



DANSK TEKNOLOGI FOR FULD UDBLÆSNING – DANMARKS BIDRAG TIL EUROPAS NYE RUMRAKET, ARIANE 6

Thomas Aa. Jensen, FORCE
Jonas B. Bjarnø, DTU Space



DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi

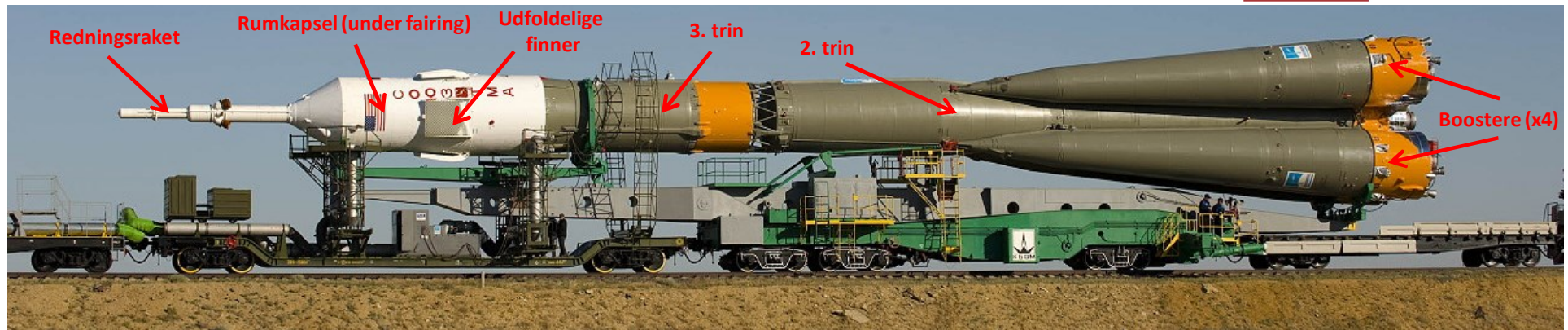
Præsentation



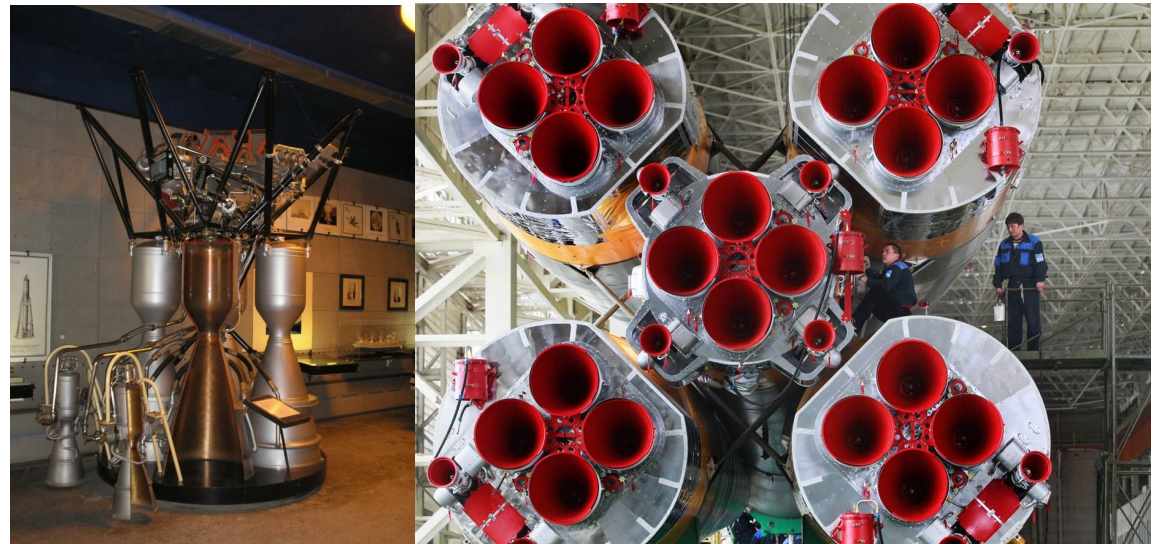
DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi

- Soyuz raketten
- Force og Ariane 5
- Hvordan virker en raketmotor
- Udvikling af udblæsningsdyser
- Ariane 6, Europas nye løfteraket

Soyuz raketten – Bemandet rumfarts arbejdshest

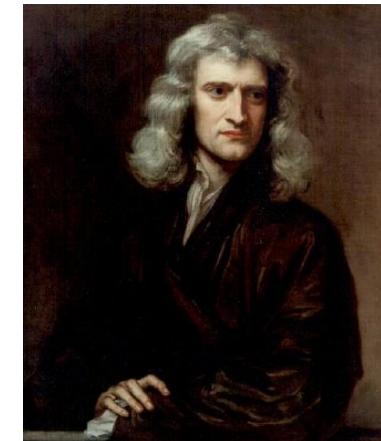
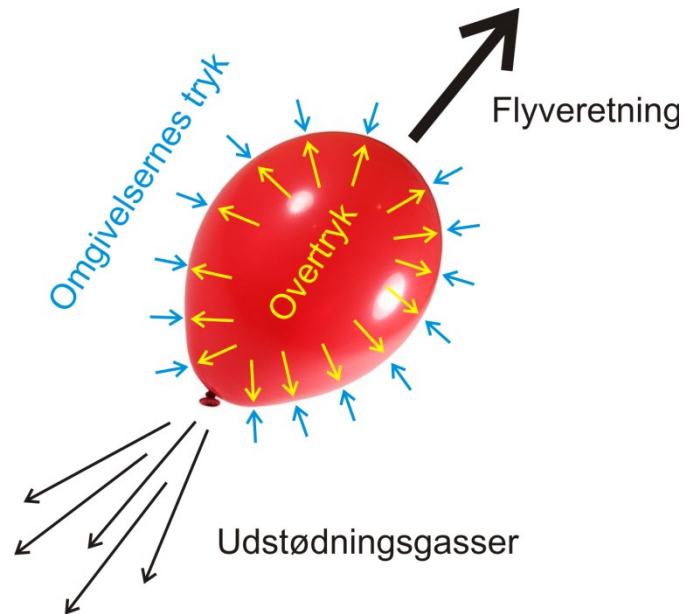


- Samlet længde: 49.5m
- Samlet masse ved start: 305 Ton
- Samlet trykkraft ved start: 422 Ton
- Brændstofforbrug ved start: 1.6 ton/s
- 3 (2½) trin med flydende ilt og petroleum
- Første opsendelse i 1966
- 1845 opsendelser til dato
- **Ved start kører hele 32 raketmotorer samtidig!**



En ekstrem maskine til en ekstrem opgave

Hvordan fungerer raketten så egentlig?



Isaac Newton (1642-1726)

Newtons 2. lov:

$$F = m \cdot a$$

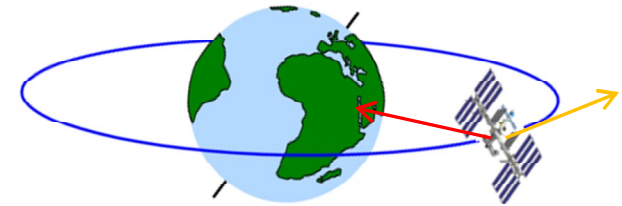
Newtons 3. lov:

Aktion = Reaktion

- For at løfte tunge raketter skal der altså leveres anseelig trykkraft for at overvinde både tyngdekraft og luftmodstand.
- **Men hvad skal der så til for at raketten kan nå i kredsløb, er det kun et spørgsmål om trykkraft?**

Nej ikke helt, det handler alt sammen om energi

- Det er ikke nok at opnå hverken hastighed eller højde alene, såfremt man vil i kredsløb. Man skal bruge begge dele samtidig.
- Kredsløb om Jorden opnås ved at balancere tyngdekraften imod centripetalkraften udenfor den tætte del af Jordens atmosfære (typisk >150km højde).
- I praksis betyder det at man skal op på godt 27600km/t eller 7.7km/s i 400km's højde, hvilket svarer til en tur rundt om Jorden hvert 93. minut.
- For at nå ISS' 400km cirkulære bane fra jordoverfladen kræver det tilførsel af ikke mindre end **47 Megajoule/kg** at opnå denne balance.



Energiske Andreas

- At få Andreas i kredsløb kræver altså at vi tilfører ham energi:
 - Andreas i rumdragt ca. 100 kg $\approx$ 4.7 Gigajoule
 - Souyz rumskibet ca. 7150kg $\approx$ 338 Gigajoule
- Indenfor rumfart generelt er vægt altafgørende, da de disse store energiniveauer er svære at tilvejebringe på kontrolleret vis.
- Indenfor bemandet rumfart hvor astronauter også skal hjem igen, er det tillige nødvendigt at kunne fjerne energien igen på en sikker måde.
- Så hvordan får vi 4.7GJ ind i Andreas og hvor meget energi er det egentlig?
 - 1gram vand opvarmet 1°C = 4.18 Joule



Andreas + Energikilde = Kredsløb

- Med 27940 kilojoule/kg er smør en rimeligt energirig fødevare, men at bede Andreas spise 169kg har næppe den ønskede effekt. Vi skal have ham op i fart!
- Formel 1 racer – 375km/t, 0km højde
 - 542 kilojoule $\approx 0.01\%$ af 4.7GJ
- Concorde – 2170km/t, 12km højde
 - 29900 kilojoule $\approx 0.6\%$ af 4.7GJ
- Der skal mange mange flere kræfter til, og ikke mindst kræfter som også virker udenfor Jordens atmosfære... Altså raketmotorer!



Om FORCE Technology



DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi

FORCE Technology er:

En teknologisk rådgivnings- og servicevirksomhed på det internationale marked.

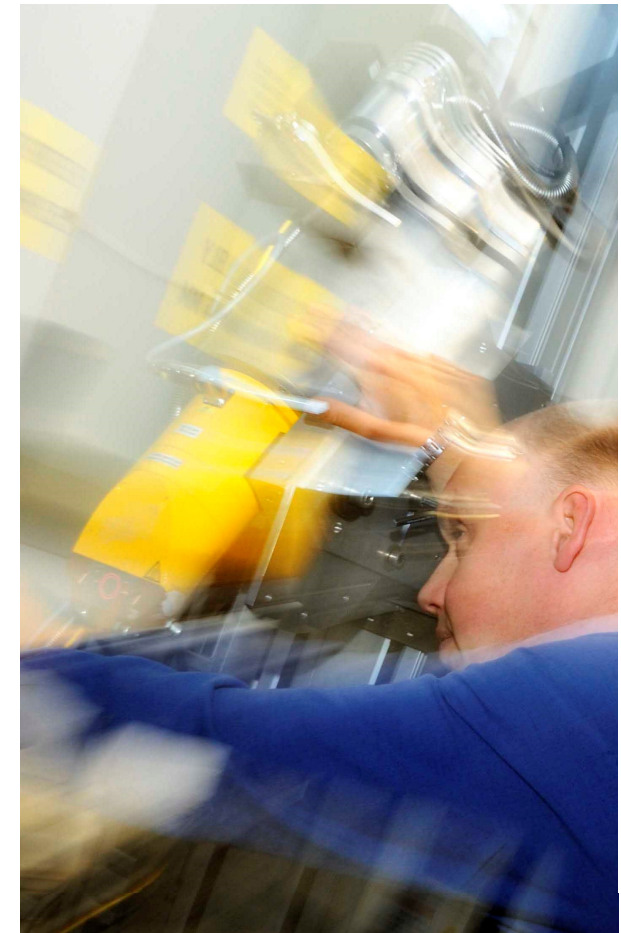
Vi omsætter højt specialiseret ingeniørmæssig viden til praktiske og værdiskabende løsninger for et bredt udsnit af brancher og industrier.

Force Technology omsætter for 1.300 MDKK og har 1.400 ansatte fordelt i 6 lande.

Vore kompetencer er indenfor procesudvikling, automatisering, materialer, prøvning, sensorer, hydro- og aero simulering, energi og miljø

En GTS-virksomhed

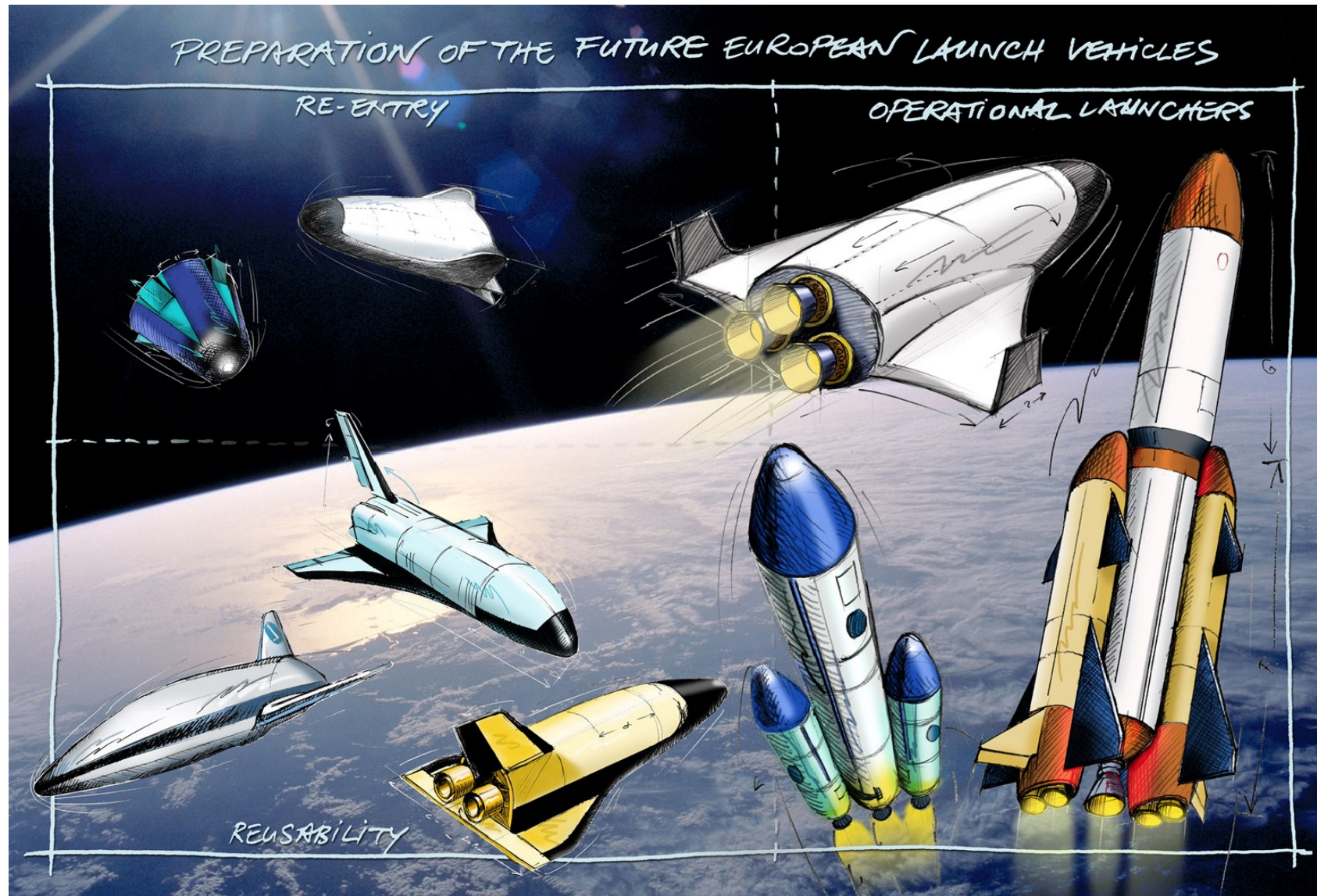
Som GTS-virksomhed er vi dedikeret til at udvikle og anvende nye teknologier og ny viden til gavn for de danske virksomheder og det danske samfund.



GODKENDT
TEKNOLOGISK SERVICE

forcetechnology.com

ESA – Fremtidens raketter



Rumfartsaktiviteter

Rumfartsprogrammer ledes typisk af internationale konsortier med højt specialiserede partnere.

Force's niche er høj teknisk kompetence i avancerede produktionsteknologier;

Sensorer, lasersvejsning, robotter, automatiseret inspektion og system integration.

Force's historie,

- Levering af NDT system til rumfærgen, Nasa
- Udvikling af dyse til 2-trins motor, RL60, Nasa
- Udvikling af dyse til hovedmotoren på Ariane 5ME, ESA
- Kontrol af brændstoftanke på 2-trins motor, Vega, ESA
- Udvikling af dyse til ny raketmotor ETID, ESA



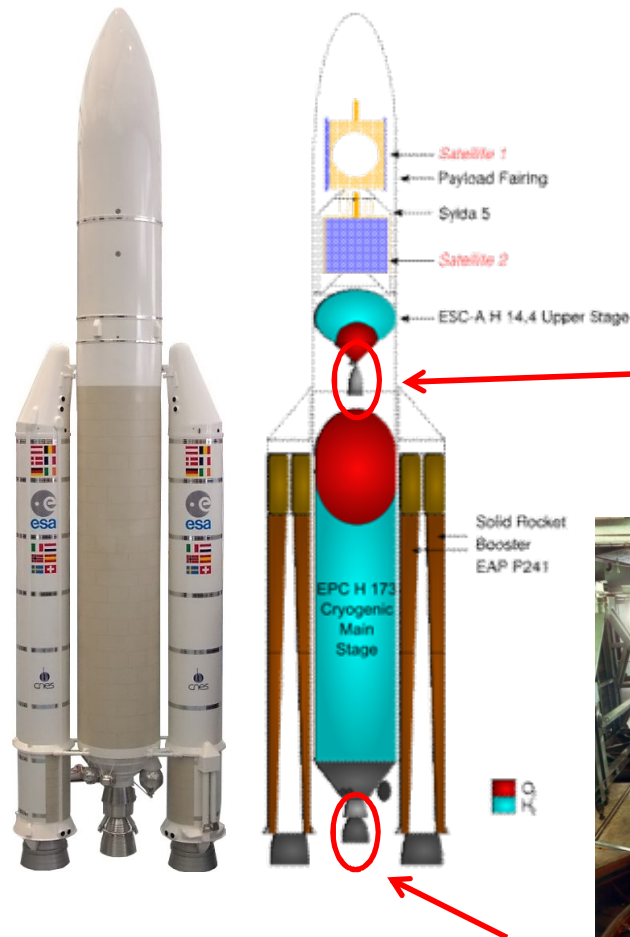
Ariane 5, Europas store løfteraket

- Højde: 46-52 m
- Start vægt: 780 ton
- Last kapacitet: 10-20 ton
- Motorer: 3 til 1-trin og 1 til 2-trin
- Motorkraft 1.500 ton
- 2 faststof raketter 2 minutter
 - 1 hovedmotor 10 minutter



Mest motorer og brændstof

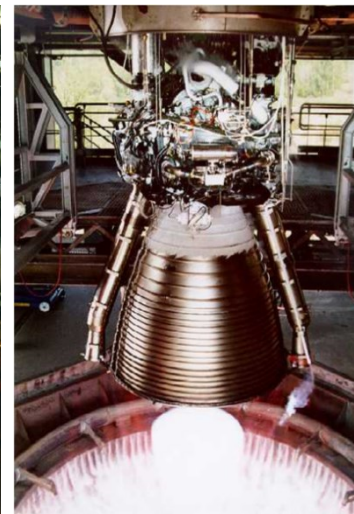
Ariane 5 ECA



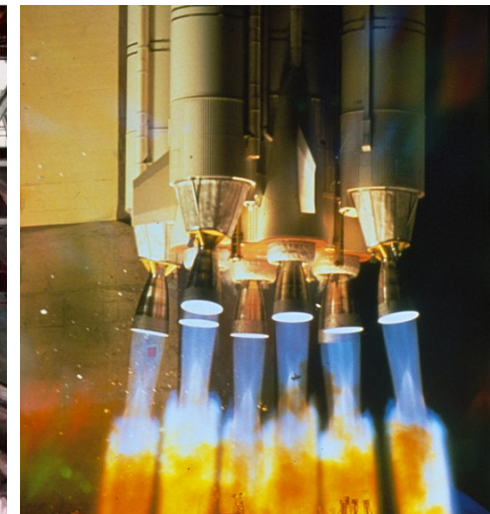
Vinci



Vulcain 2



Vulcain 1



Viking 4,5 & 6 (Ariane 1-4)

Hovedmotoren Vulcain 2/2+

Vulcain 2 - dyse

Dimensioner:	ø2.1 m x 2.3 m
Vægt:	400 kg
Motorkraft:	150 ton
Brændstof forbrug:	250 kg/s, flyd. brint og ilt
Flamme temp.:	3500 °C
Udstødningshast.:	4000 m/sec
Kølemiddel:	Flydende brint, -250°C
Motor levetid:	10 min.

Krav til design

Lav vægt, ingen deformation under ekstrem belastning,
høje temperaturer og temperatur gradienter

- og aktiv køling ...!



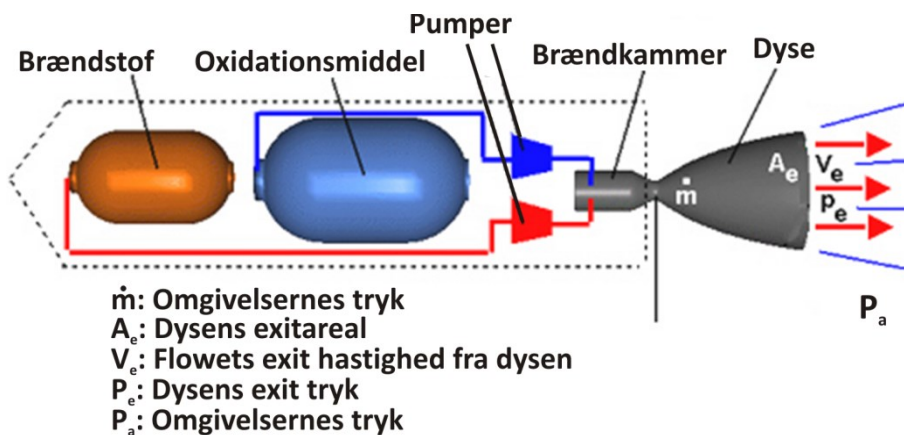
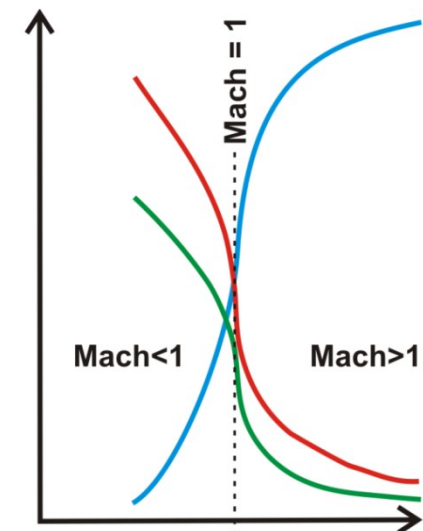
Hvordan virker en raketmotor

– I teorien

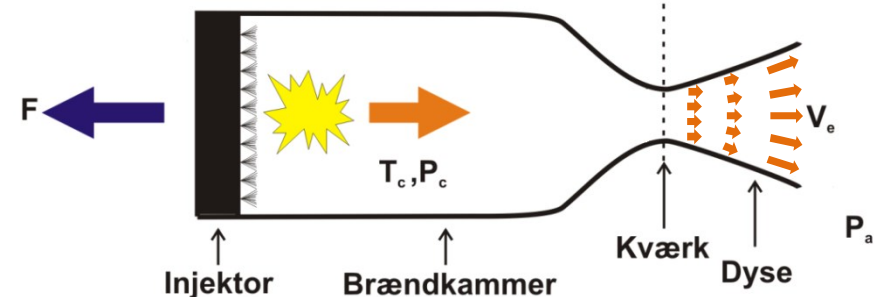
- Raketmotoren producerer trykkraft ved at accelerere og udstøde forbrændingsprodukter med høje hastigheder – Newtons 2. og 3. lov.
- Brændstof og oxidationsmiddel sammenbringes i brændkammeret og antændes.
- Forbrændingsprodukterne passerer ned igennem kværken og i dysen ekspanderer de varme gasser med hastighedstilvækst og afkøling til følge.
- Transporten af de varme gasser (typisk $> 3500^{\circ}\text{C}$) ned igennem motoren afsætter voldsomme energimængder i i brændkammervæg og dyse som skal fjernes ved køling for at undgå at motoren beskadiges.

Flowkarakteristika i dyse:

— Temperatur
— Tryk
— Hastighed



$$\text{Trykkraft} = F = \dot{m} \cdot V_e + (P_e - P_a) \cdot A_e$$



Brændstoftyper

- Brændstoftypenes fysiske egenskaber er vidt forskellige, og netop derfor finder de anvendelse i forskellige situationer.

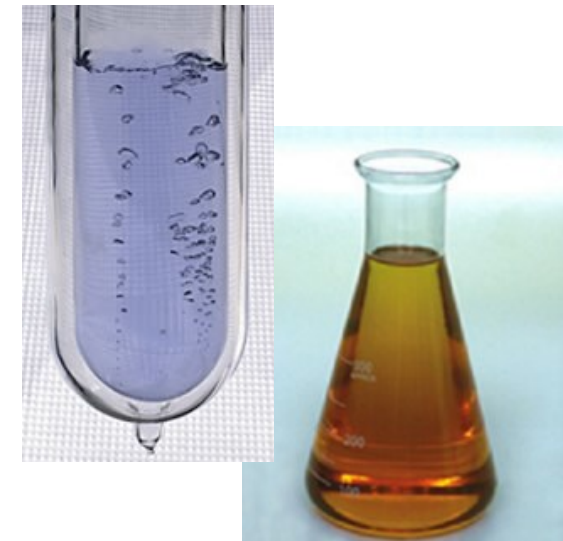
Faste



Hybrider



Flydende



Typ. Spec. Impuls (@69 Bar kammertryk, havniveau):

1670 – 2450 N·s/kg

Amm. Perklorat + Aluminium + Epoxy

Kaliumklorat + Asfalt

2250 – 2650 N·s/kg

Lattergas + Gummi

Flydende ilt + plastic

1600 – 3780 N·s/kg

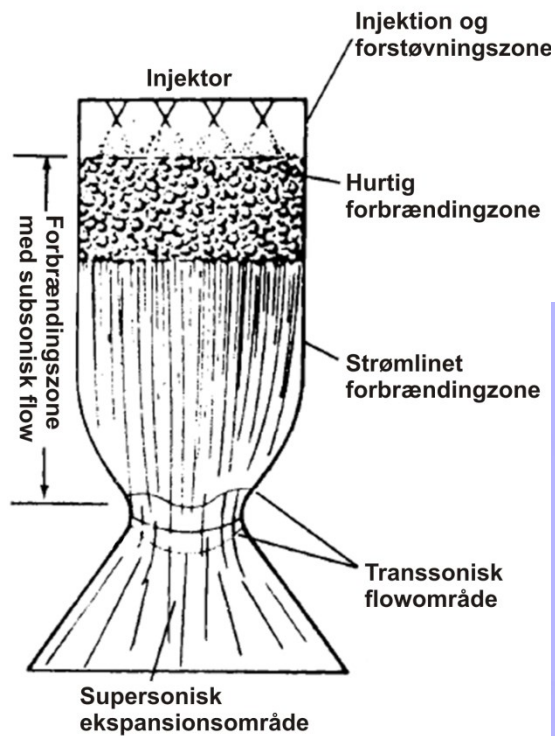
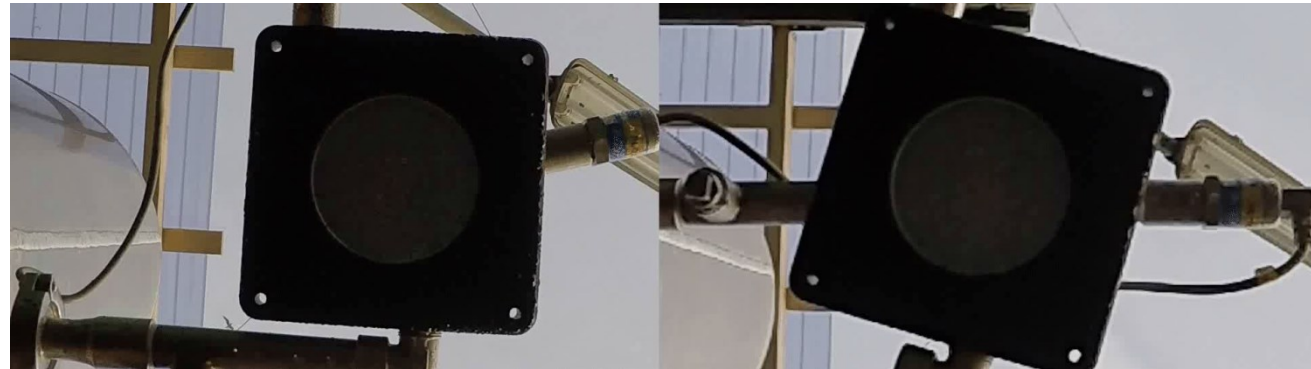
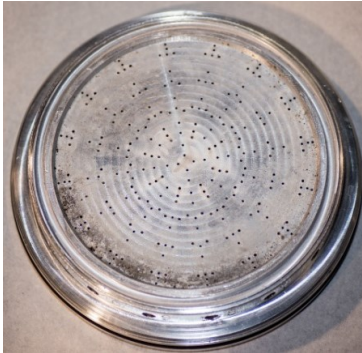
Flydende ilt + Petroleum/Brint

Salpetersyre + Hydrazin

- Forbrændingseffektiviteten angives ofte som specifik impuls, dvs. Den trykkraft en vis mængde brændstof kan generere per tidsenhed.
- **Det er altså ikke helt uvæsentligt hvad man hælder i tanken på sin raket.**

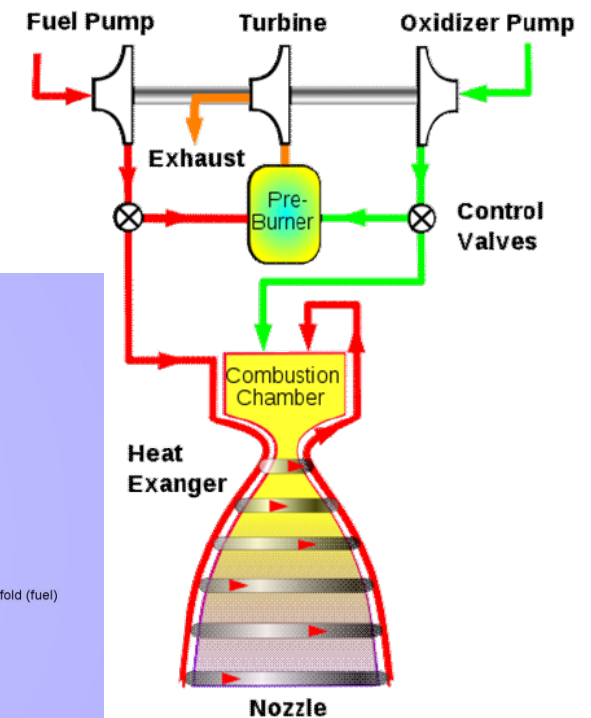
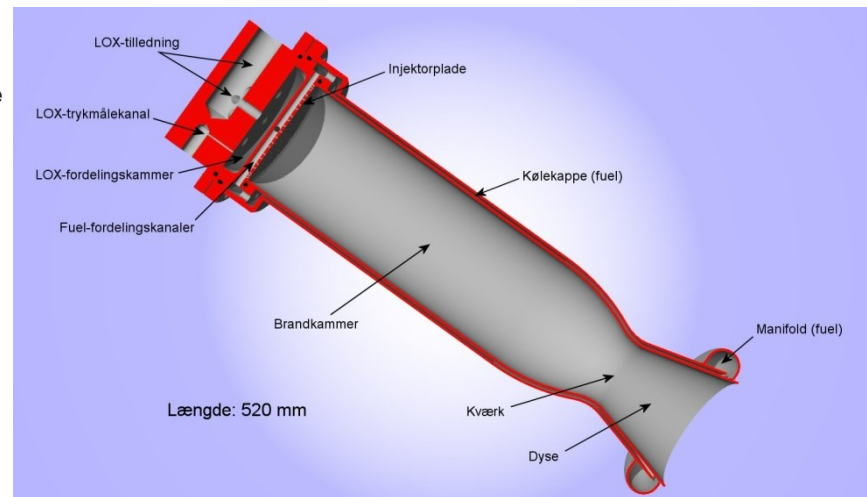
Hvordan virker en raketmotor

– I praksis



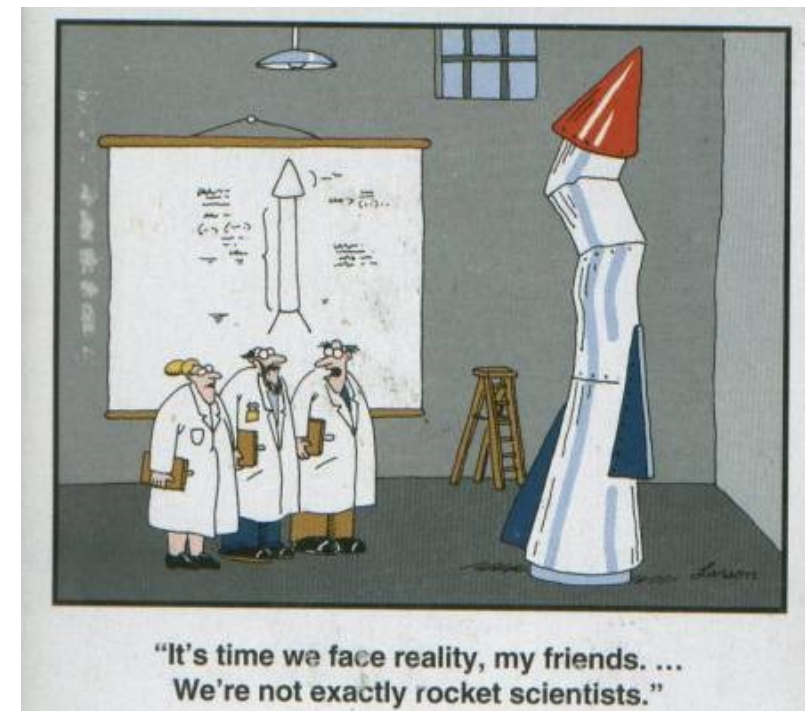
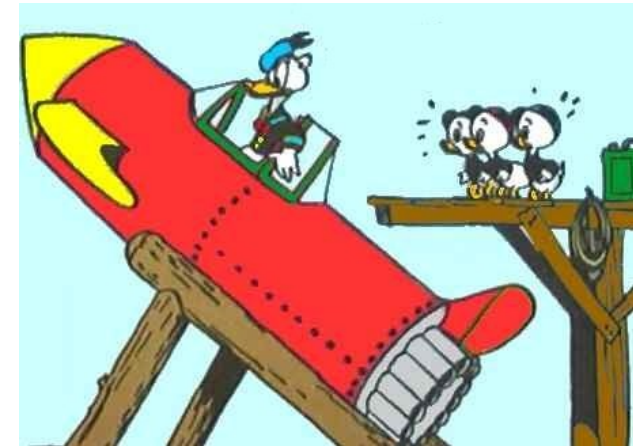
I praksis er injektoren den mest bestemmende komponent for en raketmotors effektivitet og stabilitet.

Dyse og turbopumper er tilsvarende de sværeste dele at fremstille.



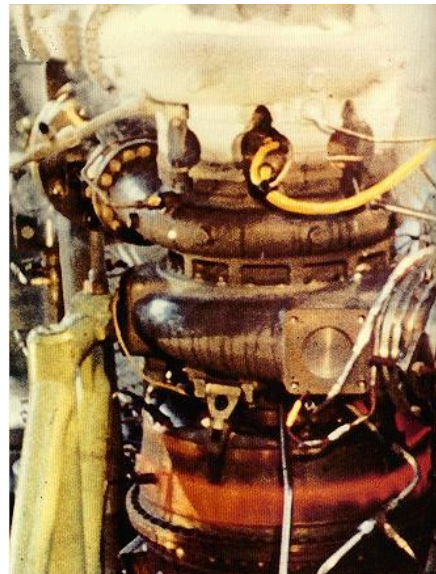
Raketmotorens største udfordringer

- En raketmotor baseret på flydende brændstof rummer en række mekaniske dele som opererer under enorme termiske, mekaniske, akustiske og aerodynamiske påvirkninger.
- At designe og konstruere en raketmotor som kommer tæt på den teoretiske ydeevne er en omfattende teknisk/praktisk process som kræver særligt fokus på især fem områder:
 - Pålidelighed, kvalitet og reproducerbarhed
 - Injektordesign
 - Termisk design
 - Forbrændingsinstabilitet
 - Effektivitet, herunder specifikt dyse design



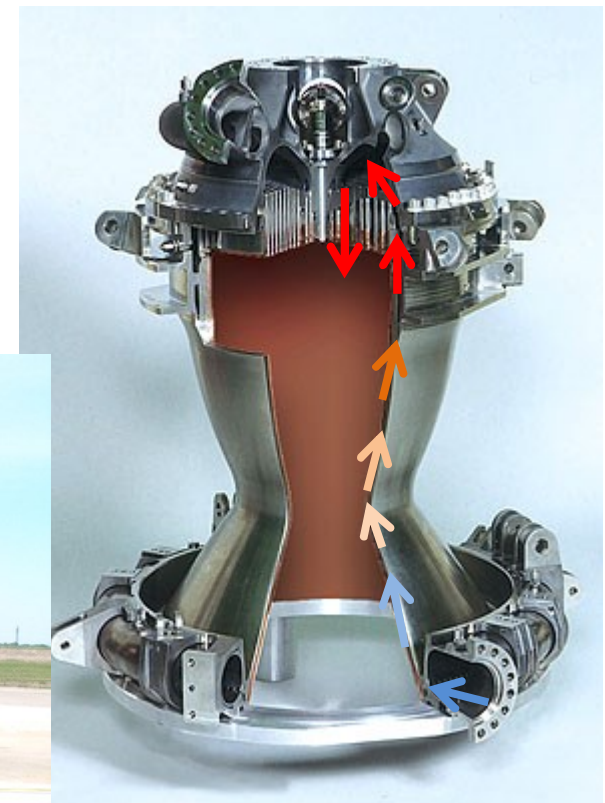
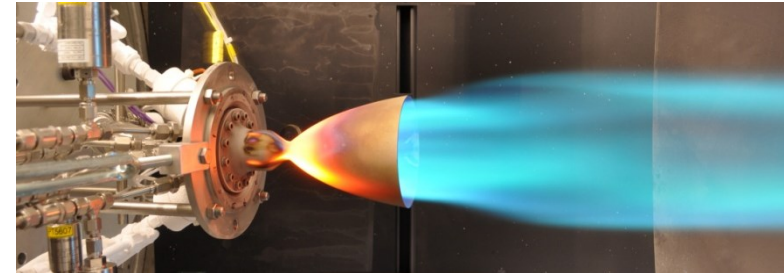
Pålidelighed, kvalitet og reproducerbarhed

- Raketmotorens materialer udsættes for ekstreme niveauer af mekanisk/termisk stress → meget lille margin for fejl og produktionstolerancer.
- Pålidelighed er ikke trivielt at opnå, og da raketmotorers levetid måles normalt i minutter er fuldskalaforsøg en omkostningsfuld øvelse.
- Høj kvalitet er benhård rocket science...



Termisk design

- Med forbrændingstemperaturer i omegnen af 3000°C og kammertryk >100atm opererer raketmotorer ofte på grænsen af materialernes egenskaber.
- Aktiv køling er derfor en nødvendighed i langt de fleste motordesigns.
- Flere effektive kølemetoder eksisterer, men de fleste motorer må kombinere metoder for at opnå tilstrækkelig køleeffekt.
- Effektniveauer på op imod 14kW/cm² ses i større motorer.



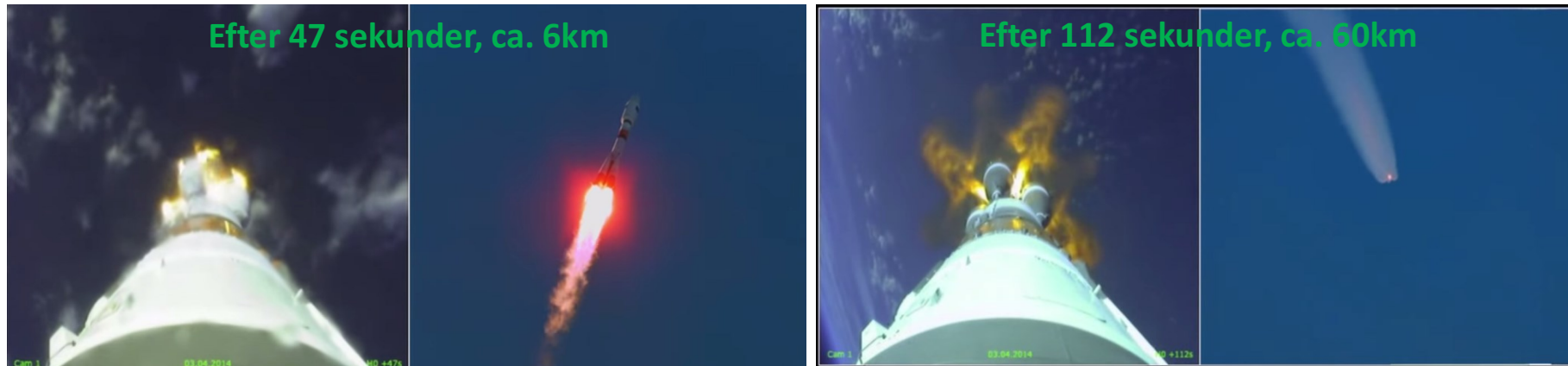
Omstrømningskøling

Forbrændingsinstabilitet

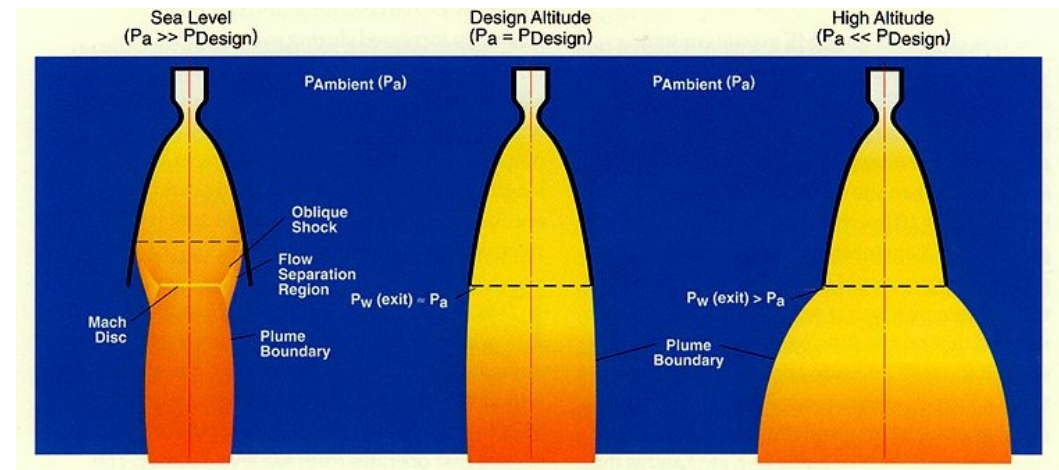


- Forbrændingsinstabilitet er et potentielt destruktivt fænomen som kan optræde i raketmotordesigns under nogle givne omstændigheder.
- Instabilitet er typisk knyttet til brændkammerets akustiske egenskaber og/eller motorens driftsbetingelser.
- Betydelig indsats ligger derfor i designfasen for at modellere og kompensere instabiliteter, specielt i større motorer hvor konsekvenserne kan være betydelige.

Effektivitet



- I stor højde giver en længere og derved større dyse mere trykkraft for det samme brændstofforbrug.
- Men større dyser er skrøbelige, tungere og svære at fremstille, så hvad gør man?



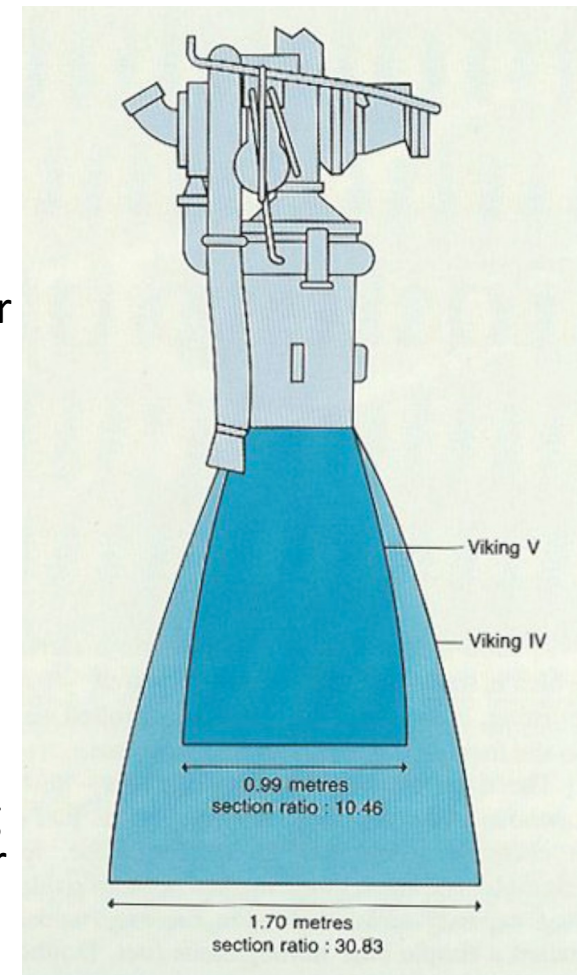
$$\text{Trykkraft} = F = \dot{m} \cdot V_e + (P_e - P_a) \cdot A_e$$

Dysedesign



F-1 raketmotoren fra Saturn V raketten. Vægt: 8400kg. Leverer 690 Ton trykkraft dvs. >1½ gange alle Souyz rakettens motorer i 1. og 2. trin tilsammen.

- Konventionelle dyser kan kun ekspanderes optimalt til én højde.
- For rumraketter med flere trin indebærer det at hvert trins dyser optimeres til forskellige højder/omgivelses tryk.
- Dysen er typisk et meget fysisk omfattende element af raketmotoren, hvorfor dens vægt er kritisk.
- Samtidig er dysen udsat for ekstreme termiske, mekaniske og akustiske påvirkninger, hvilket gør den til en af de største ingeniørmæssige udfordringer i en raketmotor.



**Ariane 4 raketten
udblæsningsdyser. Viking V
brugtes på 1. trin, Viking IV på
2. trin**

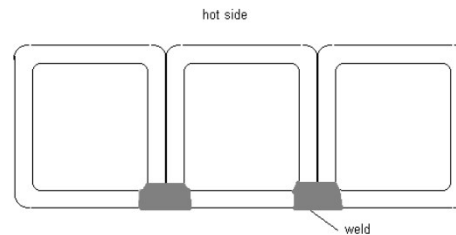
Udblæsningsdyser - principper

Dysens formål er at accelerere gassen fra forbrændingskammeret, til størst mulig hastighed

Dysen laves i superlegeringer og skal køles for ikke at smelte.

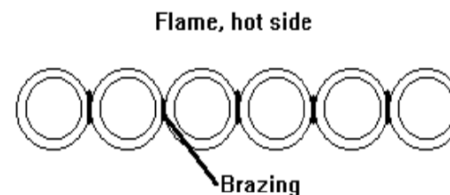
Ariane 5

- Firkantede rør
- Robot svejses
- Spiral viklade for at få den rette form på dysen



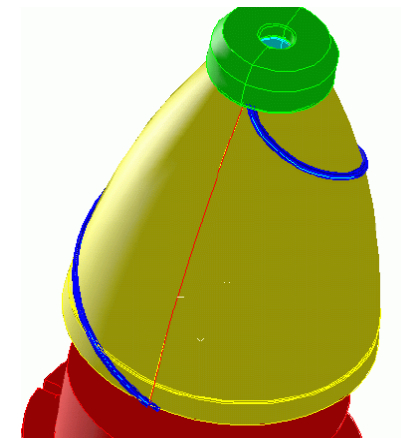
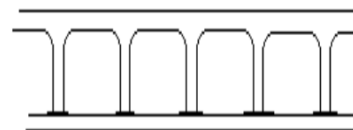
Space shuttle

- Koniske rør
- Loddess sammen



Rusland

- Sandwich design
- Vacuum loddess



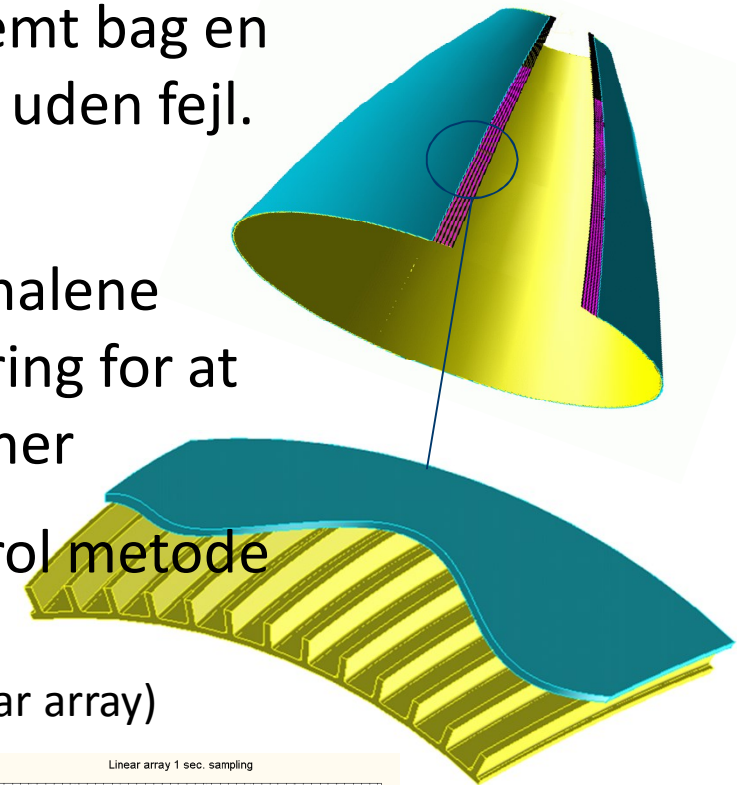
Udblæsningsdyse – Nyt design

Udfordring

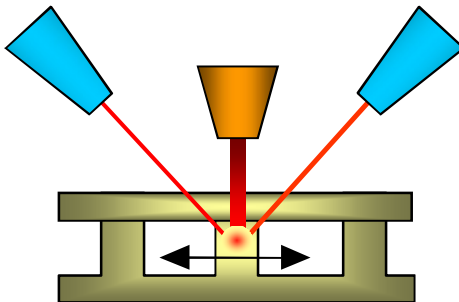
Lasersvejse 3 km tynde kølekanalvægge gemt bag en ydre skal, med en præcision på 0,1 mm og uden fejl.

Idé

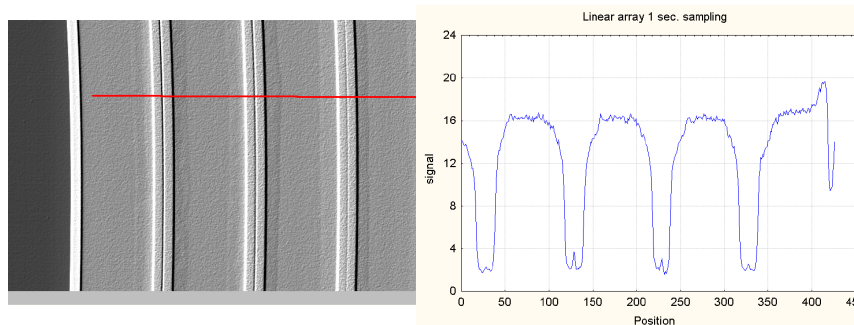
- Se igennem den ydre kappe og svejse kanalene sammen en ad gangen. Anvend aktiv styring for at undgå problemer med svejsedeformationer
- Kvalitetssikring med ikke destruktiv kontrol metode



Back Scatter X-ray



X-ray DLAT (Digital linear array)



Udviklingsprojekt

Udvikling af

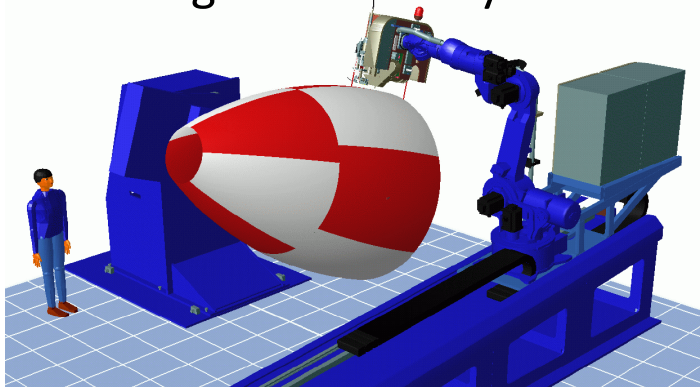
- Seamtracker m Laser og røntgen sensorer
- Lasersvejse og -påvejsnings procedurer
- Inspektions metoder: Digital røntgen, laser og ultralyd

Udvikle en automatiseret produktionscelle m.

- Seamtracker
- Robot og manipulatorer
- Beskyttelsesgas system
- Kamera og sikkerheds system

Fremstilling af

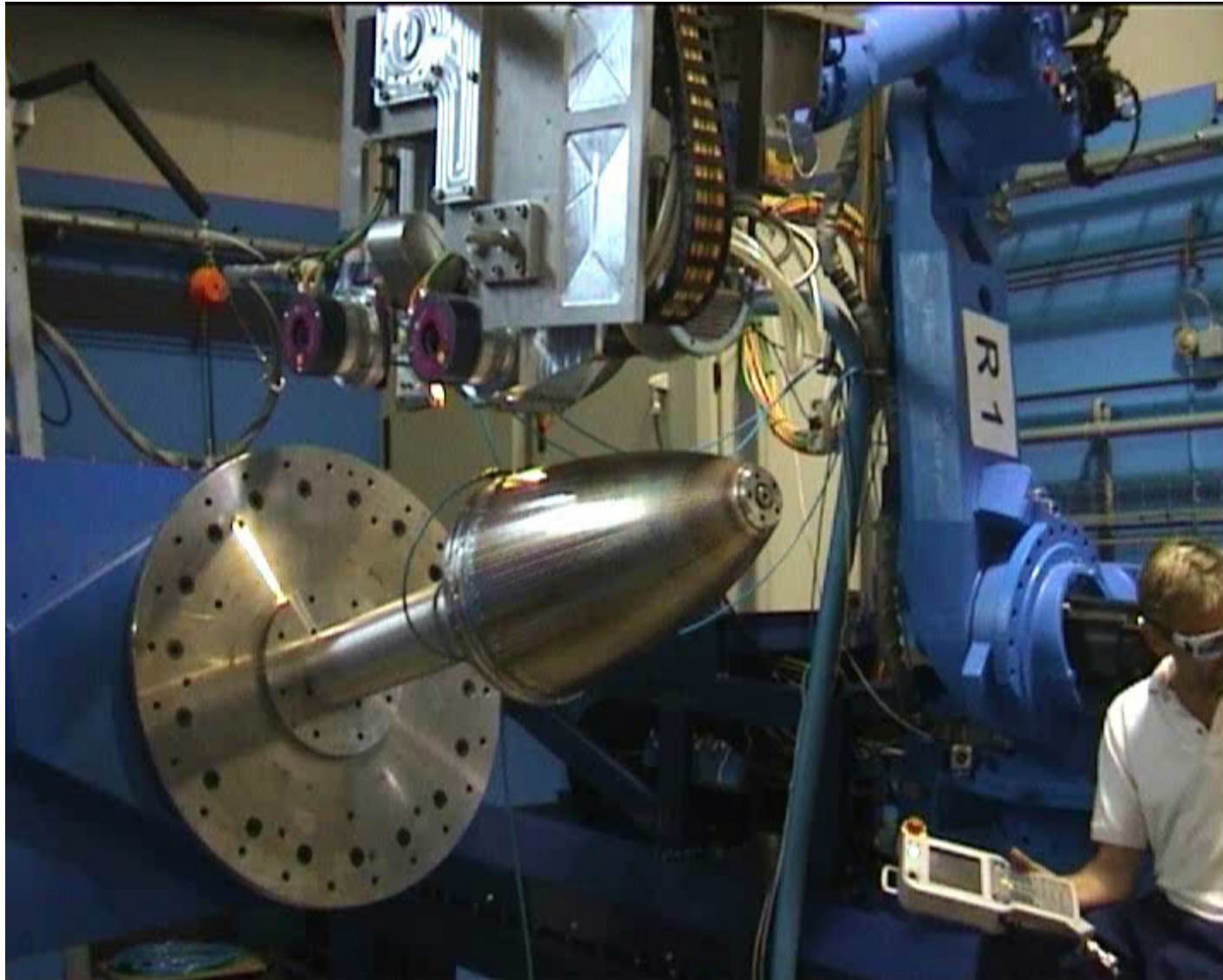
- sub-skala og fuld-skala dyser



Lasersvejsning af sub-skala dyse

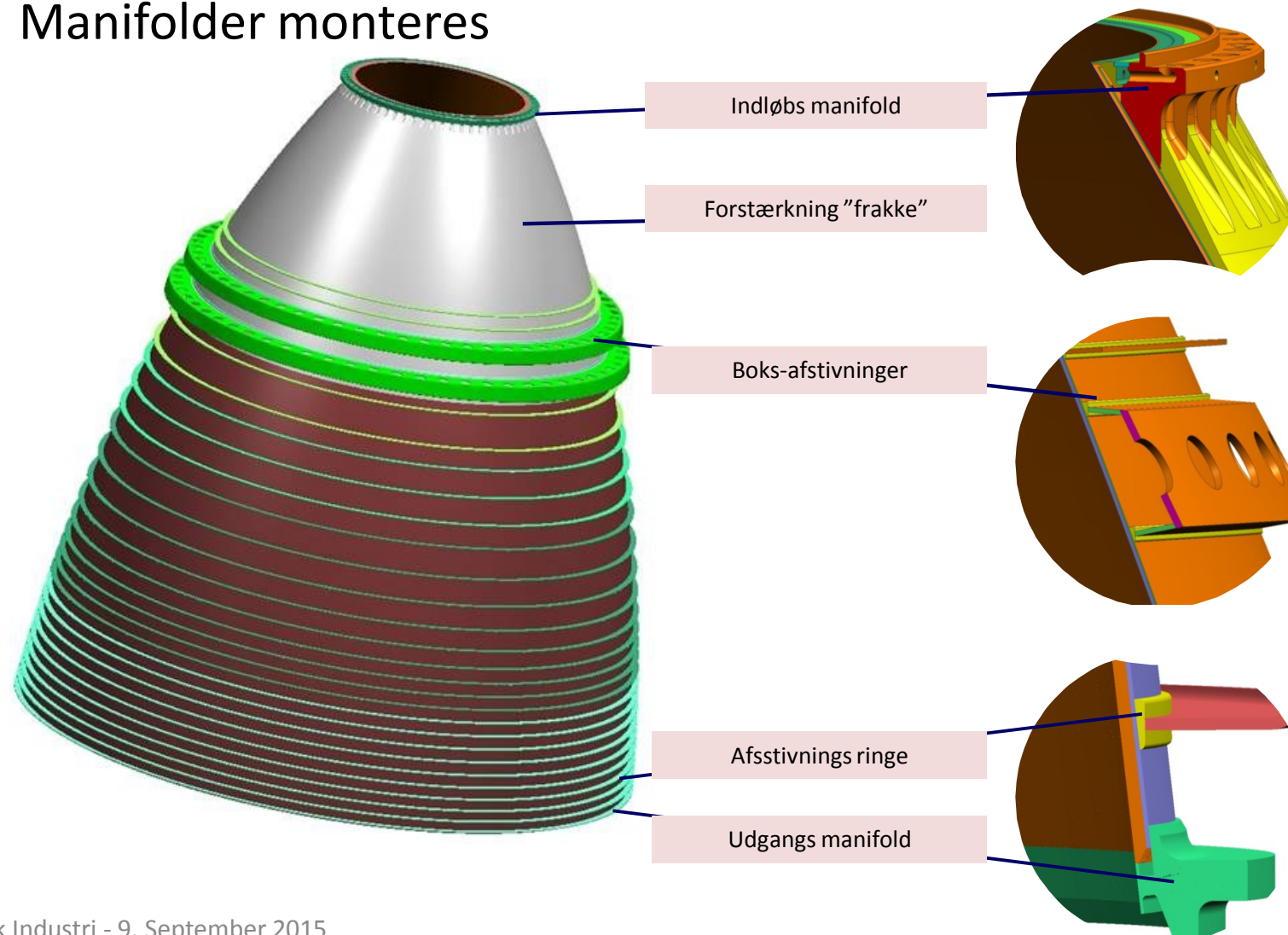


DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi



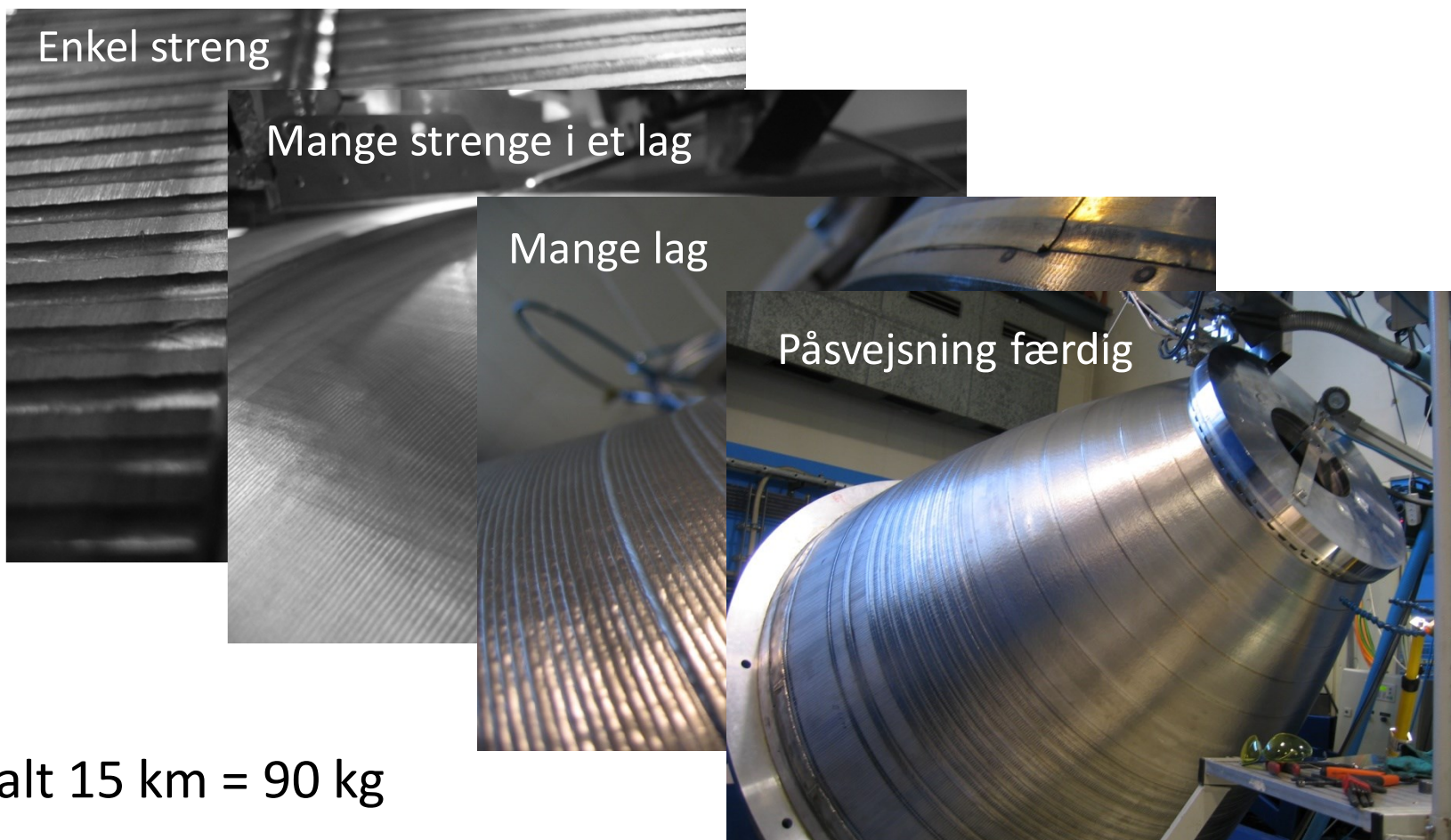
Forstærkninger

- Dysen forstærkes med laserpåsvejsning
- Manifolder monteres



Laser påsvejsning

Forstærkningerne opbygges ved laserpåsvejsning af mange tynde strenger



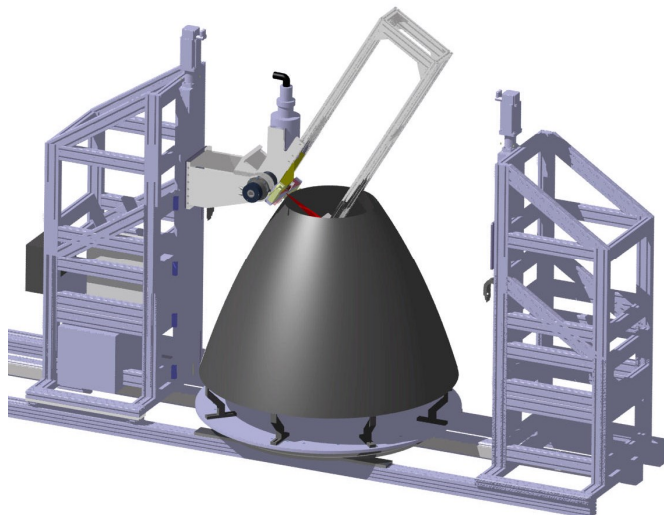
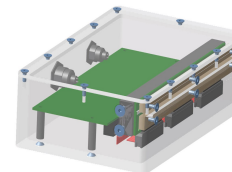
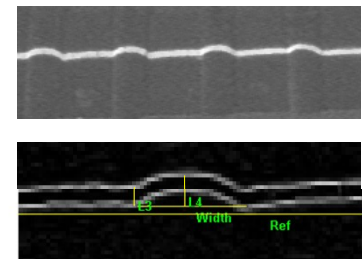
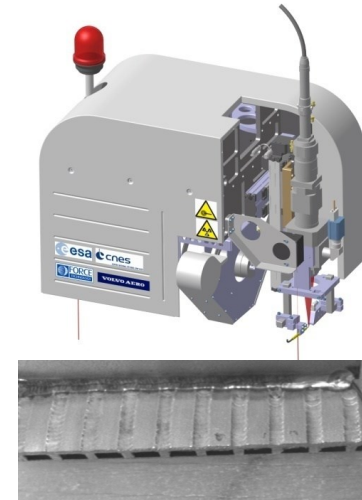
Ialt 15 km = 90 kg

Kvalitetskontrol

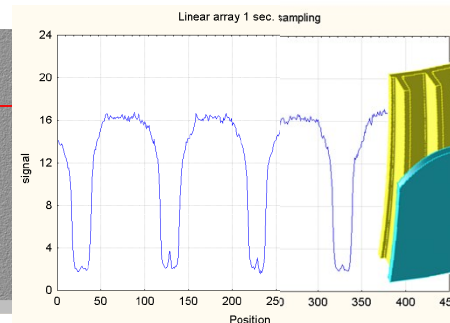
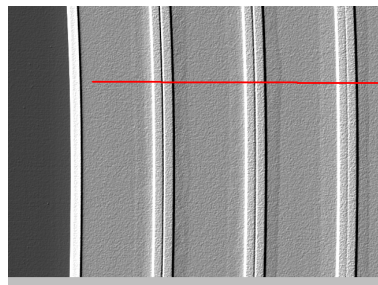
Force har udviklet udstyr og metoder til 100% kvalitetskontrol af

- 3 km kølekanaler og 90 kg forstærkninger som automatisk undersøges for facon, revner og eventuelle blokeringer

Én fejl kan betyde tab af raket og last!



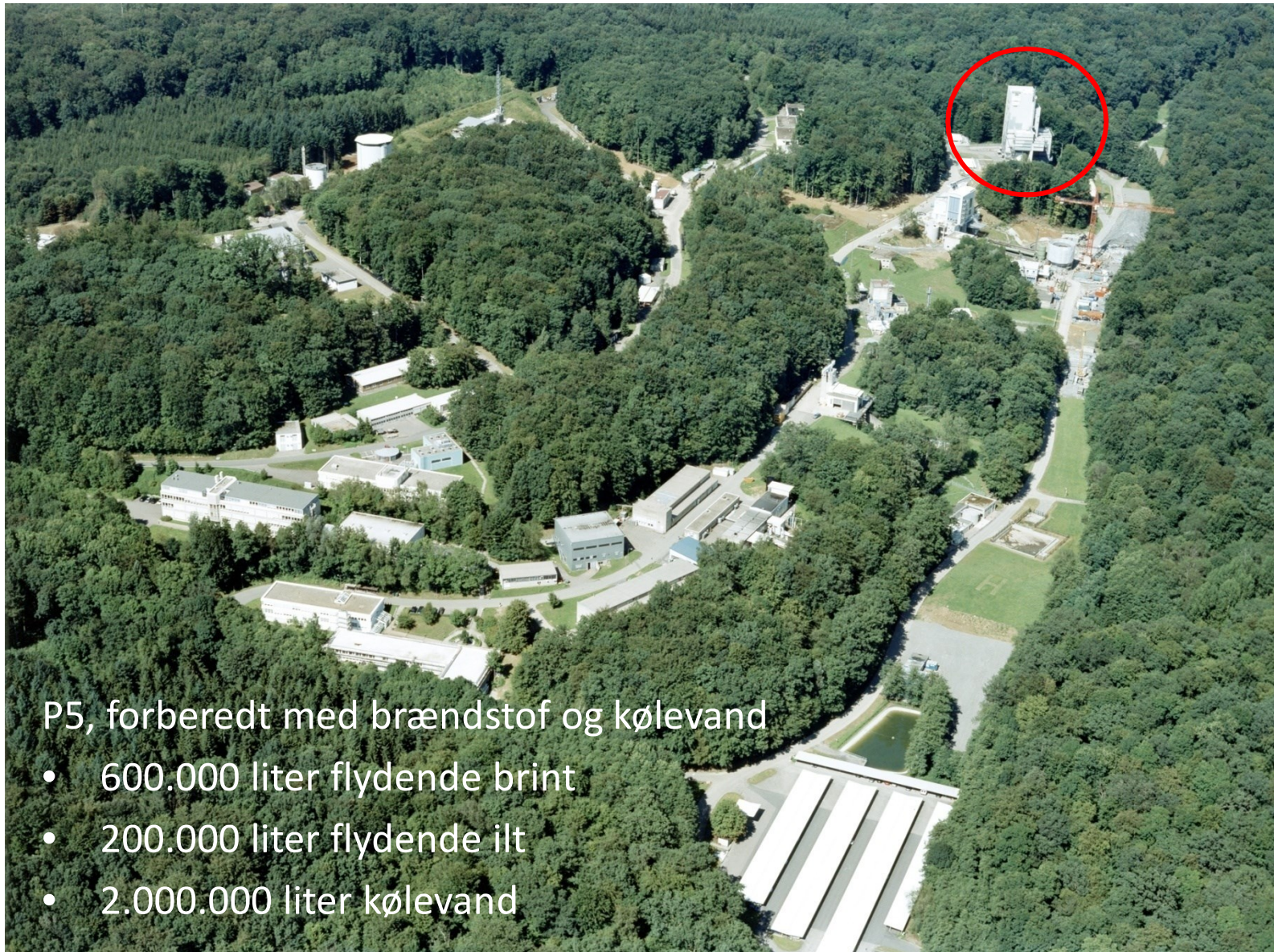
X-ray DLAT (Digital linear array)



Motor test Dec. 2009 hos DLR



DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi



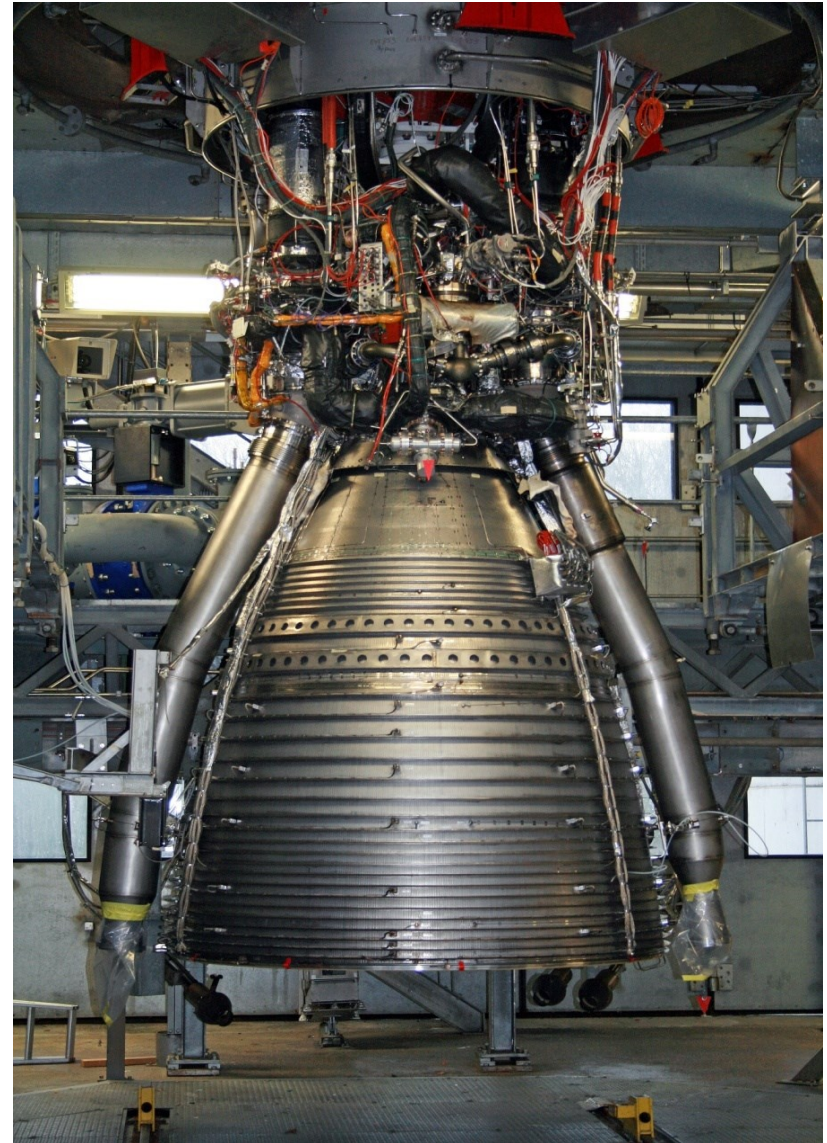
P5, forberedt med brændstof og kølevand

- 600.000 liter flydende brint
- 200.000 liter flydende ilt
- 2.000.000 liter kølevand

Europas største test rig



DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi



Motor test i 2009 hos DLR



DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi



Belastning: 100%

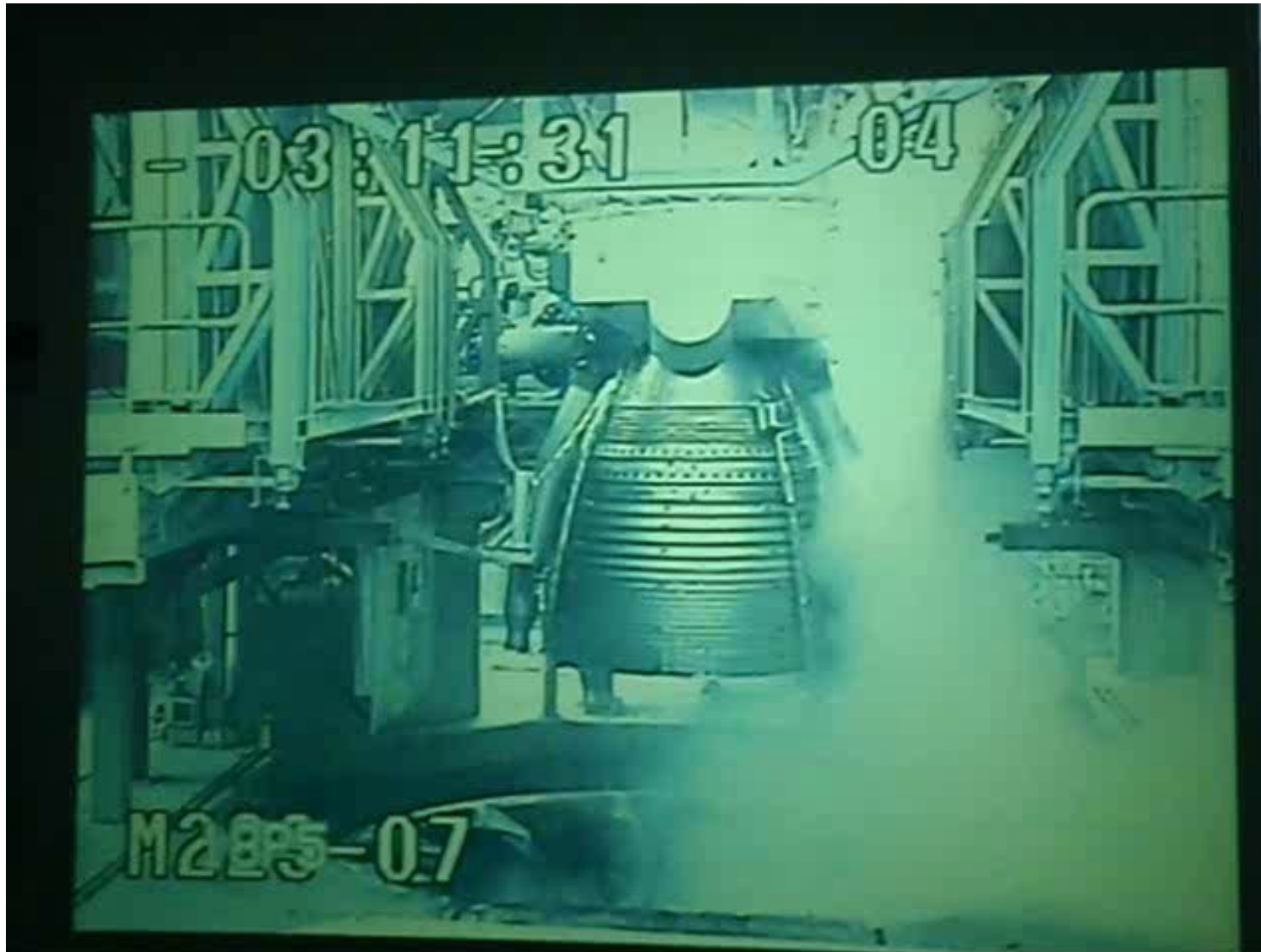
Varighed: 12 minutter

Brændstofforbrug: 250kg/s, totalt 800.000 liter

Motor test – Vulcain V2+



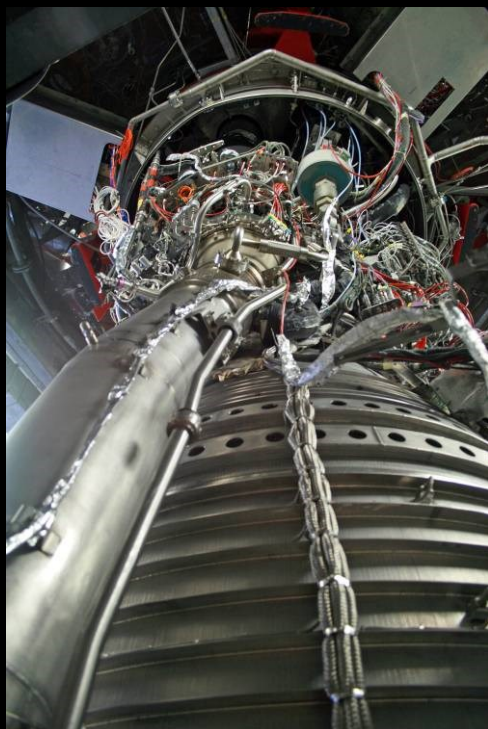
DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi



Motor test 22. dec 2009 – en succes!



DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi



Europa skal have en ny løfteraket

Ariane 6, Europa's nye løfteraket fra 2020

- Lavere omkostning per flyvning
- Større fleksibilitet i last

Sandwich dyse konceptet er valgt til hovedmotoren, og udviklingen er allerede i fuld gang

