

## Zukünftige Antriebe von Verkehrsflugzeugen

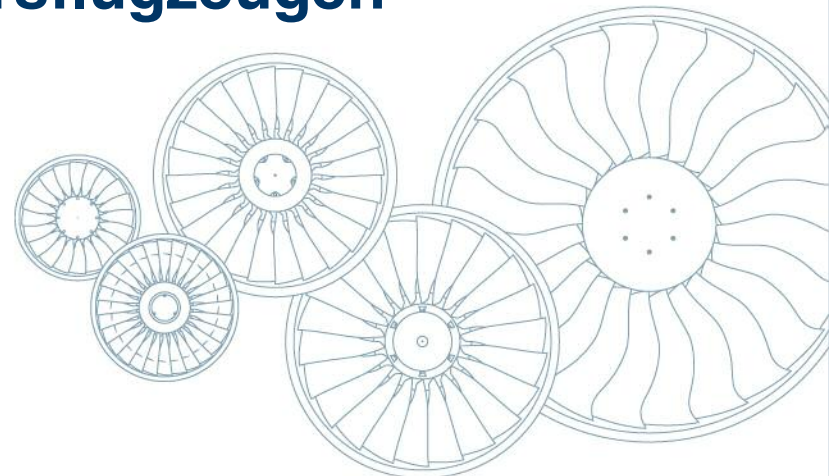
Dr. Jörg Sieber

Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt

Verein Deutscher Ingenieure

Royal Aeronautical Society

05.11.2009 HAW Hamburg

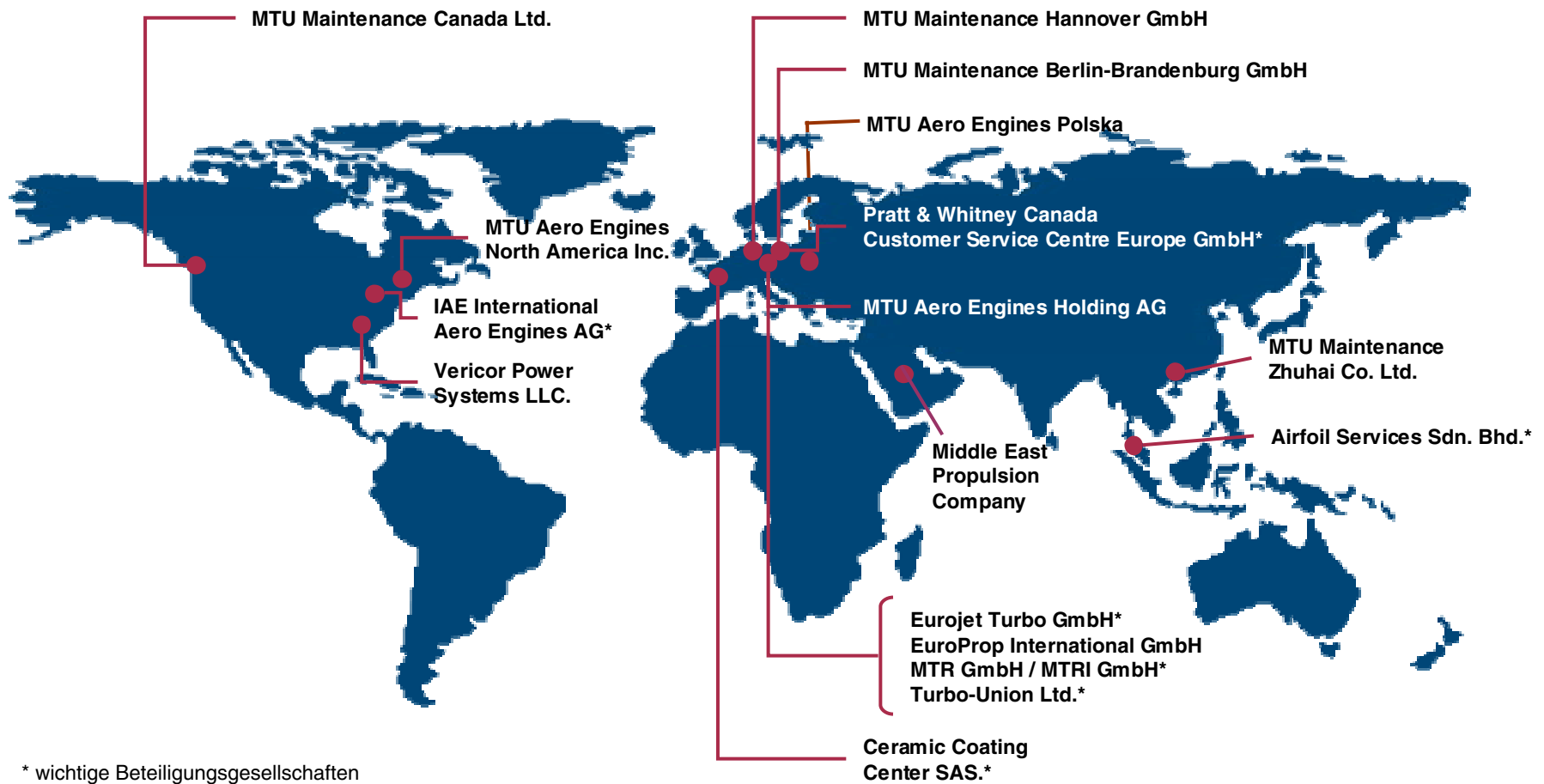


## Inhalt

- **MTU Aero Engines**
- **Zukünftige Randbedingungen**
- **Neue Antriebskonzepte**
  - Verbesserungspotentiale
  - Neue Triebwerkskonzepte mit verbessertem Vortriebswirkungsgrad
  - Neue Triebwerkskonzepte mit verbessertem thermischen Wirkungsgrad
  - Langfrist Triebwerkskonzept
- **Technologieentwicklung**
  - Verdichter
  - Turbine
  - Fertigungsverfahren
  - Gesamtsystem
- **Technologieprogramme**
  - VITAL / NEWAC / DREAM
  - CLAIRE / Ökoeffizientes Fliegen
- **Auswirkungen auf den Luftverkehr**

# MTU Aero Engines

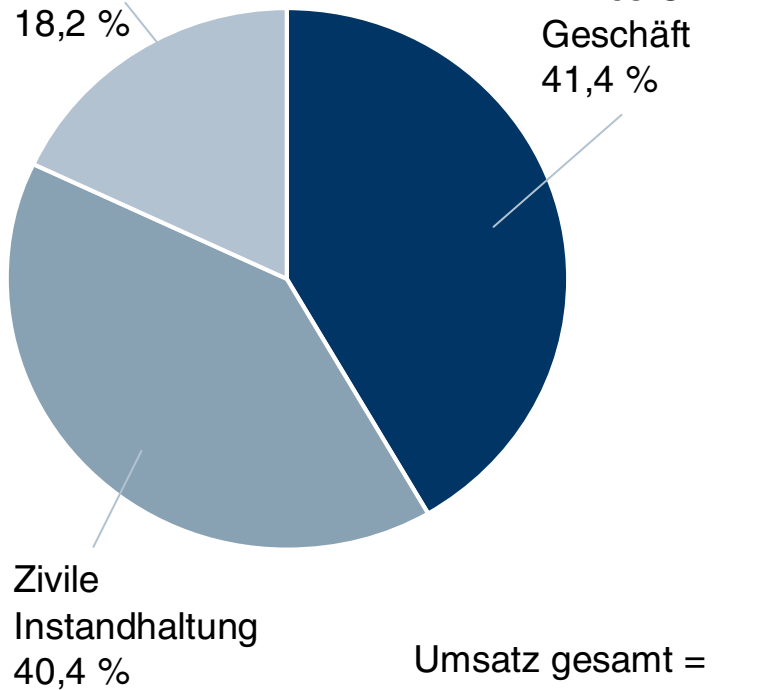
# MTU Aero Engines Standorte



## Das MTU-Geschäftsmodell

### Umsatz 2008

Militärisches  
Geschäft  
18,2 %



Umsatz gesamt =  
2.724,3 Mio. €

### Stärken

#### Ziviles Triebwerksgeschäft

- Ausgewogenes Produktportfolio
- Hoher Anteil an zukunftssträchtigen Programmen

#### Zivile Instandhaltung

- Weltweit größter unabhängiger Instandhalter
- Zugang zu wachstumsstarken Segmenten (V2500, CFM56, CF34)

#### Militärisches Geschäft

- Teilnahme an europäischen Schlüsselprogrammen mit Entwicklungsverantwortung für die Systeme
- Beteiligung am US-Militärmarkt
- Führender Partner der Bundeswehr für Triebwerke

## Die zivile Anwendungspalette

**PW4000 Growth**

**GP7000**

**GEnx**

**CF6**

**PW2000**

**V2500**



Boeing 777

Airbus A380

Boeing 787  
Dreamliner  
Boeing 747-8

Airbus A300,  
A310, A330,  
Boeing 747, 767,  
MD-11

Boeing 757,  
Boeing C-17,  
(milit.: F117)

Airbus A319,  
A320, A321,  
Boeing MD-90

**PW6000**

**JT8D-200**

**PW1000G**

**PW800**

**PW300**

**PW500**



Airbus A318

Boeing  
MD-80-Serie

Mitsubishi Regional  
Jet (MRJ),  
Bombardier CSeries

große  
Geschäftsreiseflug-  
zeuge

Learjet 60, Do328JET,  
Gulfstream G200,  
Hawker 1000,  
Dassault Falcon 7X,  
Cessna Sovereign

Cessna Bravo,  
Cessna XLS

## Die militärische Anwendungspalette

**F414 / F404**



F/A-18 Hornet

**EJ200**



Eurofighter  
Typhoon

**RB199**



Panavia Tornado

**J79**



F4-Phantom II

**Larzac04**



Alpha Jet

**TP400-D6**



Airbus A400M

**Tyne**



Transall  
Breguet Atlantic

**GE38**



Sikorsky  
CH53-K

**T64**



Sikorsky  
CH53-G

**MTR390**



Eurocopter  
Tiger

**250-C20**



PAH-1

# Randbedingungen



## Ressourcen

- Seit 1981 verbraucht die Welt mehr Öl pro Jahr als neu entdeckt wird\*.
- Die Reichweite der heute nachgewiesenen Weltölreserven beträgt bei Fortschreibung der Produktion ca. 40 Jahre. Bei Steigerung der Produktionsrate sind die Reserven bereits in 30 Jahren verbraucht\*\*.
- Nach Ansicht der Internationalen Energie-Agentur kann der Rohölbedarf noch bis zum Jahr 2030 befriedigt werden\*\*\*.
- Der Preis für Rohöl hat sich seit dem letzten Tiefststand im Jahr 1999 gegenüber Sommer 2008 mehr als verzehnfacht.

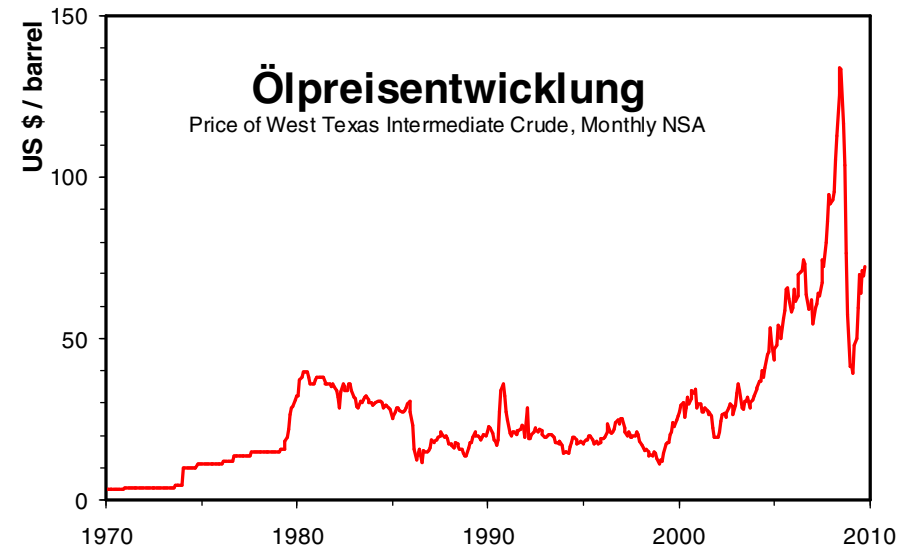
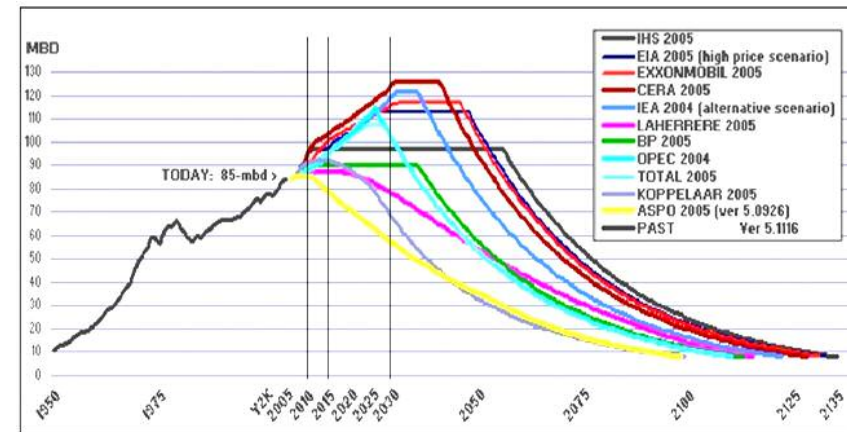
\* ASPO Association for the Study of Peak-Oil and Gas

\*\* TU Berlin International 60, August 2007

\*\*\* International Energy Agency IEA, World Energy Outlook 2007

## Szenarien zur Entwicklung der Ölförderung

Millionen Barrel pro Tag



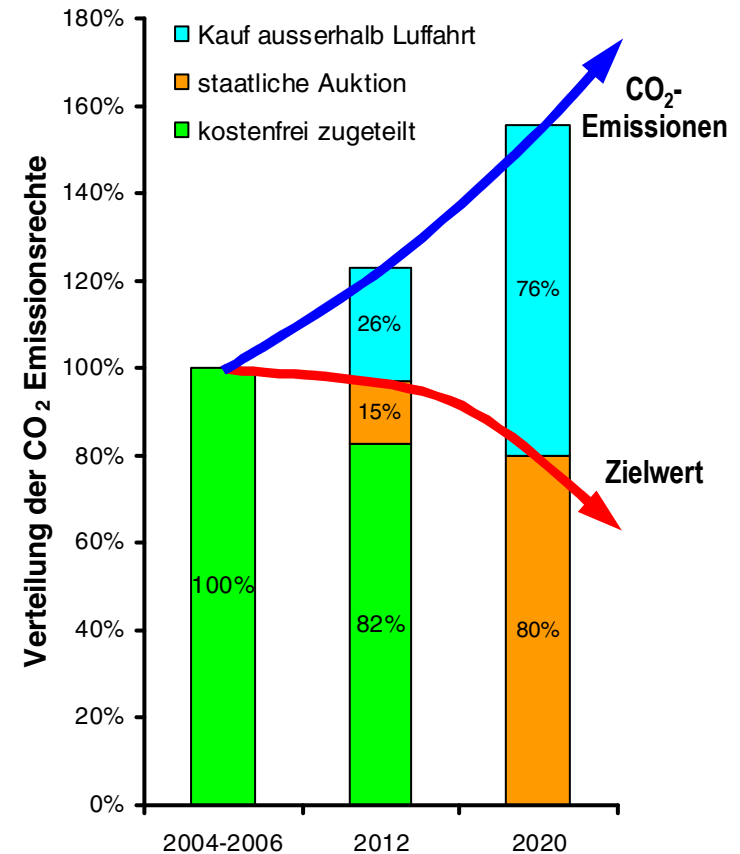
## Klimaänderung

- Es ist sehr wahrscheinlich, dass die beobachtete Klimaänderung durch Menschen verursacht wird und die CO<sub>2</sub>-Emissionen daran den wesentlichen Anteil haben.
- Der Anteil des Luftverkehr am CO<sub>2</sub>-Ausstoss beträgt heute ~2% \*.
- Ab 2012 sollen die Airlines im europäischen Luftverkehr am Emission Trading System teilnehmen. Im ersten Schritt ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 3%, eine kostenfreie Zuteilung von 85% sowie eine Versteigerung von 15% der Emissionsrechte vorgesehen. Weiter notwendige Emissionsrechte müssen zugekauft werden \*\*.
- Die EU-Umweltminister streben eine Vereinbarung auf der Weltklimakonferenz 2009 zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses um 10% bis zum Jahr 2020 im Vergleich zu 2005 an.

\* World Resource Institute

\*\* EU-Umweltminister 21. Oktober 2009

## Emission Trading System

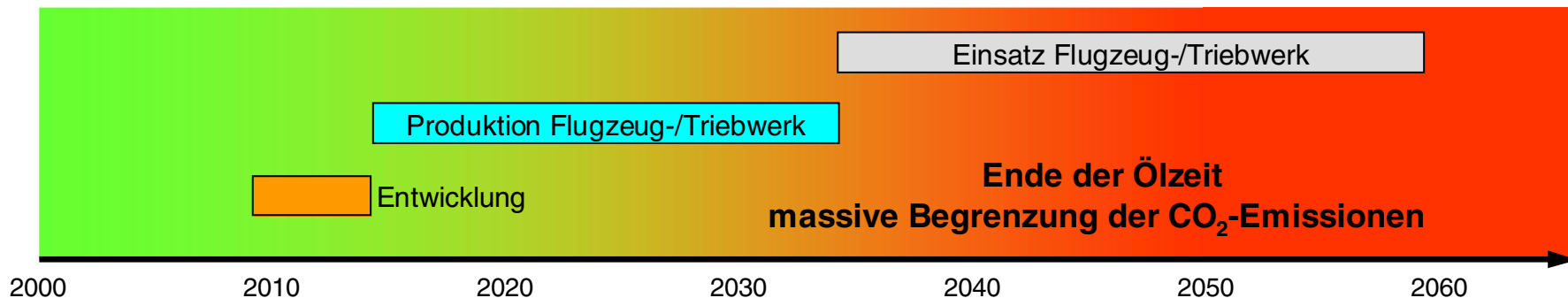


### Annahmen

- Steigerung des absoluten Brennstoffverbrauchs um 3% pro Jahr
- Weitere Reduktion der CO<sub>2</sub> Grenze um 20% in 2020 (in Diskussion)

## Konsequenzen

- Rohöl steht als Energielieferant zu akzeptablen Preisen nur noch für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung.
- Die Gesellschaft erwartet zukünftig (besonders) von der Luftfahrt eine deutliche Reduktion der klimaschädlichen Emissionen.
  - In den vergangenen 40 Jahren konnte der spezifische Verbrauch um 70% reduziert werden, das entspricht einer jährlichen Verbesserung von 3% pro Jahr.
  - Ein Anstieg der absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Luftfahrt ist wegen des starken Verkehrswachstums von ca. 5% pro Jahr durch technologische Verbesserungen wie in der Vergangenheit nicht zu kompensieren bzw. zu überkompensieren.

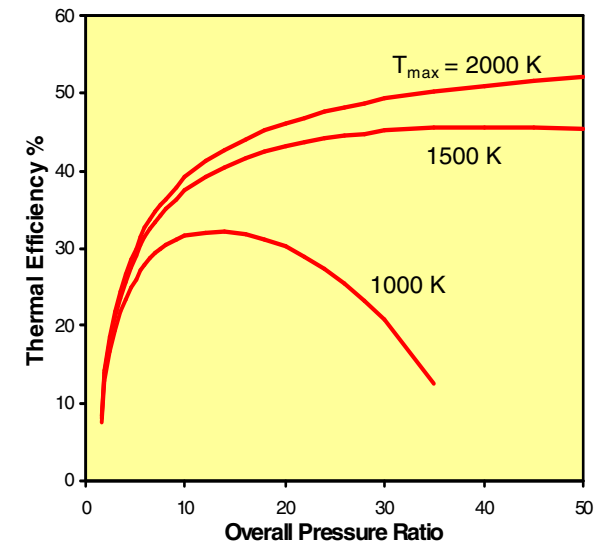
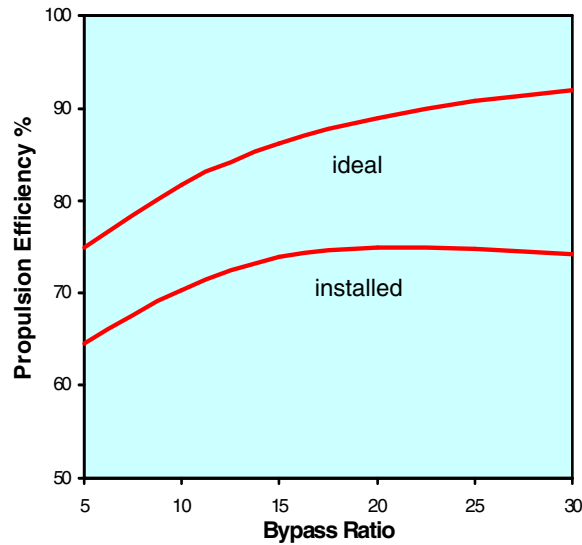
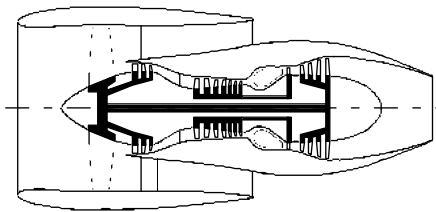


**→ Technologieentwicklungen zu effizienten Luftverkehrssystemen und alternativen Brennstoffen sind sofort zu starten.**

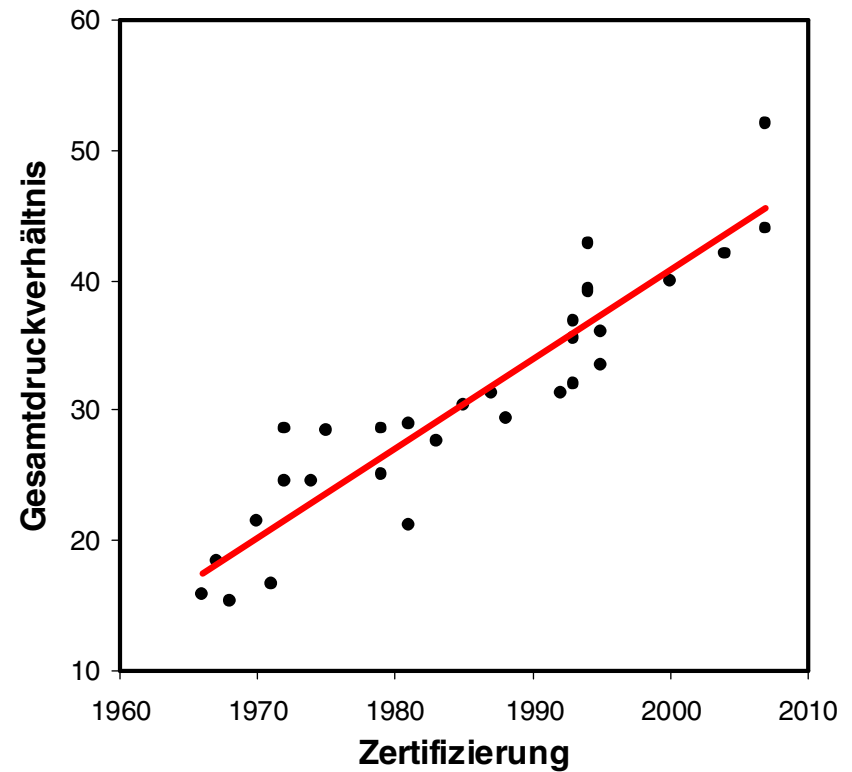
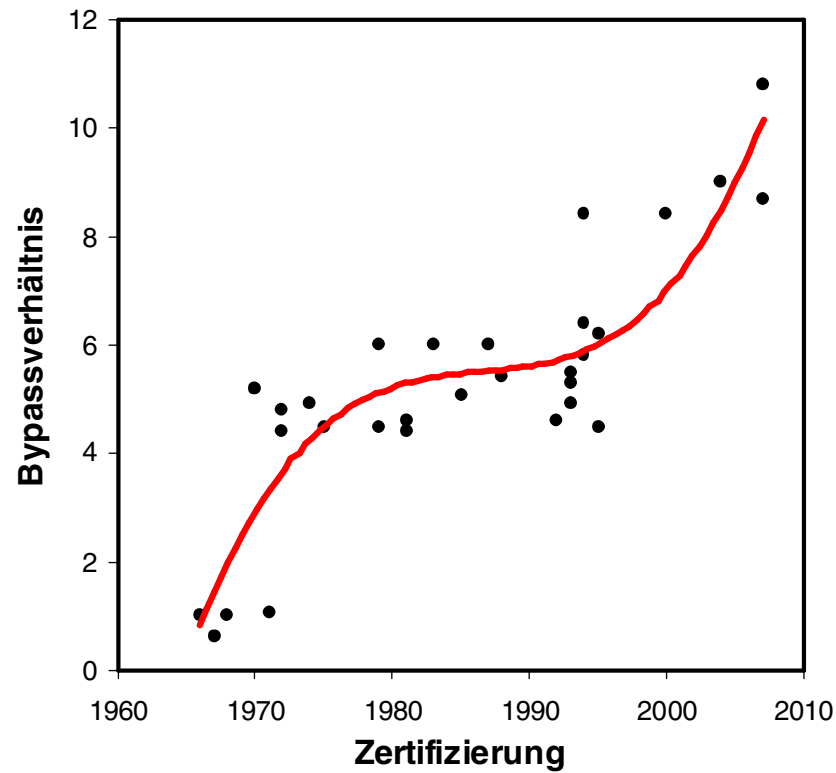
# Neue Antriebskonzepte

# Wirkungsgrad von Flugantrieben

$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_{\text{Vortrieb}} \left\{ \begin{array}{l} \text{Bypassverhältnis} \\ \text{Installation} \\ \dots \end{array} \right\} \cdot \eta_{\text{thermisch}} \left\{ \begin{array}{l} \text{Kreisprozess} \\ \text{Druckverhältnis} \\ \text{Temperatur} \\ \text{Komponentenwirkungsgrad} \\ \dots \end{array} \right\}$$



## Designtreiber Gesamtdruckverhältnis und Bypassverhältnis



# Triebwerkskonzepte mit verbessertem Vortriebswirkungsgrad

## Getriebefan

### Beschreibung

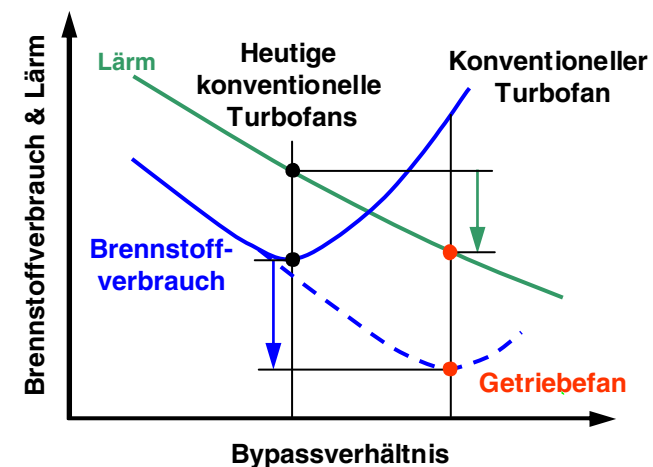
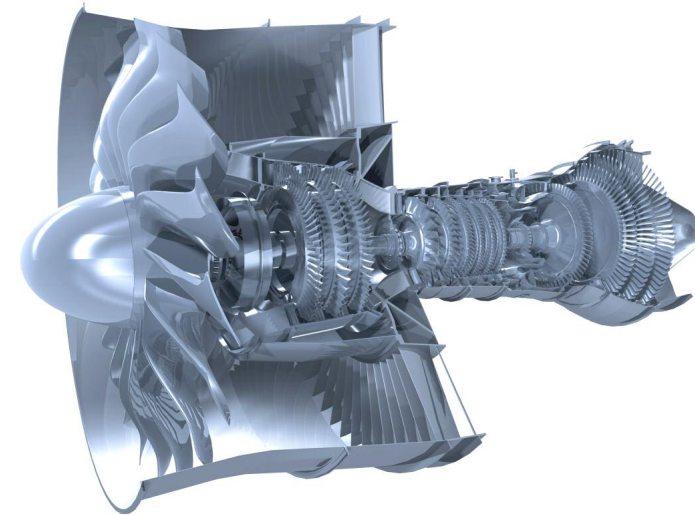
- Getriebe zwischen Niederdruckturbinen und Fan
- schnelllaufende Niederdruckturbinen
- hohes Bypassverhältnis  $> 12$

### Vorteile / Ziele

- hoher Vortriebswirkungsgrad
- effiziente und leichte Niederdruckturbinen
- 15% reduzierter Brennstoffverbrauch \*
- Lärmreduktion um 24 dB (kumuliert) \*
- EIS 2015

### Technologische Herausforderungen

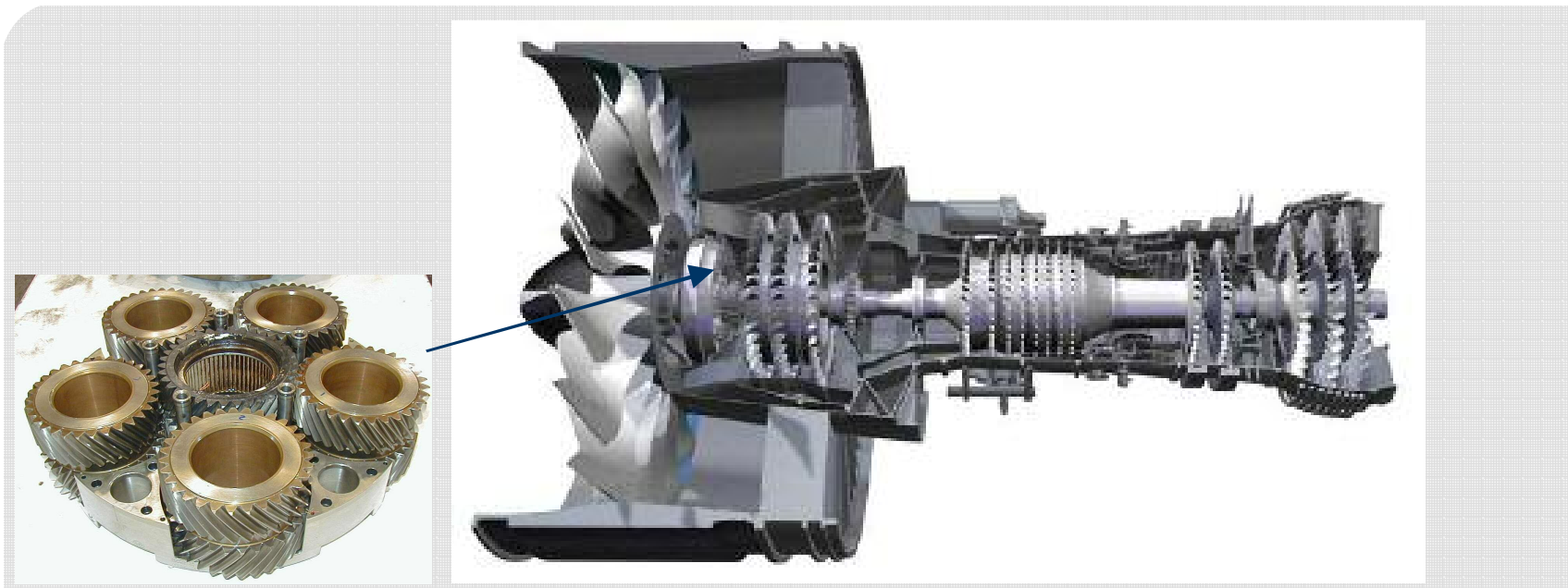
- widerstandsarme Gondel
- leichtes Getriebe
- Leichtbauweisen



\* im Vergleich zum Jahr 2000 Triebwerk



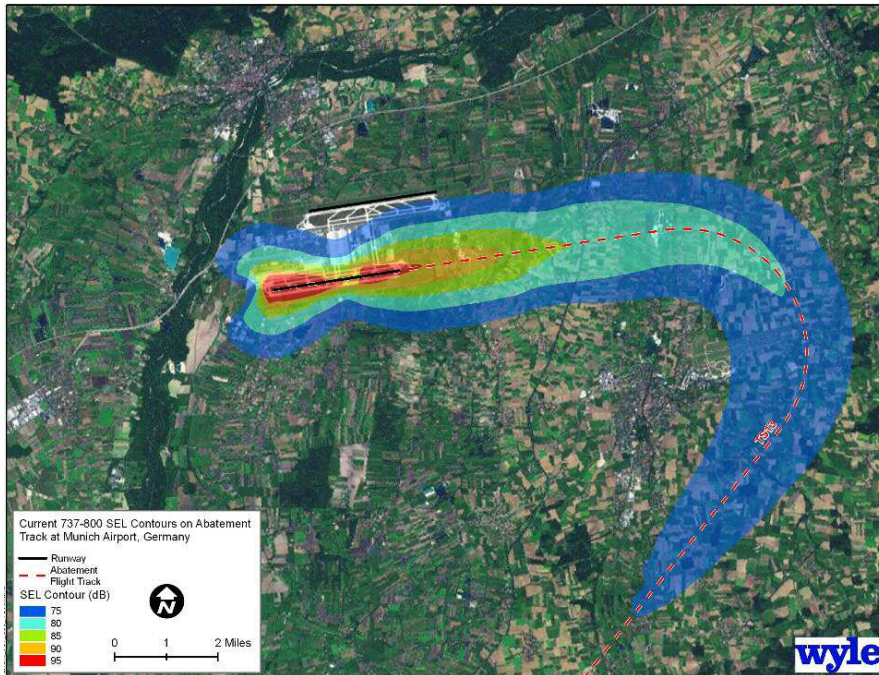
## Der GTF erfüllt die Designziele der Next Generation Triebwerke (EIS 2013)



Single Aisle Vergleich	Heutiges TWK	Advanced TF	Geared Turbofan
Fuel burn	Basis	-8 to -10%	-15%
Noise, rel. ICAO stage 4	-2 to -4 dB	-15 to -17 dB	-20 to -24 dB
Maintenance cost	Basis	-30 to -40%	-30 to -40%

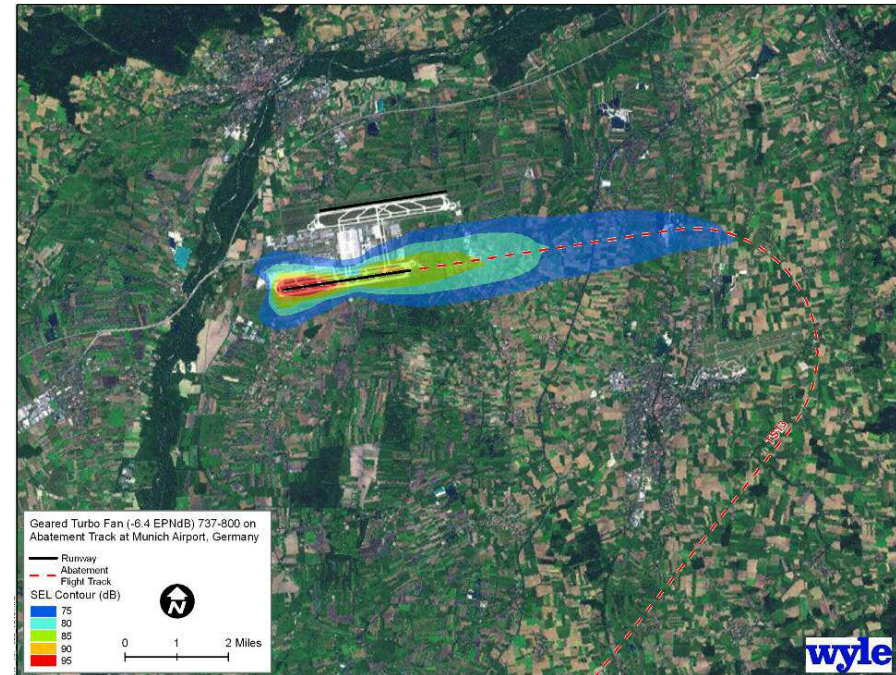
# Getriebefan - Deutliche Lärmreduktion

## Flughafen München



**Heutiges Flugzeug**

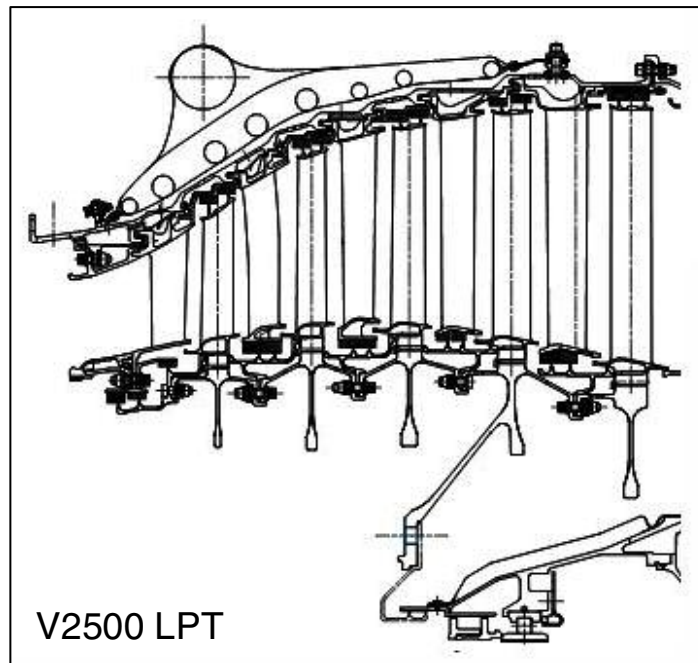
Noise Simulation: Pratt & Whitney  
SEL Contour Source: Wyle Laboratories



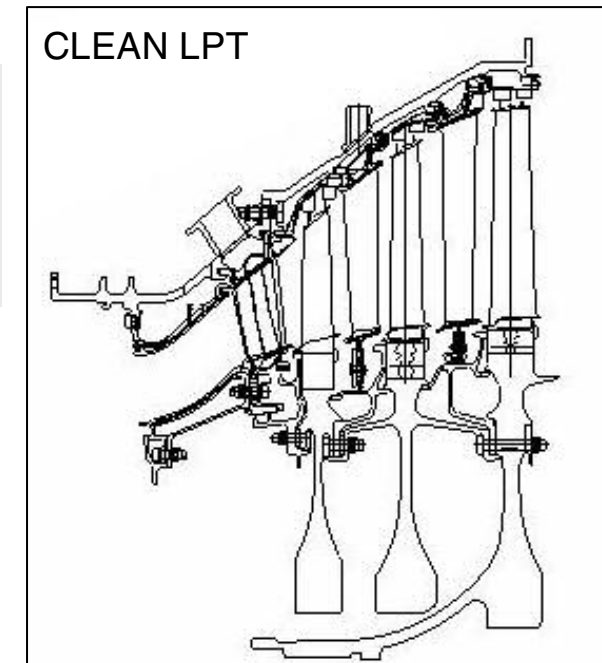
**Next Generation Flugzeug  
mit Getriebefan**

→ Reduktion der 75dB Lärmkontur um 72%

## Verbesserungspotential Schnellaufende Niederdruckturbine



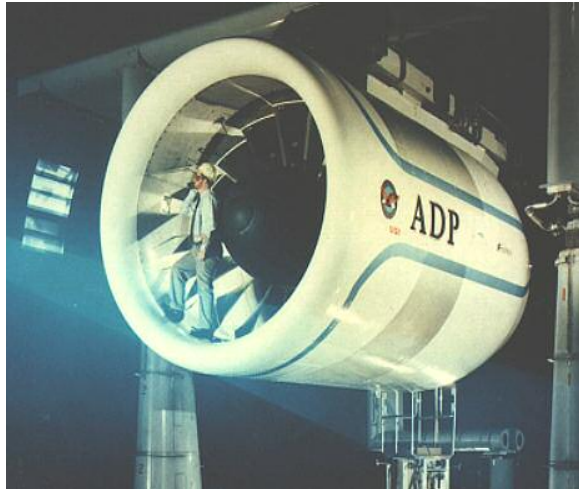
- similar SHP
- + 60% speed
- 3 stages vs 5
- - 40% airfoil count
- - 60 - 70% weight



### Vorteile der Schnellaufenden Niederdruckturbine

- reduzierte Stufen- und Schaufelzahl durch höhere Umfangsgeschwindigkeit
- reduziertes Gewicht und Kosten
- hoher Wirkungsgrad wegen niedriger aerodynamischer Belastung
- niedrige Lärmemission infolge hoher Schaufelwechselfrequenzen

## Getriebefan - Technologiedemonstration



**ADP Demonstrator**  
50 klb

Partner: PW-A, MTU, Avio  
 MTU: schnelllaufender NDV,  
 schnelllaufende NDT  
 Triebwerkstests: P&W Florida  
 Höhentests: NASA Ames



**ATFI Geared Fan Demo**  
13 klb

Partner: PW-C, PW-A, MTU, Avio  
 MTU: schnelllaufende NDT  
 Triebwerkstests: PWC



**GTF-Demonstrator**  
28 klb

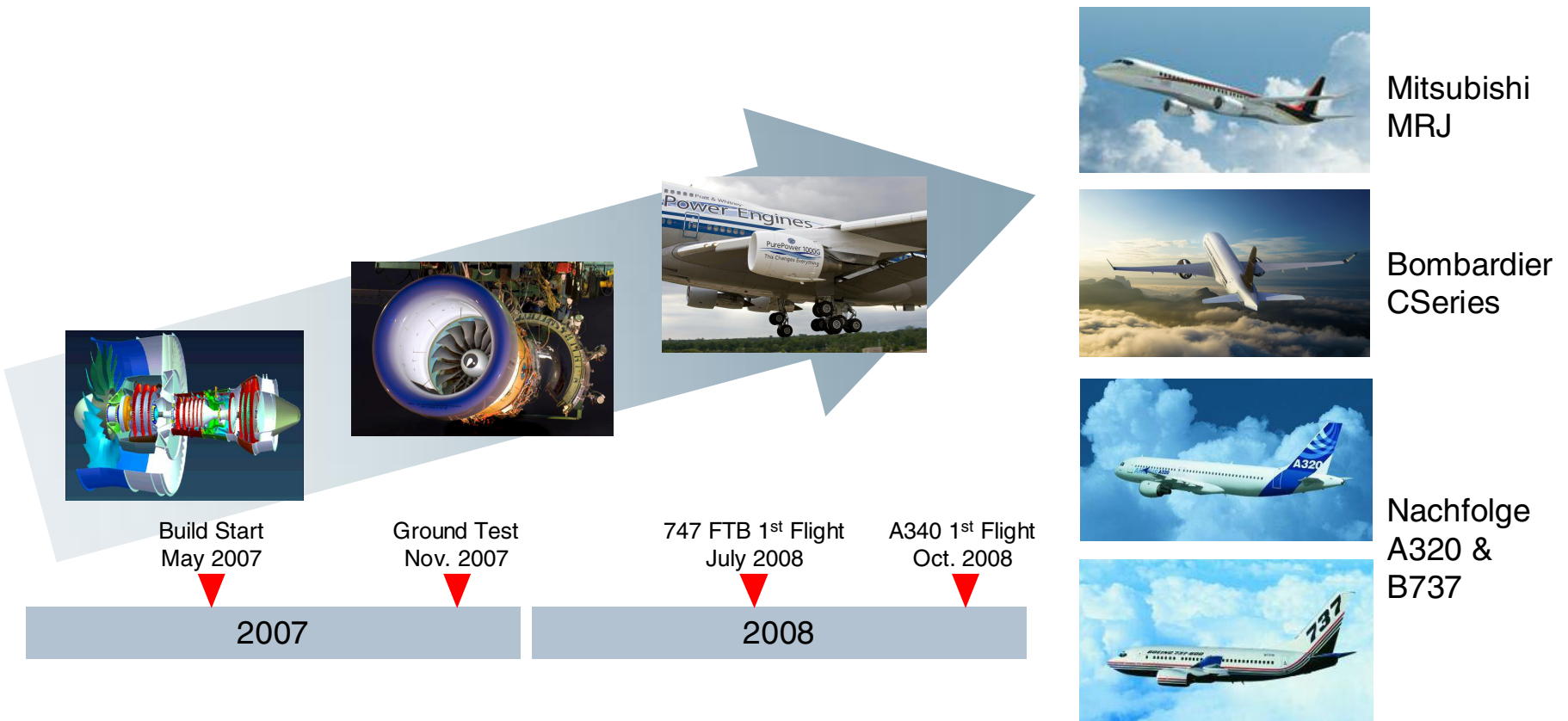
Partner: PW-A, MTU, Avio  
 MTU: HDV, schnelllaufende NDT  
 Triebwerkstests: P&W Florida  
 Flugtests: B747 Flying Testbed

1993

2001

2007

## Getriebefan - Demonstrator Programm und Anwendungen



- Technologiereife Ende 2008 und Serieneinführung 2013
- Erste Anwendung in Kurzstreckenflugzeugen
- Wegen großem Brennstoffkostenanteil vor allem für Langstreckenflugzeuge interessant

## Open Rotor

### Beschreibung

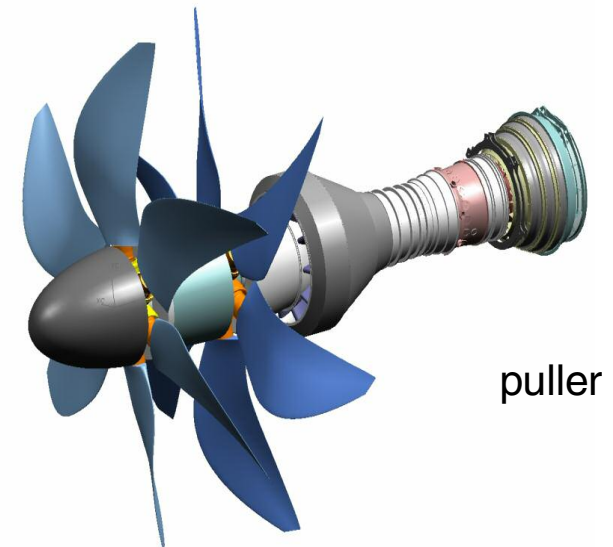
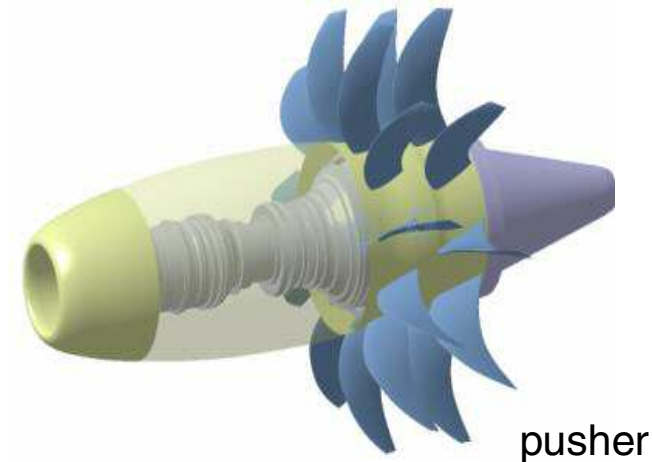
- offener gegenläufiger Fan
- Getriebe oder gegenläufige Niederdruckturbine
- „pusher“ oder „puller“ Konfiguration
- sehr hohes Bypassverhältnis

### Vorteile / Ziele

- sehr hoher Vortriebswirkungsgrad
- 20% reduzierter Brennstoffverbrauch \*
- Technologiereife 2020

### Technologische Herausforderungen

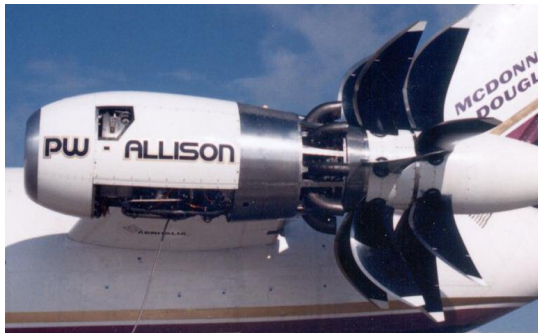
- Lärmemission (Umgebung + Kabine)
- Installation am Flugzeug
- Blattverstellung
- Blade off / Vogelschlag, Zulassung
- Getriebe / gegenläufige Turbine
- hohe Fluggeschwindigkeit



\* im Vergleich zum Jahr 2000 Triebwerk

## Open Rotor

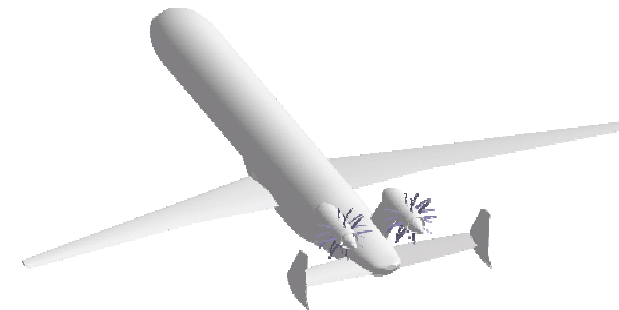
- Entwicklung des neuen Triebwerkskonzepts in den 80-er Jahren nach dem ersten Ölpreisschock in den USA durch General Electric und Pratt&Whitney-Allison.
  - GE36 von GE, Antrieb der Rotoren direkt durch gegenläufige Niederdruckturbine
  - 578-DX von P&W-Allison, Antrieb der Rotoren über ein Getriebe
- Demonstratorflüge an B727 und MD80 Anfang der 80er Jahre durchgeführt.
- Die Entwicklungen wurden wegen ungelöster Lärmprobleme (Lärmemission in etwa auf dem Niveau ICAO Stage 3) und wieder sinkender Energiepreise gestoppt.
- Wiederaufnahme der Open Rotor Entwicklung durch Rolls Royce und GE, zur Zeit Lärmmessungen an Modellen im Windkanal.



P&W-Allison 578-DX



General Electric GE36



Installation am Heck

## Counter Rotating Shrouded Fan

### Beschreibung

- gegenläufiger ummantelter Fan
- Getriebe oder gegenläufige Niederdruckturbine
- hohes Bypassverhältnis ~ 25

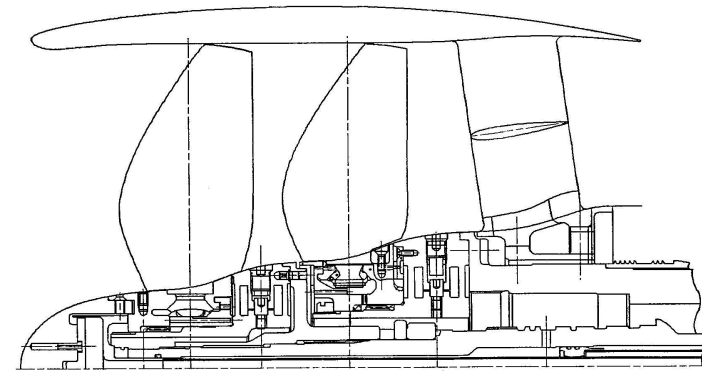
### Vorteile / Ziele

- hoher Wirkungsgrad
- weiter Betriebsbereich
- hoher Durchsatz (= hohes Bypassverhältnis)
- 20% reduzierter Brennstoffverbrauch \*
- Technologiereife ab 2025

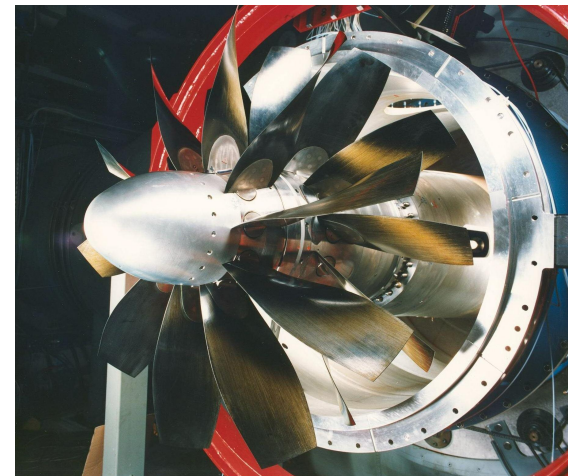
### Technologische Herausforderungen

- widerstandsarme Gondel
- Lärmemission
- Umkehrschub
- leichtes Getriebe
- Leichtbauweisen

\* im Vergleich zum Jahr 2000 Triebwerk



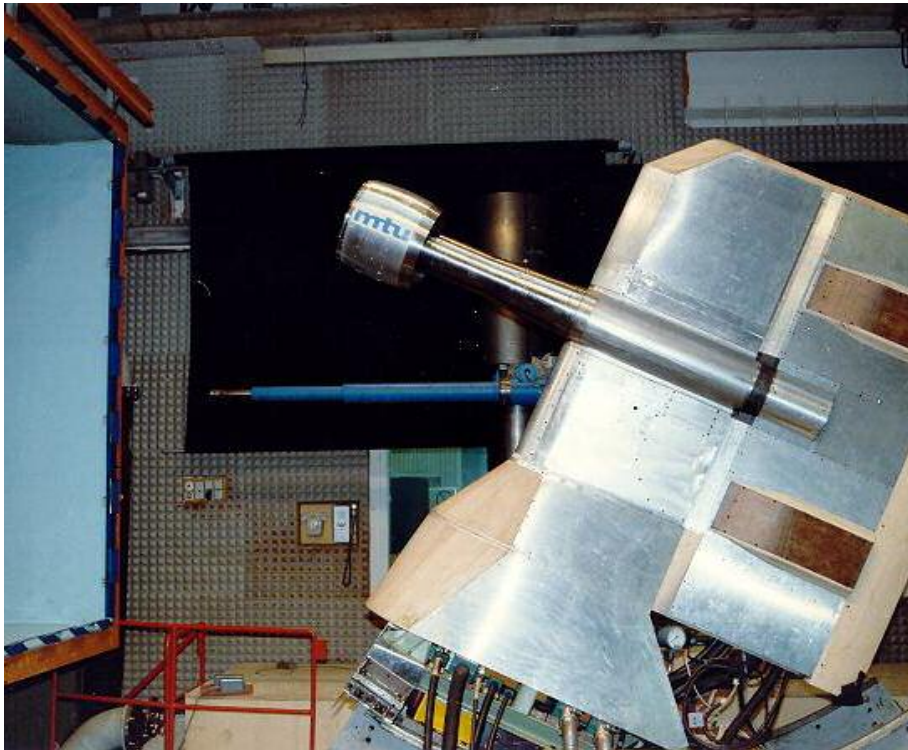
CRISP Nationales Modell



CRISP  
1m-Rig

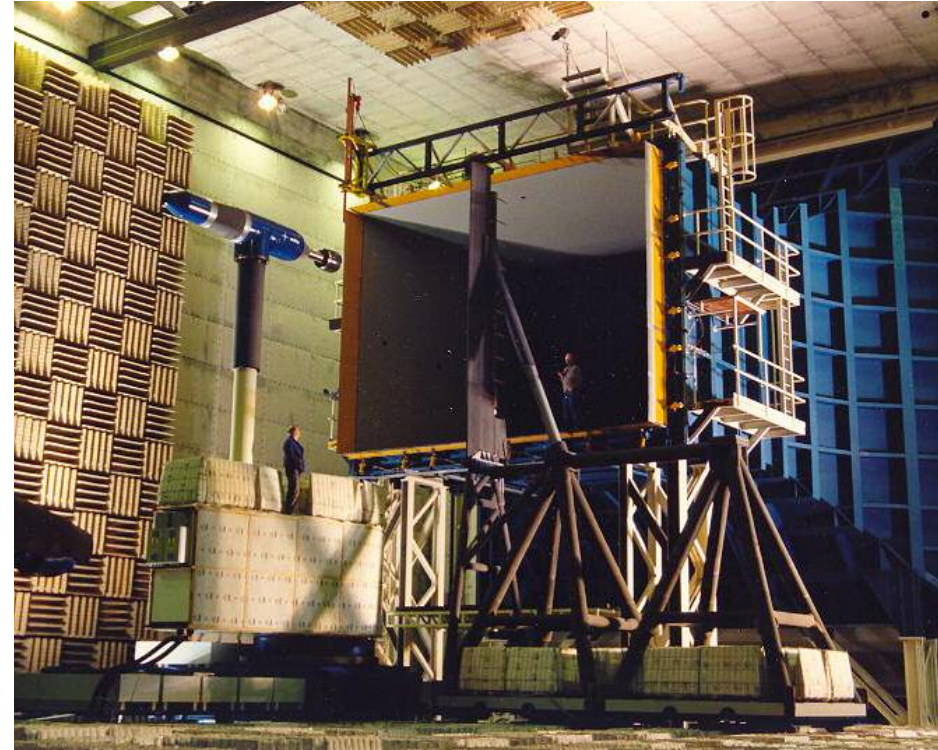


## CRISP Modell in Windkanaltests



Niedergeschwindigkeitswindkanal DLR Göttingen  
Fan/Gondel-Wechselwirkung

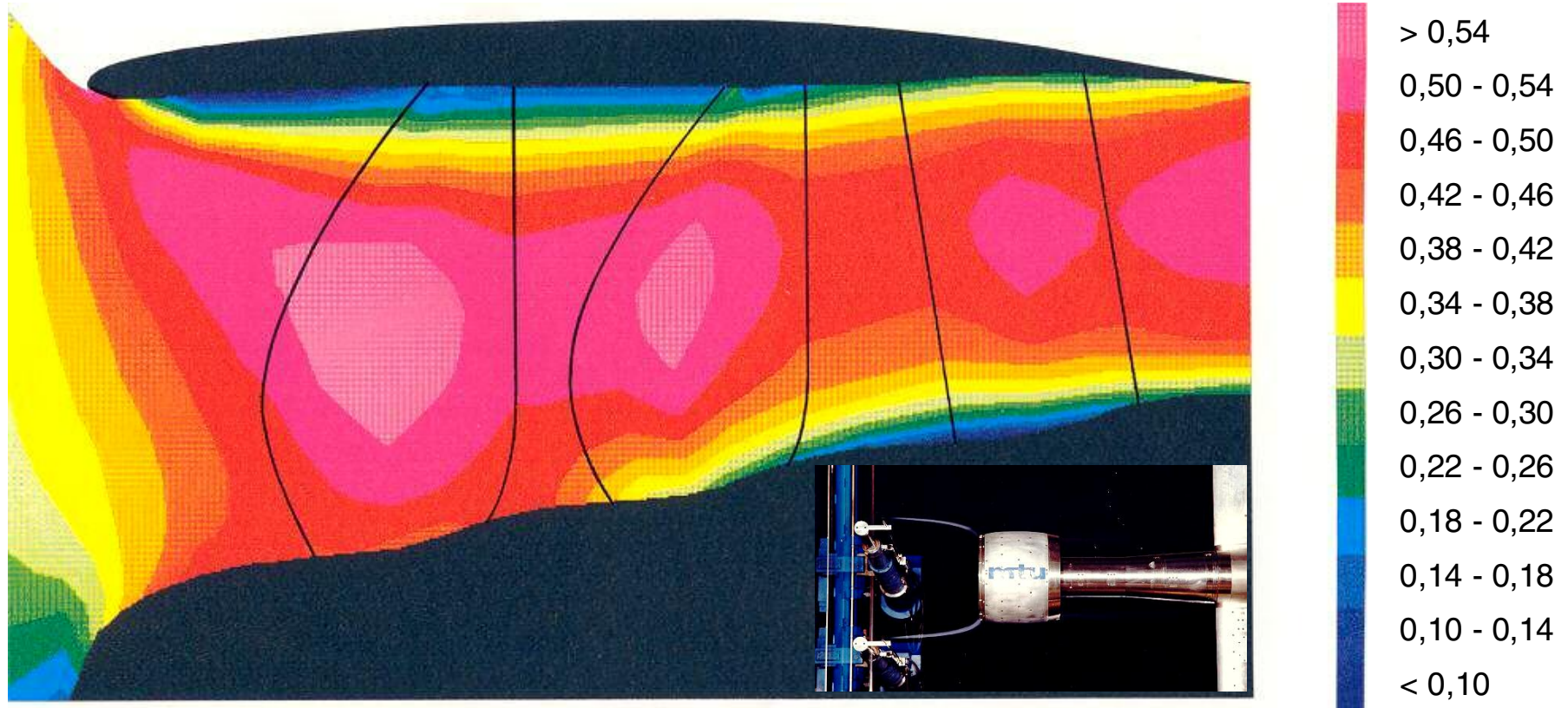
- Start
- Umkehrschub
- Windmilling



Deutsch-Niederländischer Windkanal (DNW)  
Fan/Gondel-Wechselwirkung

- Start
- Akustik

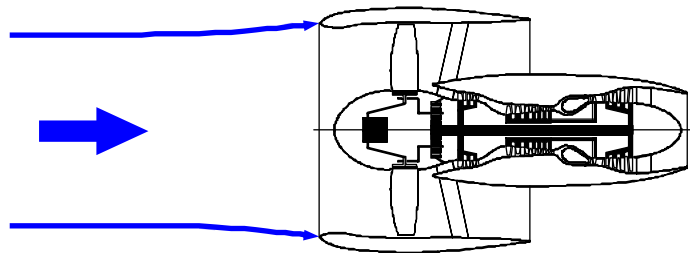
## CRISP Meridian-Mach-Zahl bei Start-Bedingungen



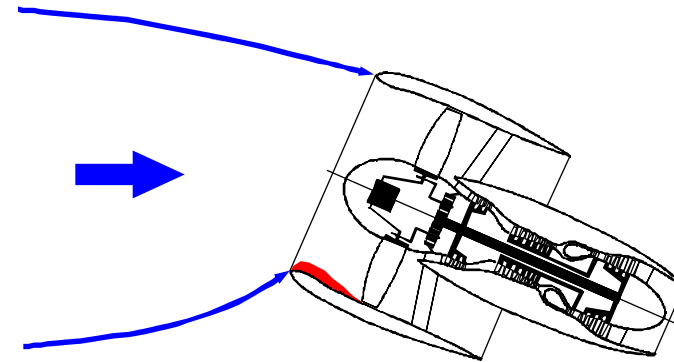
CRISP Nationales Modell Standard 1 Windkanalbau Versuchsanalyse

Drehzahl: 104,5%    Staffelung: -10°/-10°    Mach-Zahl: 0,04    Anstellung: 0°

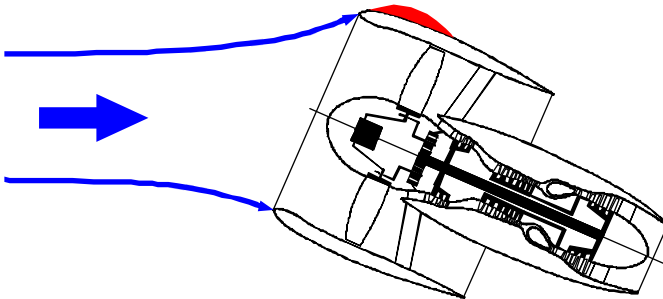
## Wichtige Betriebspunkte eines Hochbypass-Triebwerks



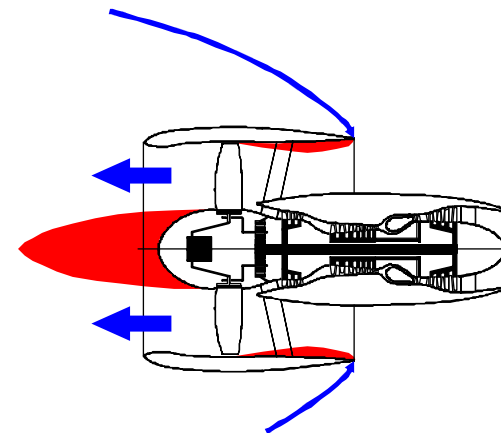
**Reiseflug**



**Start**

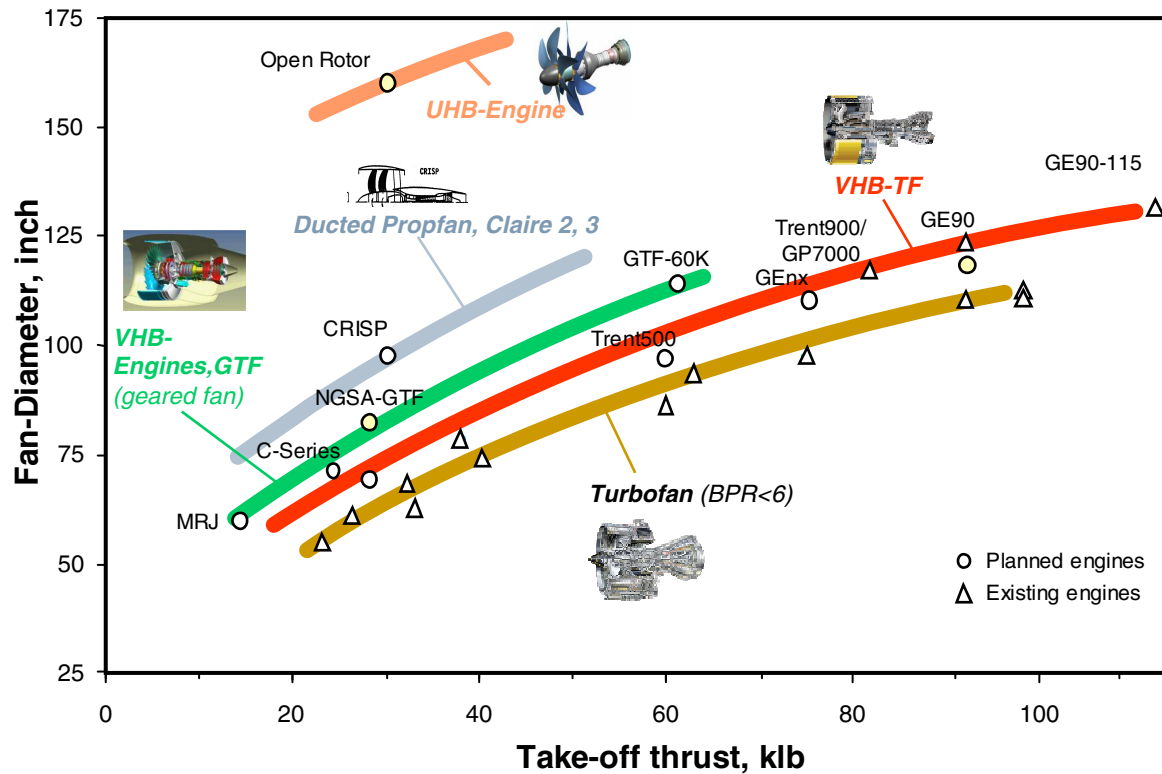


**Windmilling**

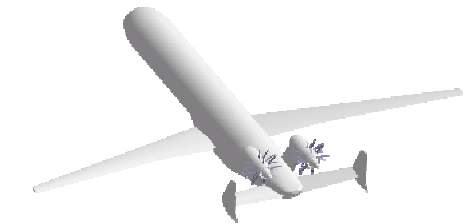


**Umkehrschub**

# Die neuen Hochbypass-Konzepte erfordern einen signifikant größeren Fandurchmesser



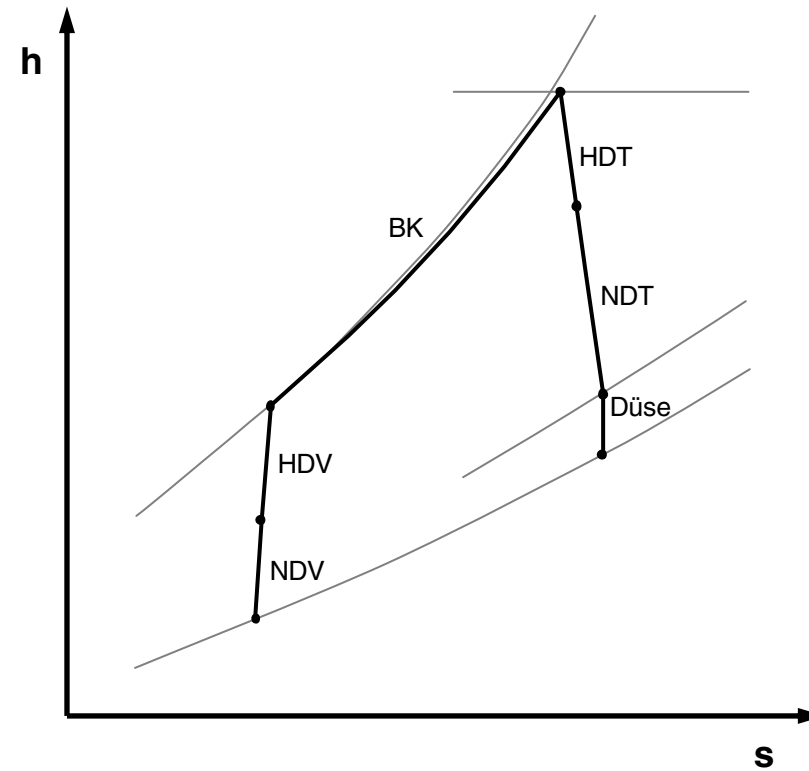
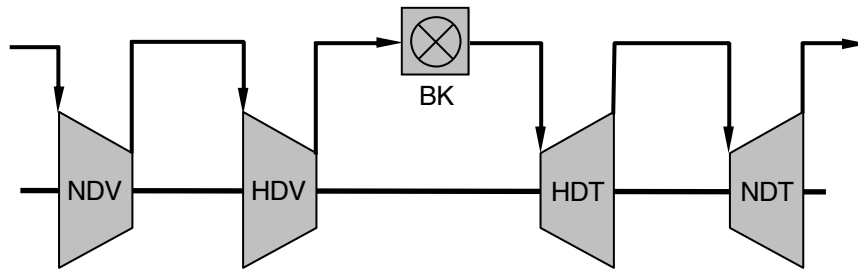
→ Eventuell neue Flugzeugarchitekturen notwendig



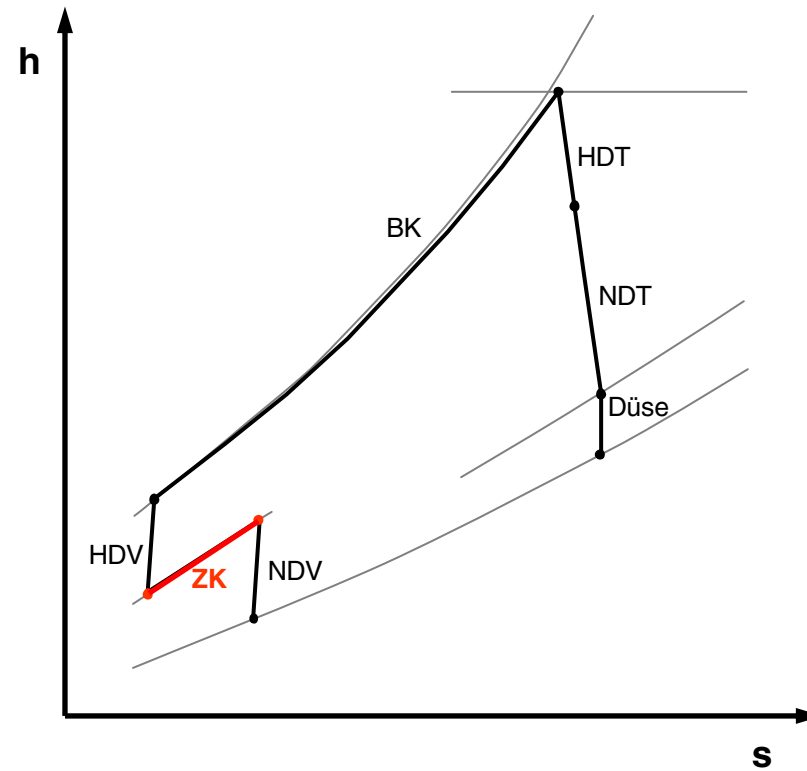
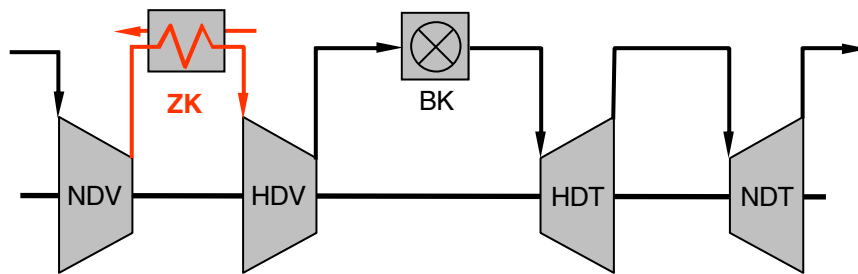
# **Triebwerkskonzepte mit verbessertem thermischen Wirkungsgrad**

# Verbesserung des thermischer Wirkungsgrads

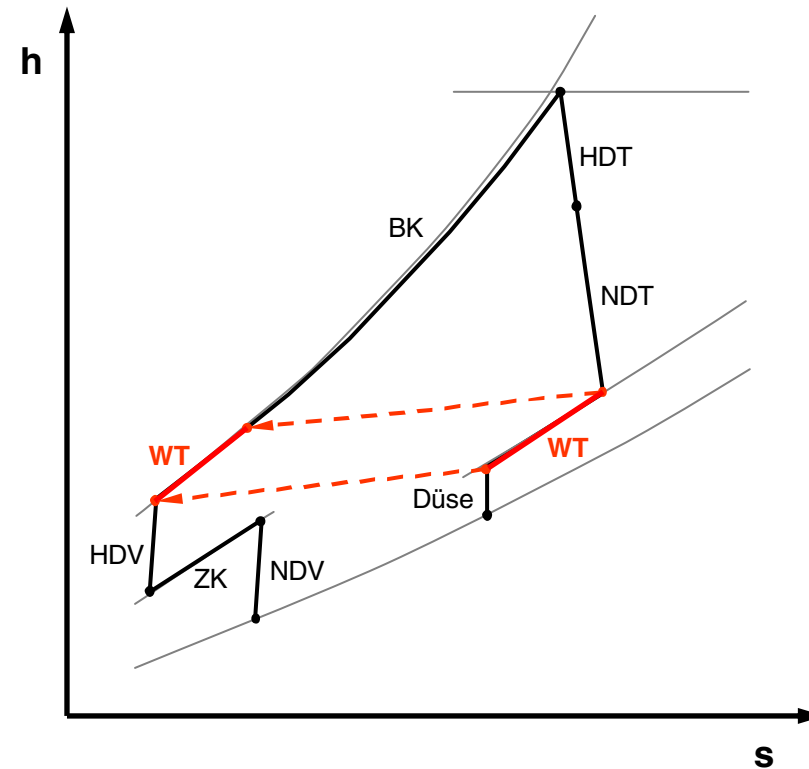
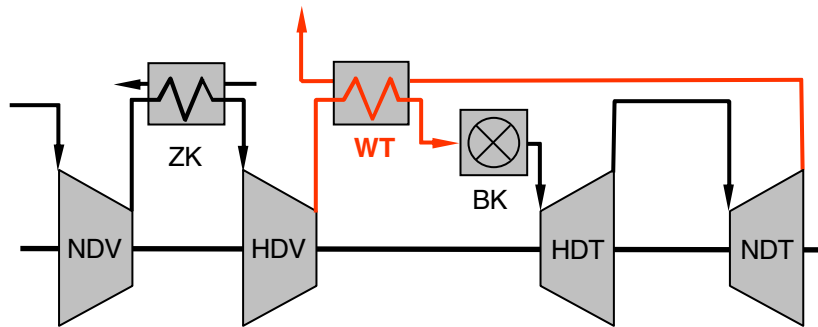
## Einfacher Gasturbinenprozess



# Verbesserung des thermischer Wirkungsgrads Triebwerk mit Zwischenkühler



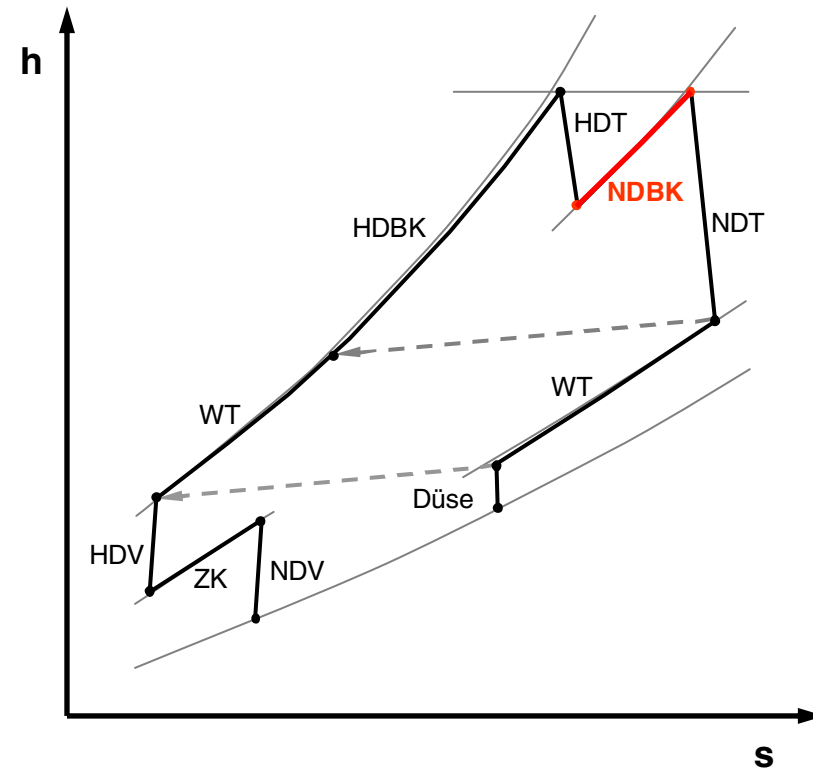
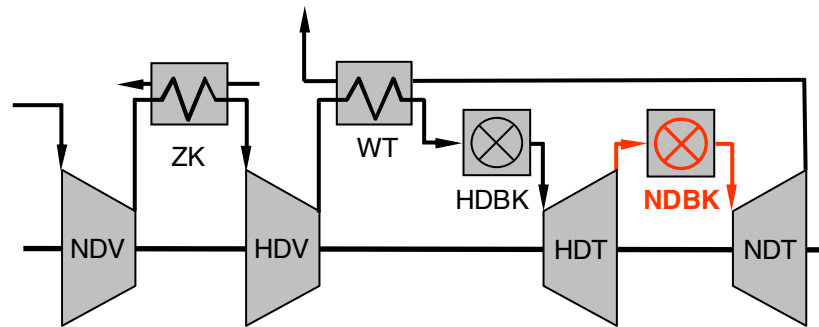
# Verbesserung des thermischer Wirkungsgrads Triebwerk mit Zwischenkühler und Abgaswärmetauscher



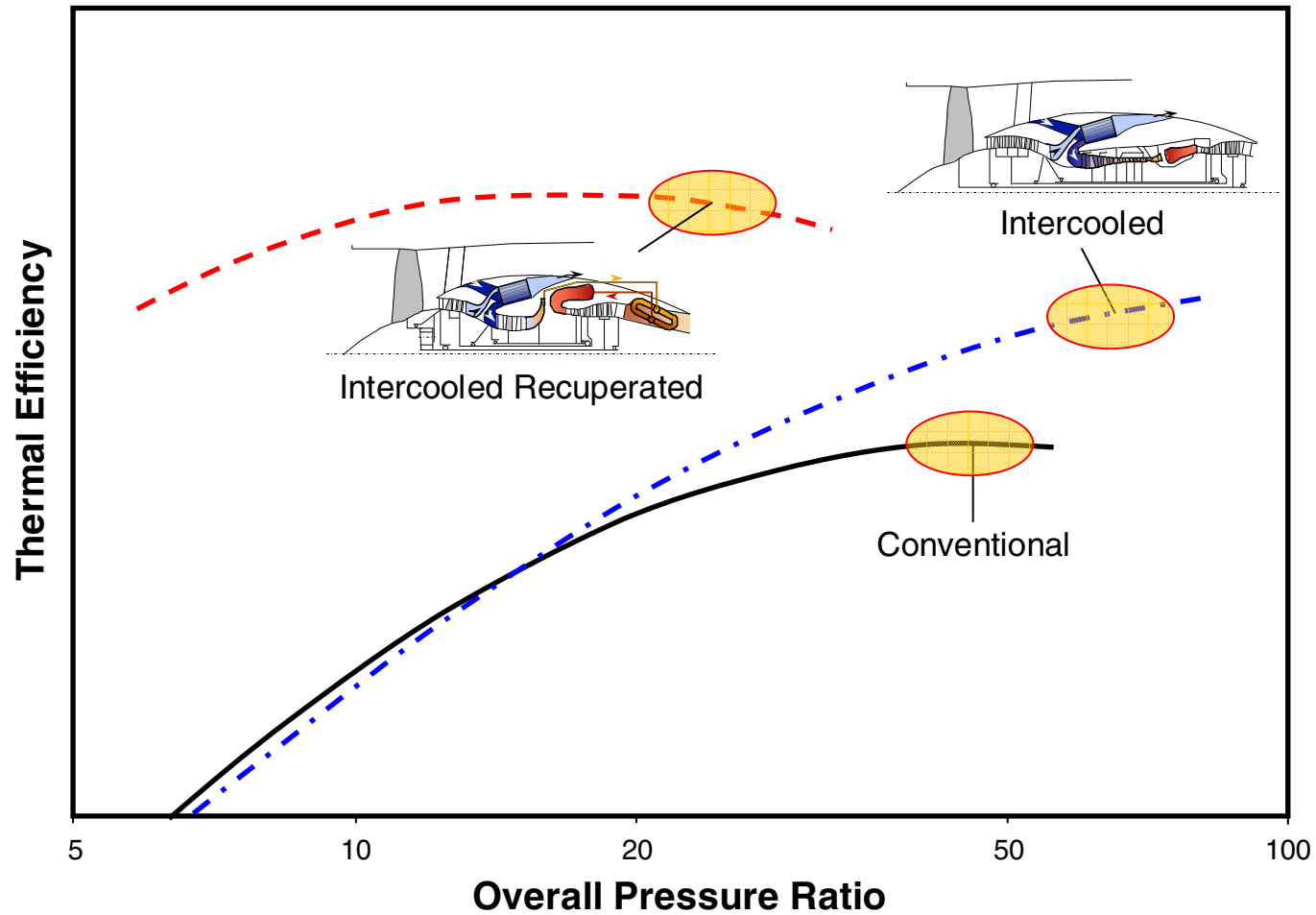


## Verbesserung des thermischer Wirkungsgrads

Triebwerk mit Zwischenkühler, Zwischenüberhitzung und Abgaswärmetauscher



# Thermischer Wirkungsgrad verschiedener Kreisprozesse



## Intercooled Core

### Beschreibung

- Zwischenkühler zwischen Niederdruck- und Hochdruckverdichter
- konventioneller Fan
- hohes Gesamtdruckverhältnis  $> 70$

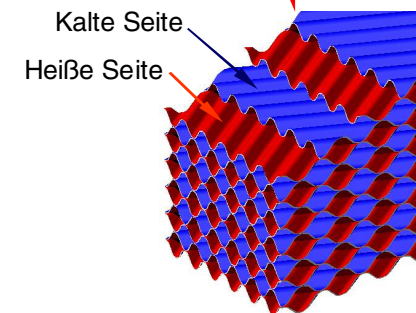
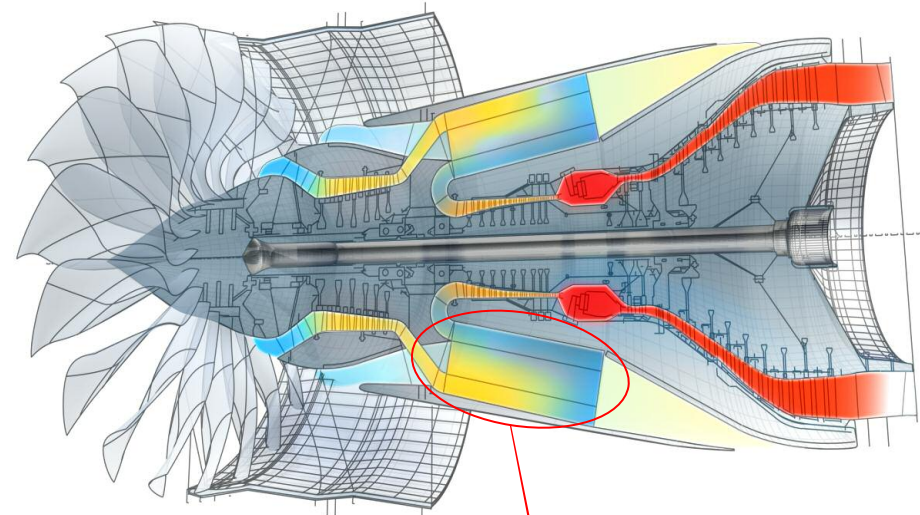
### Vorteile / Ziele

- hoher thermischer Wirkungsgrad
- 20% reduzierter Brennstoffverbrauch \*
- Technologiereife ab 2025

### Technologische Herausforderungen

- Integration des Zwischenkühlers
- niedrige Druckverluste in Luftführung und Zwischenkühler
- leichter und zuverlässiger Zwischenkühler
- effizienter Verdichter für sehr hohe Drücke
- Schadstoffemissionen

\* im Vergleich zum Jahr 2000 Triebwerk



Wärmetauscher

## Intercooled Recuperated Core

### Beschreibung

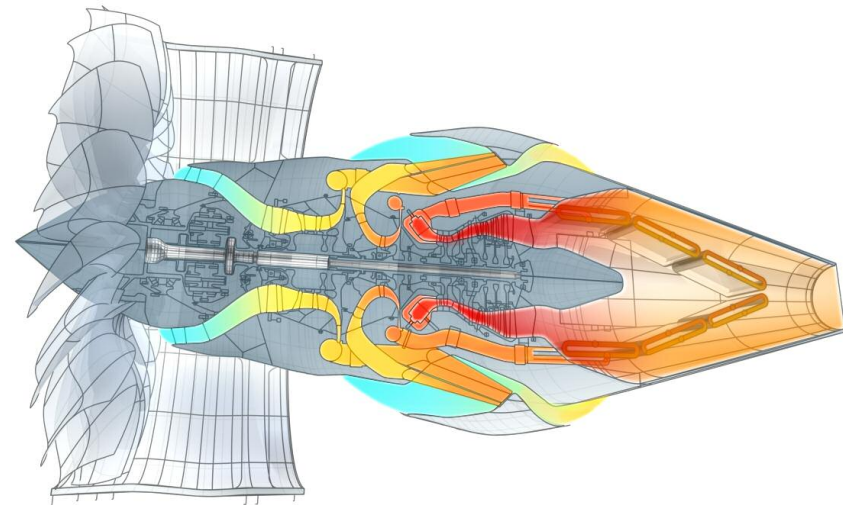
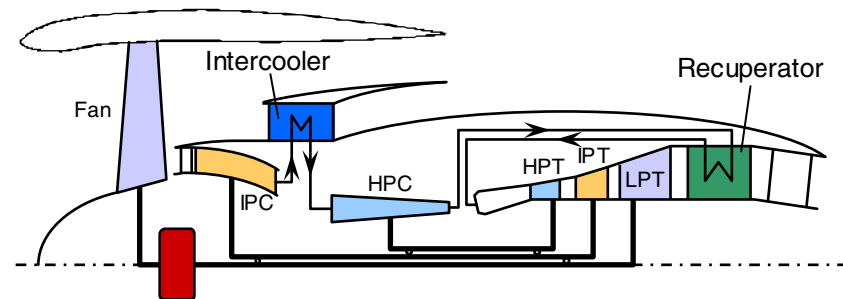
- Zwischenkühler zwischen Niederdruck- und Hochdruckverdichter
- Abgaswärmetauscher
- niedriges Gesamtdruckverhältnis  $\sim 25$

### Vorteile / Ziele

- sehr hoher thermischer Wirkungsgrad
- geringe  $\text{NO}_x$ -Emissionen
- 30% reduzierter Brennstoffverbrauch \*
- Technologiereife ab 2035

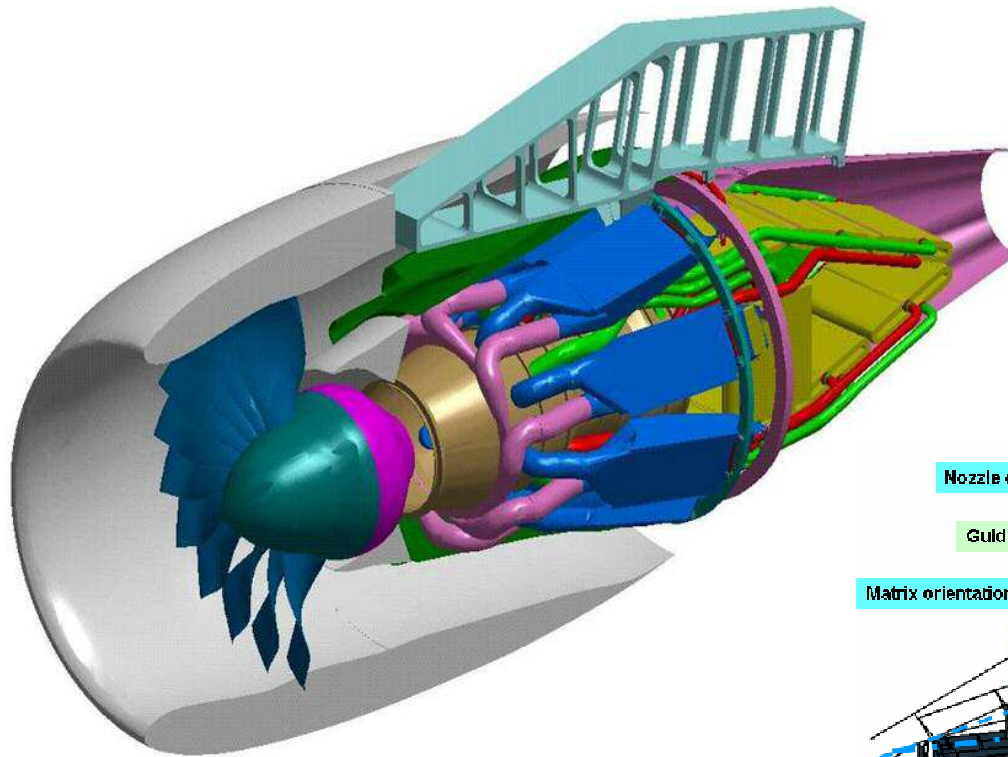
### Technologische Herausforderungen

- Integration von Zwischenkühler und Abgaswärmetauscher
- niedrige Druckverluste in Luftführung, Zwischenkühler und Abgaswärmetauscher
- leichter und zuverlässiger Wärmetauscher

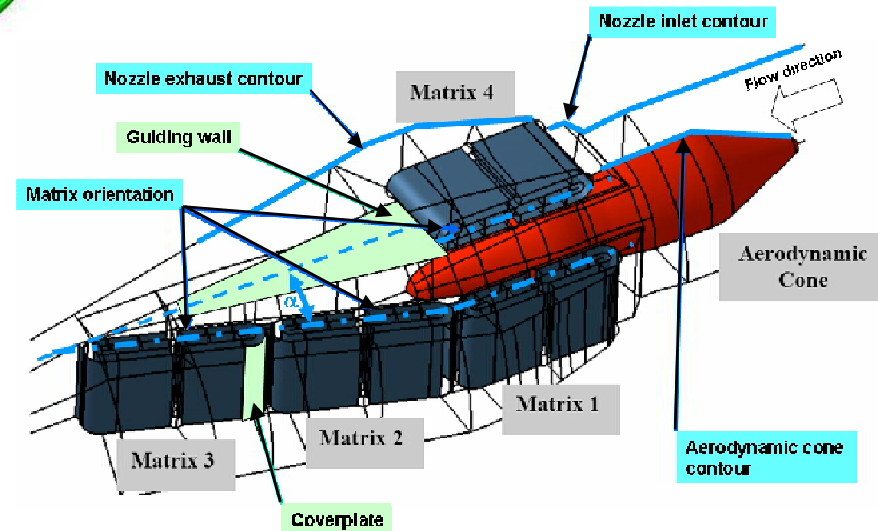


\* im Vergleich zum Jahr 2000 Triebwerk

# Intercooled Recuperated Core



Anordnung der Wärmetauschermatrizen



## Langfristkonzept - Ultra Efficient Propulsion

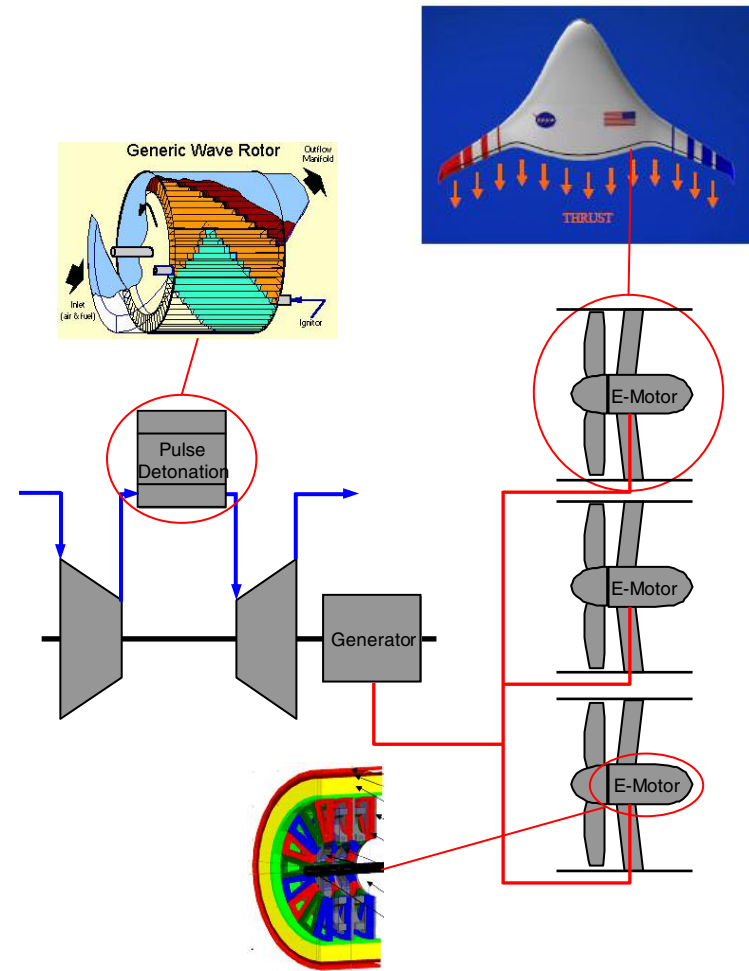
### Beschreibung

- neuer Gasturbinenkreisprozess mit sehr hohem thermischen Wirkungsgrad
  - Zwischenkühlung, Zwischenüberhitzung und Abgaswärmetauscher
  - Turbomaschinen Niederdrucksystem mit Freikolben Gaserzeuger
  - Turbomaschinen Niederdrucksystem mit Pulse Detonation Gaserzeuger
- Schuberzeugung mittels verteilter integrierter Fans zur Reduktion des Flugzeugwiderstands
- elektrisch angetriebene Fans
- Stromerzeugung durch Gasturbine/Generator mit Unterstützung durch Batterie, Ultrakondensator oder Brennstoffzelle

### Vorteile / Ziele

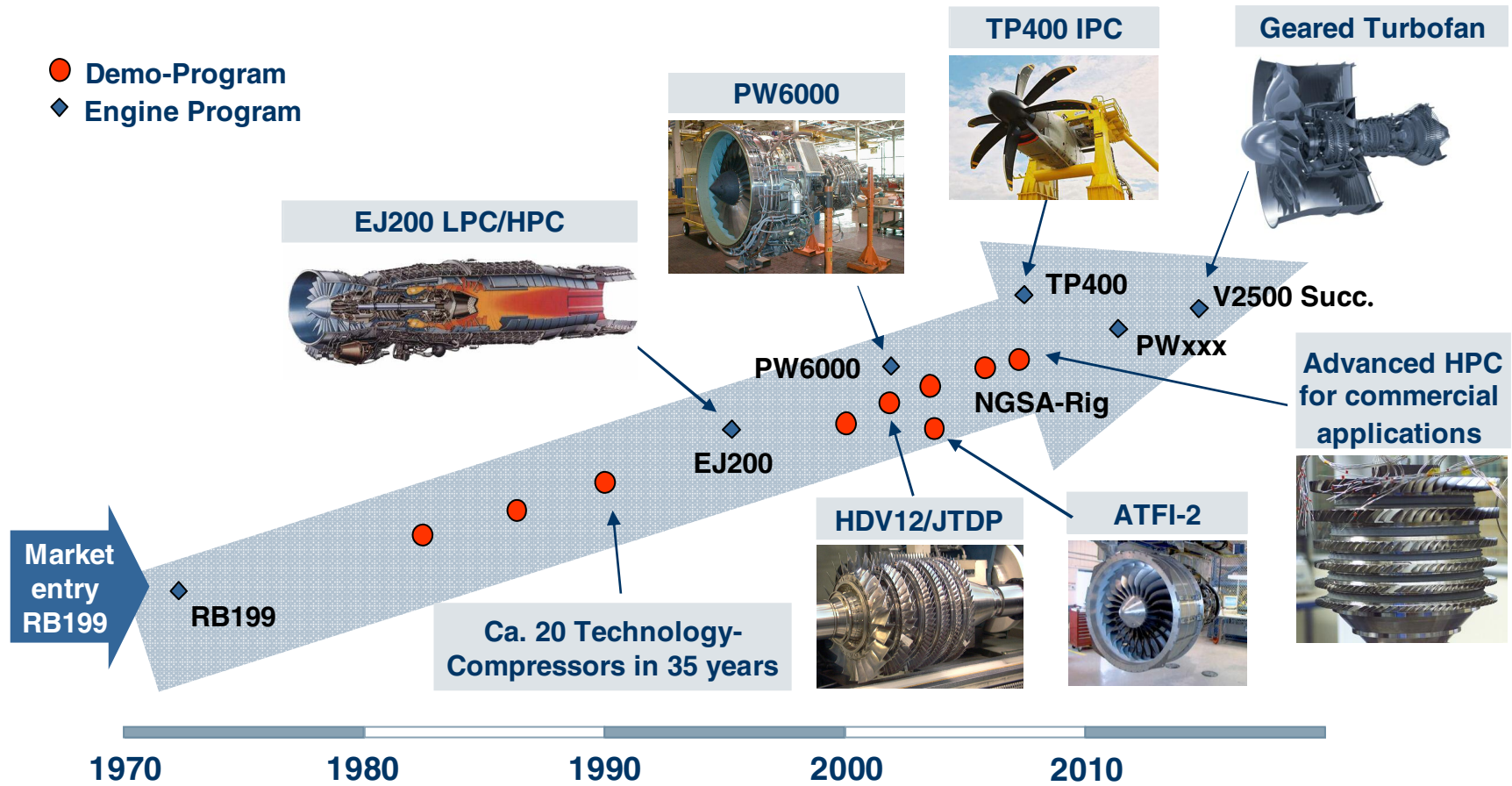
- sehr hoher thermischer Wirkungsgrad
- reduzierte Flugzeugwiderstände
- 40% reduzierter Brennstoffverbrauch \*
- deutliche Lärmreduktion
- Technologiereife ab 2050

\* im Vergleich zum Jahr 2000 Triebwerk



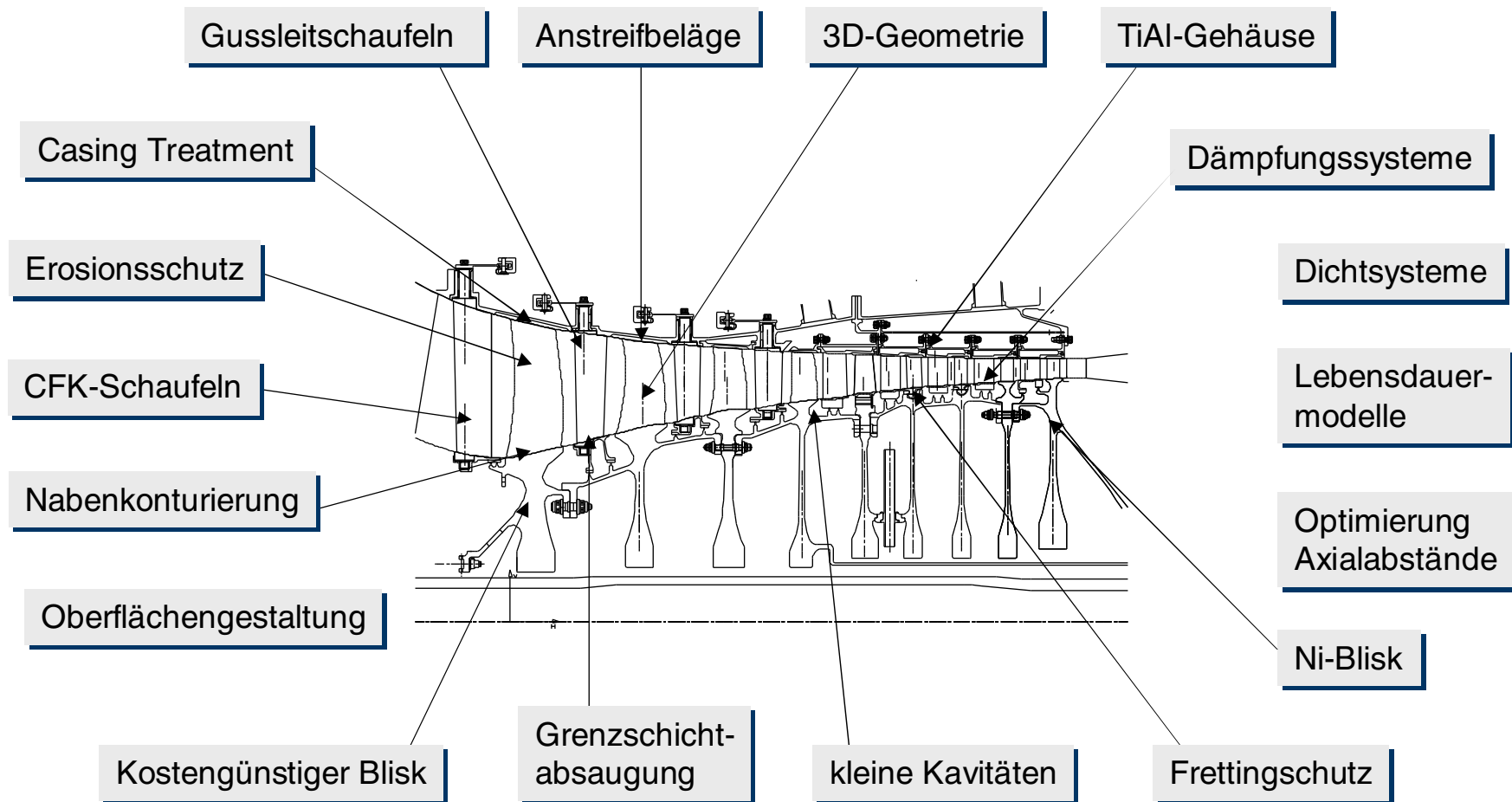
# Technologieentwicklung

# 30 Jahre Erfahrung im Bau von Triebwerksverdichtern

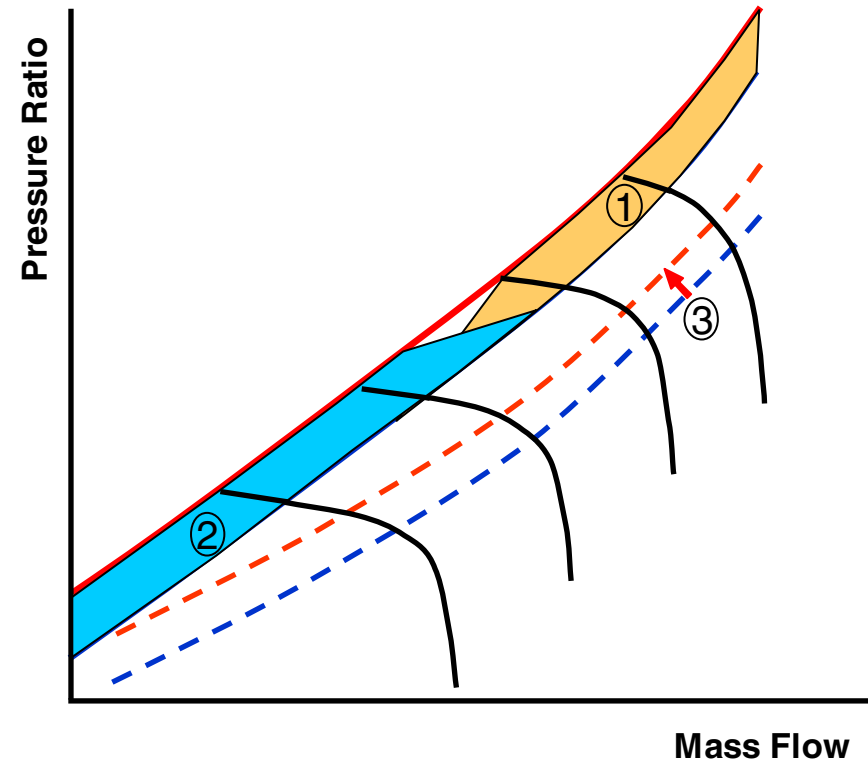
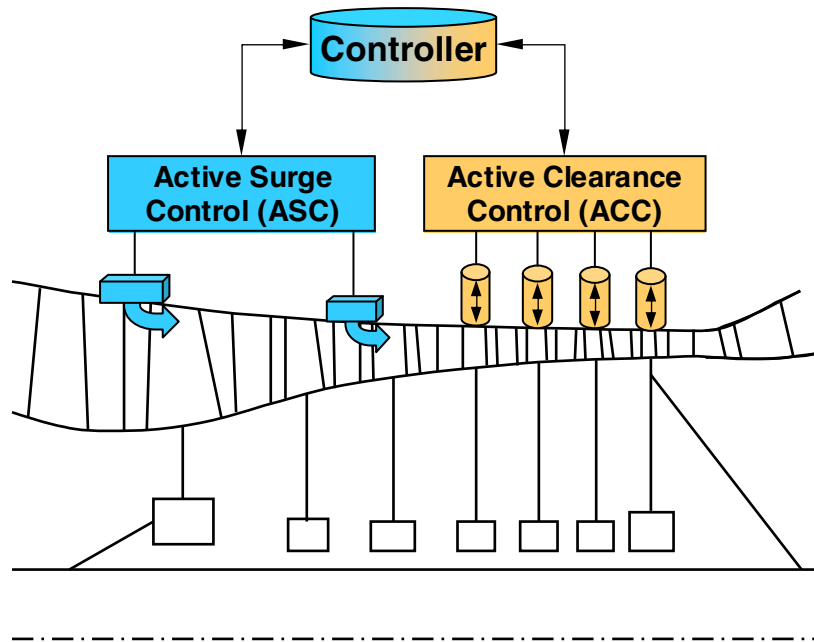




# Verdichtertechnologien



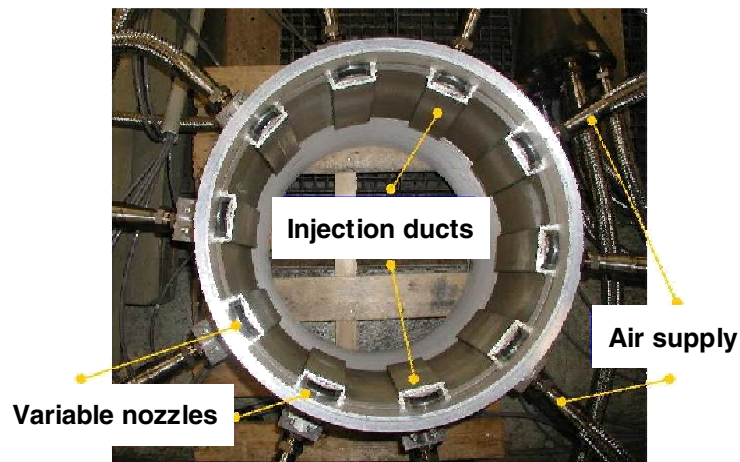
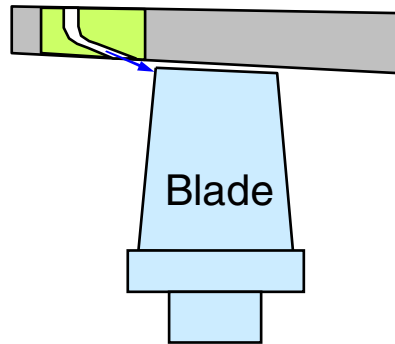
## Beispiel - Intelligenter Verdichter



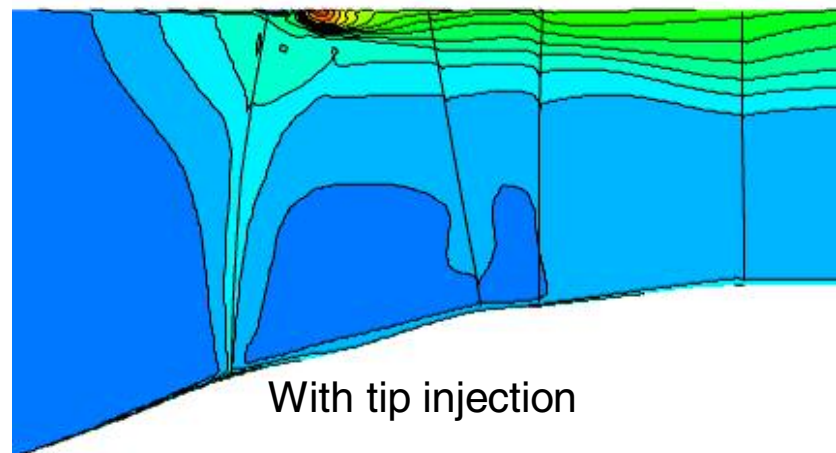
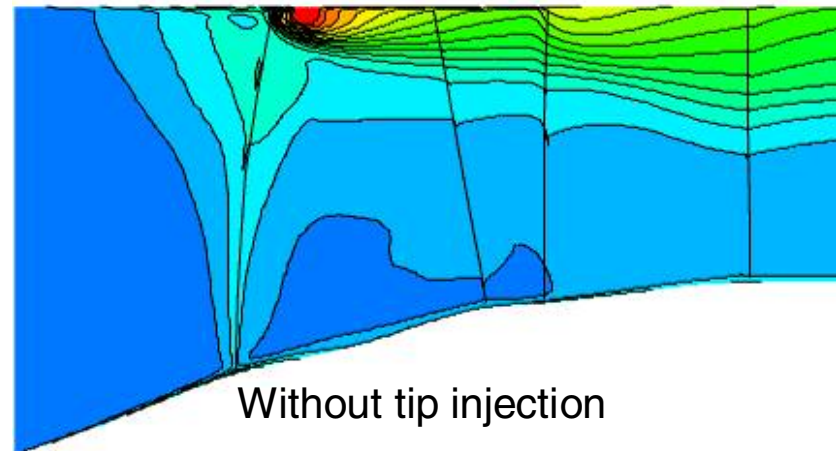
Advantages of increased surge margin

- higher overall pressure ratio
- reduced number of stages
- reduced blade count

## Beispiel - Intelligenter Verdichter - Active Surge Control

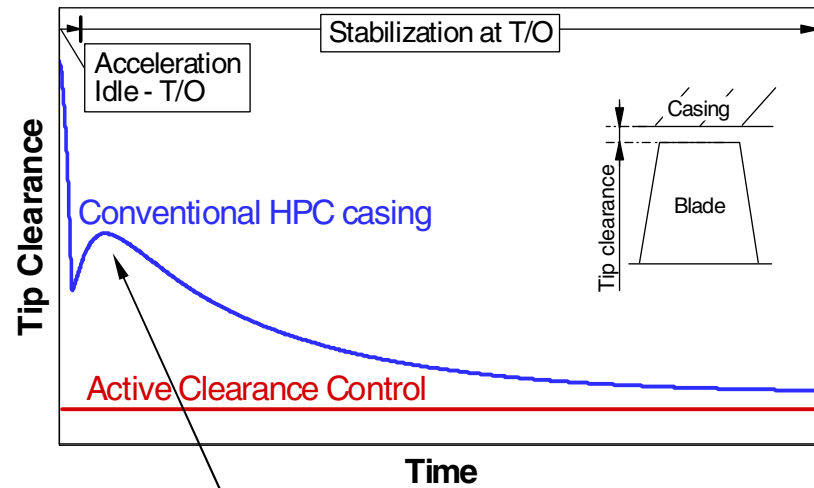


Entropy distribution close to surge point



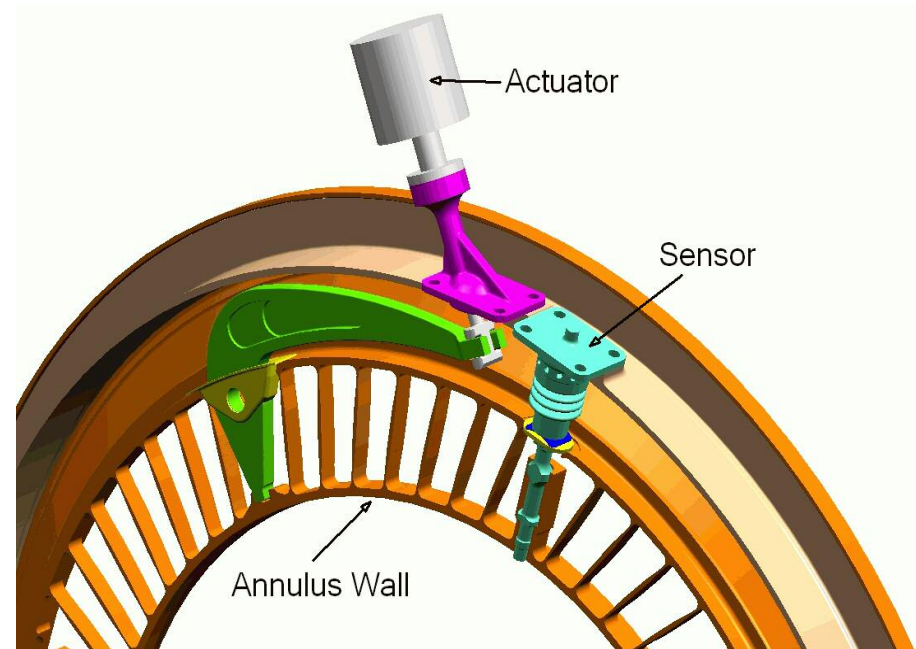
# Beispiel - Intelligenter Verdichter - Active Clearance Control

Tip clearance calculation

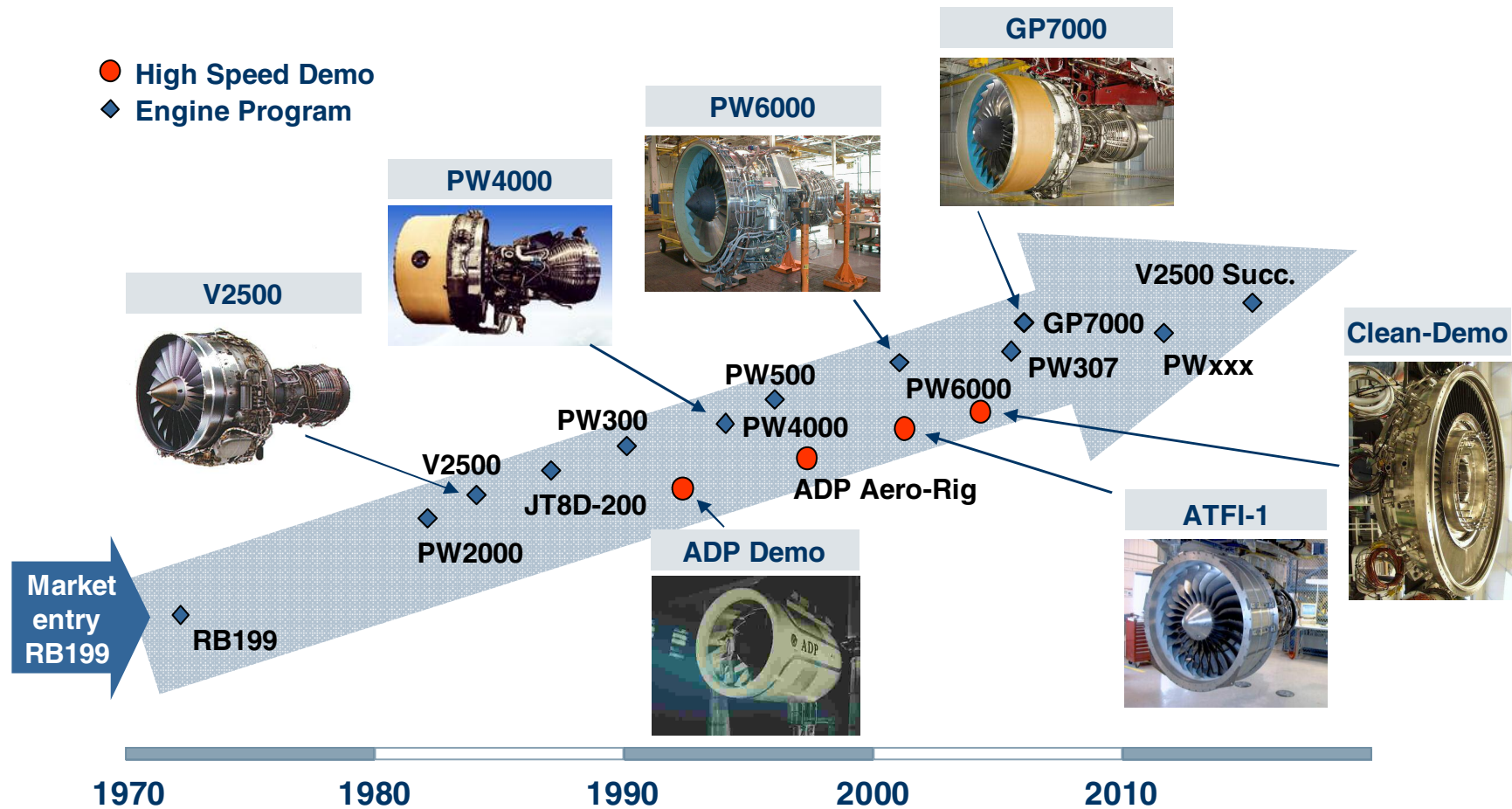


Critical surge at takeoff rotation

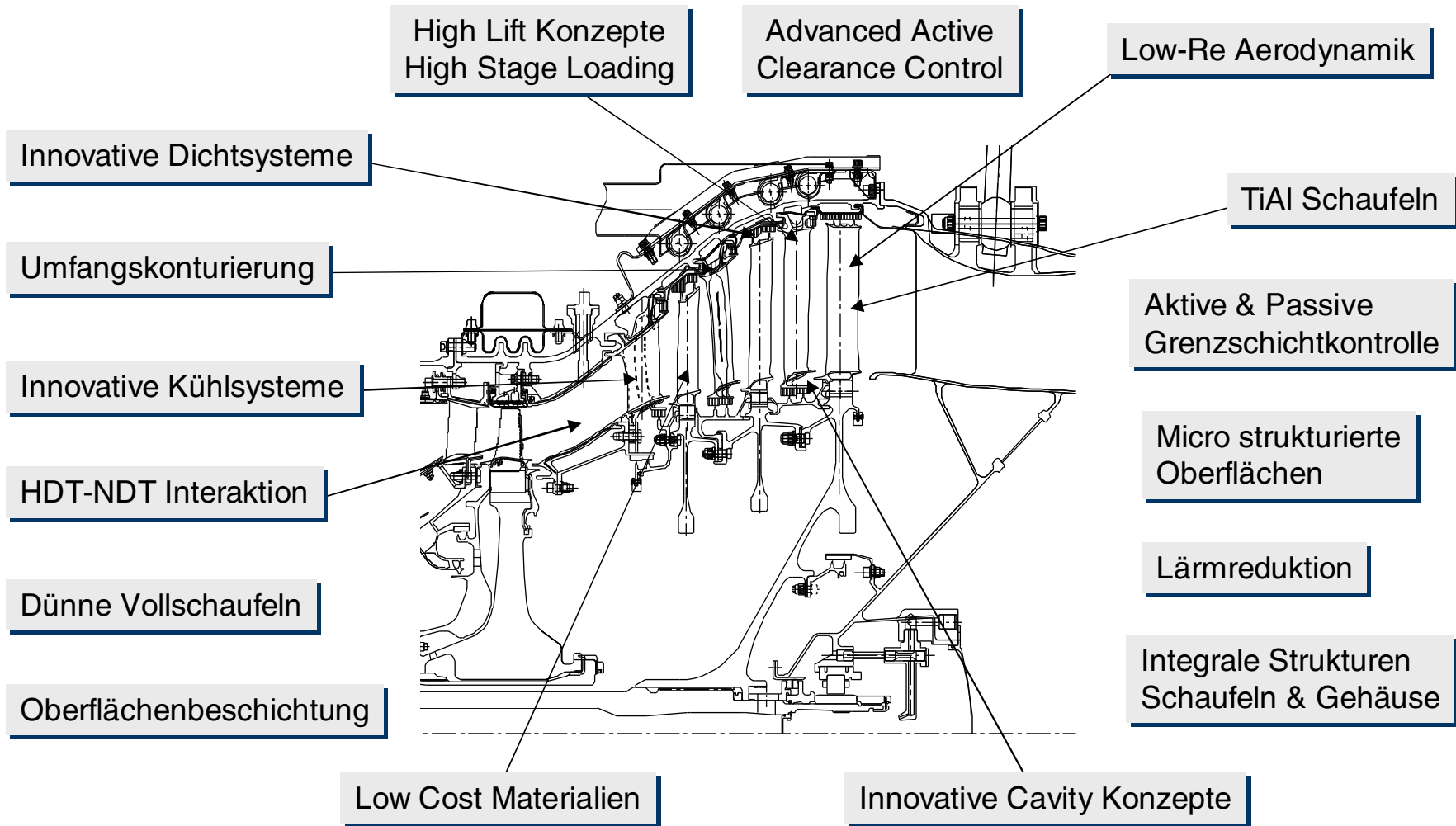
Mechanical Active Clearance Control



# 30 Jahre Erfahrung im Bau von Niederdruckturbinen



# Turbinentechnologien



## Beispiel - Lineares Reibschweissen (LRS) von Blisken



+



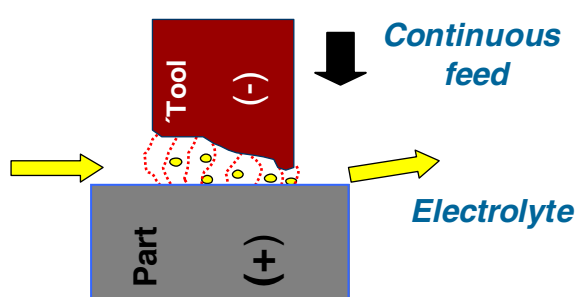
EJ200 All-BLISK Fan  
Stufe 1&2 hergestellt mit  
LRS



Lineare Reibschweissanlage bei MTU

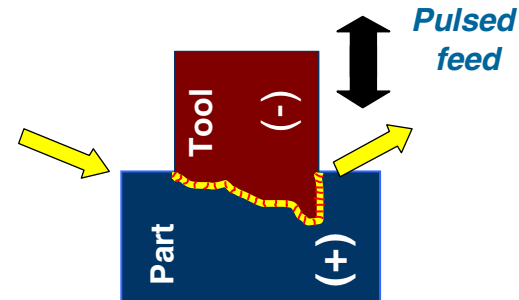
- Reibschweissen durch oszillierende Bewegung (Druck: 100-150 MPa, Frequenz: 25-35 Hz, Amplitude: 1,3-2 mm)
- Neuteile-Herstellung und Reparatur
- Kostengünstige Herstellung großer Blisken
- Hervorragende Schweissqualität, sehr gute HCF- und LCF-Festigkeit

## Beispiel - Precise Electro-Chemical Machining (PECM)



### Konventionelles ECM - Vorbearbeitung

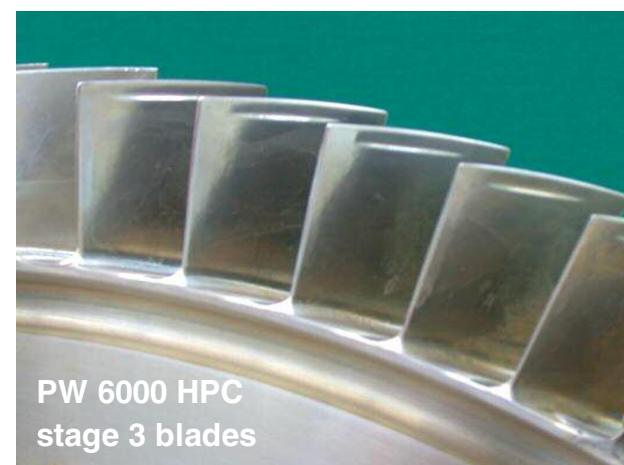
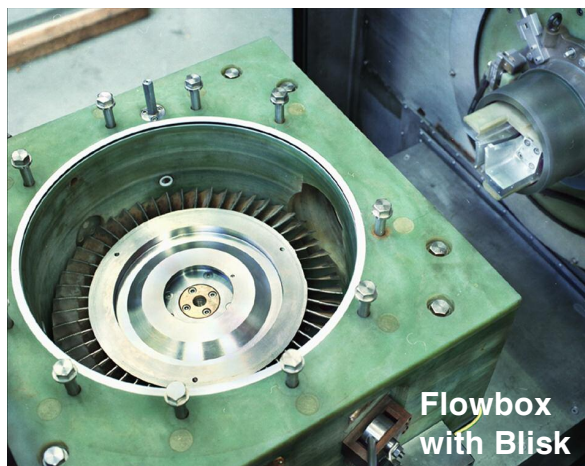
- großer Spalt
- geringe Genauigkeit
- hohe Abtragrate



### Precise ECM - Endbearbeitung

- kleiner Spalt
- verbesserte Genauigkeit
- reduzierte Abtragrate

PECM  
BLISK  
Fertigung

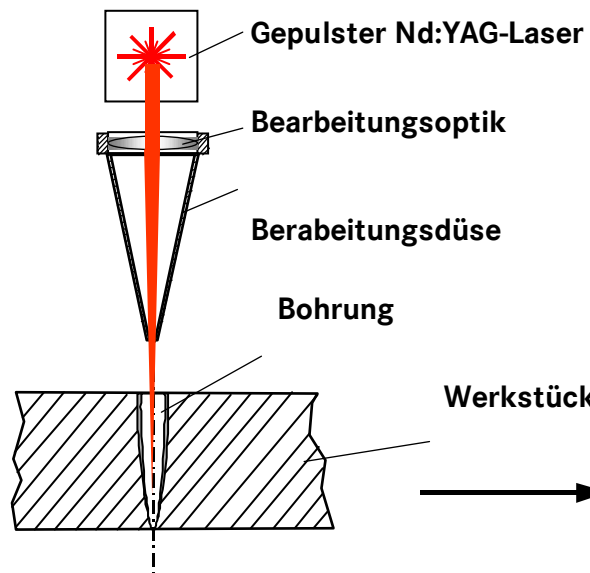




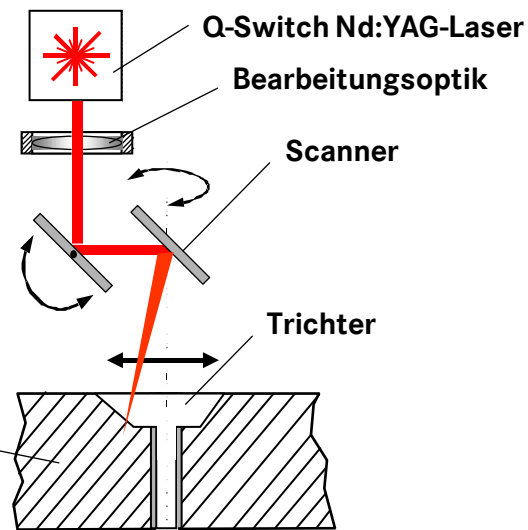
## Beispiel - Laserbearbeitung

### Kombination von Laserjet-Bohren und -Abtragen

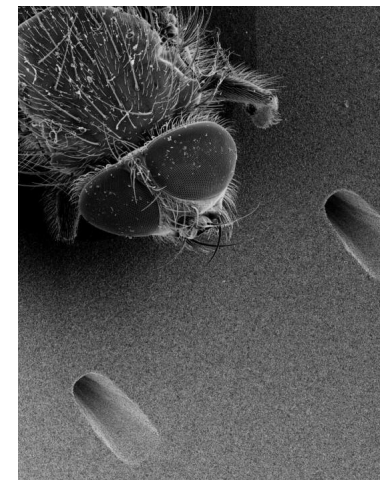
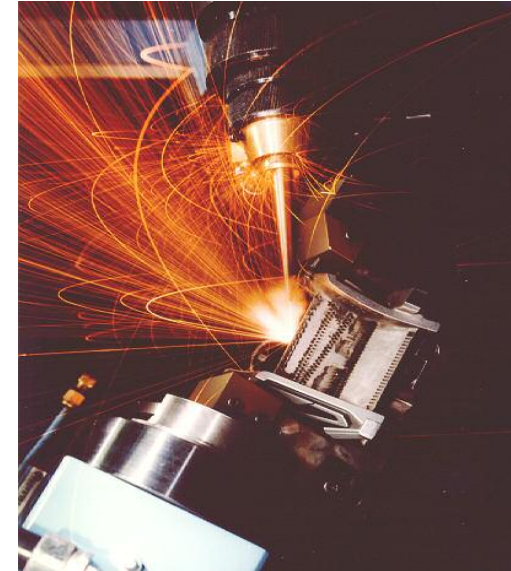
#### Step 1: Laserjet-Bohren



#### Step 2: Laserjet-Abtragen

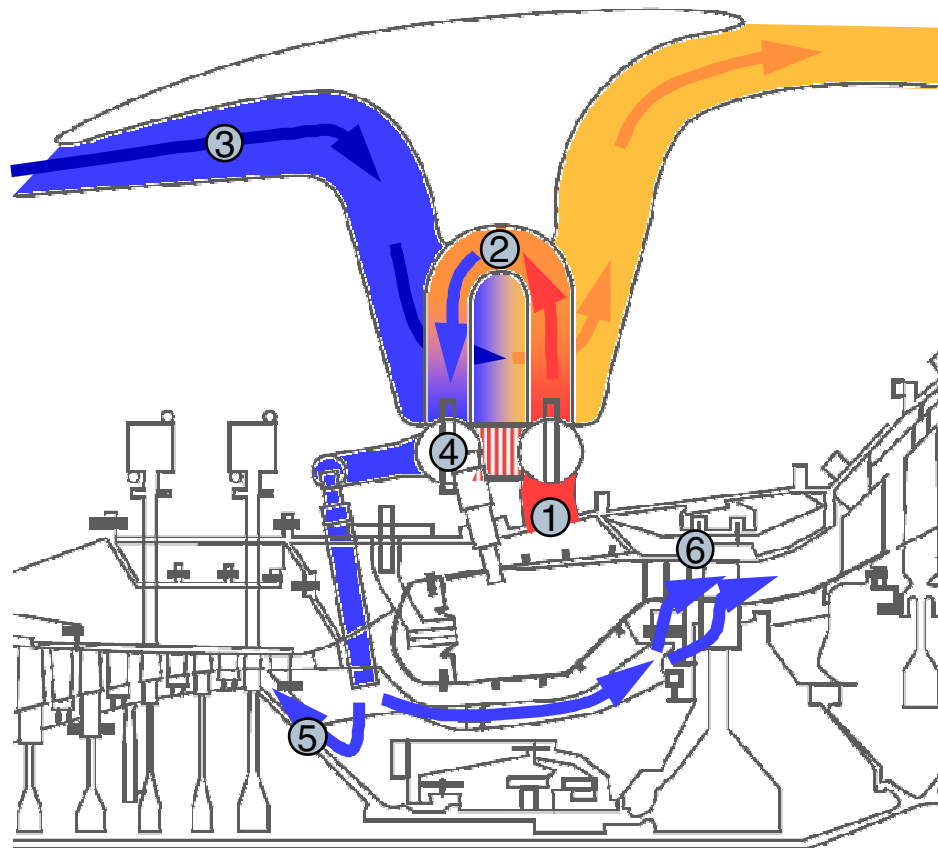


- Verfahren hoher Flexibilität, angepasst für Kühlfilm-Formbohrungen mit komplexer Geometrie
- Prozessmonitoring & Regelung durch optische Sensoren
- Integrierbar in die Produktionslinie



Durch Laserabtragen hergestellter Trichter

## Beispiel - Kühlluftkühlung (Active Cooling Air Cooling)

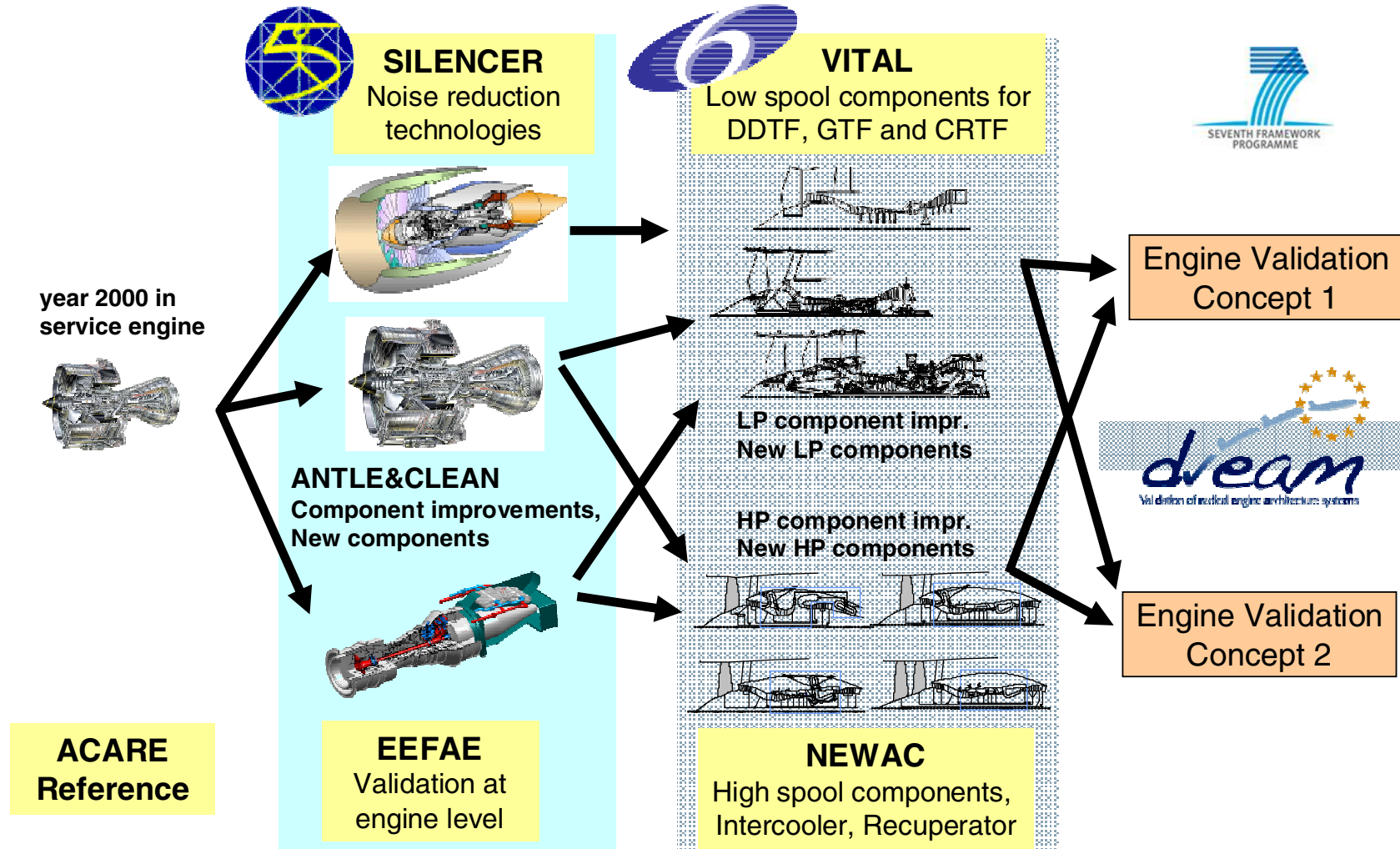


- Reduktion des Kühlluftbedarfs durch Kühlung der Kühlluft
- Verwendung von gekühlter Kühlluft nur bei Take Off
- Abschalten der Kühlluftkühlung im Reiseflug zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades (niedrige Kühlluftmenge, keine Kühlverluste)

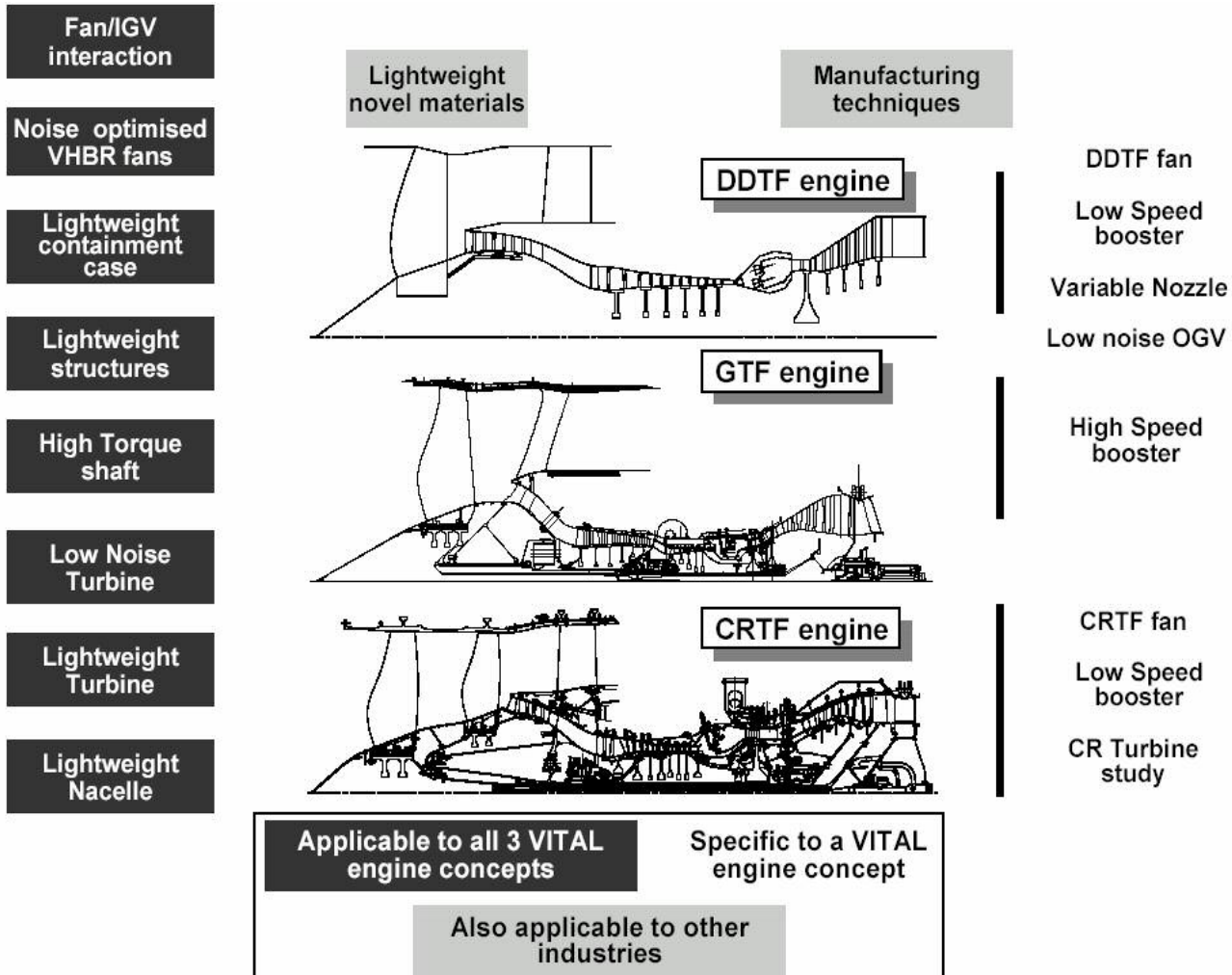
- 1 Combustor case
- 2 Heat exchanger
- 3 Bypass air
- 4 Valve
- 5 Compressor rear cone
- 6 HPT vane and blade

# Technologieprogramme

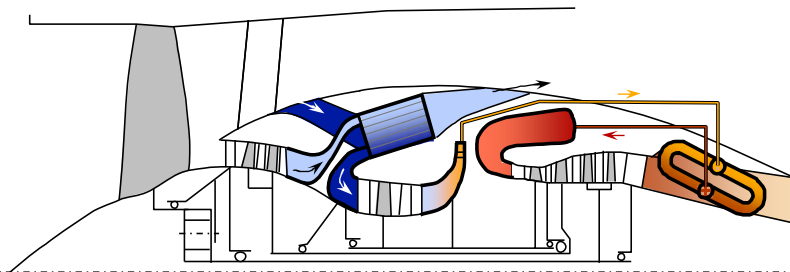
# Überblick EU Technologieprogramme



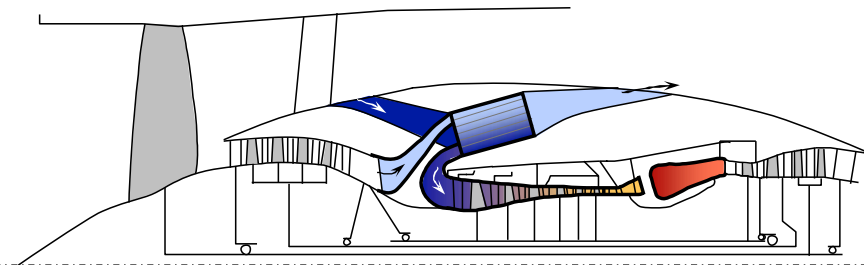
# VITAL Technology Activities & Engine Architectures



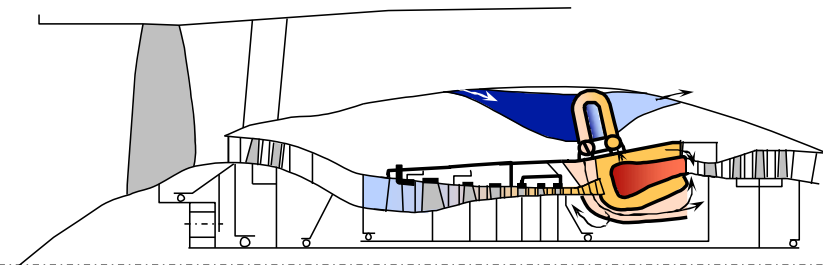
## NEWAC Core Concepts



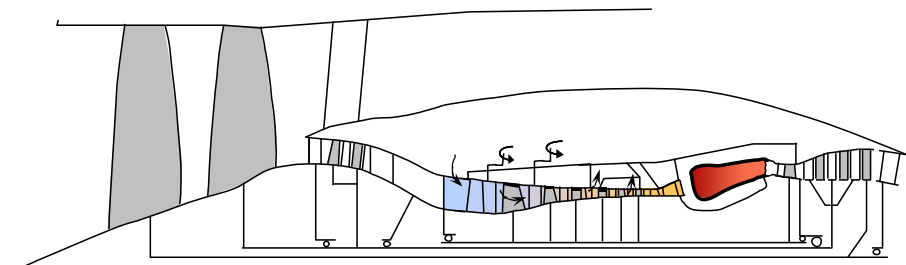
Intercooled Recuperative Core



Intercooled Core

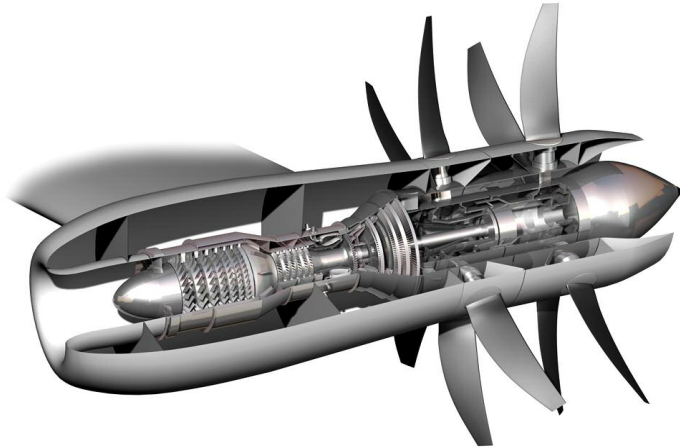


Active Core



Flow Controlled Core

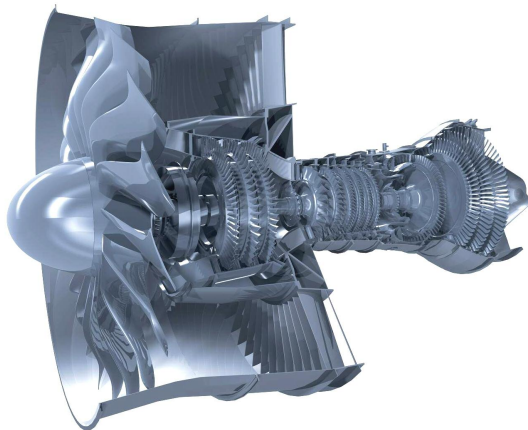
## DREAM



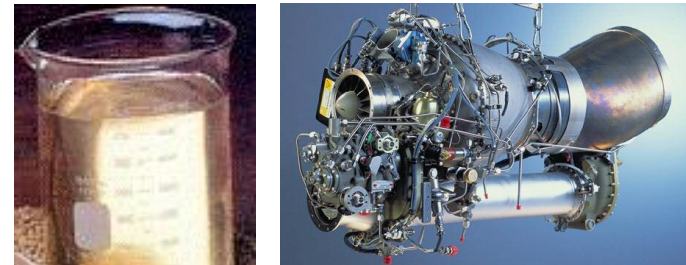
Geared Open Rotor



Direct Drive Open Rotor

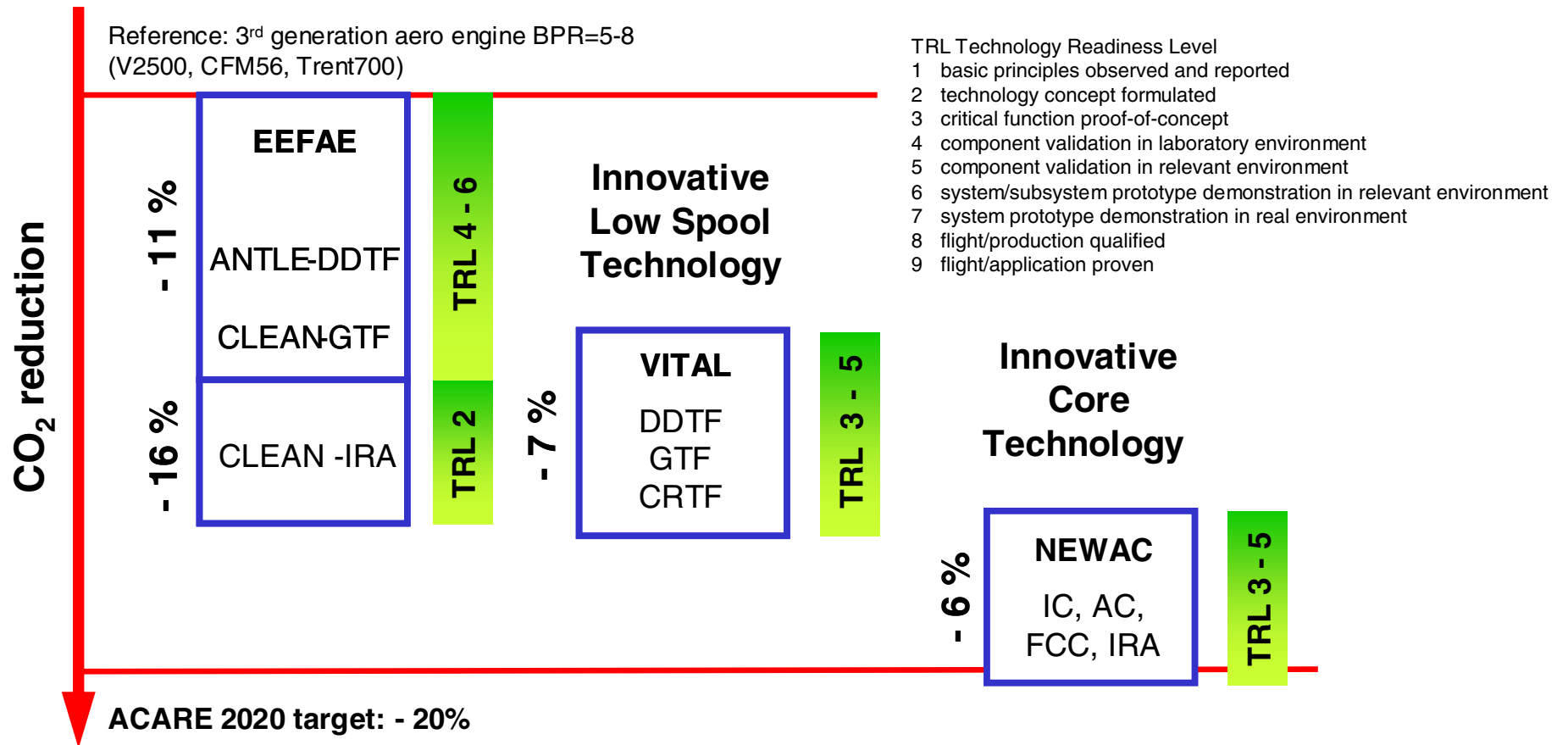


Innovative Systems



Alternative Fuels Demonstration

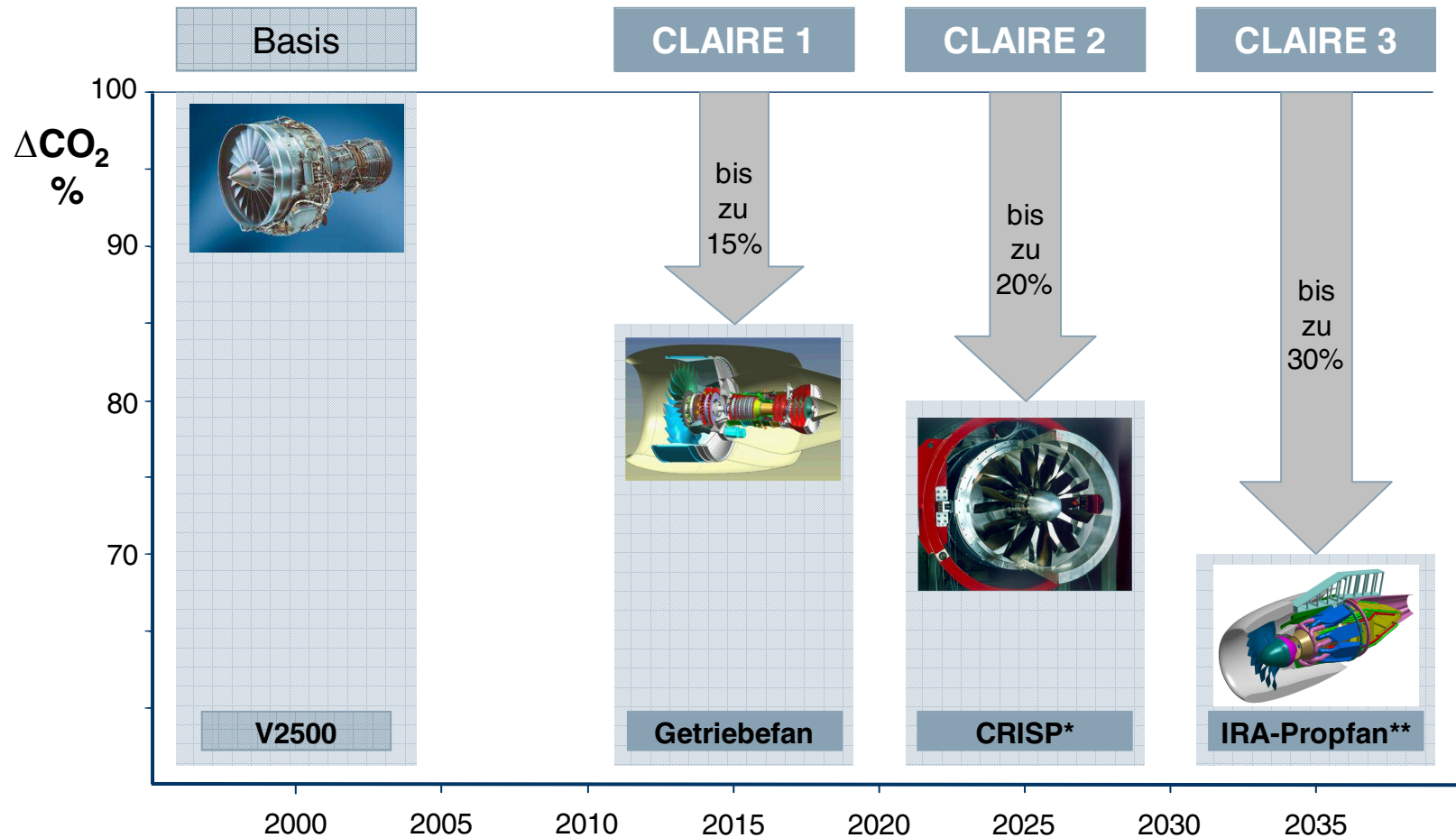
# CO<sub>2</sub> improvements - ACARE objectives versus EU technology projects





# MTU Technologie Program CLAIRE

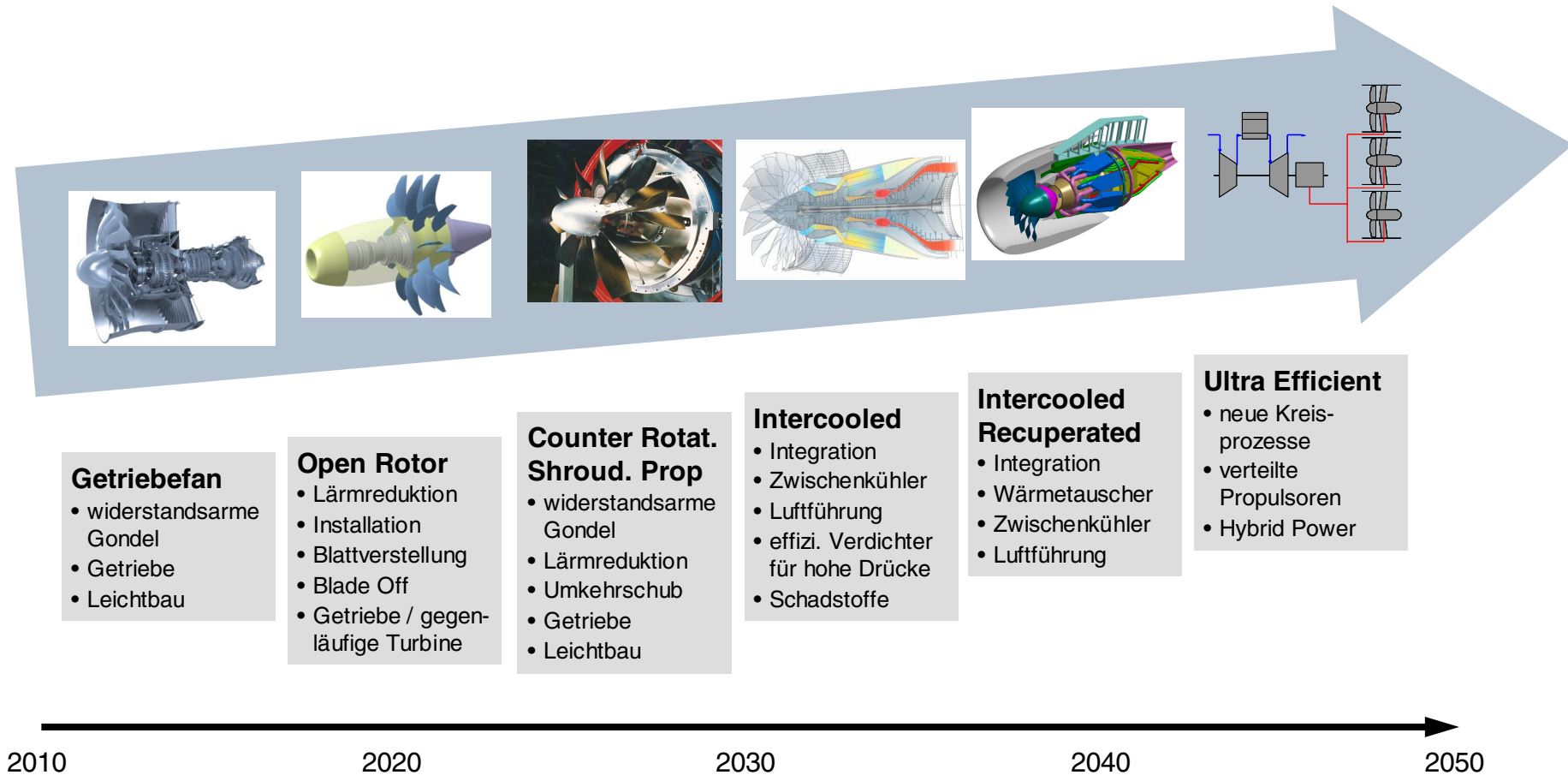
## CLean AIR Engine Technology Program



\* Counter-Rotating Integrated Shrouded Propfan

\*\* Intercooled Recuperated Aero Engine

# BDLI Roadmap Ökoeffizientes Fliegen - Antriebe



# Auswirkungen auf den Luftverkehr

## VISION 2020 Targets

ACARE (Advisory Council of Aeronautical Research in Europe)

### Safety & Security

- Reduce accident rate by 80%
- Zero successful hijack

### Quality & Affordability

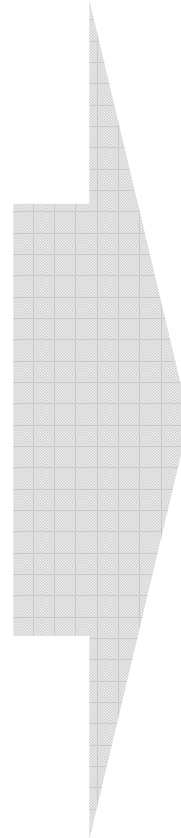
- Halve time to market
- Fall in travel charges

### Air Transport System Efficiency

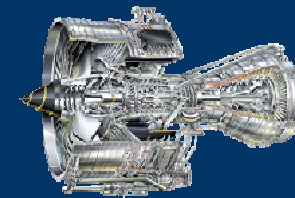
- On time arrival/departure 99% within 15 minutes
- Increase movements of aircraft x3

### Environment

- Reduce perceived noise by half
- Reduce NO<sub>x</sub> by 80%
- Reduce CO<sub>2</sub> by 50%



## Engine Contribution

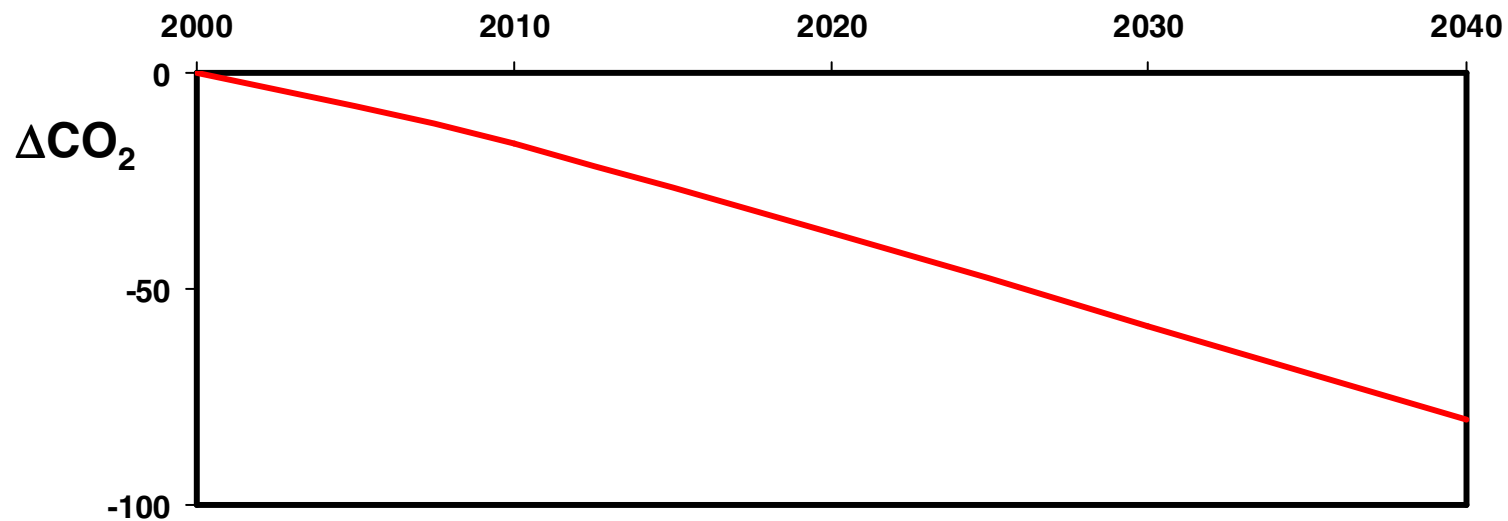


- Reduce specific fuel consumption by 20%
- Reduce NO<sub>x</sub> by 60% to 80%
- Reduce noise by 6 dB per operation
- Reduce accident rate by x5
- Reduce operational costs
- Half time to market

Reference: year 2000 in service engine

## Abschätzung der zukünftigen Technologiepotentiale

<b>Flugzeug</b>	Gewichtsreduktion	Strömungskontrolle	Brennstoffzelle	Laminarhaltung		Systeme	neue Konfigurat.
<b>Antrieb</b>	Advanced Turbofan	Geared Turbofan		Open Rotor	Counter Rotating Fan	Intercooled Recuperat.	Embedded Engines
<b>Luftverkehrsmgt. Betrieb</b>		Effizienzsteigerung Airline	SESAR	4D-Routenplanung	Formationsflug	Free Flight	Luftbetankung
<b>Brennstoff</b>				5% BTL	15% BTL	30% BTL	50% BTL



Quellen: DLR, Airbus, eigene Abschätzungen

# Zukünftige CO<sub>2</sub>-Emissionen des Luftverkehrs

