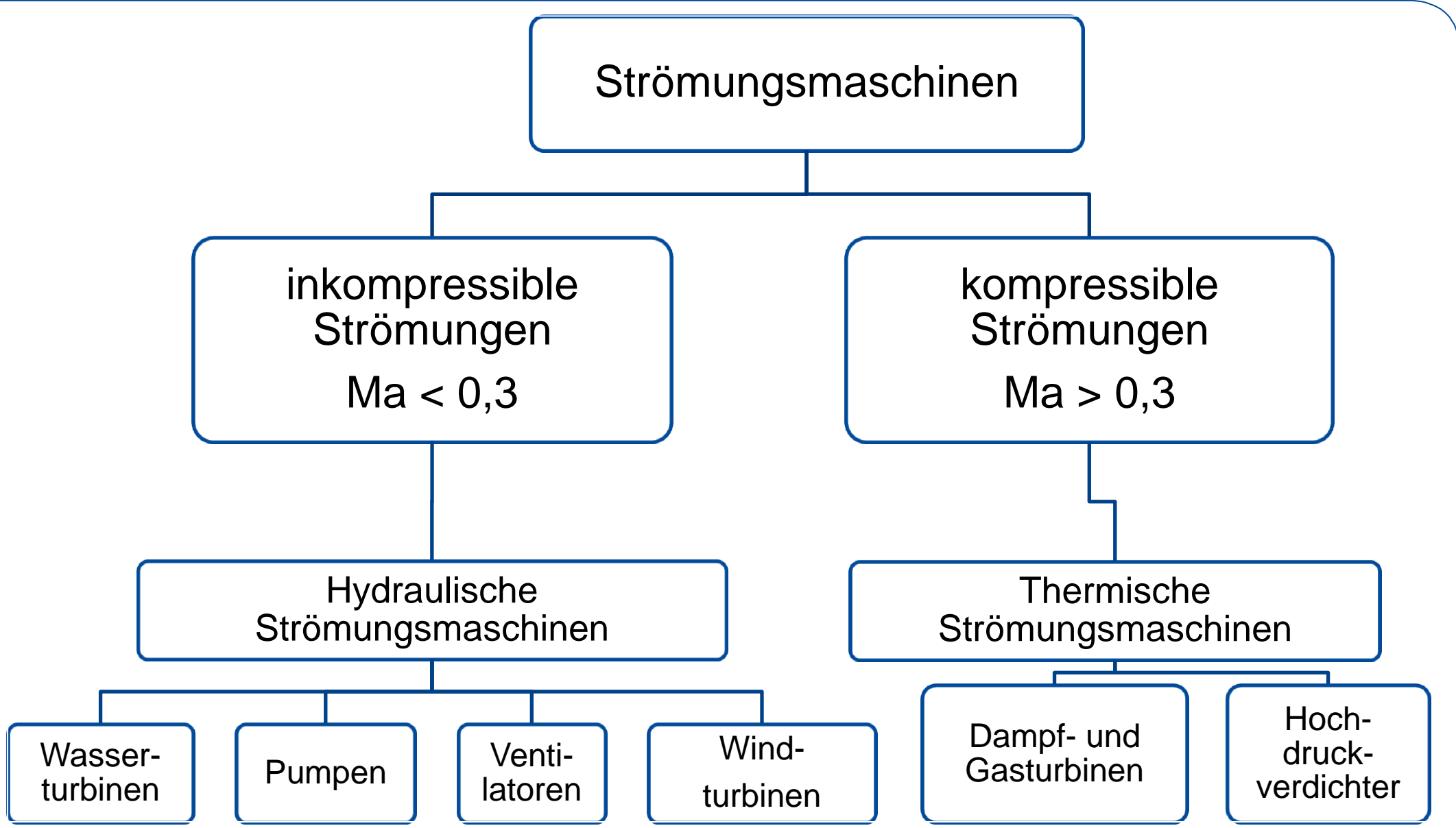


Sommersemester 2016

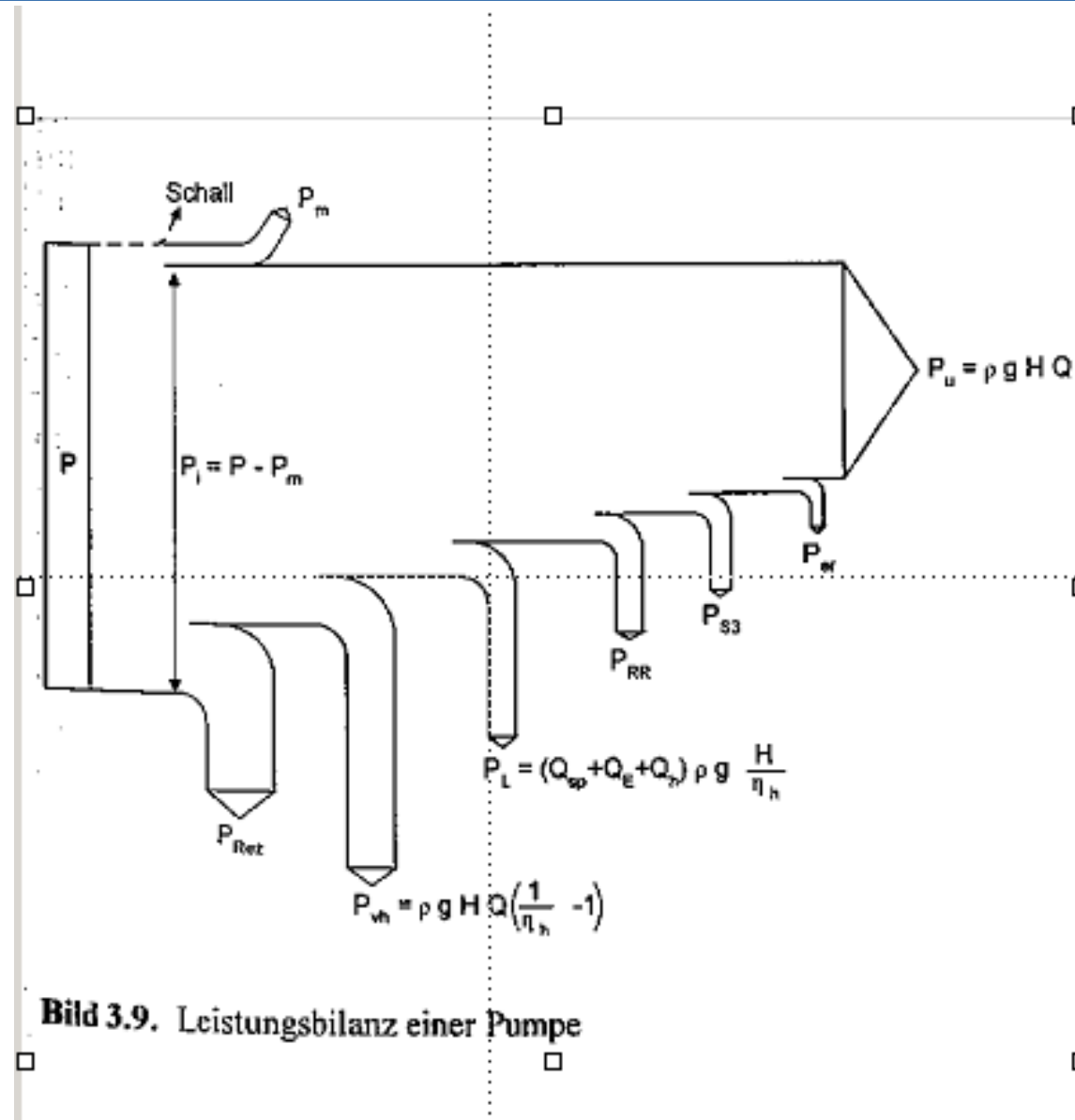
Kolben- und Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm  
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

- Einführung, Arten und grundsätzlicher Aufbau von Strömungsmaschinen
- Aufbau und Funktionsweise von Flugtriebwerken und den enthaltenen Strömungsmaschinen
- Aufbau und Funktionsweise von Windturbinen
- Aufbau, Funktionsweise und Kennlinien von Pumpen
- Entwurfsmethoden
- **Optimierungsmethoden**



- Reduzierung der strömungstechnischen Verluste
- Verbesserung des strukturemechanisches Verhalten (Festigkeit, Steifigkeit, Schwingungsverhalten)
- Verbesserung des akustisches Verhalten (Abstrahlung von Fluid-, Körper-, und Luftschall)
- Reduzierung der Herstellkosten
- anderes

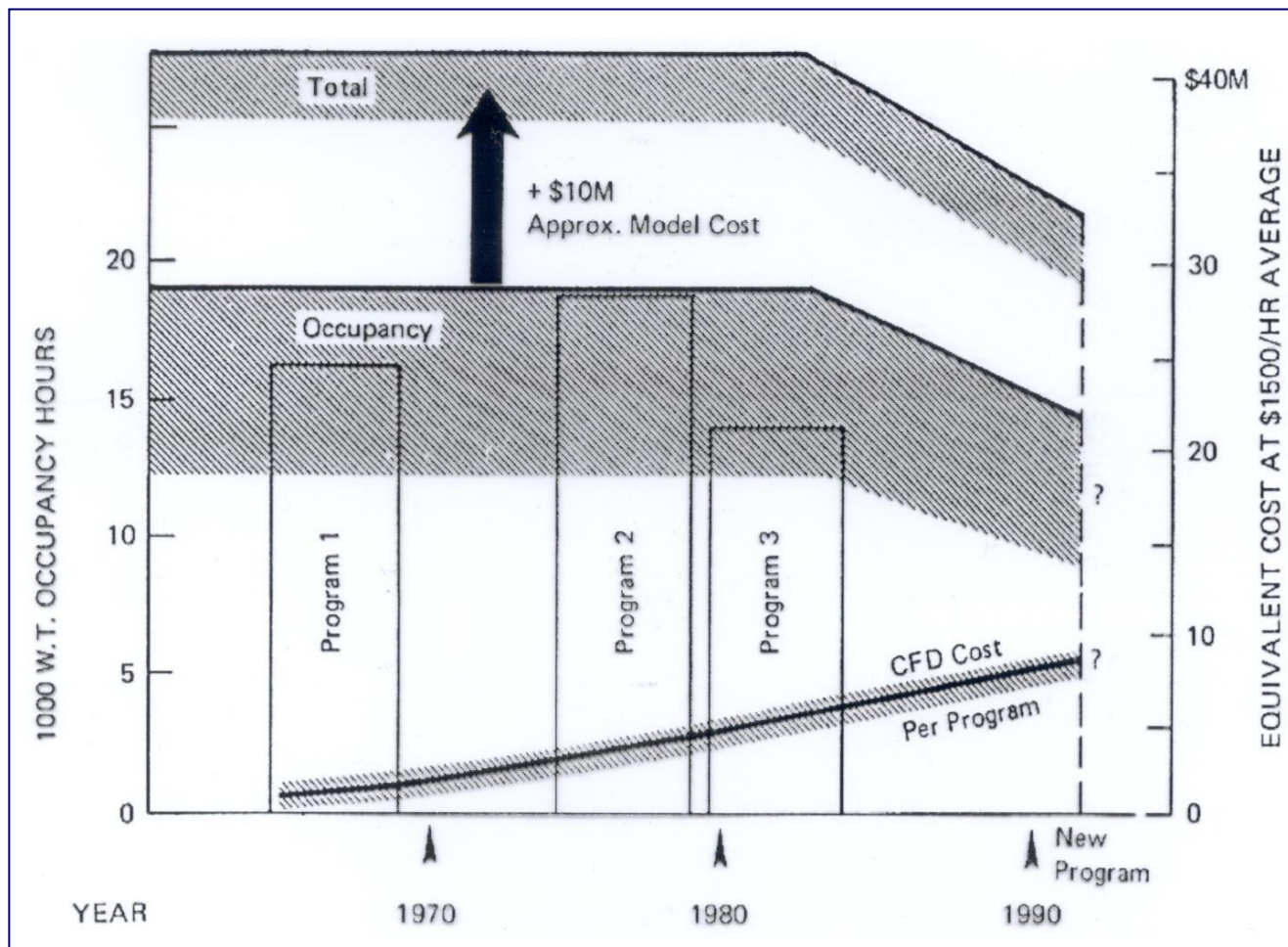


- experimentelle Methoden
- numerische Methoden



- Analyse der strömungsmechanischen Vorgänge (numerisch oder/und experimentell)
- Verstehen der Verlustursachen
- iterative Verbesserung des Bauteils oder Optimierung mit mathematischen Methoden (Optimierungsziel muss klar sein!!!)

## Costs of Wind Tunnel Tests (Civil Transport Aircraft); Reference: BOING



/The Influence of Computational Fluid Dynamics of Experimental Aerospace Facilities.  
Nat. Academy Press,  
Washington, D.C., 1983/



Simulationen können

- eindimensional / zweidimensional / dreidimensional
- stationär / instationär
- reibungsfrei / reibungsbehaftet

sein.

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Navier - Stokes - Gleichungen

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

4 unbekannte Größen :

$$u_1, u_2, u_3, p$$

4 Gleichungen und geeignete Anfangs- und Randbedingungen

Lösung: a) Direkte Numerische Simulation

b) Large Eddy Simulation

b) Zeitliche Mittelung  $\Rightarrow$  mittlere Strömungskräfte  
mittlere Drücke  
mittlere Geschwindigkeiten  
Statische Behandlung der Turbulenz

## Beispiel Pumpenstufe

Gehäusedurchmesser ca.  $d=180$  mm

$$\text{Re} = \frac{U \cdot d}{\nu} = 3 \cdot 10^5$$

für  $\eta$  als Größe des kleinsten Turbulenzelements gilt näherungsweise:

$$\frac{\eta}{d} \approx \text{Re}_u^{-3/4}$$
$$\text{Re}_u = \frac{u \cdot d}{\nu} \approx 0,1 \cdot \text{Re}$$

Für unser Beispiel ergibt sich  $\eta \approx 0,00043 d$ , das entspricht ca. 0,01mm.

Zur Auflösung der kleinsten Turbulenzelemente müssten ca.  $2,5 \cdot 10^{11}$  Gitterpunkte für die Vernetzung des durchströmten Raumes verwendet werden.

Je Gitterpunkt und Zeitschritt sind ca. 500 Flops notwendig.

Ein statistisch aussagekräftiger Mittelwert ist nach ca. 10.000 Zeitschritten erreicht.

Für eine Direkte Simulation wären demnach ca.  $1.25 \cdot 10^{18}$  MFlops notwendig.

Rechner	Rechengeschwindigkeit in MFlops	Rechenzeit für unser Beispiel in Jahren
Cluster JUGENE	575 167.000.000	ca. 900 Jahre

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Navier - Stokes - Gleichungen

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

4 unbekannte Größen :

$$u_1, u_2, u_3, p$$

4 Gleichungen und geeignete Anfangs- und Randbedingungen

Lösung: a) Direkte Numerische Simulation

b) Large Eddy Simulation

b) Zeitliche Mittelung  $\Rightarrow$  mittlere Strömungskräfte  
mittlere Drücke  
mittlere Geschwindigkeiten  
Statische Behandlung der Turbulenz

## Prinzip und Auswirkung

Aufspaltung des Augenblickswertes der betrachteten Größe in einen Mittelwert und einem Schwankungswert, z.B.

stationäre Strömung:  $u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u_i'(x_i, t)$

Bei instationären Strömungen wird der sogenannte „Ensemble-Mittelwert“ über eine große Anzahl von Realisationen der Strömung gebildet.

Durch die Zeitmittelung treten zusätzliche Korrelationen zwischen verschiedenen Schwankungsgeschwindigkeiten auf.

Diese Korrelationen stellen den Impulstransport durch die turbulenten Schwankungsbewegungen dar und werden durch Turbulenzmodelle beschrieben.

# Ergebnis der Zeitmittelung für eine stationäre Strömung

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0$$

Impulsgleichung

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \rho \bar{g}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right]$$

\* Durch Zeitmittelung treten zusätzliche Korrelationen zwischen verschiedenen Schwankungsgeschwindigkeiten auf

\*  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  → Impulstransport durch turbulente Schwankungsbewegungen (turbulente Spannungen)

► Problem :

Berechnung der Reynoldsspannungen  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$

Berechnung der Transportglieder  $-\rho \overline{u'_i \varphi'}$

(kommen in den gemittelten Gleichungen für skalare Größen vor)

- Problem wird durch Turbulenzmodelle gelöst
- Die komplexen Effekte der Turbulenz werden in vereinfachter Weise beschrieben
- Turbulenzmodelle bauen auf empirischen Informationen auf.

- ▶ Der Einfluss der turbulenten Schwankungsbewegung wird ohne Berücksichtigung des eigentlichen Turbulenzmechanismus beschrieben.
  
- ▶ BOUSSINESQ: Einführung einer Analogie zum newtonschen Schubspannungsansatz für laminare Scherströmungen

$$\tau_{ij} = \eta \frac{du_i}{dx_j}$$

$$\tau'_{ij} = \eta' \frac{du_i}{dx_j}$$

Wirbelviskosität  $\eta'$

$\eta$

Beschreibung des Impulsaustausches  
aufgrund der molekularen Bewegung

$\eta'$

Beschreibung des Impulsaustausches aufgrund der  
makroskopischen turbulenten Schwankungsbewegung

- ▶ Die Kurve der gemittelten dimensionslosen Geschwindigkeit dargestellt über dem dimensionslosem Wandabstand zeigt 3 Zonen:
  - 1) viskose Unterschicht (molekulare Viskosität dominiert)
  - 2) Übergangsschicht (molekulare und turbulente „Viskosität“ haben gleiche Größenordnung)
  - 3) turbulente „Viskosität“ dominiert

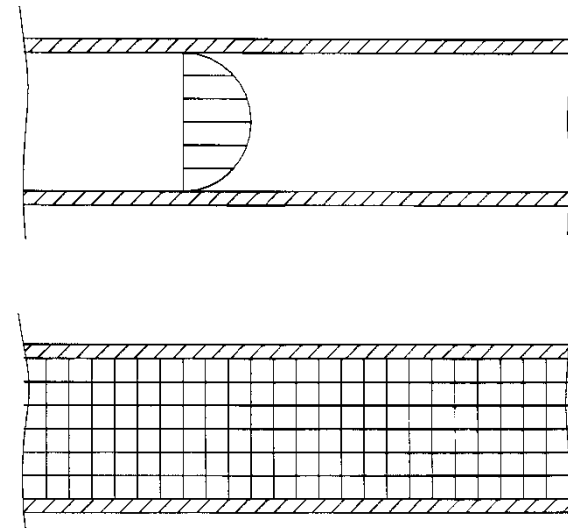
Analytische Lösung  $\Rightarrow$  stetige Funktion, Variablen können an allen Stellen im Lösungsgebiet berechnet werden

Numerische Lösung  $\Rightarrow$  Satz von Zahlen, Verlauf der Änderung einer Größe kann konstruiert werden (ähnlich Experiment)  
Im Prinzip kann die Maschenweite beliebig klein gewählt werden.

Beispiel laminare Rohrströmung eines Newtonschen Fluids:

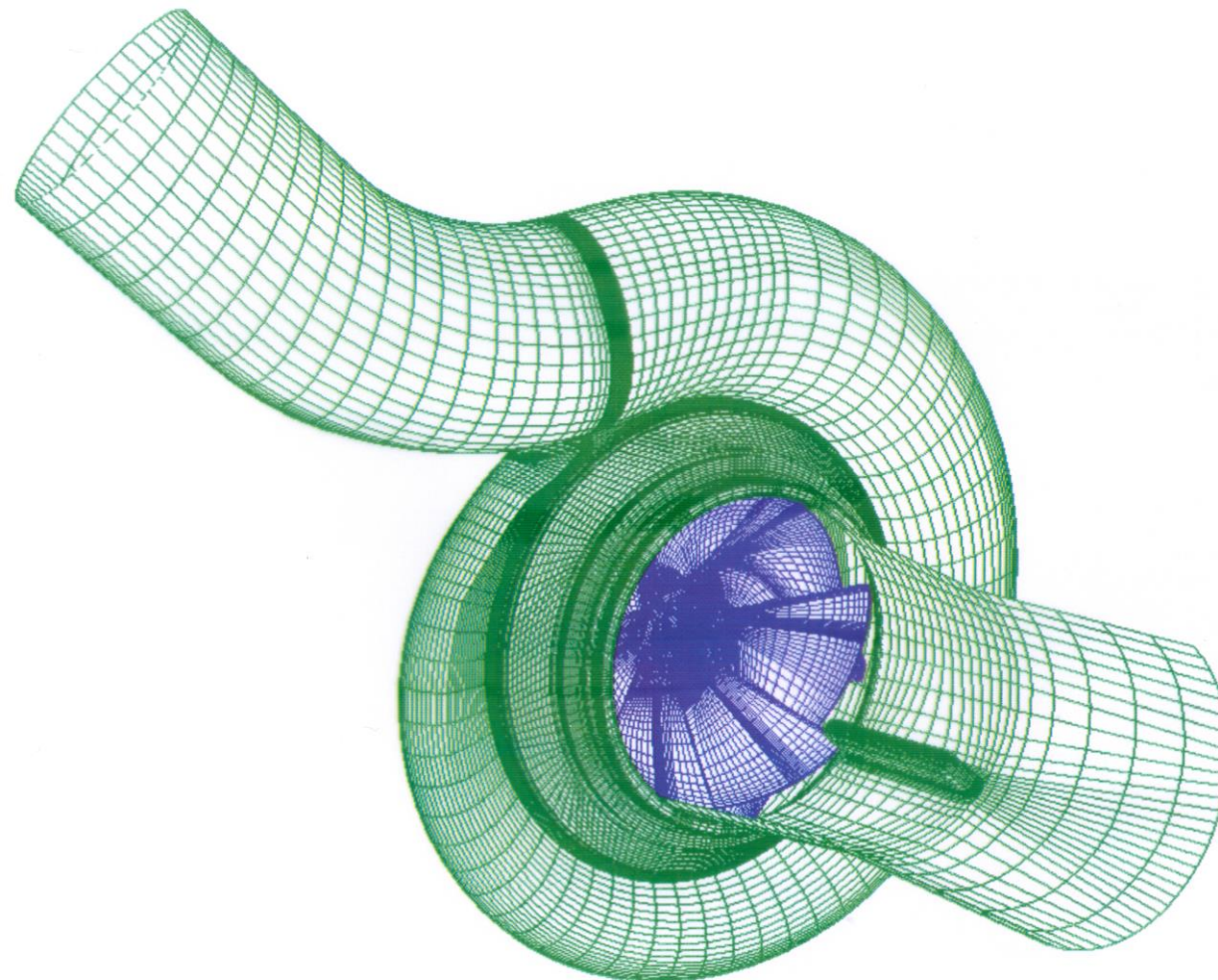
Analytische Beziehung für die Geschwindigkeitsverteilung:

$$v(r) = \frac{R^2}{4\eta} \left( -\frac{dp}{dx} \right) \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

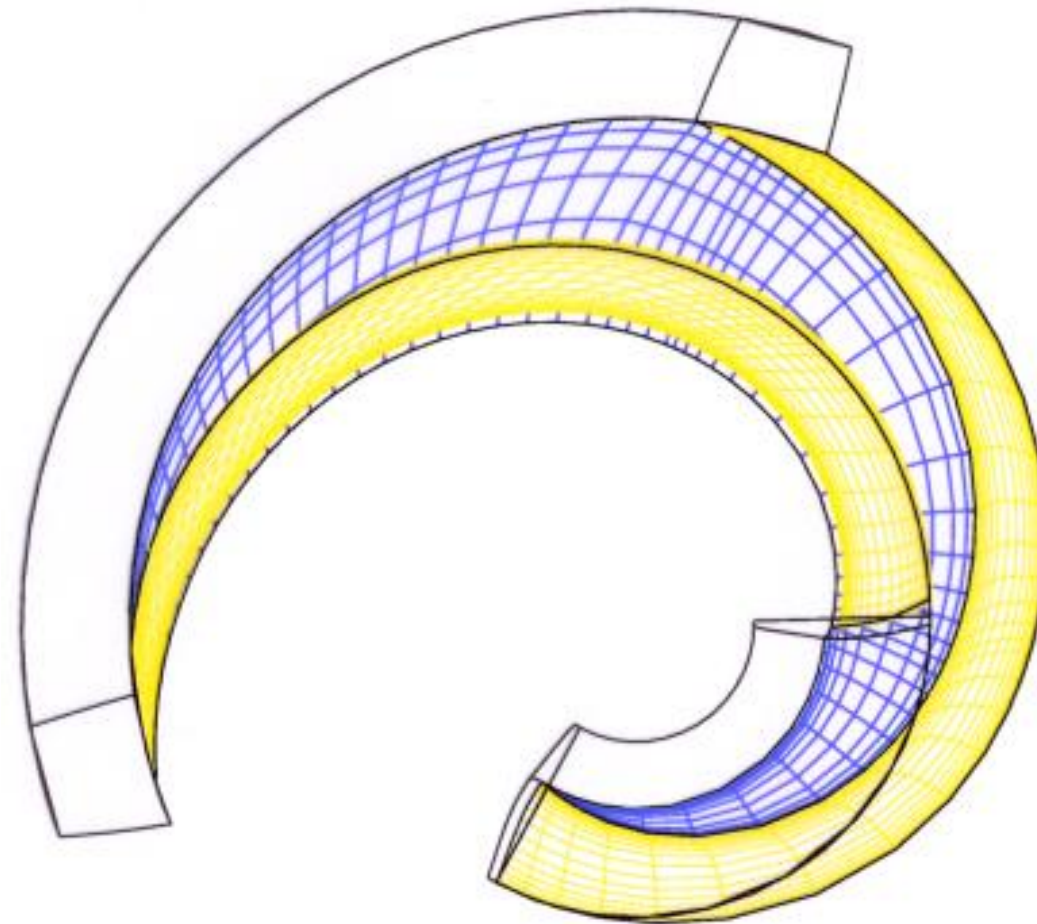


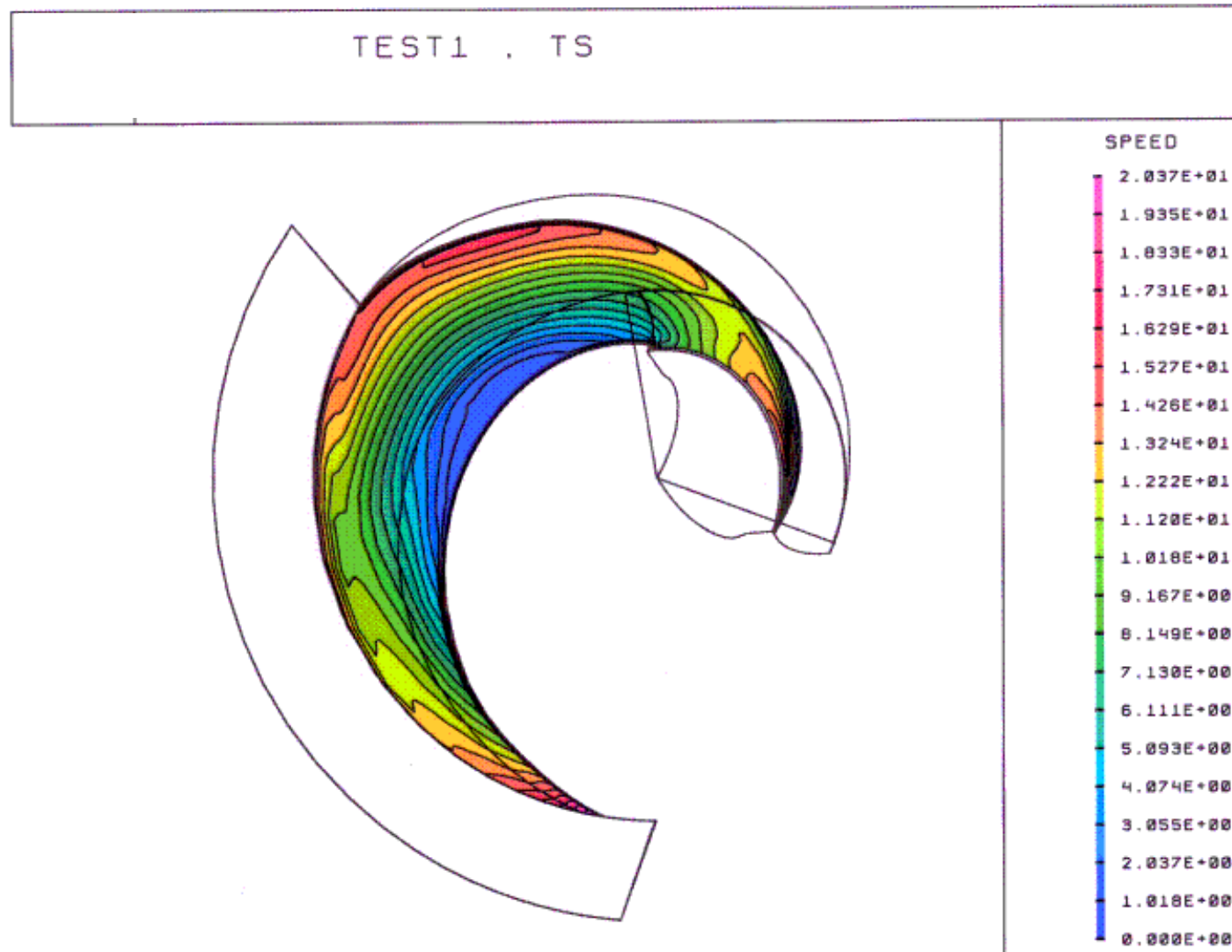
# Rechengitter

BL 80/175

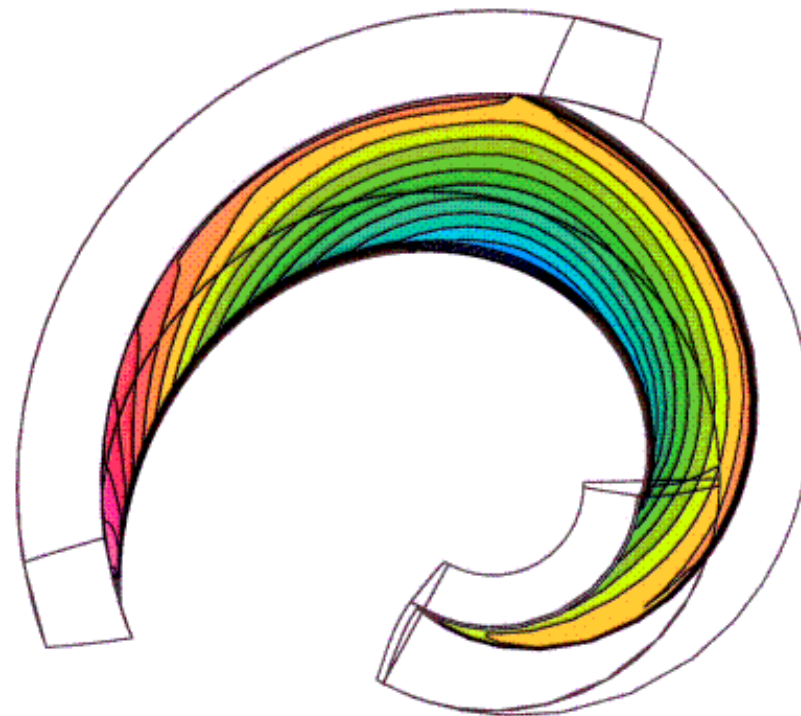


# Geometrie

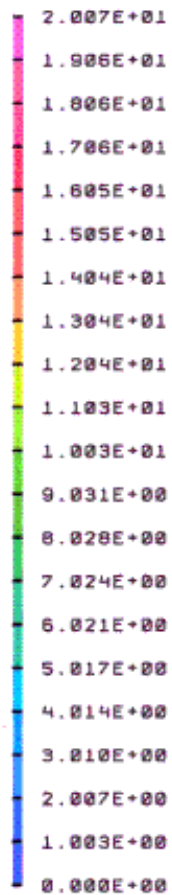




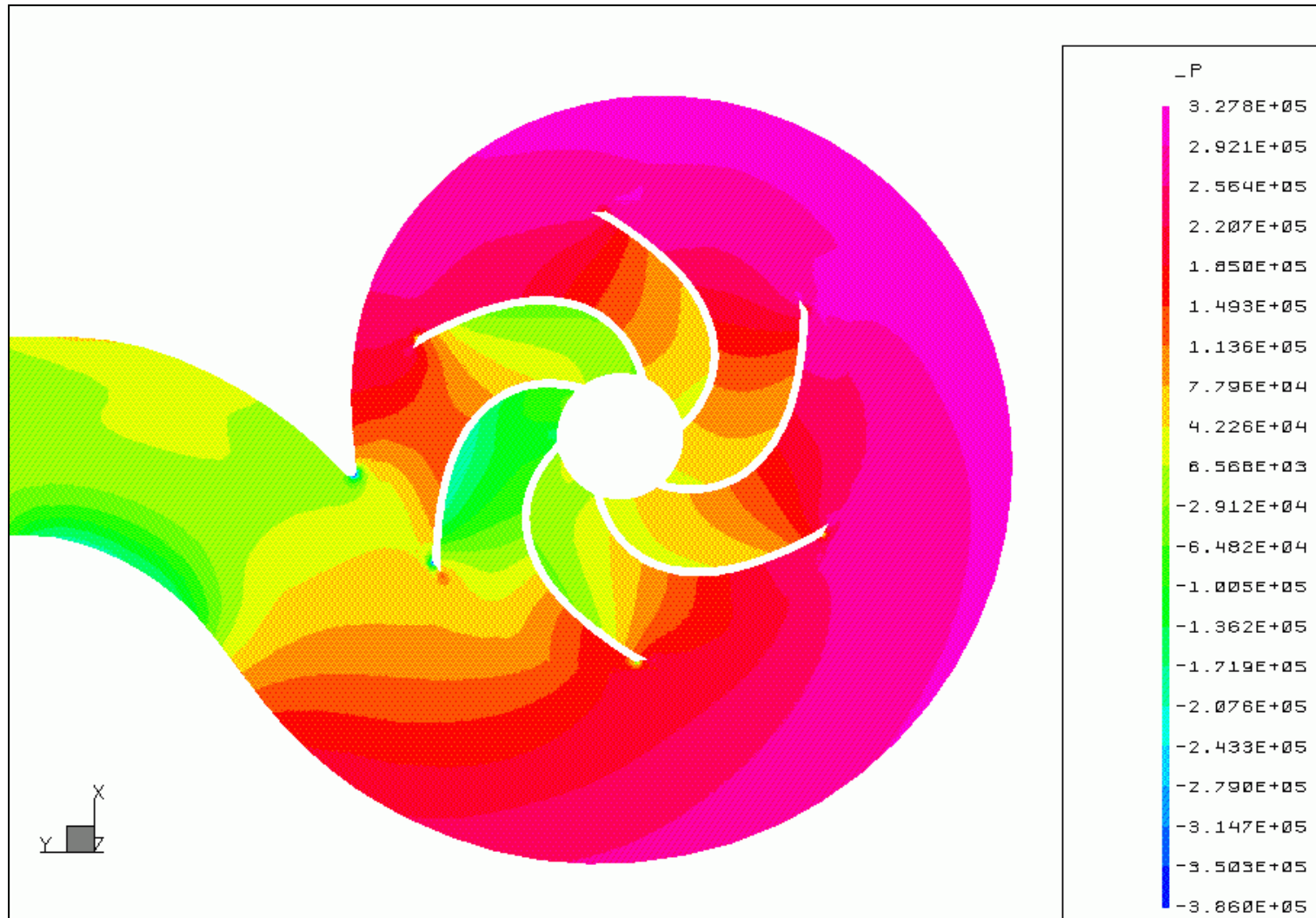
TEST2 . TS



SPEED

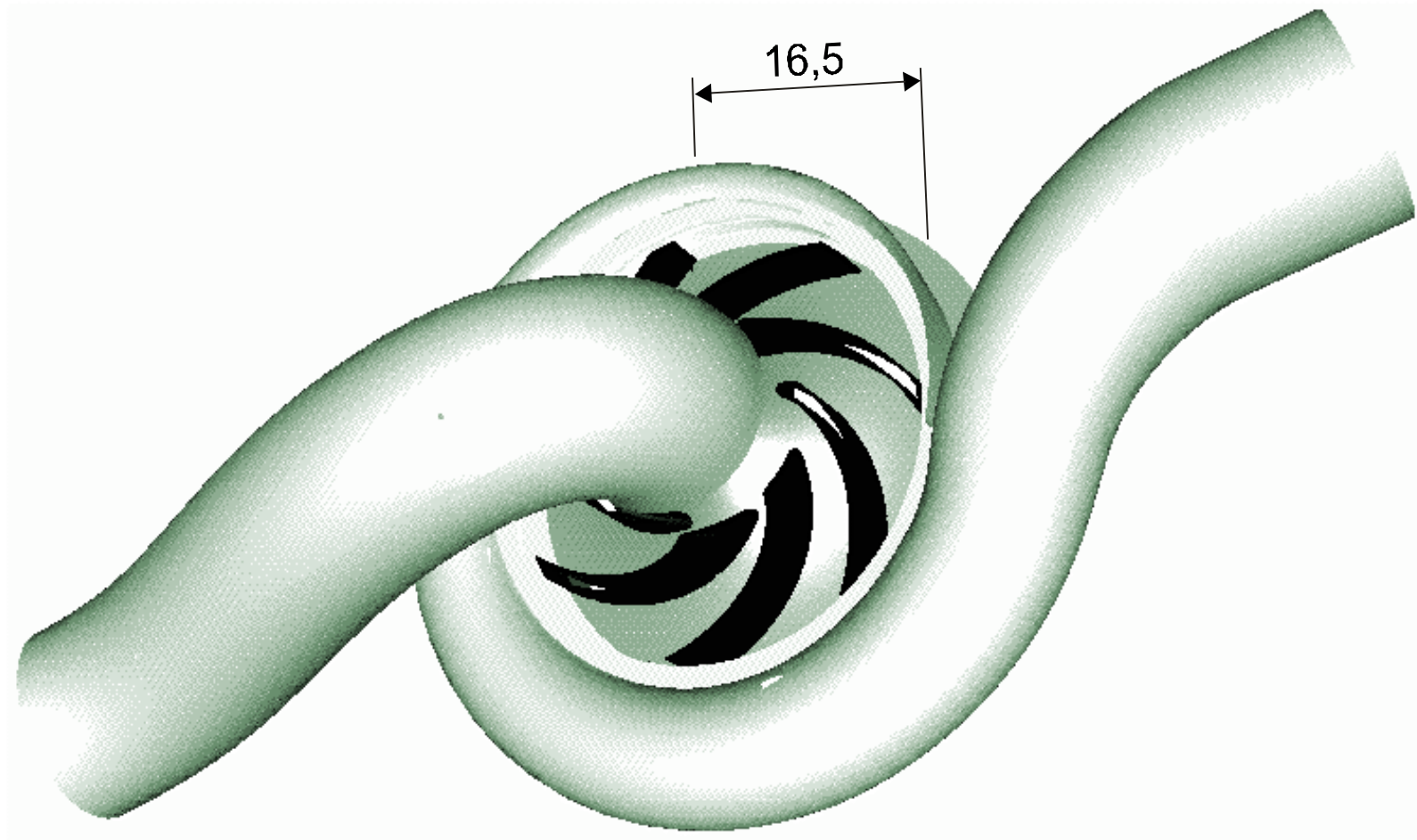


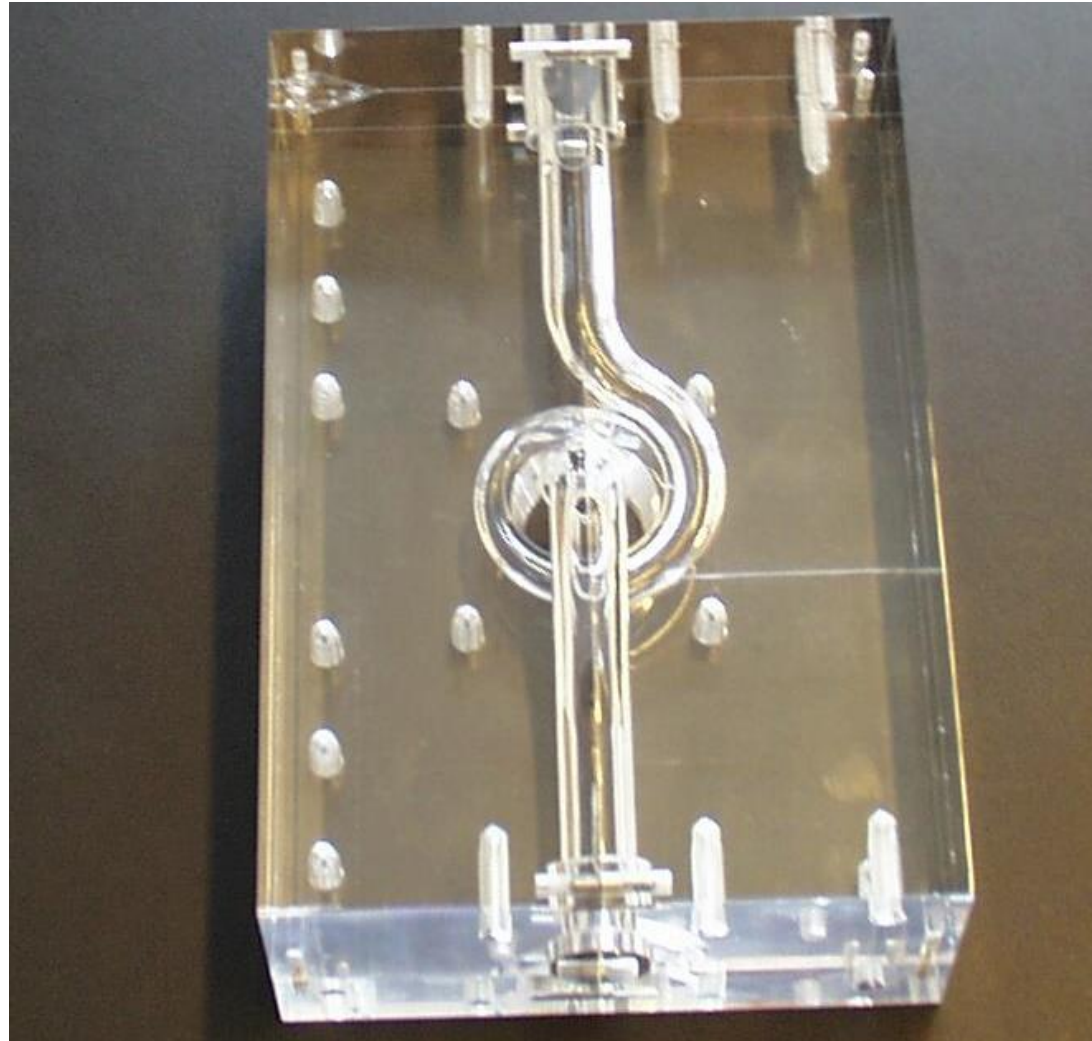
## Druckverteilung



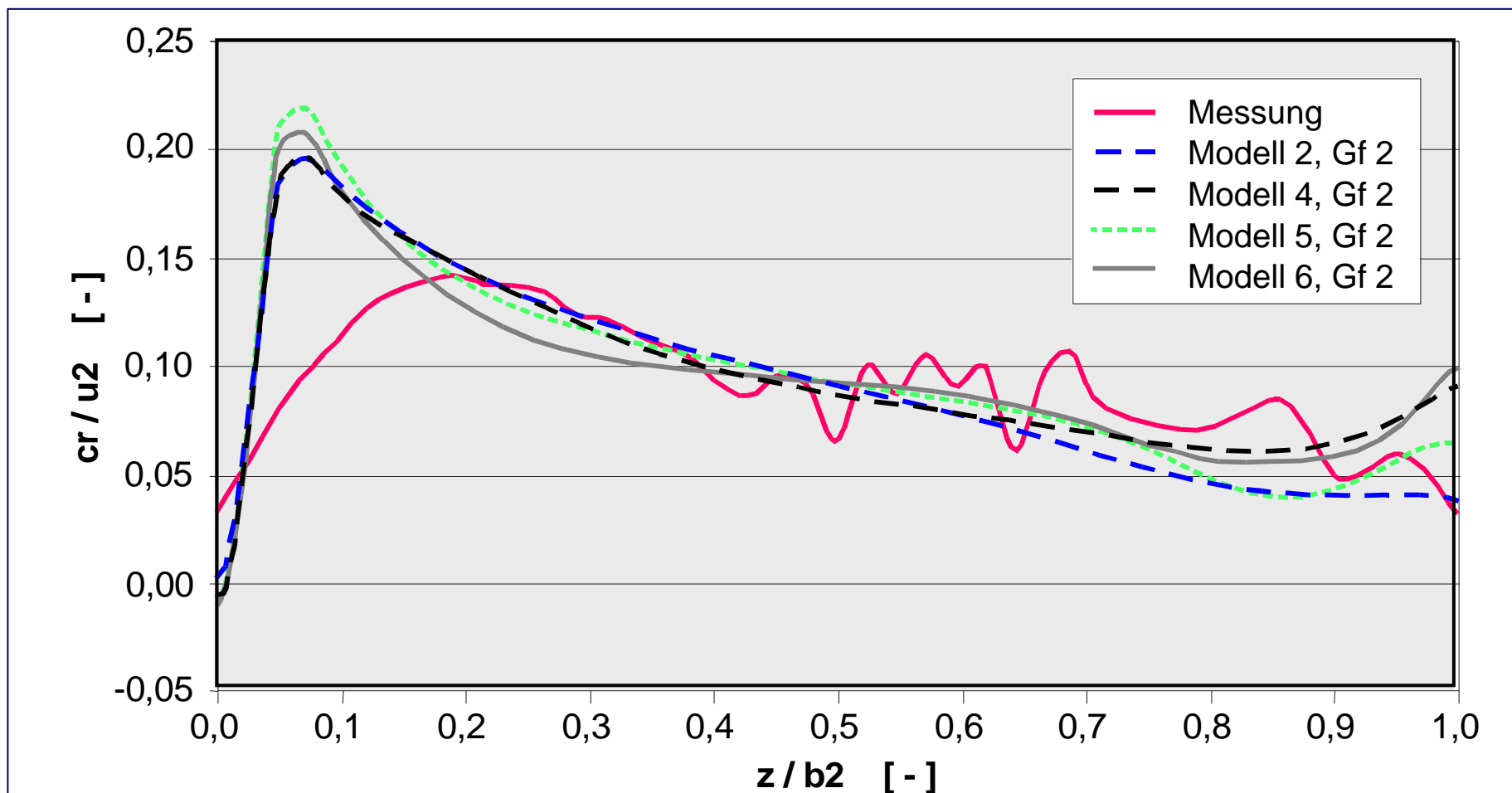
## Analyse der Strömung durch

- Beobachtung und qualitative Analyse, z.B. mit Schlierenbildern
- mit Sonden zur Messung von Drücken, Geschwindigkeiten, Wandschubspannungen
- Laseroptische Verfahren (LDA, PIV)
- etc.





gemessene und gerechnete Radialkomponente der Absolutgeschwindigkeit  $c_r$  als Funktion der Austrittsbreite des Laufrades  $b_2$



Analyse des Strukturmechanischen Verhaltens, z.B. durch

- numerische Untersuchung des Verformungs- und Bruchverhaltens mittels FEM oder „einfache“ Überschlagsverfahren
- numerische Untersuchung des Schwingungsverhaltens, z.B. durch Berechnung der Eigenfrequenzen, der Eigenschwingformen und der Betriebsschwingformen mittels FEM



Analyse des Strukturmechanischen Verhaltens, z.B. durch

- experimentelle Untersuchung des Verformungs- und Bruchverhaltens
- experimentelle Untersuchung des Schwingungsverhaltens, z.B. durch Messung der Eigenfrequenzen, der Eigenschwingformen und der Betriebsschwingformen

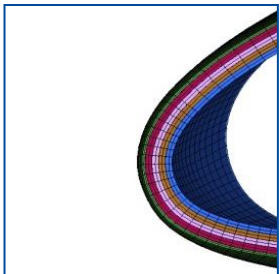
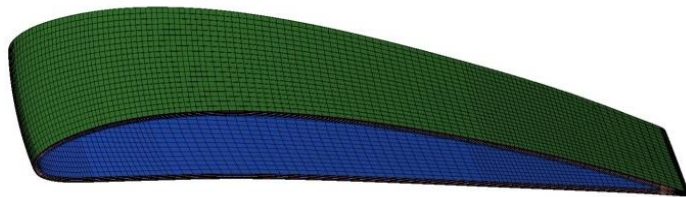
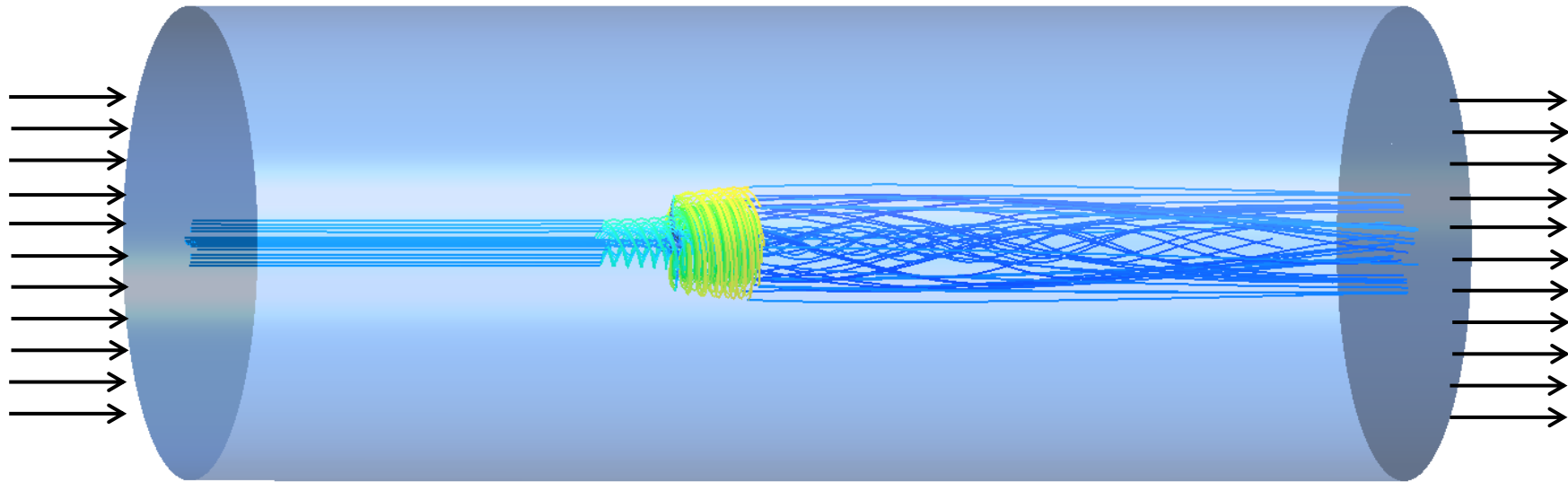
- detaillierter Aufbau des Bauteils und die lokalen Werkstoffeigenschaften müssen bekannt sein (Messung der Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Faserorientierung oder Simulation der Herstellprozesses)

Tafelbild

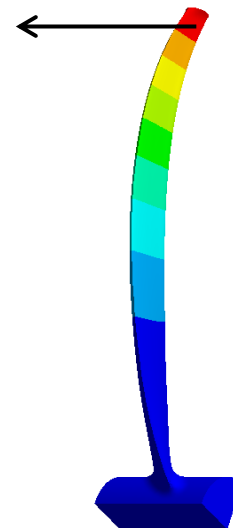
- Beispiel: lagenweiser Aufbau einer Rotorschaufel (Realisierung z.B. für Wind- und Gezeitenturbinen, Schiffspropellern, Rührern)



- strömungsinduzierte Kräfte verformen ein Bauteil – das verformte Bauteil hat eine veränderte Umströmung, daraus folgen wiederum veränderte strömungsinduzierte Kräfte – gekoppelte und iterative Simulation von Strömungsfeld (mittels CFD) und Verformungen (mittels FEM)
- sinnvoll z.B. bei Rotoren von Hubschraubern, Rührern und Windturbinen



Maximum  
deformation  
= 30 cm

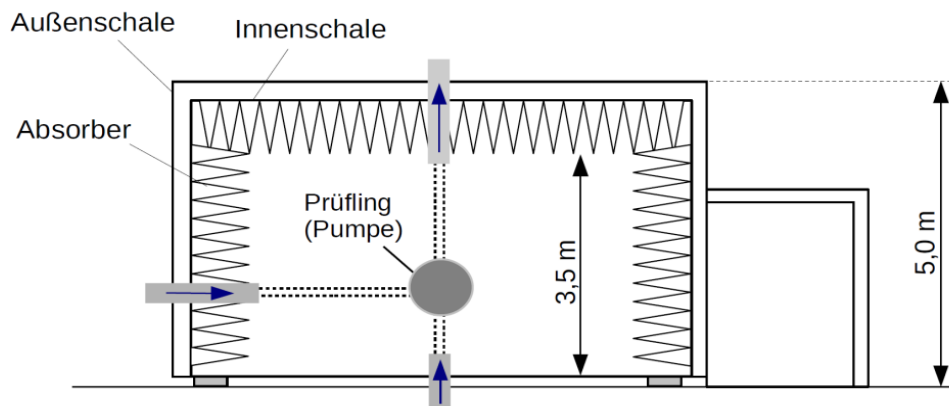
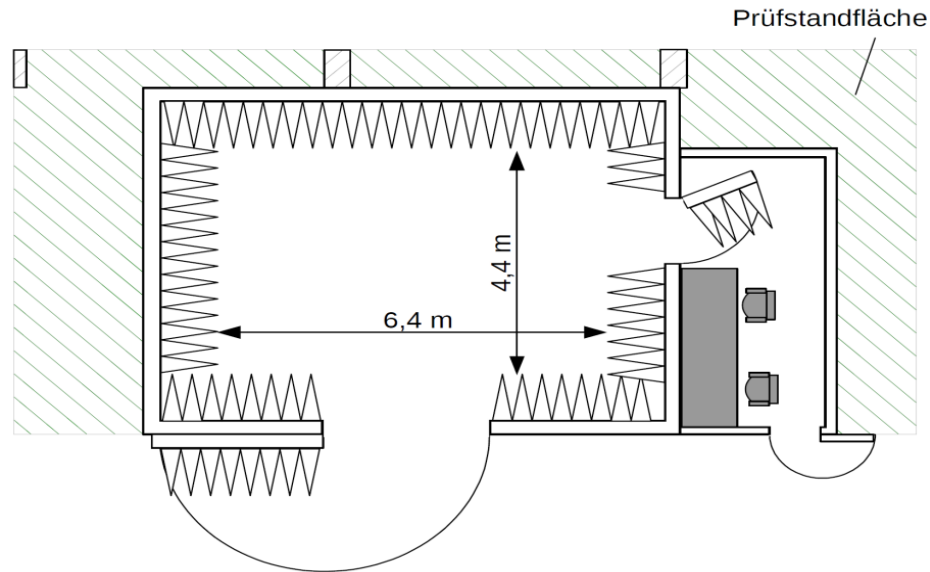




## Analyse des akustischen Verhaltens durch Messung

- Schalldruck mit Mikrofonen / Hydrofonen
- Schallintensität mit Schallintensitätssonden
- Schallquellenlokalisierung mit Mikrofon-Arrays

# Schallmessraum mit hydroakustischem Prüfstand



## Analyse des akustischen Verhaltens durch

- instationäre Strömungssimulation, ggf. Simulation der daraus resultierenden Körperschwingungen, Simulation der Schallabstrahlung in das Fluid und an die umgebende Luft

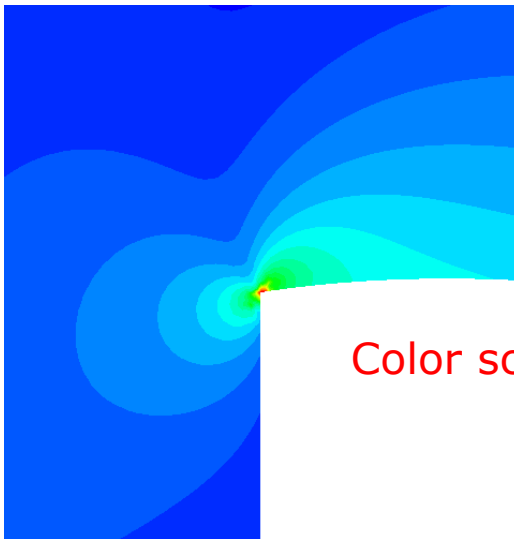


Ziel:

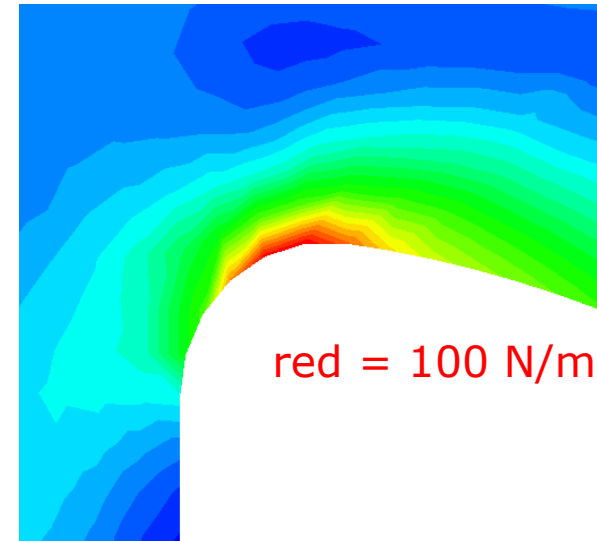
Reduzierung der Kerbspannungen an Querschnittsprüngen

- Avoid failure due to high stress gradients / stress concentrations caused by notch effects
- Especially critical for changing / cyclic loading conditions (p, T)

red ->  $\infty$



Color scales are different!



red = 100 N/mm<sup>2</sup>

## Sharp edge

Stress singularity, stress increases with mesh refinement -> infinity

## Fillet (radius)

Stress reduced, but still notch effect

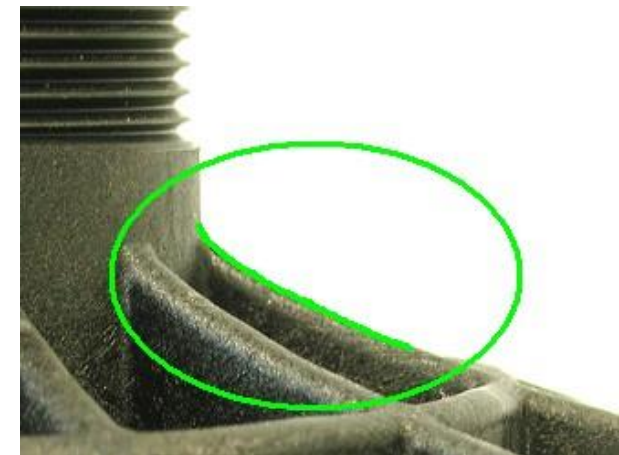


- In hochbelasteten Teilen in der Natur treten nur sehr geringe Kerbspannungen auf.
- Beispiele sind Haifischzähne, Löwen- und Bärenkrallen, Astgabeln von Bäumen.
- Dieses Phänomen wurde sehr intensiv von **Herrn Prof. Mattheck** im Forschungszentrum Karlsruhe erforscht.
- Ergebnis dieser Forschungen ist eine aus der Natur adaptierte Methode zur Reduktion von Kerbspannungen an technischen Bauteilen.

- Idee: technische Bauteile wie Bäume wachsen lassen
- Die Idee wurde von **Herrn Prof. Mattheck** als ein Ergebnis seiner Forschungsarbeiten entwickelt und in einer Software umgesetzt.
- Ergebnis ist das sogenannte "eco-design"
- CAO -> Computer Aided Optimization
- Die Methode basiert auf dem "**axiom of constant stress**"
- Z.B. Bäume besitzen eine nahezu homogene Spannungsverteilung ohne ausgeprägte Spannungsspitzen im inneren Aufbau.
- Die CAO-Methode kann in Verbindung mit FEA zur Optimierung der Form technischer Bauteile genutzt werden.



Wie reduzieren Bäume Kerbspannungen?



Die CAO-Idee: ein technisches Bauteil wie einen Baum wachsen lassen.

- Axiom of constant stress -> the aim is to have a homogeneous stress distribution -> high stress regions must geometrically modified
- Originally, CAO used a creep law to realize a growth effect
- Later: stress field converted into temperature field, definition of a layer capable of growing (or shrinking), temperature induced deformation leads to a new shape (nodal displacements are added to nodal coordinates)

$$T_i = A(\sigma_i - \sigma_{ref})$$

- Today: growth normal to the surface, growth (=nodal displacement) is proportional to stress

# CAO - Implementation

- CAO Standard for 2D problems and CAO Submodel which makes use of the ABAQUS submodeling feature for 3D problems
- CAO comes as an add-in for ABAQUS
- Software carries out iterations until stress criterion (v. Mises,...) is met
- Uses a remeshing feature to keep element quality high
- Input: mesh, boundary conditions
- Output: new nodal coordinates

# Ergebnis der CAO

