

Systematische Auslegung von Strömungsmaschinen mit  
numerischer Strömungsberechnung und  
empirischer/experimenteller Überprüfung im hydraulischen Labor

Kompetenzzentrum Fluidmechanik und Hydromaschinen

Prof. Dr. E. Casartelli

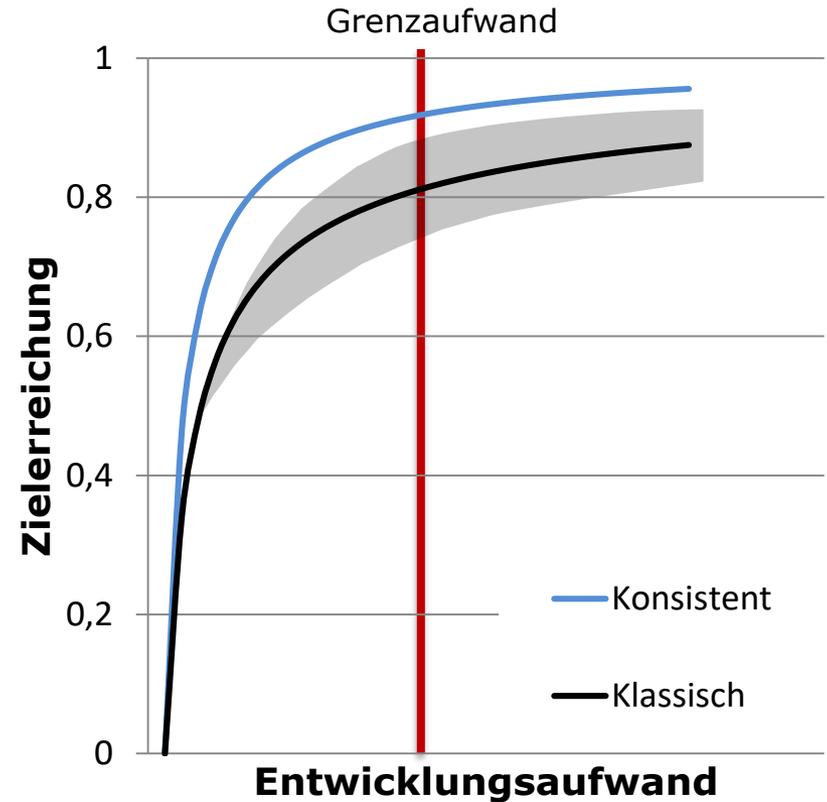
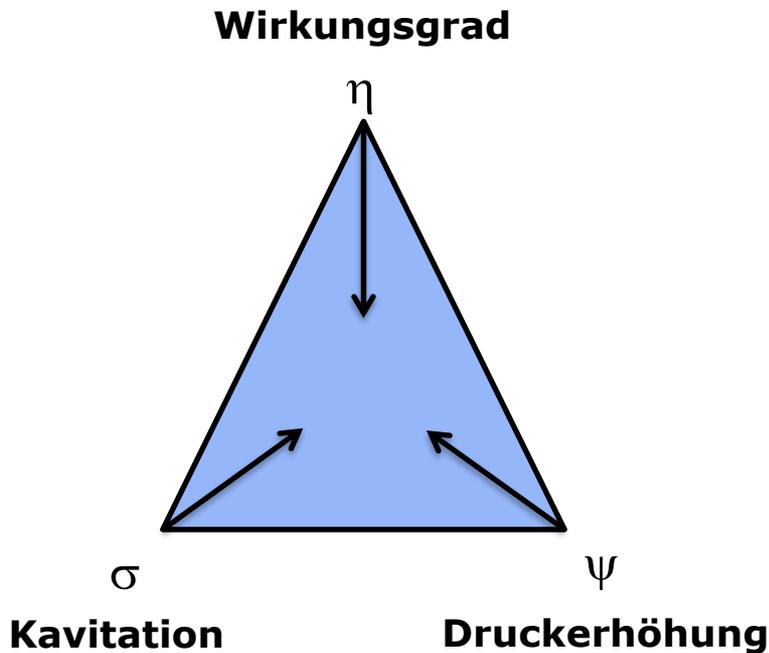
## Motivation

Auslegung von effizienten Pumpen ist

- Komplex
- Ressourcenintensiv

**Kann der Prozess effizienter gemacht werden?**

# Herausforderungen des Kreiselpumpendesigns



Kavitationsbeiwert

Wirkungsgrad

Druckzahl

$$\sigma = \frac{2g NPSH}{u_1^2}$$

$$\eta_i = \frac{P_{hyd}}{P_i}$$

$$\psi = \frac{2gH}{u_2^2}$$

# Systematisches Pumpendesign

## Ziele

- **Effizienzsteigerung** im Auslegungsprozess
- **Verkürzung der Entwicklungszeiten**
- **Erhöhung der Treffsicherheit** der Auslegungsmethode

## Vorgehen

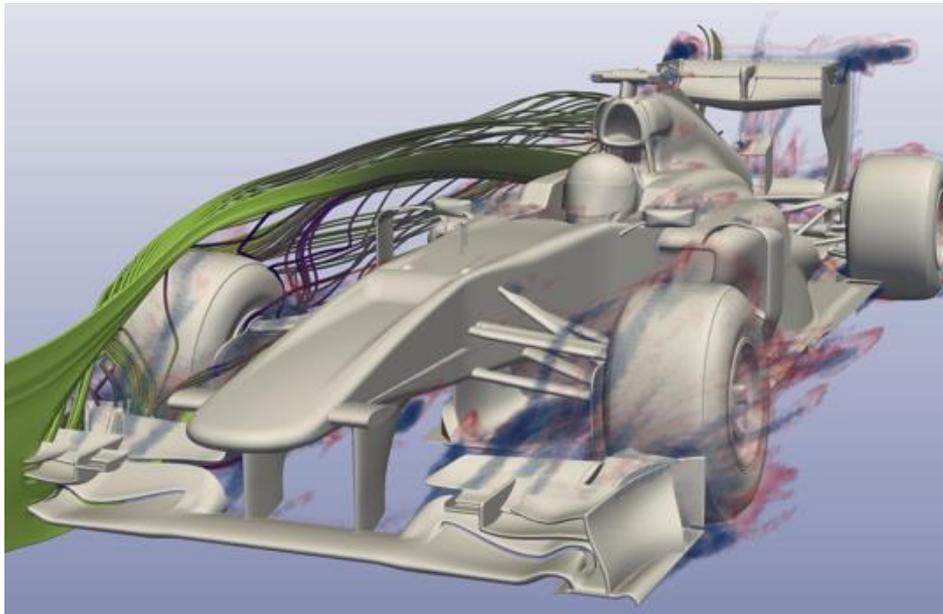
- **Pumpengeometrie** komplett **analytisch** in einer **Systematik** beschreiben, basierend auf dem Ansatz von Dr. J. Gülich (Sulzer Pumpen)
- Systematik durch CFD und Messungen gezielt **überprüfen, anpassen und validieren**
- **Verbesserung der Korrelationen** für die Auslegung aufgrund der **Erkenntnisse aus CFD und Messungen**

## Was ist CFD?

- CFD: Computational Fluid Dynamics (= num. Strömungsberechnung)
- CFD erlaubt die Einsicht in die Strömungsvorgänge

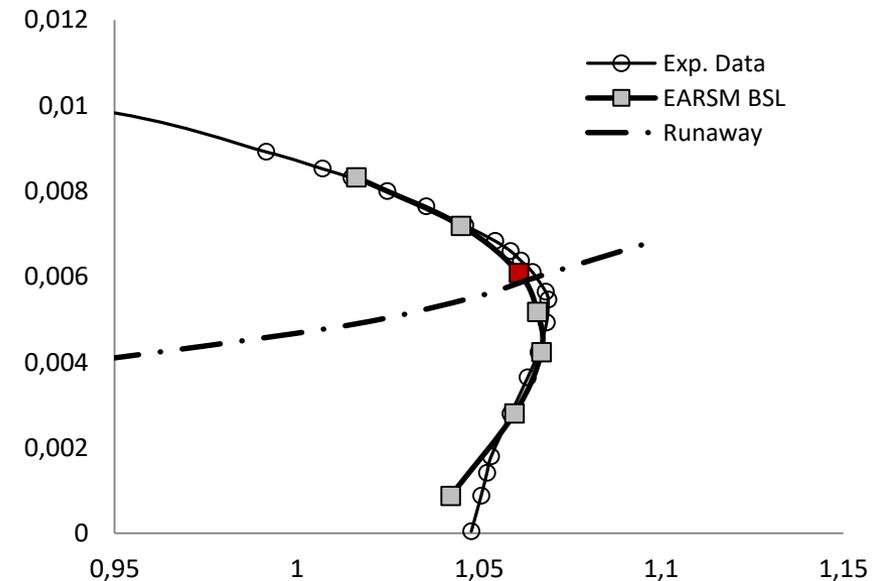
Qualitative Betrachtung

besseres Strömungseinblick



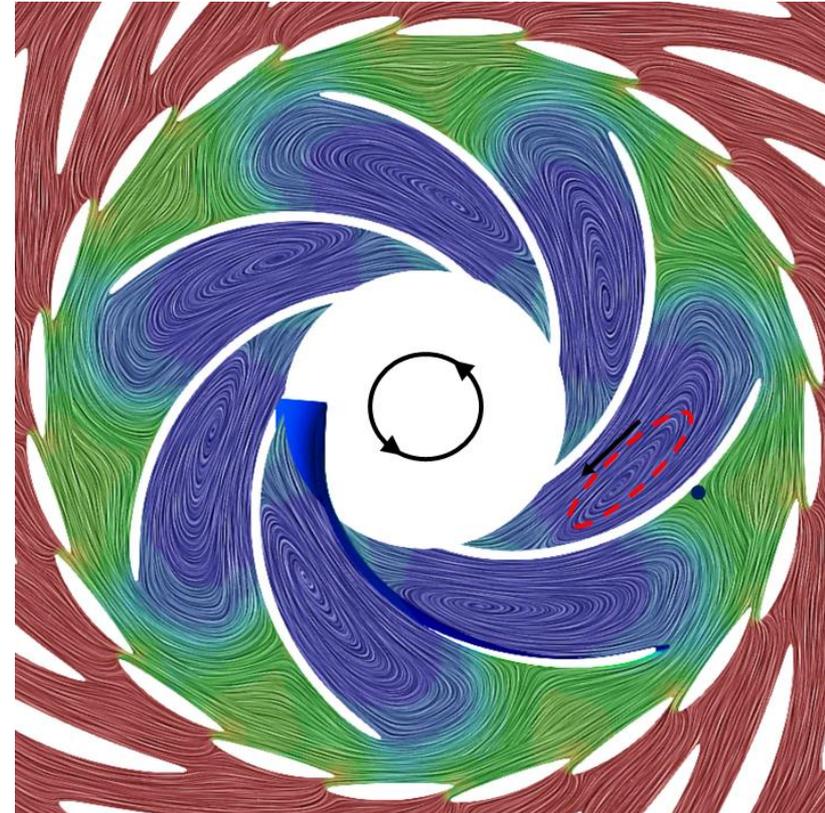
Quantitative Betrachtung

(Ingenieur) Zahlen



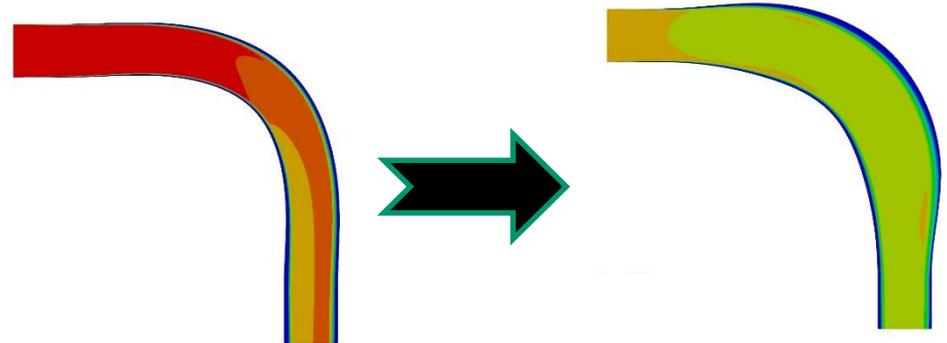
## Was ist CFD?

- CFD: Colors For Directors?
- CFD ist vom Prozess stark abhängig
  - Qualität der Modelle und Randbedingungen
  - Erfahrung der Ingenieure
- Kann «Ineffizienz» fördern
  - Simulieren statt überlegen ...



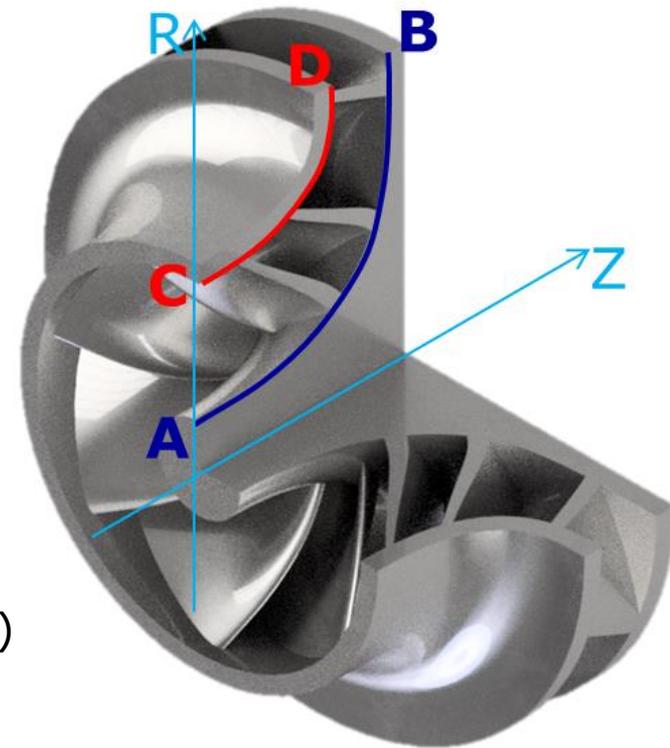
## Nutzen der CFD

- Systematische Analyse mit gleichen Randbedingungen
- Automatische Optimierung
- Ideen generieren
- Minimale Anzahl an experimentelle Versuche
- ...

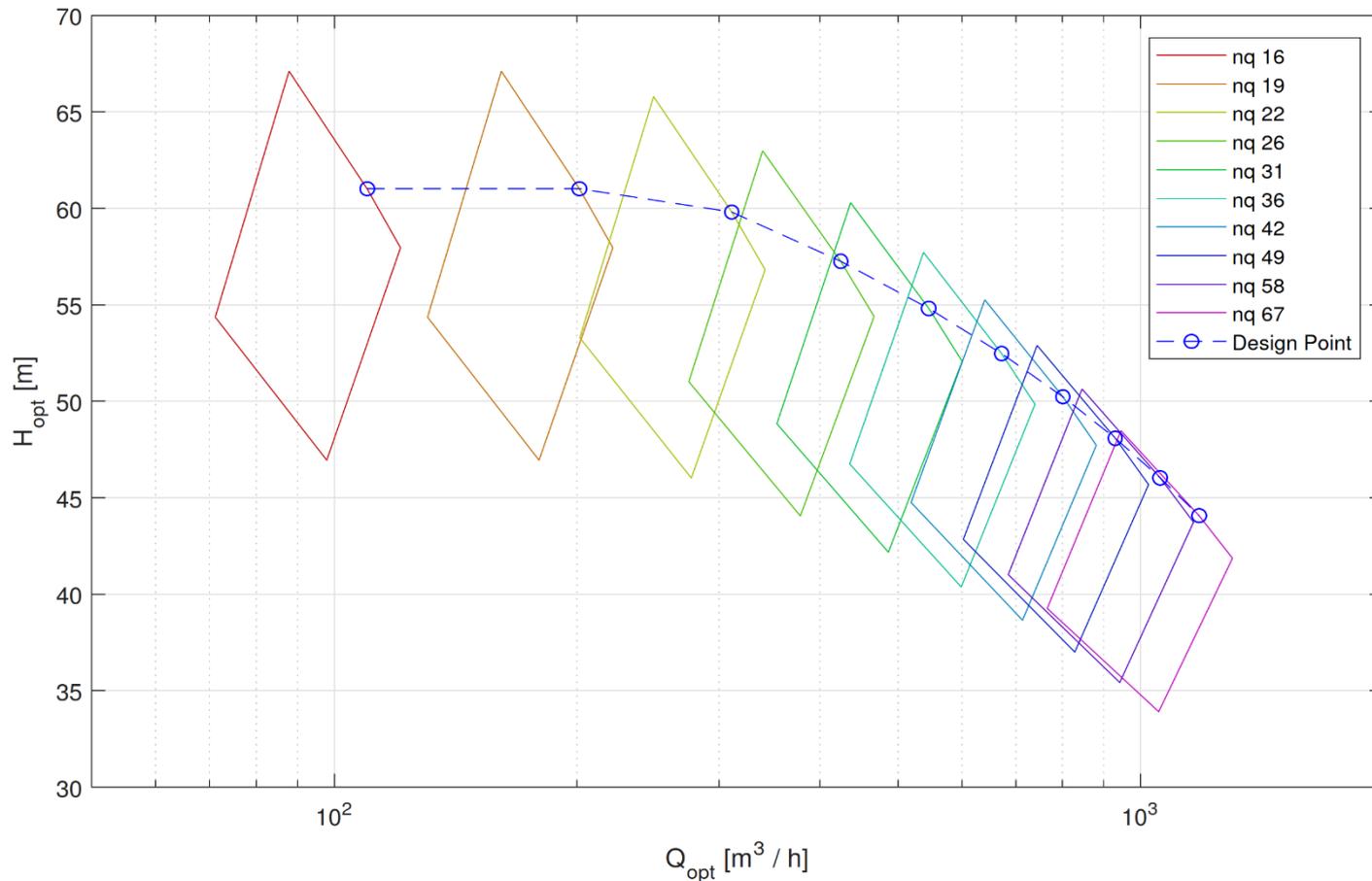


## Vorgehen bei der Auslegung

1. Auswahl und **Festlegung** der **Startparameter**  
z.B.: Drehzahl, Volumenstrom,  
Aussendurchmesser
2. **Berechnung** der **fehlenden Parameter**  
z.B.: Förderhöhe, spezifische Drehzahl
3. **Vorgabe** der gewünschten **Form** des  
**Winkelverlaufs** und der **Meridiankontur**
4. Berechnung der **Geometrie** über die  
**Korrelationen**
5. **CFD** (automatisierter Prozess zur Verifizierung)
6. **Messung** ausgewählter Geometrien

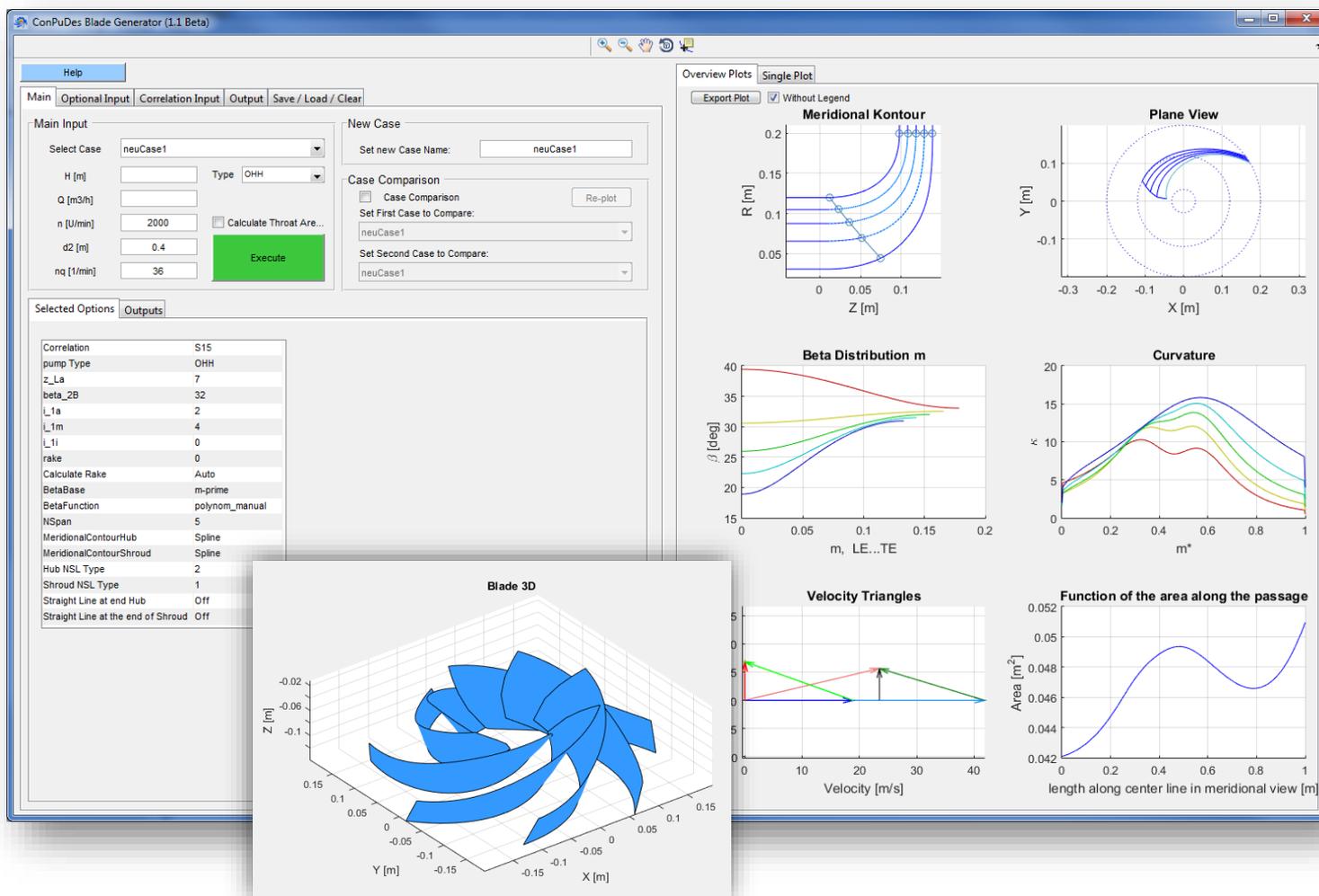


# Kennfeld der Systematik



$d_2=315$  mm;  $n_q$  16-67

# Design Systematik



## Beispiel für Korrelationen

$$\Psi_{opt} = \Psi_{opt,const} \cdot \exp\left(\frac{-\Psi_{opt,expo}}{10^2} \cdot nq\right) \cdot f_{\Psi_{opt,a} + \Psi_{opt,b} \cdot nq}$$

$$\eta_{opt,r} = \left(1 - \eta_{opt,c1,GC} \cdot \left(\frac{nq}{Q_{opt,r}}\right)^{\eta_{opt,c2,GC}} - \eta_{opt,c5,GC} \cdot \left|\eta_{opt,c6,GC} - \log\left(\frac{nq,r}{\eta_{opt,c7,GC}}\right)\right|^{\eta_{opt,c10,GC}}\right) \cdot f_{\eta,iv}$$

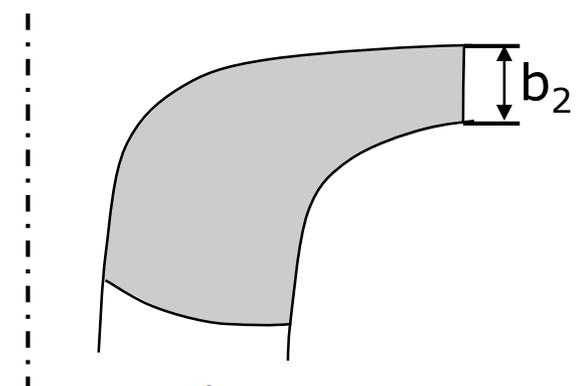
$$dn0 = d_{no,a1} \cdot d2m \cdot \left(1 + d_{no,a2} \cdot \left(z_{st} \cdot \frac{H_{optSt}}{1000}\right)^{d_{no,a3}}\right) \cdot nq^{d_{no,a4}}$$

$$zE = \frac{(d_{1a} - d_n)}{z_{E_{opt}}} \cdot nq^{zE_{opt}}$$

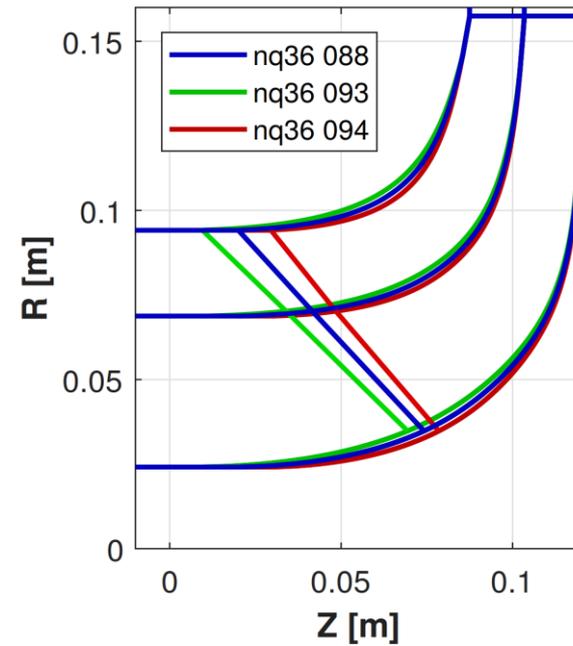
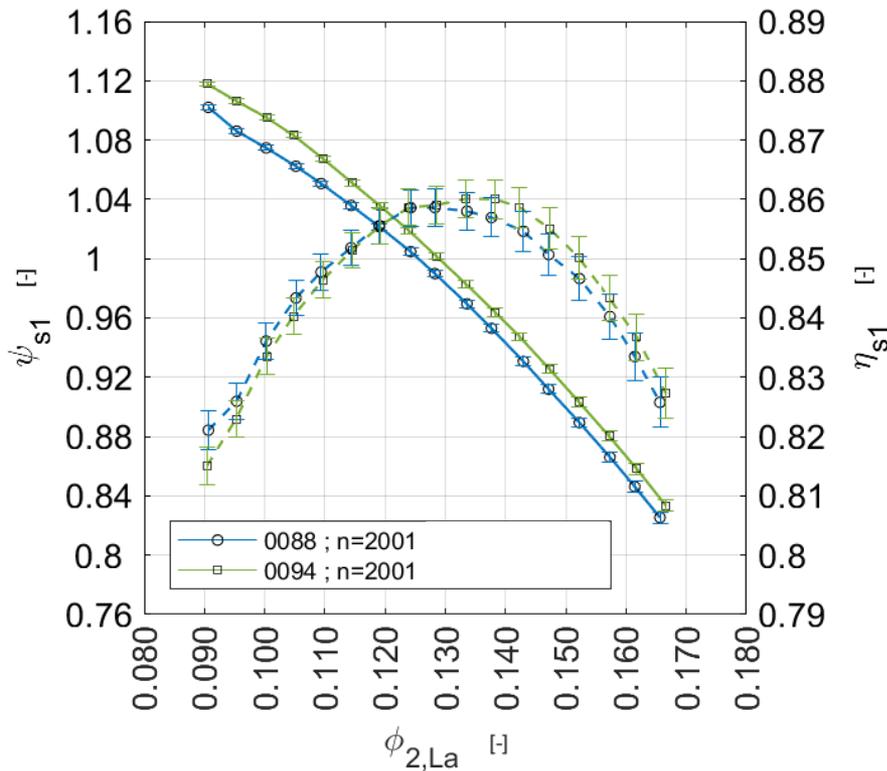
$$b_2^* = \left(b_{2,a1} + b_{2,a2} \cdot \frac{nq}{100} + b_{2,a3} \cdot \left(\frac{nq}{100}\right)^2 + b_{2,a4} \cdot \left(\frac{nq}{100}\right)^3\right) \cdot (b_{2,a5} + b_{2,a6} \cdot nq)$$

**Performance**

**Geometrie**



## Konsistente Resultate trotz anpassen von Parametern



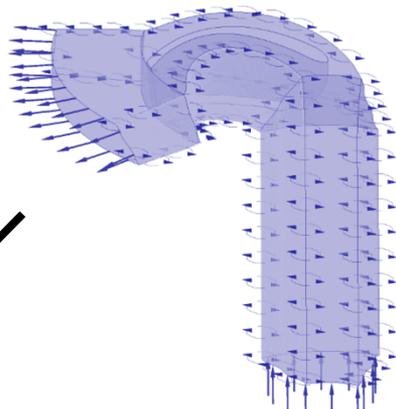
Durchflusszahl

$$\phi_{2,La} = \frac{Q_{La}}{\pi d_{2b} b_2 u_2}$$

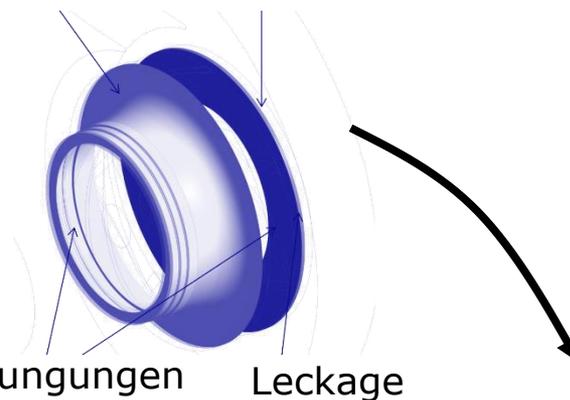
S1: Messstellenbezeichnung  
La: Durch Laufrad

# Modellierung der Pumpengeometrie

1-Passagen Modell



Radseitenräume

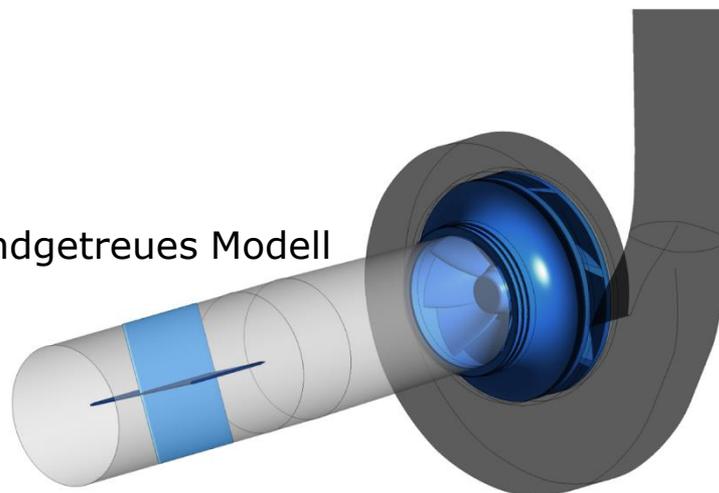


Vereinfachtes 360° Modell



Labyrinthdichtungen Leckage

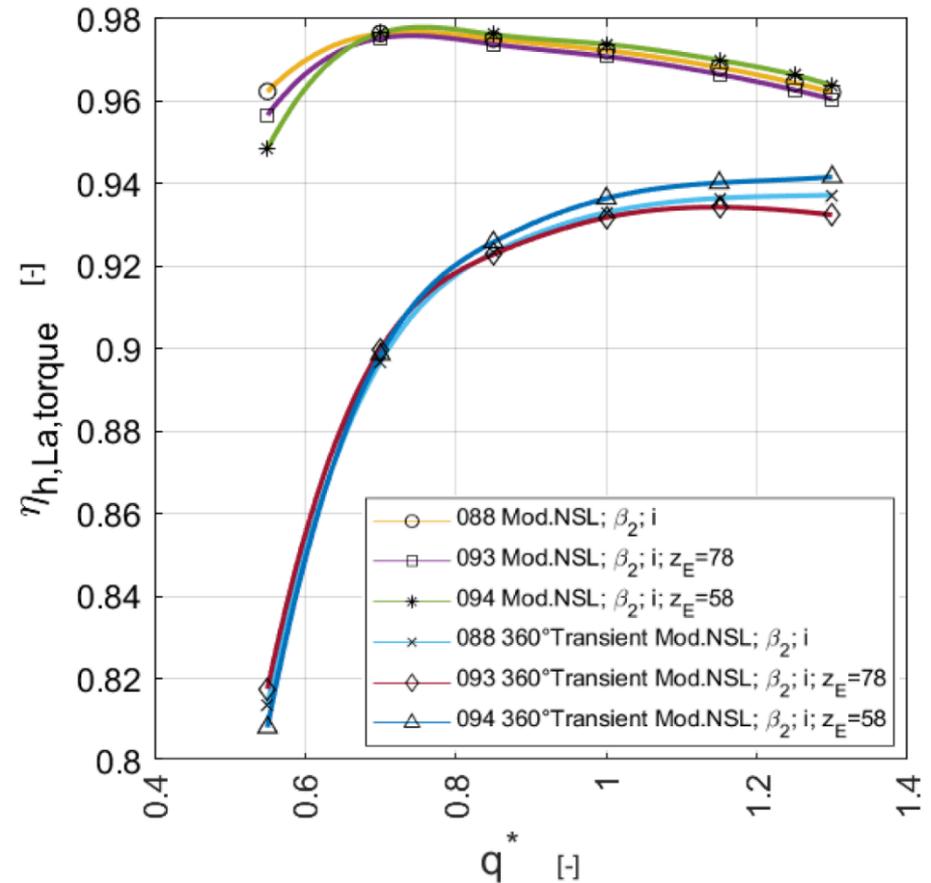
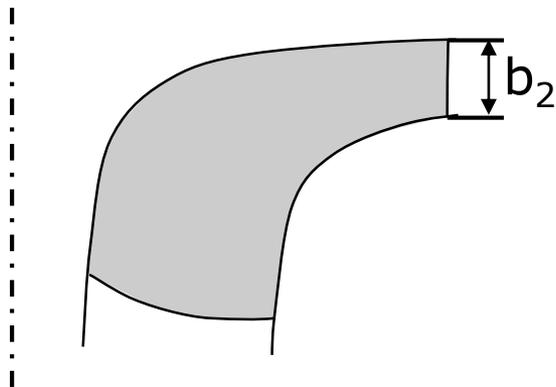
Prüfstandgetreues Modell



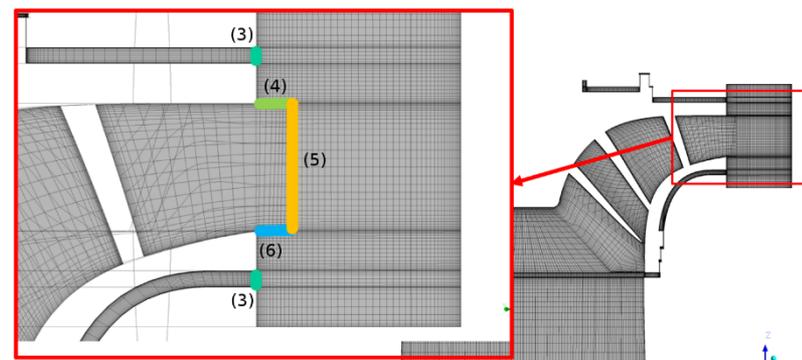
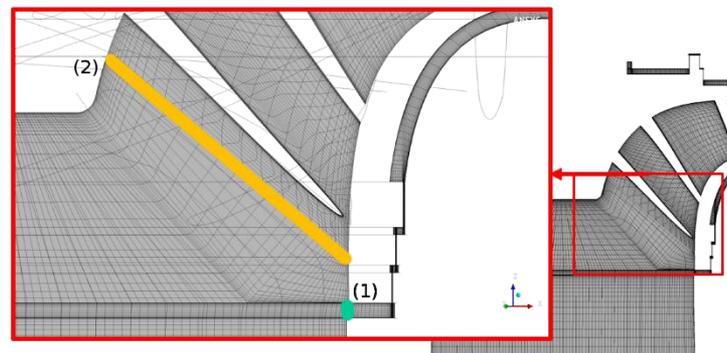
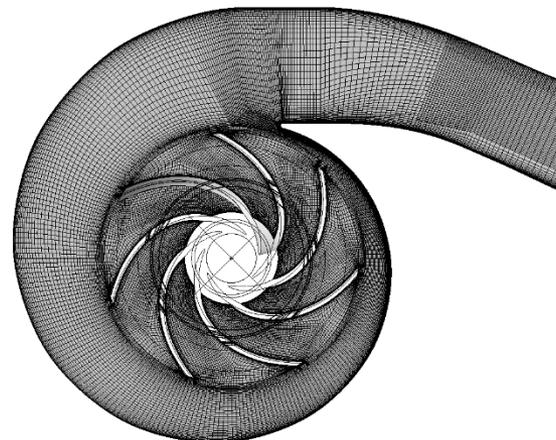
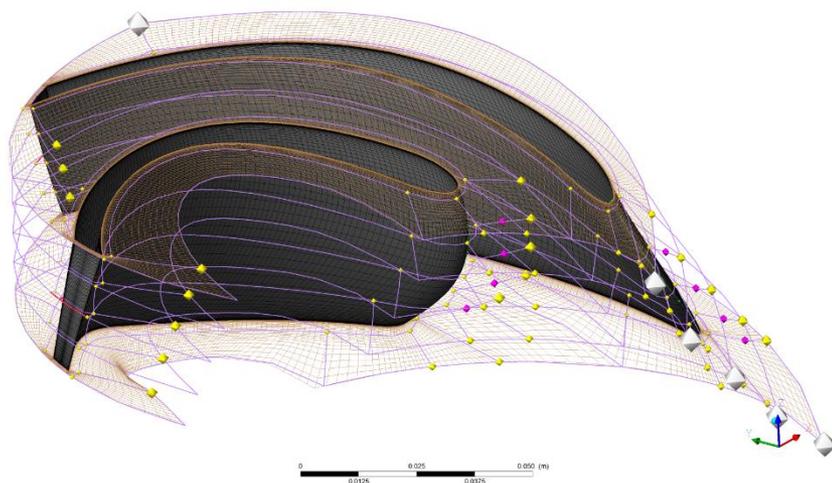
# 1-Passage vs. prüfstandgetreue Pumpengeometrie

Vereinfachung nicht geeignet für:

- Off-Design-Betrachtung
- Einfluss von Geometrie-Parameter, welche die Spirale beeinflussen (z.B.  $b_2$ )



## (Semi) Automatische Vernetzung



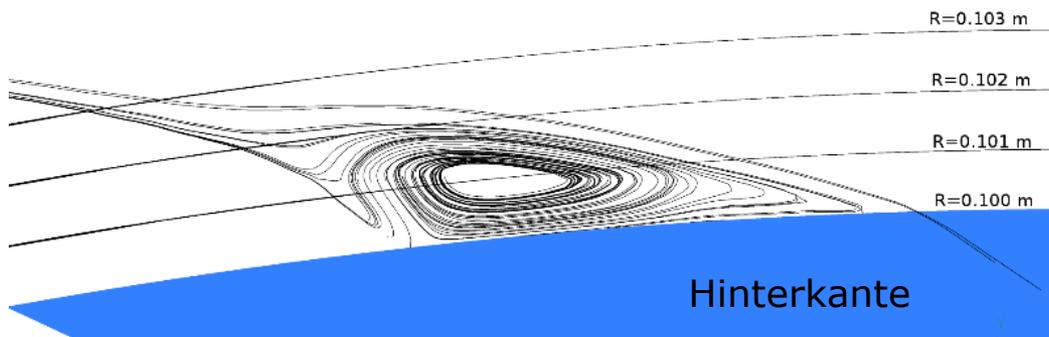
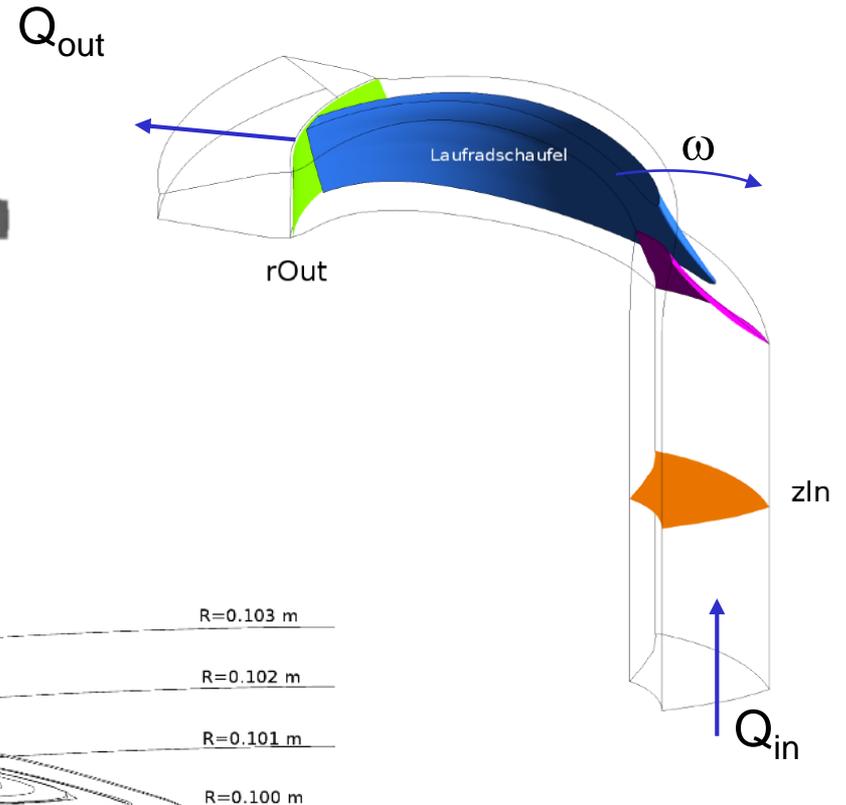
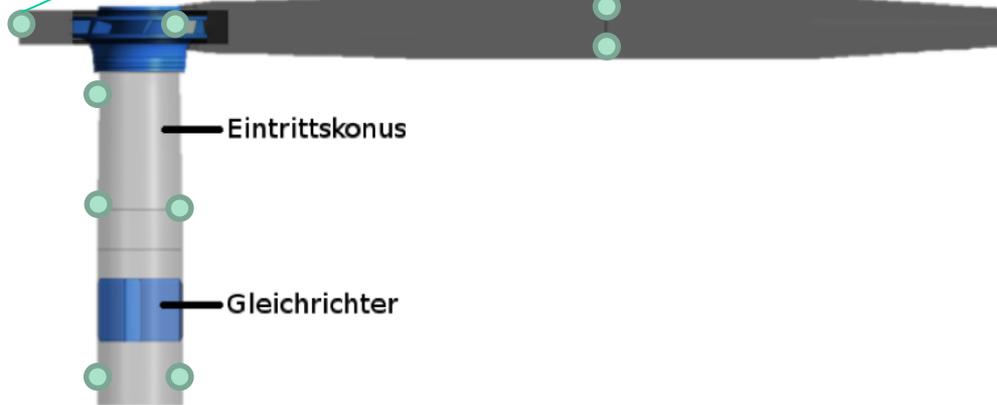
Laufgradvernetzung: TurboGrid

Inlet, Spirale, Radseitenräume:  
Manuell, strukturiert,  $y^+ : 1$

Elementanzahl Total: ~10-15 Mio.

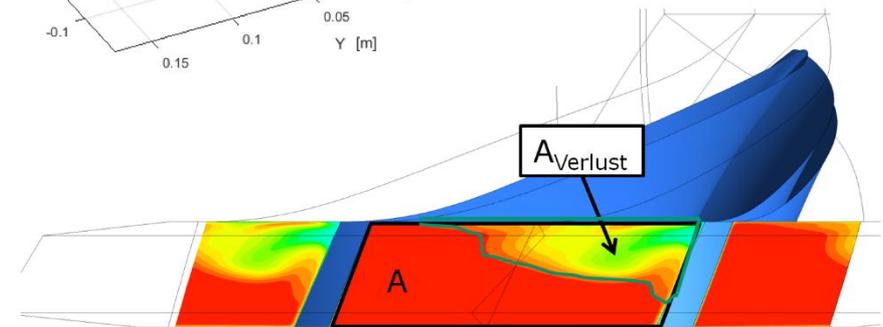
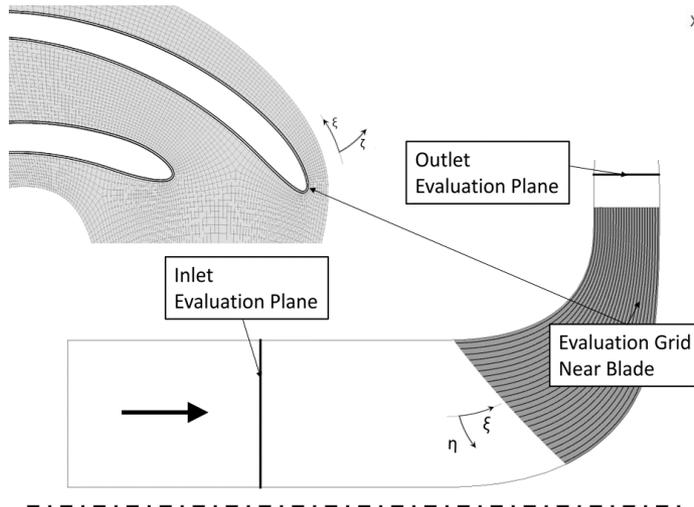
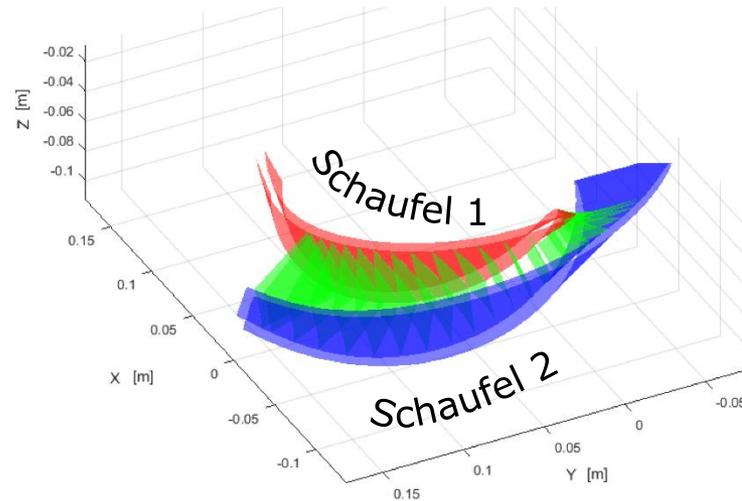
## Detaillierte Auswertung globaler Daten

Punktauswertung der statischen Drücke



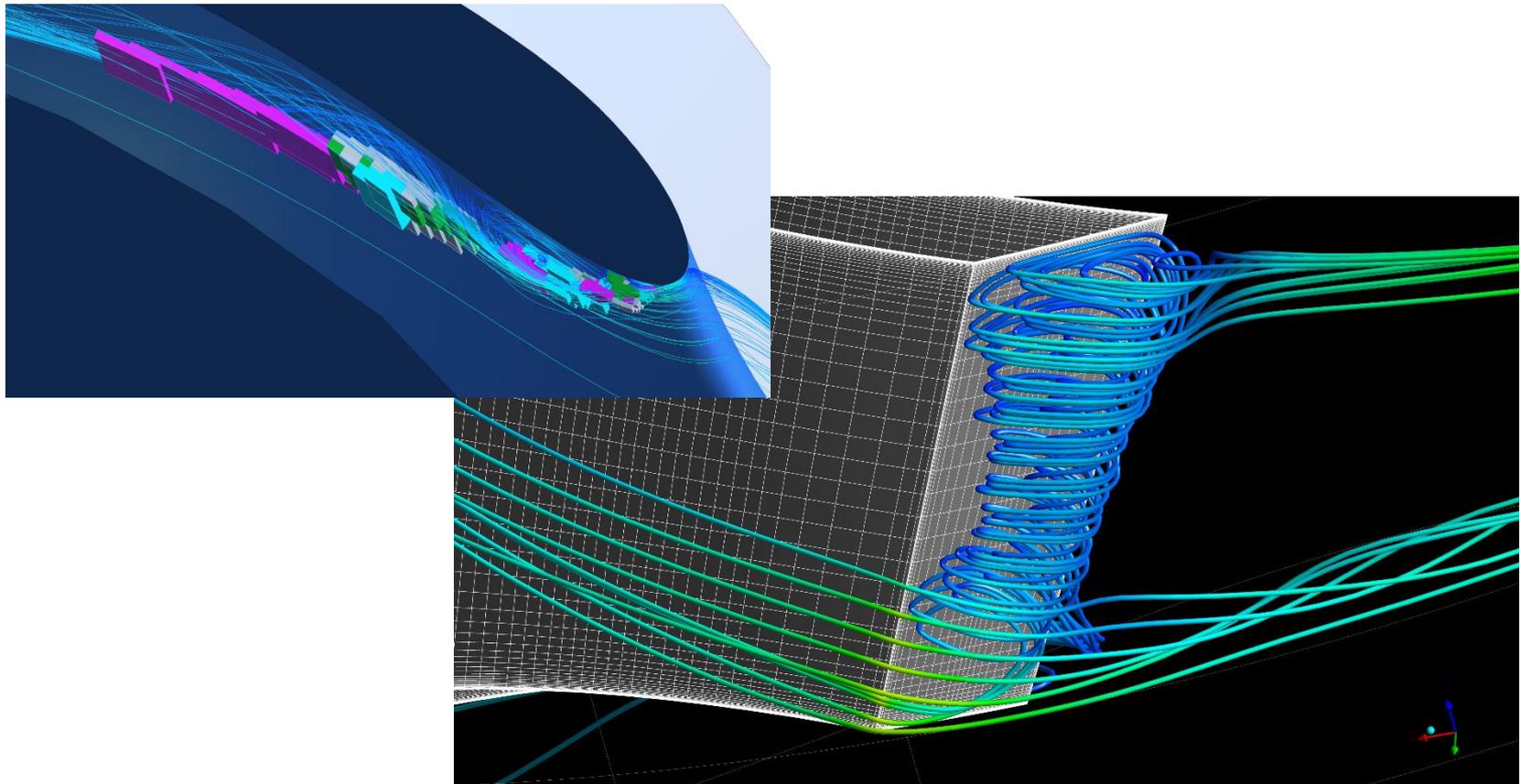
# Geometriespezifische Auswertung

## Orthogonale Flächenelemente

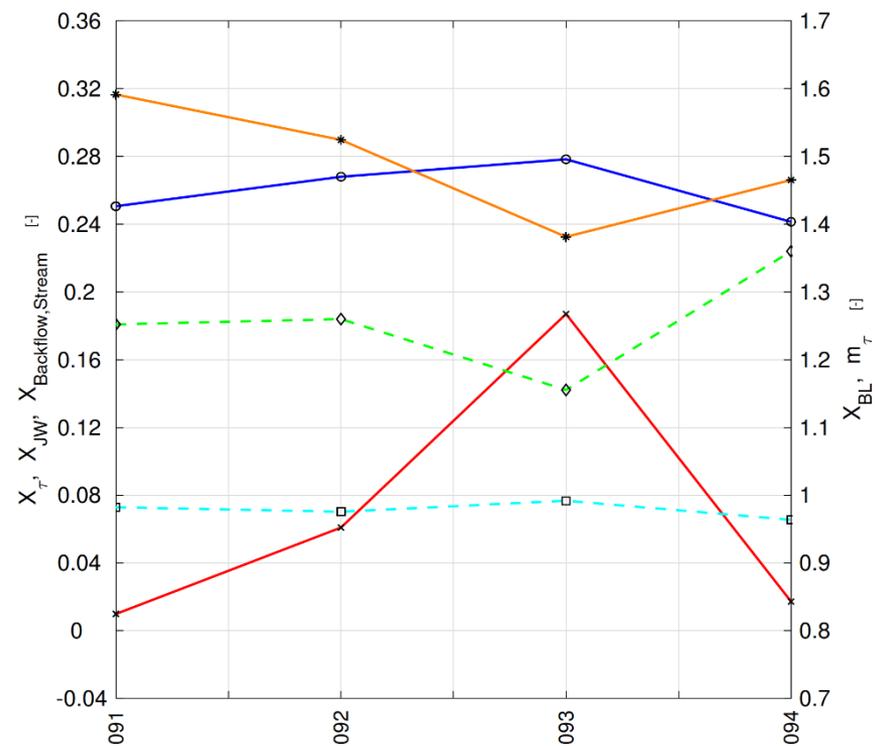
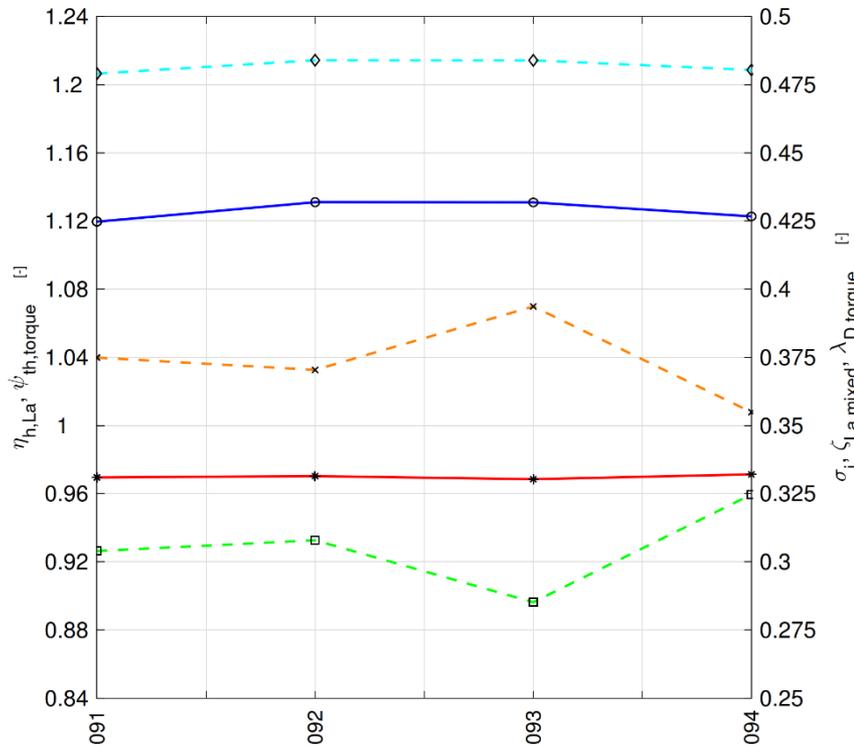
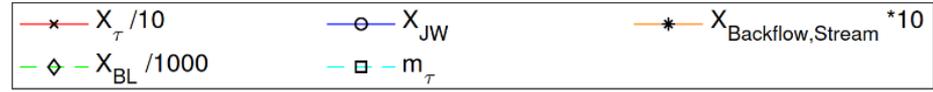
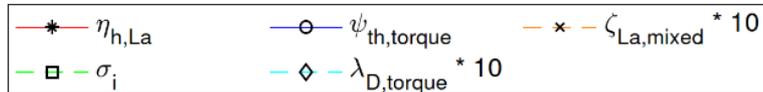


$$\chi_{JW} = \frac{A_{verlust}}{A} = \frac{Area[\overline{p_{rel}^0} < 0]}{d_2 \pi b_2 / t}$$

## Visuelle Analyse (qualitativ)



# Quantitativer Vergleich von Laufradgeometrien



Laufradgeometrien

Laufradgeometrien

## Pumpenprüfstand HSLU

Technische Daten:

Maximale Druckerhöhung auf 16 bar

Maximaler Durchfluss 305 l/s

Motorenleistung:

$$n_{max} = 2600 \text{ Nm}$$

$$P_{max} = 160 \text{ kW}$$

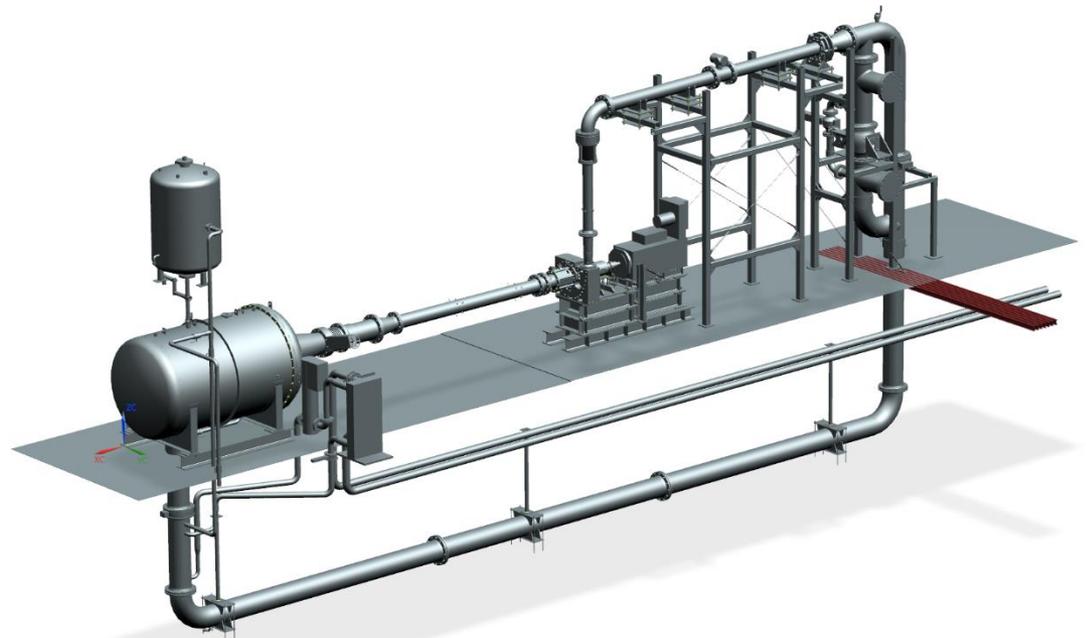
$$M_{max} = 815 \text{ Nm}$$

Beruhigungstank von 4000l

Druckausgleichstank 2000l

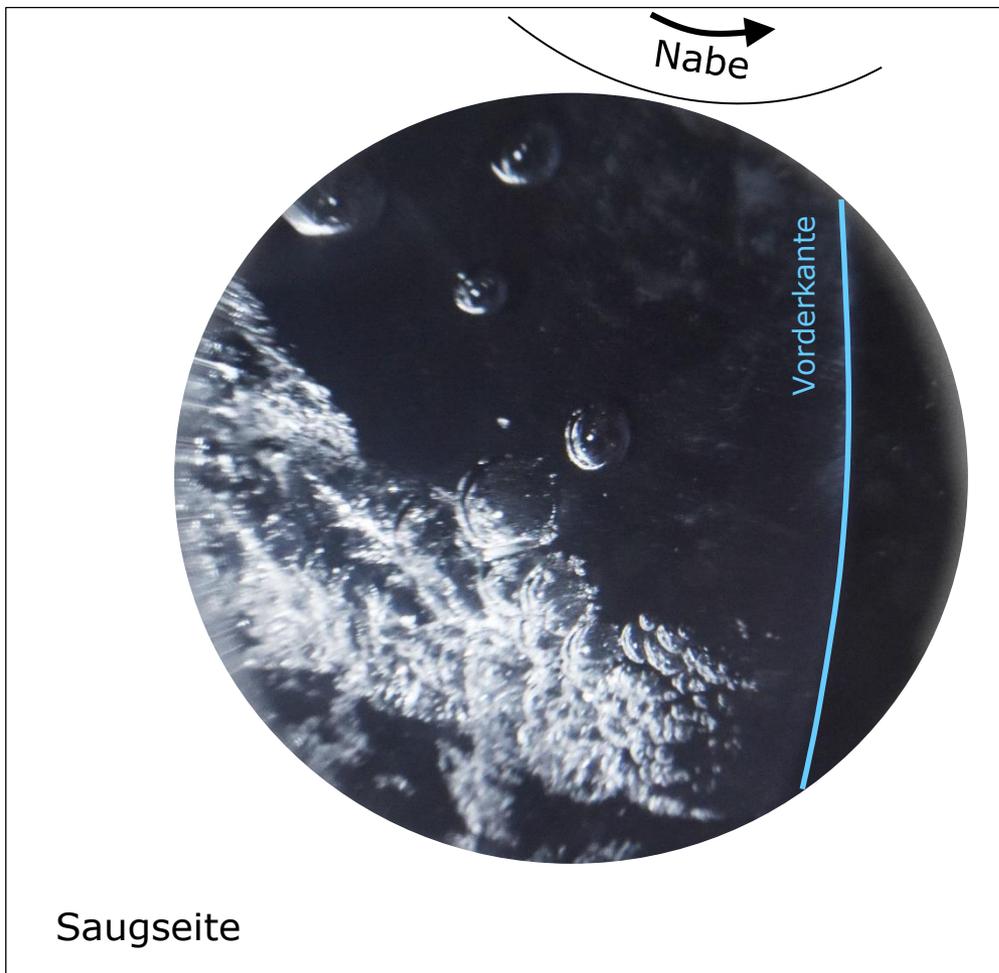
Zugang für LDA und  
Strömungsvisualisierung

Minimaler Vordruck 2700 Pa



# Visualisierung von Kavitation in Kreiselpumpen

## 1% Förderhöhenabfall

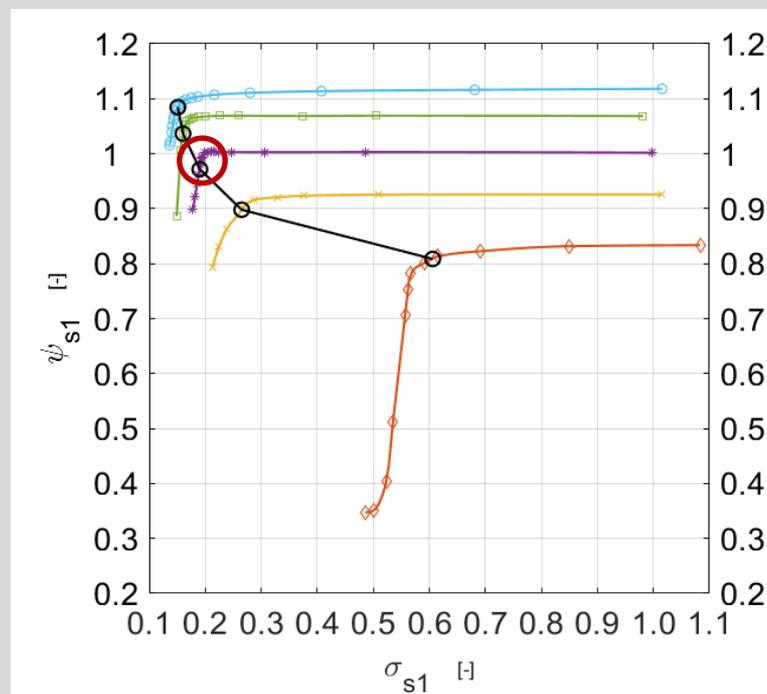


Geometrie 094

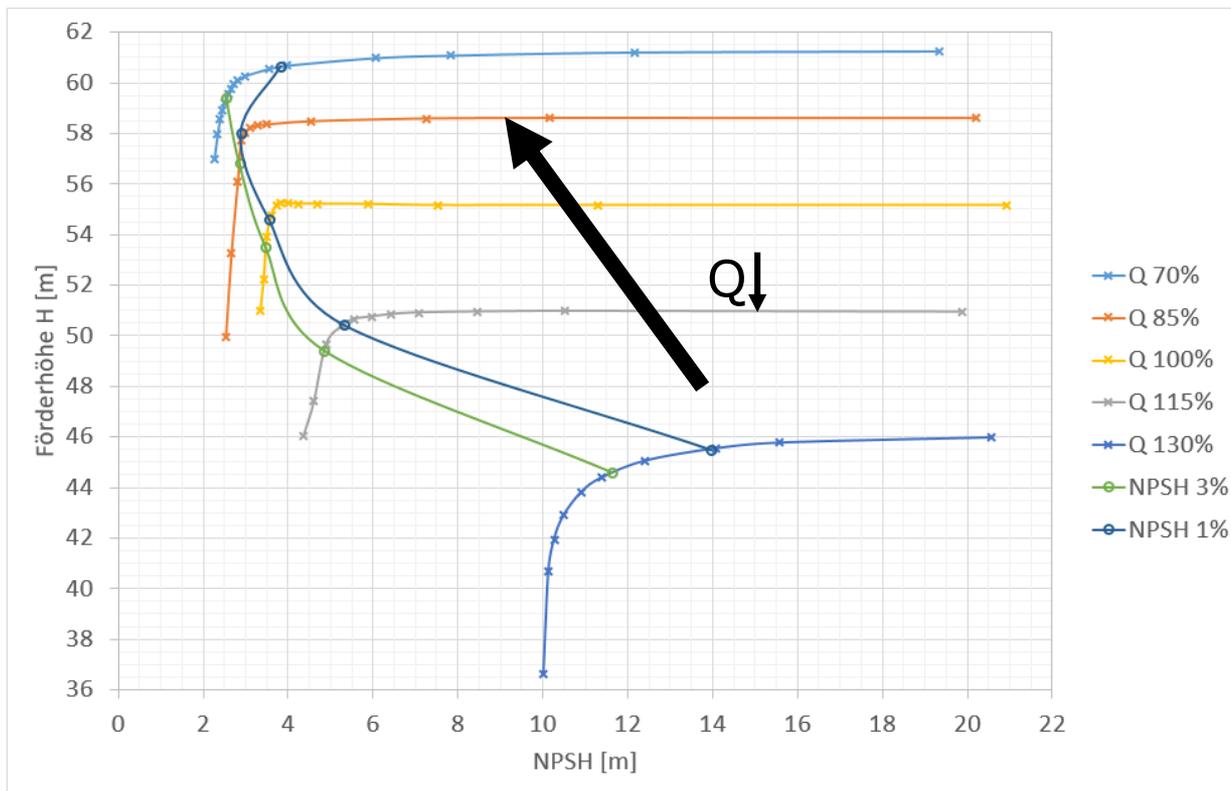
$$n_q = 36$$

$$q^* = 1$$

1% Förderhöhenabfall



## Abreisskurve: H - NPSH

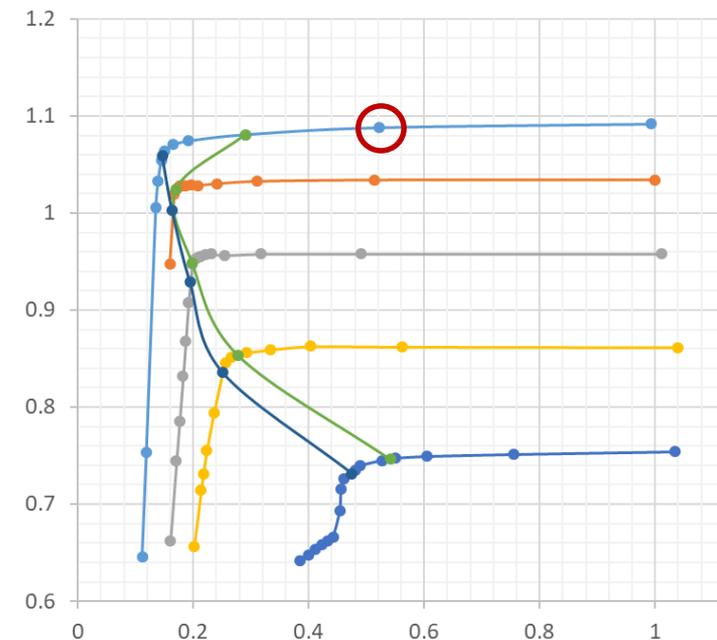


- Alu-Laufrad
- Geometrie 088
- $n=2000 \text{ min}^{-1}$

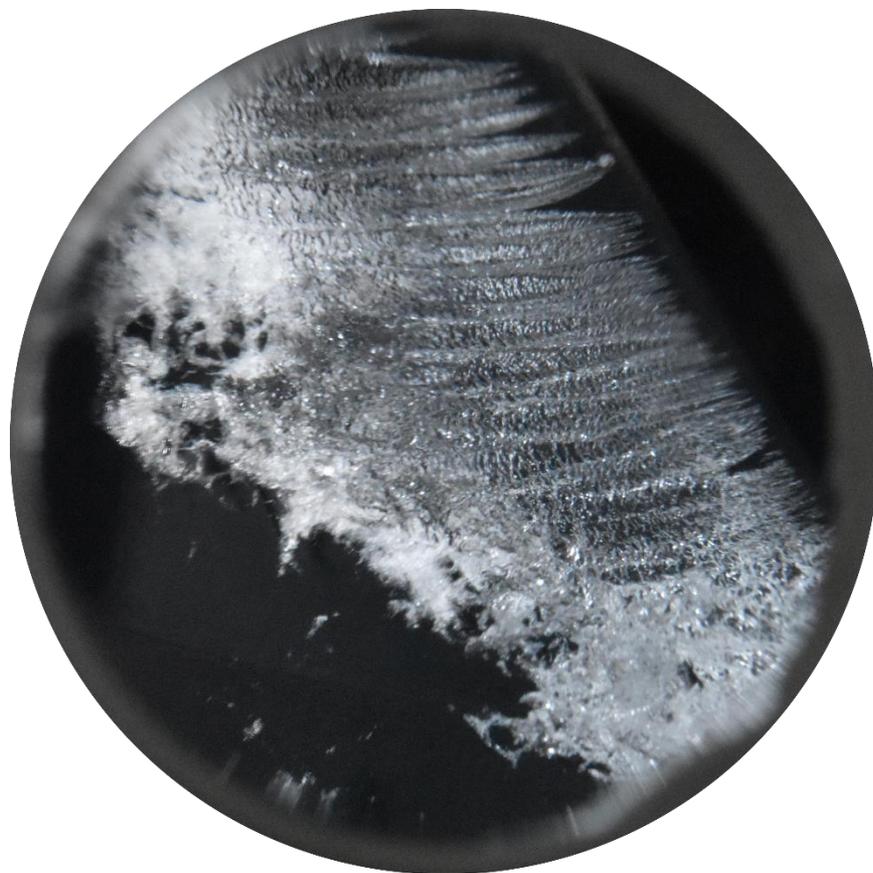
## Kavitationsbilder



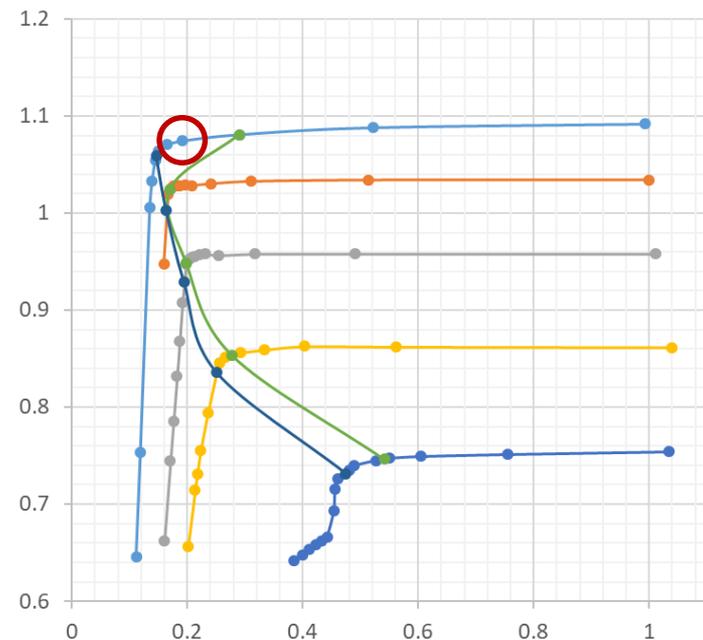
- Kunststoff-Laufrad
- Geometrie 011
- $n=2000 \text{ min}^{-1}$
- $q^* 70\%$



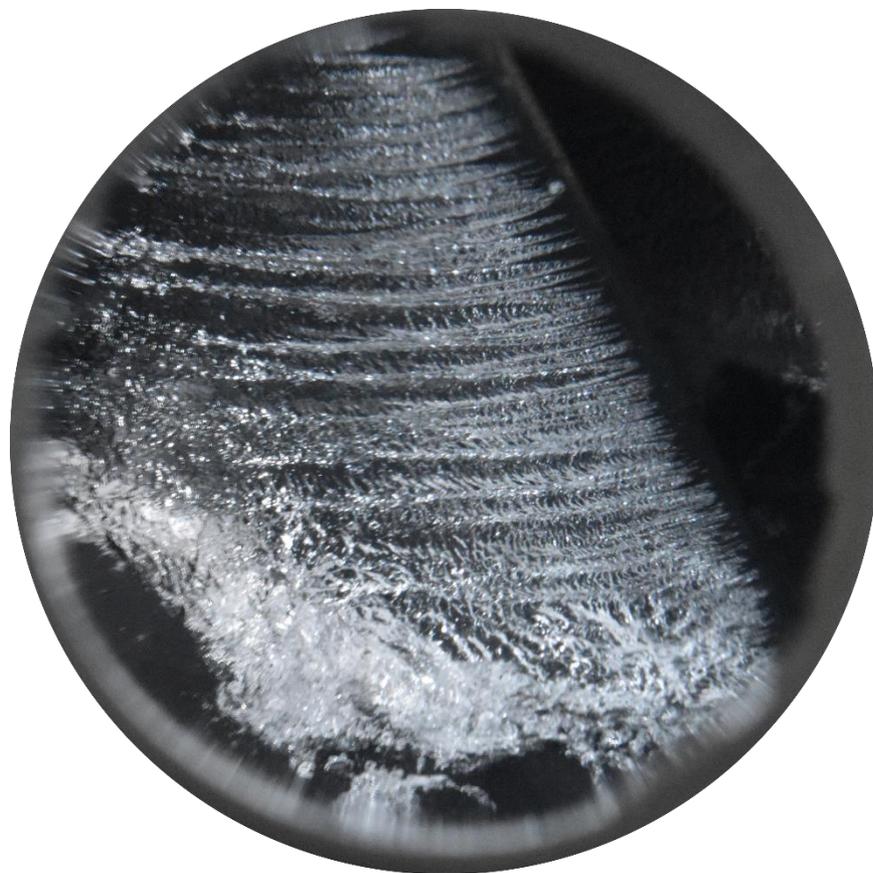
## Kavitationsbilder



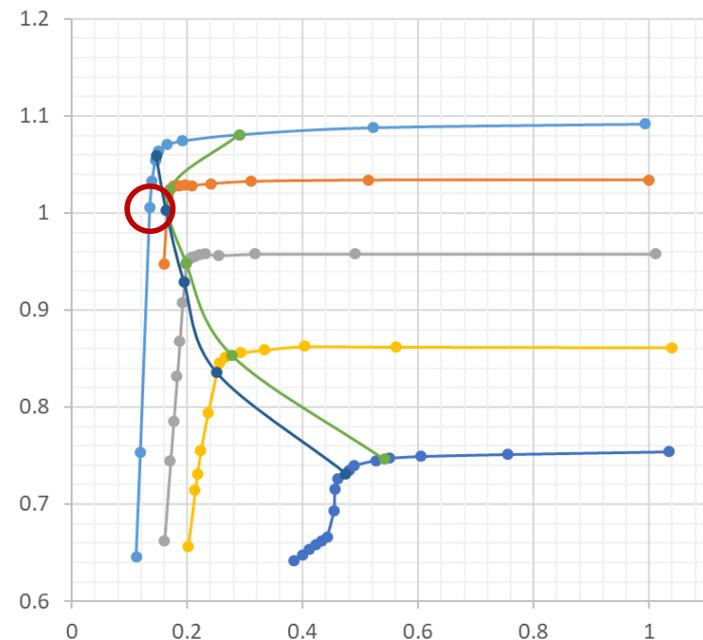
- Kunststoff-Laufrad
- Geometrie 011
- $n=2000 \text{ min}^{-1}$
- $q^* 70\%$



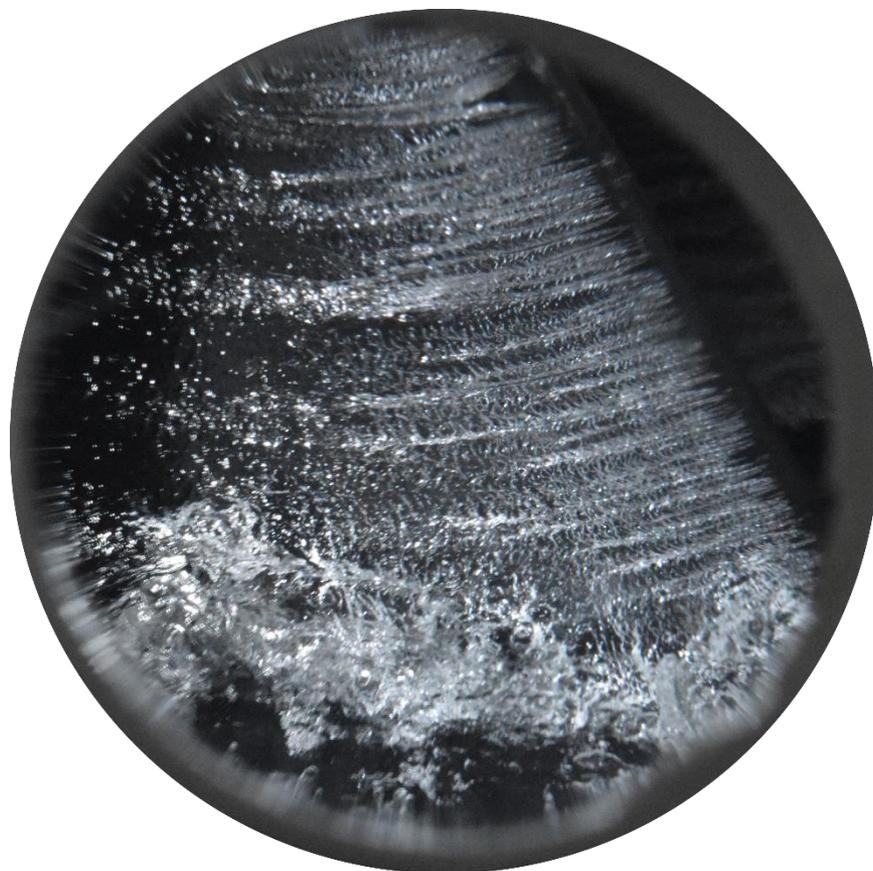
# Kavitationsbilder



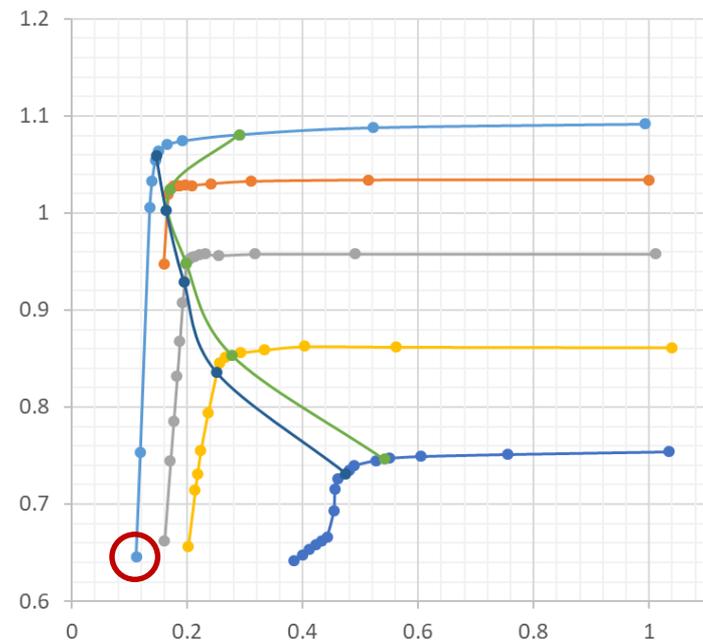
- Kunststoff-Laufrad
- Geometrie 011
- $n=2000 \text{ min}^{-1}$
- $q^* 70\%$



# Kavitationsbilder



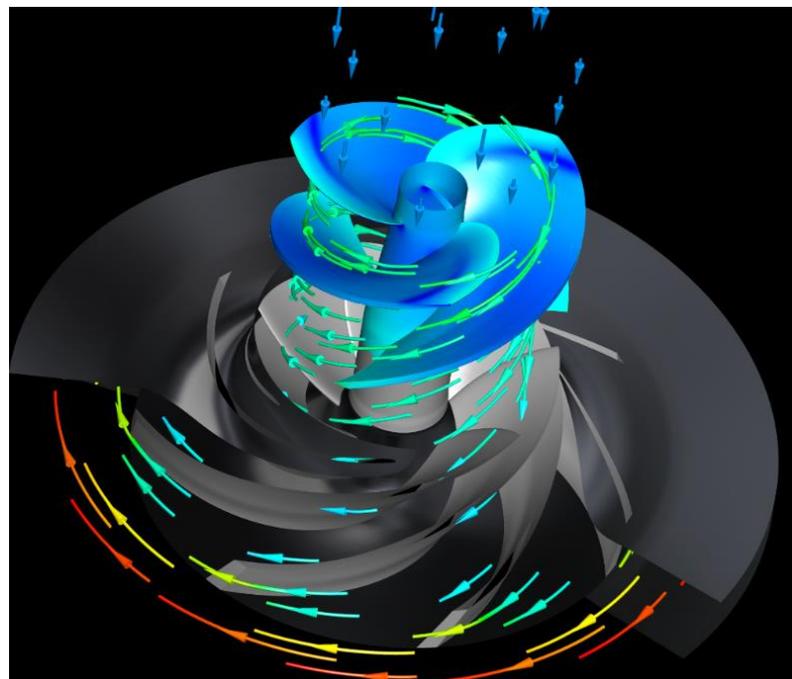
- Kunststoff-Laufrad
- Geometrie 011
- $n=2000 \text{ min}^{-1}$
- $q^* 70\%$



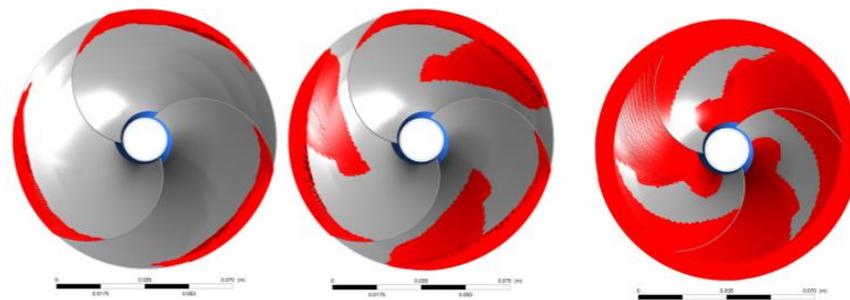
## Einsatz von Kavitationsmodellen

Schneller Vergleich von verschiedenen Varianten, z.B. Inducer Kavitation

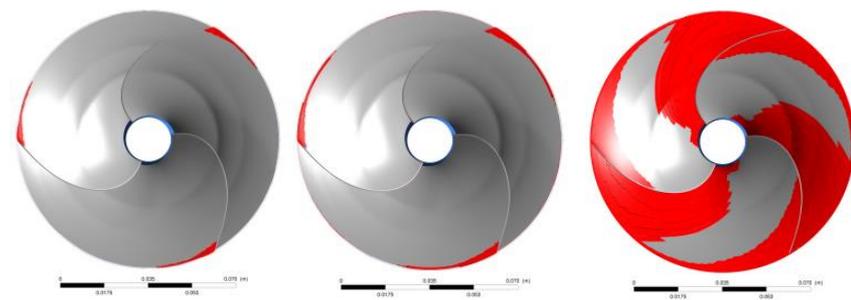
**NPSH** ↓  
→



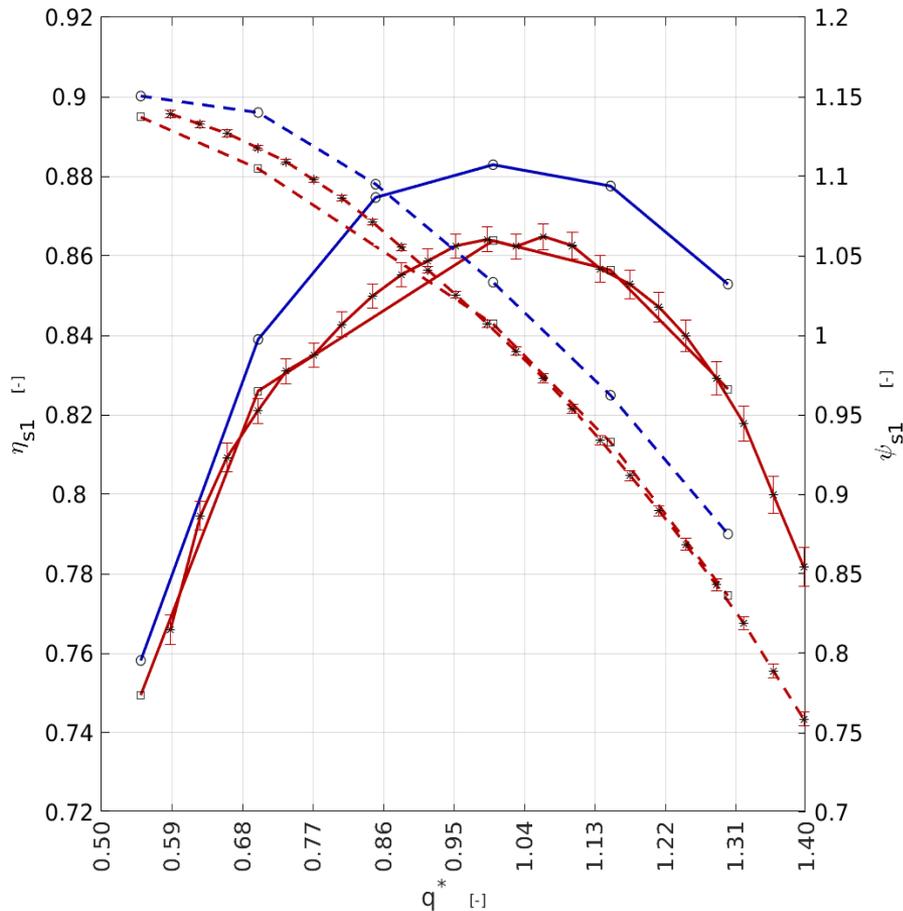
**Rad A**



**Rad B**



# Einsatz neuer Turbulenzmodelle



Geeigneter Einsatz des Turbulenzmodells durch Validierung mittels Messungen

Einfluss von Turbulenzmodell

- SST
- RSM
- x- Messung

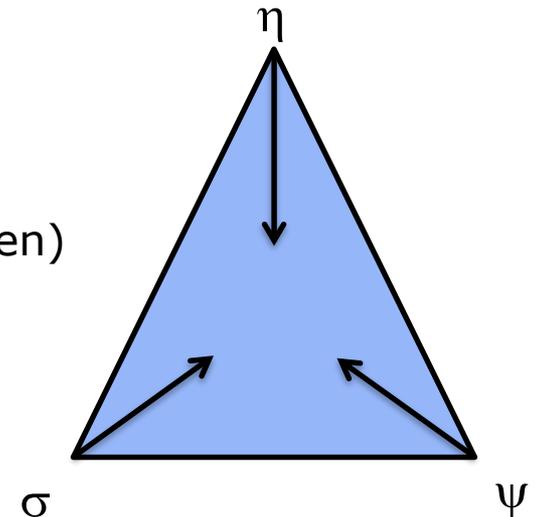


## Projektvorteile

- Zeit bis zur Laufradgeometrie ( $\sim 1$ Tag)
- Verbesserte Korrelationen für  $n_q = 36$  Laufräder
  - Meridiankontur
  - Schaufelwinkerverlauf
  - Schaufelbreite
  - Axiale Länge
  - Inzidenzwinkel

(Wirkungsgrad, Förderhöhe, Kavitationseigenschaften)

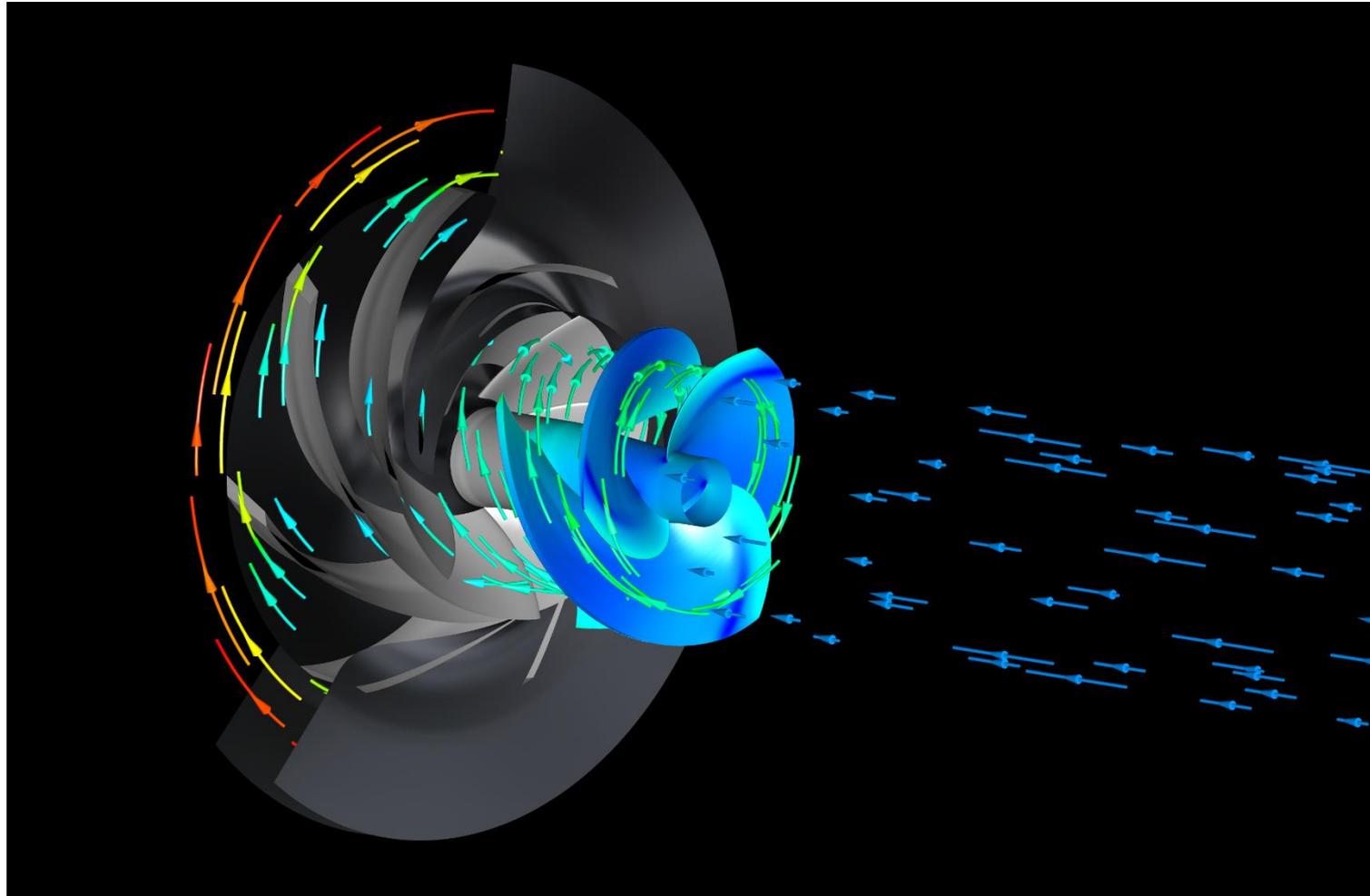
- Sehr konsistente Auslegung



## Danksagung

- CP Pumpen: Projektpartner
- Wilo SE: Projektpartner
- Sulzer Pumpen: Projektpartner
  
- KTI / Innosuisse: Förderagentur

## Systematik auch für Inducer

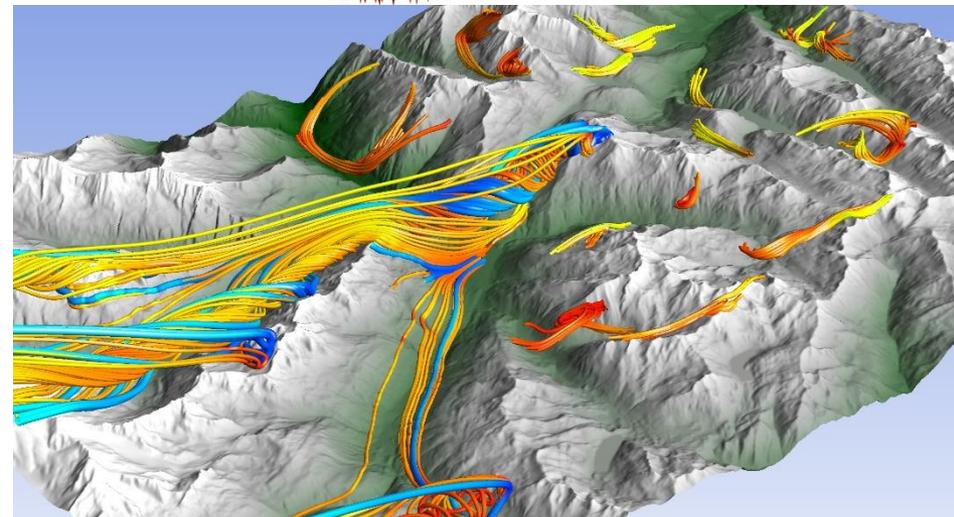
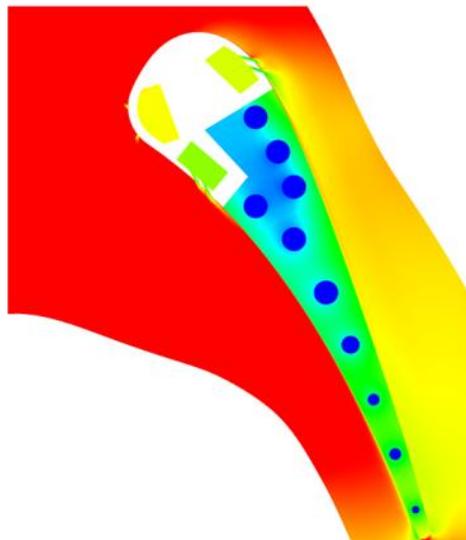
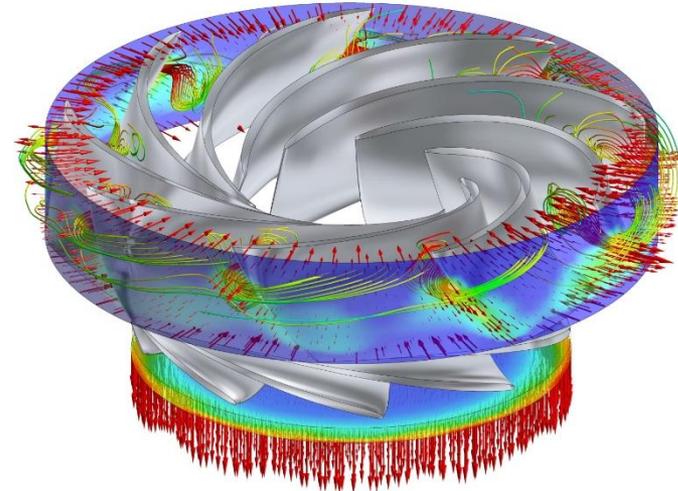


## Team CC FMHM / HSLU

- Leitung: Prof. Dr. Ernesto Casartelli
- 4 Dozenten
- 19 wiss. MA und Assistierende
- Labormechaniker

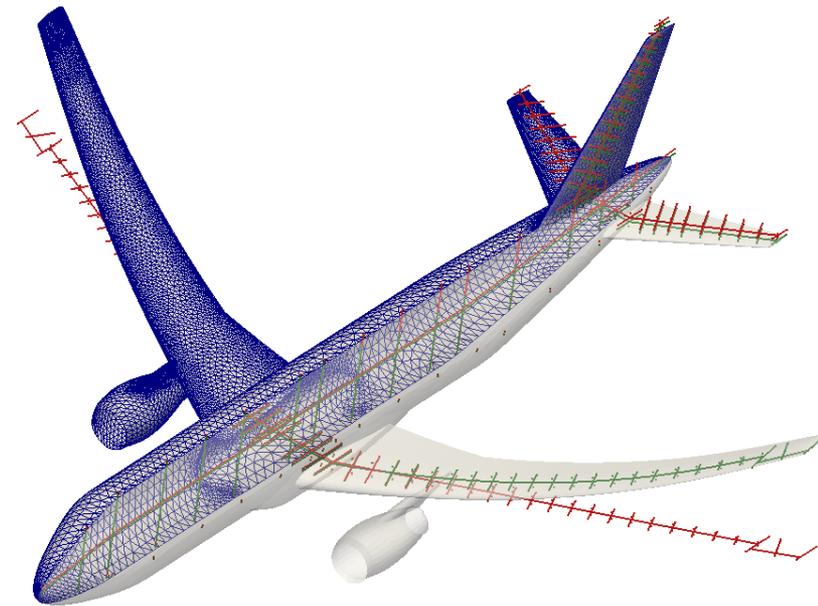
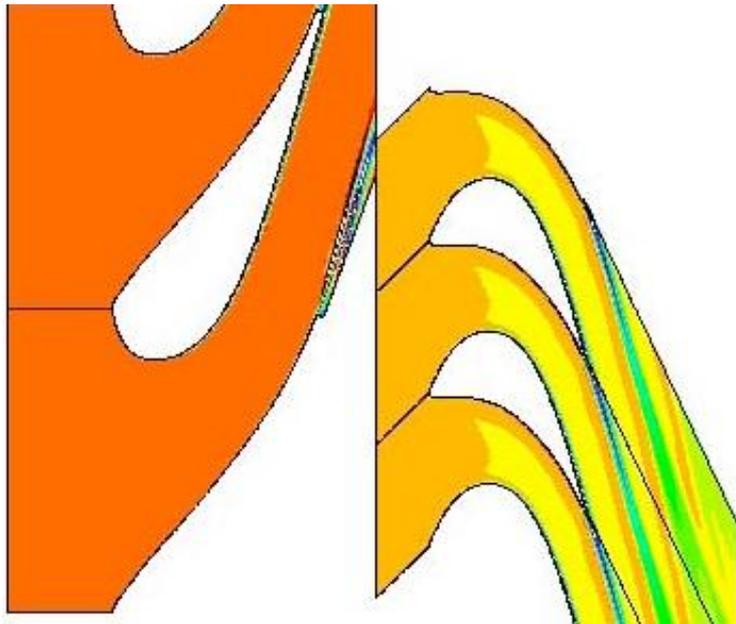
# Kernkompetenzen

- CFD Analyse von fluiddynamischen Prozessen, Komponenten und Systeme



# Kernkompetenzen

- CFD Software Entwicklung (in-house frame work)

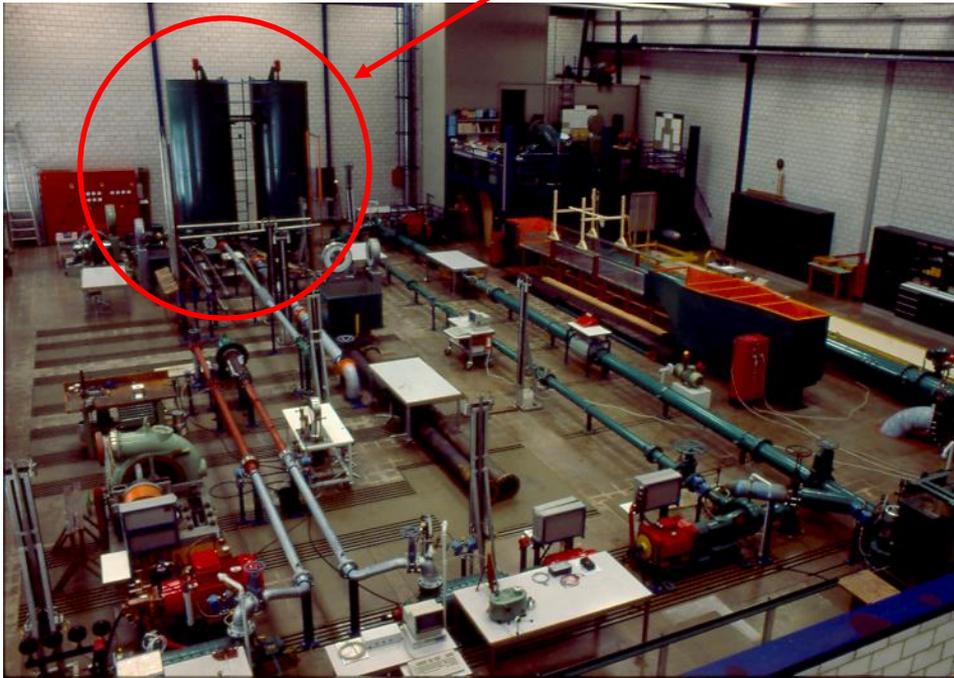


## Kernkompetenzen (2)

- Experimentelle Analysen im Labor
- Experimentelle Versuche on site (IEC Experte Prof. Dr. T. Staubli)
- Feldmessungen (Kraftwerke, ...)
- Strömungsvisualisierung
- Dynamische Modellierung von Prozessen und Systemen (1D transient) inkl. Regelung und Model Predictive Control



# Hydrolabor



1986



2019

## Laborinfrastruktur

- 600 m<sup>3</sup> Wasserbecken
- Verschiedene Pumpen zur Förderung von Wasser an den Prüfstände
- IEC Kalibrierung für Durchflussmessung
- Offene Kanäle (1 x 20 m, Beton / 1 x 5 m, Plexiglas)
- Geschlossener Pumpenprüfstand => Kavitation
- Pelton, Francis und Kaplan Prüfstand
- Rotating Stall Prüfstand
- Teststrecke für akustische Durchflussmessung
- Moderne Messtechnik (LDA, PIV, HighSpeed Kamera, Boroskop, ...)

# In-house Computational Resources

## Zwei HPC Clusters

### Cluster 1

- 900 Cores, 1800 GB RAM mit Infiniband
- 2 x 56TB File Server

### Cluster 2

- 900 Cores, 5400 GB RAM mit OmniPath
- 40 TB SSD File Server



## Automatische Optimierung

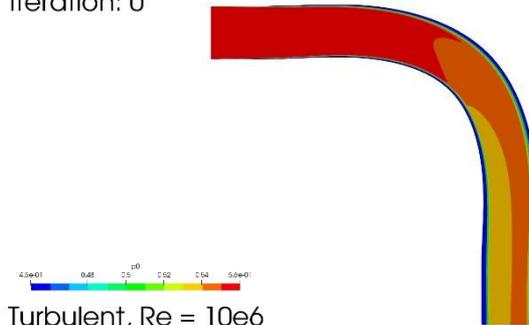
- Evolutionäre Strategien
- Gradienten basierte Methode: Adjoint

## Optimierung: Adjoint

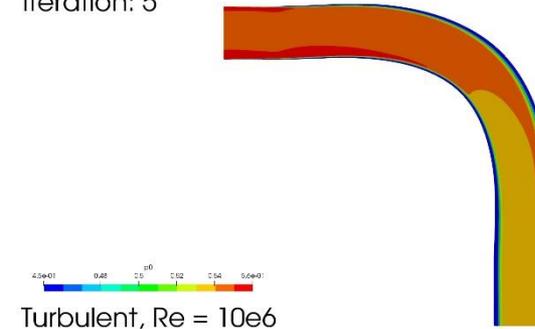
- Gradientenbasiert => Lokaler Max/Min
- Sehr schnell/effizient ( $\sim 20$  Iterationen (= 40 CFD Berechnungen) bis Konvergenz)
- Unbeschränkte Anzahl Parameter bei gleichbleibender Aufwand

# Optimierung: Adjoint

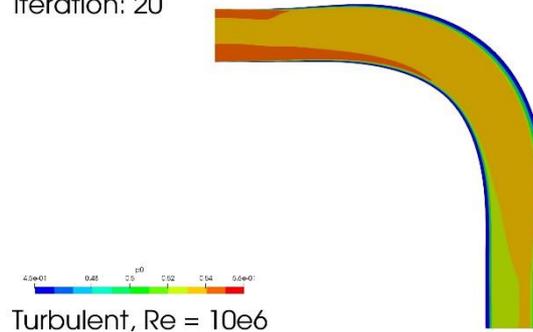
Loss Reduction = 0.0 %  
Iteration: 0



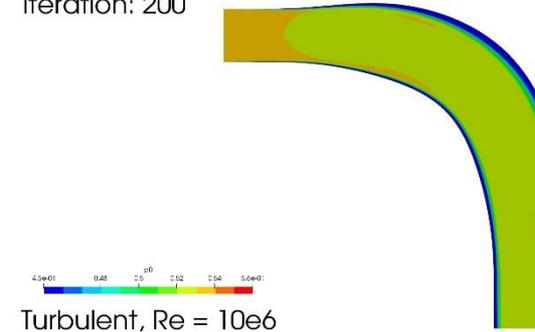
Loss Reduction = 12.1 %  
Iteration: 5



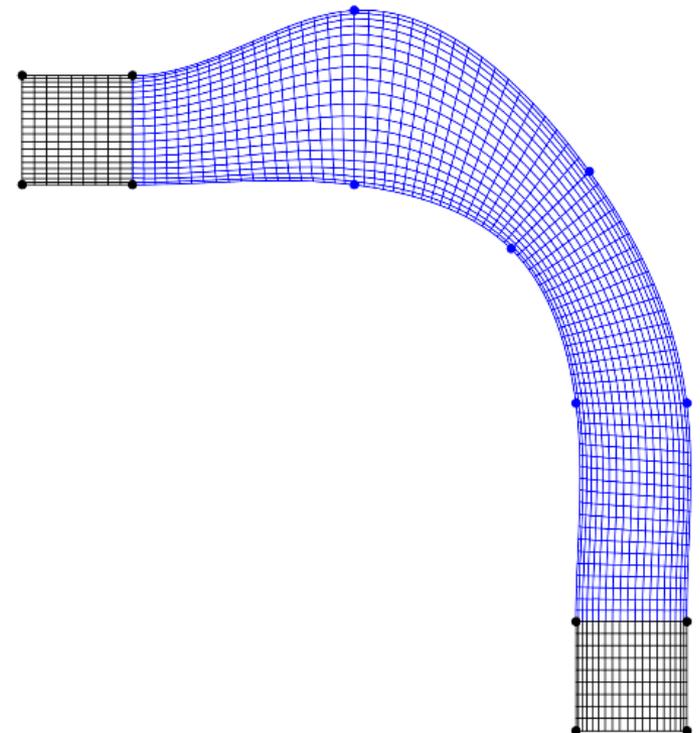
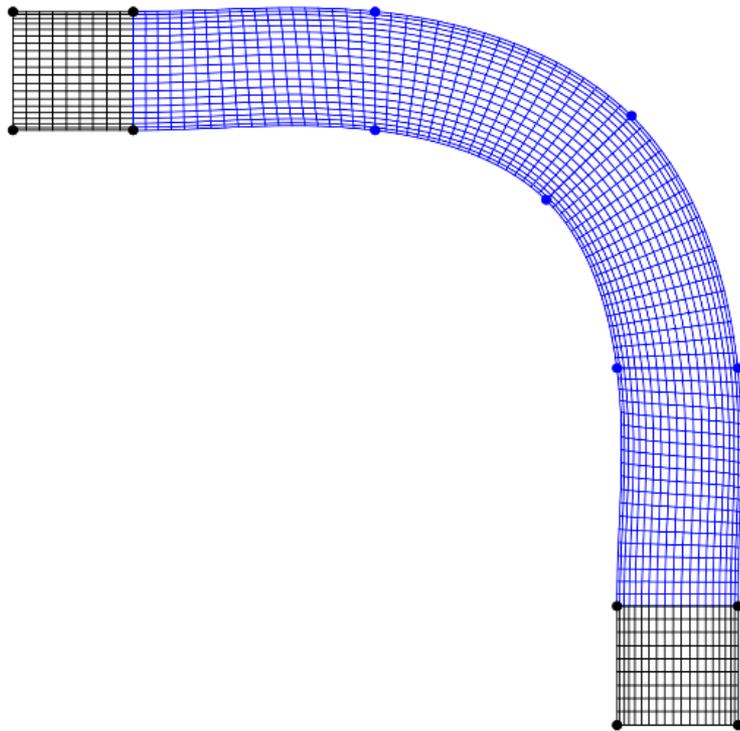
Loss Reduction = 25.9 %  
Iteration: 20



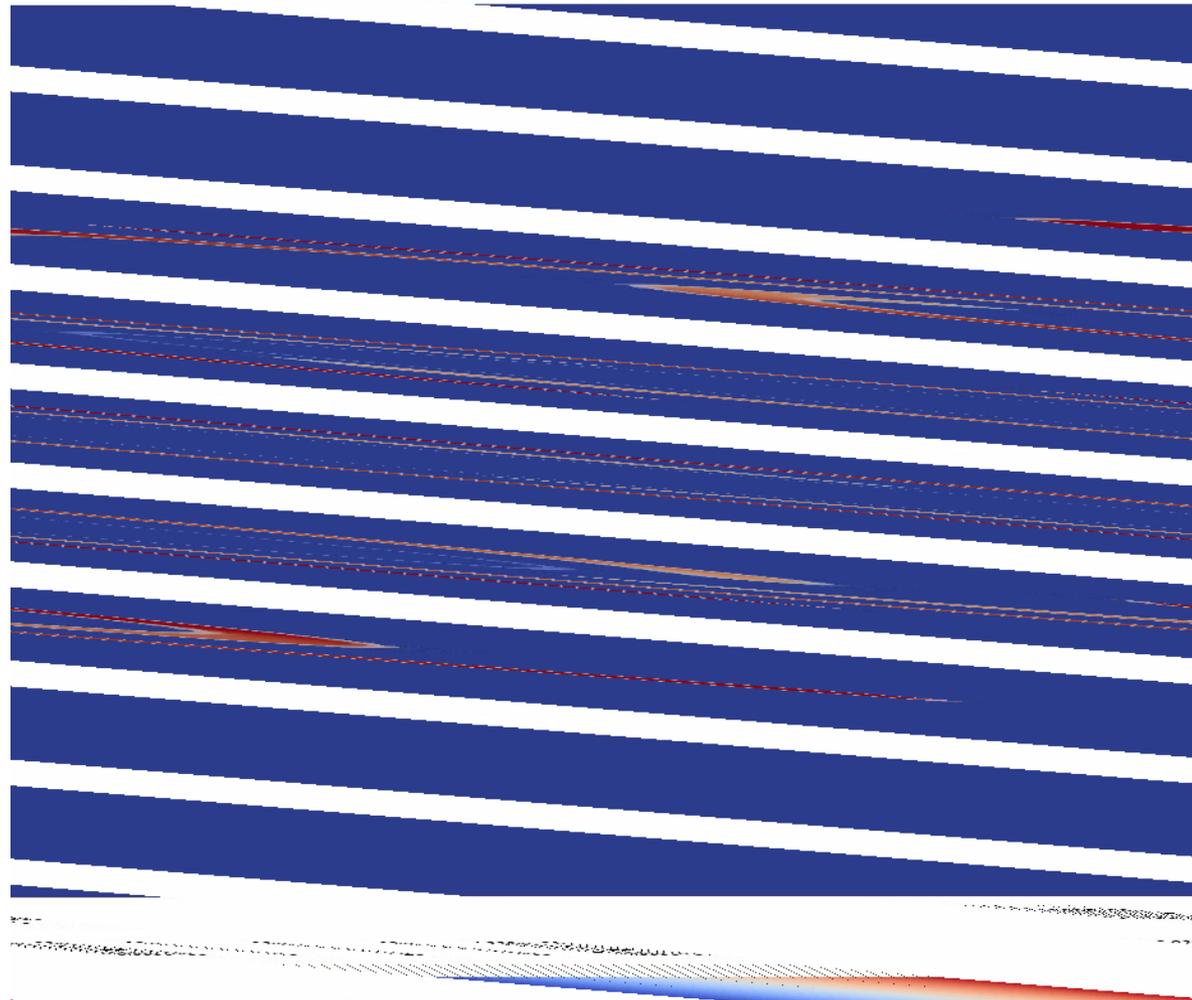
Loss Reduction = 39.7 %  
Iteration: 200



## Optimierung: Adjoint

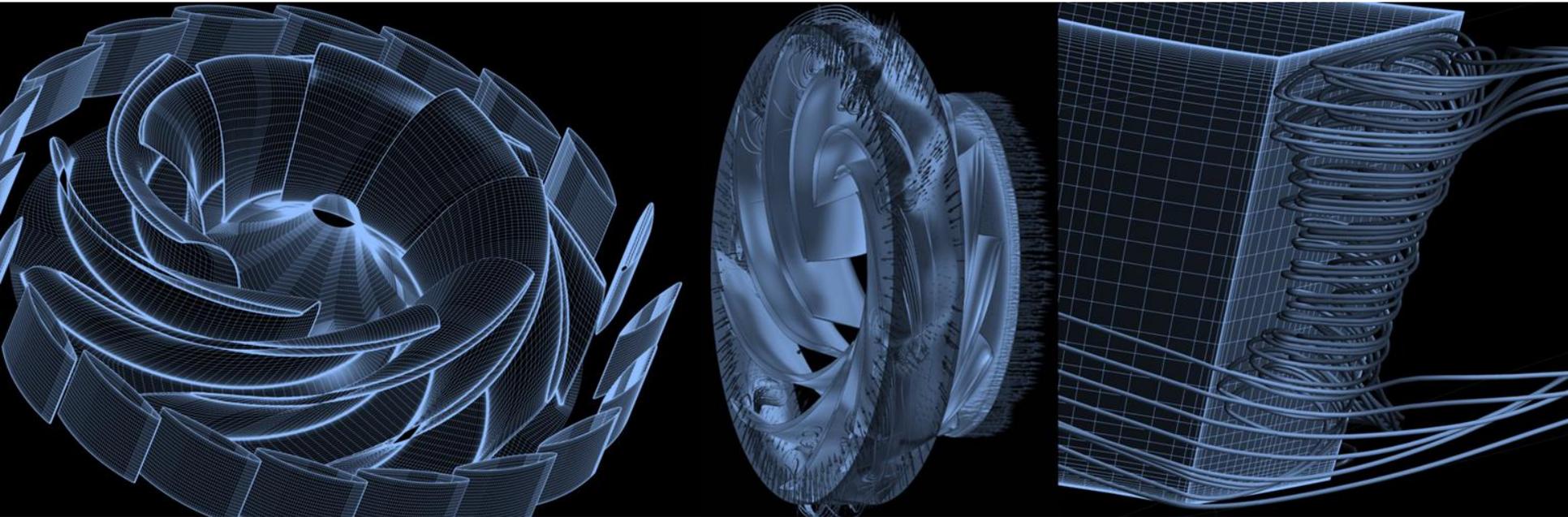


## Neue Ansätze für CFD: Lattice Boltzmann



## Möglichkeiten der Zusammenarbeit

- Forschungsprojekte
  - Öffentlich gefördert (Innosuisse, BFE, Stiftungen, ...)
  - Direkte Auftragsforschung
  
- Dienstleistungsprojekte / Consulting
  - Messungen in Labor und Feld
  - CFD-Analyse von speziellen Phänomene
  
- Studentische Arbeiten
  - Bachelor Studium (Semester + Abschlussprojekt)
  - Master Studium (2x Semester + Abschlussprojekt)



## Kontakt

**Ernesto Casartelli**

**[ernesto.casartelli@hslu.ch](mailto:ernesto.casartelli@hslu.ch)**

**+41 41 349 32 36**