

Strömungstechnische Grundlagen – numerische Optimierungsverfahren

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Warum Strömungstechnik?

Entwurf der einzelnen Komponenten

Lauftrad

Leitrad

Gehäuse

Strömungstechnische Optimierung der Komponenten

Verlustminimierung

Geräuschminimierung

Vermeidung von Kavitation

Kräfte minimierung

Einlaufbauwerke

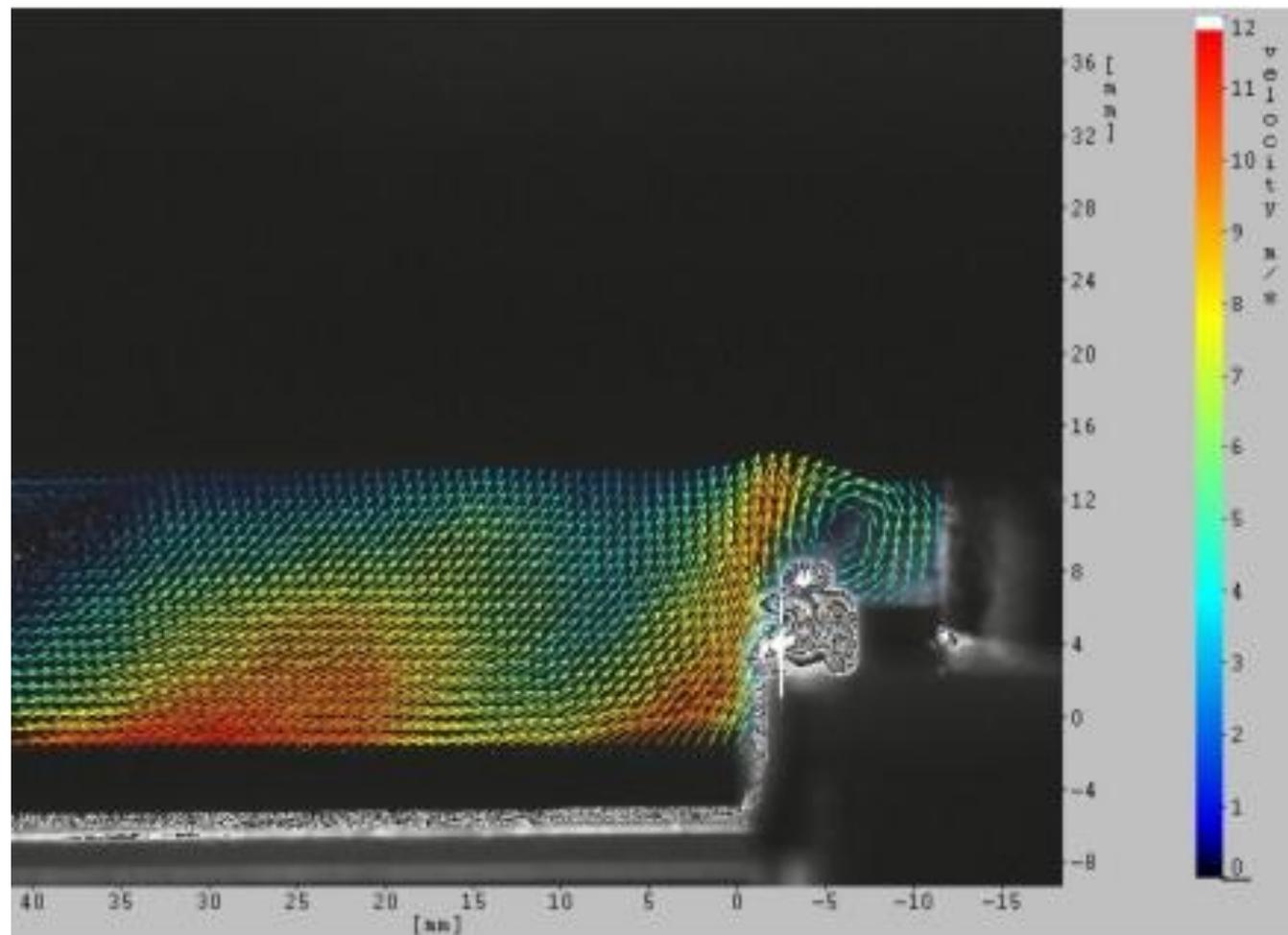
Warum Strömungstechnik?

Kühlung

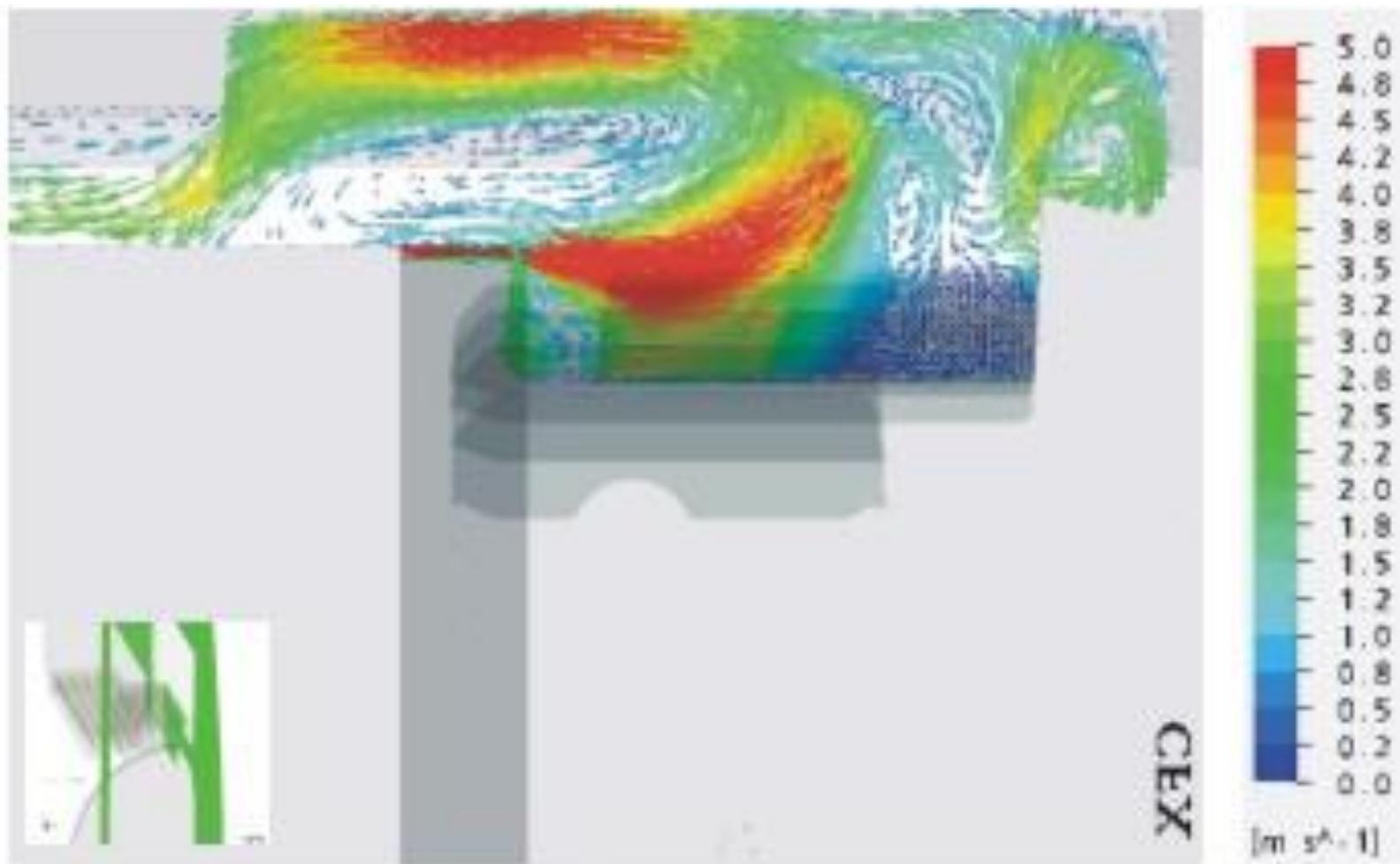
Motor
Regelelektronik

Akustik

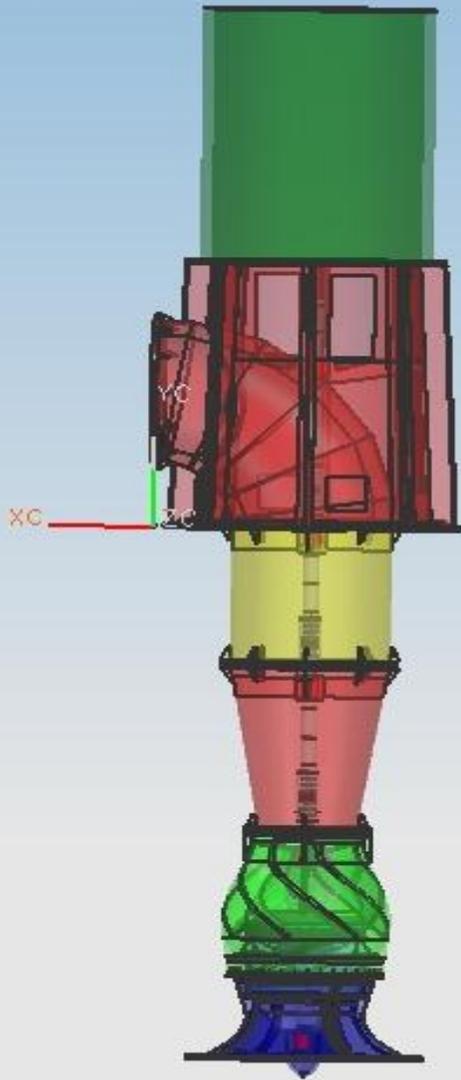
Gemessenes Geschwindigkeitsfeld an einem Elektronikmodul



Gerechnetes Geschwindigkeitsfeld an einem Elektronikmodul



„Maßgeschneiderte“ Pumpe



Kühlwasserpumpe für
konventionelles Kraftwerk

$P = 3,6 \text{ MW}$ (4 permanent, 1 stand by)

$H = 29 \text{ m}$

$Q = 35.000 \text{ m}^3/\text{h}$

$l_{\text{Welle}} = 17,5 \text{ m}$

$d_{\text{Laufgrad}} = 1,8 \text{ m}$

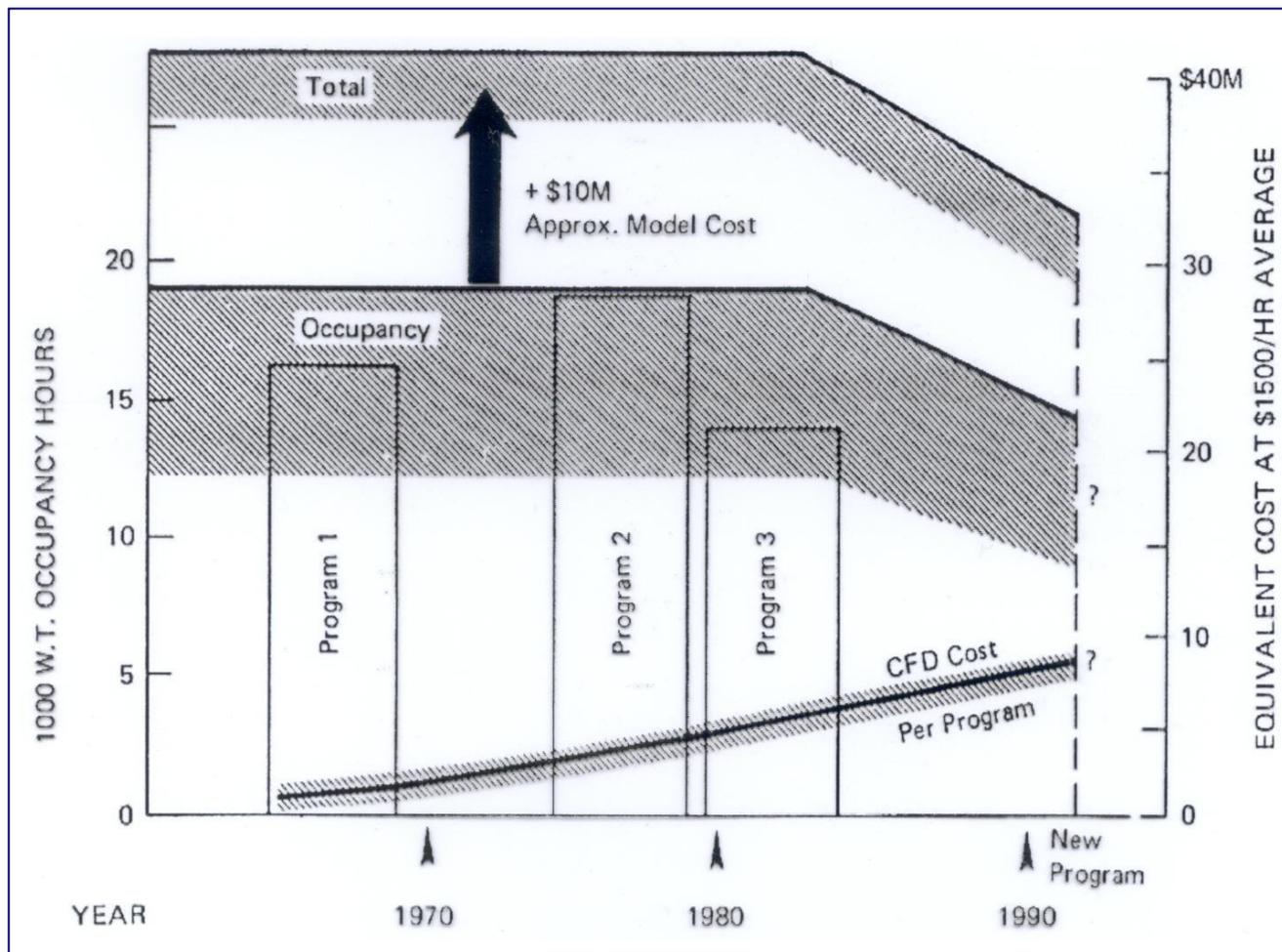
$l_{\text{EBW}} = 50 \text{ m}$

$m \text{ ca. } 115 \text{ t}$

Und warum numerische Verfahren?

- ▶ Verkürzung der Entwicklungszeiten und -kosten
- ▶ Besseres Verständnis der strömungstechnischen Vorgänge in Strömungsmaschinen „gläserne Maschine“
- ▶ Technische Optimierung
(Wirkungsgrad, Kavitation, Geräusche, Schwingungen, ...)

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



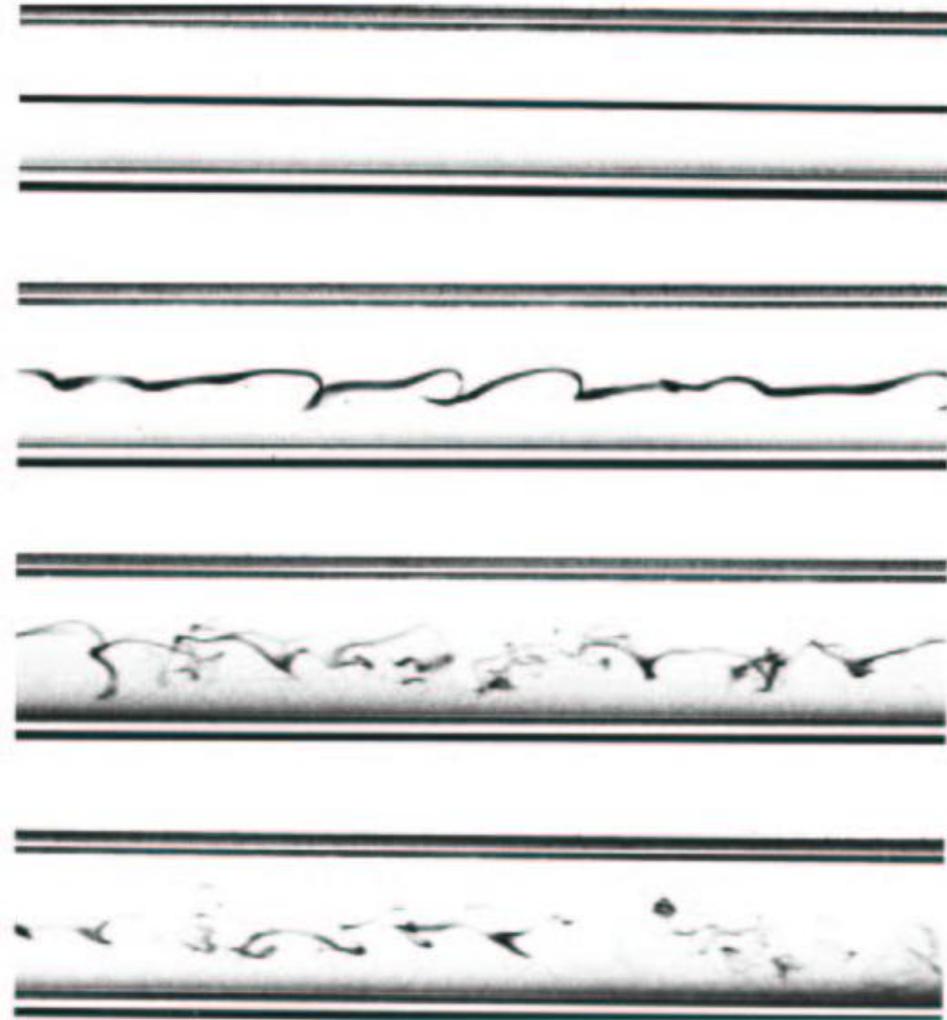
/The Influence of Computational Fluid Dynamics of Experimental Aerospace Facilities.
 Nat. Academy Press,
 Washington, D.C., 1983/

Strömung in Strömungsmaschinen

- ▶ dreidimensional
- ▶ instationär
- ▶ turbulent
- ▶ teilweise mit Transition

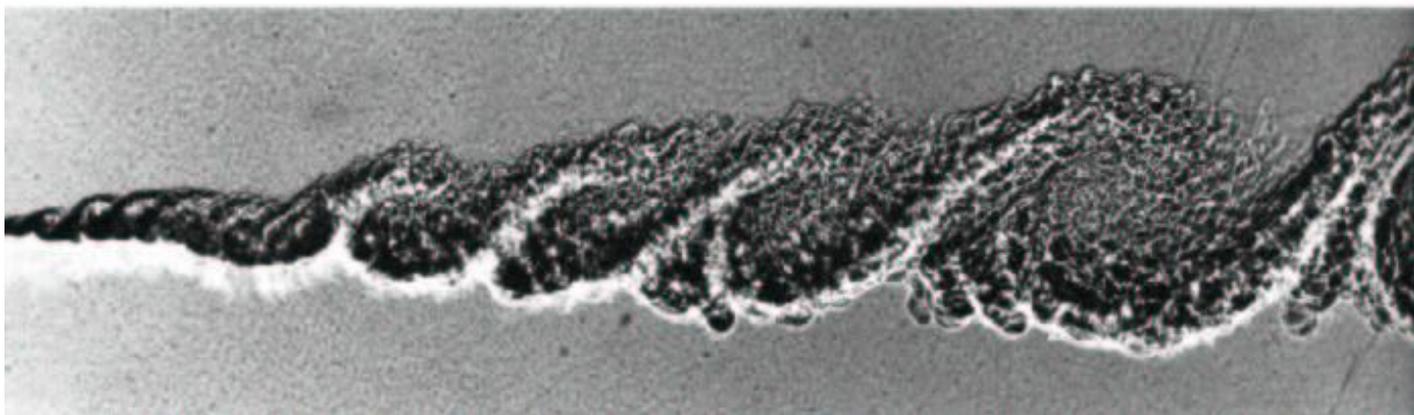
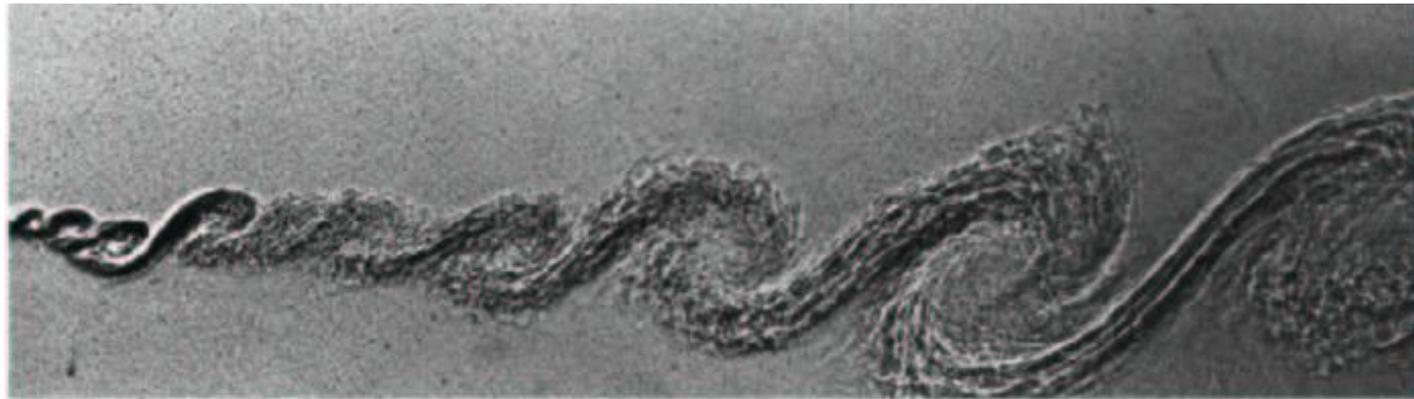
Mathematische Beschreibung durch ein System partieller DGLn.

Turbulenz



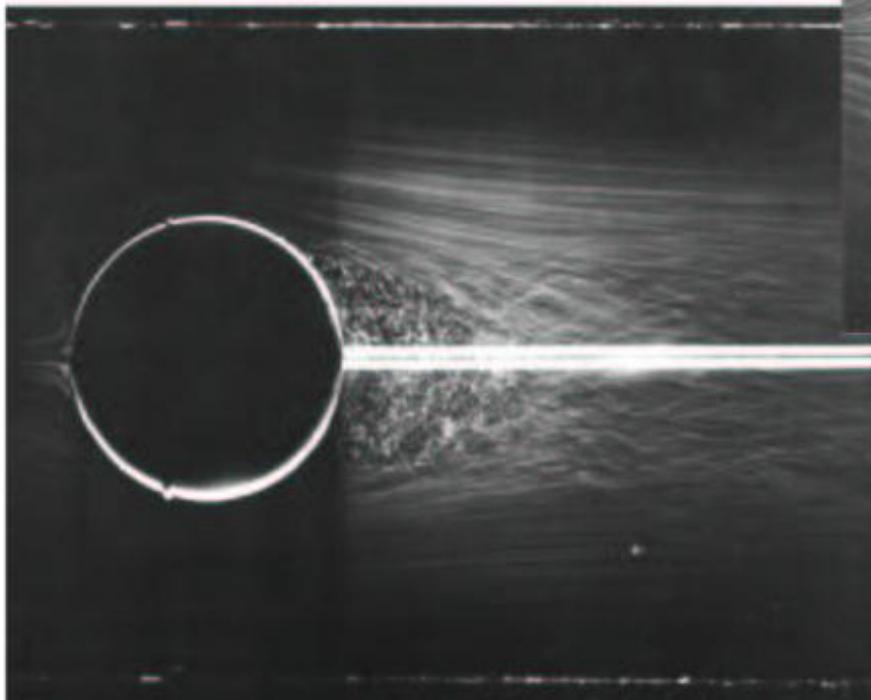
Quelle: Menter, F.R.; Vortrag: "Turbulenz" –
interne Schulung bei WILO, Dortmund

Turbulenz



Quelle: Menter, F.R.; Vortrag: "Turbulenz" – interne Schulung bei WILO, Dortmund

**Laminar
Flow**



**Turbulent
Flow**

Quelle: Menter, F.R.; Vortrag: "Turbulenz" – interne Schulung bei WILO, Dortmund

Effekte von Turbulenz

- ▶ Turbulent flow is three-dimensional
- ▶ Turbulent flow is unsteady
- ▶ Turbulent flow is irregular
- ▶ Turbulent flow is characterised by strong vorticity
- ▶ Turbulent flows consists of many different scales

Quelle: Menter, F.R.; Vortrag: "Turbulenz" – interne Schulung bei WILO, Dortmund

Effekte von Turbulenz

- ▶ Increased friction losses
- ▶ Later separation under pressure gradients
- ▶ Noise generation
- ▶ Increased mixing
- ▶ Interaction with other effects
 - Combustion
 - Chemistry
 - Multi-Phase

Quelle: Menter, F.R.; Vortrag: "Turbulenz" – interne Schulung bei WILO, Dortmund

Gleichungssystem zur Berechnung der Strömung inkompressibler newtonscher Fluide

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial c_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier - Stokes - Gleichungen

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j^2}$$

4 unbekannte Größen :

$$c_1, c_2, c_3, p$$

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

Direkte Numerische Simulation

Beispiel Pumpenstufe

Gehäusedurchmesser ca. $d=180$ mm

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

für η 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 E18 MFlops notwendig.

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

Gleichungssystem zur Berechnung der Strömung inkompressibler newtonscher Fluide

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial c_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier - Stokes - Gleichungen

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j^2}$$

4 unbekannte Größen :

$$c_1, c_2, c_3, p$$

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: $C_i(x_i, t) = \bar{C}_i(x_i) + c_i(x_i, t)$

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

$$\frac{\partial (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}] + \rho \bar{g}_i$$

* 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
(kommen in den gemittelten Gleichungen für skalare
Größen vor)

$$-\rho \overline{u_i \varphi}$$

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

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

$$\tau = y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

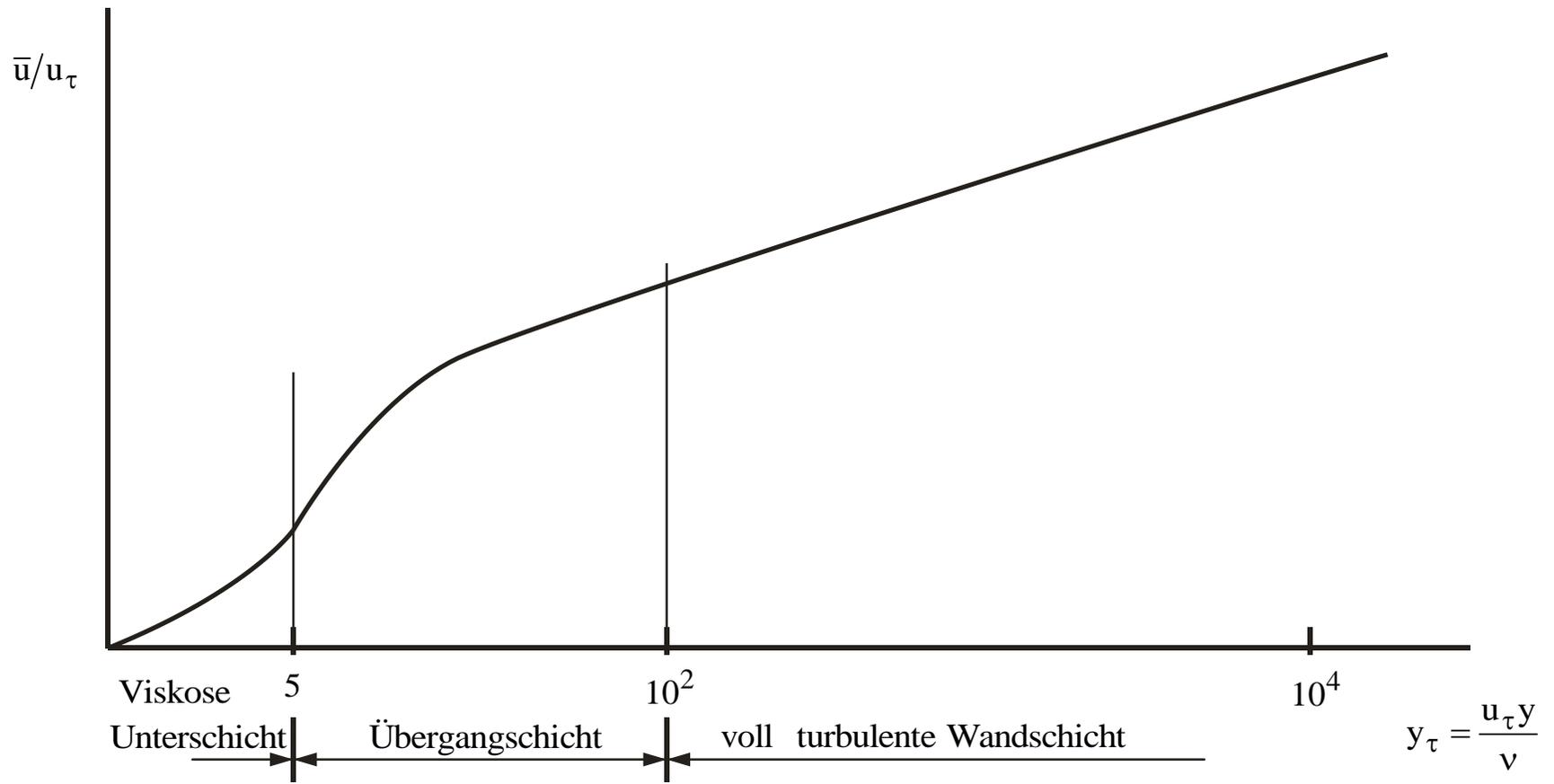
$$\tau' = -\rho \overline{u'v'} = y' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

Wirbelviskosität $\nu' = y' / \rho$

y Beschreibung des Impulsaustausches
aufgrund der molekularen Bewegung

y' Beschreibung des Impulsaustausches aufgrund der
makroskopischen turbulenten Schwankungsbewegung

- ▶ Kurve gemittelte dimensionslose Geschwindigkeit über dimensionslosem Wandabstand zeigt 3 Zonen:
 - 1) viskose Unterschicht (molekulare Viskosität dominiert)
 - 2) Übergangsschicht (molekulare und turbulente „Viskosität“ haben gleiche Größenordnung)
 - 3) turbulente „Viskosität“ dominiert



► Reynoldsspannungsmodelle

Lösung der Transportgleichungen des Reynoldsspannungstensors
(7 zusätzliche Gleichungen)

► Modelle mit 2 Transportgleichungen

z.B. k - eps Modell

Das k - eps Modell verwendet das Prinzip der Wirbelviskosität:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Spezielle Phänomene

- ▶ „kleine“ Reynoldszahlen
- ▶ laminar/turbulenter Umschlag

Low Re-Modelle allgemein

1) Lineare Modelle

„Dämpfung“ der Wirbelviskosität ν_t in Wandnähe über Funktionen, die fernab der Wände den Wert 1 annehmen – dann Standard $k-\varepsilon$

2) Nicht-lineare Modelle

inhärente Berücksichtigung der Anisotropie der Turbulenz
z.B. LCL-Modell nach LIEN

Transition – Umschlag laminar/turbulent

- ▶ natürliche Transition (kleiner Turbulenzgrad ($Tu < 1\%$) in der Außenströmung; Umschlag wird durch Tollmien-Schlichting-Wellen eingeleitet; z.B. an Flügeln)
- ▶ Bypasstransition (hoher Tu in der Außenströmung, der Umschlag wird aus der Außenströmung eingeprägt; z.B. in Kompressoren)
- ▶ ablöseinduzierte Transition
- ▶ Nachlaufdüsen induzierte Transition (z.B. in mehrstufigen Maschinen)

Begriff der Intermittenz

- Transition ist stochastischer, instationärer Prozess – laminare und turbulente Anteile in der Strömung

γ

- Intermittenz γ ist die Wahrscheinlichkeit, mit der die Strömung an einer bestimmten Stelle turbulent ist.

$$v_t = \gamma \cdot v_{t, TM}$$

$$\gamma = 1 - \exp \left[- \frac{n \cdot \tau}{U_{FS}} (x - x_{tr})^2 \right]$$

(NARASHIMA)

X_{tr} - Transitionskriterium

n - Turbulenz / Fleckenproduktion

τ - Ausbreitungsparameter

n τ müssen mit Transitionsmodell berechnet werden

v^2 f- Turbulenzmodell

Lösung von Transportgleichungen für k und ε und zusätzlich für die skalare Größe v^2

Wirbelviskositätsansatz mit Verwendung eines skalaren turbulenten Geschwindigkeitsmaßes v^2 anstelle von k

$$\nu_t = c_\mu v^2 t_\tau$$

In Wandnähe stellt v^2 die Reynolds'schen Normalspannungen $\bar{u}_n' \bar{u}_n'$ dar, weiter entfernt repräsentiert v^2 die Turbulenzintensität

Optimierung von Laufrädern

- ▶ Kavitation
- ▶ Verlustminimierung
- ▶ Kennlinienstabilität
- ▶ Herstellkosten

Strömungstechnische Optimierung mit dem Schwerpunkt Verlustminimierung

Verluste u.a.:

- ▶ Reibungsverluste im
 - Laufrad
 - Gehäuse
 - Radseitenraum

- ▶ Stoßverluste
- ▶ Spaltverluste
- ▶ Diffusionsverluste
- ▶ Mechanische Verluste

Strömungstechnische Optimierung von Pumpenstufen

Möglichkeiten der Modellierung der Strömung in Pumpenstufen 1

- ▶ 3D instationär
Probleme: u.U. muß die Strömung in allen Kanäle der Stufe berechnet werden
sehr aufwendige Auswertung
- ▶ stationär, Lösung der zeitgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen

Möglichkeiten

1. Für die Leitradrechnung werden umfangsgemittelte Werte der Laufradrechnung verwendet.
Die Profile der einzelnen Größen über der Laufradbreite bleiben erhalten.
Probleme: Durch die Zeitmittelung werden halbempirische Modelle zur Beschreibung der Wirkung der Turbulenz notwendig.
Informationsverlust durch die Umfangsmittelung

Strömungstechnische Optimierung von Pumpenstufen

Möglichkeiten der Modellierung der Strömung in Pumpenstufen 2

2. Berechnung der Strömung in der Stufe im „eingefrorenen“ Zustand.
Probleme: u.U. muß die Strömung in allen Kanälen berechnet werden verschiedene Stellungen vom Lauf- zum Leitrad werden untersucht (aufwendig für Berechnungen und Auswertung)
 3. Berechnung von Lauf- und Leitrad einzeln
 4. Nur Berechnung des Laufrades
- ▶ Stationär, Verwendung anderer Gleichungen zur Beschreibung der Strömung, z.B.
1. 3D reibungsfrei
 2. Q3D reibungsbehaftet
 3. Q3D reibungsfrei

Strömungstechnische Optimierung von Pumpenbauteilen

Neue Möglichkeiten

- ▶ Detaillierte Informationen über Strömungsvorgänge
- ▶ Vorhersage der Kennlinien
- ▶ „Realer“ Test verschiedener Ideen im Entwurfsprozeß
- ▶ „Realer“ Test neuer Konzepte

aber: 1) Qualität und Vertrauen in das Ergebnis problematisch
2) Ein korrektes Ergebnis ist keine bessere Maschine

Bekannte Unsicherheiten/Herausforderungen

- ▶ Effekte durch Stromlinienkrümmung und Rotation
- ▶ instationäre Effekte
- ▶ Ablösung

Zu beachtende Probleme bei der Anwendung von CFD-Verfahren

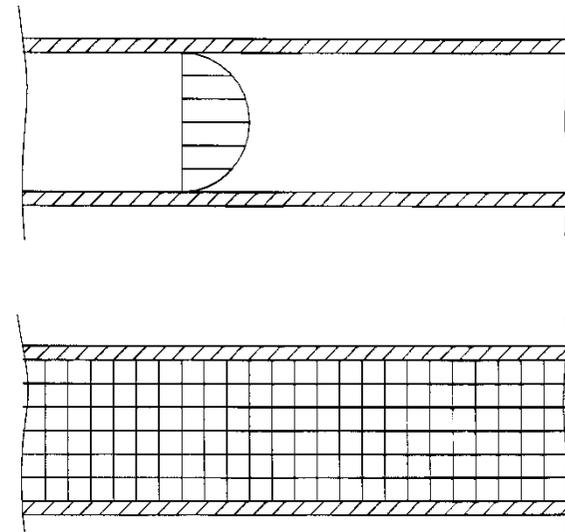
Analytische Lösung \Rightarrow stetige Funktion, Variablen können an allen Stellen im Lösungsgebiet berechnet werden

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.

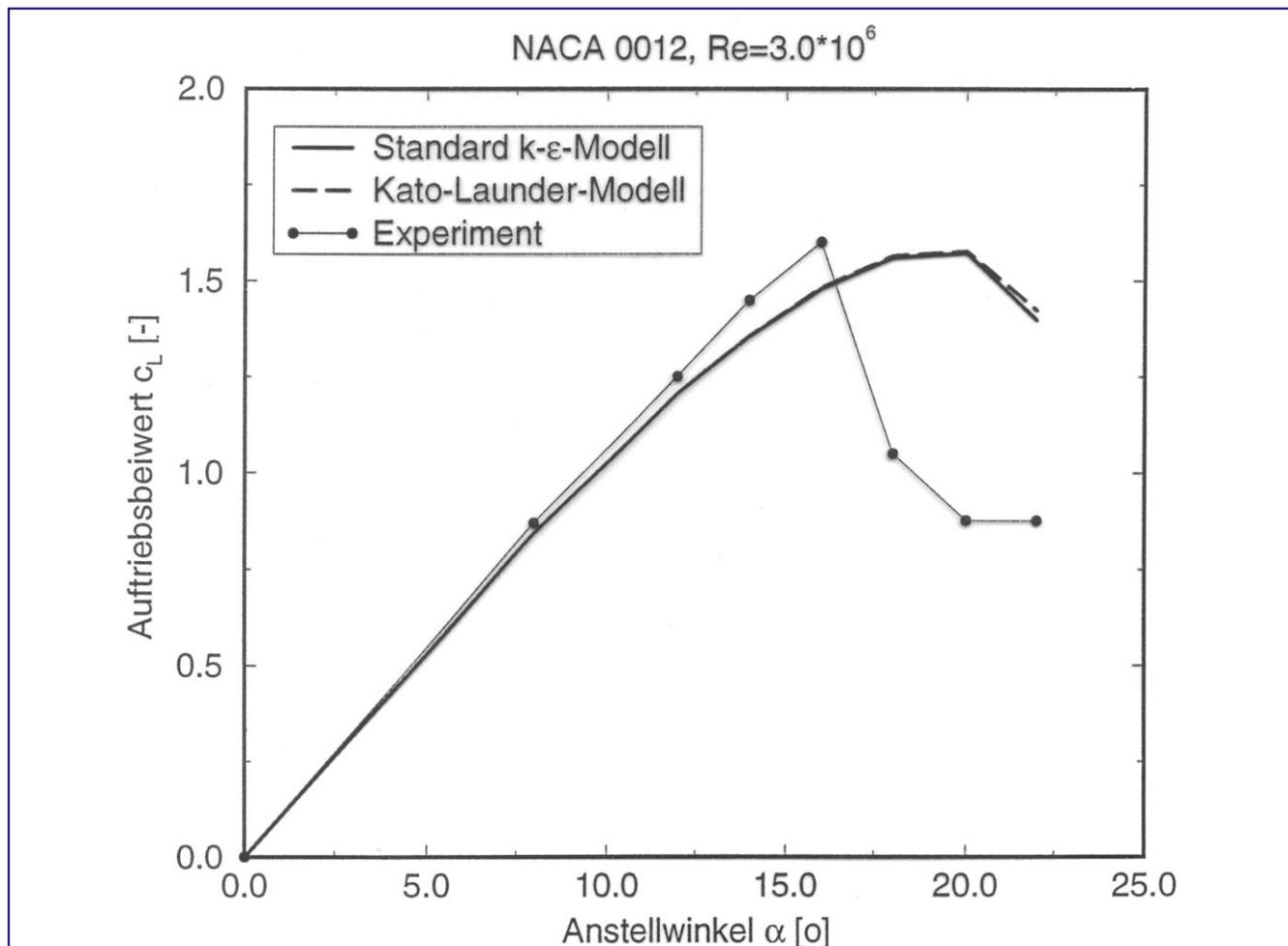
Beispiel laminare Rohrströmung eines Newtonschen Fluids:

Analytische Beziehung für die Geschwindigkeitsverteilung:

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



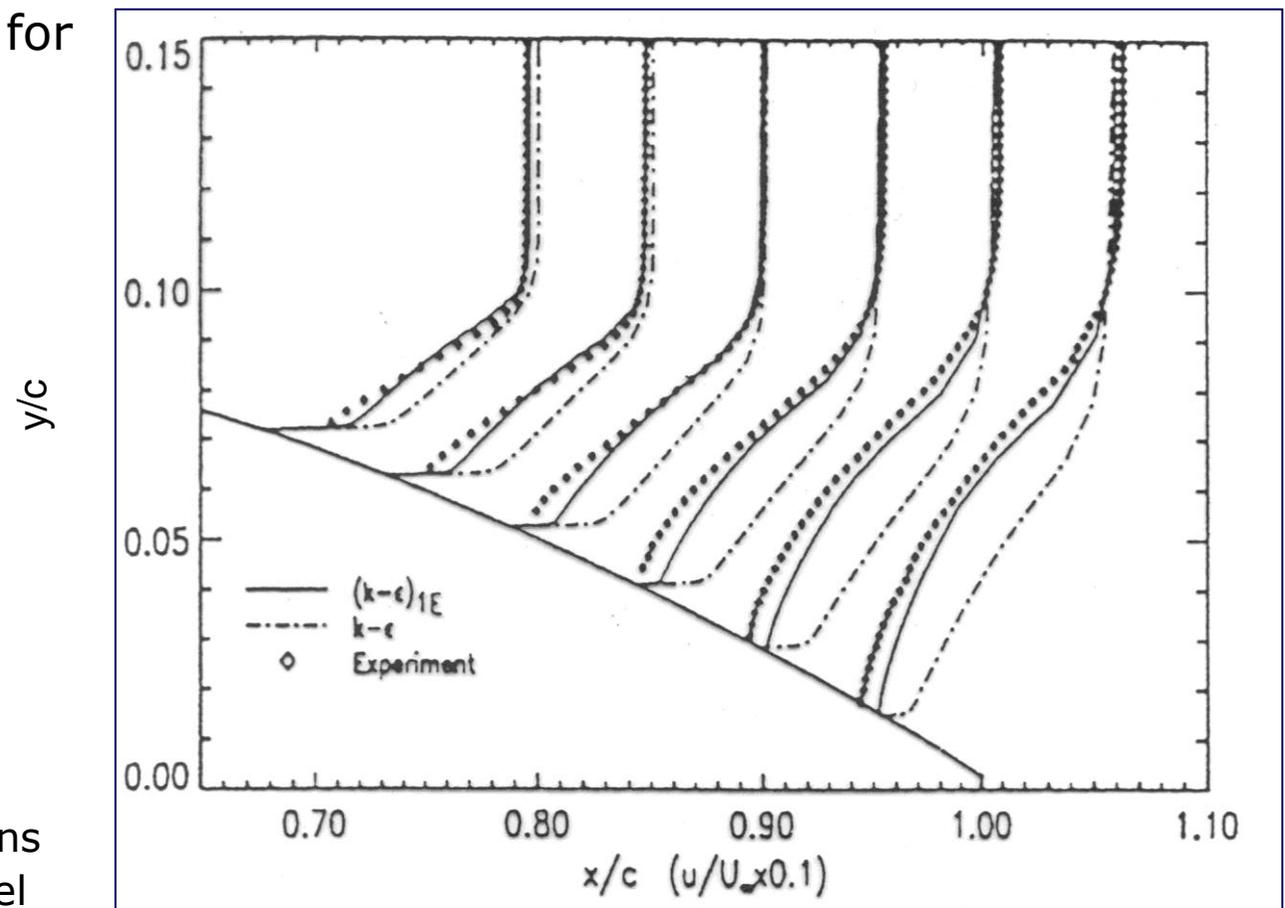
Auftriebsbeiwert über Anstellwinkel



Quelle: Esch, Th., ASC GmbH

Eddy Viscosity Transport Equations Part 1

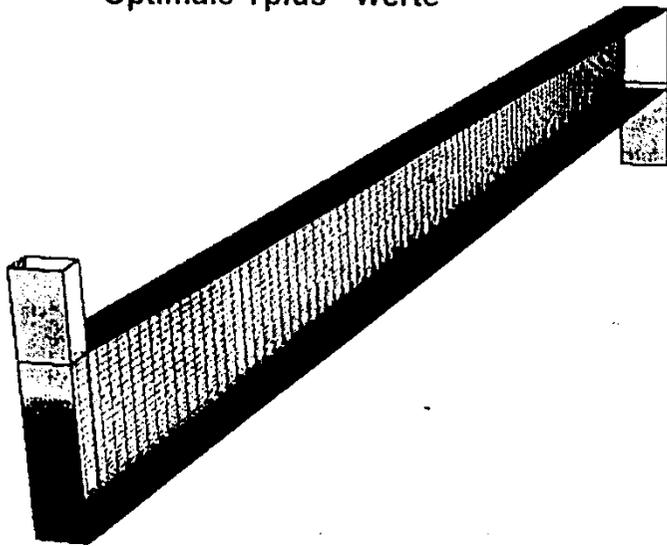
Figure 20: Velocity profiles for NACA 4412 airfoil, $\alpha=13.87$, $Re=1.7 \times 10^6$.



F.R. Menter
Eddy Viscosity Transport Equations
and their relation to the $k-\epsilon$ model
NASA Technical Memorandum 108 854

Einsatz des optimierten Gitters

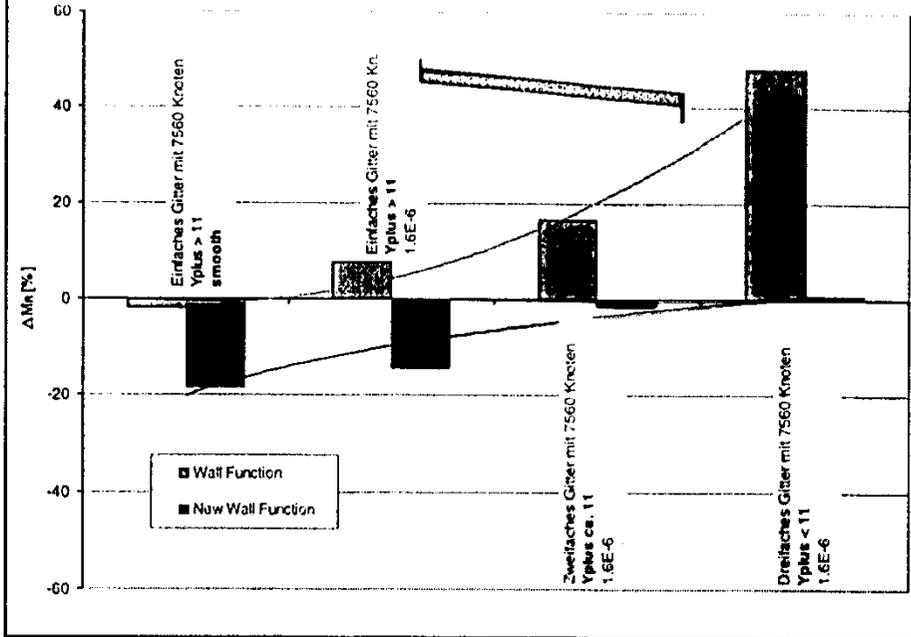
Optimale Yplus - Werte

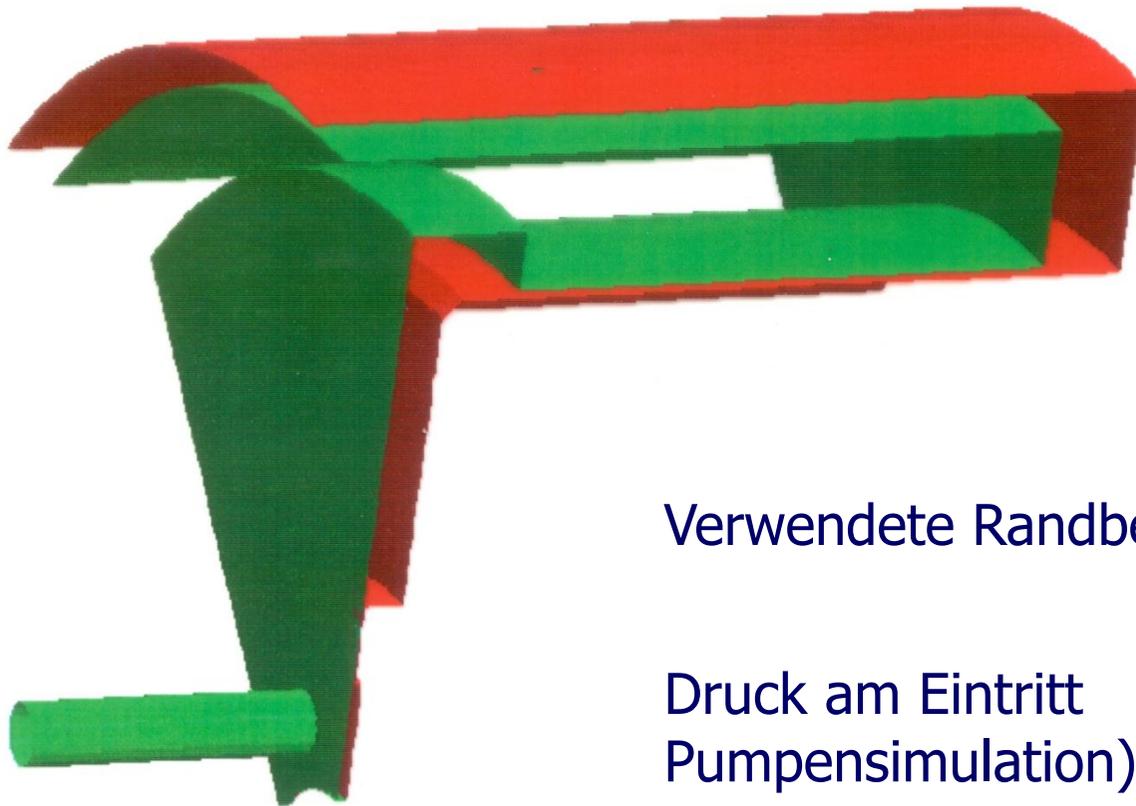


YPLUS	
120	1.423E+01
114	1.352E+01
108	1.282E+01
102	1.211E+01
96	1.140E+01
90	1.070E+01
84	9.992E+00
78	9.285E+00
72	8.577E+00
66	7.870E+00
60	7.163E+00
54	6.457E+00
48	5.749E+00
42	5.040E+00
36	4.332E+00
30	3.625E+00
24	2.918E+00
18	2.211E+00
12	1.503E+00
6	7.963E-01
1	2.903E-01

Einfluss verschiedener Parameter

Einflüsse von Yplus und der Wandfunktion auf das Moment





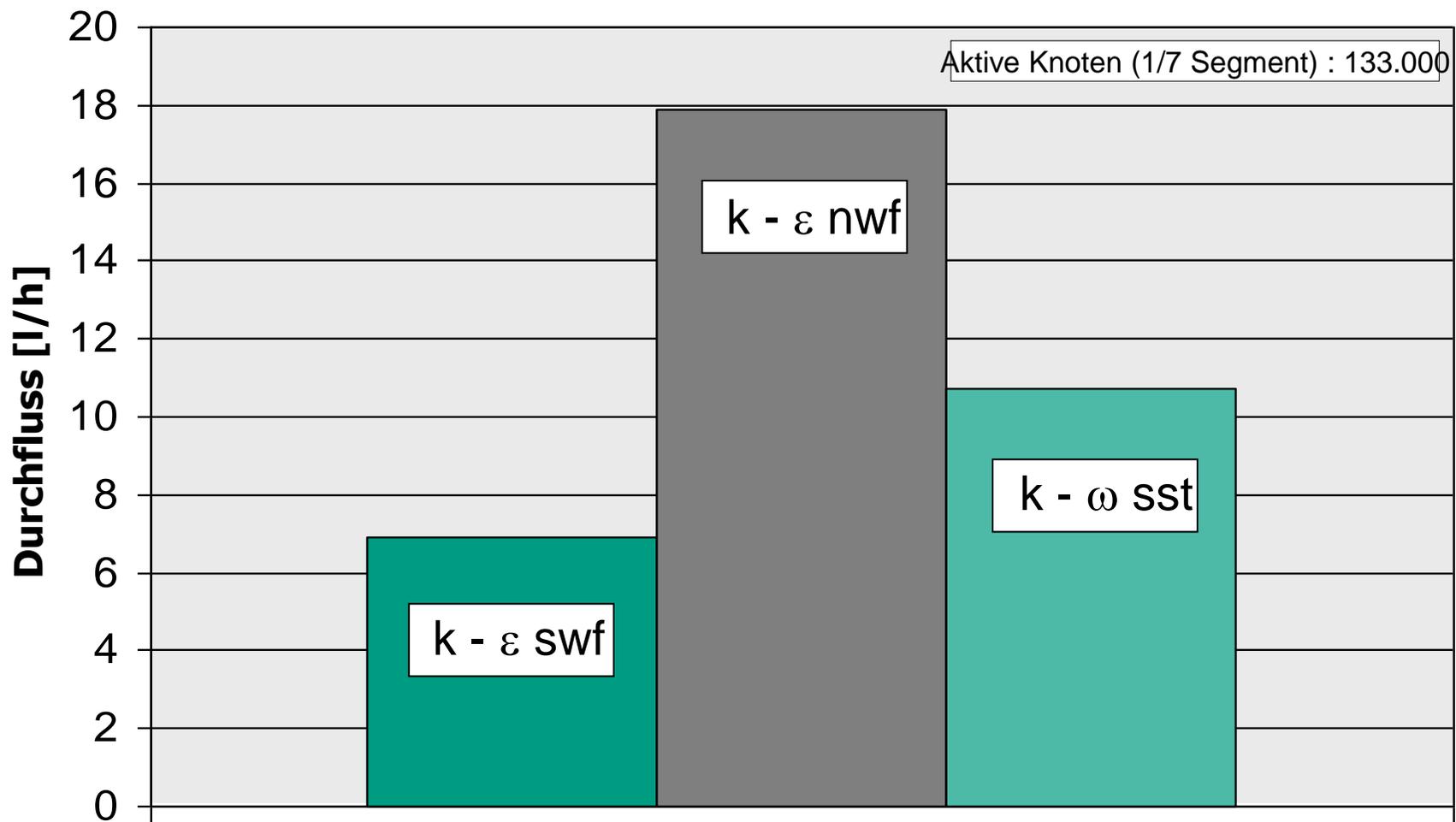
Verwendete Randbedingungen:

Druck am Eintritt (aus
Pumpensimulation)

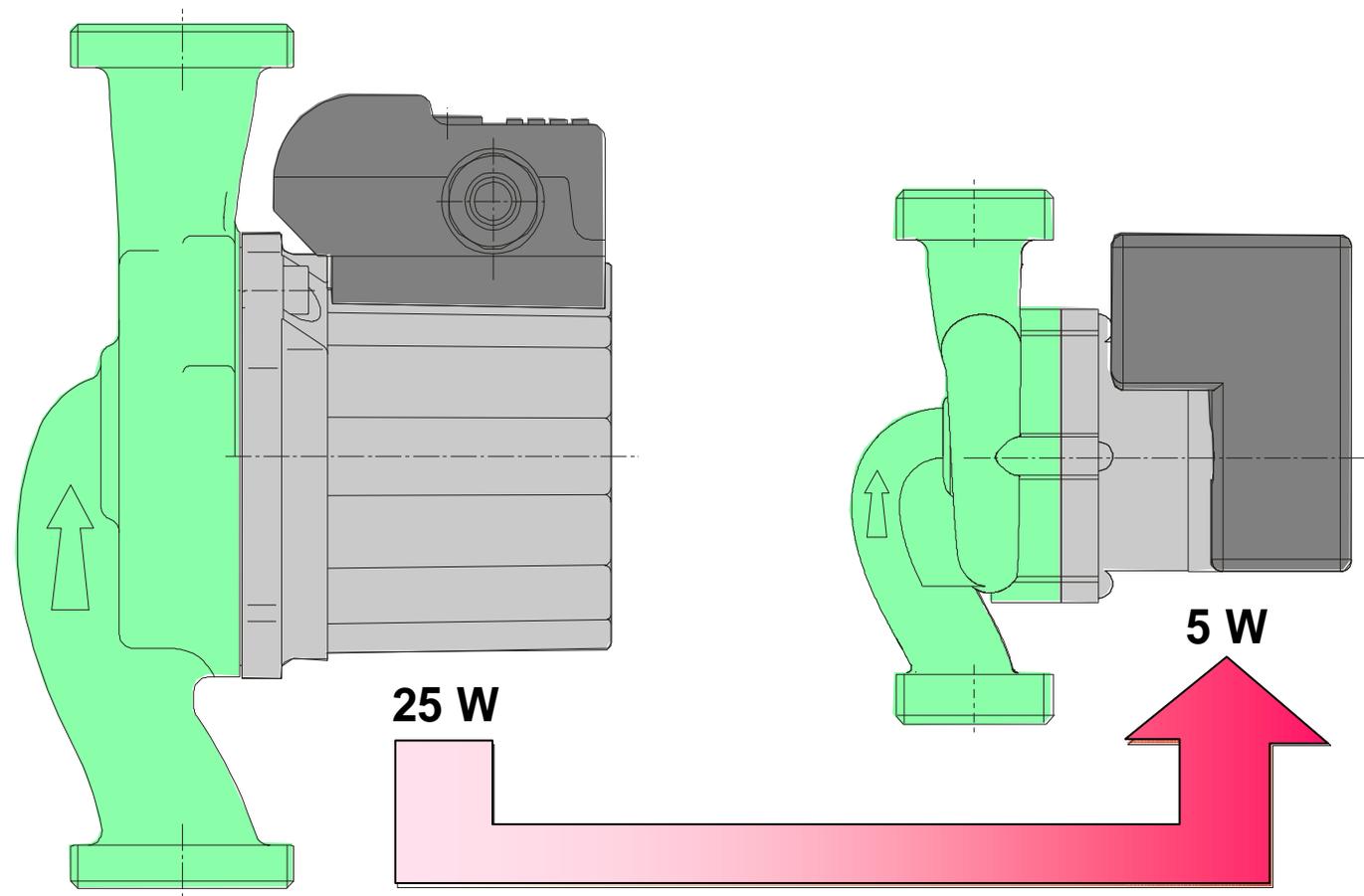
Druck am Austritt (aus
Pumpensimulation)

Rotierende und stehende Wand

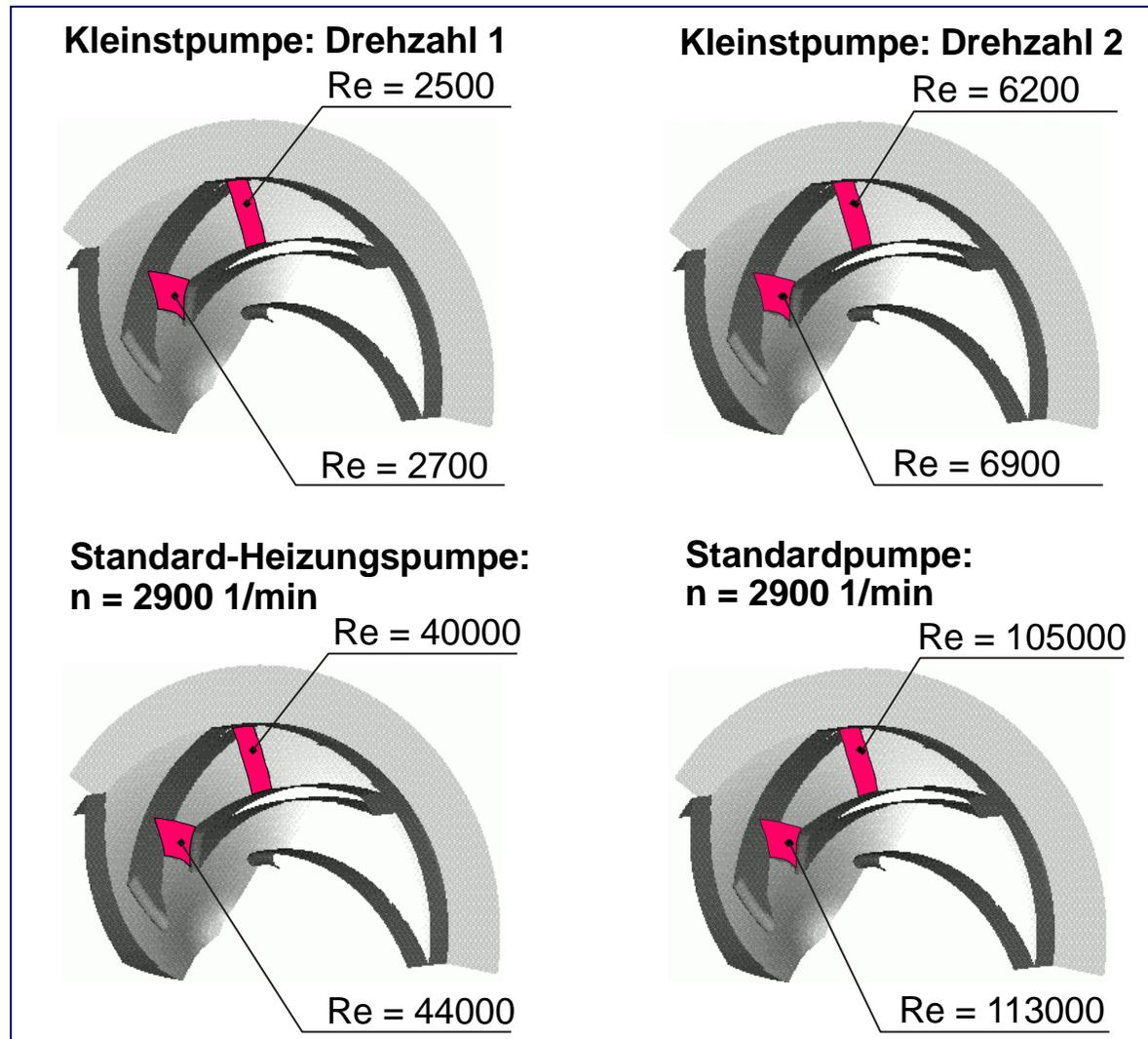
Periodische Ränder (1:1)



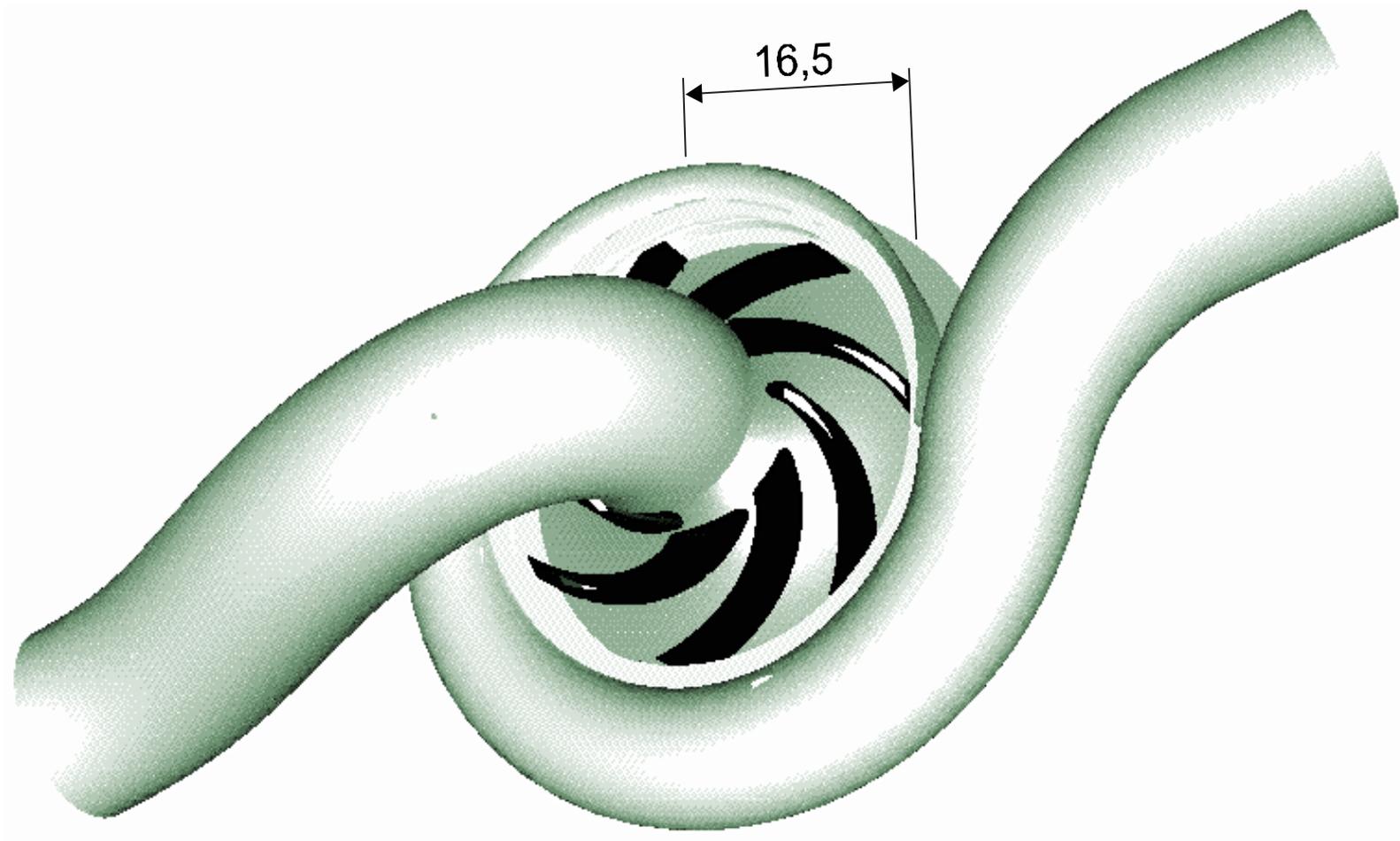
Größenvergleich zwischen einer üblichen Heizungspumpe und der Kleinstpumpe



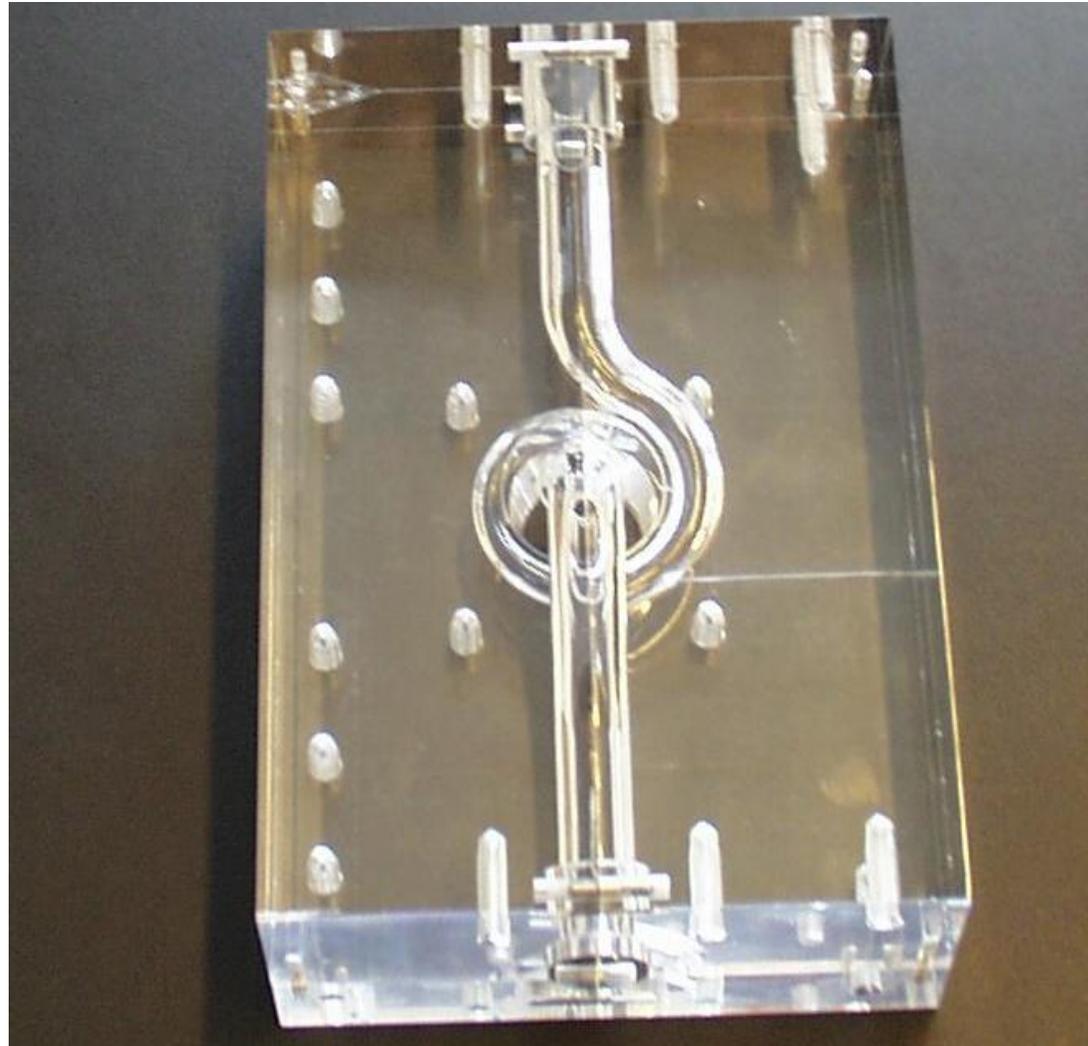
Reynoldszahlen in verschiedenen Laufrädern



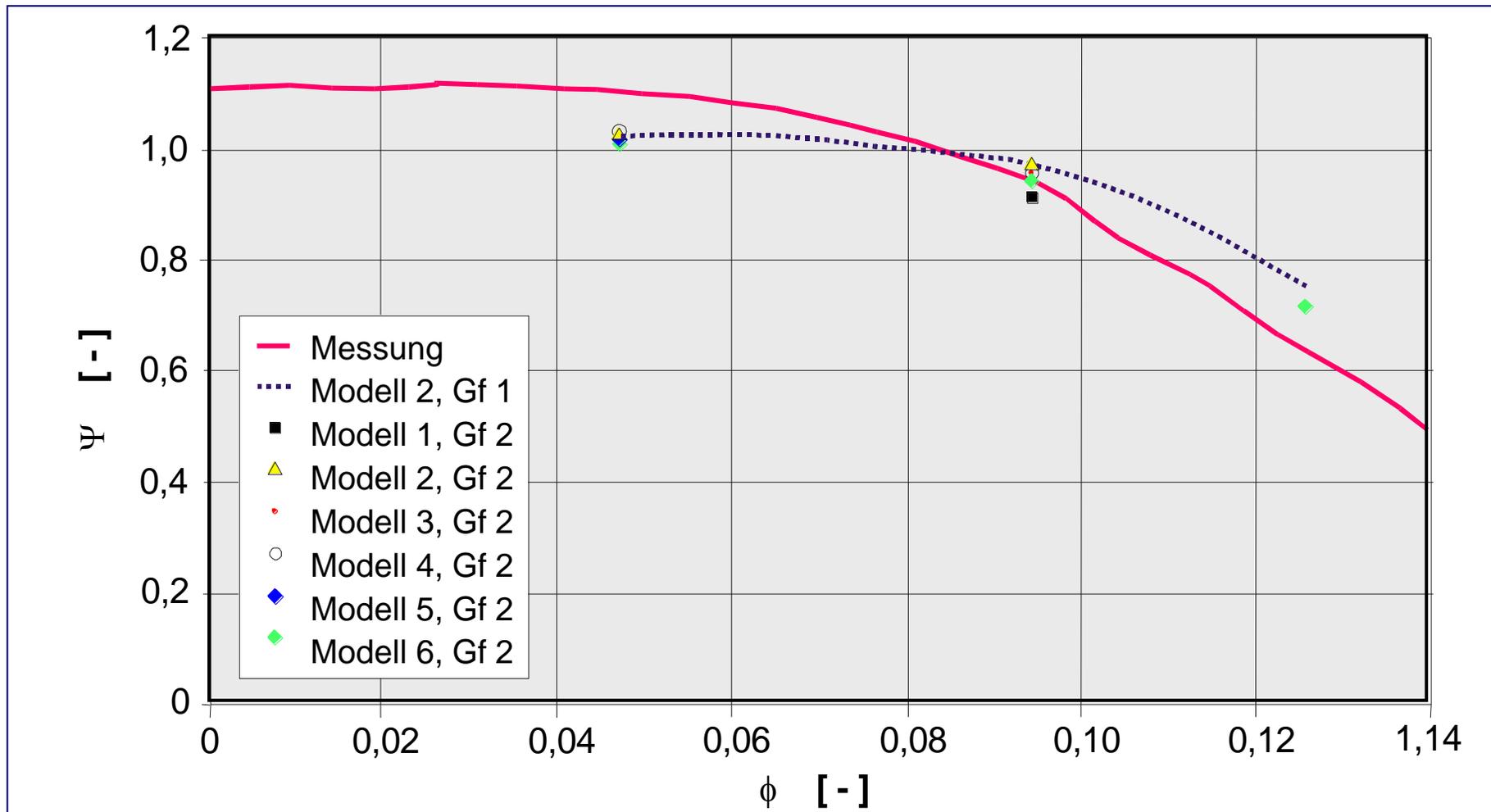
Prototyp der Kleinstpumpe



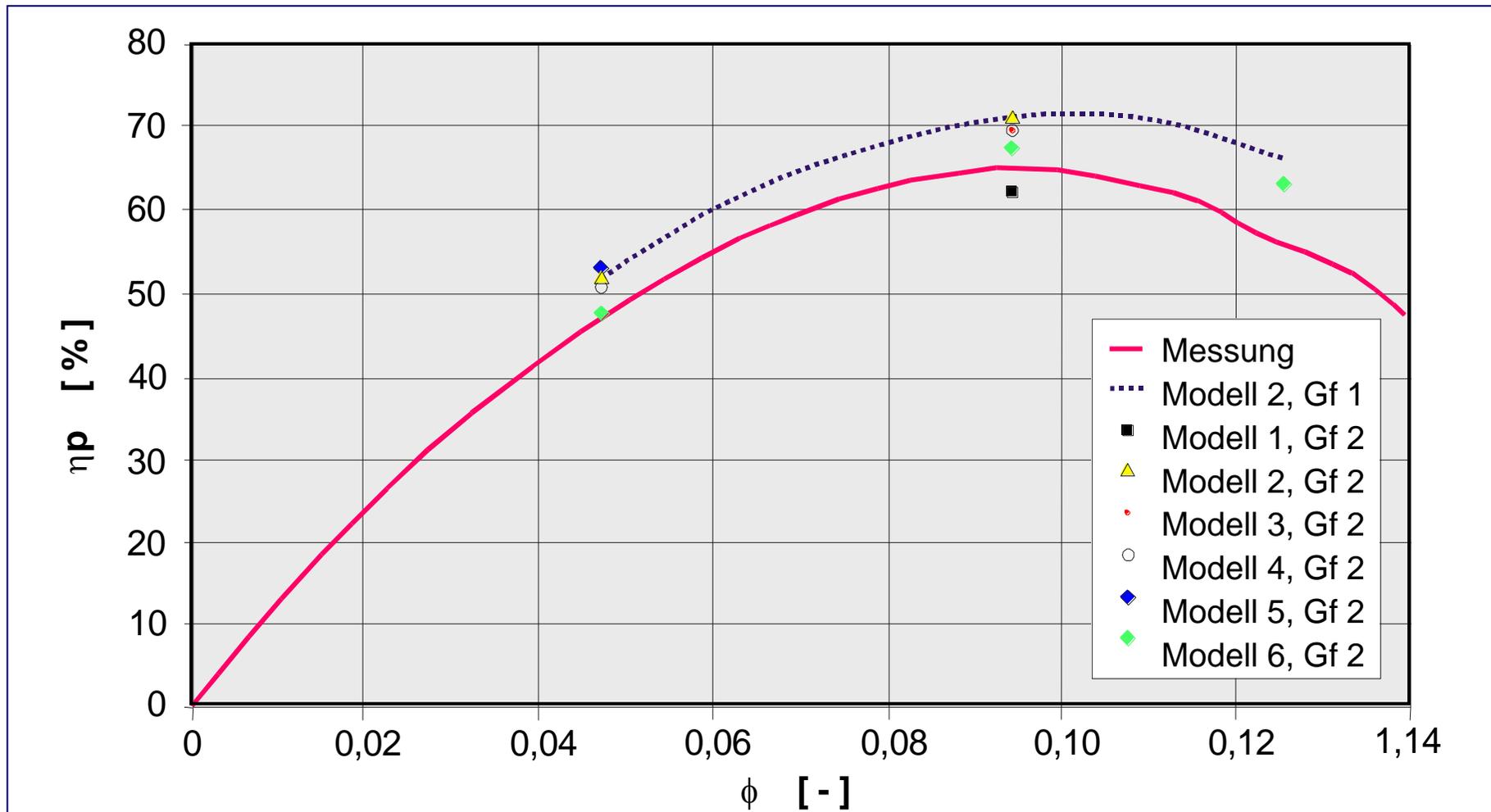
LDA-Modell der Kleinstpumpe



Comparison between measured and calculated pressure coefficient



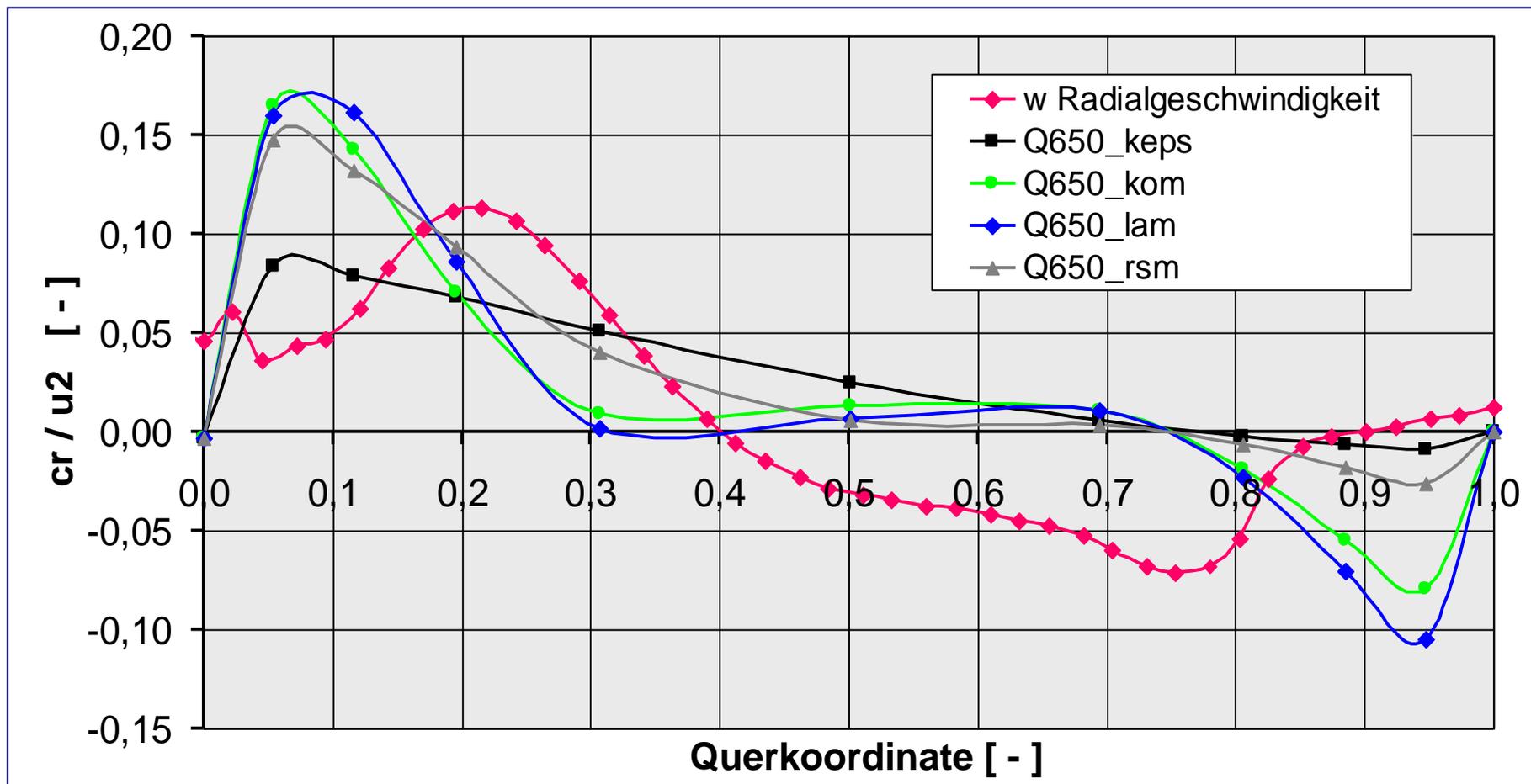
Comparison between measured and computed pump efficiency



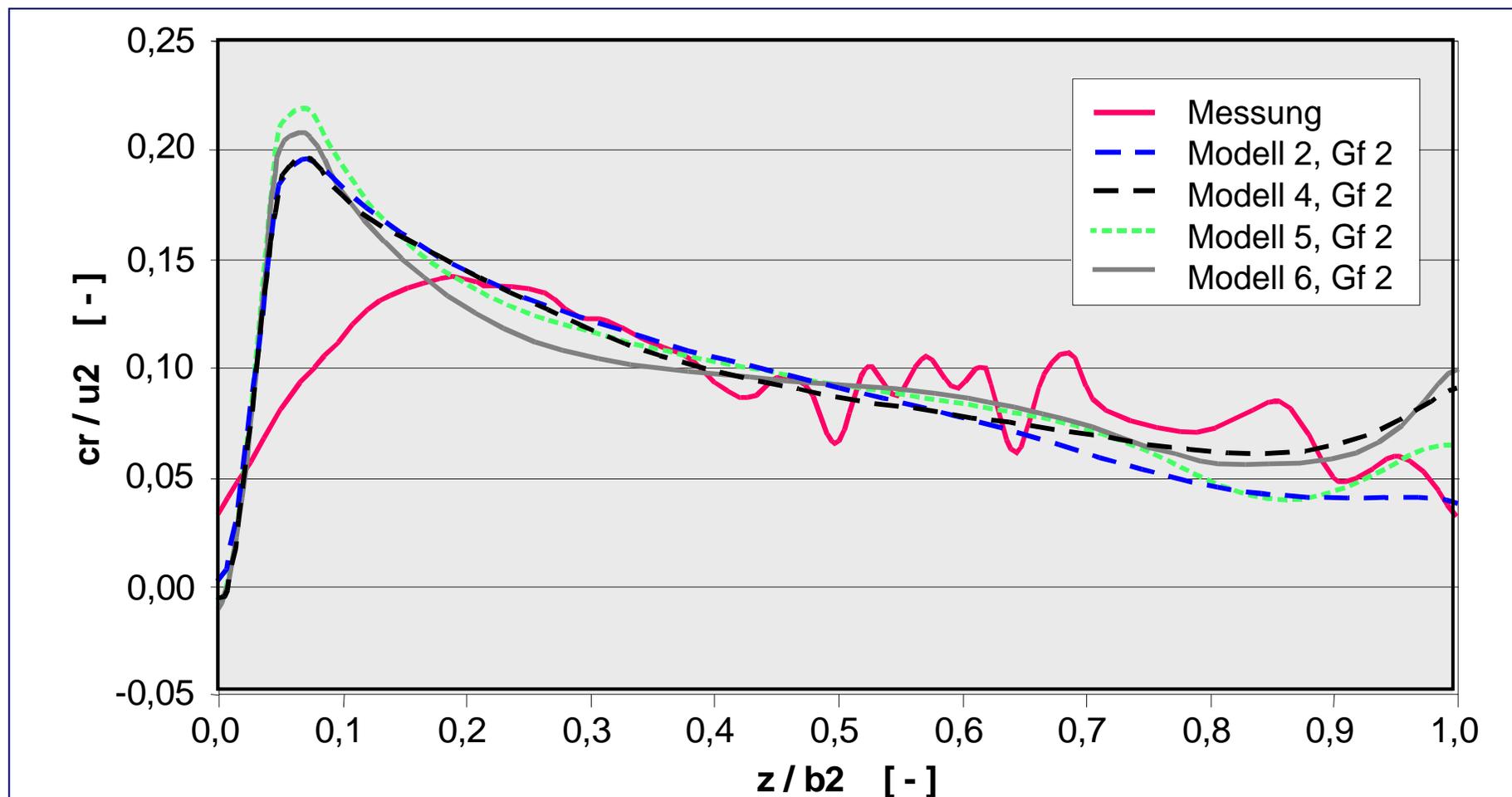
Getestete Modelle

- Modell 1** - Standard k - ε Turbulenzmodell mit Nutzung des logarithmischen Wandgesetzes
 - Modell 2** - Standard k - ε Turbulenzmodell mit Nutzung des logarithmischen Wandgesetzes und einer modifizierten Behandlung der viskosen Unterschicht
 - Modell 3** - k - ω Turbulenzmodell
 - Modell 4** - Shear-Stress-Model (SST)
 - Modell 5** - Reynolds- Spannungs-Modell
 - Modell 6** - Laminare Strömung
- Gf1** = 600.000 Gitterpunkte; **Gf2** = 1000.000 Gitterpunkte

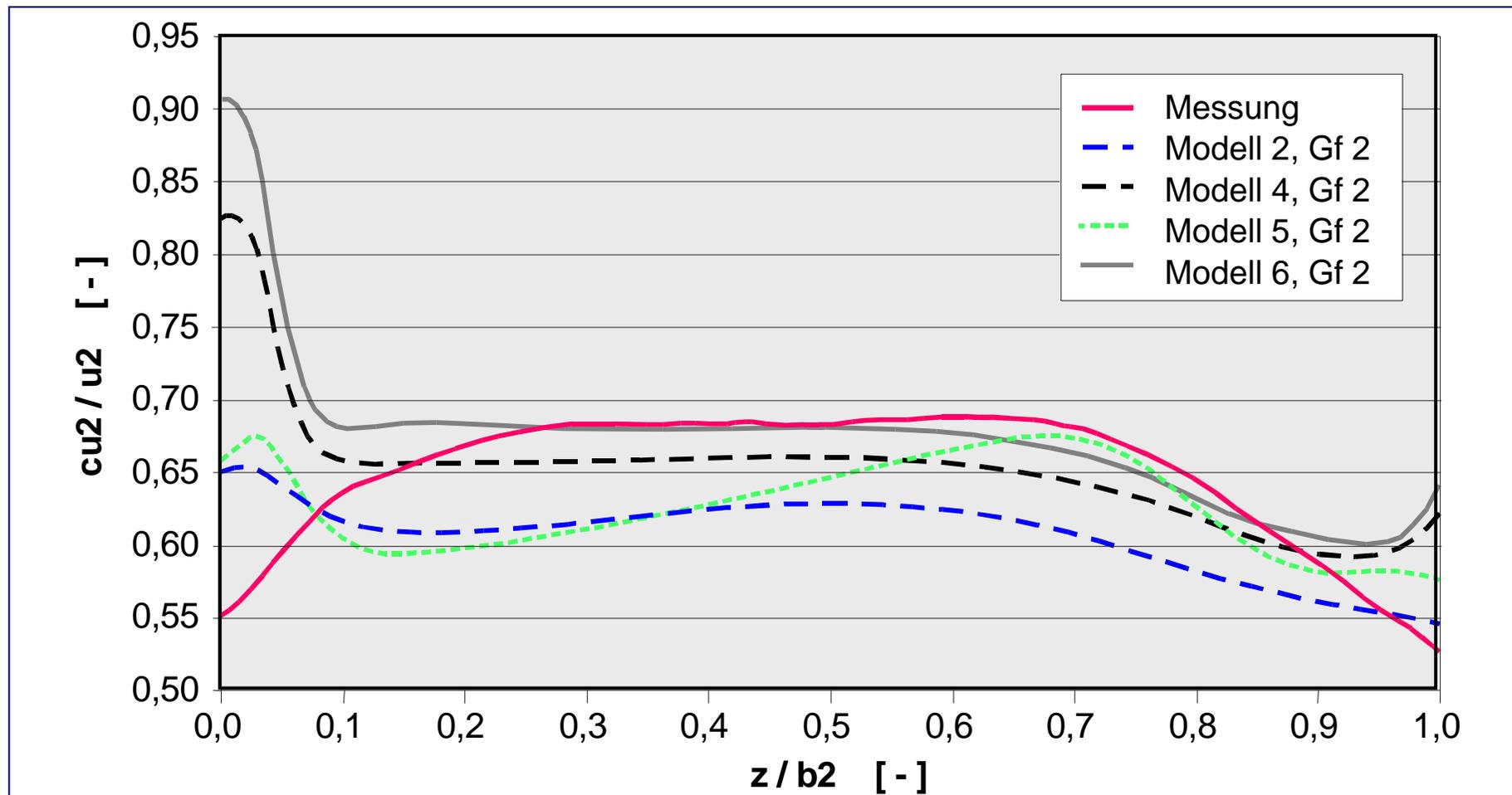
Gemessene und gerechnete Verteilung der Radialkomponente der Absolutgeschwindigkeit im Radseitenraum ($r = \text{const.}$)



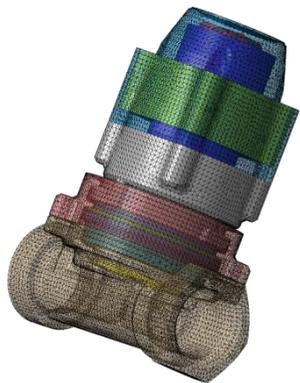
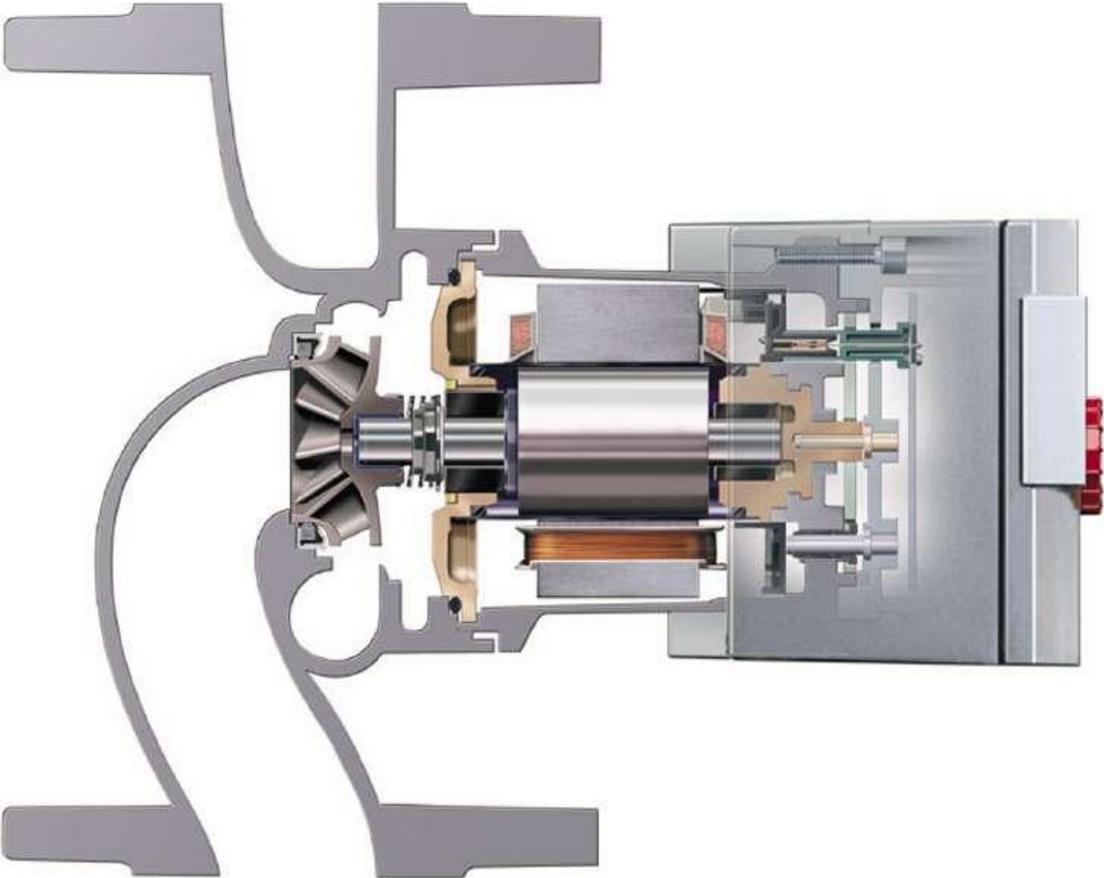
Comparison between measured and computed C_r profile over the impeller exit width



Comparison between measured and computed C_u profile over the impeller exit width



Miniaturisierung



Größenvergleich

90 W ----- 2 W

Simulation der Strömung

- ▶ Simulation der Strömung mit
 - RANS mit Standard k - ε -Modell
 - RANS mit low Re- Modell (LCL)
 - RANS mit v^2f - Modell
 - LES

- ▶ noch geplant: Test weiterer Ansätze

Large Eddy Simulation

Filterung der N-S-Gleichungen in alle drei Raumrichtungen

Feinskalige Schwankungen werden „heraus gefiltert“ und müssen modelliert werden

Grobskalige Schwankungen werden direkt gelöst

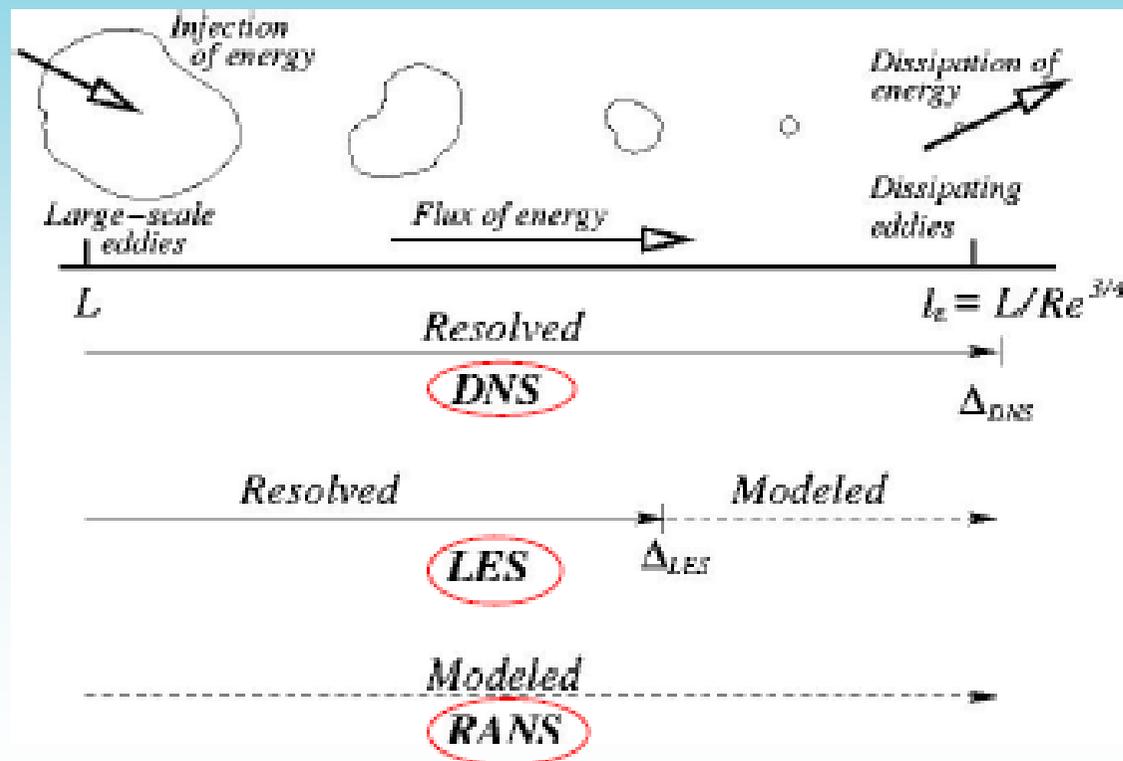
$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} + \overline{u_i u_j'} + \overline{u_i' \bar{u}_j} \right]$$

Feinstruktur-Spannungen $-\rho \cdot \overline{u_i' u_j'}$

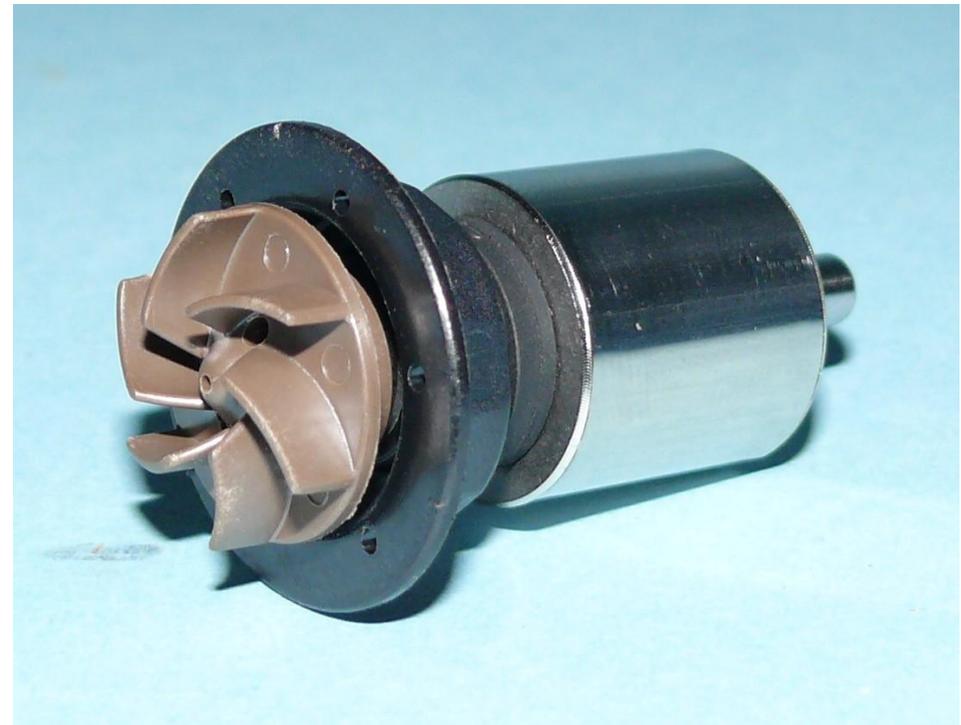
What Is LES? – Basic Concepts



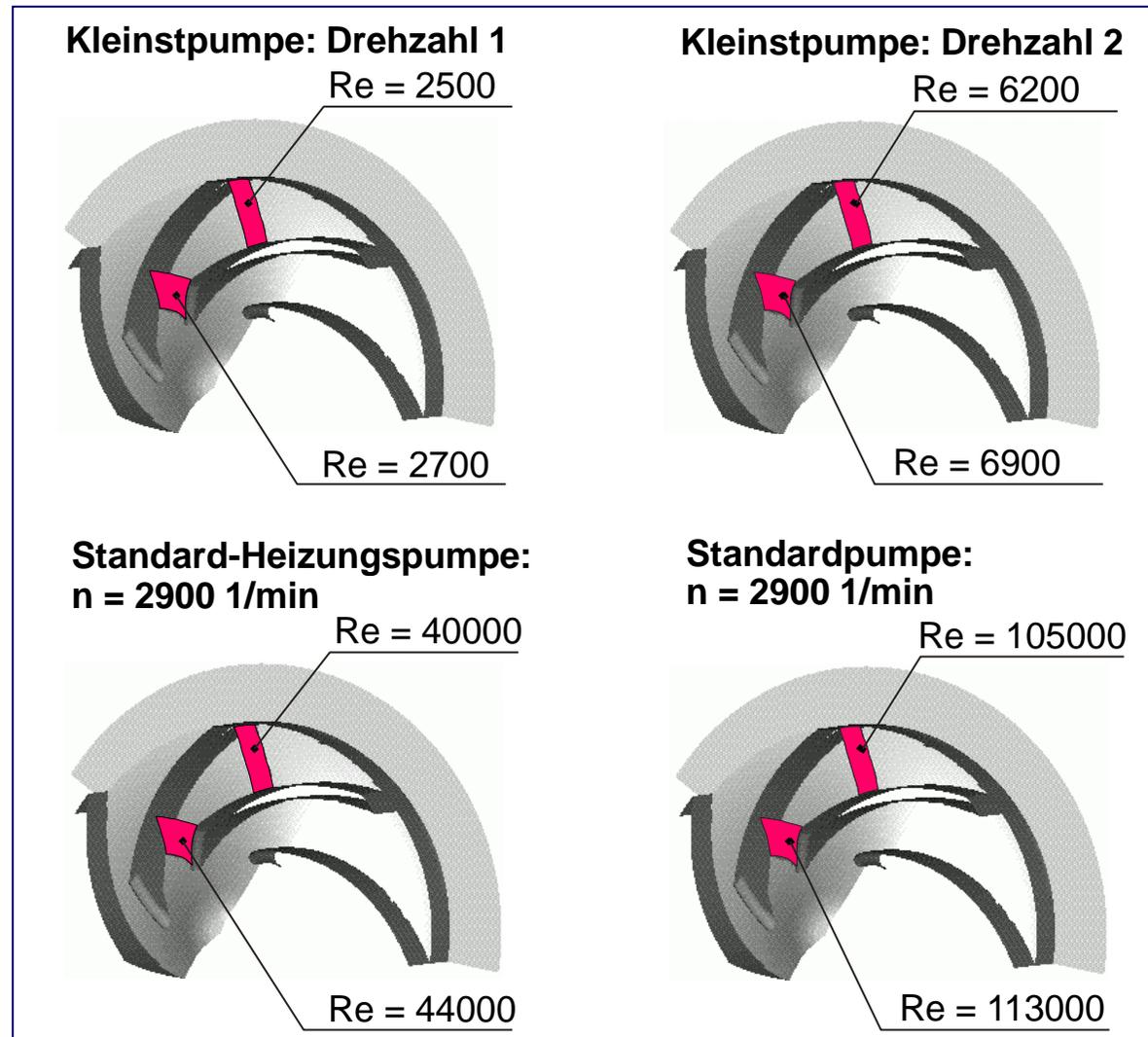
energy cascade
(Richardson, 1922)

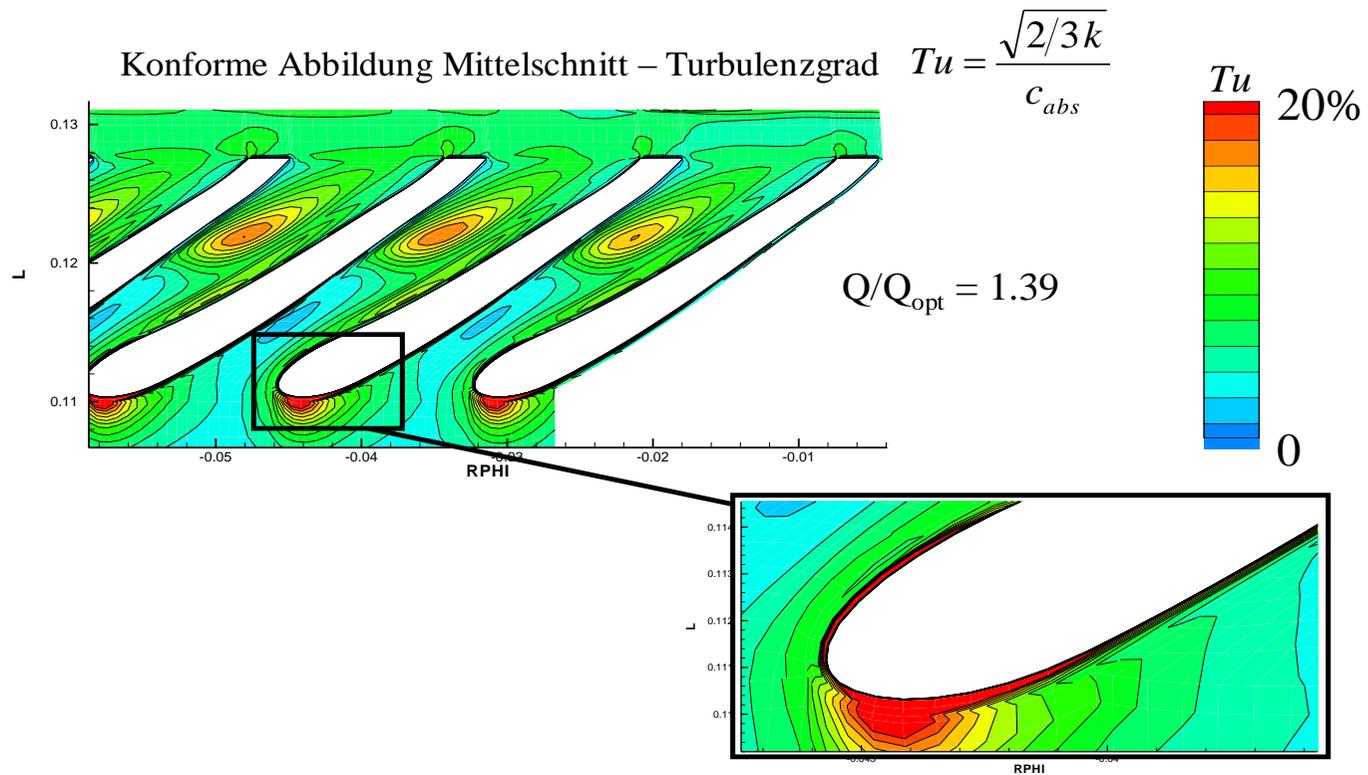


Laufblad mit und ohne Motor

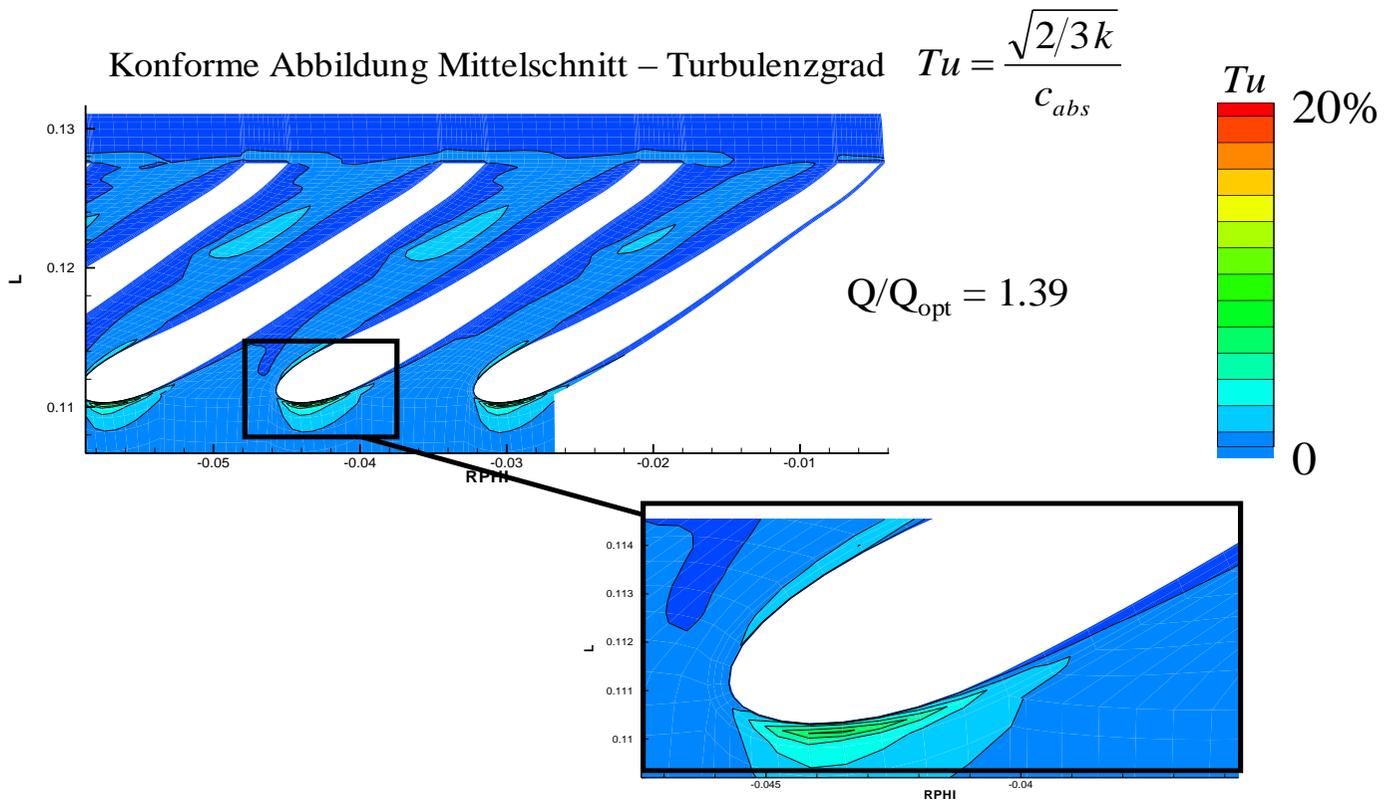


Reynoldszahlen in verschiedenen Laufrädern



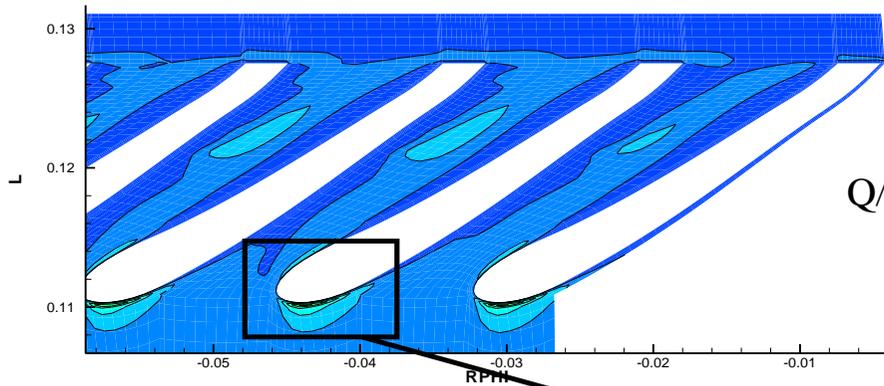


Simulationsverfahren: RANS; Turbulenzmodell: Standard- $k-\varepsilon$

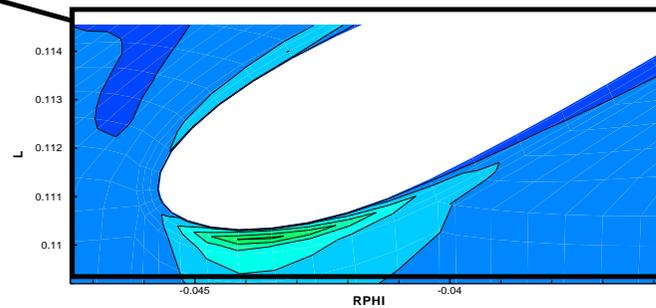
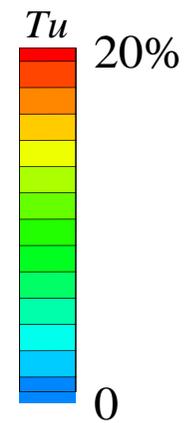


Simulationsverfahren: RANS; Turbulenzmodell: V2F

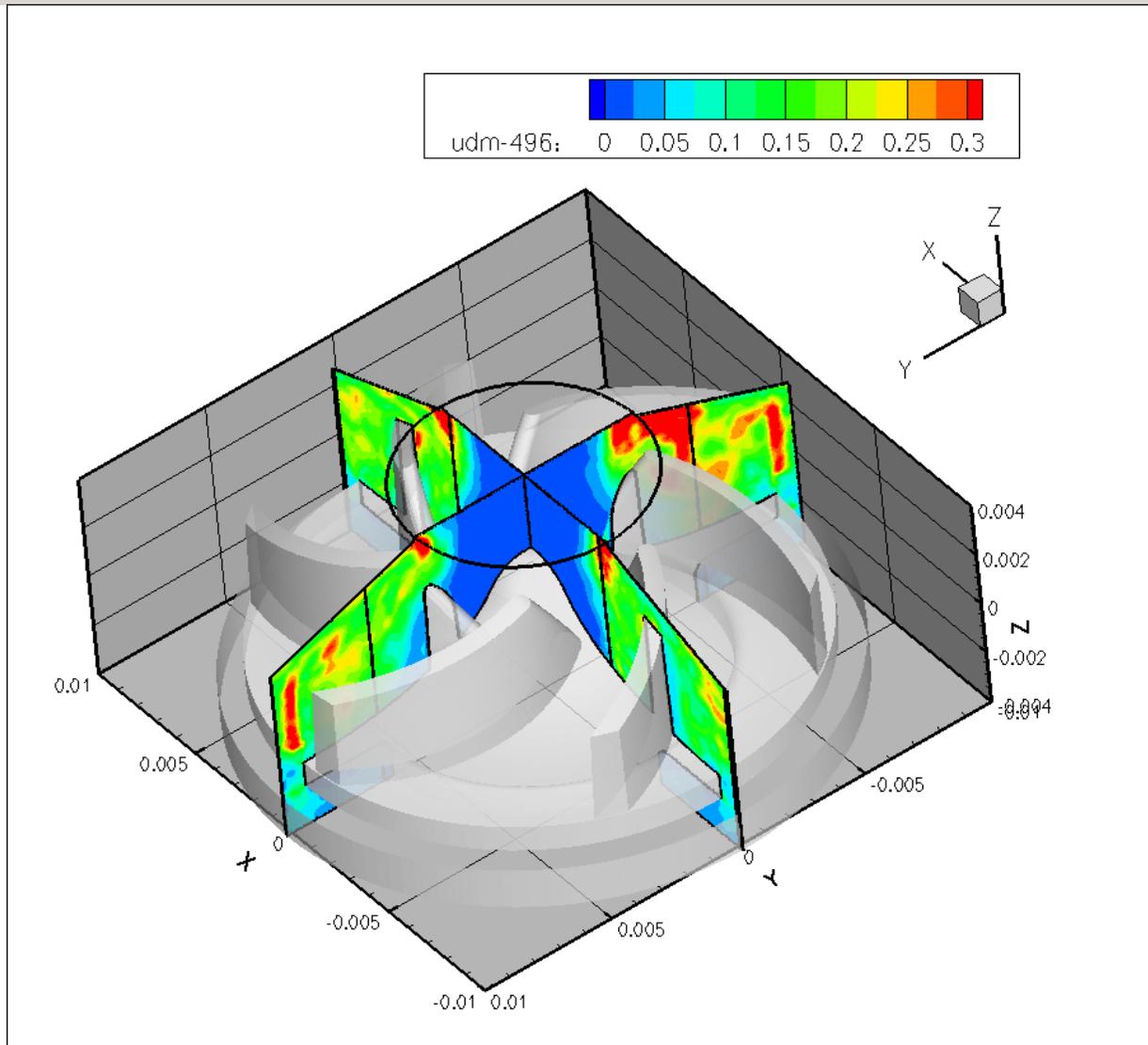
Konforme Abbildung Mittelschnitt – Turbulenzgrad $Tu = \frac{\sqrt{2/3k}}{c_{abs}}$



$Q/Q_{opt} = 1.39$



Simulationsverfahren: RANS; Turbulenzmodell: V2F



Simulationsverfahren: LES; im Bild: turbulente kinetische Energie [m^2/s^2]

Unsicherheiten / offene Fragen

▶ Strömung mit starker Stromlinienkrümmung

SST- CC ?

LES ?

▶ Transitionsvorgänge

low Re- Modelle mit Korrekturen ?

LES ?

Ablösung und Wiederanlegen

DES (RANS in der Grenzschicht, LES in abgelösten Bereichen)?

LES ?

Unsicherheiten / offene Fragen

▶ Akustik

DES ?

LES ?

Forschungsziel : Numerische Optimierung von Komponenten mit/ohne Systemanbindung

