

General Electric LM2500 Gas Turbine

Utviklingsstatus og trender for gassmotorer og turbiner

ved

Høgskolelektor siv ing Lars M Nerheim

Høgskolen i Bergen / HiB



”Utviklingsstatus og trender for gassmotorer og turbiner”

Hensikt: *Gi en oppdatering på teknologisk nivå og egenskaper ved dagens gassmotorer og turbiner for stasjonære og marine anvendelser*

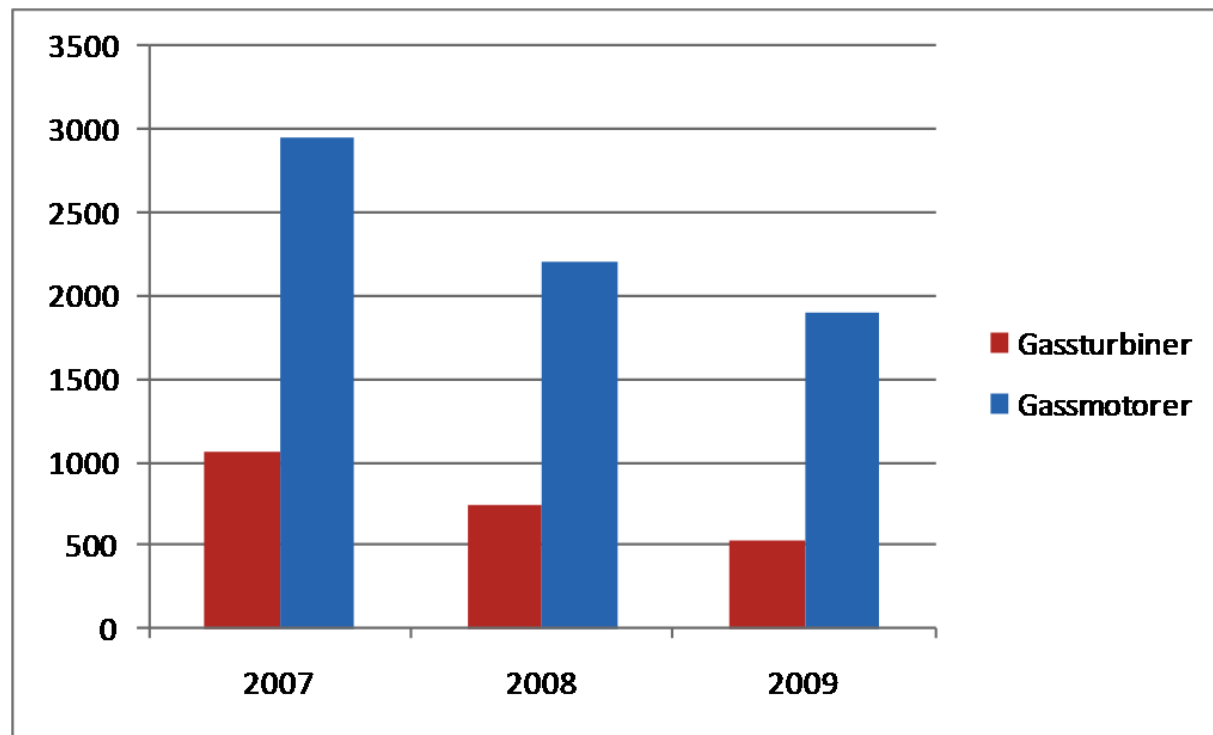
Innhold:

- 1. Innledning**
- 2. Aktuelle gasstyper**
- 3. Avgassutslipp fra gassdrevet maskineri**
- 4. Gassmotorteknologi**
- 5. Gassturbiner**
- 6. Oppsummering**

1. Innledning

- ❑ **Gassmotorer og turbiner** er kompliserte og kostbare maskiner som bygges for verdensmarkedet i relativt begrenset antall; - spesifikasjoner og egenskaper er derfor oftest standardiserte og generelle for å passe best mulig i alle markeder.
- ❑ Tradisjonelt er det overordnede faktorer som *verdensøkonomien*, *miljølovgivningen* og *energisituasjonen* som er de største pådriverne og premiss-setterne for den teknologiske utviklingen av disse maskinene, og da ofte i skiftende rekkefølge.
- ❑ Gassmotorer og turbiner har tradisjonelt vært mest brukt til stasjonære formål (kraft- og varmeproduksjon), men vinner nå mer og mer innpass også for *marine anvendelser*; -og på dette området er Norge med på å påvirke spesielt anvendelsesteknologien.
- ❑ De siste årene har vært preget av kraftig økonomisk stagnasjon og tilbakegang i store deler av verden, noe som har ført til at fokus innen gassmotor- og –turbinutviklingen først og fremst har vært på kostnadseffektivisering (pris pr kW) mer enn på de andre faktorene.

Salgstall for Gassmotorer og –turbiner de seneste årene (alle typer, tall fra D& GT International)



2. Aktuelle gasstyper:

Pris, tilgjengelighet og energitetthet er de viktigste faktorene for drivstoffet til gassmotorer og –turbiner. I nyere tid har *hensynet til klimaeffekten* også blitt et stadig viktigere argument.

Derfor er *naturgass og (anriket) biogass* de mest aktuelle gassdrivstoffene, mens *LPG* (propan) som et biprodukt fra oljeindustrien bare har begerenset betydning.

Hydrogen vil nok fortsatt forbli lite brukt til forbrenningsmaskiner, da den egner seg bedre for andre typer energiproduserende innretninger, - om den skulle komme til anvendelse i særlig stor skala.

Denne presentasjonen vil derfor ta utgangspunkt i naturgass (dvs CNG, LNG), og det aller meste som sies om den vil også være relevant for biogasser, spesielt i anriket form.

3. Avgassutslipp fra gassdrevet maskineri:

Ved utviklingen av gassmotorer og –turbiner er fokus først og fremst rettet mot **reduksjon av de giftige utslippene som NO_x, CO og UHC**, da disse kan påvirkes gjennom forbrenningsprosessen i maskinen; -selv om dette ofte er komplisert og kostbart å gjøre noe med....

Derimot når det gjelder **klimagasser, og da spesielt CO₂ –utslippet**, kan dette for en gitt drivstofftype ikke påvirkes på annen måte enn gjennom forbedret virkningsgrad, dvs redusert brennstofforbruk.

Dette har som kjent alltid vært og vil være et av de viktigste konkurranseargumentene maskinprodusentene i mellom.

Man kan altså hevde at når brennstofftypen er spesifisert, så vil som oftest konkurransesituasjonen sørge for at CO₂-utslippet blir lavest mulig ved de gitte forutsetningene.

(CO₂-fangst er maskin-ekstern teknologi....)

Naturgass vs Diesellolje og Bensin:

- Naturgass har spesielt gode forutsetninger for ren og fullstendig forbrenning, idet den ikke danner sot og partikler og ikke inneholder svovel i målbar grad (dvs SO_x, PM).
- Hovedbestanddelen i naturgass er *metan* som også kan produseres biologisk fra bærekraftige prosesser.
En sammenligning mot andre drivstoffer viser bl a følgende:

	Diesellolje	Bensin	Naturgass
Brennverdi (MJ / kg)	42.7	41.7	49
Svovelinhold (%)	0.05	~0	0
Karboninnhold (vekt-%)	84 - 86	85	77
CO ₂ (g / MJ)	74	76	57
Oktantall		95	~ 140



4. Dagens gassmotorteknologi

- ❑ Da gass som drivstoff har problematiske selvtenningsegenskaper egner den seg derfor klart best i "Otto-motorer", dvs motorer med fremmedtenning (-plugg) og hvor gass og luft er blandet på forhånd.

- ❑ Ut fra tennings- og forbrenningsprinsippene finner vi følgende hovedtyper av gassmotorer på markedet i dag:
 - *Ottomotorer med høyt luftoverskudd* under forbrenningen, enten som "SI Lean Burn" med plugg- eller forkammertenning eller med Diesel-tenning ("mikro-pilot" / MP, eller "Dual Fuel" / DF)

 - *Dieselmotorer med høytrykk gassinnblåsning* ("HP DF"-motorer). Dette er mest aktuelt for saktegående 2-T motorer.

 - *Ottomotorer med forbrenning uten luftoverskudd og med EGR* (EksosGassResirkulering) til NOx-kontroll, såkalte "λ 1 EGR – motorer". Disse er mest brukt i kjøretøy.

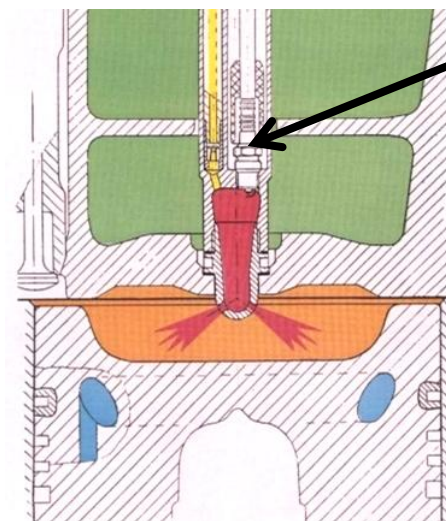
Lean burn SI motorer:

Fordeler:

- God virkningsgrad (= lav CO₂)
- Lavt NO_x - utslipp
- Robust, med lang komponent-levetid (= lav driftskostnad)

Svakheter:

- Kan ha redusert transient respons (avhengig av reguleringsystemet)
- 10 – 20% lavere spesifikk ytelse enn Dieselmotorer
- Redundans en utfordring (til skipsbruk)



Tennplugg i
forkammer

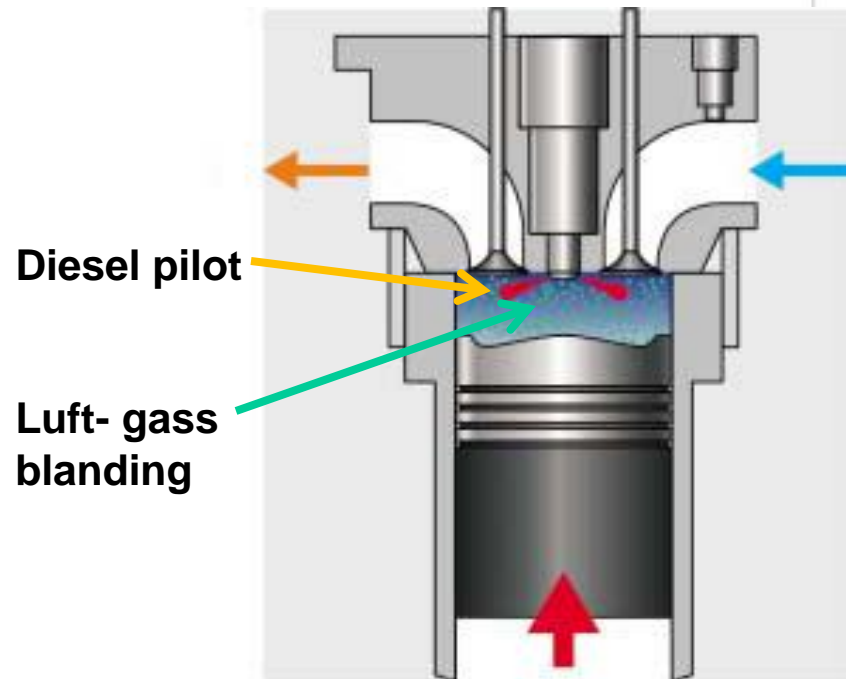
“Duel Fuel” diesel-gass motorer:

Fordeler:

- God virkningsgrad (= lav CO₂)
- Høy spesifikk ytelse
- God redundans

Svakheter:

- Setter større krav til gasskvaliteten enn andre gassmotorer
- Problematisk regulering på lav- og del-belastning kan gi respons- og utslippsproblemer (UHC).
- Kostbare systemløsninger på motor og i anlegget, med to brennstoffsystemer



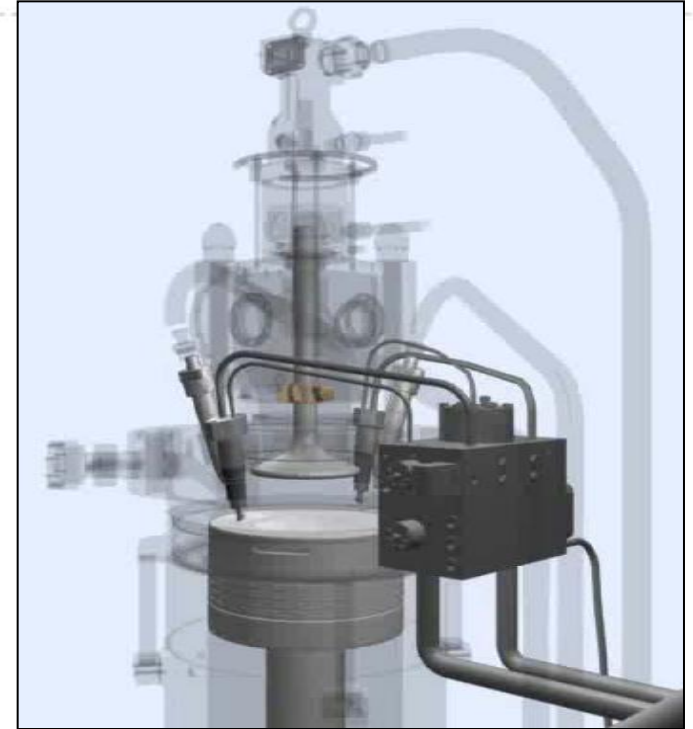
Dieselmotor med gass høytrykksinnblåsning:

Fordele:

- God virkningsgrad (= lav CO₂)
- God redundans
- Fleksibel mht gasskvalitet

Svakheter:

- Høyt NO_x-utslipp krever katalysatorløsninger i tillegg (SCR)
- Kostbare og komplekse systemer, spesielt høytrykks-innblåsningen, og som kan gi redusert robusthet
- Kostnadseffektivitet for små og mellomstore anlegg uavklart ??



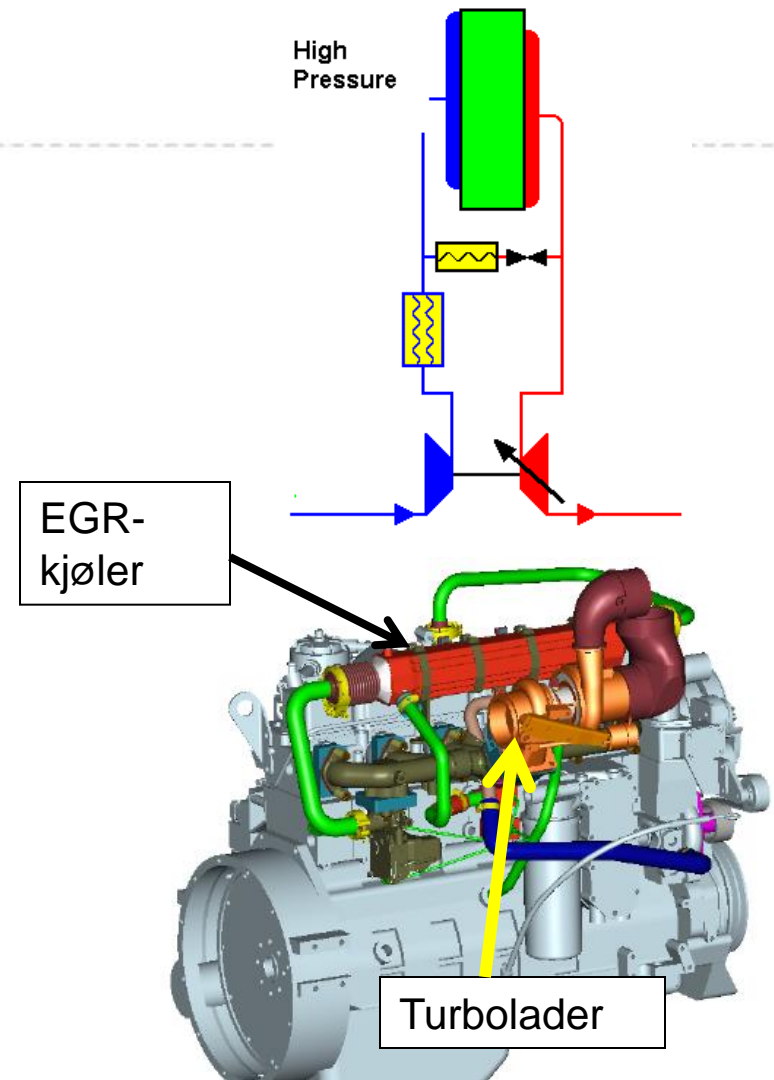
λ - 1 motorer med kjølt EGR:

Fordeler:

- Meget lave utslipp (NOx, UHC)
- God kjørbarhet

Svakheter:

- Moderat virkningsgrad
- Komplekse systemer pga EGR, og som kan gi redusert robusthet og begrensede komponentlevetider
- Kondens og tilskitningsproblemer kan gi driftsproblemer (spesielt om vinteren)



Om utvalget av gassmotorer:

Ytelser, virkningsgrader og utslipp

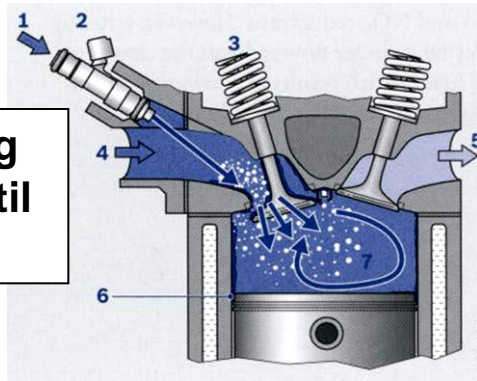
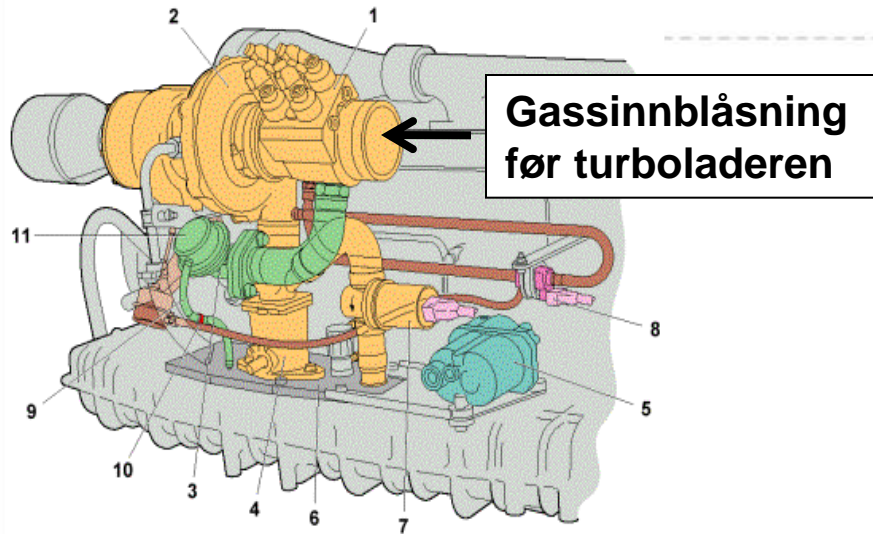
	Slow speed < 200 rpm	Medium speed 500 – 1000 rpm	High speed > 1200 rpm
Effektområde:	10 – 40+ MW	1 – 18 MW	0.25 – 3 MW
Motortyper:	HP DF	SI LB, DF, MP	SI LB,
Virkningsgrad: (CO ₂ -utslipp)	ca 50% (ca 430 g/kWh)	< 48% (ca 450 g/kWh)	< 44% (ca 490 g/kWh)
NO_x –utslipp:	Ca 10 g/kWh	ca 1 g / kWh	ca 0.7 g / kWh

Utviklingstrender for gassmotorer

Følgende hovedpunkter preger dagens utvikling:

- Høyere spesifikk ytelse gjennom modifisert termodynamisk syklus, “Miller Cycle”:** dette kan nødvendiggjøre høyere kompleksitet, slik som 2- trinns turbolading, variable ventiltider osv.
- Fokus på bedre dellast- og transientegenskaper, dvs mer avansert regulering:** Dette er en følge både av mer bruk av Miller Cycle og *krav fra nye anvendelser som f. eks til marint bruk, samkjøring mot vind- og bølgekraft osv*
- Mer fokus på reduksjon av uforbrent gass, UHC:** denne reduserer virkningsgraden og er noe alle motorbygere er opptatt av å gjøre noe med, men likevel kan dette være en uheldig bi-effekt ved noen motorkonsepter
- Forbedret katalysatorteknologi,** spesielt med tanke på reduksjon av metan- og formaldehyd utslipp

Ad: Gassmotorer og lastrespons:



Kanalinnblåsning
med en gassventil
pr sylinder

Problem:

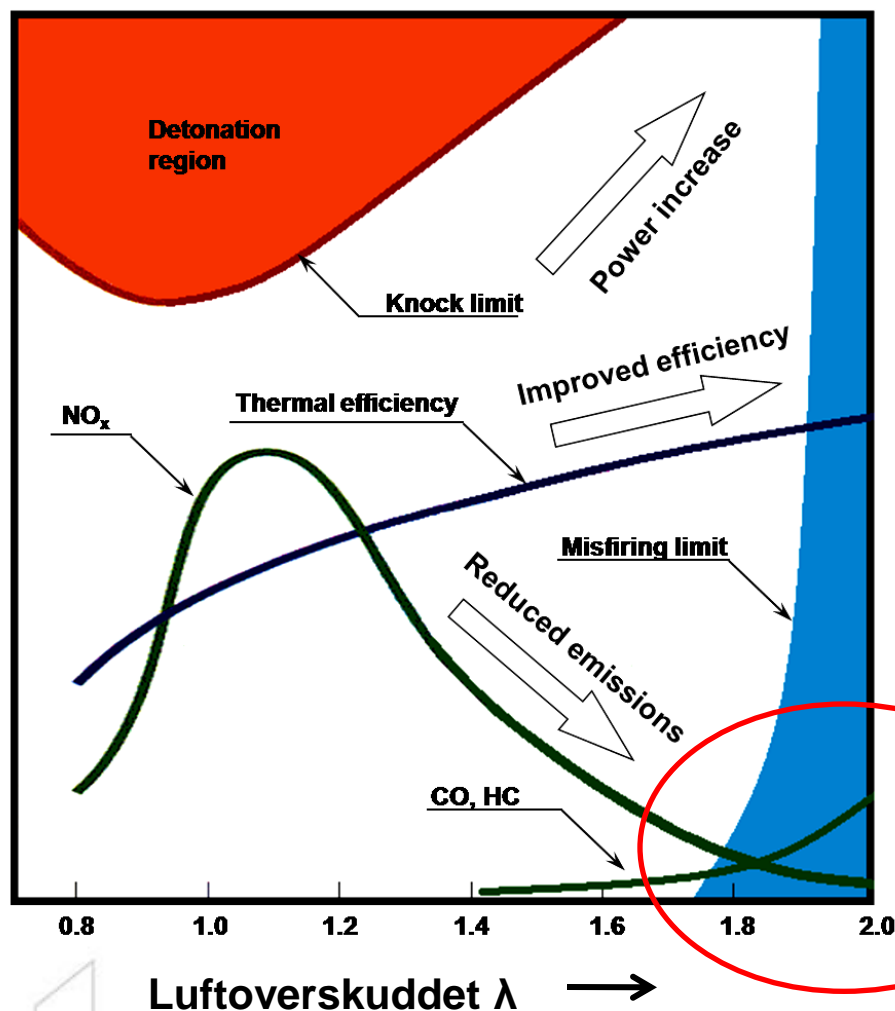
- På mange gassmotorer ligger gasstilførselen fysisk langt fra sylindere. Dette betyr i praksis betydelig tidsforsinkelse fra pådragsendring til motoren endrer ytelsen, dvs den blir "treg på gassen".

Løsning:

- Gasstilførsel i kanalene. Ved å tilføre gassen med separate ventiler i innsugningskanalene nær sylindere, blir tidsforsinkelsen minimal.

Det er også viktig med *rask regulering av lufttilførselen*, helst med ekstra spjeld.

Ad: UHC utslipp på delbelastning:



Problem:

- Otto gasmotorer med luftoverskudd (DF, Lean Burn osv) har ofte et problem ved at utslippet av uforbrent drivstoff øker ved del- og lavlast. Dette betyr i så fall redusert virkningsgrad og større klimautslipp.

Løsning:

- Optimalisert forbrenningsrom
- Mer avansert regulering
- Katalysator teknologi

Problemområde ved del- og lavlast

5. Gassturbiner

Hovedtyper og ytelsesområder:

- Tunge industrigassturbiner: ca 50 – 400MW
- Lette industrigassturbiner: ” 2 – 20 MW
- Modifiserte flyturbiner: ” 1 - 40 MW

Drivstoff:

- Naturgass med rel. vide toleranser, (dessuten flytende drivstoffer)

Anvendelsesområder:

- Strøm og varmeproduksjon (dominerende)
- Mekanisk drift av kompressorer og pumper i olje og gassindustrien
- Marin fremdrift (hurtiggående fartøy)

Gassturbinanlegg

Viktige fordeler:

- Meget kompakt og modulbasert oppbygging (dvs rask å installere!)
- Lave avgassutslipp av NO_x, CO og UHC
- Egner seg godt for varmegjenvinning
- Virkningsgraden kan økes gjennom ”kombinerte anlegg” (CCGT)

Noen begrensninger:

- Gassturbiner egner seg best til kontinuerlig drift på høy belastning, da delast-virkningsgraden faller sterkt av
- Gassturbiner har rel dårlig akselerasjonsevne (reguleringsevne)
- Gassturbiner er ømfintlige maskiner for ytre mek. påvirkninger og de krever veldig god luftfiltrering og rent brennstoff (erosjon på blader, avbrenning i brennkammer og ledeskovler)
- Gassturbiner er dyre maskiner i anskaffelse (€ / kW) sammenlignet med stempelmotorer

Typiske driftsdata for dagens gassturbiner:

- Virkningsgrad ("simple cycle"): 18 – 42% ($\text{CO}_2 = \text{ca } 520 - 1200 \text{ g/kWh}$)
"kombinererte anlegg" : < 60%
- Spes avgassmengde: 10 – 15 kg/kWh
- Avgasstemperatur: 500 – 580 °C
- NO_x – utslipp: 0.2 – 0.4 g/kWh
(uten katalysator)
- Nødvendig gasstrykk inn på brennkammeret: 15 – 30 bar
- Krav til gasskvaliteten: Små, bortsett fra ren, tørr og tilstrekkelig trykk, avhenging av brennverdien.
For avvikende brennverdier tilpasses brennerene.

Gassturbiner; - utviklingsretninger:

Hovedaktivitetene kan listes opp slik:

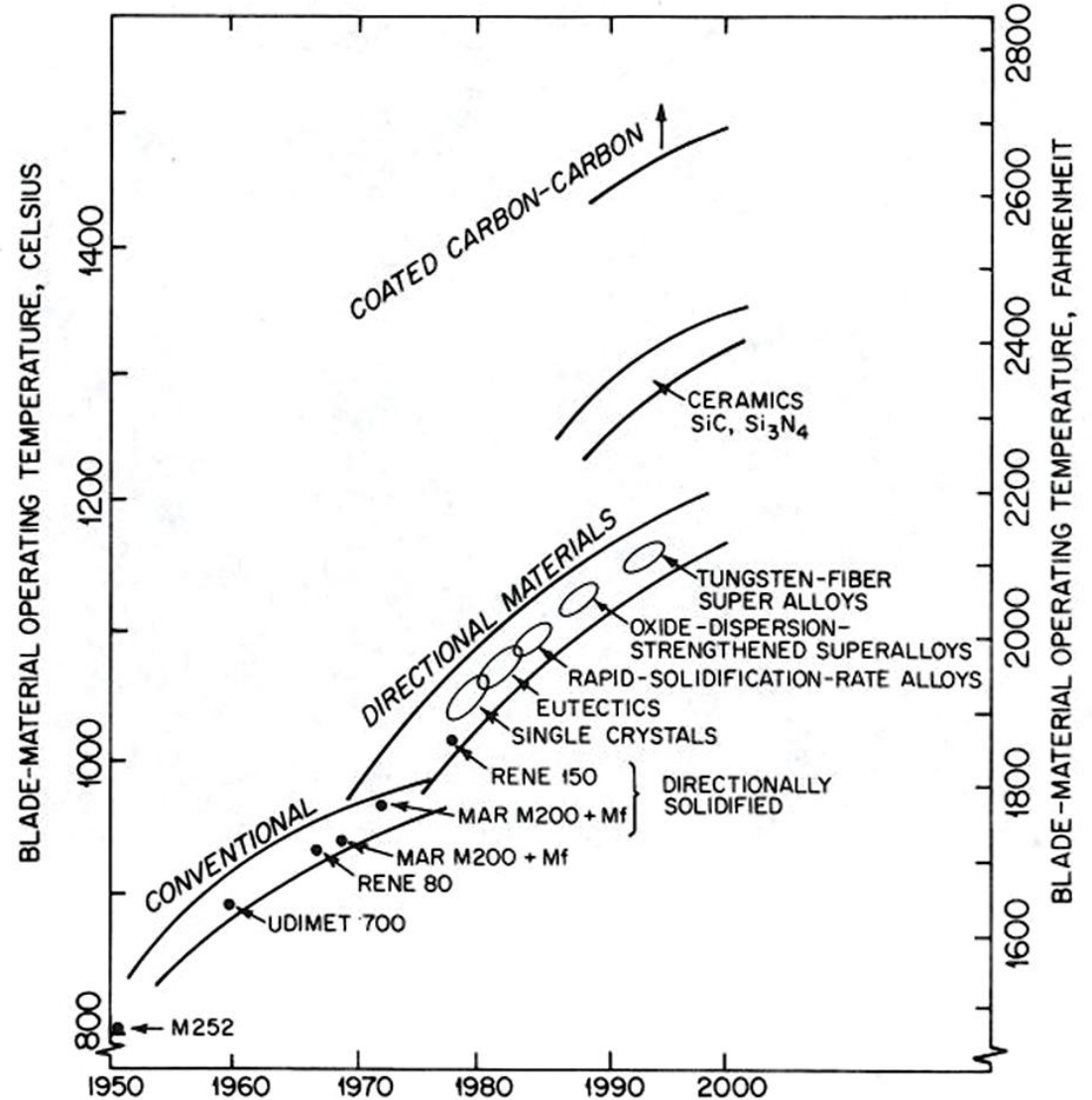
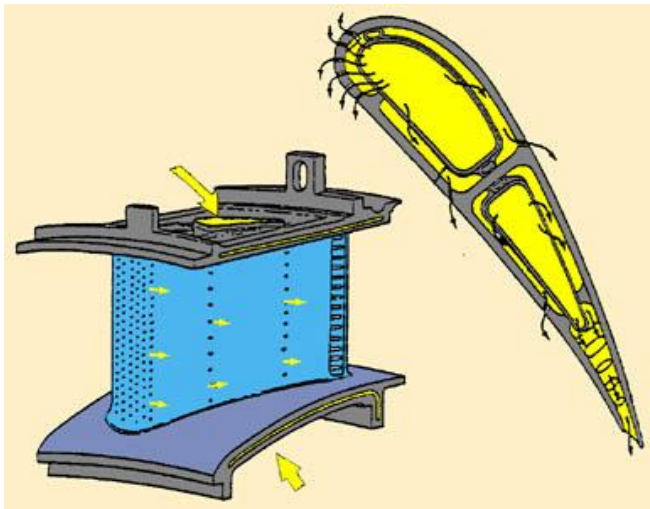
- **Aerodynamikk:** forbedringer gir økning av trykkforhold og kapasitet (= høyere ytelse), og variabel geometri bidrar til delast optimalisering
- **Materialteknologi:** nye legeringer i kombinasjon med forbedret innvendig kjøleteknologi øker turbin innløps-temperaturen og dermed virkningsgraden.
- **Forbrenning:** "Dry Low Emission, DLE, teknologi" gir redusert NO_x-dannelsen ved høye temperaturer. Katalytiske brennkammer under utvikling
- **Konsept / termodynamikk:** utvikling av mer *avanserte sykluser* gir forbedret driftsøkonomi (mellomkjøling, varmegjenvinning og variabel geometri)

Ad: Forbedret skovlekjøling og materialteknologi:

→ Virkningsgraden øker med høyere tillatt prosessstemperatur...

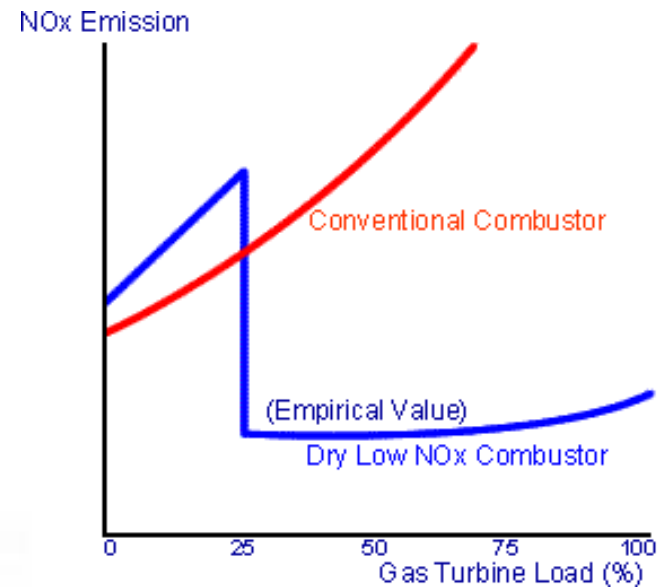
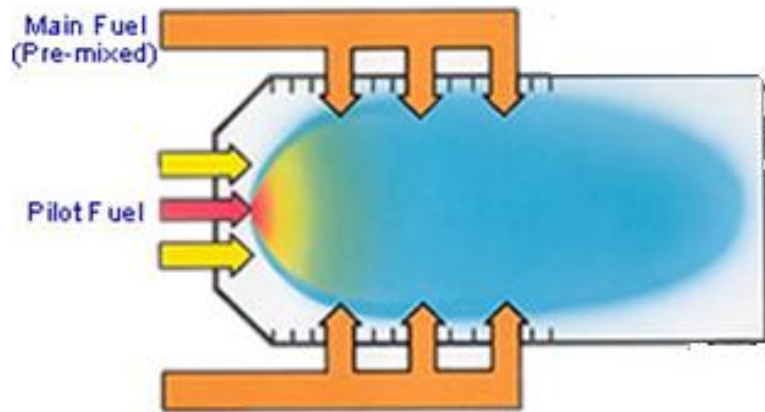
Utvikling av høgtemperatur skovlematerialer:

Avansert skovlekjøling:



Ad: Lav-NOx brennkammerteknologi

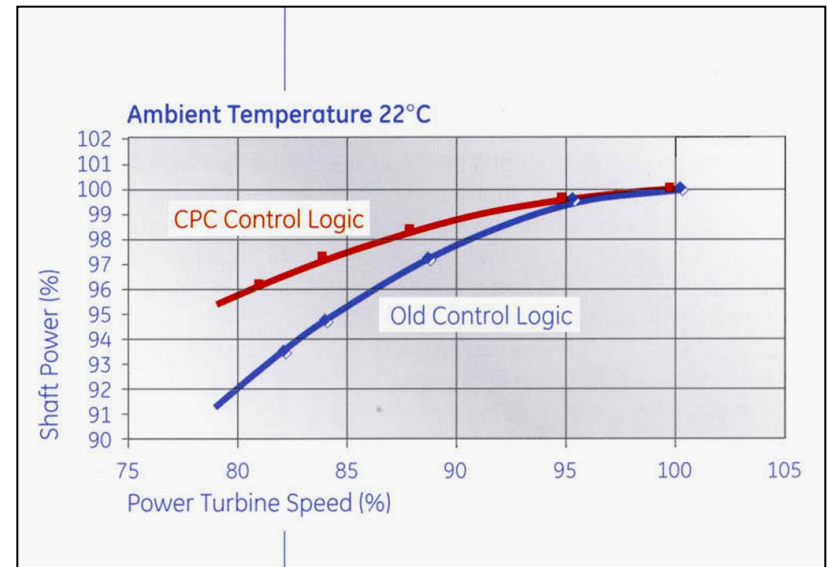
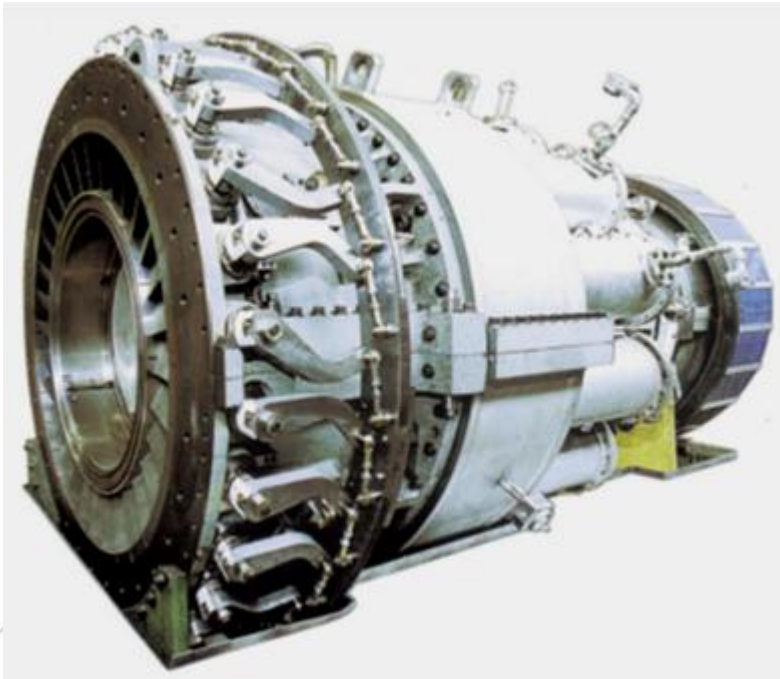
Eksempel: To-trinns Dry Low Emission, "DLE" brenner



Ad: Forbedret dellast virkningsgrad

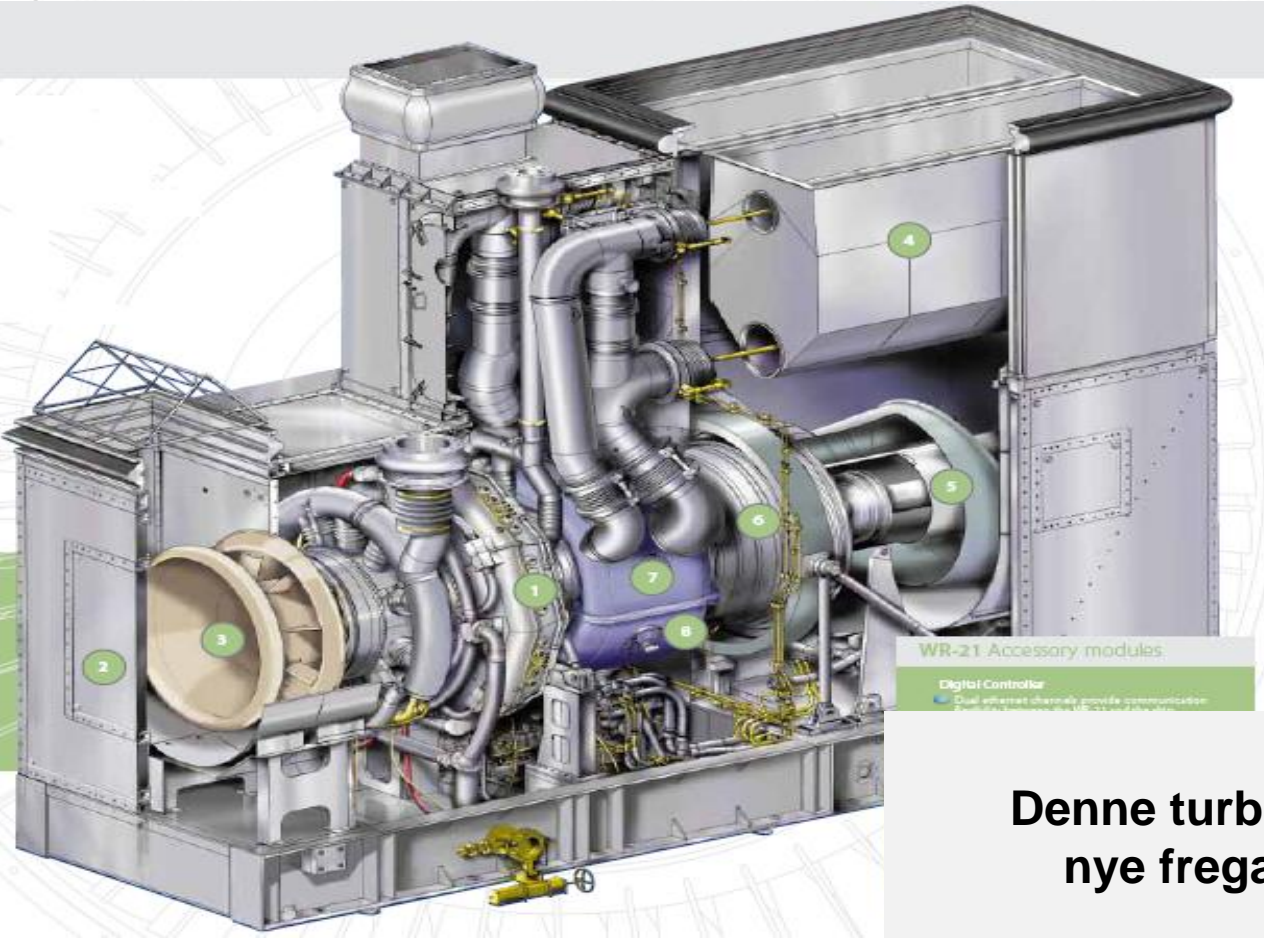
Kraftturbin med variable ledeskovler:

- Variable ledeskovler kan benyttes for å bedre tilpasse turbinkarakteristikken til endringer i gassmengde og dermed opprettholde ytelsen ("dellast optimalisering")



Ad: Videreutviklet termodynamisk konsept:

Gassturbin med *mellomkjøling* og *varmegjenvinning* (RR WR – 21)



Effekt:	25 MW
Virkningsgrad:	42%
Trykkforhold:	16.5
Avg temperatur:	582 / 355 grdC
Spes avg mengde:	10.6 kg/kWh
Vekt:	46 tonn

Denne turbin typen er i drift på de nye fregattene Type 45 i UK

6. Sammendrag

- Det finnes et stort utvalg av gassmotorer på markedet med et høyt teknologisk nivå og tilsvarende gode driftsdata. Markedet har falt kraftig de diste årene, så mye av utviklingsfokus for tiden er på prisreduksjon.
- Tradisjonelt har gassmotorer vært brukt til stasjonær kraftproduksjon, og konstruksjonene er preget av dette. Nye anvendelser som marin fremdrift, setter også andre krav til motorene som f. eks til transient respons, og som kundene må ta hensyn til ved motorvalget.
- Naturgass er det viktigste gassdrivstoffet, men gassmotorer egner seg også godt til drift f. eks. på biogass. I transportsektoren er LNG den mest attraktive løsningen, og som passer svært godt for de fleste gassmotorer.
- Begrensning av giftige utslipp har hovedfokus i motorutviklingen, fremfor alt NO_x, men da også uforbrent gass, UHC, kan være et problem for visse motortyper, får dette stadig mer oppmerksomhet, også hva gjelder katalysatorutvikling.
- Gassturbinene brukes nesten utelukkende til kraftproduksjon, og da spesielt for store effekter, eller hvor deres kompakthet er av stor betydning. Det finnes mange typer på markedet med svært ulike driftsdata.
- Gassturbiner er meget kostbare maskiner og virkningsgraden er begrenset, slik at det gjelder å oppnå høy driftstid på høyest mulig belastning, noe de er godt egnet til. Til gjengjeld er NO_x-utslippet lavt.
- Videreutviklingen omfatter de tradisjonelle disiplinene aerodynamikk, materialteknologi og nye brennkammer, men også mer fokus på kombinerte sykluser. Som for alle termiske maskiner gjelder at når virkningsgraden går opp, så øker også NO_x-utslippet og mye arbeid legges ned for å begrense dette.