

2 Lehre des LFA im Maschinenwesen Turbomaschinen, Gasturbinen und Flugantriebe sowie Raumfahrt-Triebwerke



Fakultät Maschinenwesen in Zahlen

Stand 2014

Die Fakultät für Maschinenwesen ist eine der größten und leistungsstärksten Maschinenwesen-Fakultäten Europas. Neben Rankings dokumentieren diesen Erfolg...

...41 Professorinnen und Professoren.

...1200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

...5500 Studenten.

...56 Mio. € eingeworbene Forschungsmittel (davon je zu einem Drittel rein öffentlich finanziert, rein privat (Industrie) finanziert und in Kooperationen mit der Industrie öffentlich finanziert).



Lehre und Studiengänge 1964 – 2014

Fakultät für Maschinenwesen

Dipl.Ing-, Bachelor-, Master-Studiengänge

- Energie- und Prozesstechnik, Entwicklung und Konstruktion,**
- Fahrzeug- und Motorentechnik**
- Luft- und Raumfahrt mit**
 - Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik (Prof. Adams)
 - Lehrstuhl für Flugantriebe (Prof. Kau, † 2013)
 - Lehrstuhl für Flugsystemdynamik (Prof. Holzapfel)
 - Lehrstuhl für Hubschraubertechnologie (Prof. Hayek)
 - Lehrstuhl für Leichtbau (Prof. Bayer)
 - Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme (Prof. Hornung)
 - Lehrstuhl für Raumfahrttechnik (Prof. Walter)
- Fachgebiete:
 - Raumfahrtantriebe (Prof. Haidn)
 - Strömungsbeeinflussung und Aeroakustik (Prof. Kaltenbach)
- Maschinenbau und Management,**
- Mechatronik und Informationstechnik**
- Medizintechnik, Nukleartechnik, Produktion und Logistik**

Lehrbetrieb am Lehrstuhl für Flugantriebe

1964 – 2014

Grundlagen-, Wahl- und Ergänzungs-Vorlesungen
im Maschinenwesen mit Luft- und Raumfahrt L&R

- Gasturbinen, Flugantriebe und Kombinationen**
- Turbomaschinen, Luftstrahlantriebe und Kombinationen**
- Betriebsverhalten, numerische Simulation, Regelung, Diagnose, Monitoring sowie Mess- und Prüfstandstechnik**
- Technologie, Entwicklung und Konstruktionsaspekte**
- Strömungsmechanische Berechnungsverfahren zur CFD-Auslegung von Turbomaschinen**
- Raumfahrt- und Hochgeschwindigkeitsantriebe**

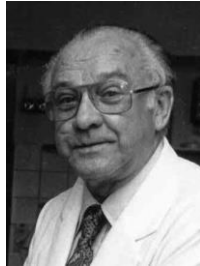
Lehrstuhl für Flugantriebe 1964 – 2014

Hochschullehrer, Dozenten, Lehrbeauftragte

1964 – 1982



Prof. Münzberg,

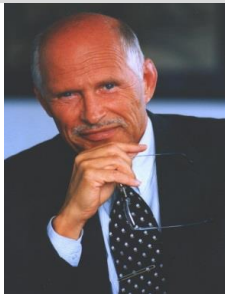


Prof. Büchner,



Dr. Dittrich,

1982 – 1998



Prof. Kappler,



Prof. Rick,



Prof. Rist,



Dr. Erhard



Prof. Lichtfuß
Prof. Schmidt
Lehrbeauftragte

1998 – 2014



Prof. Kau



Prof. Haidn



Prof. Rick



Dr. Erhard



Dr. Hupfer



Lehrbeauftragte

Prof. Lichtfuß



Dr. Henne



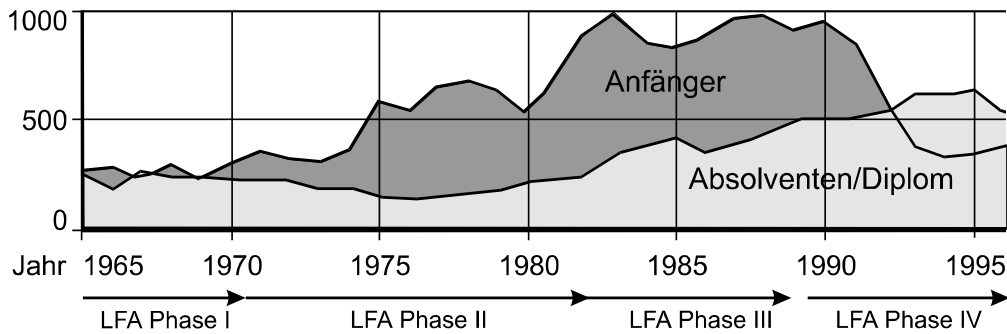
Dr. Hagemann



Dr. Knab

Lehrbetrieb 1964 – 1998 Fakultät MW und Lehrstuhl LFA im Stammgelände

Studenten der Fakultät für Maschinenwesen MW von 1965 bis 1998 TU München, Stammgelände (vor 1998 Umzug nach Garching)

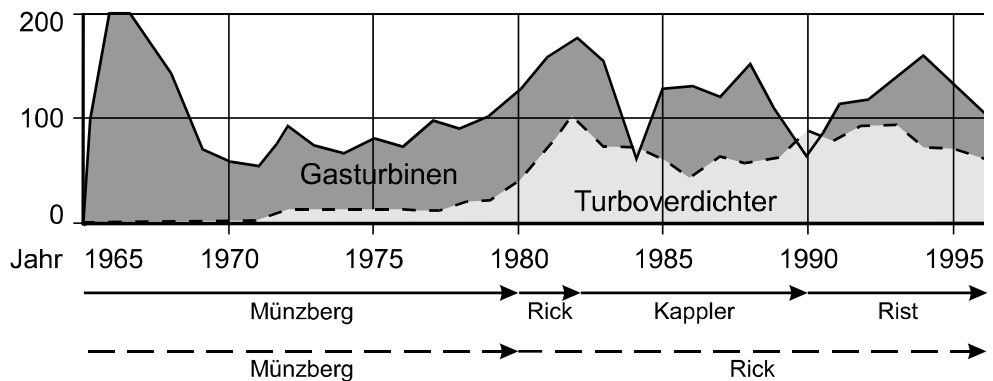


Studienanfänger pro Jahr, Absolventen / Dipl.-Ing.

mittlere Studiendauer: 1965/66: 11,8 Sem., 1985/86: 12,1 Sem., 1995/96: 11,5 Sem.

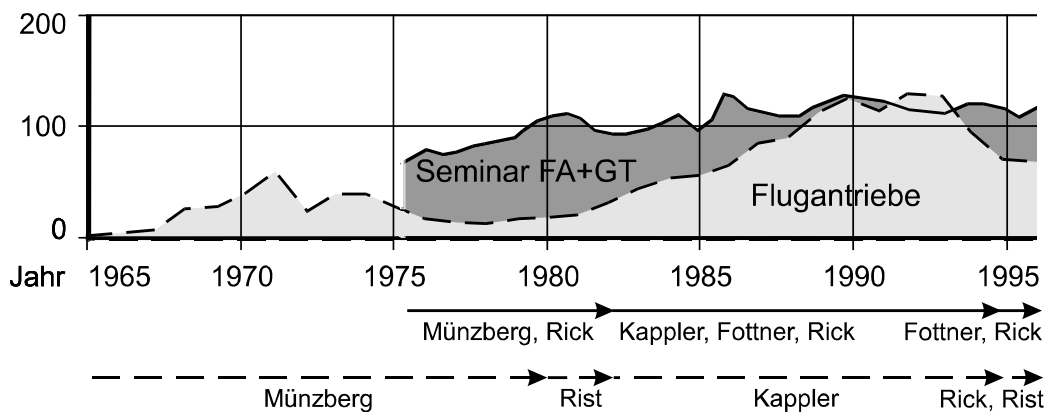
Absolventen Dipl.-Ing.-Prüfungen mit Dozenten

Fächer Gasturbinen GT und Turboverdichter TV



Absolventen Dipl.-Ing.-Prüfungen mit Dozenten

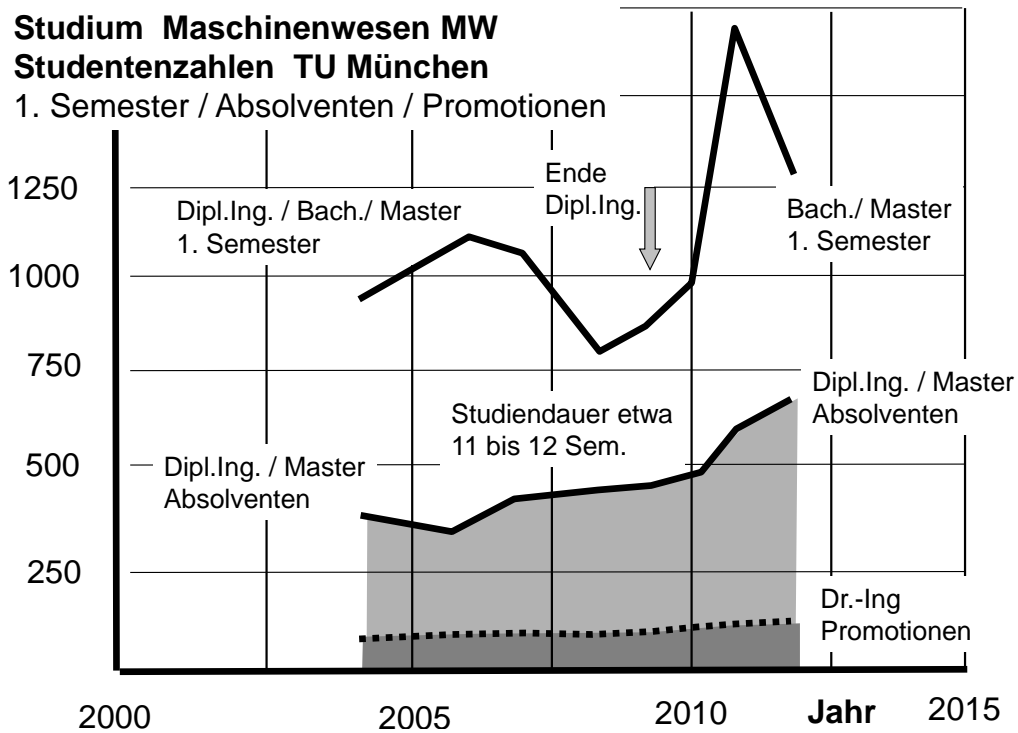
Fach Flugantriebe FA, Teilnehmer Seminar „Flugantriebe“



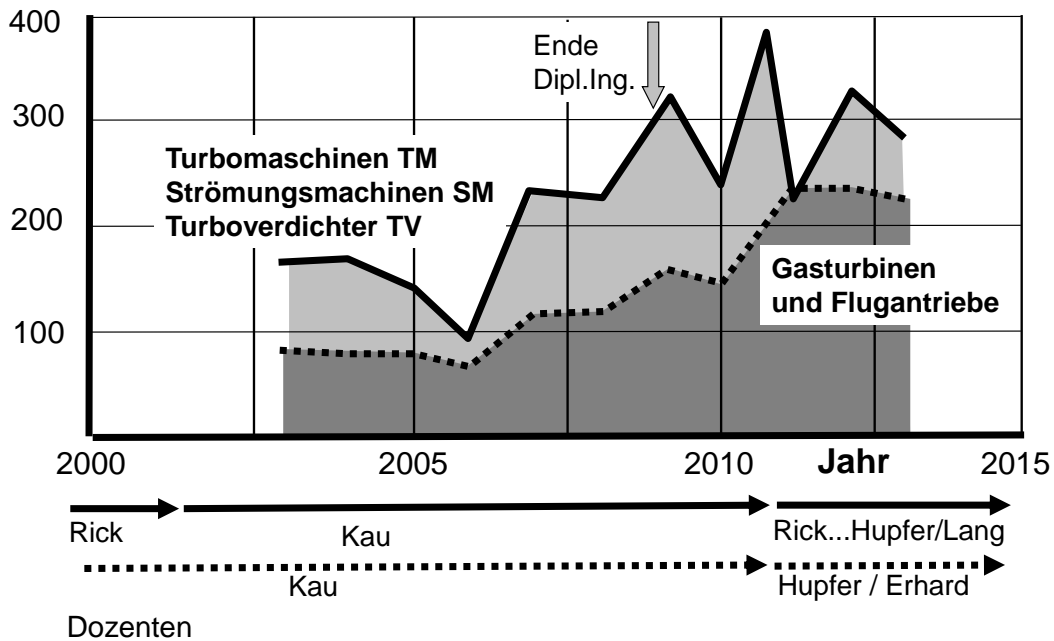
Lehrbetrieb 1998 – 2014

Fakultät MW und Lehrstuhl im LFA-Campus Garching

Studenten der Fakultät für Maschinenwesen MW von 1998 bis 2014
TU München-Campus Garching (nach Umzug nach Garching)



Studenten Prüfungen (Dipl.Ing./Master)
Lehrstuhl für Flugantriebe LFA Maschinenwesen MW



Vorlesungen 1964 – 2014

Gasturbinen , Flugantriebe und Kombinationen

Grundlagen-Vorlesungen (Lehrinhalte) im Maschinenbau und L&R

Gasturbinen

Wahlpflichtvorlesung bzw. Grundlagenvorlesung im Maschinenbau

1965 **Münzberg**, 1981 **Rick**; 1983 **Kappler**, 1996 **Rist**, 1999 **Kau**, 2011 **Hupfer**

- Vorstellung des Systems Gasturbine: Funktionsweise, Aufbau, Bezeichnungen
Geschichte, Entwicklungsziele
- Arbeitsprozesse: Ideale und reale Arbeitsprozesse, Optimierung auf Leistung und
spez. Brennstoffverbrauch), Beeinflussung der Schadstoffemissionen
Fluidmechanische und thermodynamische Aspekte
- Vorstellung der Gasturbinenekomponenten: Einlauf, Verdichter, Brennkammer,
Turbine, Schubdüse bzw. Austrittsrohr. Aufbau, Funktion, Eigenschaften.
- Schub, Leistung, Wirkungsgrade, Kenngrößen und Kennfelder

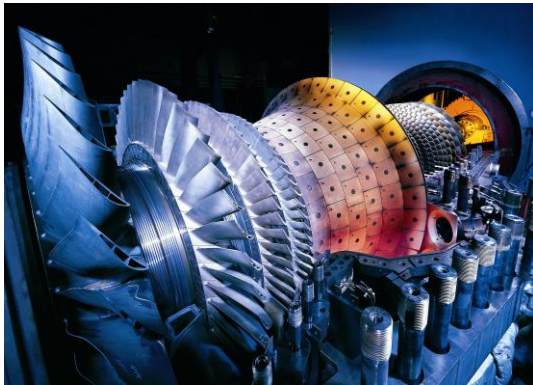
Flugantriebe I , Flugantriebe II, Betriebsverhalten und Simulation

Wahlpflichtvorlesung bzw. Grundlagenvorlesung im Maschinenbau, L&R

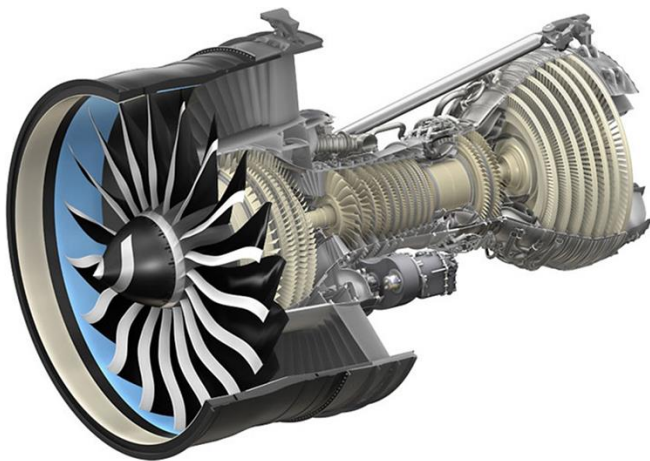
1965 **Münzberg**, 1982 **Kappler**, 1996 **Rick/Rist**, 1999 **Kau**, 2011 **Hupfer/Erhard**

- Triebwerkszu- und Triebwerksabströmung: Einläufe, Düsen
- Betriebsverhalten allgemein von Flugtriebwerken
- Arbeitsprozesse von Bypass-Unterschall- und Überschalltriebwerken sowie
Staustrahltriebwerken für den Hyperschallflug
- Berechnungsverfahren für stationäres Betriebsverhalten von Flugantrieben in
verschiedenen Lastbereichen, Leistungs-Syntheseprogramme
- Instationäres Betriebsverhalten sowie deren Überwachung und Monitoring.
- Betriebsverhalten im eingebauten Zustand; Installationseffekte; Umwelteinflüsse.
- Triebwerkszuströmung: Flugstau, Unterschalleinläufe, Überschalleinläufe:
Gasdynamische Grundlagen, Bauweisen, Verluste, Betriebsverhalten.
- Aufheizung in Flugtriebwerken: Grundlagen, Organisation der Verbrennung,
Brennkammern: Bauarten, Parameter, Brennstoffe, Schadstoffemissionen.
- Triebwerksabströmung: Schubdüsenbauarten
- Ausgewählte Beispiele von Hubschrauber-, Propeller- und Luftstrahltriebwerken
unterschiedlicher Flugbereiche
- Anbau- und Hilfssysteme
- Regelung und Monitoring
- Triebwerksentwicklung und Zulassung





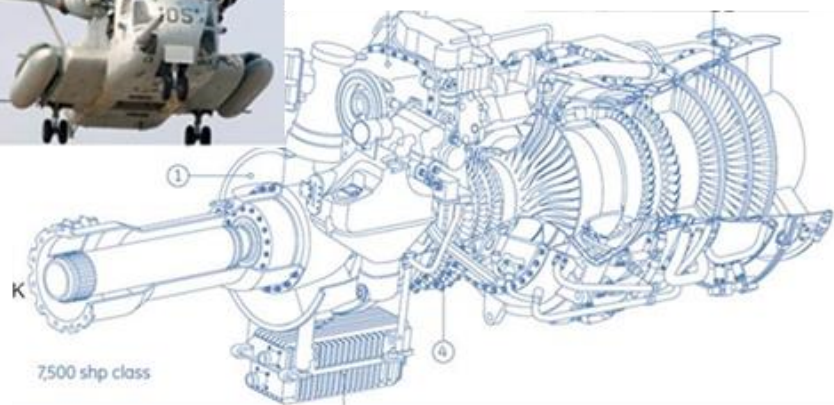
Kraftwerks- Gasturbine (bis > 300 MW) Siemens SGT5, Kraftwerk Irsching (D)



Turbofan-Bypass-Triebwerk



Airbus A 380



Hubschrauber-Gasturbine General Electric GE38 mit MTU-Turbine

Vorlesungen 1964 – 2014

Turbomaschinen, Luftstrahlantriebe und Kombinationen

Schwerpunkt- / Vertiefungs-Vorlesungen im Maschinenbau und L&R

Turboverdichter

Wahlpflichtvorlesung Maschinenbau und L&R

1965 **Münzberg**, 1982 **Rick**, 2002 **Kau**

- Überblick zu Verdichtertypen, strömungsmechanischen Vorgängen und Rechenverfahren.
- Arbeitsweise der Turboverdichterstufe, Kenngröße, Wirkungsgrade, mehrstufige Verdichter.
- Verdichter-Schaufelgitter, Schaufelprofilierung.
- Räumliche Strömung, einfache und erweiterte Differentialgleichung der Turbomaschinenströmung, Hauptgleichung, Drallgesetze.
- Berechnungsverfahren ("Duct-Flow", "Through-Flow"). Mittelschnittsrechnung, dimensionslose Kennzahlen, Wirkungsgrade, Belastungskriterien.
- Verwindungsrechnung.
- Radialverdichter, Schaufelkrümmung, Kennlinien.
- Kennfelder, Stufenzusammenarbeit, Schaufelverstellung, Grenzbereich-Betriebsverhalten.

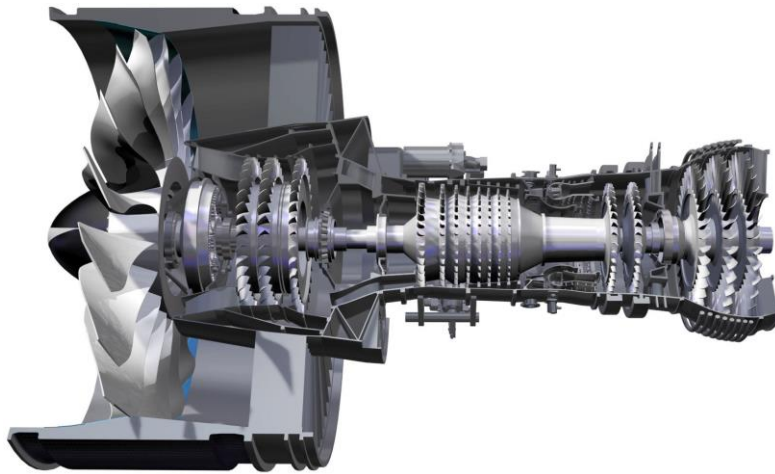
Grundlagen Strömungsmaschinen und Turbomaschinen

Wahlpflichtvorlesung Maschinenbau und L&R

1977 **Rick**, 2002 **Kau**, 2012 **Hupfer**

- Konzepte und Bauweisen verschiedener Flugantriebe
- Fluidmechanische und thermodynamische Aspekte von Turbomaschinen
- Aufbau und Wirkungsweise, Betriebsdaten,
- Ähnlichkeitsbeziehungen und Kenngrößen
- Thermische und hydraulische Maschinen
- Betriebsverhalten: Kennlinien und Kennfelder
- Anwendungsbeispiele Gasturbine, Dampfturbine, Turbolader u.a
- Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Belastungen, statische und dynamische Festigkeit
- Konstruktions- und Beschichtungswerkstoffe
- Lagerung und Konstruktionsprinzipien

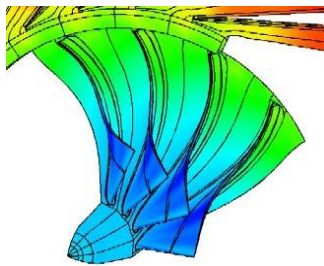




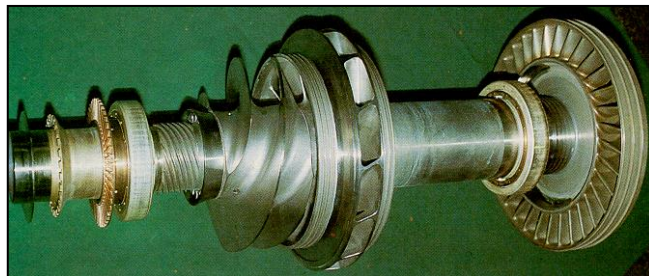
Turbofan-Triebwerk mit Getriebe PW GT1000 von P&W / MTU



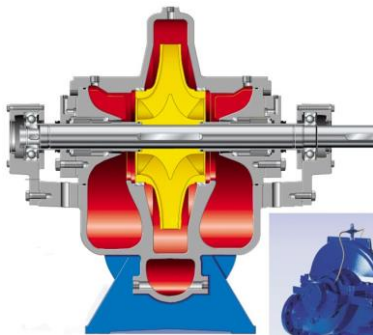
Radialverdichter



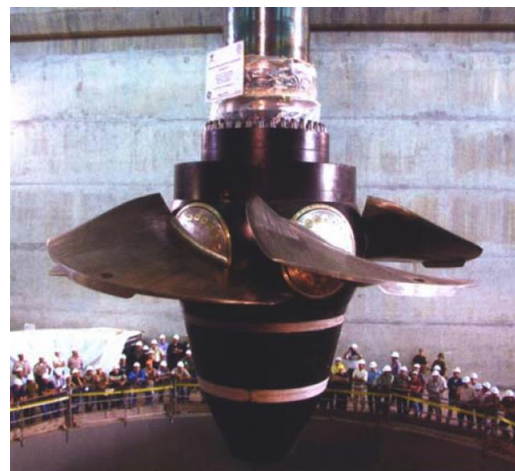
Axial-Verdichterstufe



Turbopumpe für Raketentriebwerke



2-flutige Radialpumpe



Kaplan-Turbine 150 MW

Vorlesungen 1964 – 2014

Betriebsverhalten, numerische Simulation, Regelung Diagnose, Monitoring, Mess- und Prüfstandstechnik

Numerische Methoden zur Simulation des Betriebsverhaltens von Gasturbinen und Luftstrahlantrieben ab 2013 2014 Flugantriebe II

Wahl- bzw. Ergänzungs-Vorlesung im Maschinenbau und L&R

1978 **Rick**, 2005 **Erhard**

Numerische Simulation

- Numerische Programmtechnik, prinzipielle Darstellung von Rechenverfahren.
- Numerische Erfassung und Berechnung von Komponentenkennfeldern.

- Stationäres und instationäres Betriebsverhalten von Wellenleistungsgasturbinen (Hubschrauber, Fahrzeug-GT mit und ohne Wärmetauscher) sowie Triebwerken mit variabler Geometrie für Unterschall- bis Hyperschall-Flugzeuge.
- Rechenmodelle für stationäre und dynamische Betriebsbedingungen, Störungen.

Regelung, Monitoring

- Regelung von Gasturbinen, Triebwerksmonitoring, Echtzeitsimulation

- Triebwerkskomponenten: Einlauf, Verdichter, Wärmezufuhr, Turbine, Düse

- Stationäre und instationäre numerische Simulation des Betriebsverhaltens

- Beispielrechnungen mit Leistungs-Syntheseprogramme wie **GasTurb**

- Turbofan-Triebwerksregelung, Hubschrauber-TW-Regelung
- Funktionsweise digitaler Regler, Lebensdauer- und Schwingungsüberwachung

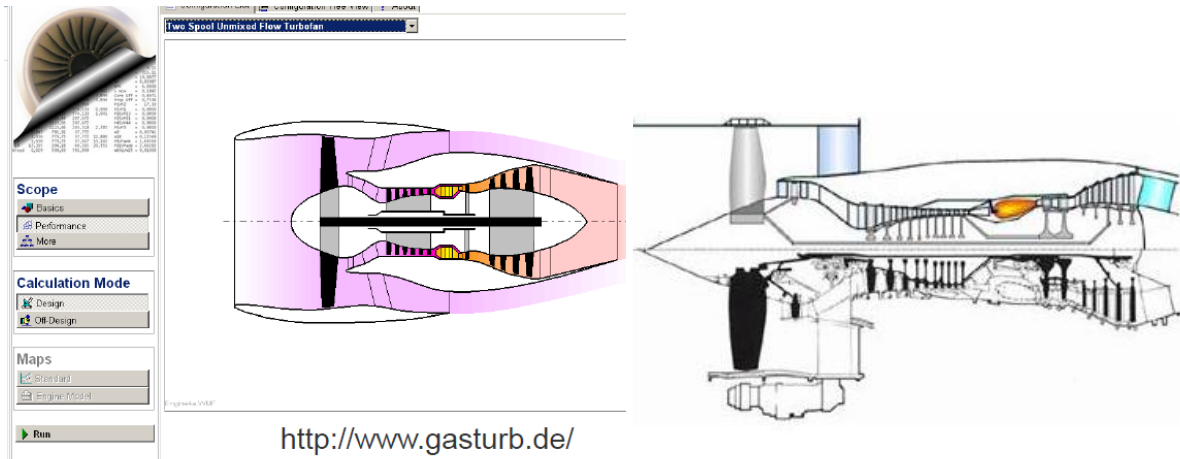
- Anbau- und Hilfssysteme Triebwerksentwicklung und Zulassung

Mess- und Versuchstechnik für Strömungsmaschinen

- Messtechnik- und Testverfahren im Überblick
- Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung
- Grundlagen von Messtechnik, Messelektronik und digitaler Messwerterfassung
- Messung physikalischen Größen Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und Durchfluss, Lasermesstechnik

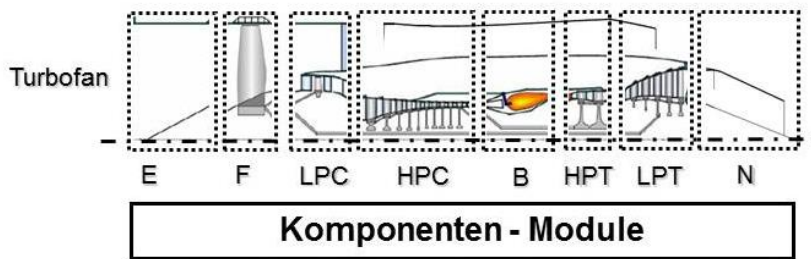
- Komponentenprüfstände: Verdichter-, Brennkammer-, Turbinen-, Schleuder-, Kraft- und Schmierstoffprüfstände



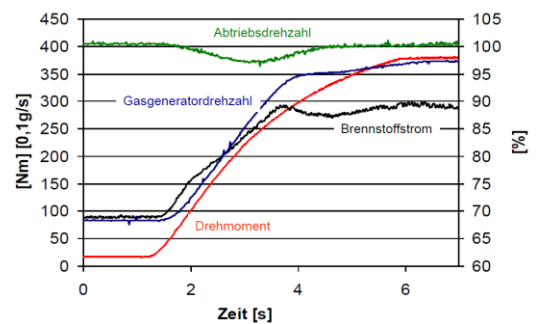
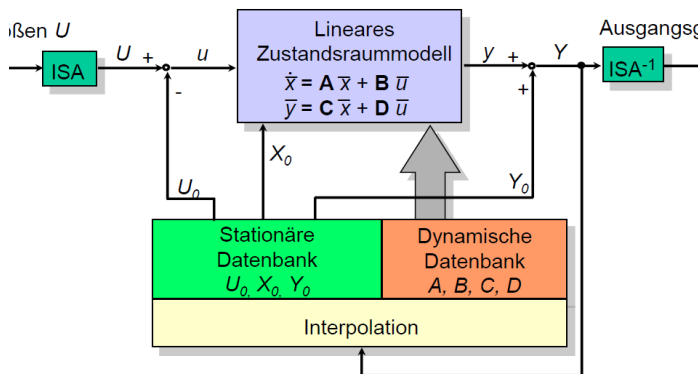
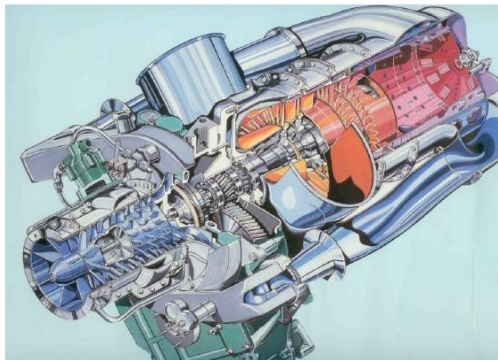


Multidisziplinäre Simulation von Antriebssystemen

Modulare Simulations-Programm Systeme wie LFA-MUSYN, „GasTurb“ (Dr. Kurzke)
 Beispiel: MOPEDS MTU Aero Engines



Multidisziplinäre Auslegungs- und Simulationsprogramme GTSSD



Numerische und experimentelle Simulation, Regelung und Monitoring von Gasturbinen und Flugantrieben

Vorlesungen 1964 – 2014

Technologie, Entwicklung und Konstruktionsaspekte

Technologie und Entwicklung von Triebwerken

Wahlvorlesung Maschinenbau und L&R

2000 **Steffens** (MTU), 2003 **Süß** (MTU), 2005 **Henne** (MTU)

- Anforderungen an moderne Triebwerke aus gesellschaftlicher und ökonomischer Sicht
- Auslegungs- und Berechnungsmethoden der Leistungsrechnung, Aerodynamik und Strukturmechanik
- Erprobung, Validierung und Zulassung der Triebwerke

- Heutige und zukünftige Herstell- und Prüfmethoden im Triebwerksbau
- Umsetzung neuer Technologien in Triebwerksprogrammen

- Neue Antriebskonzepte und ihre Herausforderungen

Technologie der Fluggasturbinen und Turbomaschinen

Wahlvorlesung Maschinenbau: 1981 **Rist**, 2005 **Hupfer**

- Fluggasturbine als Repräsentant der Strömungsmaschine, Beispiele.
- Technologische Aufgaben: Hauptkriterien, Zusammenhang Thermogasdynamik und Technologie, Umweltbelastung, spez. Kosten, Beanspruchungen, Werkstoffe, Festigkeit; Ermüdung; Sicherheit; Überwachung; Instandhaltung.
- Konstruktion und Strukturmechanik der Turbomaschinen: Beschaufelungen und -Rotoren, weitere Turbomaschinenbauteile.
- Schwingungen (Axialmaschine): Eigenfrequenzen der Beschaufelung und gekoppelter Schaufel-Scheibe-Systeme, Schwingungserregung, Schwingungsschäden, Zustandsüberwachung.
- FEM-Anwendung im Turbomaschinenbau

Konstruktionsaspekte bei Turbomaschinen und Flugantrieben

Wahlvorlesung Maschinenbau: 1981 **Rist**, 2005 **Hupfer**

- Überblick über verschiedene Konzepte und Bauweisen aktueller Flugantriebe
- Auslegungskriterien und Anforderungen an Flugtriebwerke
Sicherheitsrichtlinien und –Konzepte
- Betriebsfestigkeit mit Belastungsformen, Schwingungsfestigkeit, Materialermüdung, Thermische Belastungen, u.a.
- Konstruktionswerkstoffe, Werkstoffauswahl, Legierungsarten, Polymermatrix-Verbundwerkstoffe (PMC)
- Beschichtungswerkstoffe und Oberflächentechniken
- Kräfte und Belastungen, Lebensdauer
- Bauweisen, Baugruppen und Komponenten, Rotoren, Lagerungen



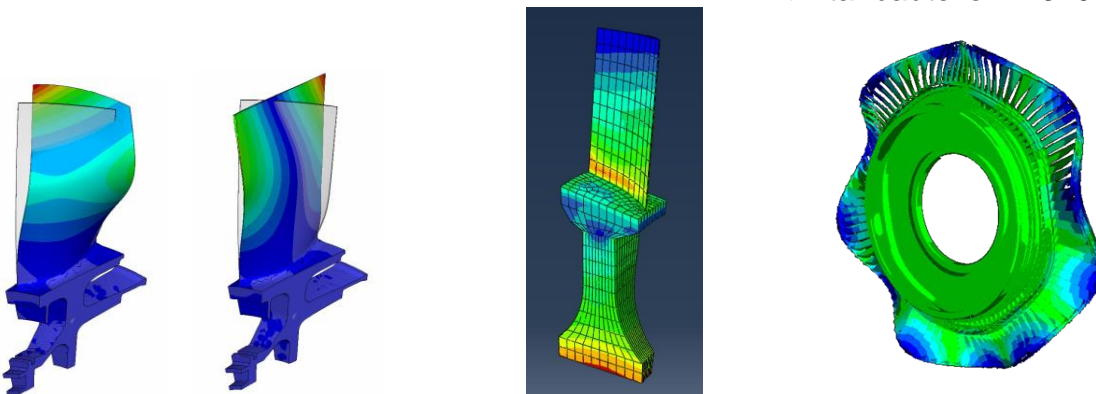
Turbofan-Bypass-Triebwerk



Fan-Blätter aus PMC GE90



Titanbauteile EJ200



Schwingungen an Schaufeln und Scheiben FEM Anwendungen

Vorlesungen 1964 – 2014

Strömungsmechanische Berechnungsverfahren zur CFD-Auslegung von Turbomaschinen

Anwendung strömungsmechanischer Berechnungsverfahren in Flugtriebwerken

Wahlvorlesung Maschinenbau und L&R

1996 **Lichtfuß**

- Die verschiedenen Strömungskomponenten in einem Flugtriebwerk: Einlauf, Verdichter, Brennkammer, Düse.
- Mathematische Grundlagen: Vektor- und Tensorrechnung.
- Strömungsmechanische Grundlagen: Erhaltungssätze, Spannungs-Dehnungsbeziehungen, Turbulenzmodell.
- Grundlagen der Strömungsmaschinen: Absolut-Relativ-System, Ähnlichkeitsbeziehungen, Kennfelder und Kennzahlen, Turbinenhauptgleichung.
- Die Strömung in der Meridianfläche (S2-Flächen): Stromlinienkrümmungsverfahren, Stromfunktionsverfahren, radiales Gleichgewicht.
- Die Profil-Gitterströmung (S1-Flächen): Strömung auf Rotationsflächen, ebene Gitterströmung, Profilierungsverfahren, Überschall-Gitterströmung.

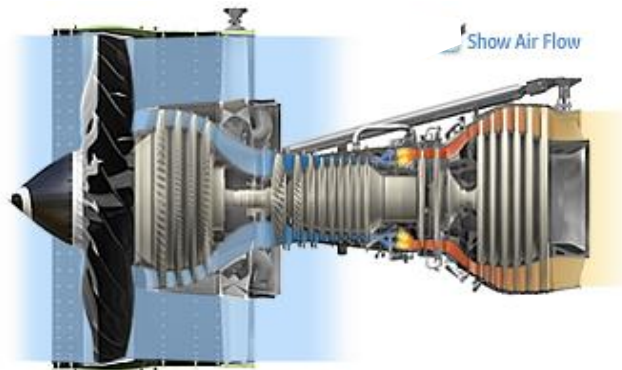
CFD-Auslegung von Turbomaschinen

Wahlvorlesung Maschinenbau und L&R

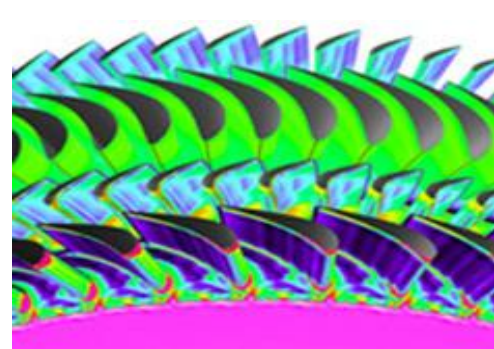
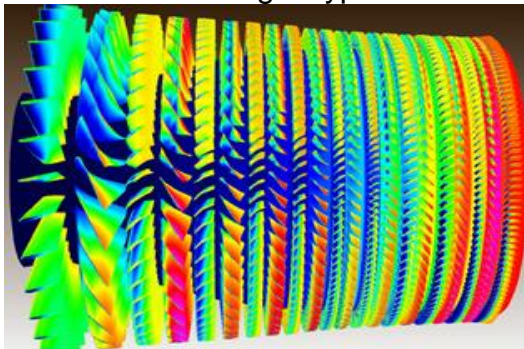
2012 **Kau**, 2014 **Hupfer**

- Anwendungsorientierte Einführung in den Ablauf einer numerischen Strömungssimulation (CFD)
- Aerodynamischer Auslegungsprozess, Beispiel Axialverdichters
- Bewertung des Betriebsverhalten mittels dreidimensionaler Rechnungen
- Analyse auftretende Strömungsphänomene
- Eigenständige Bearbeitung in 2er-Studenten-Gruppen (Softwarepaket ANSYS CFX) z.B. mit folgenden Aufgaben:
 - Veränderung der Rotorspalhöhe
 - Veränderung der Schaufelzahl in Stator oder Rotor
 - Simulation des Betriebs in Reiseflughöhe
 - Variation der Betriebsdrehzahl
 - Veränderung der Einlass-Bedingungen (radiale Profile)
 - Grenzschichteinfluss
 - Variation des Staffelungswinkels des Stators
 - Vergleich von Statoren mit und ohne Deckband

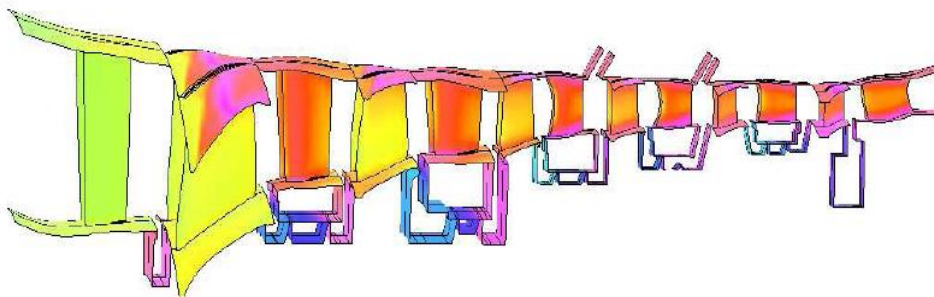
Präsentation und Diskussion der Ergebnisse.



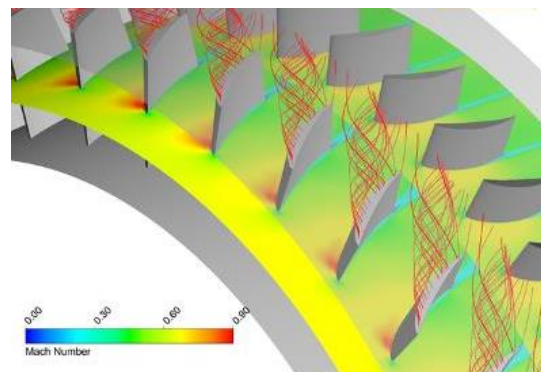
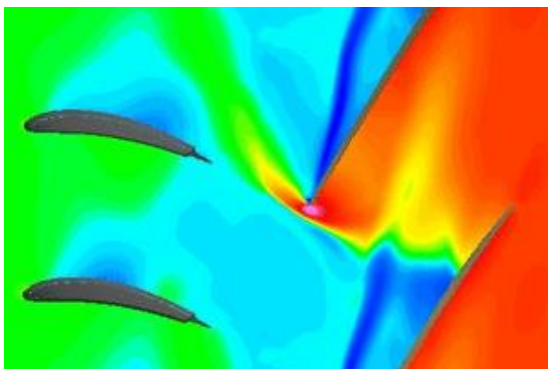
High-Bypass-Turbofan-Triebwerk GE90



3-D-Strömungssimulation, Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen



3-D-Navier-Stokes-Rechnungen mit Cavity-Strömungen



CFD-Rechenverfahren instationärer Strömungen in Turbomaschinen

Vorlesungen 1964 – 2014

Fachgebiet Raumfahrtantriebe
Raumfahrt- und Hochgeschwindigkeitsantriebe

Grundlagen der Raumfahrtantriebe

Pflichtvorlesung Maschinenbau

1996 **Schmidt**, 2012 **Haidn**

- Grundlagen der Raketenantriebstechnik kommerzieller Raumtransport-systeme.
- Bahnmechanik-Grundbegriffe und dazu typische Charakteristiken für Raketentriebwerke besonders für die Gruppe der Flüssigkeitsraketenantriebe
- Treibstoffe und Bauweisen für die einzelnen Schubkammerkomponenten und die Turbopumpenaggregate
- Besonderheiten für den Bereich der Satelliten- und Hilfsantriebe
- Merkmale und Eigenschaften für die Gruppen der Feststoff- und Hybridantriebe, der Staustrahlantriebe sowie der elektrischen und nuklearen Raketenantriebe
- Grundlagen und Besonderheiten aktueller Triebwerksentwicklungen
- Einblicke in das industrielle Umfeld und die europäische Organisation des Geschäfts mit Raketenantrieben

Technik der Flüssigkeits-Raketenantriebe

Wahlvorlesung Maschinenbau

1968 **Büchner**, 1996 **Schmidt**, 2009 **Knab**

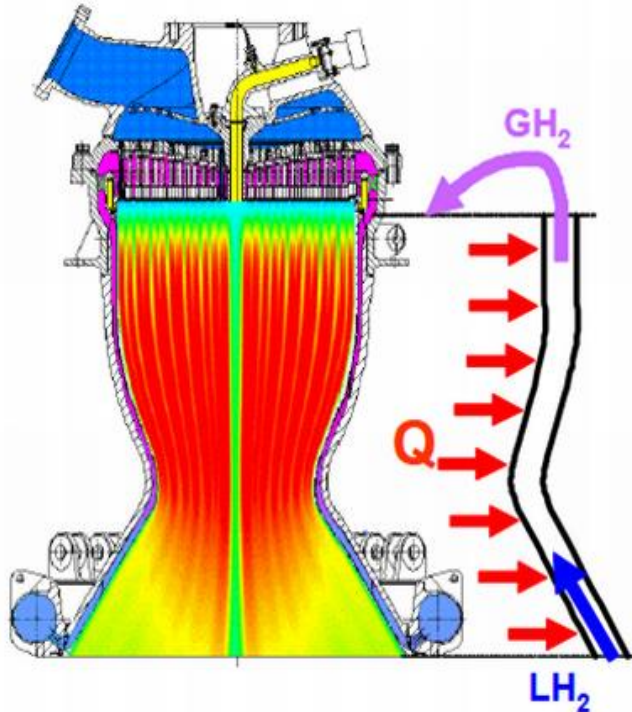
- Historischer Abriss zum Thema "Raumfahrtantriebe
- Antriebssystem-Varianten.
- Auslegung kritischer Komponenten eines Flüssigkeitsraketenantriebes
- Komponenten-Auslegung: Einspritzkopf, Brennkammer, Schubdüse,
- Turbopumpen, Turbinen
- Flüssigtreibstoffe und ihre Leistung.
- alternative Design-Konzepte vorgestellt.
- Systemgesichtspunkte zum Anfahr- und Abschaltverhalten
- Interaktion des Raketentriebwerks mit dem Fördersystem
- Operationelle Fragen.
- Darstellung von Fehlschlägen und daraus abgeleitete praxisnahe Lösungsvorschläge am Beispiel der ARIANE-Familie
- Zukünftige Antriebs-Entwicklungstrends.
- Vorstellung typischer Projektentwicklungs- / Projektmanagement-Strukturen an ausgewählten Beispielen von Raketenmotoren



ARIANE 5



VEGA



Vulcain 2 Motor (CFD)



Vulcain 2 at P5

Selected Topics of Launcher Propulsion

Wahlvorlesung Maschinenbau

2012 Haidn

- Launch Systems, Launcher Architecture and Integration
- Aspects of selected Missions (LEO, GEO, Moon, Exploration)
- Lectures on History and Heritage of selected Countries (Russia, China, Europe, US, Japan)
- Large Rocket Engine Test Facility and Launch Site Operation
- Storable and Cryogenic Stage Technologies
- Non-conventional Propulsion Technologies (pulse detonation, continuous detonation wave, etc.,)
- Materials and Manufacturing Procedures for Space Propulsion Applications (copper alloys, nickel alloys, ceramics, friction stir welding, brazing, pulse plating, etc, ..
- Selected Problems of Space Propulsion (combustion instability, low cycle fatigue, material failures, embrittlement,etc.,)

Heat Transfer

Pflichtvorlesung Munich School of Engineering

2012 Haidn

- Basics of Energy and Balance Equations
- Heat Generation
- Conduction (steady state 1D, 2D, 3D, thermal resistance network, transient, extended surfaces)
- Convection (velocity and temperature boundary layer profile similarity, Nusselt correlations)
- Natural convection
- Forced internal and external convection
- Heat Exchangers
- Radiation (basics of emission, irradiation, absorption, reflection, transmission)
- Black body, grey bodies and real bodies
- Solar radiation
- Gas Emissions
- View Factors and Radiation Networks



ARIANE 5 launch from Courou



H2B Launch from Tanegashima



Chimki Test Center



Example of forced heat Transfer
Heavy Snow Removal Equipment



Extended Surfaces



Heat and Mass transfer in Human Lungs