Zukünftige Entwicklungen bei der Strömungscharakterisierung: Kombination von Strömungssimulationen und LDV-Messtechnik

3. Internationale EMATEM-Sommerschule, Seeon

28. August 2007

Karsten Tawackolian

Karsten.Tawackolian@ptb.de

Inhalt

- Grundlagen
- Beispiele aus Forschung und Entwicklung
- Vorgehensweise bei der CFD-Rechnung
- CFD-Ergebnisse
- Vergleich zwischen Experiment und Messung

Warum Simulationen?

- Zusätzliche Informationen helfen Designfehler so früh wie möglich zu erkennen
- Unterstützung bei der Versuchsplanung
- Reduzierung der Anzahl der Experimente
- Parametervariation (wenn diese im Experiment zu aufwendig ist)
- Kostenreduktion und Wettbewerbsvorteil durch verkürzte Entwicklungszeit

Kombination von Experiment und Simulation

- Die Simulation braucht das Experiment für Modell- und Eingangsparameter
- Durch die Bestätigung von Experiment und Simulation erhöht sich die Aussagesicherheit für beide Methoden
- Die Simulation hilft bei der Deutung von Experimenten

Boeing: 30 Jahre CFD

Thirty years of development and application of CFD at Boeing commercial airplanes, Seattle, AIAA 2003-3439, 16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference

LDV ist der ideale Partner für CFD

- Hohe Genauigkeit
- Rückwirkungsfreie Strömungsmessung
- Es wird direkt die Geschwindigkeit gemessen (ohne Rückzurechnen)
- Turbulenzgrößen der Geschwindigkeit können gemessen werden. Diese sind wichtig für die Modellierung.

Was würden wir uns noch wünschen?

- Räumliche Druckverteilung
- Räumlich Temperaturverteilung
- Messung in Wandnähe (bis in die Viskose-Unterschicht)

Klassifizierung von Strömungen

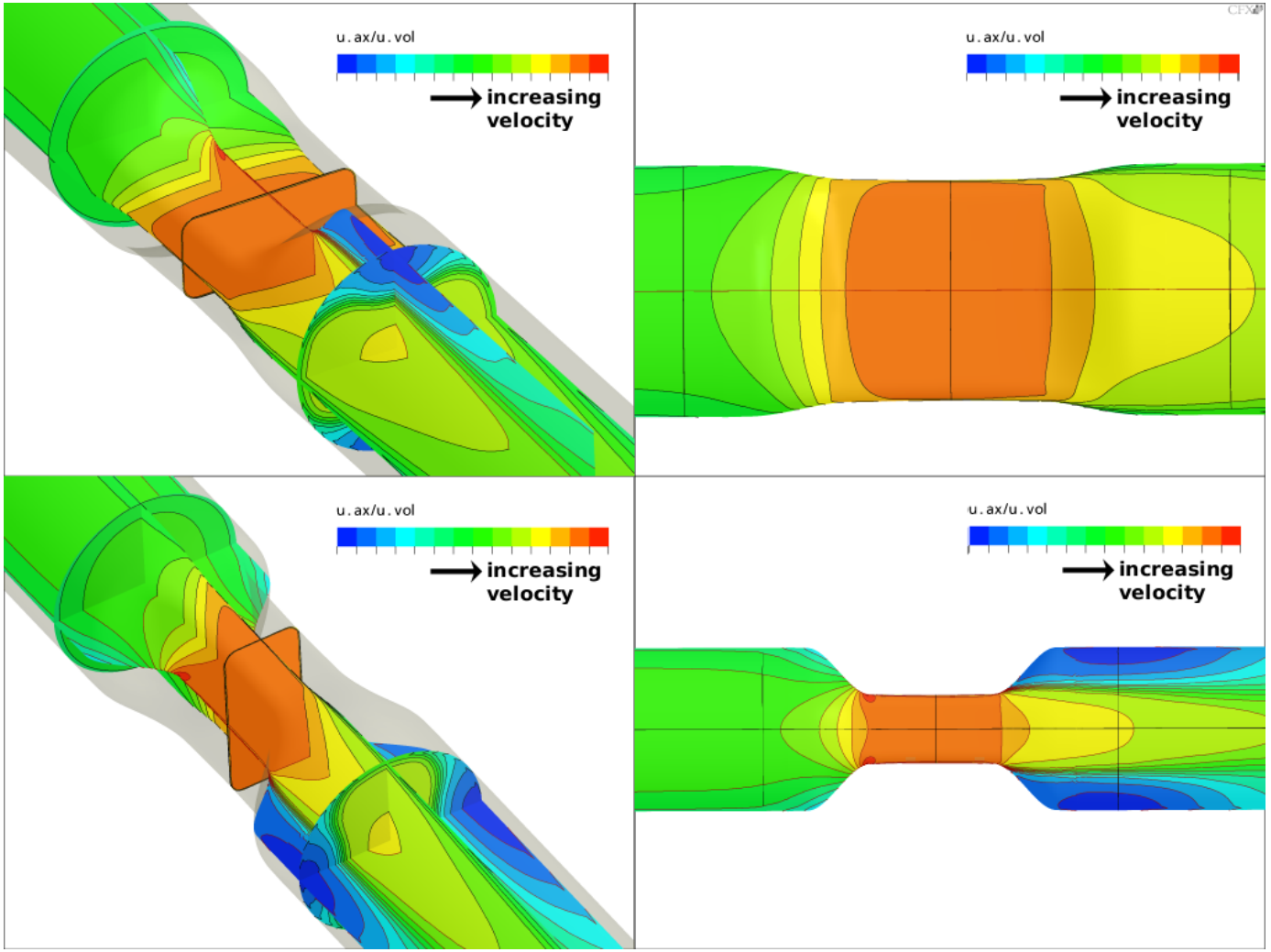
Der Aufwand sowie das zu verwendende numerische Verfahrens hängt von den Annahmen ab, die getroffen werden können

- Stationär / Instationär
- Reibungsfrei / Reibungsbehaftet
- Zweidimensional / Dreidimensional
- Laminar / Turbulent
- Inkompressibel / Kompressibel
- Einphasig / Mehrphasig
- Isotherm / Nicht-isotherm
- Newtonsch / Nicht-Newtonsch

Beispiele

Flow conditioners efficiency a comparison based on numerical approach, A. Frattolino, N. Massarotti, Flow Measurement and Instrumentation,13, S. 1-11 (2002)

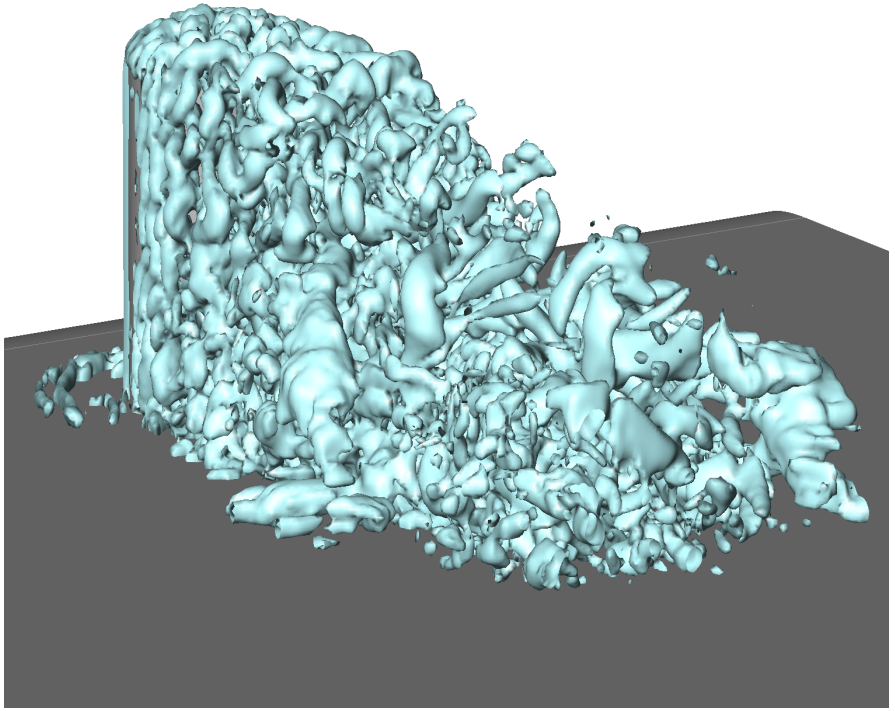
Reduzierung Rechteckrohr

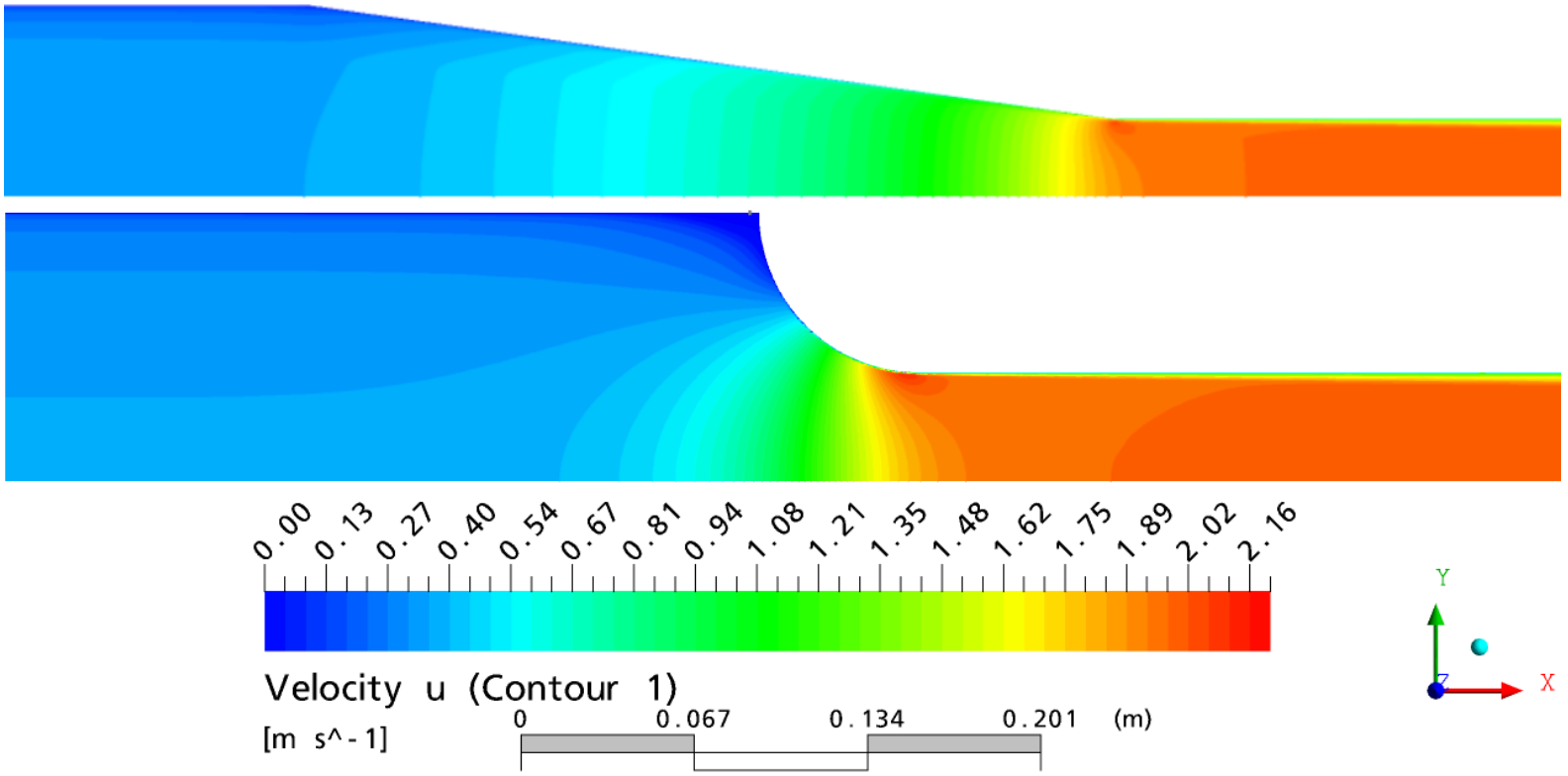


Vortex-Shedding Flow Metering Using Ultrasound, V. Hans , E. von Lavante, Fluid Mechanics of Flow Metering, S. 95-110 (2005)

Beispiele

Analysis of the unsteady flow around a wall-mounted finite cylinder at Re=200 000 ,O. Frederich, M. Luchtenburg, E. Wassen, F. Thiele In: J.M.L.M. Palma and A. Silva Lopes (eds.) Advances in Turbulence XI, Proceedings of the 11th EUROMECH European Turbulence Conference, Porto, Portugal, June 25-28, 2007, Springer Proceedings in Physics 117, Springer, Heidelberg ISBN 978-3-540-72603-6, 2007.





Axialgeschwindigkeit $u\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$, $\dot{V} = 38.45 \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$

Durch die Düse kommt es zu einer Vergleichmäßigung des Profiles hin zu einem Blockprofil.

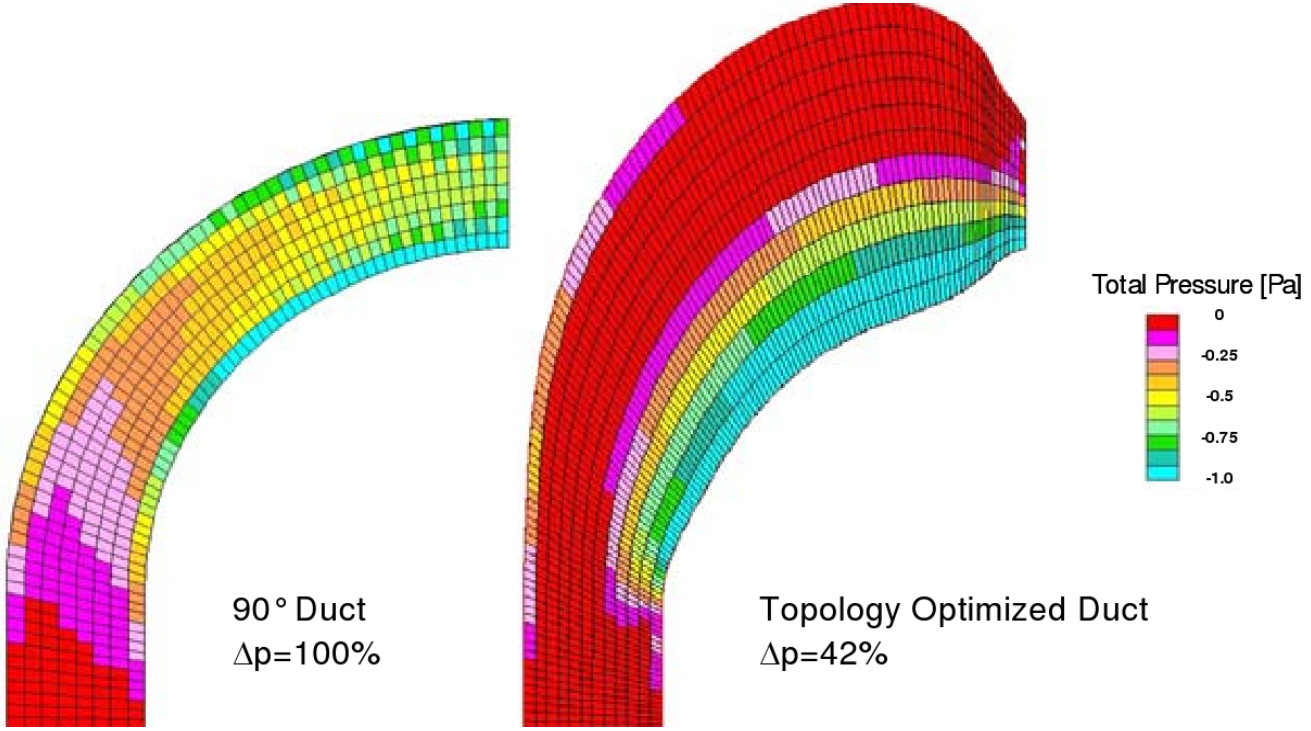
Dahinter muss sich die Strömung neu ausbilden.

ESDU international pl. in: Ansys Solutions, Volume 7, Issue 5, 2006, www.ansys.com

Beispiele

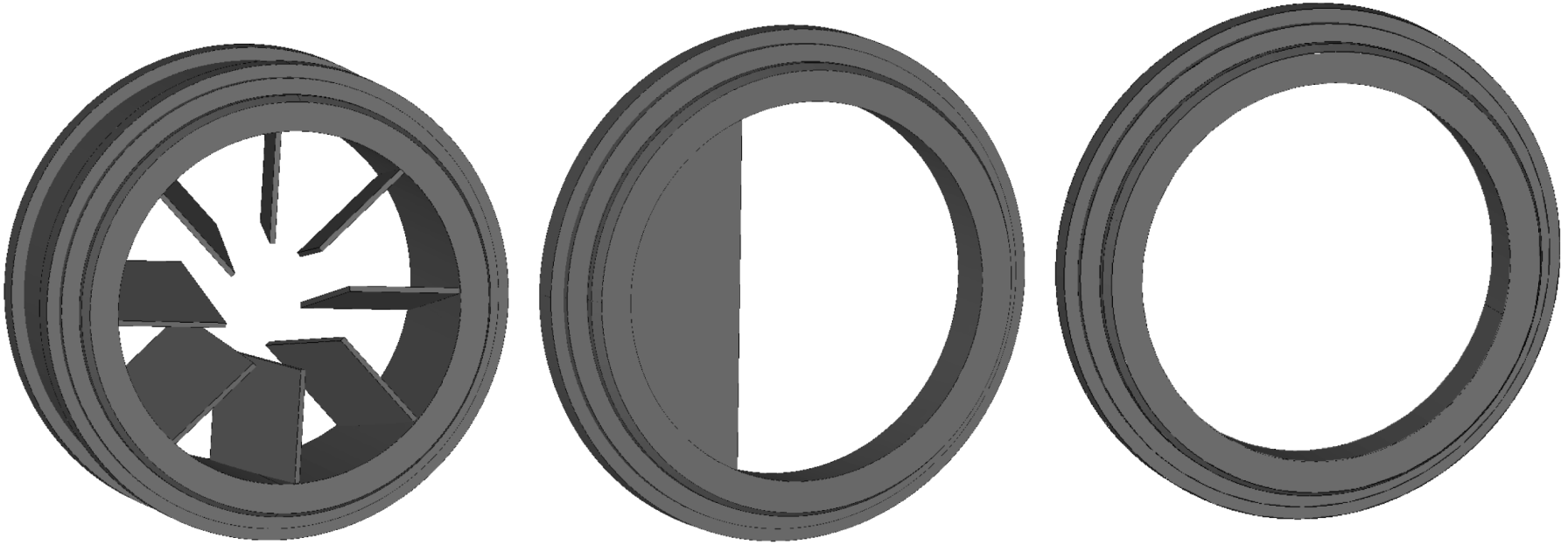
Maschinelles Evolutionsexperiment 10 roboterbetätigte Seilzüge mutieren einen Rohrkrümmer, Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg, Folien zu den Vorlesungen Evolutionsstrategie I http://www.bionik.tu-berlin.de/institut/skript/s2skript.htm

AutoDuct: Topology Optimization for Fluid Flow, Franz R. Klimetzek, Julie Paterson, Oliver Moos, DaimlerChrysler AG, Stuttgart



Weitere Information unter http://www.fe-design.de

Störkörper



Genormte Störungen nach DIN EN 1434

Struktur der Arbeit

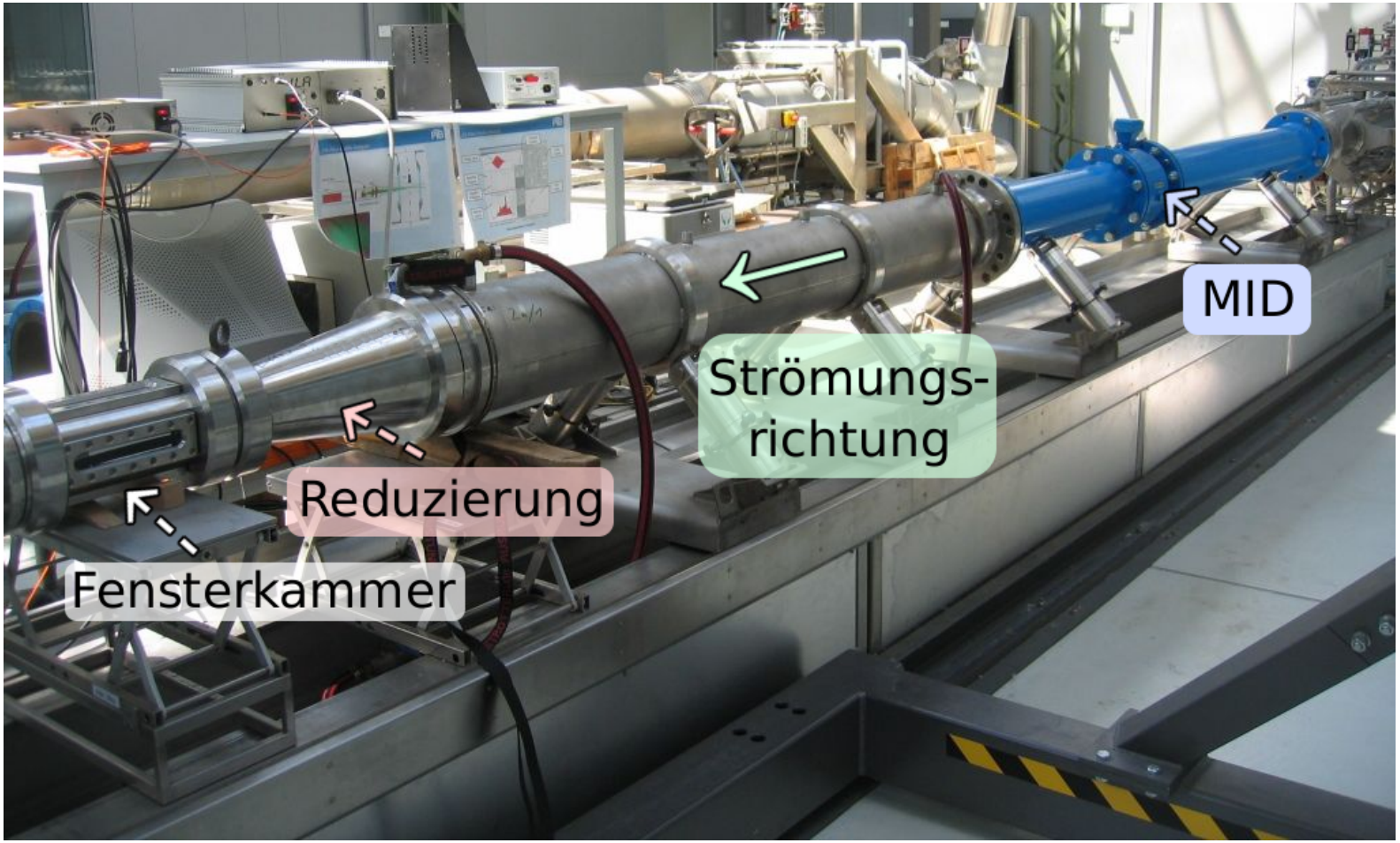
Voruntersuchung

- Ungestörte Profile (axialsymmetrisch)
- 1D-Messung $\longrightarrow$ 2D-CFD-Rechnung
- Validierung des Verfahrens
- Untersuchung unterschiedlicher Gitter und Modellierungsansätze

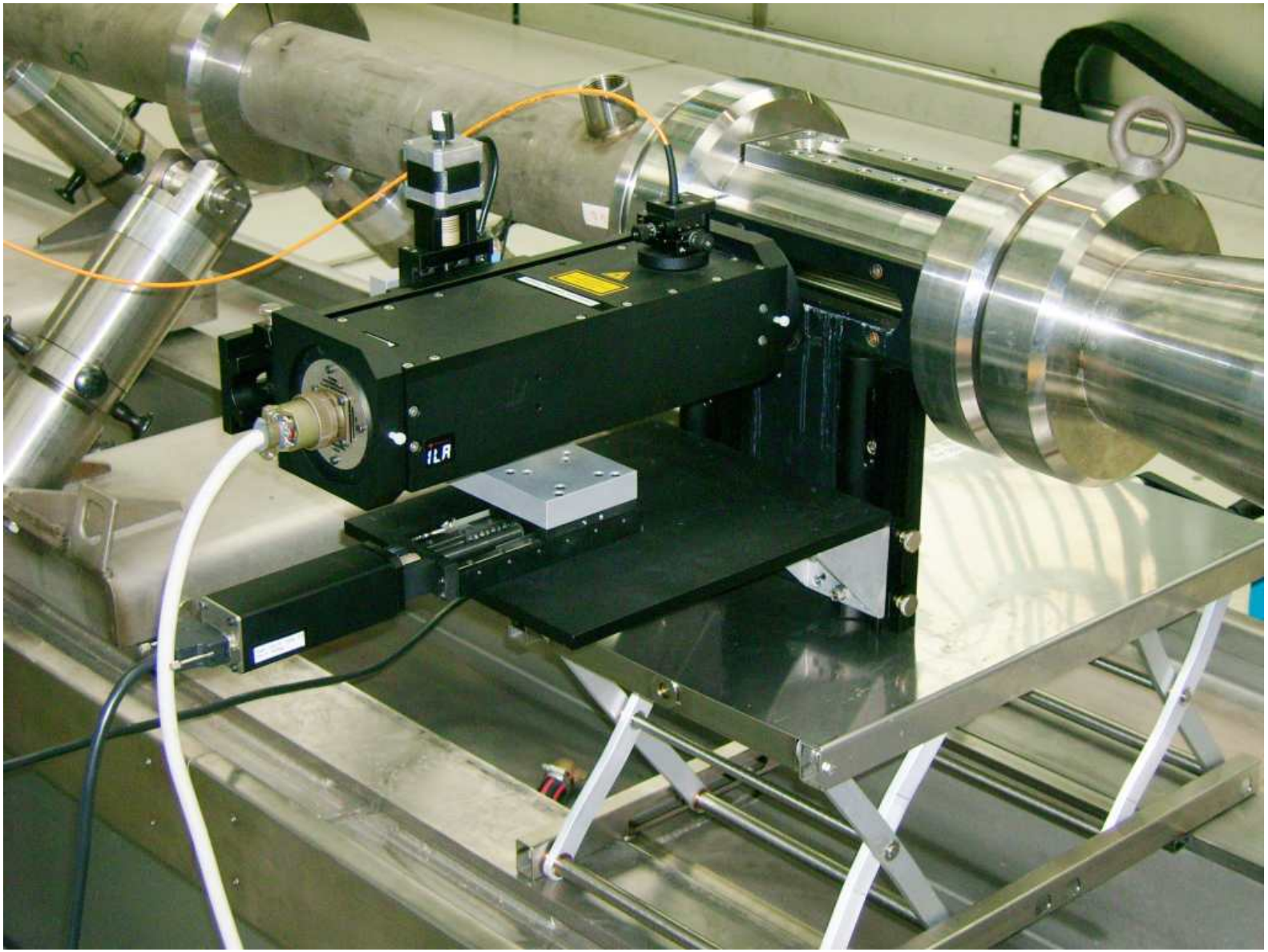
Hauptuntersuchung

- Gestörte Konfigurationen (nicht axialsymmetrisch)
- 2D-Messung $\longrightarrow$ 3D-CFD-Rechnung
- Neues Messverfahren

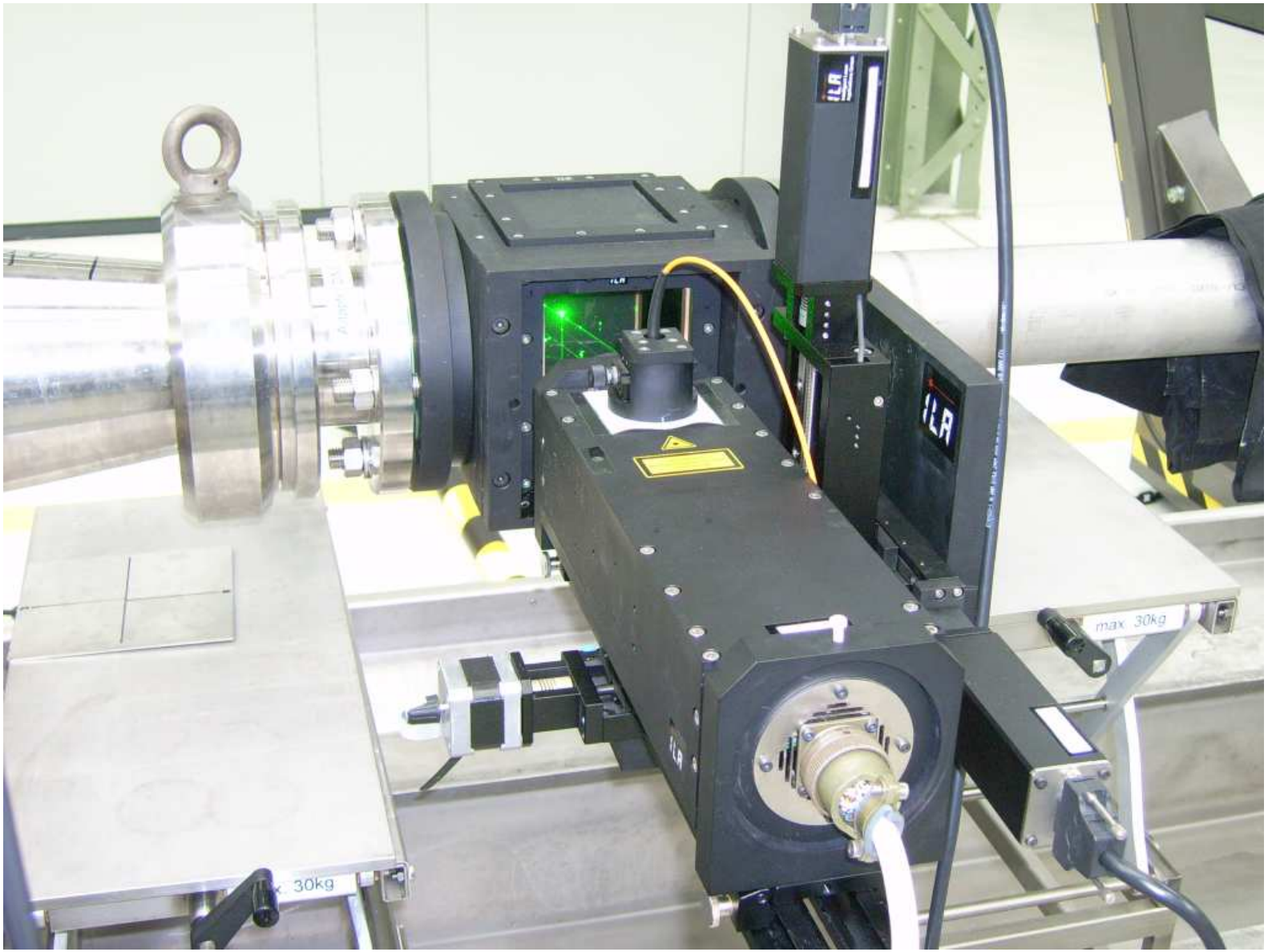
Messaufbau



Messaufbau 1D1K



Messaufbau 2D1K



CFD-Paket

- CFD-Software: Ansys CFX
- Gittererstellung: ICEM CFD
- Verwendung von RANS - Turbulenzmodellen
  - Reynolds Stress, basierend auf dem Menter BSL Modell
  - k-ε, k-ω, Menter SST
- $\Longrightarrow$ Keine Auflösung von Instationäritäten, Statistische Mittelung.
- Nur statistische Mittel sind für die Auswertung interessant. Aber: Instationäre Strukturen werden nicht aufgelöst sondern modelliert $\longrightarrow$ Modellierungsfehler.
- Stand der Technik: LES verfügbar für Reynoldszahlen < 1 Mio. Aber: Rechenzeiten von mehreren Monaten für einen Fall auf einem PC Cluster. Deswegen ungeeignet für eine Diplomarbeit.

Differential Reynolds Stress Model (DRSM) versus Eddy Viscosity Model (EVM)

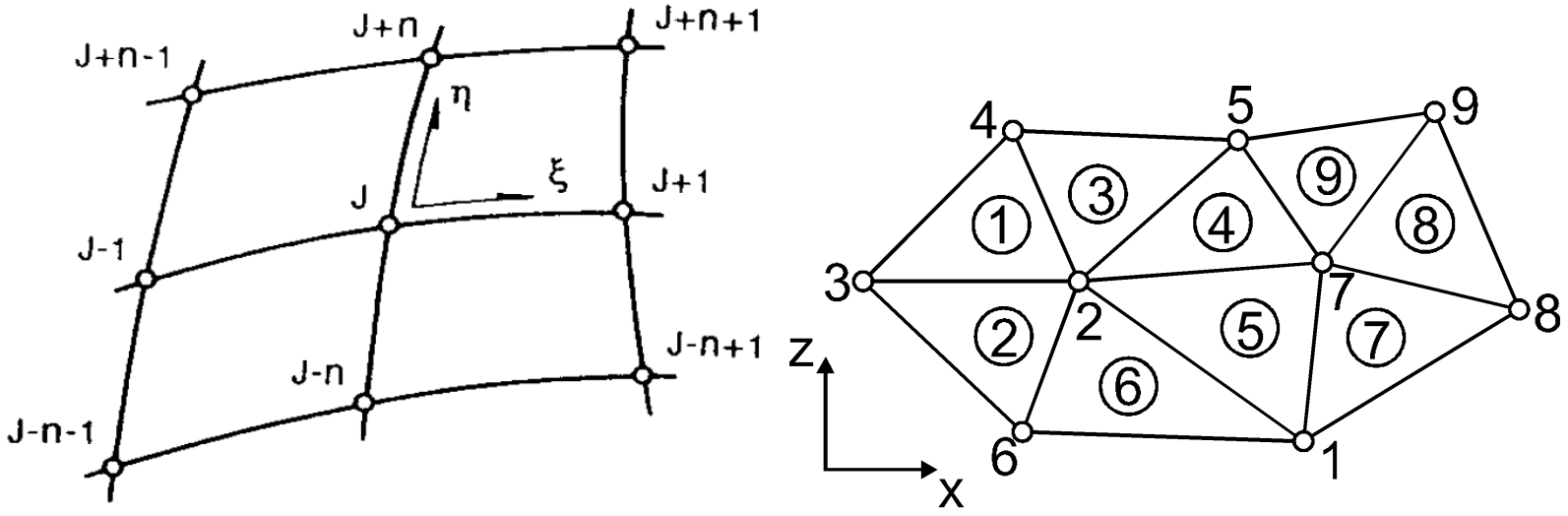
Vorteile der DRSM gegenüber EVM

- Exakte Darstellung der dominanten Produktionsterme
- Erfassung von Umverteilungsmechanismen
- Spannungsanisotropie, Anisotropiegetriebene Sekundärströmungen, Systemrotation, Stromlinienkrümmung

Nachteile der DRSM gegenüber EVM

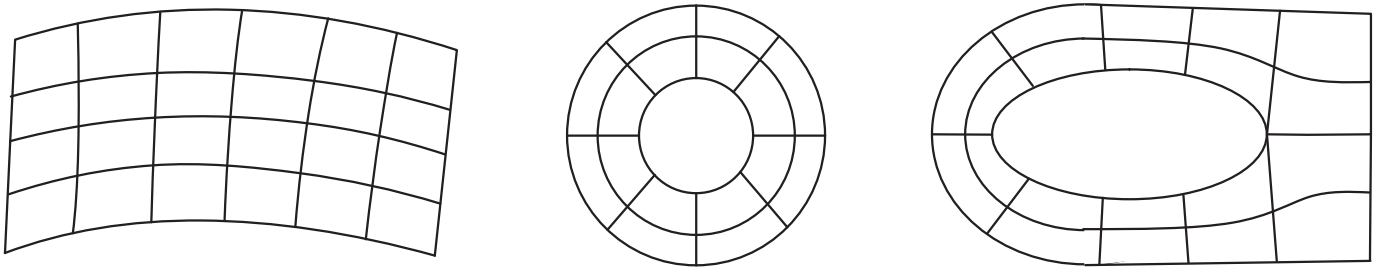
- Hoher Rechenbedarf + Speicherbedarf (EVM: 2-Gleichungen, DRSM: 7-Gleichungen)
- Anpassung des Lösungsverfahrens

Strukturierte/Unstrukturierte Gitter

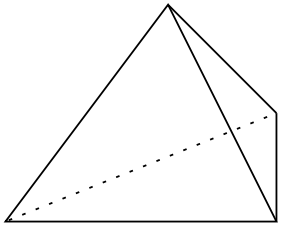


- In CFX5 werden nur unstrukturierte 3D-Gitter unterstützt.
- Jedes strukturierte Gitter lässt sich in ein unstrukturiertes Gitter konvertieren

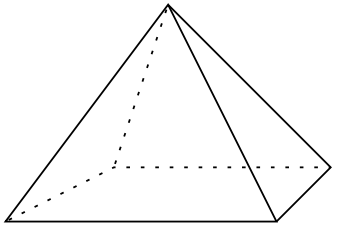
Strukturierte H-Gitter, O-Gitter, C-Gitter



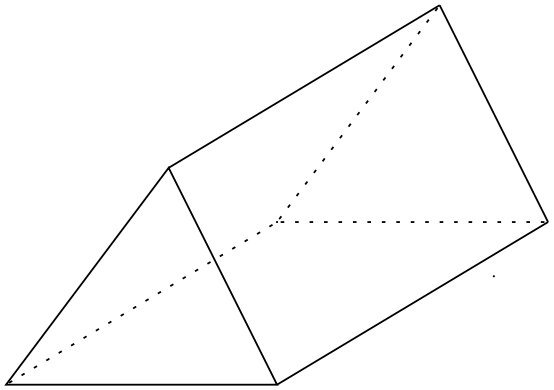
Elementtypen



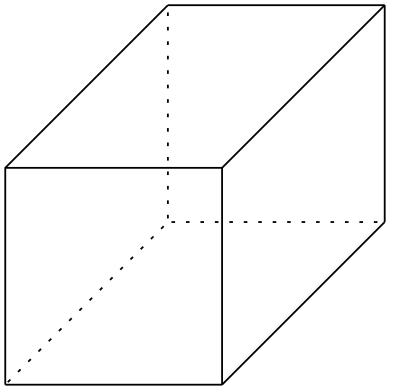
Tetraeder



Pyramide



Dreieckiges Prisma



Hexaeder

Abschätzung der Einlauflängen

Vorrechnungen

$$\dot{V} = 38.45\ \mathrm{m}^3/\mathrm{h}$$

$$T = 50\ ^\circ\mathrm{C}$$

$$\rho = 988.03\ \mathrm{kg}/\mathrm{m}^3$$

$$\nu = 5.54 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}$$

Vor der Düse:

$$Re = \frac{4}{\pi}\,\frac{\dot{V}}{D\,\nu} = 118.013$$

$$l_e = 4.4\ Re^{1/6}\ D = \underline{6,4\ \mathrm{m}}$$

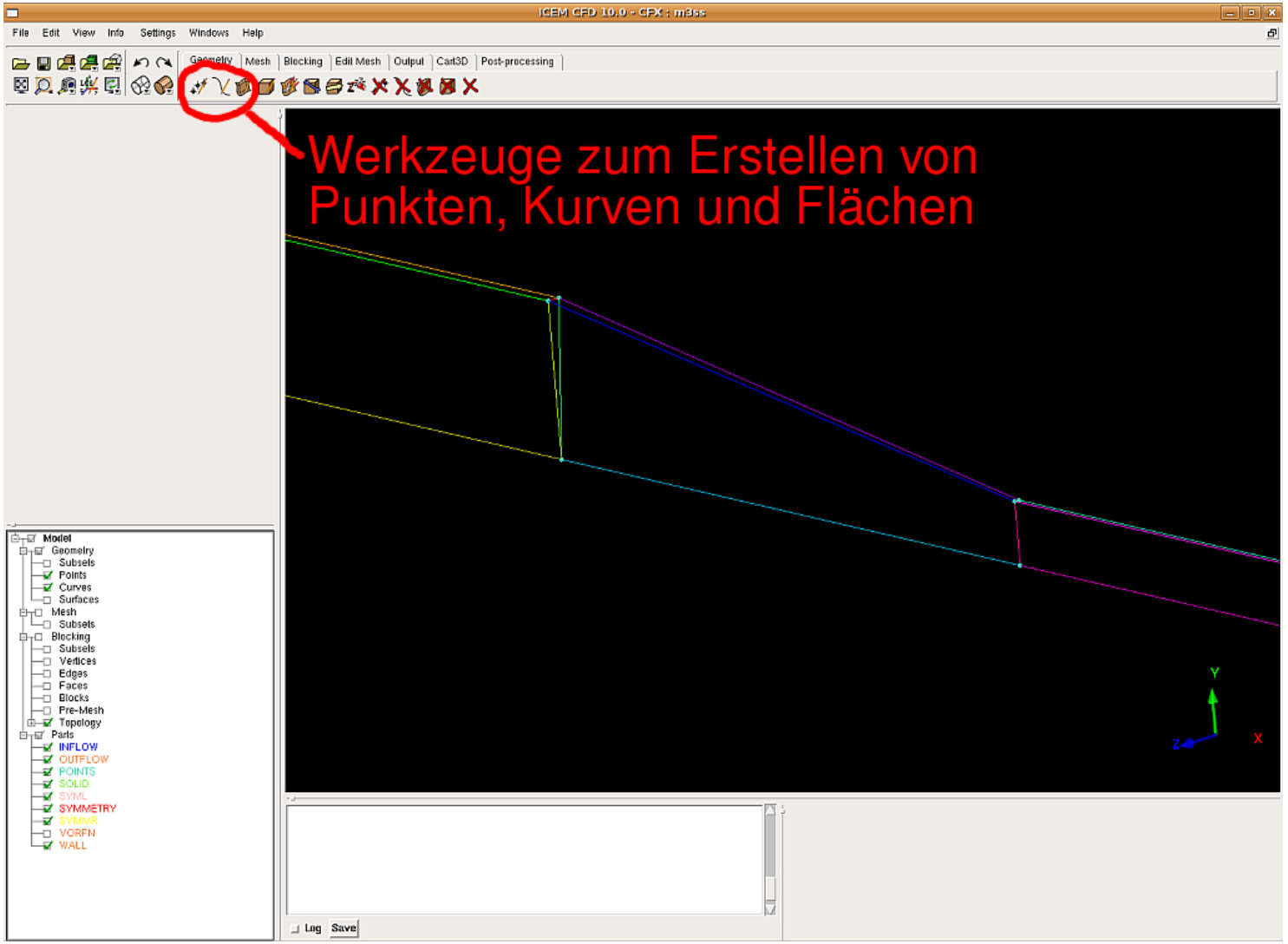
Hinter der Düse:

$$Re = \frac{4}{\pi}\,\frac{\dot{V}}{D\,\nu} = 292.223$$

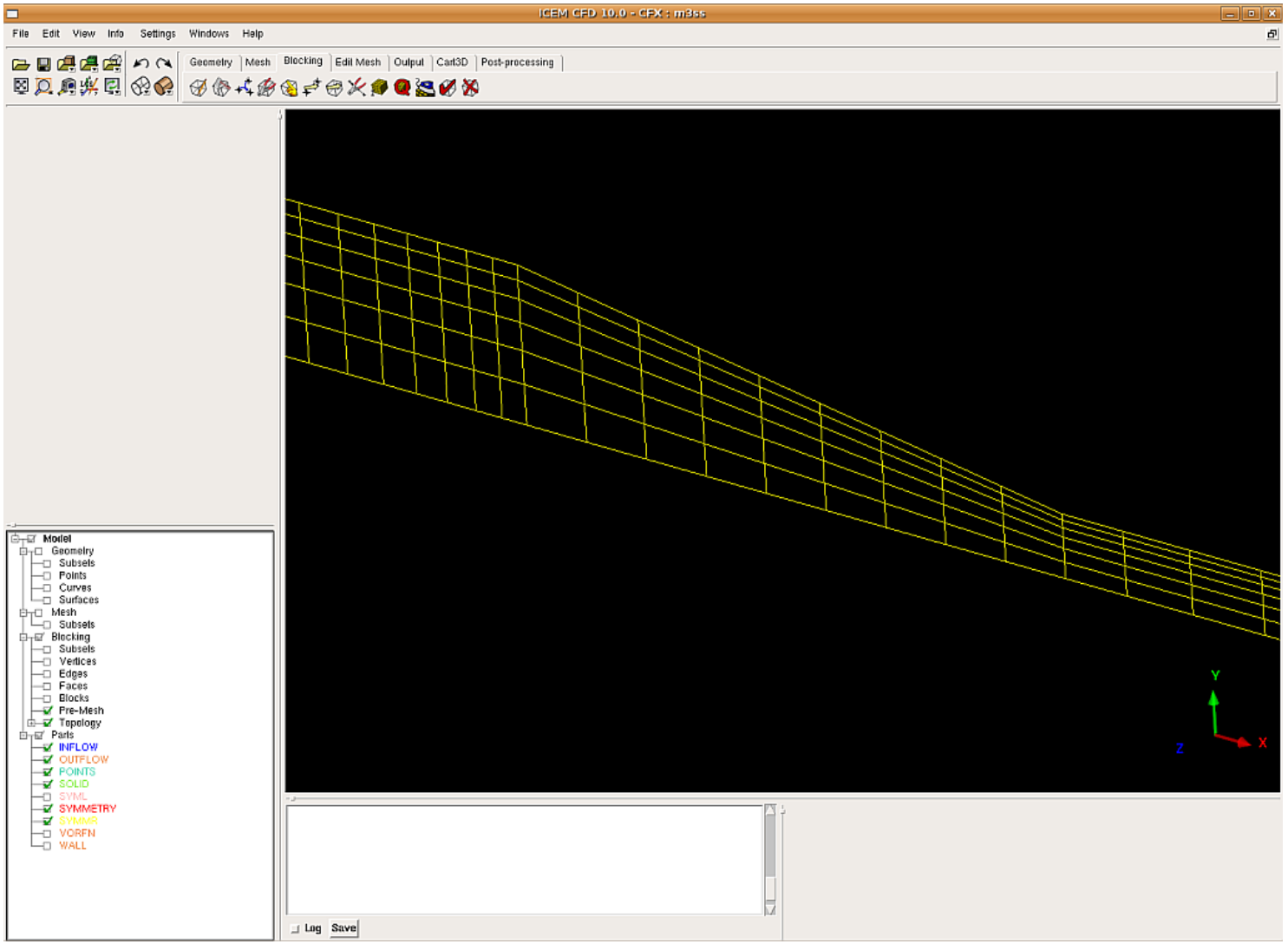
$$l_e = 4.4\ Re^{1/6}\ D = \underline{3,0\ \mathrm{m}}$$

Abschätzung der Einlauflänge nach Spurk, Strömungslehre

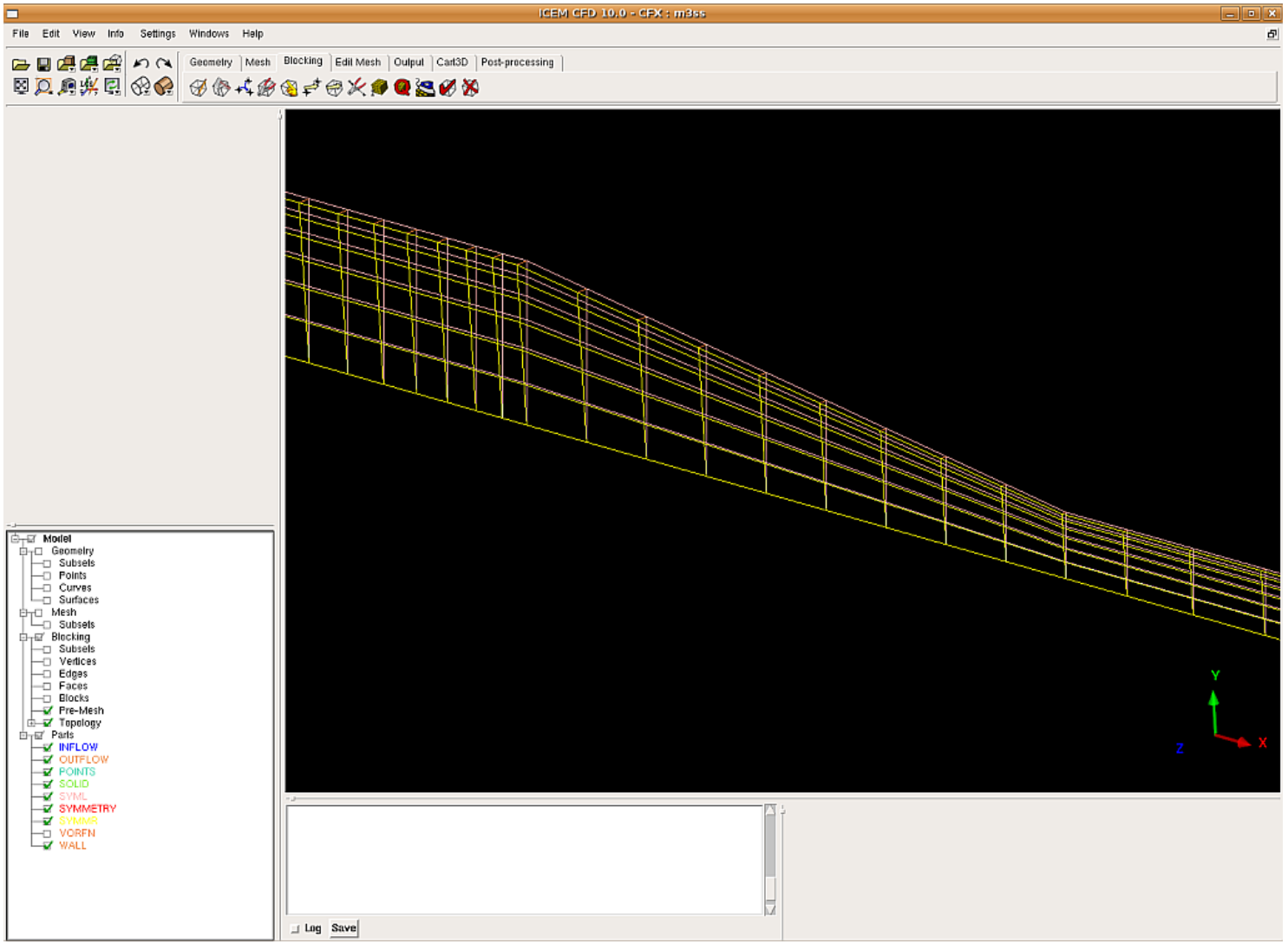
Geometrieerstellung



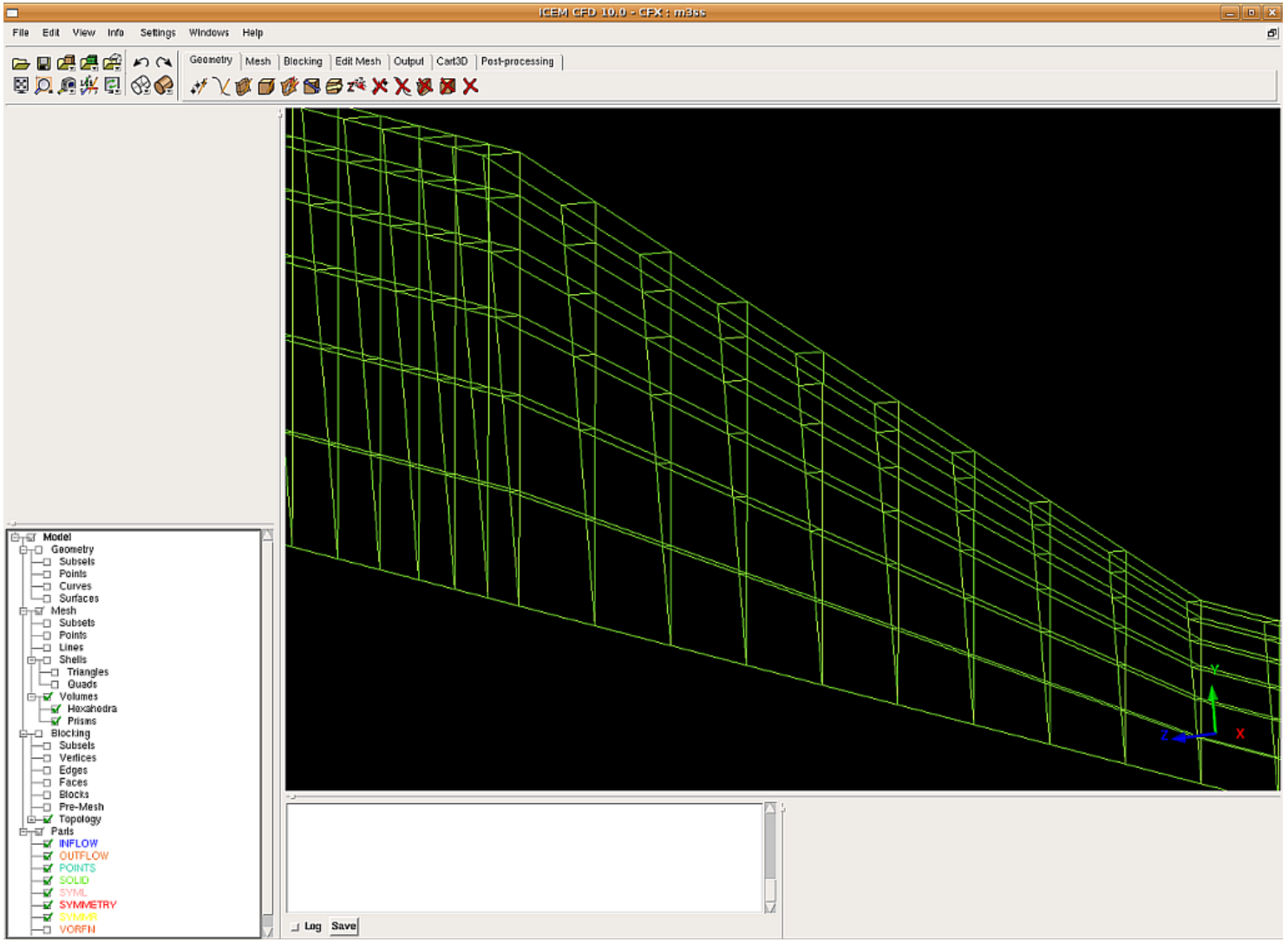
2D-Gitter


ICEM CFD 10.0 - CFX : m3ss
File Edit View Info Settings Windows Help
Geometry Mesh Blocking Edit Mesh Output Cart3D Post-processing
Model
Geometry
Subsets
Points
Curves
Surfaces
Mesh
Subsets
Blocking
Subsets
Vertices
Edges
Faces
Blocks
Pre-Mesh
Topology
Parts
INFLOW
OUTFLOW
POINTS
SOLID
SYML
SYMMETRY
SYMMR
VORFN
WALL
Y
Z
X
Log
Save

3D-Gitter durch Rotation

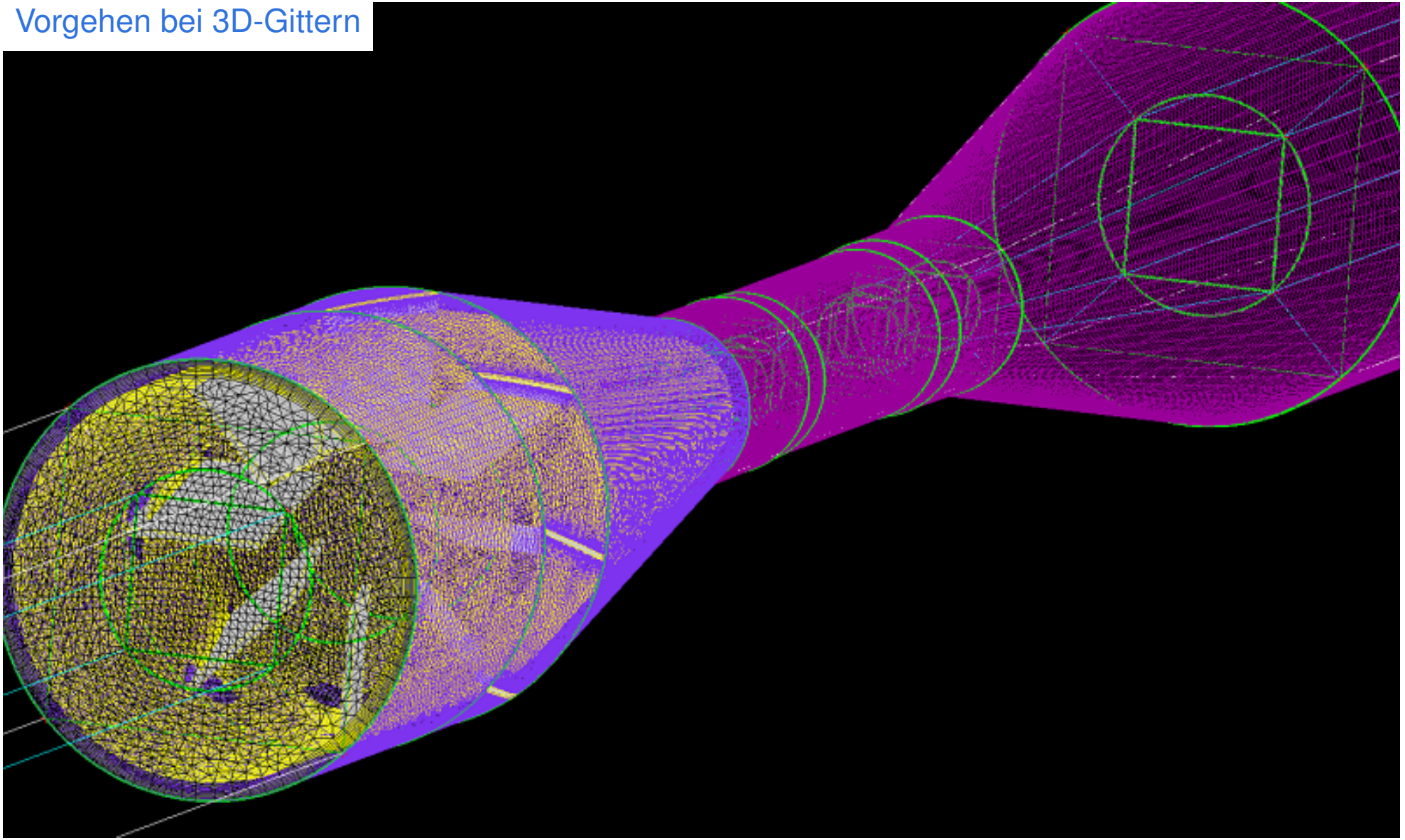


Elementtypen

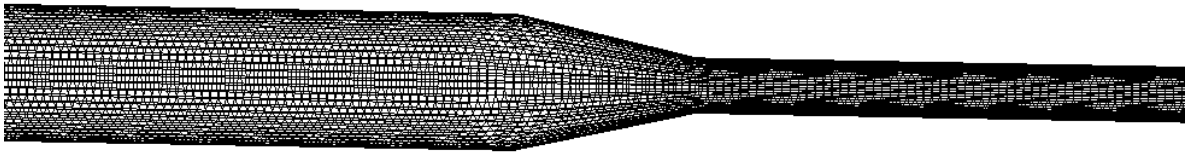


Gittererstellung in ICEM

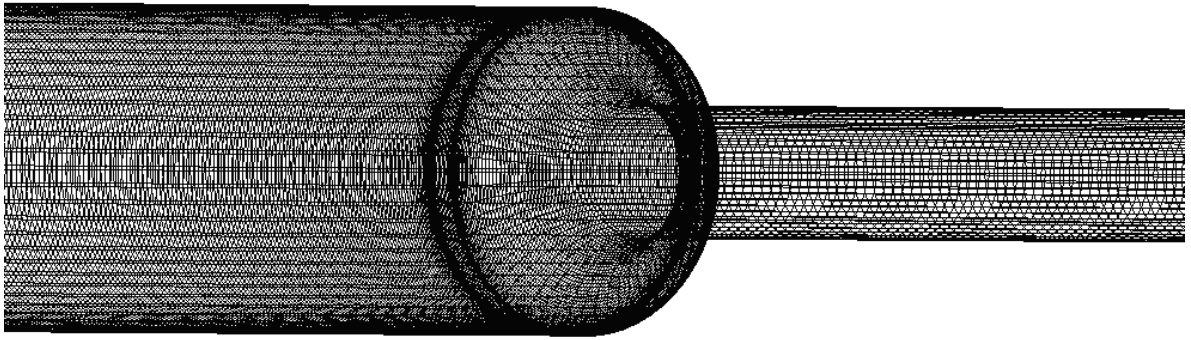
Vorgehen bei 3D-Gittern



Vorrechnungen - 3D Gitter

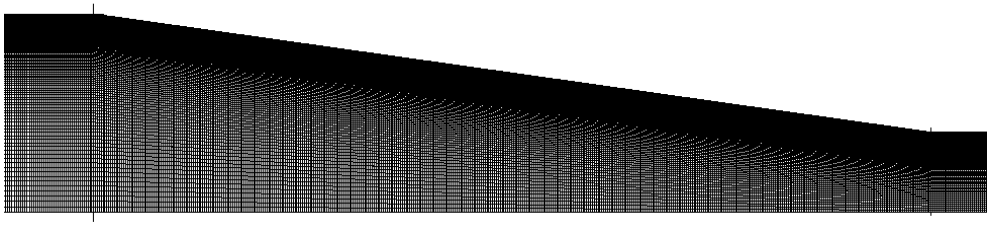


Übergangsdüse, 1 Mio. Zellen

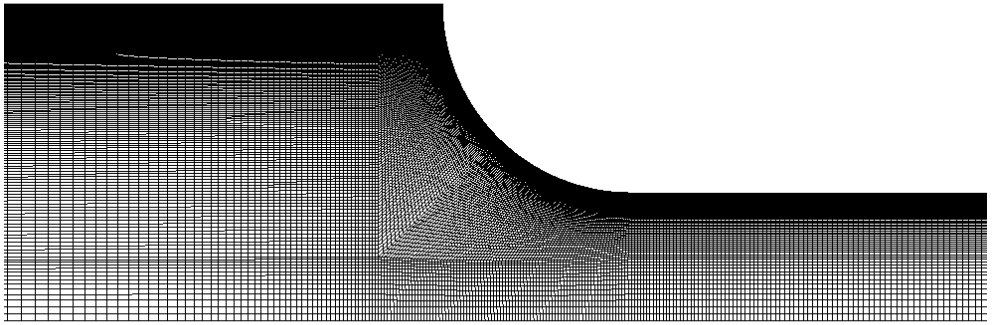


Viertelkreisdüse, 2,5 Mio. Zellen

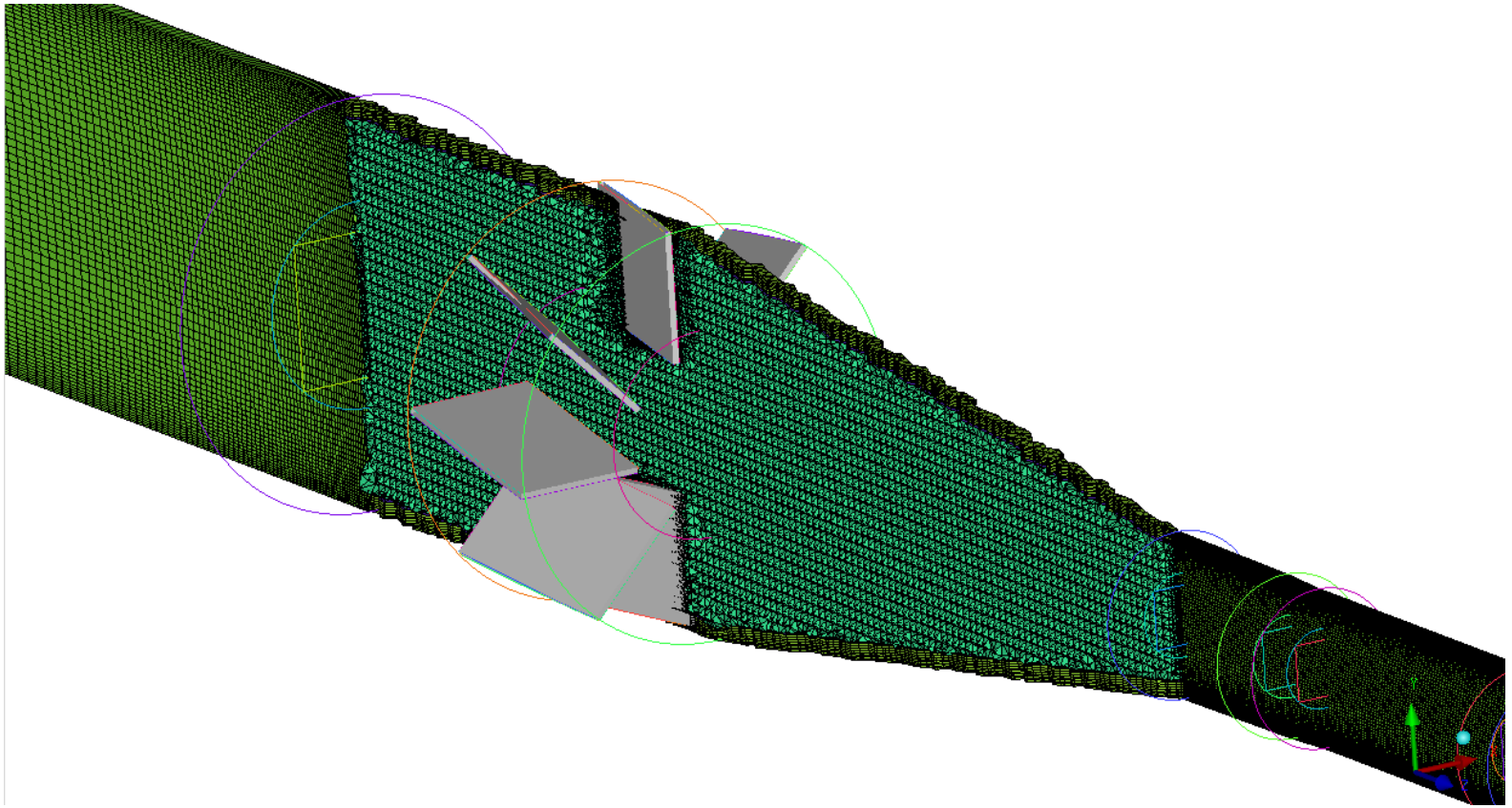
Vorrechnungen - 2D Gitter



Übergangsdüse, 500.000 Zellen

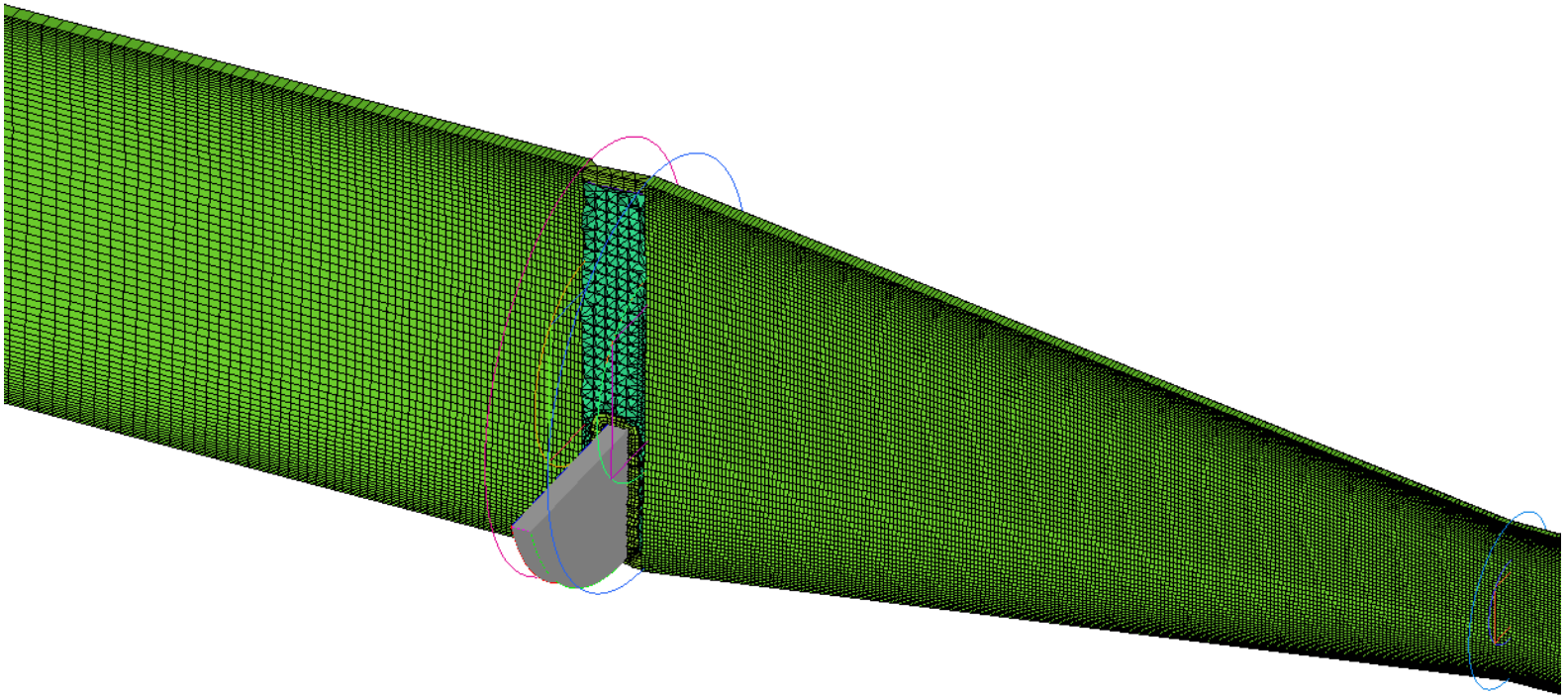


Viertelkreisdüse, 320.000 Zellen



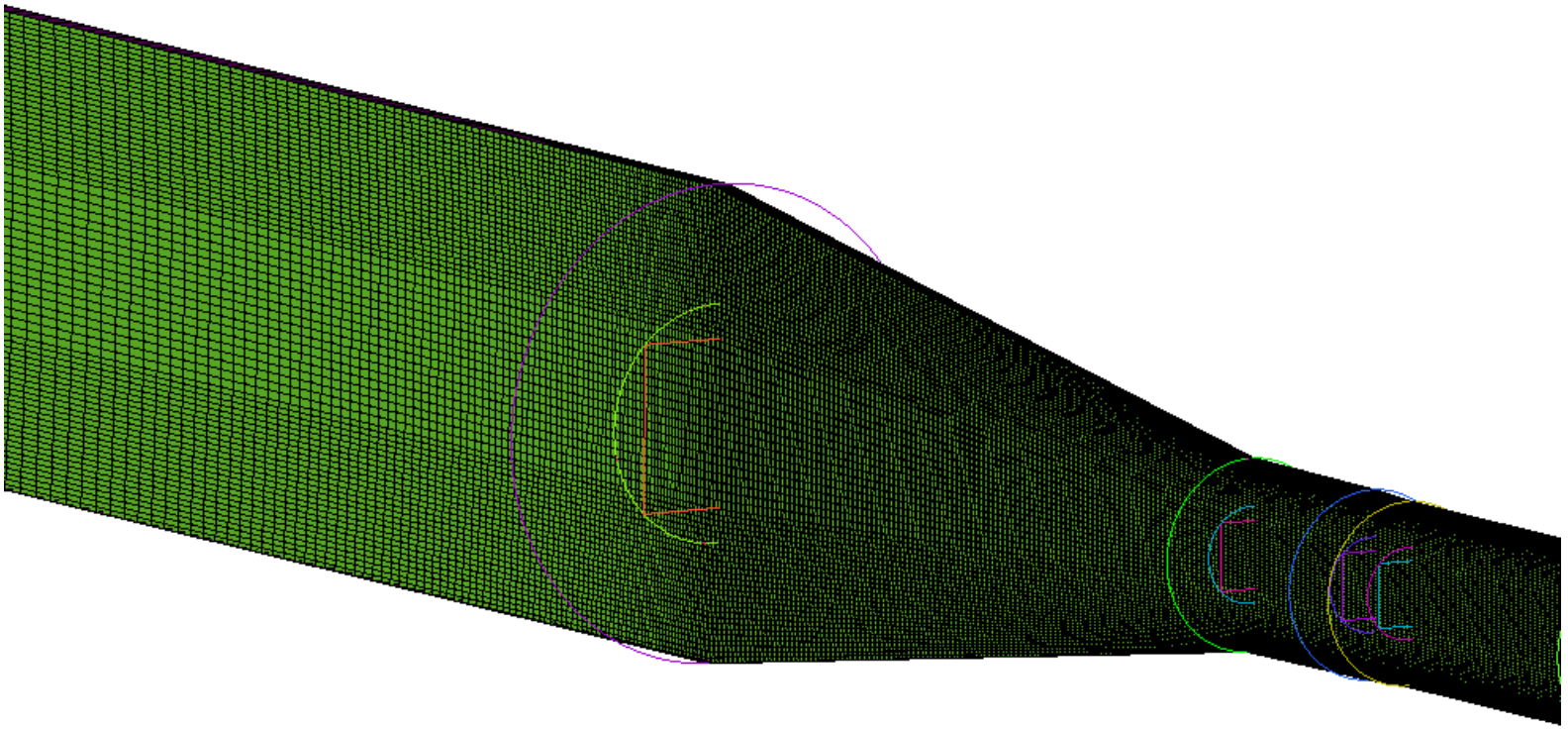
8 Mio. Zellen

Drittelstörer



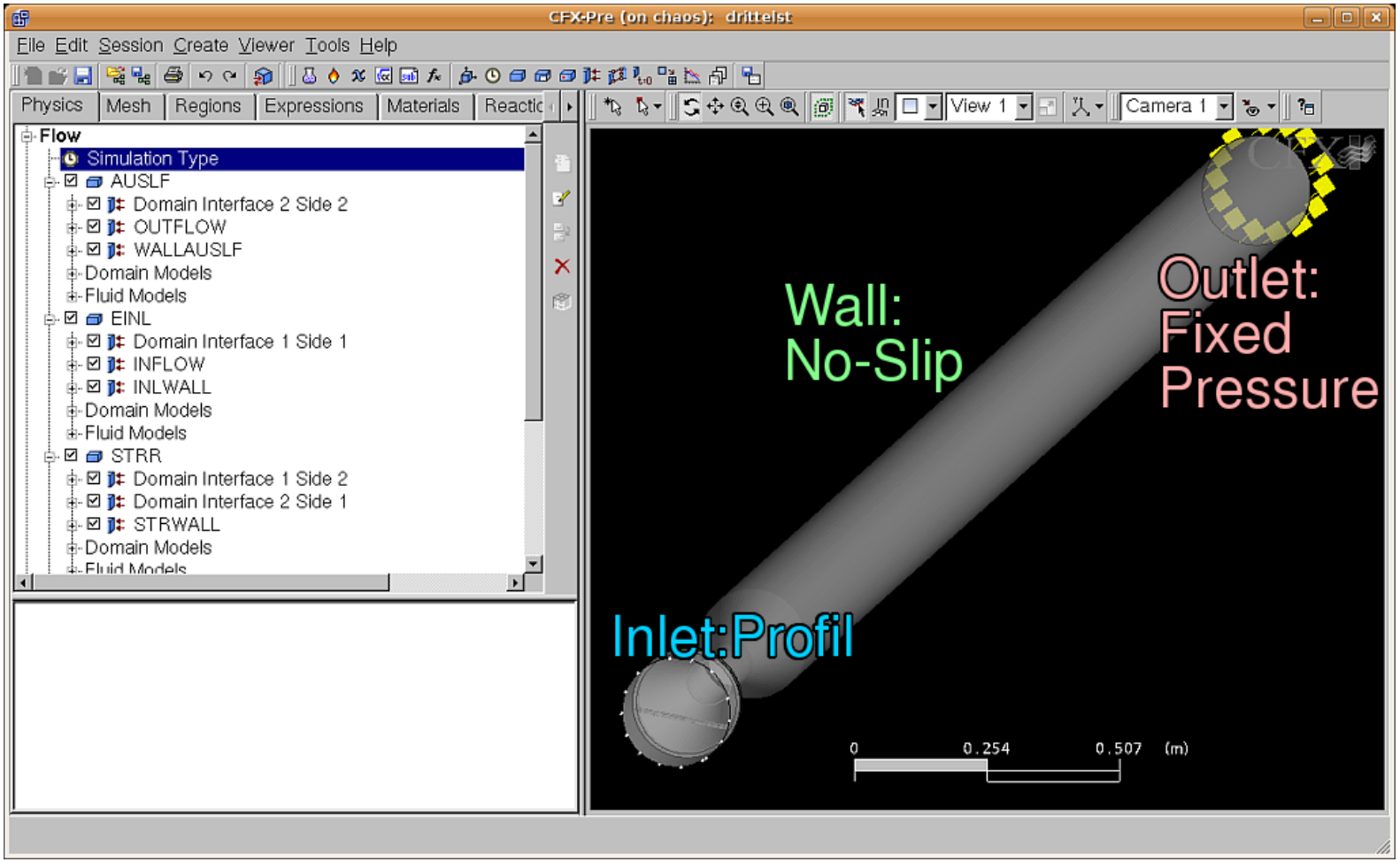
6,2 Mio. Zellen

Ohne Störung

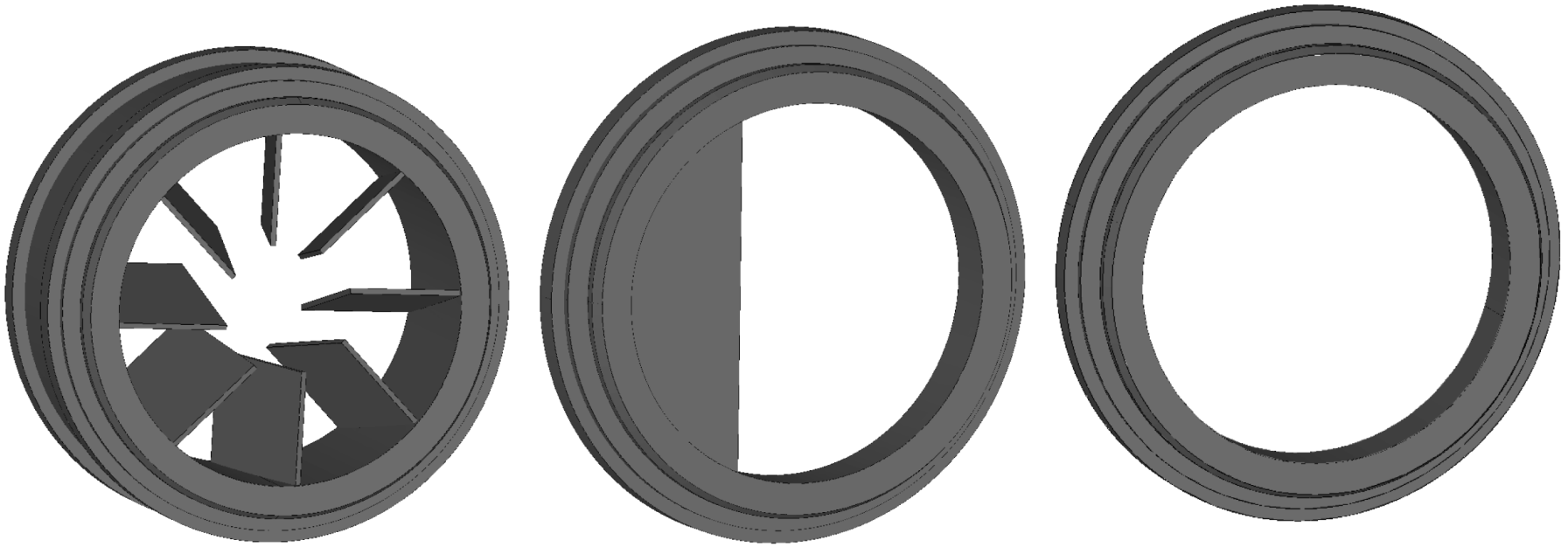


5,8 Mio. Zellen

Randbedingungen



Untersuchte Konfigurationen

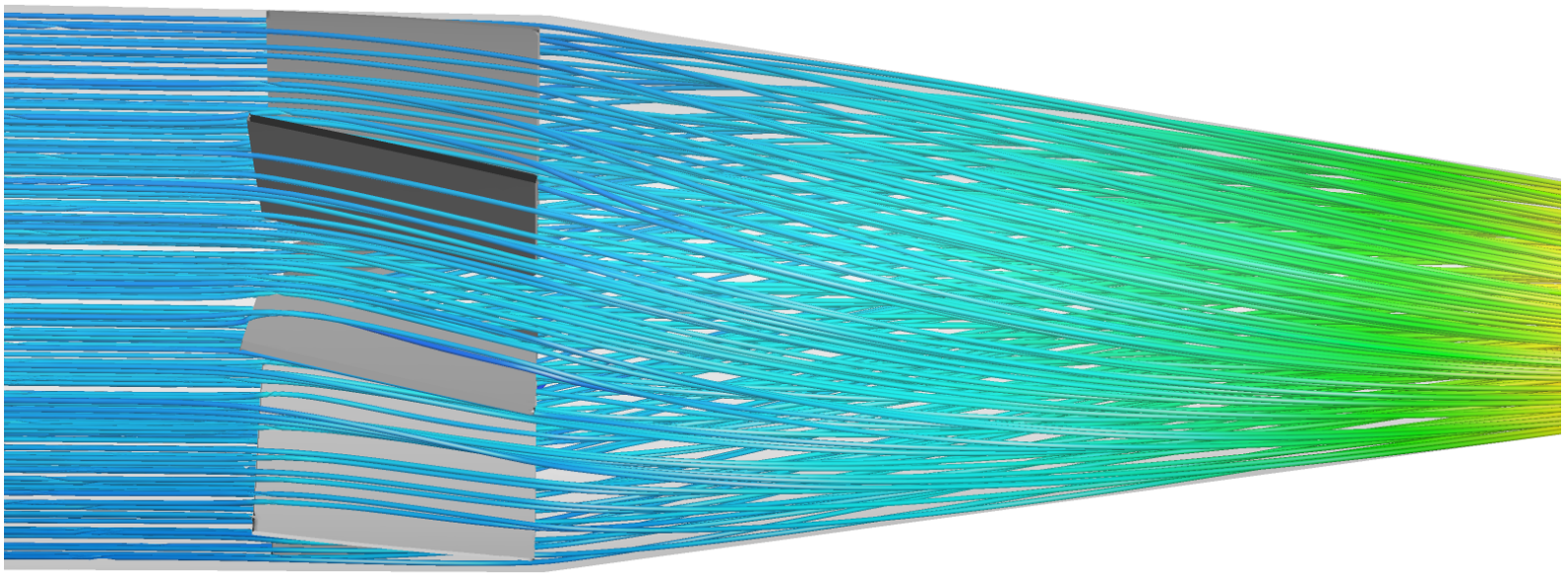


$$T = 50\ ^\circ\mathrm{C}$$

$$\dot{V} = 80 \text{ bzw. } 160\ \mathrm{m}^3/\mathrm{h}$$

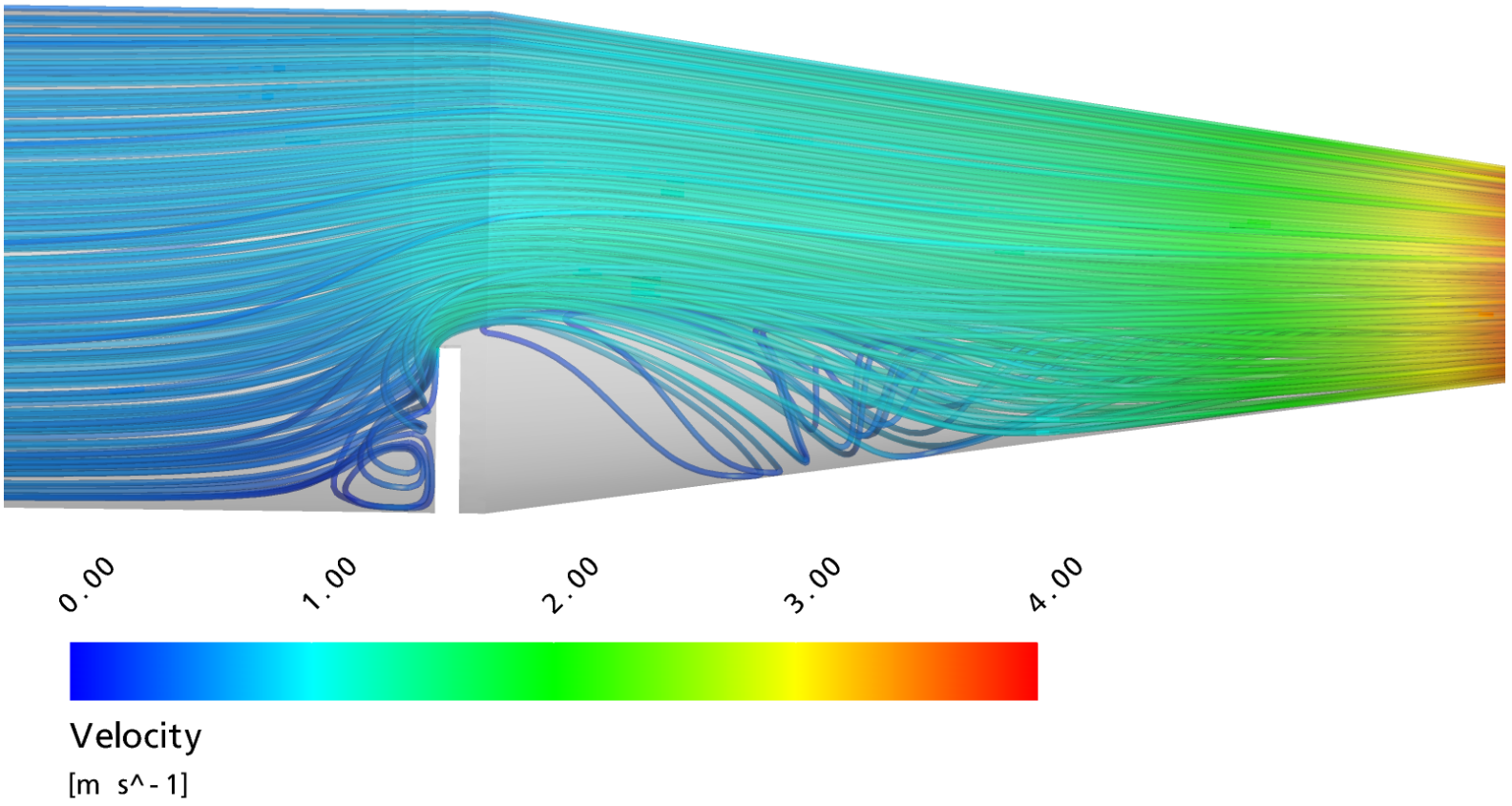
$$\Longrightarrow 6 \text{ Konfigurationen}$$

Stromlininen Drallerzeuger



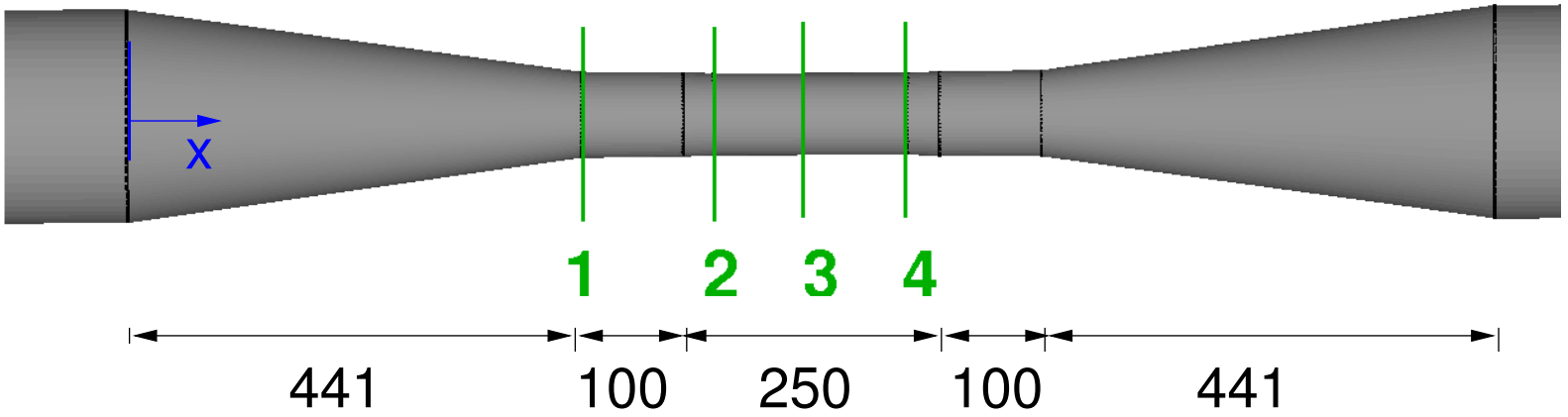
$$\dot{V} = 80 \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$$

Stromlinien Drittelstörer



$$\dot{V} = 80 \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$$

Schnittpositionen



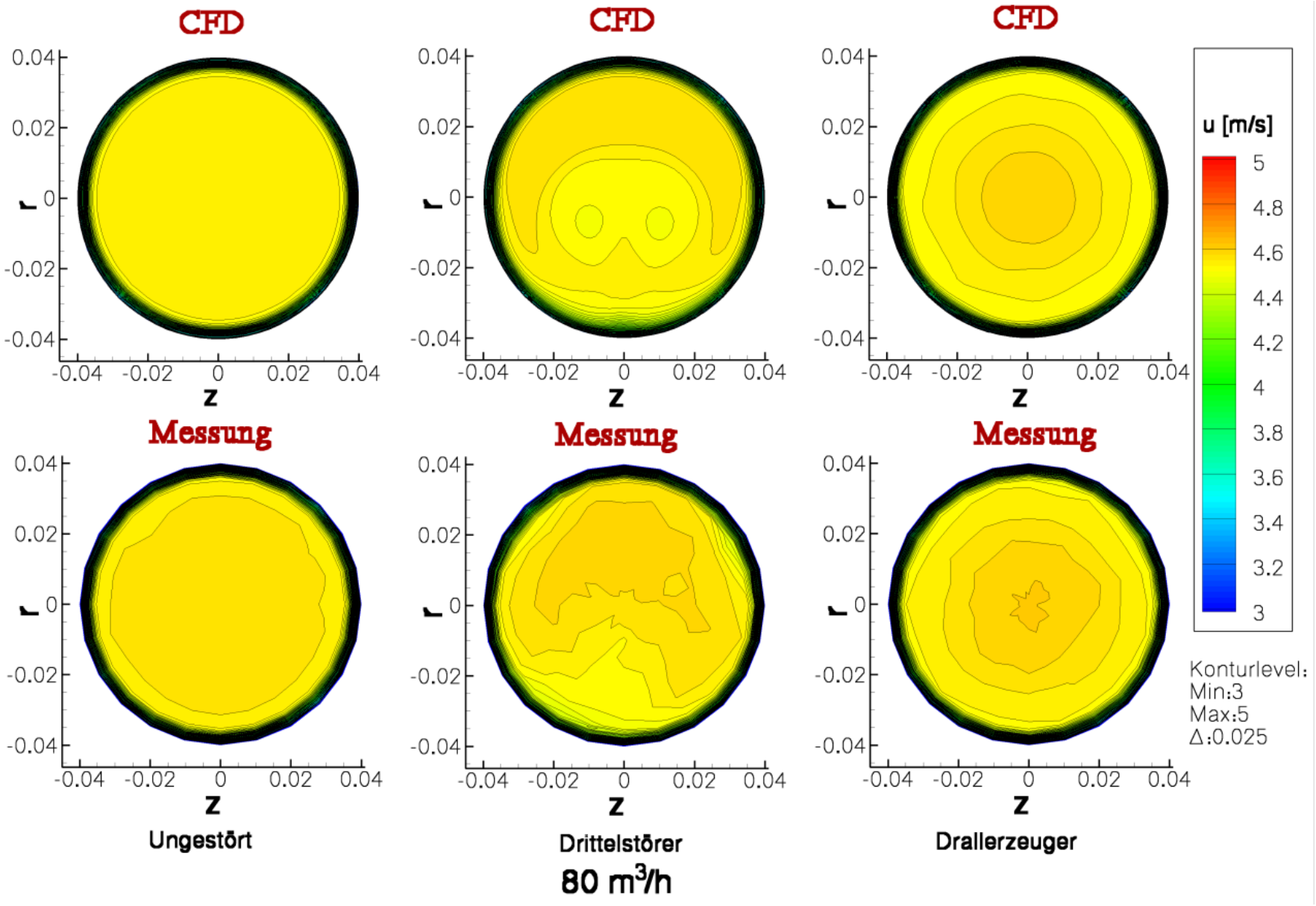
1 Hinter der Düse

2 Anfang der Messstrecke

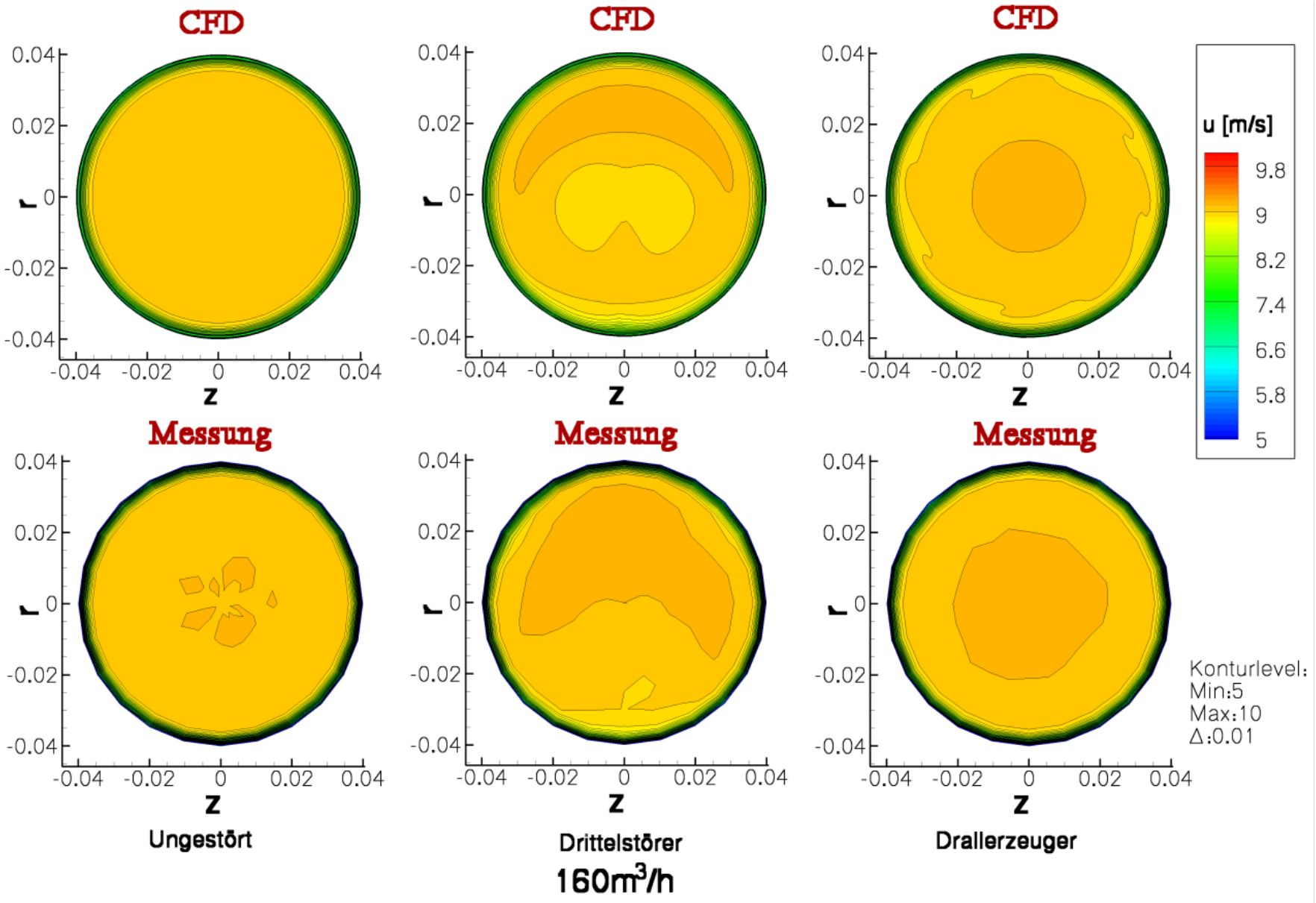
3 Mitte der Messstrecke

4 Ende der Messstrecke

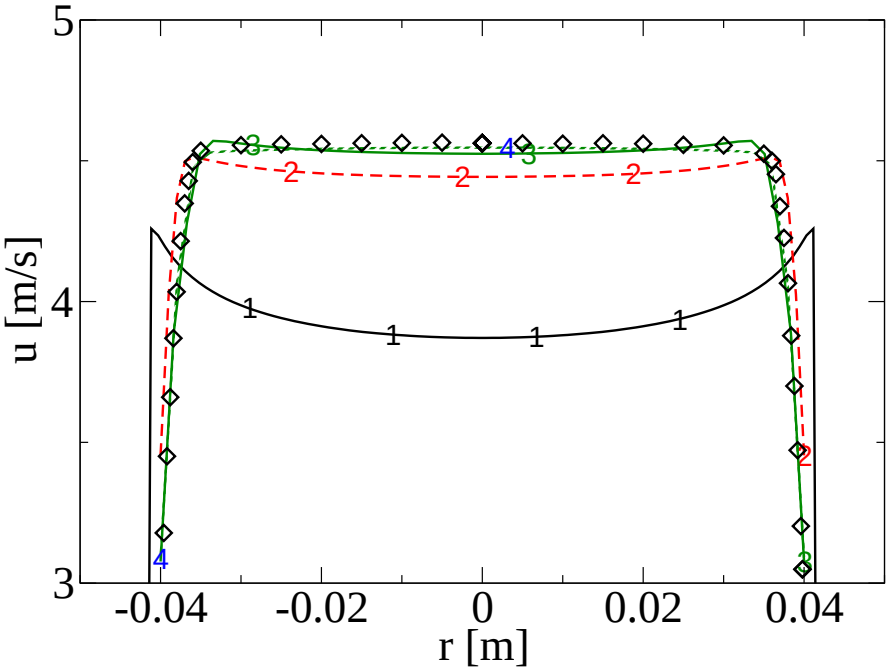
Übersicht Störkörperprofile Position 3

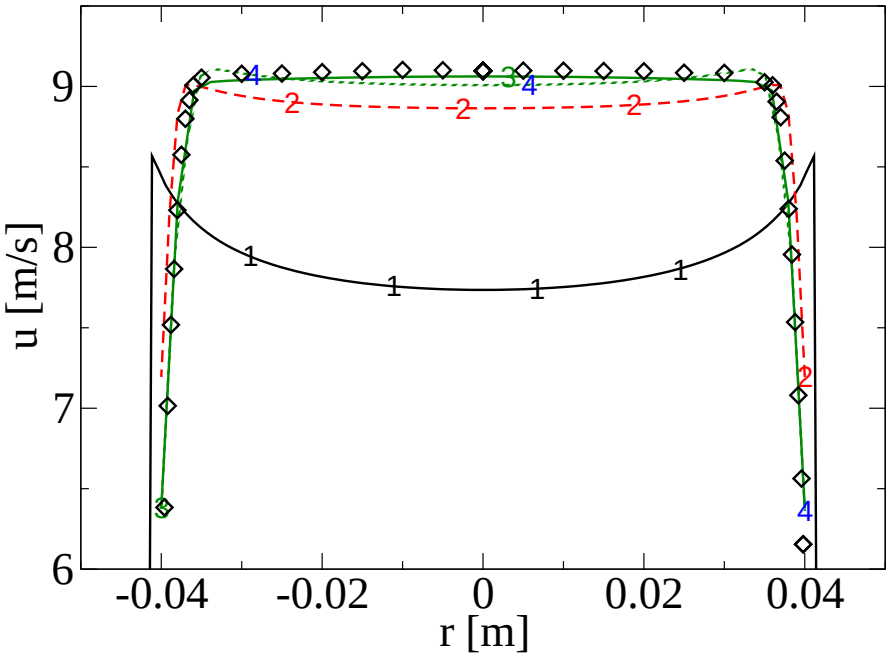


Übersicht Störkörperprofile Position 3



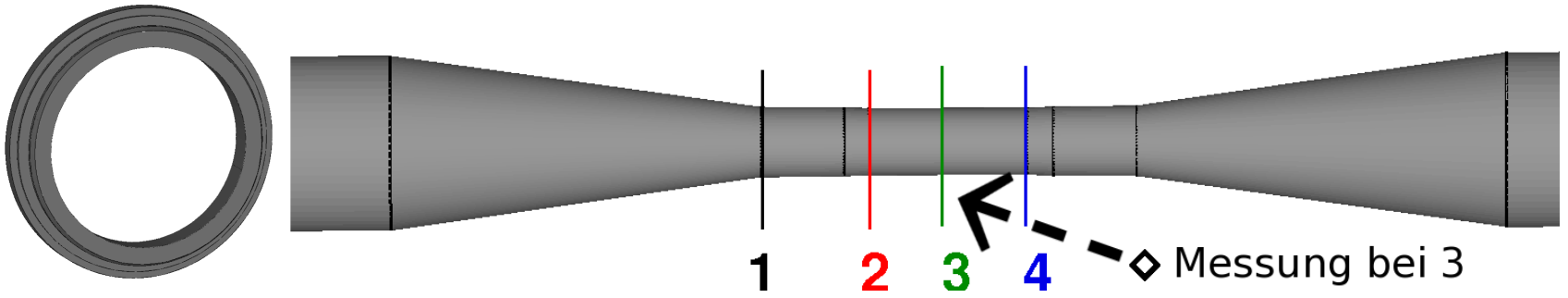
Ohne Störung



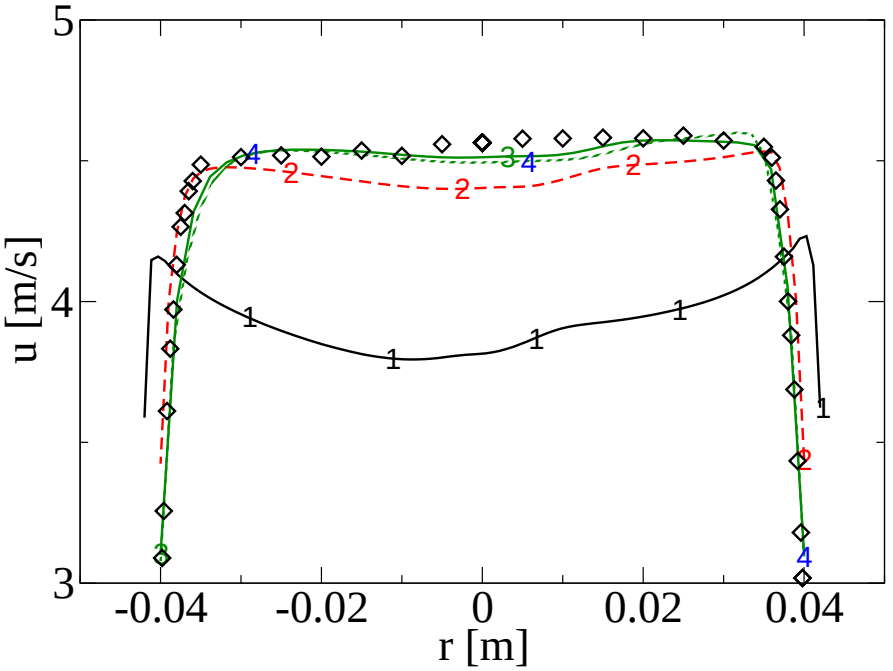


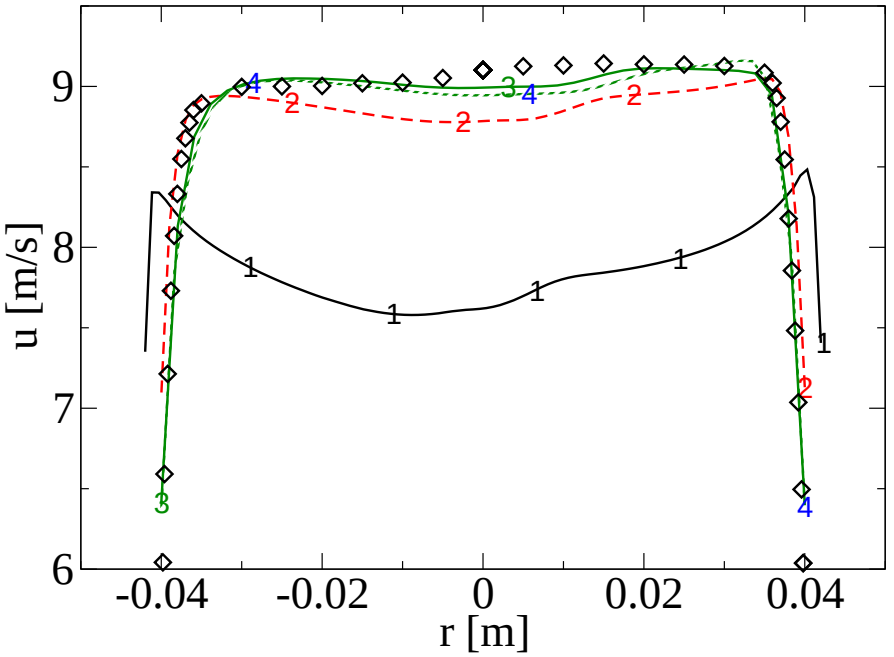
$\dot{V} = 80 \frac{m^3}{h}$

$\dot{V} = 160 \frac{m^3}{h}$



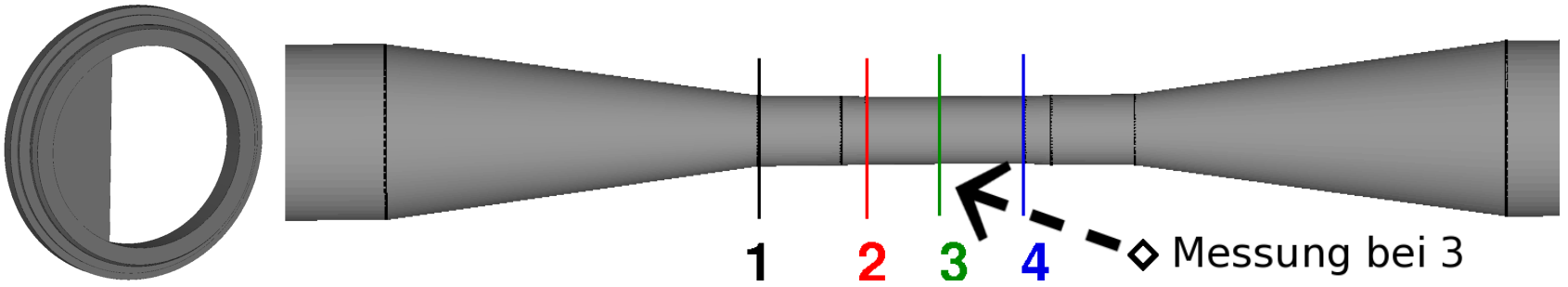
Drittelstörer



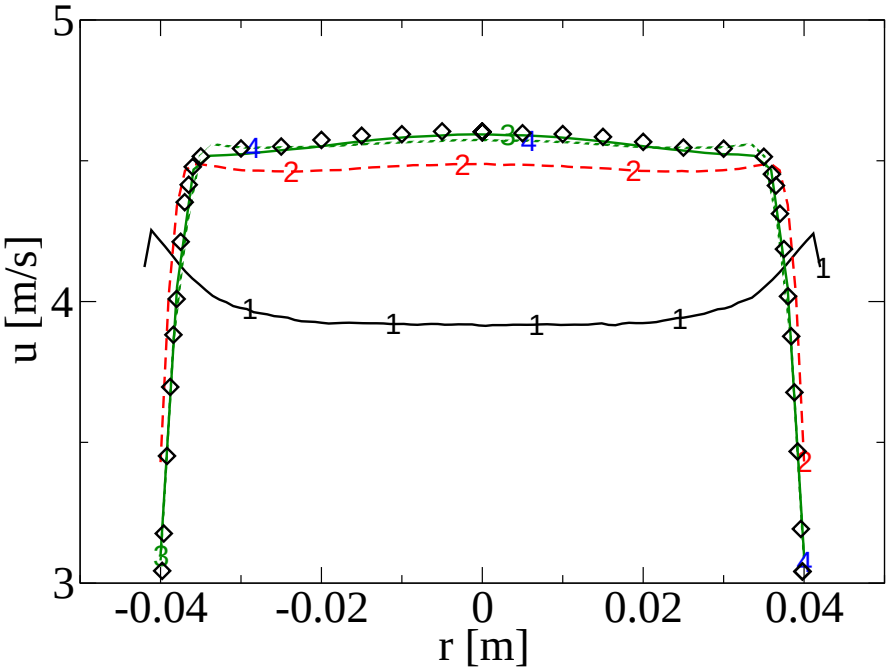


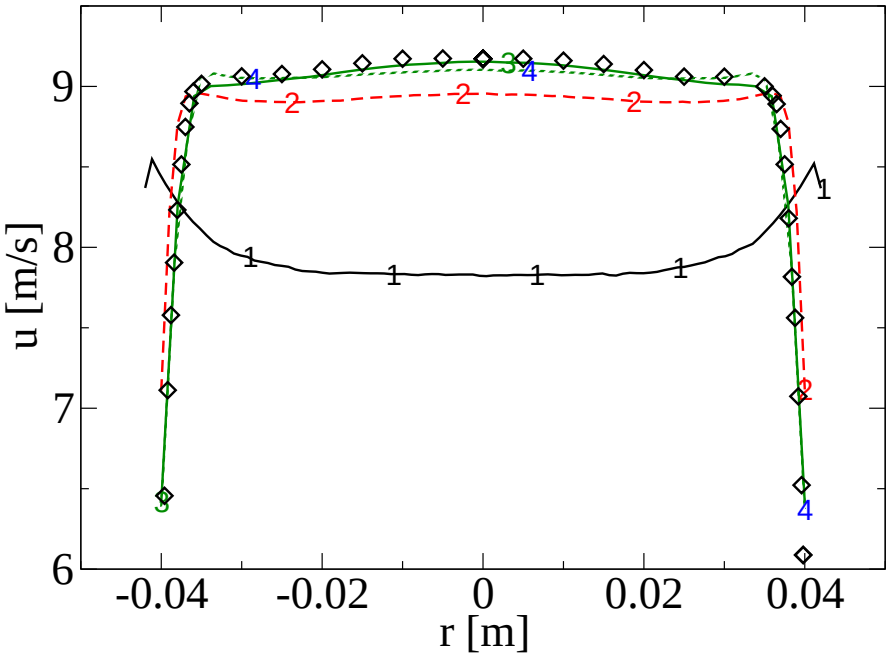
$\dot{V} = 80 \frac{m^3}{h}$

$\dot{V} = 160 \frac{m^3}{h}$



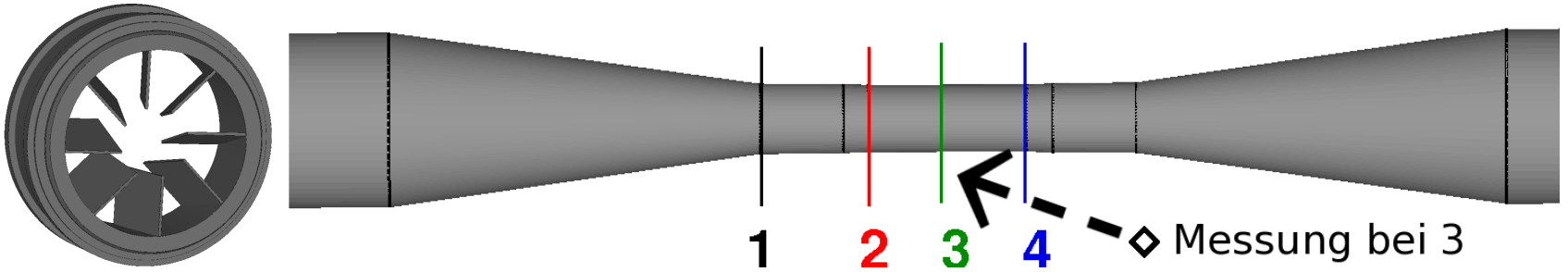
Drallerzeuger



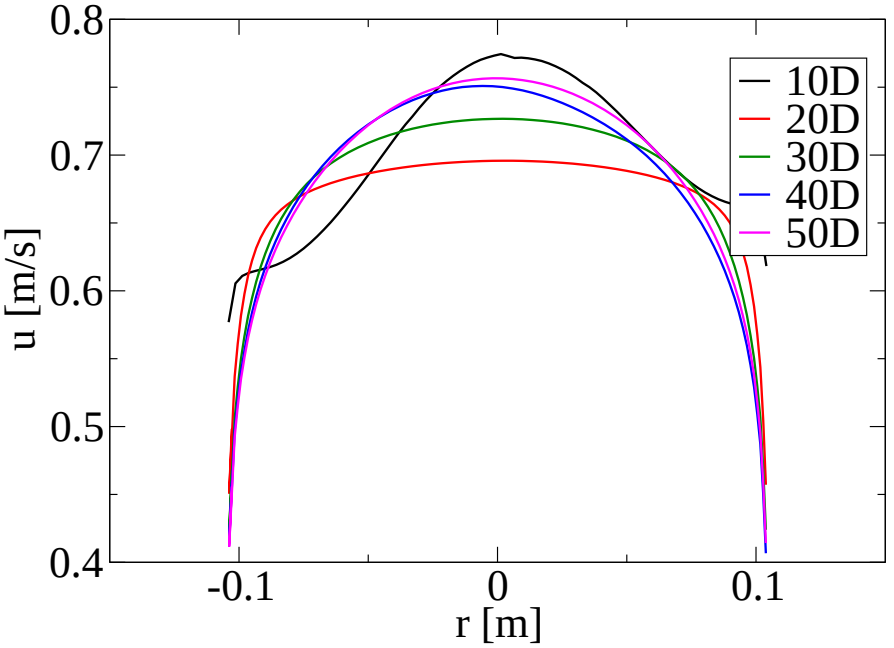


$\dot{V} = 80 \frac{m^3}{h}$

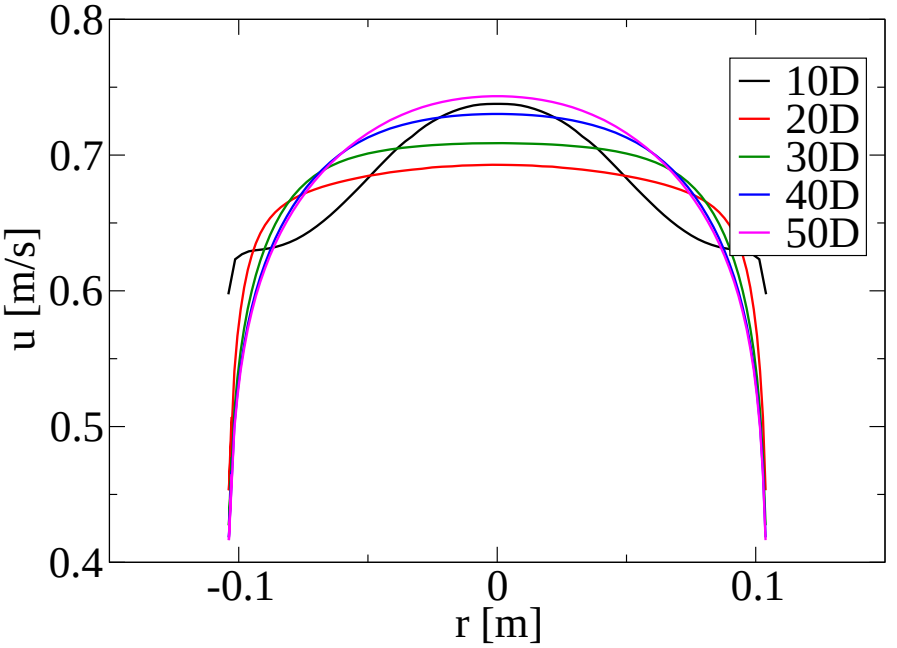
$\dot{V} = 160 \frac{m^3}{h}$



Drallerzeuger Rotationsinstabilität



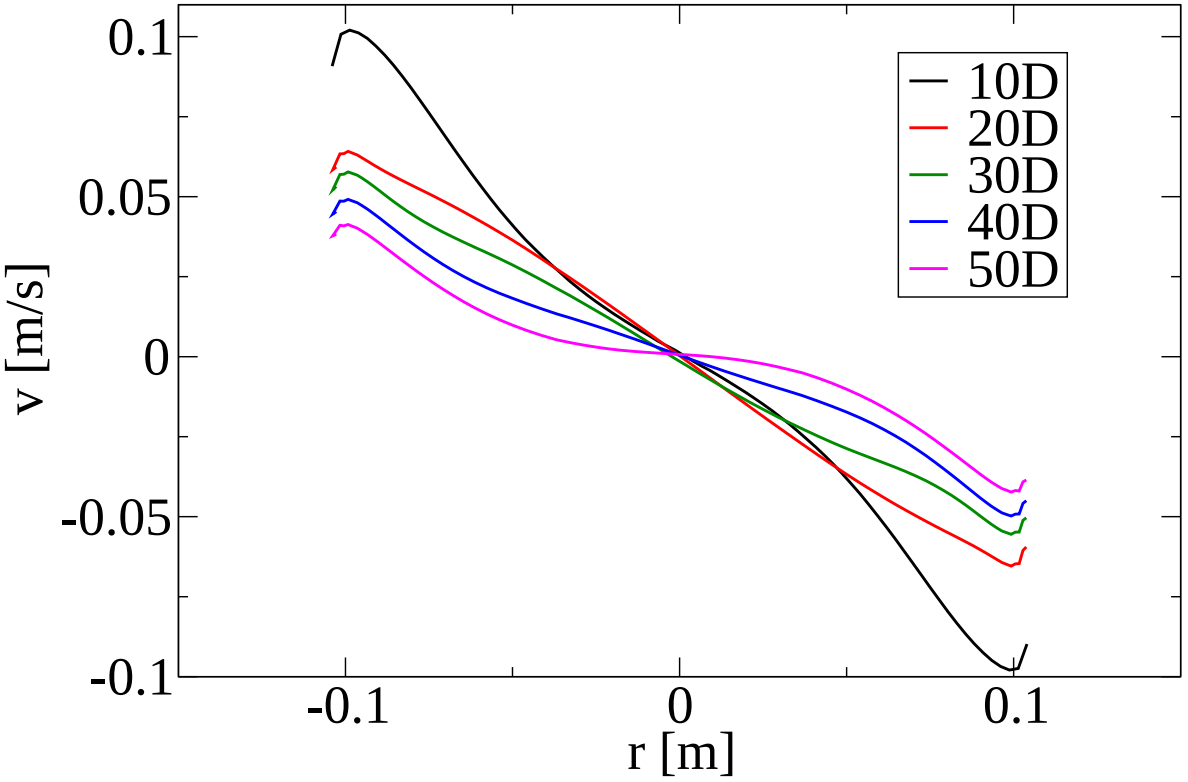
Drallerzeuger - Asymmetrie



Ohne Störung - Symmetrie

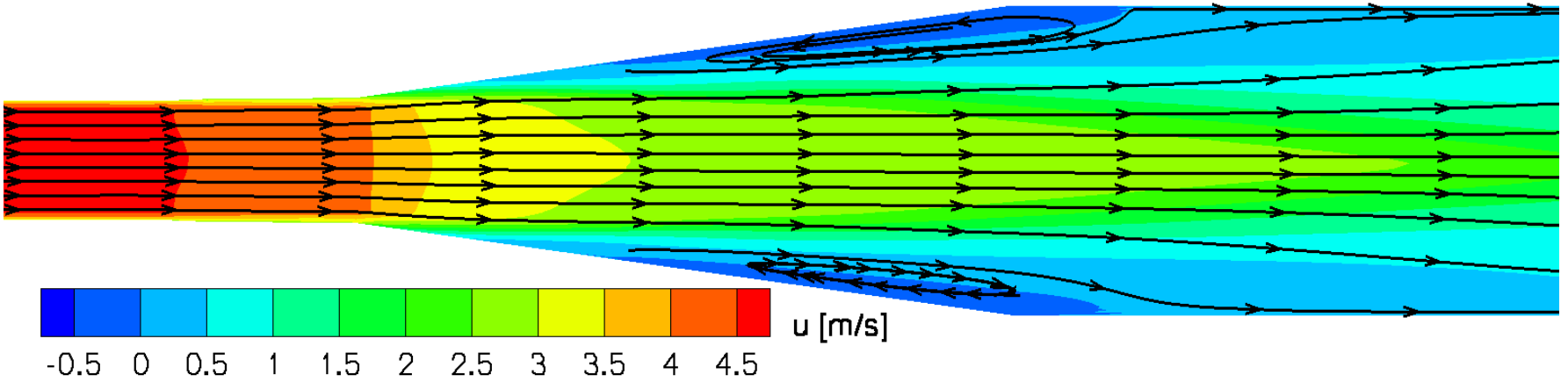
Axialgeschwindigkeit $u\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ in der Auslaufstrecke, $\dot{V} = 80\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$

Drallerzeuger Rotationsinstabilität



Tangentialgeschwindigkeit $w\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ in der Auslaufstrecke, Drallerzeuger, $\dot{V} = 80\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$

Ablösung in der Auslaufstrecke



Stromlinien, $u\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$ in der Auslaufstrecke, Drallerzeuger, $\dot{V} = 80\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$

Kritische Betrachtung

- High-Re-Randbedingungen
- Turbulenzmodell: Beschleunigung in der Düse, Ungleichgewichtiger Zustand dahinter
- Symmetrie und Stabilität der stationären Messung
- Struktur der Störungen hinter der konditionierenden Düse sind sehr schwach ausgeprägt. Wahrscheinlich ohne Düse deutlicherer Vergleich.
- Die Störungsstrukturen in den Messungen werden von der CFD erklärt

Zusammenfassung

- Strömungskonditionierung durch die Düse basiert auf drei Effekten
- Die durch die Störkörper erzeugten Strukturen wurden durch die Simulation erklärt.
- Übereinstimmung auf $1\% - 2\%$ in Bezug auf die Geschwindigkeitsprofile
- Zusätzliche Erkentnisse gegenüber LDV
- Große Menge an Daten: 20 Gigabyte

Ausblick

- Messung der Sekundärkomponenten
- Einbeziehen der Messgerätegeometrie in die Simulation. LDV-Messungen am Glaskörper.
- Kombination von CFD+Cxx für die Simulation von Durchflussmessgeräten
- Untersuchungen bei langen Einlaufstrecken: Vollausgebildetes Profil und Stabilität.
- Neue experimentelle Methoden zur Auflösung des Wandbereiches $< 0,5$ mm zur Validierung von Wandmodellen.
- Instationäre Simulationen DES/LES in Kombination mit PIV-Messungen
- CFD für PIV

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit