevne kan nemlig omformes til et spesifikt dreiemoment, som altså blir gjeldende pr. dm³ slagvolum. Omformingen tar utgangspunkt i uttrykket $W=M_d \cdot \alpha$ som ble utledet på side 3-24. Her var M_d dreiemomentet på en aksel som dreiet seg α radianer. En firetaktsmotor trenger to omdreining, altså $4 \cdot \pi$ i radianer, for å fullføre en arbeidsprosess. Arbeidet som motorens sylindre kan yte på to omdreining, kan dermed skrives slik: $w_e \cdot i \cdot V_h = M_{d,e} \cdot 4 \cdot \pi$. Dreiemomentet er altså fordelt på to omr. Dette gir:

$$m_{d,e} = \frac{M_{d,e}}{i \cdot V_h} = \frac{w_e}{4 \cdot \pi} \left[\frac{\text{kNm}}{\text{dm}^3} \text{ hvis } w_e \text{ regnes i kJ/dm}^3 \right]$$

Her er $m_{d,e}$ spesifikt dreiemoment og $M_{d,e}$ totalt dreiemoment på utgående aksel.

Eksempel 2. Fabrikanten for motoren i venstre marg oppgir at denne gjør et arbeid lik 80 kJ pr arbeidsprosess når den kjøres med fullt pådrag ved 750 o/min. Bestem motortypens spes. arbeidsevne og spes. dreiemoment, samt totalt dreiemoment på utgående aksel for en motor med 16 sylindre. **Løsning:**

Spesifikk arbeidsevne: $w_{e,MCR} = \frac{W_e}{V_h} = \frac{80 \text{ kJ}}{32,15 \text{ dm}^3} = 2,49 \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}$

Spes. dreiemom.: $m_{d,e} = \frac{w_e}{4 \cdot \pi} = \frac{2,49 \cdot \text{kJ/dm}^3}{4 \cdot \pi} = 0,20 \frac{\text{kNm}}{\text{dm}^3}$

Tot. dreiemom.: $M_{d,e} = m_{d,e} \cdot i \cdot V_h = 0,20 \frac{\text{kNm}}{\text{dm}^3} \cdot 16 \cdot 32,15 \text{ dm}^3 = 103 \text{ kNm}$

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 (kJ/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 som er 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 effekt. Som vi skjønner av det forangående, kan vi nå skrive en **firtaksmotors** 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, også kalt bremseeffekt), [kW]

w_e = spesifikk arbeidsevne, [kJ/dm^3 pr. arbeidsprosess]

i = antall sylindere [-]

V_h = motorens slagvolum pr. sylinder, [dm^3]

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

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

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

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

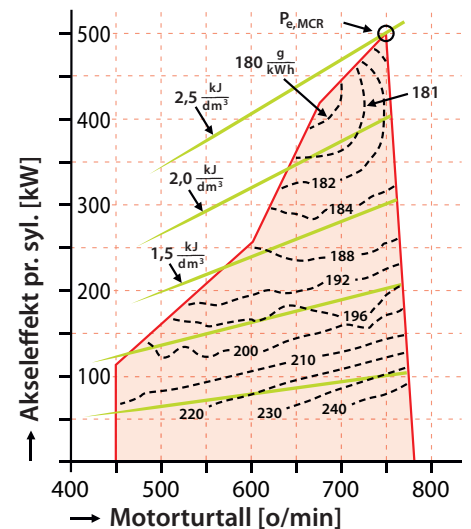
De to ligningene ovenfor gjelder generelt for sammenhengen mellom en stempelmotors spesifikke arbeidsevne og dens akseleffekt. Har vi en graf for spesifikk arbeidsevne som funksjon av turtall, kan en tilhørende graf for akseleffekt bestemmes av ligningene. På denne måten er altså figuren til høyre basert 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 firtakts- 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 s^{-1} .

Grunnen til at vi her får samme uttrykk både for totaktere og firtaktere, er at dreiemomenter alltid oppgis som gjennomsnittsverdi for alle omdreininger som utgående aksel gjør. 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, spesifikt brenselforbruk (g/kWh) er lagt inn også i dette diagrammet. Grønne linjer angir spesifikk arbeidsevne [kJ/dm^3] for pådrag lik 20, 40, 60, 80 og 100% av MCR.

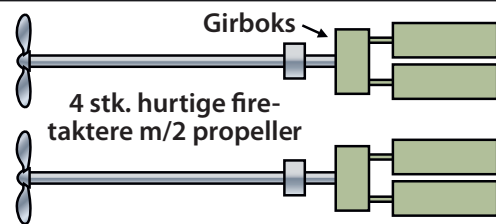
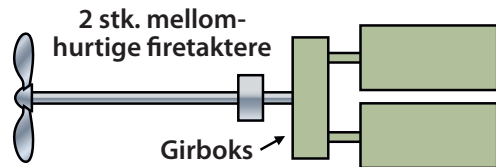
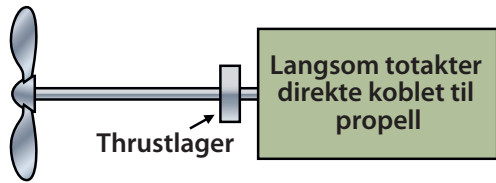
Akseleffekt pr. sylinder for en mellomhurtig, firtakts diesel-motor for framdrift av skip.



Vi undrer oss på:

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

Valg av dieselmotor ved et gitt effektbehov



Tre alternative arrangement 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 og 3-26.

Alternative motorarrangementer

Når motortype skal bestemmes, har man da ofte valget mellom langsomme totakter, mellomhurtige firetakter eller hurtige firetakter. Dette ble allerede påpekt på side 6-13. Eksempler på valgmuligheter som da kan foreligge, er gitt i figur til høyre. 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 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 en 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/dm³

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 6-13. 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. Dette er imidlertid avhengig av hvor stort effektbehovet er, og må undersøkes nærmere (se oppgave 6.xx)

Tilpasning av framdriftsmotor til fartøyets behov

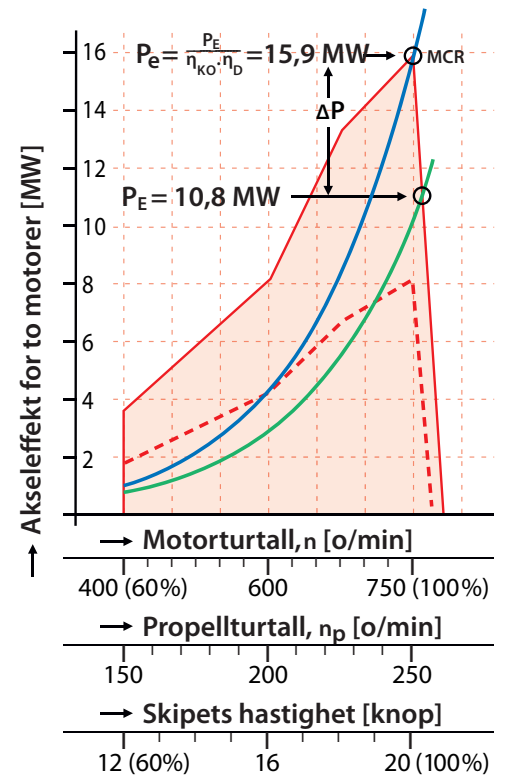
Det vises til sidene 3-14/15 med beregning av slepeeffekt for et skip ved hjelp av dataprogrammet "Free ship". Graf som funksjon av skipets hastighet er overført til figur til høyre. Som det framgår, er effektbehovet ved 20 knop $P_E = 10800$ kW.

Vi nå skal finne motorer som passer for et slikt skip, og vi forutsetter som eksempel at det skal brukes et tomotorsanlegg. Først må det tas hensyn til kraftoverføringens virkningsgrad (η_{ko}) og propulsjonsvirkningsgraden (η_D). Motorene må da samlet ha en akseleffekt $P_e = P_E / (\eta_{ko} \cdot \eta_D)$, se blå graf i figuren til høyre. Deretter må vi velge motortype og så "spille på" de fire faktorene i hovedligningen på side 6-17 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 effektbehovet, 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 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 $P_E = 10800$ 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 6-17, **Løsning:** Se nedenfor:

	Langsom totakter	Mellomhurtig firetakter	Hurtig firetakter
Kraftoverføringens virkningsgrad, η_{ko}	0,99	0,98 · 0,99	0,97 · 0,985
Propulsjonsvirkningsgrad, η_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 ³].....	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 pr syl., $V_h = \pi \cdot D^2 \cdot S / 4$ [dm ³].....	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 motor markedet anno 2008. Det er ikke plass til å beskrive motorene detaljert.



Driftsområde for et anlegg med to Rolls Royce-motorer, type Bergen B32:40P (data, se figur side 6-16)

Øvre grense for samlet akseleffekt fra to motorer, som funksjon av motorturtall
 Øvre grense for akseleffekt fra en av motorene, som funksjon av motortall (som figur på side 6-17)

Slepeeffektbehov som funksjon av hastighet/motorturtall for skip på 20000? tdw, normal hastighet 20 knop, beregnet v.h.j.a. dataprogrammet "Free Ship" se side 3-14/15.

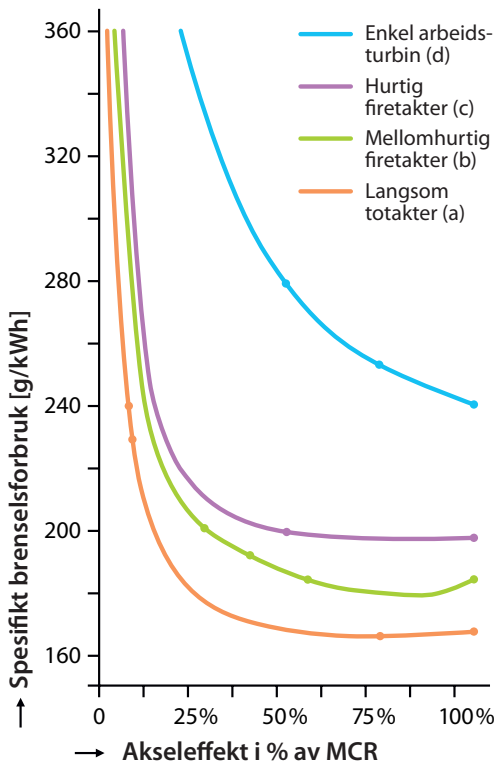
Totalt behov for effekt fra maskinerianlegget når det tas hensyn til effekttapet ΔP i kraftoverføring (inkl. girboks) og propell

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



- a) MAN, type
- b) Rolls Royce, type Bergen B32:40P
- c) Fra Woud/Stapersma

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 med motorturtallene. Dette er ikke helt riktig. Som oftest reduseres effektbehovet hurtigere ved de høyeste hastighetene/turtallene (se oppg. 6.xx). 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 koter som vist på side 6-17, når slike foreligger.

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 (side 6-34), men de øvrige tar vi for oss nedenfor og på etterfølgende sider.

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 tilstede (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 pr 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. Også totalt forbruk vil derfor øke igjen ved små belastninger.

Eksempler

Eksempel 5. Forskjell i årlig brenselforbruk for skipet i eksempel 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 pr år og har et spesifikt brenselforbruk som gitt i figur til venstre.

Løsning: I følge 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 6. Besparelse i hovedmotorenes brenselforbruk pr. nautisk mil ved reduksjon av hastigheten fra 20 til 18 knop. Det forutsettes at skipet i eksempel 4 utrustes med mellomhurtige dieselmotorer. Beregn hovedmotorenes brenselforbruk pr nautisk mil ved de nevnte hastigheter og besparelsen i prosent. Siden kotekart foreligger (side 6-17), brukes dette til å bestemme spes. brenselforbruk i stedet for figuren til venstre. Avmerk resultatene i figur til høyre.

Løsning nedenfor:

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

Ved 18 knop: Fra blå graf på side 6-17 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 6.19, 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!*

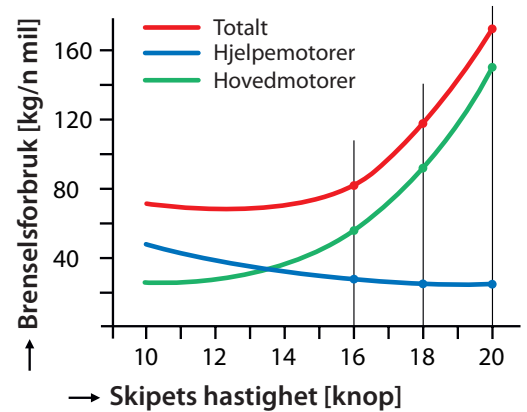
Eksempel 7. Totalt brenselforbruk pr. nautisk mil ved hastigheter lik 20 og 18 knop. Vi skal se mer på det samme skipet som i eksemplet ovenfor. Dette er også utstyrt med en hurtig dieselmotor på 2000 kW/1500 o/min som hjelpemotor. Denne har konstant last og spes. forbruk 210 g/kWh. Det relativt store elektriske effektbehovet kan f.eks. skyldes store kjøleanlegg ombord. Beregn forbruket pr 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 6 og 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, punktene for 16 knop fra oppgave 6.xx.

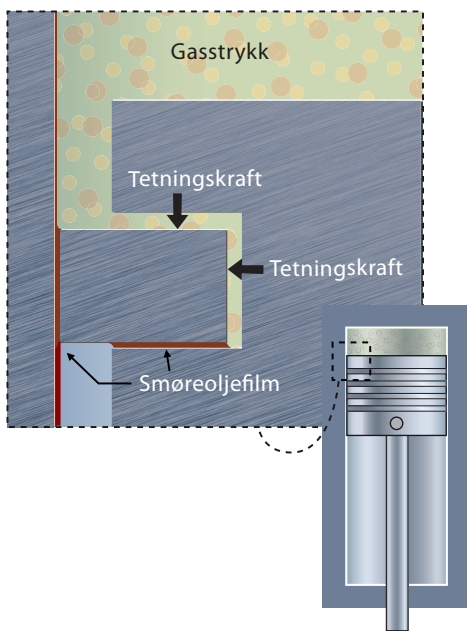
Eksempel på et skips brenselforbruk for hovedmotorer og hjelpemotor, samt totalt forbruk, som funksjon av hastighet.



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 6-19 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 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 sylindrløpebanen.

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 6-28) og evnen til gå på miljøvennlig brensel (se side 6-27), som vil "holde liv" i stempelmotoren i enda mange tiår.

Illustrasjon som viser hvordan gasstrykk i sylinderen bidrar til god tetning, men samtidig også stor slitasje, av sylindrløpebane 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 brenseløkonomien må derfor også behovet for vedlikehold tas med i betraktning 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 sylindrløpebanene, av grunner vi skal komme tilbake til nedenfor. Det er derfor som oftest slitasjen på disse delene som blir bestemmende for 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 sylindrløpebanen. Denne vil være proporsjonal med stemplets midlere hastighet
- økende flatetrykk som virker mellom stempelringen og sylindrløpebanen. 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 6-15. Selv om trykket i ringsporet blir mindre enn i sylinderen, er det på en måte maks. forbrenningstrykk som blir avgjørende for slitasjen.

Midlere stempelhastigheten 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:

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

Eksempel 8. Midlere stempelhastighet for dieselmotortyper.

Beregn midlere stempelhastighet for de motortyper som er vurdert i eks. 4, side 6-19. **Løsning:**

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

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

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

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 figur side 6-15.

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 MP-tall. Også andre faktorer virker imidlertid inn på slitasjeforholdene i en motor, og TP-tallet alene må ikke tillegges for stor vekt.

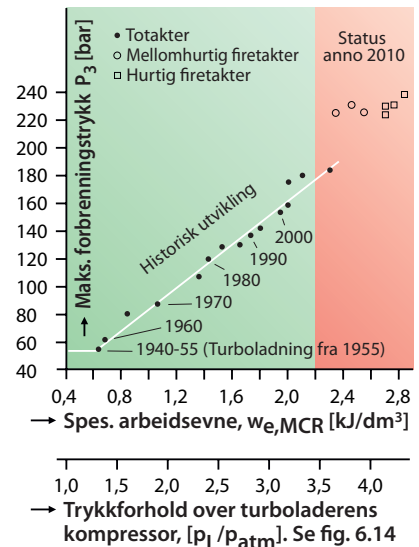
Eksempel 9. Beregn teknologi-parameteren for de tre motortypene som kan være aktuelle for skipet i eksempel 4, side 6-19. Bruk verdiene for spes. arbeids-evne $w_{e,MCR}$ fra dette eksemplet og verdier for \bar{v}_{st} fra forrige side. Løsning:

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 og status anno 2009.

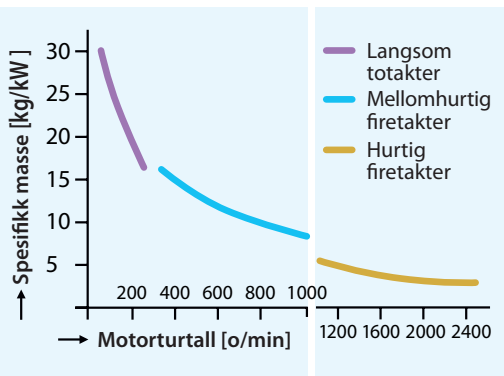
Grafen for historisk utvikling er basert på utførte Sulzer/Wartsila totaktsmotorer. Status anno 2009 gjelder for både totakts- og firetaktsmotorer. Grafen kan tilnærmet også brukes sammen med den nederste x-aksen, som illustrerer overladningsgraden. Innlagt linje gir en proporsjonalitetsfaktor lik ca 80 bar/kJ/dm³. 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 16000 km med en fart ca 80 km/h. Er det andre forskjeller i de to motortypes driftsprofiler enn selve tidsfaktoren?

Dieselmotorers plassbehov. Gir og clutch



Spesifikk motormasse som funksjon av turtall.

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

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 motortypers masser gjøres gjerne på spesifikk form. Med spesifikk masse mener vi da motorens masse pr. effektetthet [kg/kW]. Figur til venstre viser tydelig hvor tunge de langsomme totakterne egentlig er.

Plassbehov

Dette er illustrert ved at de tre motorarrangementene for skipet i eks. 4 (se sidene 6-18/19) 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 krever så stor plass.

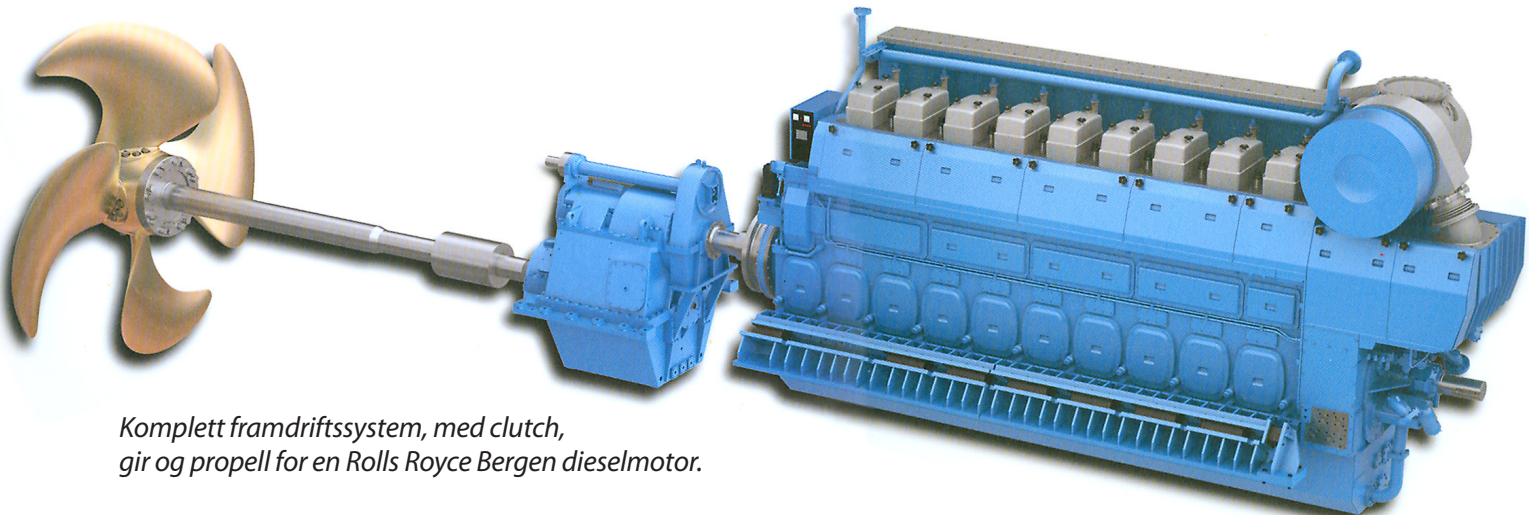
Girboks og clutch

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 6.xx 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 koble ut en av motorene. I så fall må anlegget utstyres med clutch som vist i figur nedenfor.



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

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 var vist på side 6-13?



Tverrsnitt av tre motorarrangementer for skip i eksempel. 4, side 6-19.

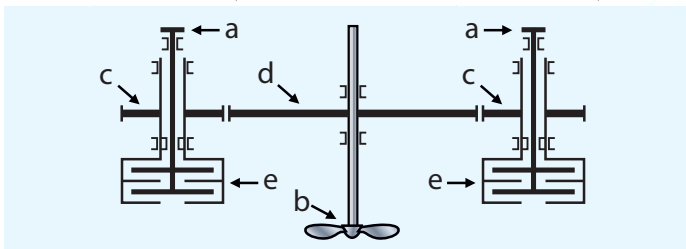
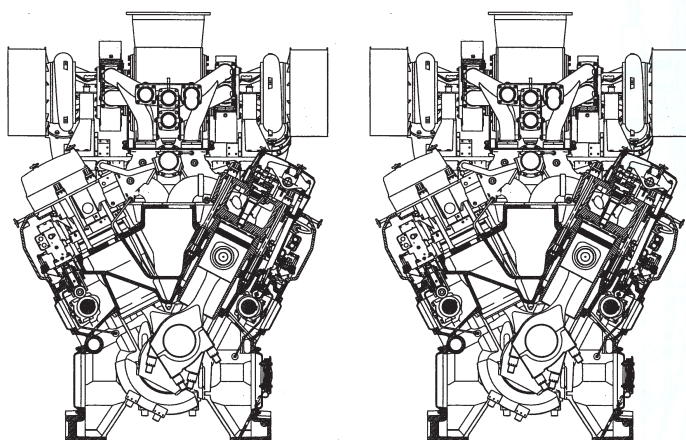
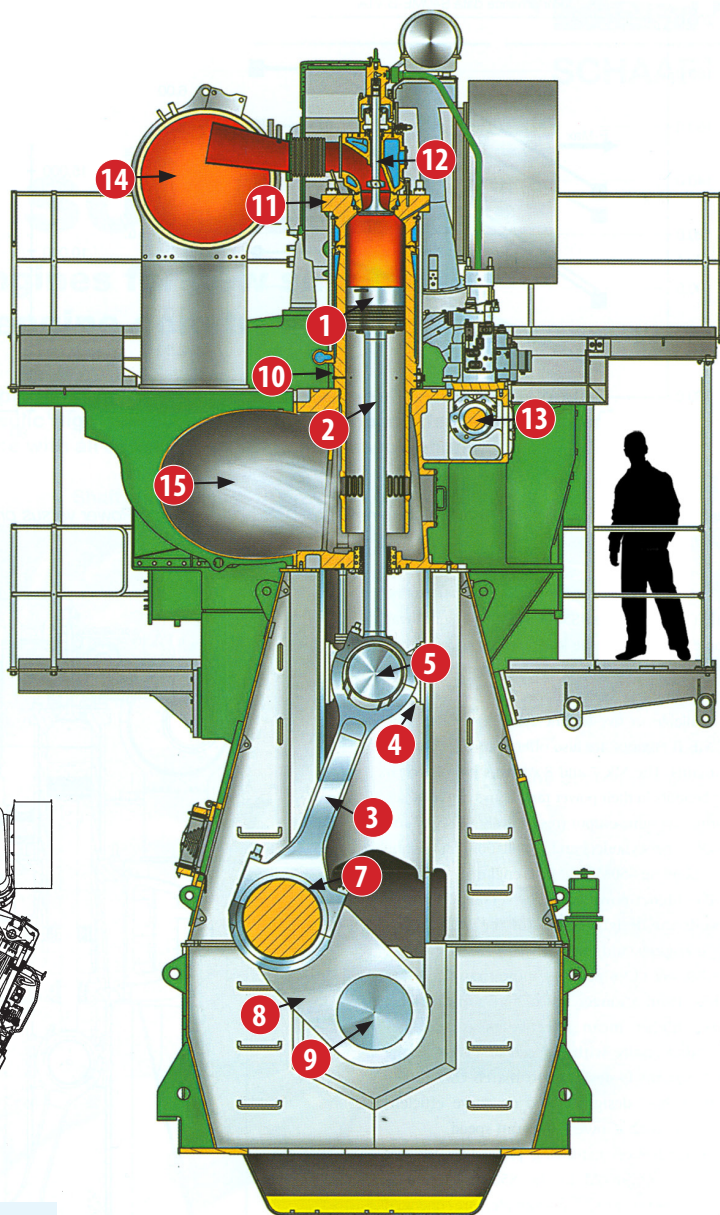
- Nederst: Fire hurtige MTU firetaktere (motorlengde 4,0 m + girboks)
- I midten: To mellomhurtige Rolls-Royce Bergen firetaktere (lengde 7,7 m + girboks)
- Til høyre: En langsom MAN totakter motorlengde (9,8 m ??????)

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

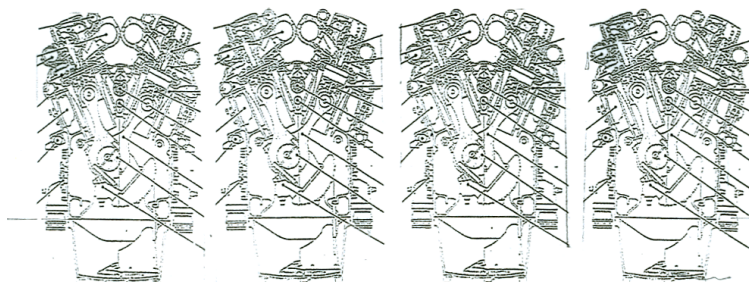
Sentrale deler i en totakts krysshodemotor

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. Sylinderforing
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)

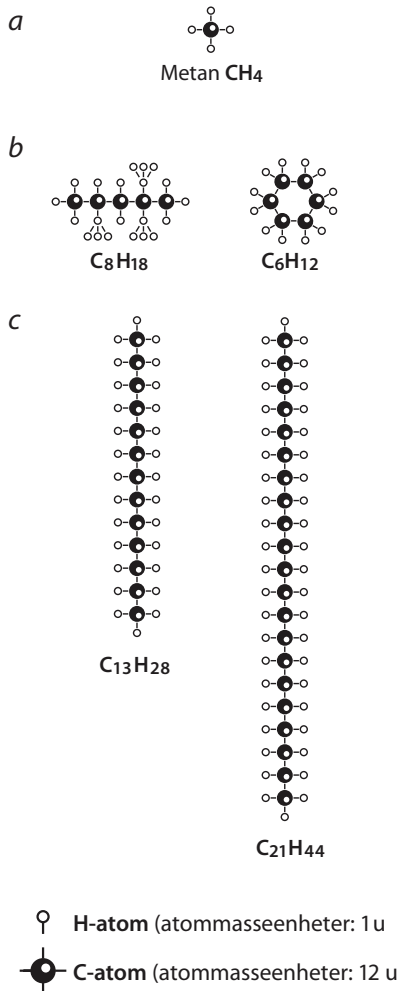
Se oppg 6.xx vedr. tilsvarende deler i en motor uten krysshode (trunkmotor)



Skjematisk illustrasjon av friksjonsplateclutcher (e) integrert i en girboks for et tomotors anlegg. (se figur til venstre). Virkemåte beskrives i oppg. 6.xx



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, alle i kjedeform. Tungoljer har mer enn 20 C-atomer

Brensler

Brensler som egner seg til bruk i forbrenningsmotorer er:

- **Hydrogen (H₂)**
- **Hydrokarboner (HC-forbindelser)**
 - Naturgass (blanding av flere gasstyper)
 - Bensiner
 - Parafiner (for gassturbiner i fly)
 - Diesellojler (for biler brukes lette "gassoljer", også kalt autodiesellolje, for skip og båter brukes en tyngre kvalitet, kalt "Marin Gas Oil" eller marin diesellolje)
 - Tungoljer (Heavy Fuel Oils, flere typer med lite/mye S)
- **Biobrensler (HCO-forbindelser)**
 - Alkoholer (etyl- og metylalkoholer, som bensintilsetning)
 - Biodiesellojler

Hydrogen (H₂) framstilles enten ved elektrolyse av vann (krever elektrisk energi) eller ved avspalting fra HC-produkter i raffinerier (gir utslipp av CO₂). Hovedfordelen med bruk av hydrogen som brensel er absolutt rene avgasser (H₂O), 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 (CO₂) 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

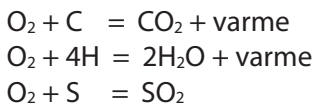
Stort sett gjelder følgende data for brenslene i lista ovenfor:

- 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/dm³ for bensin til 0,97 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 CO₂ (se side 11-7). Vi kan altså si at biobrenslene inneholder korttidslagret solenergi. Biobrenslene har dermed nylig tatt ut like mye CO₂ fra atmosfæren som de kommer til å slippe ut igjen når de senere forbrennes i motorer. De gir altså ikke noe netto CO₂-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 6.2) at den luftmengde som er nødvendig for å forbrenne 1 kg brensel, blir

$$(L/B)t = 1,293 \cdot 22,4 \cdot (c/12 + h/4 + s/32 - o/32) / 0,21 \quad [\text{kg luft} / \text{kg brensel}]$$

Her er c, h, s og o masseandelene av karbon, hydrogen svovel og oksygen per kg brensel. Typiske sammensetninger for de ulike brenselstypene 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 6.3.

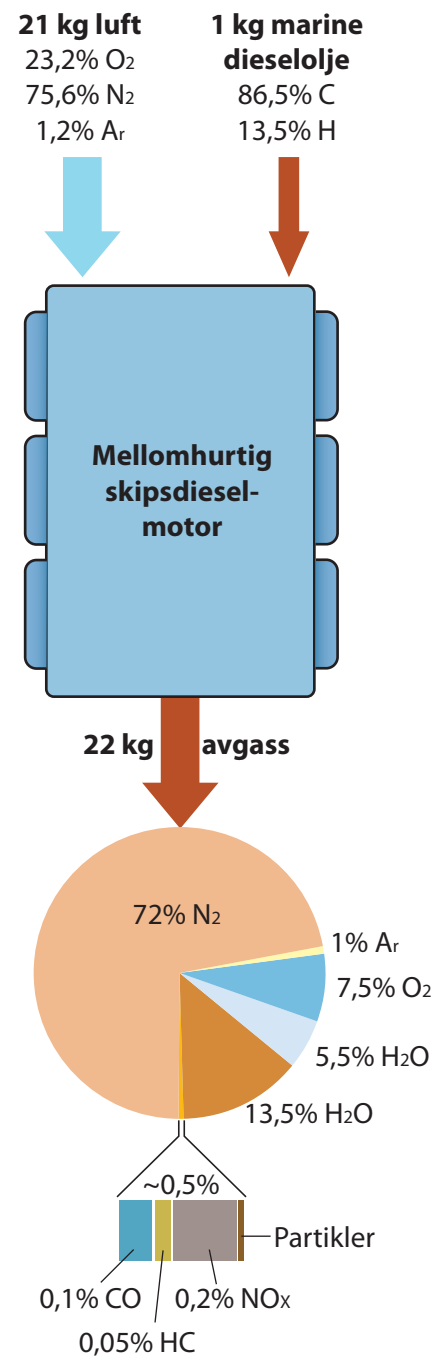
Virkelig luftbehov. Når det gjelder det virkelige luftbehovet er det stor forskjell mellom ottomotorer og dieselmotorer. I dieselmotorer sprøytes brenselet inn i forbrenningsrommet i løpet av noen få veivgrader rundt Ø.D. Det blir dermed for liten tid til å oppnå en perfekt blanding mellom luft og brensel. 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 λ 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 svært høye luftfaktorer, $\lambda = \text{ca } ?$, for å holde temperaturen etter forbrenningen tilstrekkelig lav (se side 7-11)

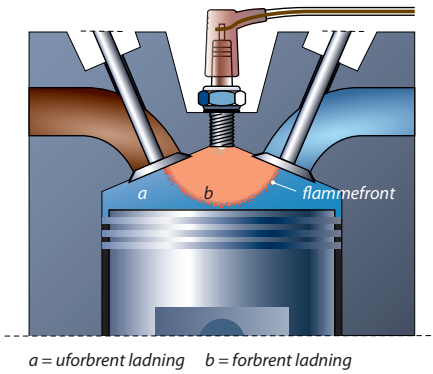
Avgassammensetning. Skadelige utslipp. Vi kan nå resonnerer oss fram til hva avgassen fra en dieselmotor i hovedsak består av, se figur i marginen. **Siden nitrogen (N₂)** er hovedbestanddelen i den lufta som tilføres, er det klart at denne gassen også må være den største bestanddelen i avgassen fra motoren. Videre inneholder avgassen **oksygen (O₂)**, 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 (CO₂)**, **vanndamp (H₂O)** og **svoveldioksid (SO₂)** vil være til stede i avgassen.

Under forbrenningsprosessen dannes det imidlertid også stoffer som er direkte helseskadelig 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_x)** og **partikler (PM)**, se neste side.

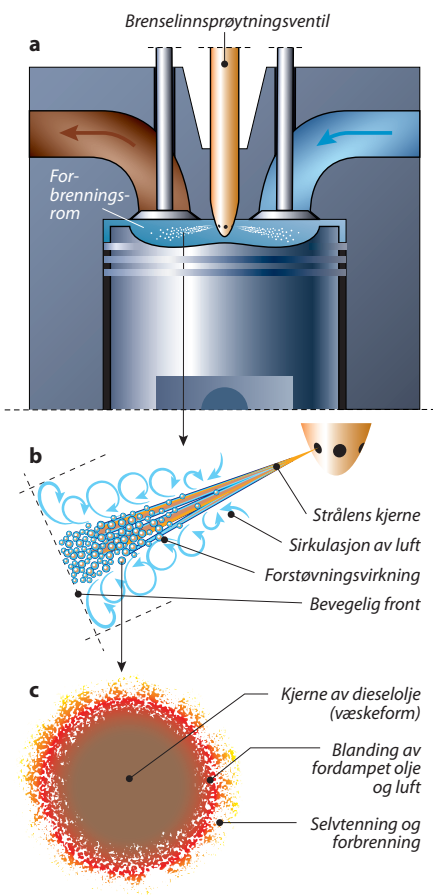


Sammensetning av avgassen fra en mellomhurtig, firetakts dieselmotor.

Du kan lese mer om dannelse og utslipp av nitrogenoksider (NO_x) og partikler (PM) på neste side.



Skjematisk illustrasjon av forbrenning i en ottomotor:



Skjematisk illustrasjon av forbrenning i en dieselmotor:

- a) Forbrenningsrom med stråler av innsprøytet dieselolje
- b) Dieselolje stråle 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 dieselolje på dråpens overflate

Forbrenningsprosesser

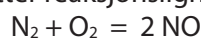
Forbrenning i bensinmotorer. Først bør du på nytt lese om forskjellen mellom otto- og dieselmotorer på side 7-12. Brensel for ottomotorer i biler eller utenbordsmotorer er som kjent bensin. Denne kan i en viss grad være blandet opp med HCO-forbindelser med høye oktantal (alkoholer og syntetiske brensler). 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 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 brer seg hurtig gjennom hele forbrenningsrommet, se figur i marginen. I flammefronten kan temperaturen være mer enn 3000 °C.

Forbrenningen i dieselmotorer foregår på en helt annen måte.

Figuren i marginen viser et forbrenningsrommet 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 fordampning fra overflaten. Denne brensel-dampen 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 brensel-dampmolekyler 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 brensel-dampmolekyler. 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 forbrenningssonene og forbrenningen brer seg raskt gjennom alle dråpene og strålen.

Dannelse av nitrogenoksider (NO_x). Nitrogenoksider (NO_x) er et samle navn for nitrogenoksid (NO) og nitrogendioksid (NO₂). Det er imidlertid primært NO som dannes i motorer, mens NO₂ stort sett oppstår ved ytterligere oksidasjon i atmosfæren. Nitrogenoksid (NO) dannes etter reaksjonsligningen



Dette er en prosess som krever høye temperaturer, så høye at N₂- og O₂-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 O₂-molekyler vil øke sjansene for at de 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. De dannes som nærmere forklart i figur c til venstre.

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 hadde vært en enorm fordel om også ottomotorer kunne utføres med høyere kompresjonsgrad, for dermed å oppnå virkningsgrader som nærmer seg dieselmotorens.

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.**

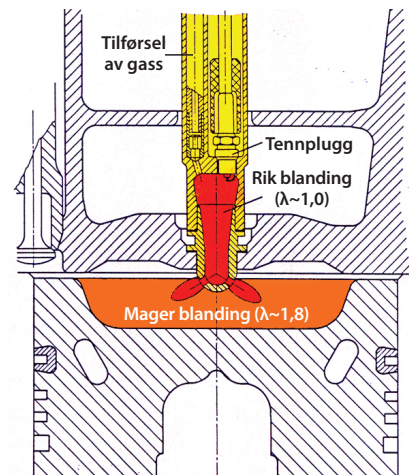
Selve forbrenningsprosessen framgår av figur og tekst øverst i margen

Ulempen med luftfaktorer som er større enn 1,0, er at en motors arbeidsevne og dermed effekt da reduseres, fordi det skal tilføres relativt mindre brensel enn ved luftfaktor 1,0. Dette kan imidlertid kompenseres ved å bruke større turboladere og turboladetrykk.

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

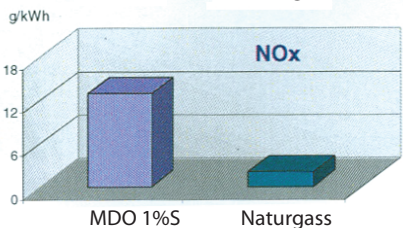
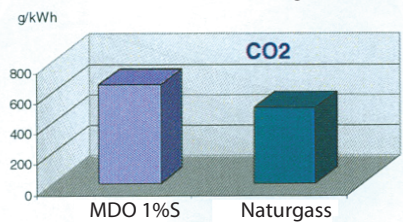
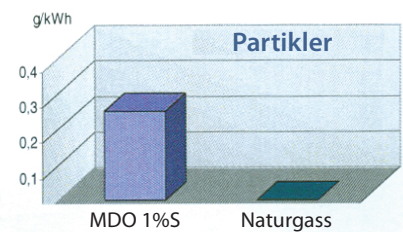
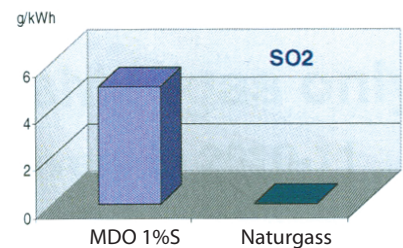
- Utslipp av svoveldioksid (SO₂) er fullstendig eliminert, fordi naturgass (levert enten som CNG eller LNG) ikke inneholder svovel (S) i det hele tatt
- Utslipp av partikler er nesten lik null, fordi partikkeldannelse først og fremst opptrer ved forbrenning av brensel-dråpene i dieselmotorer, se foran.
- Utslipp av CO₂ er redusert med 26 %, fordi metan inneholder en mindre andel karbon per kg brensel enn diesellojler, se side 7-26.
- Utslipp av nitrogenoksider (NO_x) 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.



Forbrenning i Rolls-Royce "otto mager gassmotor".

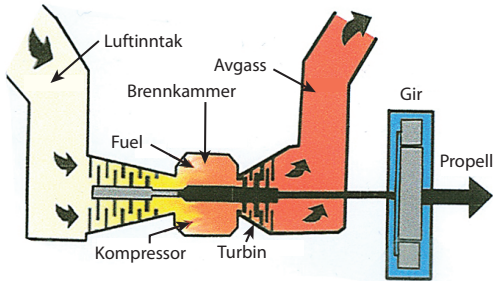
Forbrenningen starter i et for-kammer med rik blanding og stråler med brennende gass sprøytes inn i hovedforbrenningsrommet med mager blanding, hvor resten av gassen forbrenner.



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

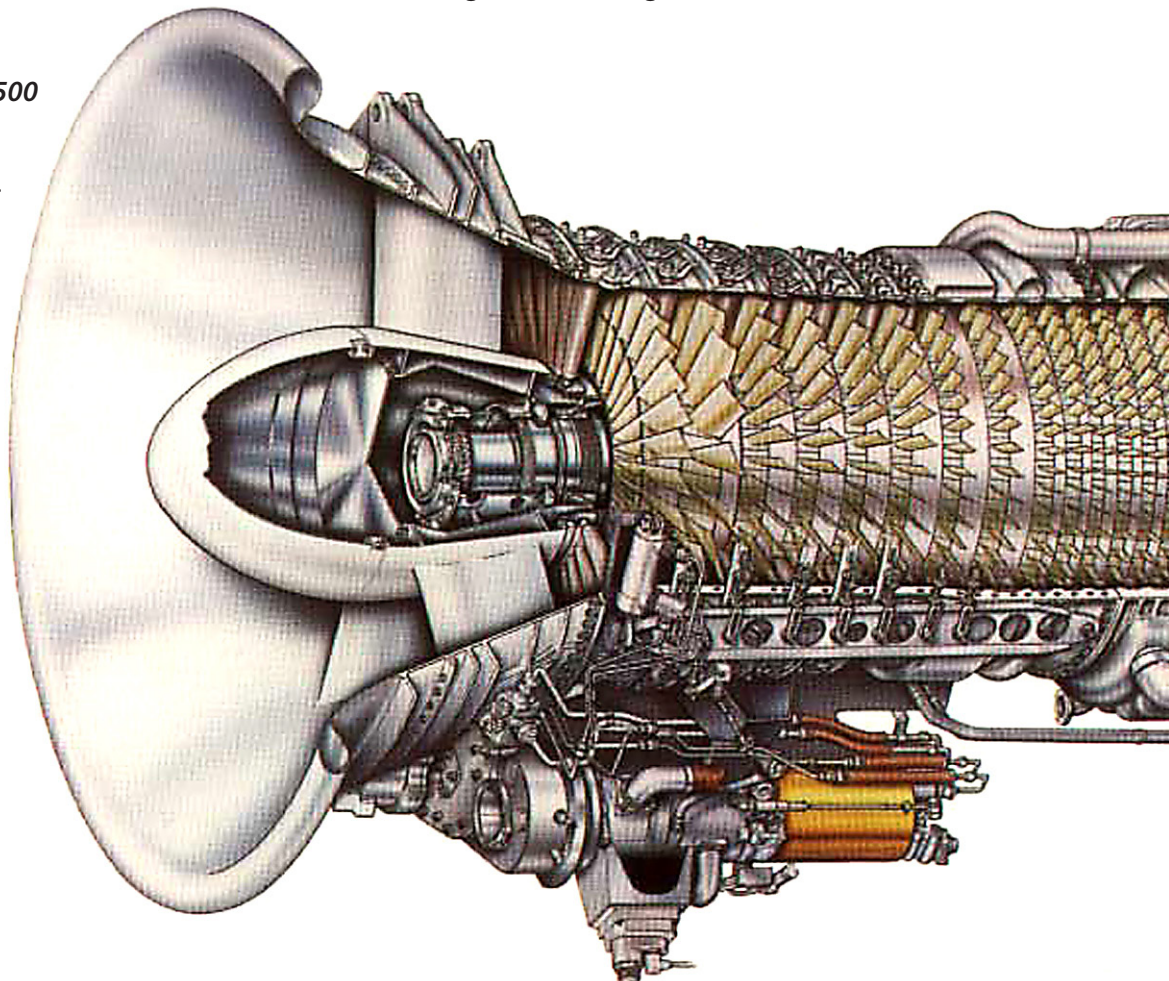
Verdens første gassturbin ble bygd i 1903 av den norske ingeniøren Ægidius Elling. Den hadde en effekt på 11 hk. Konstruksjonen var fremragende både varmeteknisk og strømingsteknisk, men materialteknikken var den gang ikke kommet langt nok til at turbinen fikk noen praktisk betydning. Blant annet var 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 kort beskrevet arbeidsprinsippet for gassturbiner, hva som skiller dem fra stempelmotorer og hvorfor de har så dårlig virkningsgrad (altså høyt brenselsforbruk).

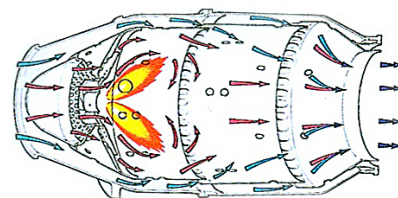
Gassturbiners virkemåte

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:

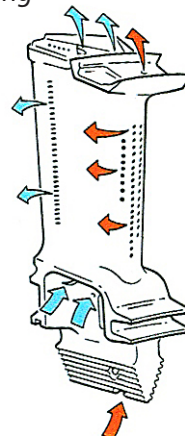
General Electric gassturbin, type LM 2500
 Effekt: 25000 kW
 Totrinns arbeidsturbin:
 Høytrykkstrinnet driver kompressoren og lavtrykkstrinnet driver lasten. Det er totalt x brennkammere plassert rundt omkretsen



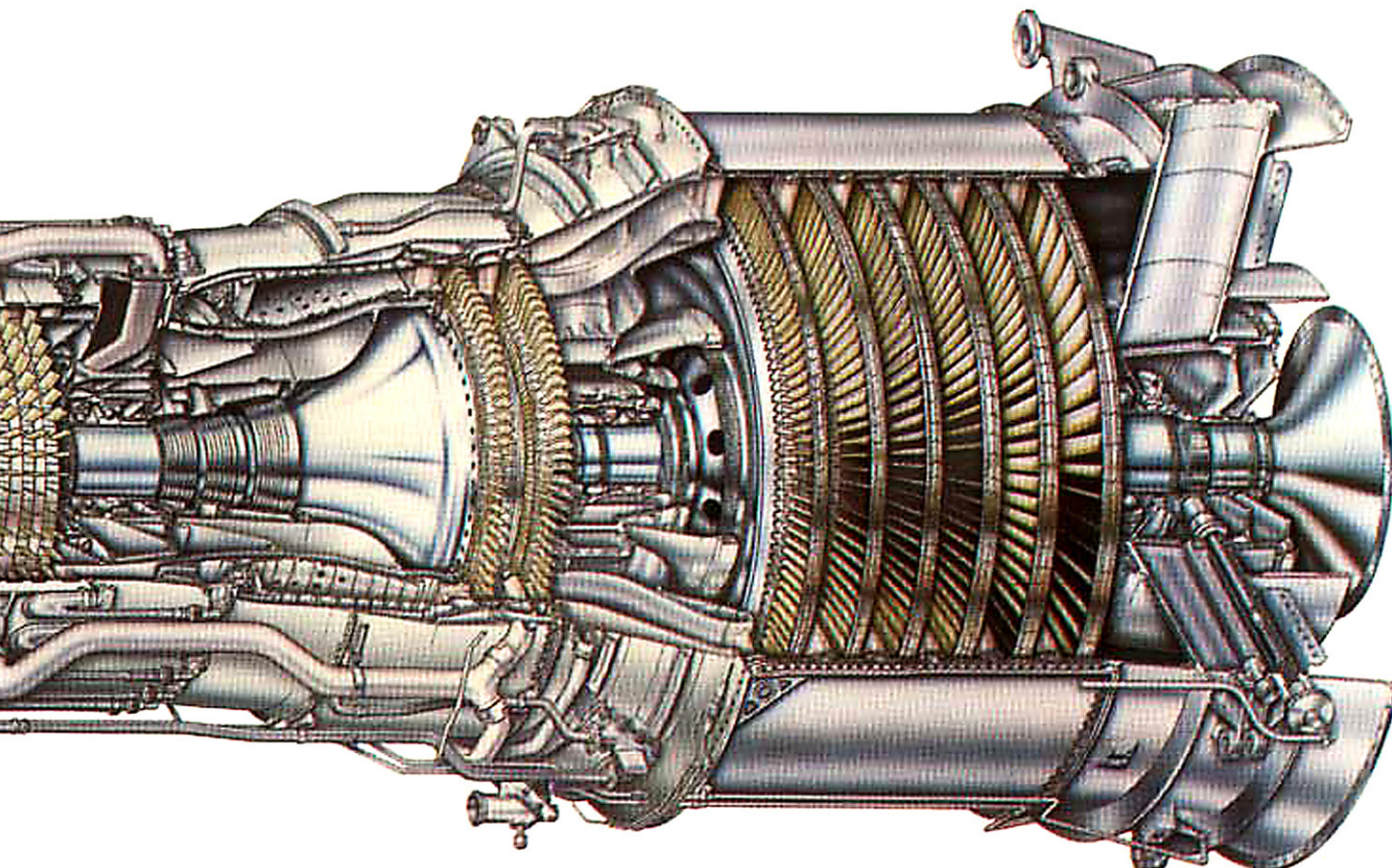
- **Vesentlig mindre kompresjon** i en gassturbin og dermed både lavere kompresjonstrykk og –temperatur. Kompresjonen skjer i et turbinhjul og ikke i en sylinder.
- **Kontinuerlig forbrenning** i en gassturbin og diskontinuerlig i en dieselmotor. Dette er et meget viktig punkt, se side 7-11.
- **Litt 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 tempereturene som skovlene i arbeidsturbinen utsettes for, under kontroll. Disse skovlene utsettes for 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 fremstilling av slike turbinblad komplisert og kostbar. Da er kjøling av de varmebelastede deler i en dieselmotor (stempel, topplokk, avgassventiler) vesentlig enklere. Her er forbrentemperaturene 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.

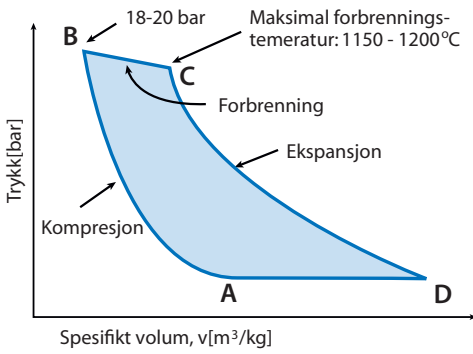


Forbrenning og strømning i et brennkammer i en Rolls-Royce gassturbin. Røde piler viser lufttilførsel og forbrenningsgasser fra forbrenningen. Blå piler viser luftkjøling



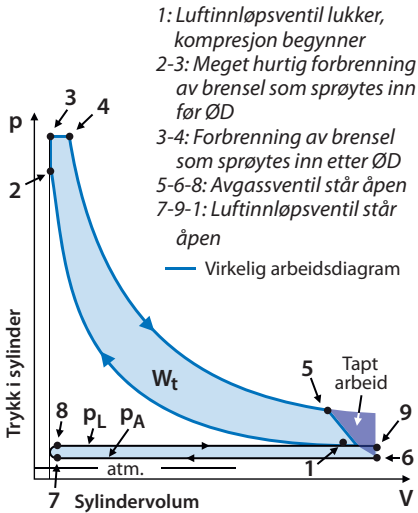
Innvendig luftkjøling av skovl for arbeidsturbin (Rolls-Royce). Røde piler viser strømning av kjøleluft med høyt trykk og blå piler luft med lavt trykk





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.



Anvendelser

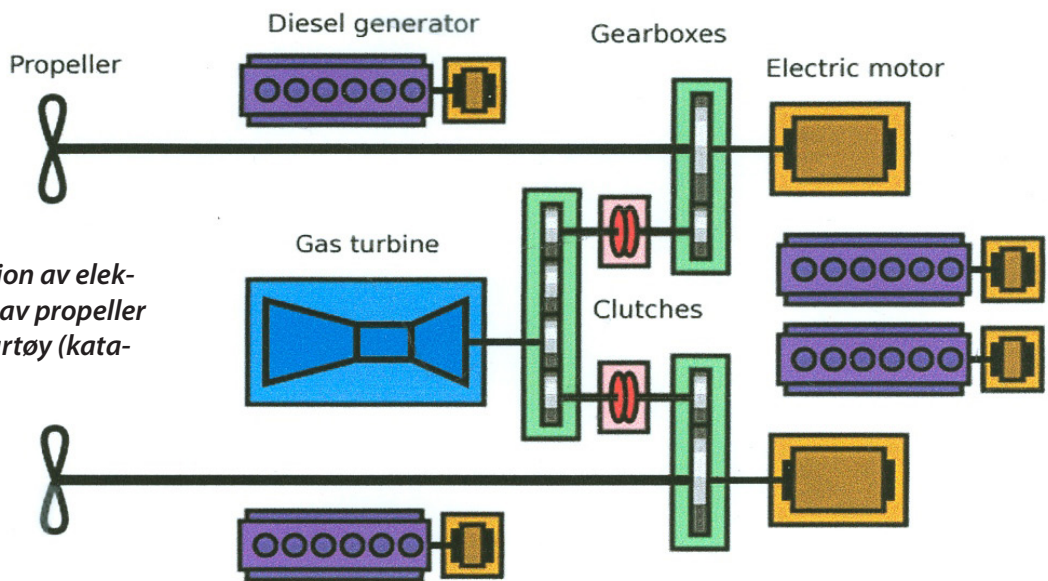
Som tidligere nevnt, brukes gassturbiner lite til framdrift av skip med propell, fordi brenselforbruket er for høyt. Unntaket er når gassturbinens beskjedne plassbehov og lave vekt spiller en viktig rolle. Dette er som kjent tilfelle i hurtiggående båter drevet med propell eller vannjet (semideplasementsfartøyer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

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).

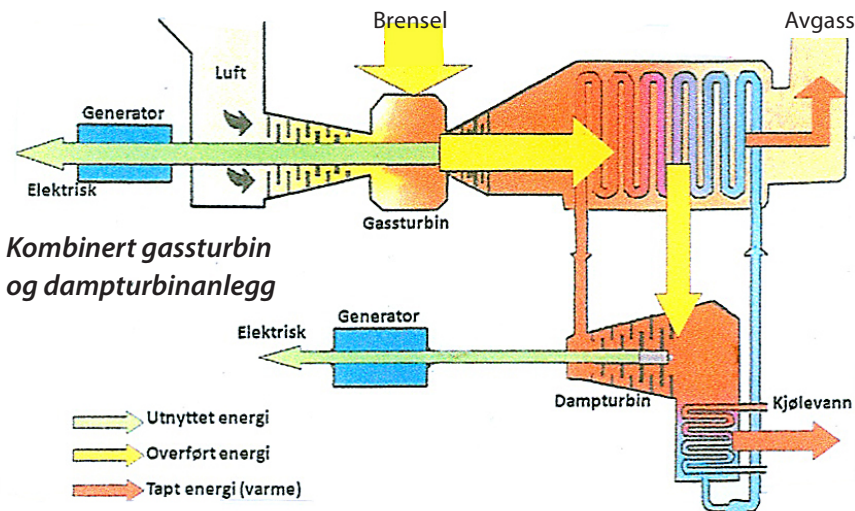


Gassturbin og dampturbin – kombianlegg

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.

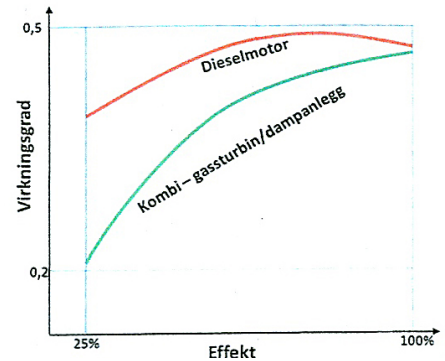
Årsaken til at slike kombianlegg i svært liten grad er benyttet for energiproduksjon om bord i skip, er tre sentrale egenskaper:

- 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 brenslers. Tyngre, billige brenslers som inneholder svovel og andre urenheter vil føre til skade på gassturbinen. Dette kan også være en fordel dersom brenslert er naturgass.

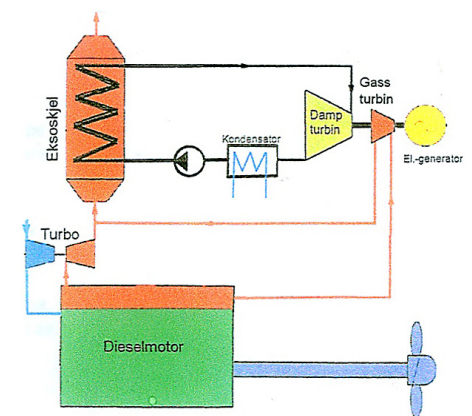


Mulige anvendelser av gassturbin og dampturbin til energiproduksjon om bord i skip.

- For skip med ekstreme krav til lav vekt og høy effekt er gassturbin ofte den eneste løsningen.
- For skip med alternative energikilder som ikke kan benyttes i dieselmotorer, er dampanlegg det eneste kjente alternativet. I fremtiden, med mangel på oljebaserte, flytende brenslers, kan dampanlegg komme tilbake i skip
- 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 eksostapene 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 totalvirkninggraden 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



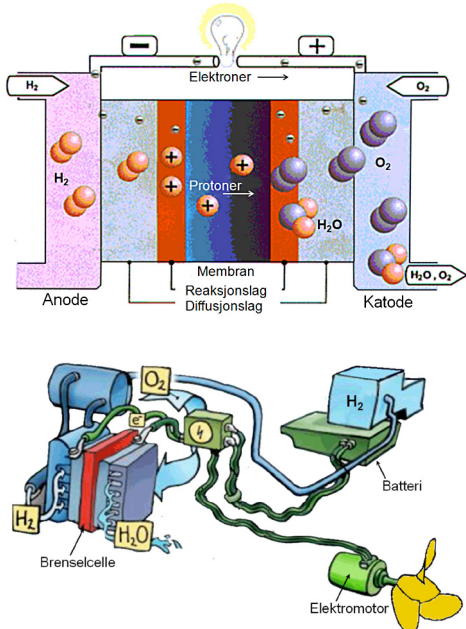
Kombinasjon av dieselmotor og dampanlegg



Vi undrer oss på:

Når brenslers 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 figur som viser prinsippet for en enkel brenselcelle og hvordan denne kan anvendes til fremdrift

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) var 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 til Apollo 11. Motivasjonen for den første utviklingen av brenselceller var å finne en effektiv og ren måte å produsere energi innenfor et lukket system der både energi, vann, luft og hydrogen inngår i et lukket kretsløp. Utvikling pågår fortsatt kontinuerlig, og motivasjonen i dag er hovedsakelig miljø. Men denne teknologien har sine begrensninger, og det store gjennombruddet for brenselceller har ikke kommet. Foreløpig er det bare utviklet brenselceller for små effekter, og det stilles mange spørsmål til om dette er en teknologi som har særlig potensial ut over de nevnte, spesielle anvendelsene.

Hvordan virker en brenselcelle?

I prinsippet fungerer en brenselcelle som et batteri. I motsetning til et batteri trenger ikke en brenselcelle å lades opp. Den vil produsere energi i form av elektrisitet og varme så lenge den får tilført brensel. En brenselcelle består av to elektroder klemmt rundt en elektrolytt. Oksygen passerer over en elektrode og hydrogen over den andre og produserer elektrisitet, vann og varme.

Hydrogen drivstoff føres inn i "anode" av brenselcellen. Oksygen (eller luft) kommer inn i brenselcellen gjennom katoden. "Oppmuntret" av en katalysator, deler hydrogenatomet seg i et proton og et elektron, som tar ulike veier til katoden. Protonene passerer gjennom elektrolytten. Elektronene oppretter en egen strøm som kan utnyttes før de kommer tilbake til katoden, å bli gjenforent med hydrogen og oksygen til et vannmolekyl. Spenningen over en enkelt brenselcelle er 0,7 volt, og ved å kople flere celler i serie får man spenning som tilsvarer 0,7 antall celler.

En brenselcelle inkluderer normalt en "brensel reformator" kan utvinne hydrogen fra alle hydrokarbon brensler, fra naturgass til metanol, og til og med bensin. Siden brenselcelle er avhengig av kjemi og ikke forbreining, vil utslippene fra denne typen system være mindre enn utslippene fra forbreiningsprosesser. Unntak er CO₂ utslippene som kan være høyere enn for en effektiv forbreiningsmotor.

Egenskaper til brenselceller

Den viktigste fordelen til brenselceller er forholdet til miljøet. Med hydrogen som drivstoff er avgassen ren vanddamp. Her må vi merke oss at hydrogen bare er en energibærer, som må lages basert på en annen energikilde. Dermed kan dette være 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 metanol, metan, eller et annet hydrokarbon, må vi i tillegg til selve brenselcellen ha en reformator som spalter brensetil hydrogen og karbonmonoksid (CO), som så reagerer i selve brenselcellen. Brenselceller for høye effekter blir dermed svært plasskrevende, og totalvirkningsgraden når vi inkluderer prosessen rundt, blir da gjerne lavere enn en effektiv forbrenningsmotor. De store og mest effektive høytemperatur brenselcellene trenger oppvarming til svært høye temperaturer før de fungerer, og er også svært trege.

Anvendelse av brenselceller.

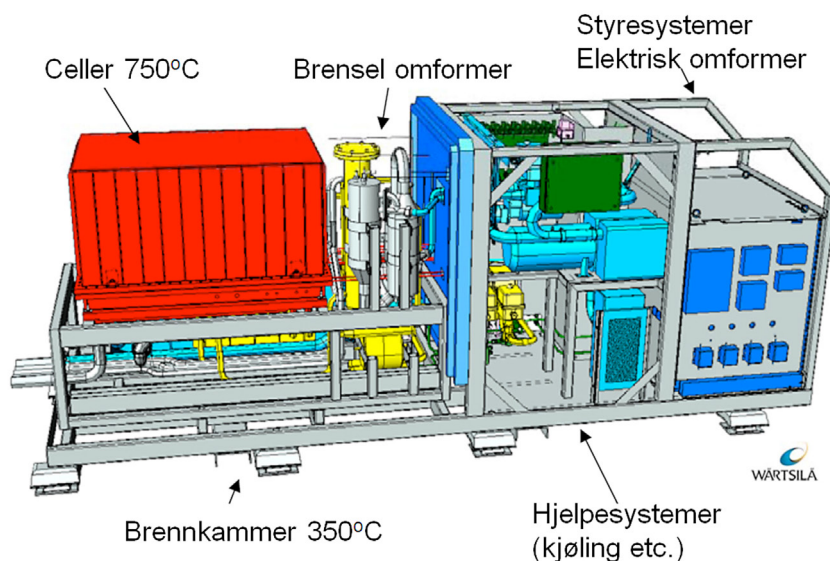
Brenselceller egner seg til spesielle anvendelser der det lokale miljøet er i fokus. Små lavtemperatur brenselceller er i bruk som strømforsyningsenheter til ulike formål der lave effekter er tilstrekkelig. For større effekter er det høytemperatur cellene som er aktuelle, men med eksisterende teknologi 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 på 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°)	Brennstoff	Virkningsgrad	Anvendelse
Lavtemperatur	PEM	60-100	H ₂ / Luft	0,3 - 0,4	Små 0,1 - 2kW
	AFC	60-120	H ₂ / O ₂	0,3 - 0,4	Små 0,1 - 2kW
Mellomtemperatur	PAFC	150-250	H ₂ / Luft	0,35 - 0,45	Mellomstore 0,1 - 5kW
Høgetemperatur	MCFC	550-700	H ₂ , CO, NH ₃ , CH ₄ / Luft + CO ₂	0,45 - 0,55 (0,8 - 0,9)*	Store <1MW
	SOFC	650-800	H ₂ , CO, NH ₃ , CH ₄ / Luft + CO ₂	0,45 - 0,55 (0,8 - 0,9)*	Store <1 MW

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

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



50 kW høytemperatur brenselcelle (Wärtsilä)

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 fremdrift og til å utføre mange andre oppgaver ombord. Som beskrevet tas energien fra lagringskilden, som er drivstoffet, og omdannes så til utnyttbar energi i en eller annen sentral reaksjonsmaskin (forbrenningsmotor). Videre må denne energien transporteres frem til der den skal brukes, altså utføre et arbeid eller tilføre varme. I hovedsak snakker vi om tre ulike måter å overføre energi om bord 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 den beste løsningen. Dette er egenskaper knyttet til funksjoner, arrangement, virkningsgrader, sikkerhet og miljø. Vi skal i dette avsnittet 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 frem 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 hovedsaklig 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 støtlast 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 spesialtilpasset 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: $W_L = \text{Kraft} \cdot \text{veg}$ 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

ω = vinkelhastigheten i radianer/sek

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60$ når n = omdreiningshastighet i omdreininger pr. 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 \cdot virkningsgrad

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

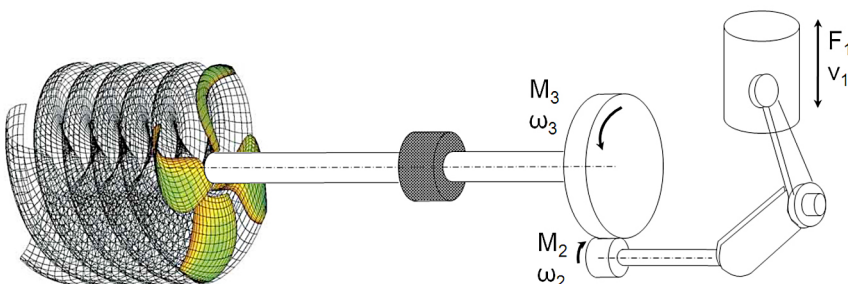
Dersom vi antar tapsfri energioverføring kan vi dermed skrive følgende sammenheng:

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

Dersom vi tar med tapene i hvert ledd i energioverføring 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 $M_3 \cdot \omega_3 = F_1 \cdot v_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$

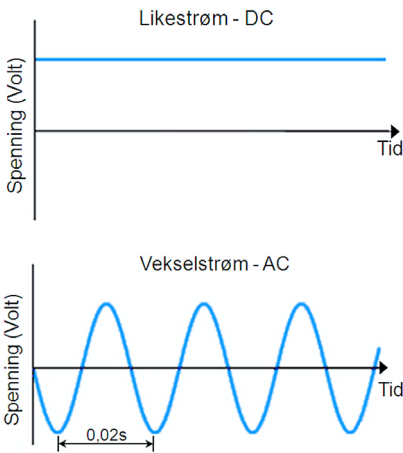


Vi undrer oss på:

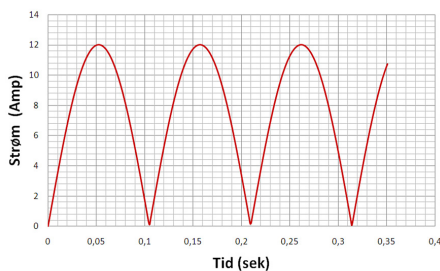
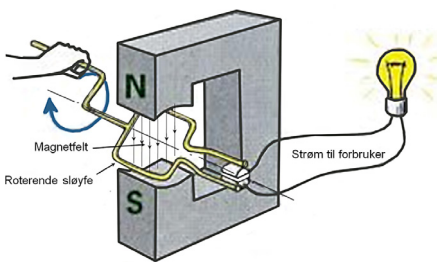
Ta for deg sykkelen din og identifiser ulike transmisjons-elementer. Hvor mange akslinger, koplelementer, gir, lager og mekanismer finner du? Dette er til dels de samme elementene som du vil finne igjen i alle slags mekaniske maskinerisystemer. Kan du også klare å beregne hvor store krefter og momenter 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 land-basert, 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 av 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". Om bord 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 nett frekvensen, men svingningene er så hurtige at vi ikke kan se at lysene faktisk blinker. Nettfrekvensen på land (Norge) er 50 Hz, mens om bord i skip er det 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. Så har vi videre høyspenningssystemene for overføring over lange strekninger. Her snakker vi om spenninger på 22 kV (kilovolt) og 132 kV.

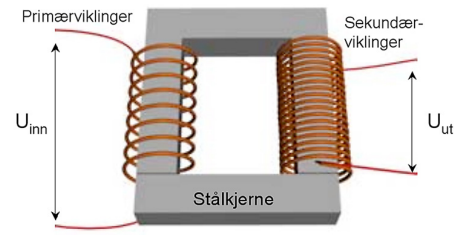
I fysikk har vi lært at elektrisk effekt er gitt som:

$$P = U \cdot I$$

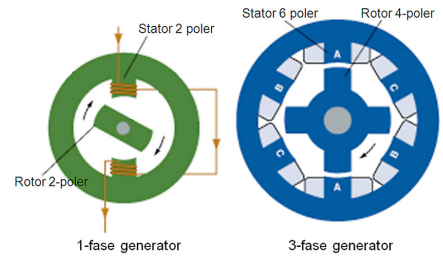
Skal vi øke energimengden (effekten) må vi derfor øke strømmen (I) og/eller spenningen (U). Dersom vi øker strømmen trenger vi kraftigere ledninger som kan lede store strømmengder uten for store tap. Dersom vi øker spenningen må vi isolere bedre for å unngå kortslutninger. Høye spenninger som kan sende 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 i verste fall vil den kortslutte og brenne opp eller eksplodere. For fremdriftssystemer 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

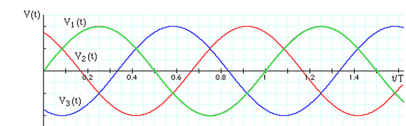
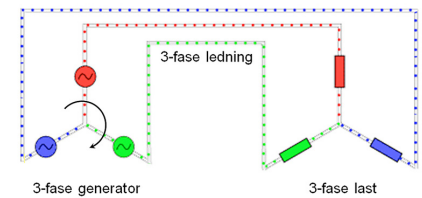


1-fase eller 3-fase

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 elekromotor på 50 Hz nett går med 1500 omdreininger pr. minutt, mens den samme motoren vil gå med 1800 omdreininger pr 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 variabelt omdreiningshastighet er helt nødvendig.



Hovedprinsippene for elektriske generatorer som lager vekselstrøm.

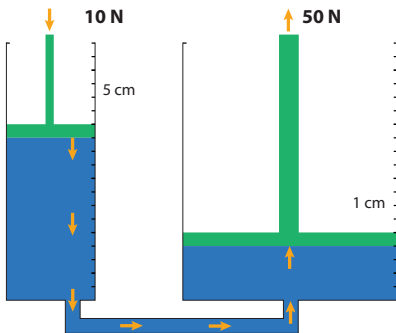


Vi undrer oss på:

- 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



Prinsippet for hydraulisk overføring.



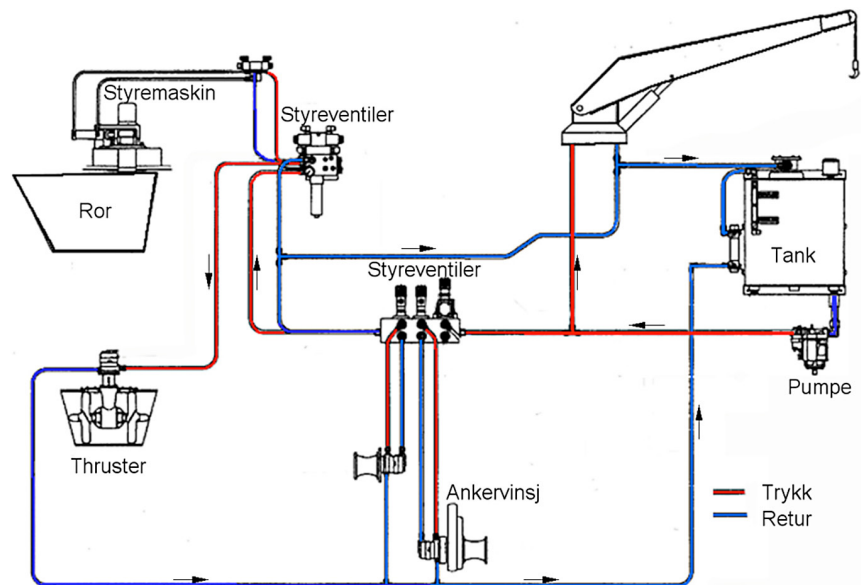
Eksempel på et offshore fartøy der dekkmaskineri drives av hydraulikk.

Prinsipp for hydraulisk effektoverføring

Hydraulisk effektoverføring er basert på en veske 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.

Når vi kommer om bord i et skip finner vi at svært mange systemer drives av hydraulikk. Alt fra vinsjer og kraner til vindusviskere drives av hydrauliske motorer eller sylindere. Eksempelet på figuren under viser et fartøy som er utrustet for offshore arbeidsoperasjoner som involverer utsetting, løfting og sleping av ulike objekt både på overflaten og på havbunnen. Denne type fartøy er utrustet med et stort antall maskiner både på og under dekk som drives av hydraulisk energi.

Eksempel: I fysikken har vi lært at $Kraft = trykk \cdot areal$. Hvis vi har en sylinder med diameter 0,1 meter og et hydraulikktrykk på 15 MPa får vi en kraft:
 $F = 15 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \cdot \pi (0,1/2)^2 = 118 \text{ kN}$



Eksempel på et hydraulisk system om bord i et skip.

Hvorfor velger vi hydraulisk overføring?

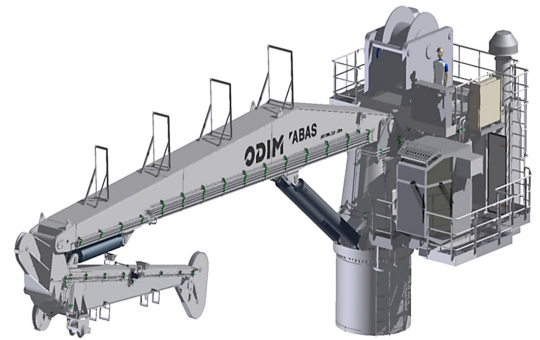
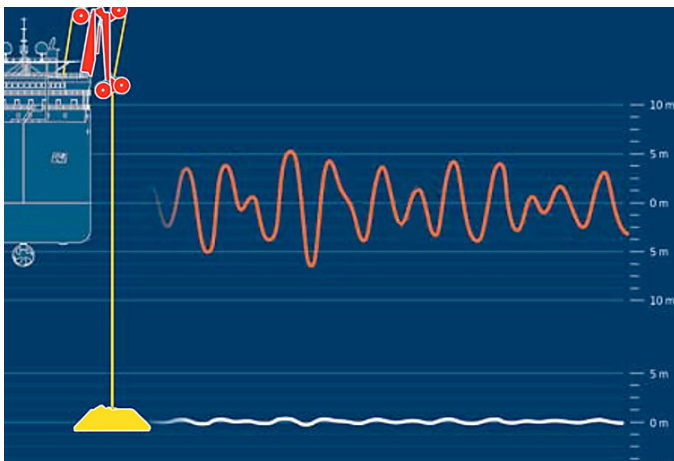
Hydraulisk overføring er svært sterk i forhold til størrelse på maskinene. I mange anvendelser er det nesten umulig å tenke seg løsninger basert på annen form for energioverføring på grunn av vekt og plass-behov. En av de viktigste egenskapene til hydraulisk overføring er evnen til høye statiske krefter. 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 driftstans 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 driftstans. Overbelastninger i hydrauliske systemer merkes knapt, fordi at 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 viktig 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 forurensning være problem.



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



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

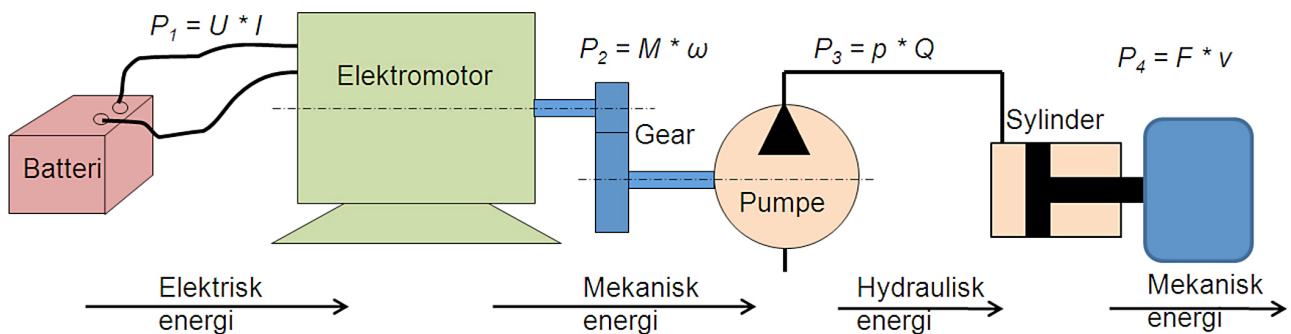
Sammenligning mellom ulike systemer

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]	ω [rad/s]	M · ω [W]
Hydraulisk	p [N/m ²]	Q [m ³ /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 (η). For hver omformer gjelder da: $\eta = P_{ut}/P_{inn}$

Eksempel:

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 230V og 75 Amp, mens vi løfter massen med en hastighet 0,3 m/sek.

Vi kan da beregne virkningsgraden til dette systemet:

Først finner vi tilført effekt:

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

Så finner vi avgitt effekt:

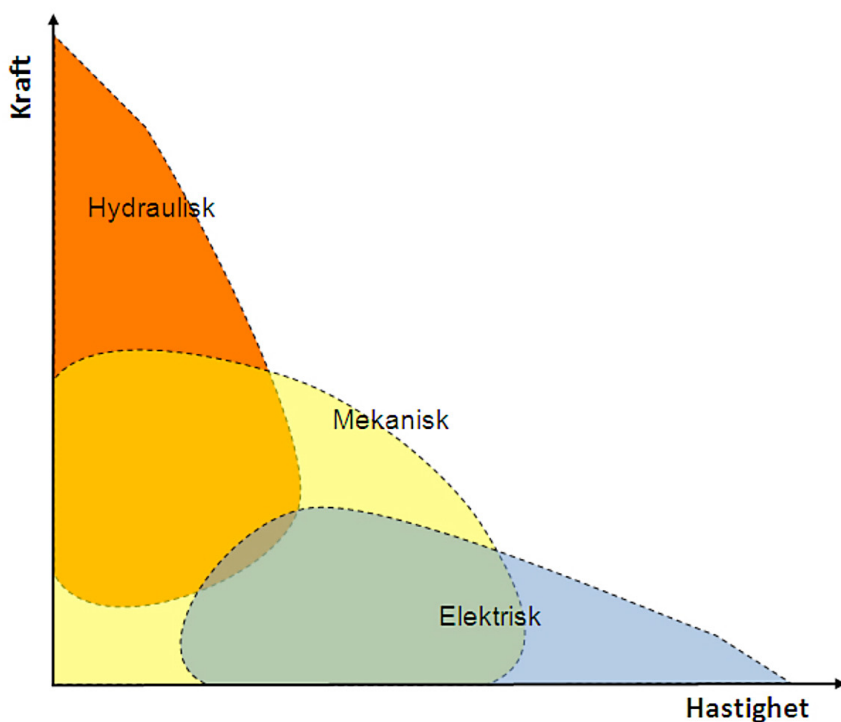
$$P_{ut} = F \cdot v = 5000 \cdot 9,81 \text{ N} \cdot 0,3 \text{ m/s} = 14715 \text{ W} = 14,7 \text{ kW}$$

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 eksempelet 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 når det skal gå hurtig med mindre krefter velger man gjerne elektrisk overføring. 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 mekanisk, hydraulisk og elektriske løsninger som er brukt.



Typisk sammenheng mellom krefter og hastigheter for effektoverføring



Vi undrer oss på:

Vi antar at tapet i eksemplet til venstre kan fordeles slik at 2/3 av effekten går tapt i friksjon i sylindere. Vi vet også at hydraulikkysylindere har en diameter på 6 cm. Hvordan kan vi beregne effektetapet i hver av komponentene, og trykket i hydraulikkørret?

Oppgaver

Oppgave 7.1

Det vises til figurer på side 6-27, som viser hvordan hydrokarboner er bygget opp. Atommasser for karbon og hydrogen er oppgitt (u). 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 (gassolje). Her bruker vi molekylet $C_{21}H_{44}$ som gjennomsnitt for de molekyltyper som den marine dieseloljen består av. Svar i masseprosent.

Oppgave 7.2

På side 6-34 har vi vist at forbrenning av en marin dieselolje gir et utslipp på 3,12 kg CO_2 pr kg brensel. Bestem utslippet av CO_2 pr kg brensel for:

- naturgass, som vi regner med består stort sett av metan
- Hvor mye større i prosent er utslippet av CO_2 pr. kg brensel ved forbrenning av marin dieselolje enn ved forbrenning av naturgass?

Oppgave 7.3

(fra kurs i 2009 for lærere fra vgs).

Beregninger av firetakts dieselmotor for framdrift av skip.

Oppgaven har to formål. For det første skal den vise at det egentlig er mulig å komme svært langt i slike beregninger ved anvendelse av stoff fra fysikken i videregående skole. For det andre skal den bidra pedagogisk til en god forståelse av virkemåten til en dieselmotor.

For en mellomhurtig dieselmotor med turtall 750 o/min gjelder følgende data:

Sylinderdiameter $D = 320$ mm
 Slaglengde $S = 400$ mm
 Nominell kompresjonsgrad: Epsilon = 17
 Trykk og temp. på syl.ladning ved kompr. begynnelse: $p_1 = 3,0$ bar overtr., $T_1 = 340$ K
 Luftfaktor under forbrenning: $\lambda = 2,4$

For brenslet gjelder følgende:

Nedre brennverdi $h_n = 42,7$ MJ/kg, teoretisk luftbehov $(L/B)_r = 14,4$ kg luft/kg brensel
 Basert på oppgitte data og erfaringsverdier for spes. brenselsforbruk og dermed eff. virkningsgrad, skal det beregnes:

- Luftmengde i syl. når kompr. begynner
- Tilført brenselmengde og tilført energi pr. arbeidsprosess
- Utført arbeid (W_e) og spes. arbeidsevne (w_e) pr. arbeidsprosess
- Dreiemoment (M_d) og effekt (P_e) på motorens utgående aksel

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

- Trykk, volum og temp. i tilstand 2, samt omsetning av arbeid og varme og forskjell i indre energi for tilstandsforandringen 1-2a. Det forutsettes at kompresjonen skjer polytropisk med en eksponent lik 1,35
- Tilsvarende beregninger for tilstand 3a og tilstandsforandringen 2-3a
- Tilsvarende beregninger for tilstand 3b og tilstandsforandringen 3a-3b
- Tilsvarende beregninger for tilstand 4 og tilstandsforandringen 3b-4. Det forutsettes at ekspansjonen foregår polytropisk med en eksponent lik 1,45
- Utført arbeid og bortført varmemengde for hele arbeidsprosessen
- Termisk virkningsgrad, effektiv virkningsgrad (forutsatt en mekanisk virkningsgrad lik 0,9) og spesifikt brenselsforbruk. Hvordan passer verdiene med resultatene fra c) og d)?
- Hvilke feilkilder har vi i beregningene ovenfor?

Oppgave 7.4

(fra kurs i 2009 for lærere i vgs)

Beregning av teoretisk luftforbruk for et dieselbrensel

Det vises til side 6-27, med figur av h-c molekylet $C_{13}H_{28}$ for en lett gassolje.

- Hvor store er andelene av karbon og

- hydrogen i det nevnte molekylet?
- b) Sett opp reaksjonsligningene for reaksjonene mellom oksygen og karbon og mellom oksygen og hydrogen
- c) Omform ligningene til kmol-basis og bestem hvor mange kg O₂ som kreves til forbrenning av 1 kg brensel. (1 kmol C-atomer=12 kg, 1 kmol H-atomer =1 kg og 1 kmol O₂-molekyler= 32 kg)
- d) Bestem deretter teoretisk luftforbruk i kg luft pr kg brensel.

Oppgave 7.5
(fra kurs i 2009 for lærere i vgs)

Integralregning og potensregning.

Vi skal se på et par eksempler på anvendelse matematikkpensumet i vgs

- a) Beregning av omsatt arbeid under adiabatisk og polytropisk tilstandsforandring. Det vises til figuren øverst på side 6-7. Vi skjønner at utført arbeid under for eksempel en ekspansjon kan skrives slik:

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

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

$$W_e = (p_4 \cdot V_4 - p_3 \cdot V_3) / (k - 1)$$

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 k erstattes med n.

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

$$p \cdot V^k = \text{konst}$$

for adiabatisk kompresjon også kan skrives slik:

$$p \cdot T^{k-1} = \text{konstant}$$

Oppgave 7.6
(fra kurs i 2009 for lærere fra vgs)

Effektiv virkningsgrad for en motor

- a) Utled ligningen:

$$\eta_{\text{eff}} = 1 / (b_e \cdot h_n)$$

Her er:

b_e=spesifikt brenselsforbruk [kg/kWh]

h_n=brenslets brennverdi [kWh/kg]

- b) Den beste virkningsgraden som er oppnådd i en dieselmotor er ca 0,55. Beregn motorens spesifikke brenselsforbruk.

Brenslets brennverdi settes lik 42,7 MJ/kg

- c) En typisk ottomotor for bildrift har et brenselsforbruk på ca 300 g/kWh når bilen kjøres i ca 80 km/h. Hvor stor er da motorens effektive virkningsgrad? Brennverdi for bensin settes lik 41 MJ/kg.

Oppgave 7.7

Ta for deg sykkelen din og identifiser ulike transmisjonselementer. Hvor mange akslinger, koplinglelementer, 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 bergne hvor store krefter og momenter noen av disse overfører?

Oppgave 7.8

Du har en hydraulisk jekk som består av en liten pumpesyylinder med diameter 1 cm og en løftesyylinder på 10 cm diameter som er komplet sammen med et rør. Du trykker på pumpesyylinderen med en kraft på 200N. Hvor stor masse kan du da løfte med løftesyylinderen, og hvor stort blir hydraulikktrykket?

