

MTU-Schnupperstudium

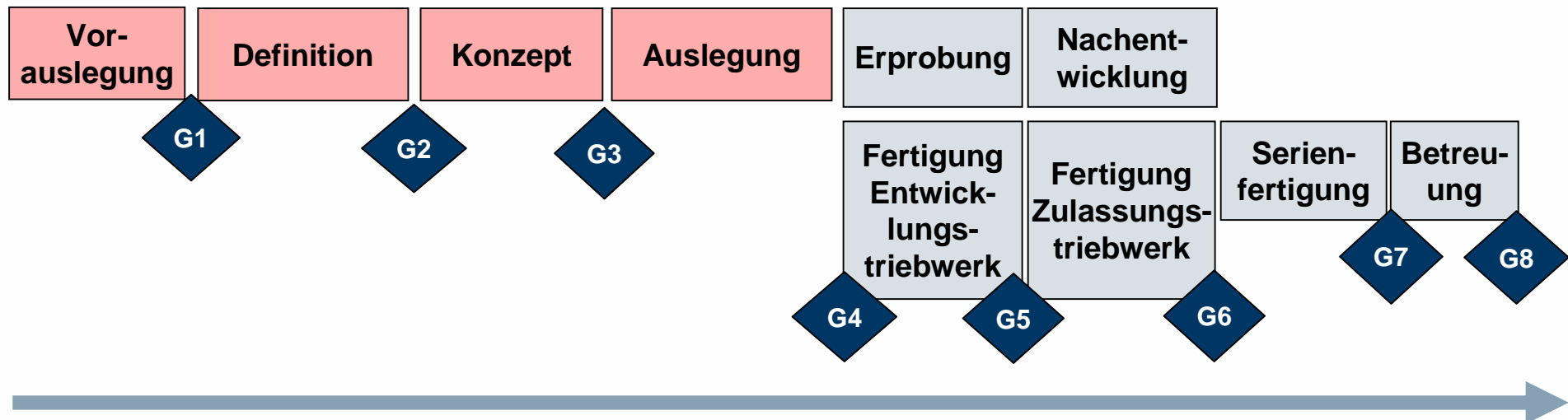
- Aerodynamik -

MTU Aero Engines, April 2009

Aerodynamik ist die Lehre der Bewegungsgesetze von starren Körpern in Gasen, vornehmlich der Luft. Im Wesentlichen geht es bei der **Aerodynamik** um das Fliegen, aber auch um sonstige Bewegungen gegen den Luftwiderstand. Ferner zählen zur **Aerodynamik** auch sämtliche Luft- und Gasströmungen. Konkret bezieht sie sich damit auf den Gegenstand (das Flugzeug), die Bewegung (der Flugwind) und die Luft (die Atmosphäre).

Aerodynamik bezogen auf hoch belastete Verdichter ist extrem komplex und verlangt ein tiefgehendes Verständnis der Strömungsvorgänge innerhalb der Beschaukelung. Vor allem im Anfangsstadium des Lebenszyklus eines Triebwerks findet die **Aerodynamik** Beachtung.

Lebenszyklus eines Triebwerks

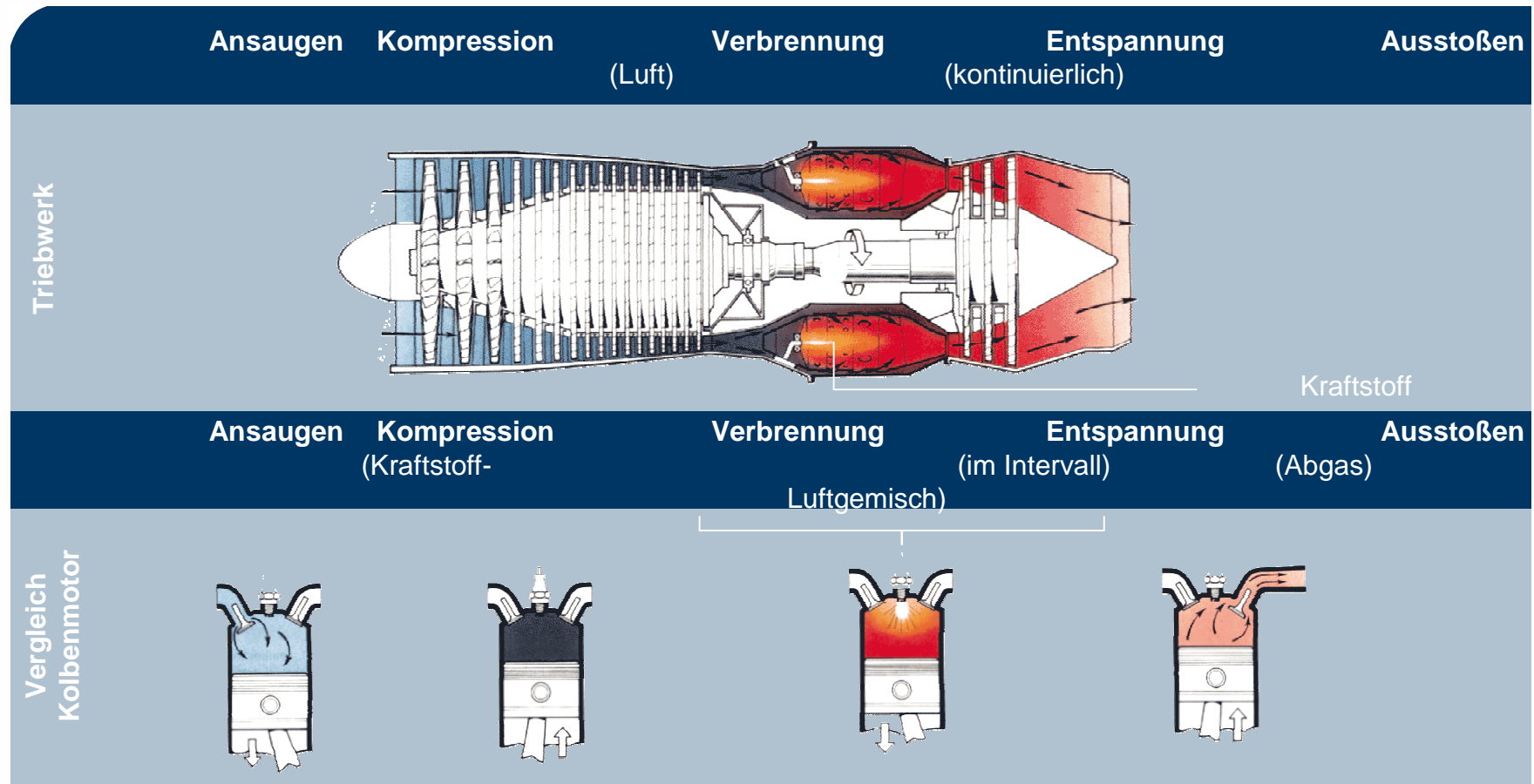


Inhalt

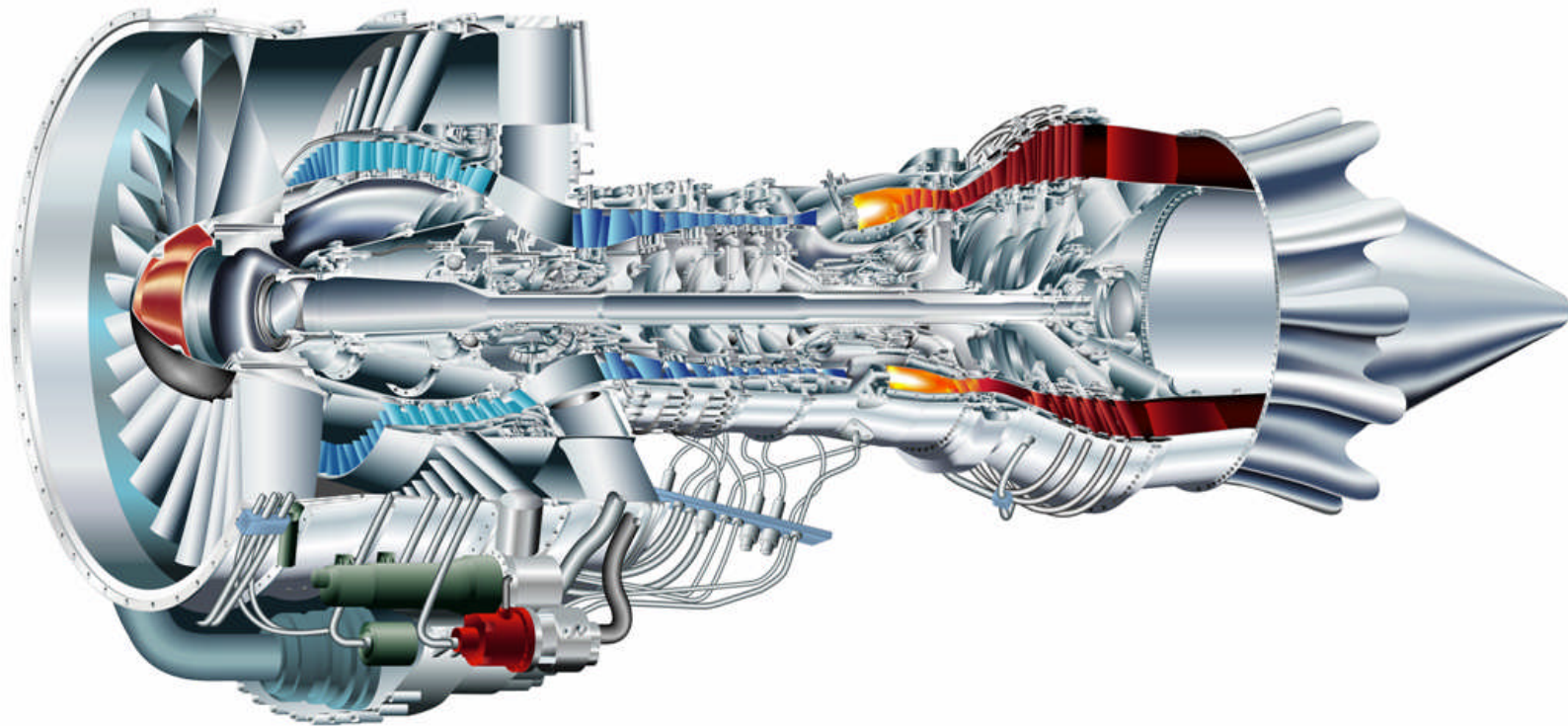
- 1. Funktionsweise des Triebwerks**
- 2. Verdichtertypen und deren Einsatzfelder**
- 3. Funktionsweise des Verdichters**
- 4. Aerodynamische Verdichterauslegung**

1. Funktionsweise eines Triebwerks

Funktionsweise eines Triebwerks - Vergleich mit einem Kolbenmotor



Modernes Turbofan-Triebwerk



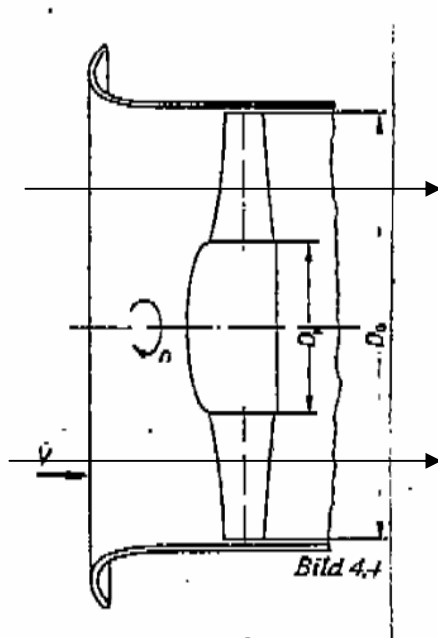
‘Energiebilanz‘ eines Flugtriebwerks oder Gasturbine

1. Verdichter: Bringt die Luft auf höheres Druckniveau, indem er die Energie der Turbine nutzt.
2. Brennkammer: Führt der Luft durch Verbrennung von Kraftstoff Energie zu.
3. Turbine: Entzieht dem Fluid einen Teil der in der Brennkammer zugeführten Energie, um damit den Verdichter anzutreiben.
4. Die restliche Energie wird...
 - im Strahltriebwerk zum Vortrieb verwendet.
 - beim Wellenleistungstriebwerk in einer weiteren Turbine der Luft „entzogen“ und zum Antrieb z.B. eines Propellers (Propellerflugzeug) oder eines Hubrotors (Hubschrauber) verwendet.
 - bei einer Gasturbine zum Antrieb eines Generators zur Stromerzeugung verwendet.

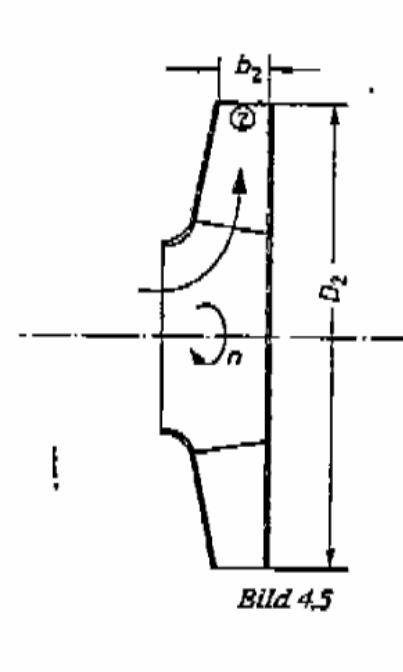
2. Verdichtertypen und deren Einsatzgebiete

Verdichtertypen

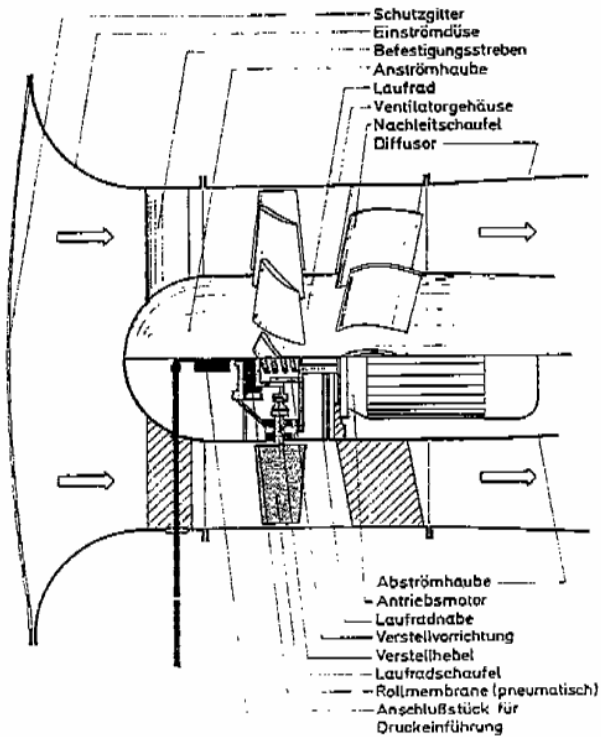
AXIALMASCHINEN



RADIALMASCHINEN



Verdichtertypen und deren Einsatzgebiete



AXIALGEBLÄSE (FA. VOITH)

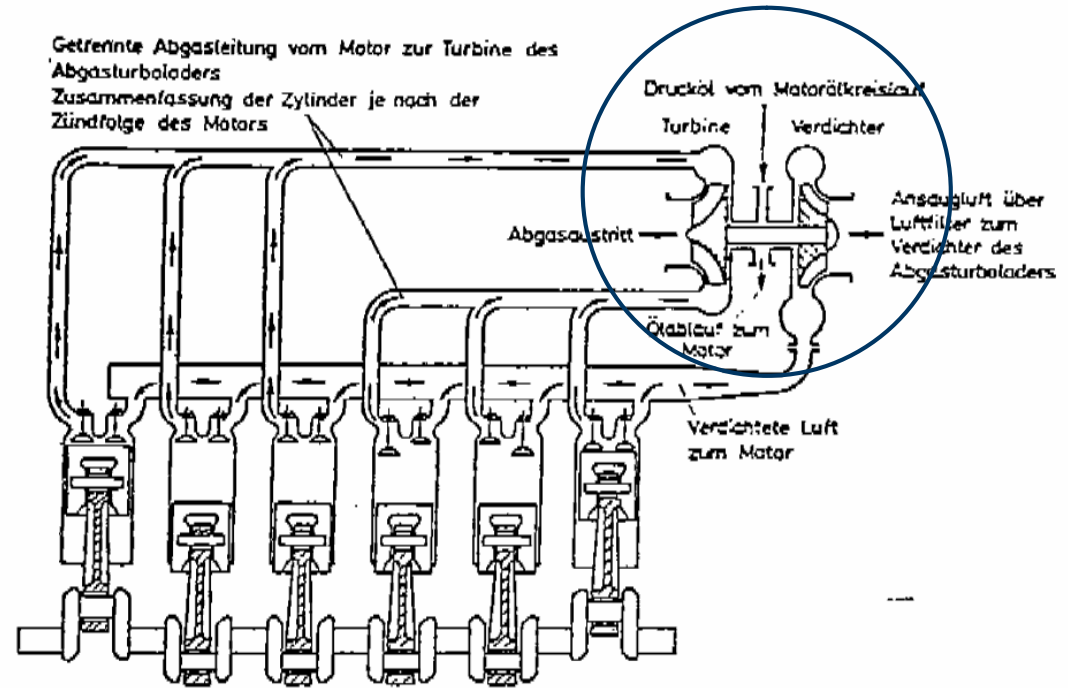
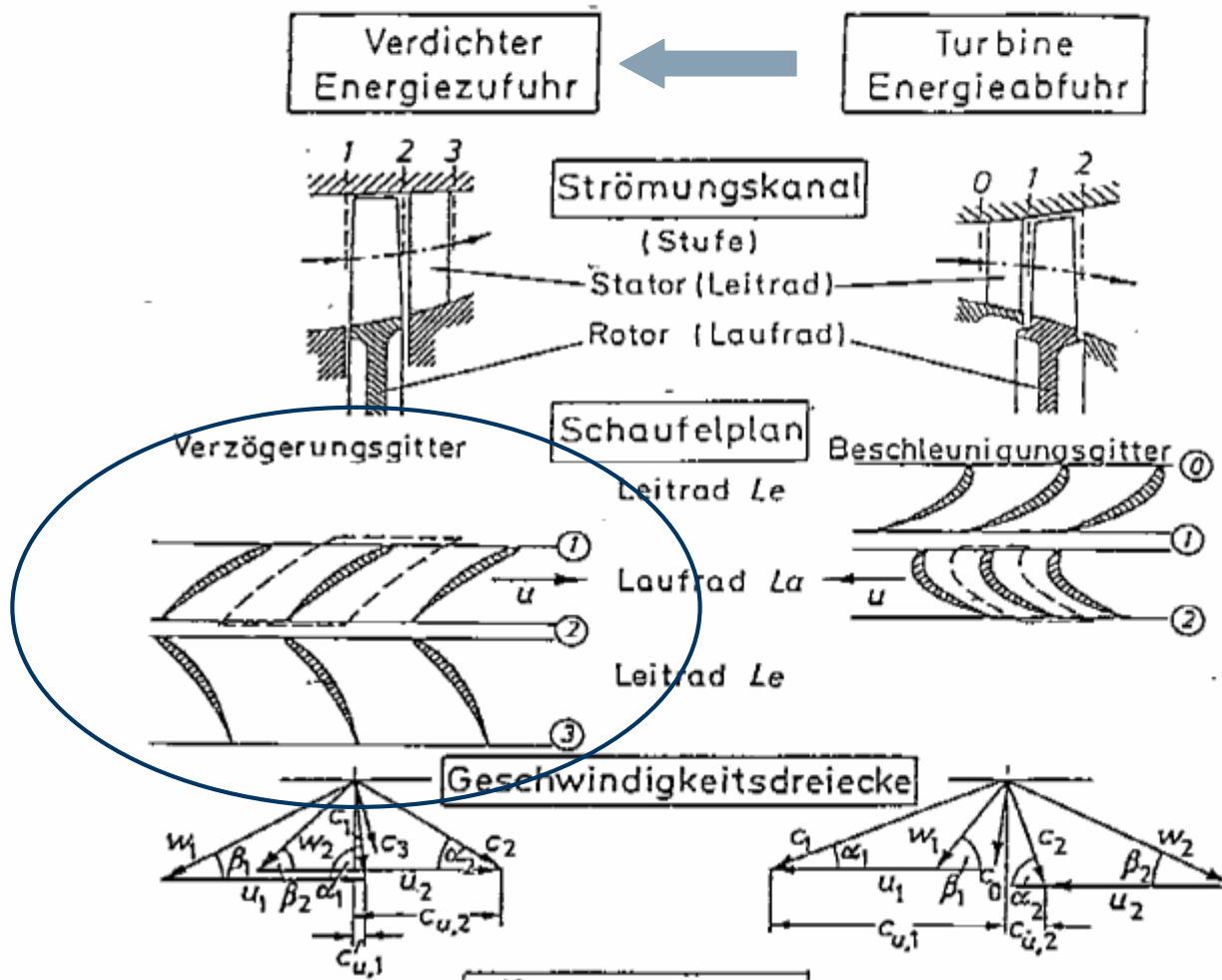


Bild 5.6/6 Schema der Turboaufladung eines 6-Zylinder-Viertaktmotors (Fa. Kühnle, Kapp & Kausch)

Förderung von Fluid z.B. in Pipelines, Gebläse für Hochöfen

3. Funktionsweise eines Verdichters

Arbeitsweise der Turbomaschinenkomponenten

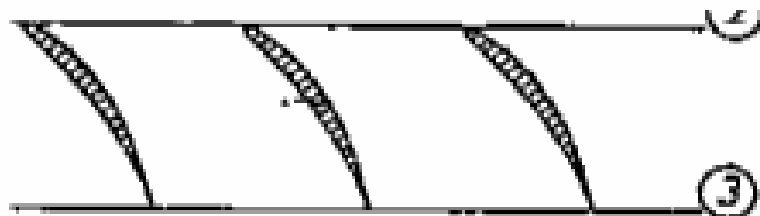


Laufrad / Leitrad



Laufrad L_a

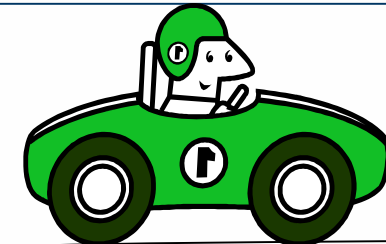
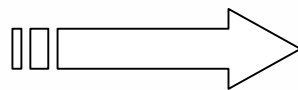
Führt dem Fluid kinetische Energie (= Geschwindigkeitsenergie) zu.



Leitrad L_e

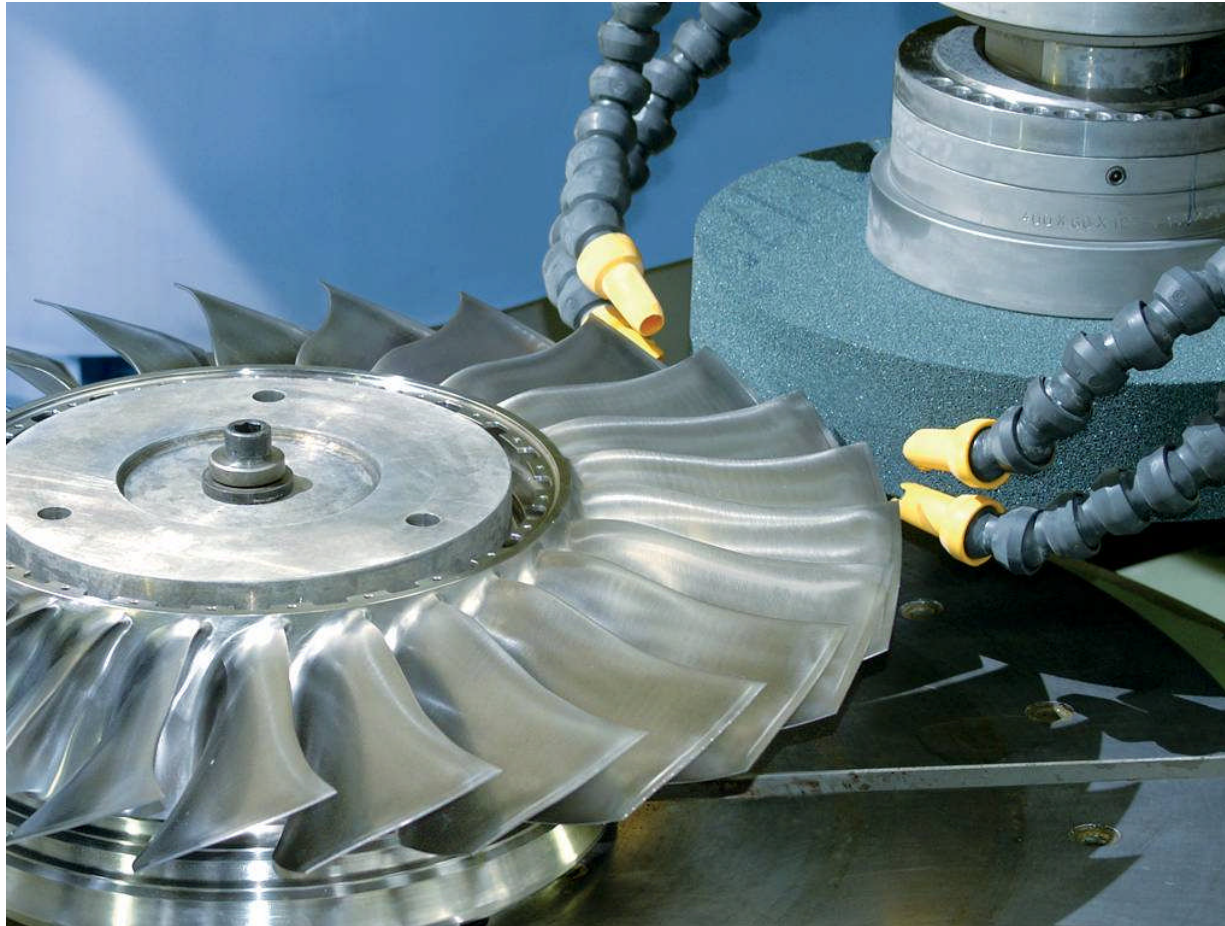
Wandelt die kinetische Energie in potentielle Energie (höherer Druck) um.

1. Ruhezustand
2. Beschleunigung entspricht dem Laufrad
→ Hohe kinetische Energie = schnell

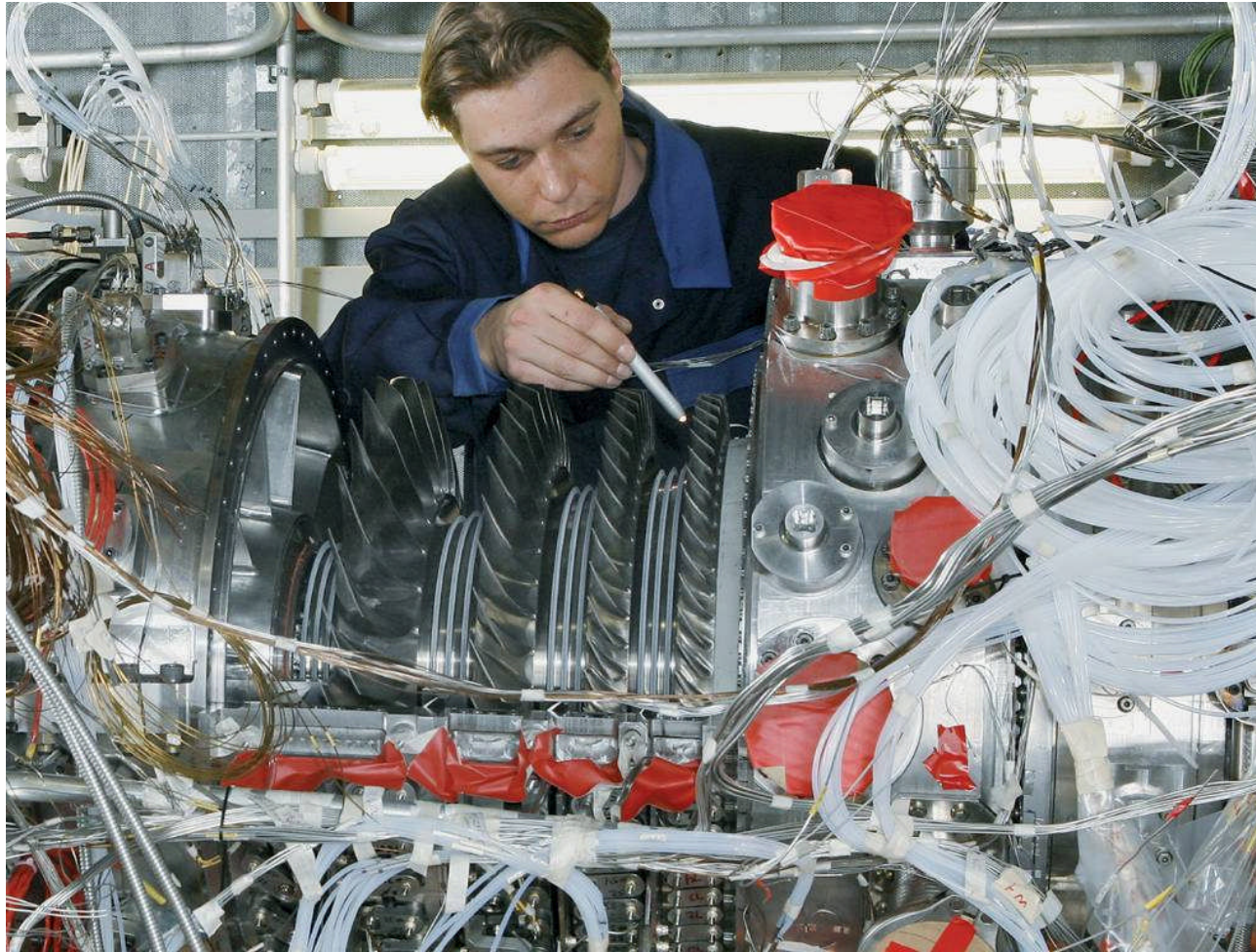


3. Langsam aber auf höherem Niveau = Hohe potentielle Energie
ohne weiteres „Gas geben“
INSTABILER ZUSTAND!

Foto eines Verdichterlaufrads



Blick in einen Verdichter



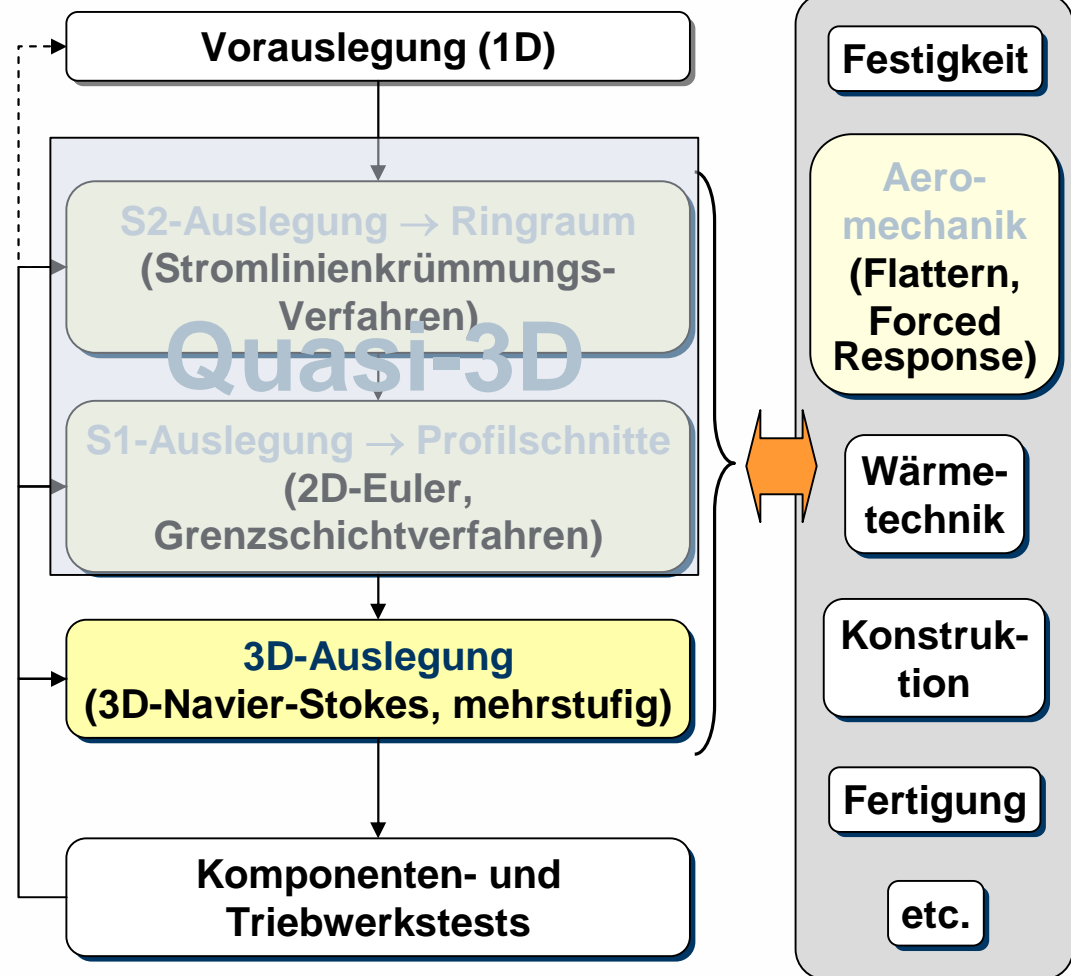
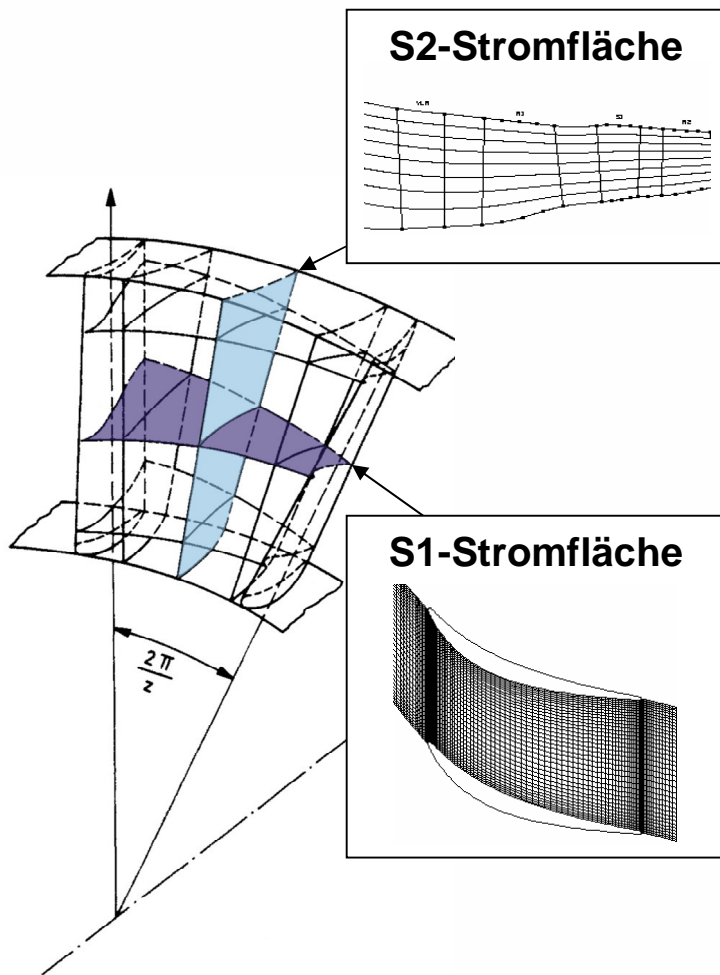
Eigenheiten des Verdichters im Vergleich zur Turbine

- Beim Verdichter strömt das Fluid (i.a. die Luft) vom niedrigen zum hohen Druck.
- Normalerweise will die Luft in die andere Richtung strömen (Analogie zum Luftballon). Also muss der Verdichter „quasi“ Zwang ausüben, um das zu erreichen.
- Wird der geforderte Druckanstieg zu groß – der Verdichter ist nicht mehr in der Lage, die Strömung zum hohen Druck zu fördern – dann kommt es zum sog. **Pumpen** des Triebwerks.

- Das ist ein gefährlicher Zustand, der vermieden werden muss.
- Bei einer Turbine kann das nicht passieren, da dort die Luft vom hohen Druck zum niedrigen strömt.
- Ein Verdichter entspricht vom Prinzip her einem Gebläse, eine Turbine einem Windrad.
- Der Verdichter führt der Luft Energie zu (Geschwindigkeit → Druck), die Turbine entnimmt der Luft Energie.

4. Aerodynamische Verdichterauslegung

Übersicht



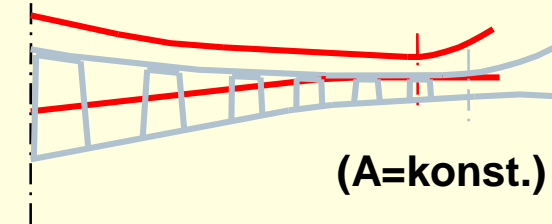
Quasi-3D-Vorgehensweise tritt zunehmend in den Hintergrund.

Fundamentale Festlegungen

- **Quellen:** Triebwerkskonzept, Vorauslegung
- **Inhalt der HDV*-Spezifikation:**
 - Druckverhältnis
 - Massenstrom
 - Ziel-Wirkungsgrad
 - Ziel-Pumpgrenzabstand
 - Drehzahl
 - Weitere Betriebspunkte (Kennfeld)
 - Länge, Gewicht
 - ...
- **Ziel ist die Optimierung von:**
 - Stufenzahl \rightarrow mittleres π Stufe
 - Nabenverhältnis ($R_{\text{Nabe}}/R_{\text{Gehäuse}}$)
 - **Schaufelhöhen/Sehnen-Verhältnis (h/l)**

Ausl.-
punkt

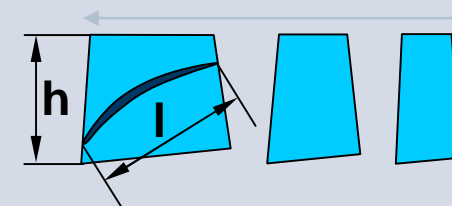
Nabenverhältnis:



$$R_N/R_G \uparrow \Rightarrow$$

- $u \uparrow \Rightarrow \Psi_h \downarrow$
- **Schaufelhöhe $\downarrow \Rightarrow$ Spalte \uparrow**
- **Scheibenbelastung \uparrow**

Schaufelhöhen-Verhältnis:



$$h/l \downarrow \Rightarrow$$

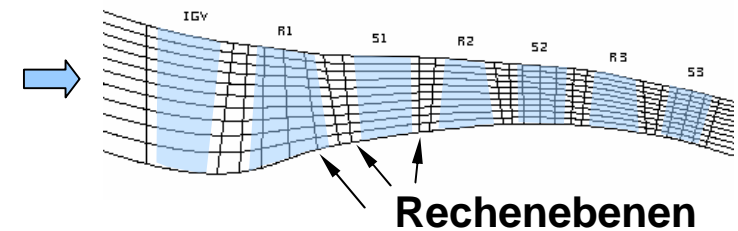
- **Diffusionszahl \downarrow**
- **Verdichterlänge \uparrow**
- **Scheibenbelastung \uparrow**

* Hochdruckverdichter

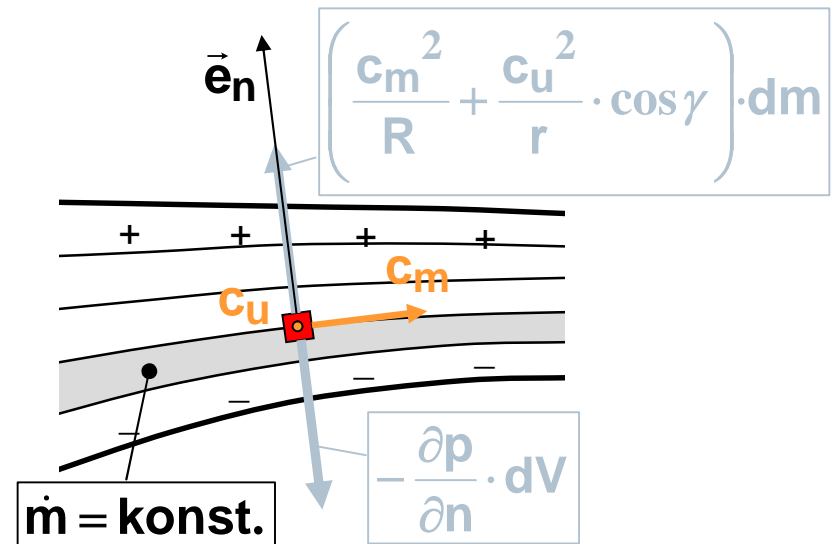
S2-Auslegung (Stromlinienkrümmungs-Verfahren)

- Iterative Berechnung der meridionalen Stromlinien
- Berechnung der Strömungsgrößen auf Rechenebenen etwa normal zur Strömung
- Kern des Lösungsalgorithmus:
 - Radiales Gleichgewicht
 - Kontinuität
- Aus Korrelationen:
 - Verluste (Profil~, Spalt~, Seitenwand~, etc.)
 - Blockage
 - Stabilität
 - etc.

Repräsentative S2-Stromfläche:



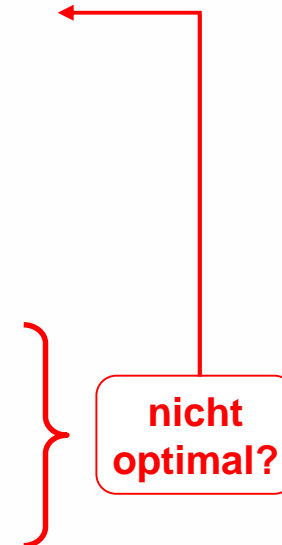
Radiales Gleichgewicht + Kontinuität:



Im S2-Auslegungsverfahren steckt ein wichtiger Teil der Firmen-Erfahrung

S2-Auslegung: Anwendung / Ergebnis

- Vorgehensweise bei der Optimierung des Ringraumes:
 - Iterative Variation von:
 - Ringraumgeometrie, Ein- u. Austrittskanten der Gitter
 - Stufendruckverhältnisse, Reaktionsgrade
 - Schaufelzahlen
 - etc.
 - SGV berechnet unter Zuhilfenahme der Korrelationen:
 - Radialverteilungen von:
Strömungsgrößen , Belastungs- und Verlustkenngrößen
 - Integrale Werte von:
Wirkungsgrad, Stabilität, etc.



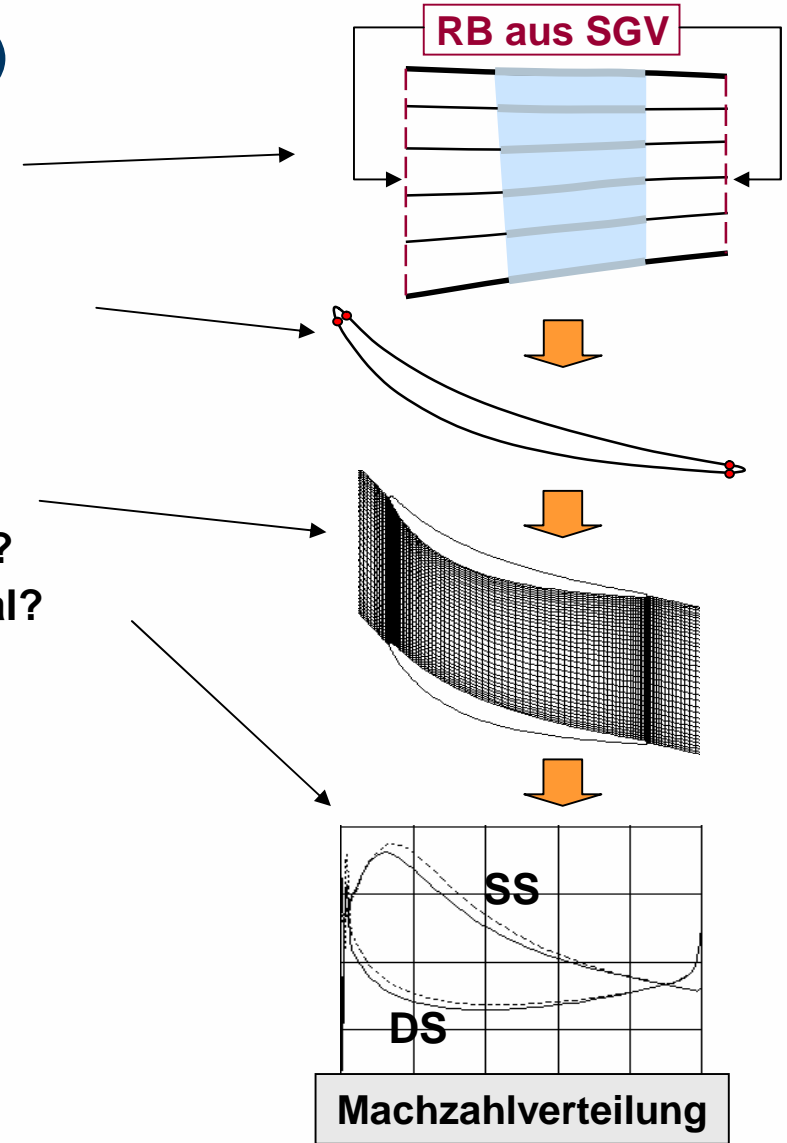
- Ergebnisse:
 1. Grundausslegung des Verdichters
 2. Strömungszustände am Ein- und Austritt der einzelnen Gitter
↳ Zielwerte für die Profilierung
 3. Startlösung für die 3D-Navier-Stokes-Rechnung

S1-Auslegung (2D-Euler + Grenzschicht)

- Auswahl einiger SGV-Stromlinien, auf denen die Schaufel profiliert wird
- Profilieren des Schaufelschnittes mit einem Geometrieerzeugungs-Programm (Einhaltung der mech. Randbed.!)
 - 2D-Euler: → Abströmwinkel eingestellt?
→ Machzahlverteilung optimal?
 - Grenzschichtverfahren:
→ Formparameter $H_{1,2}$ gut?
- Interpolation der Schaufel in radialer Richtung → „2D-Schaukel“

nicht optimal?

Alternative:
Randbedingungen aus 3D-NS
→ Erster Schritt zur 3D-Schaukel



3D-Auslegung (3D-Navier-Stokes, mehrstufig)

- Ziele:

- Abstimmung des Verdichters
- 3D-Optimierung von Beschaufelung und Ringraum

- **Praktische Vorgehensweise:** Bsp: 6-stufiger Hochdruckverdichter (13 Gitter)

- **Stationäre Rechnung des Gesamtverdichters mit Mittelungsebenen:**

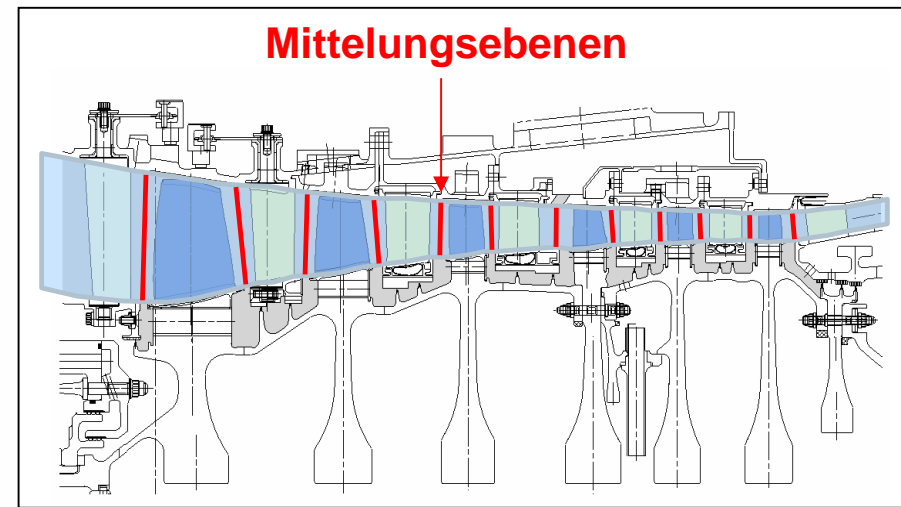
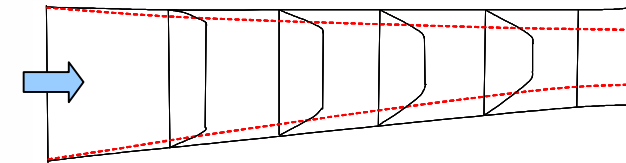
- OH-Netz mit 4 Mio Knoten
- $k-\omega$, ohne Transition, Wandfunktion
- 12.000 explizite Schritte
- 6 h auf NEC SX4 (7 Prozessoren)

- **Tagsüber:**

Optimierung mit 2D-Euler oder 3D-NS-Einzelstufenrechnung

- **Nachts: 2 Betriebspunkte**
- **Wochenende: Kennlinie (10 Punkte)**
- ↪ **Insgesamt ca. 200 Rechnungen**

Profile der Meridionalgeschw.



3D-NS ist heute Standardwerkzeug zur Optimierung auf 'Delta-Basis'