Validierung der Simulation eines querangeströmten Zylinders und eines runden Freistrahls mit dem SAS-Modell in ANSYS CFX

Autor: Gregor Neuber (TU Berlin)
Co-Autor: Dr. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin Software GmbH)

ANSYS Conference & 31th CADFEM Users' Meeting 2013
June 19-21, 2013 – Rosengarten Mannheim

Motivation

Rahmen: Masterarbeit bei der Firma CFX Berlin

- Untersuchung der Scale Adaptive Simulation
- Anwendung an drei Beispielen
- Sensibilität auf verschiedene Zeitschrittweiten
- Untersuchung des Gittereinflusses
- Best-Practice-Guidelines

Inhalt

CFX Berlin

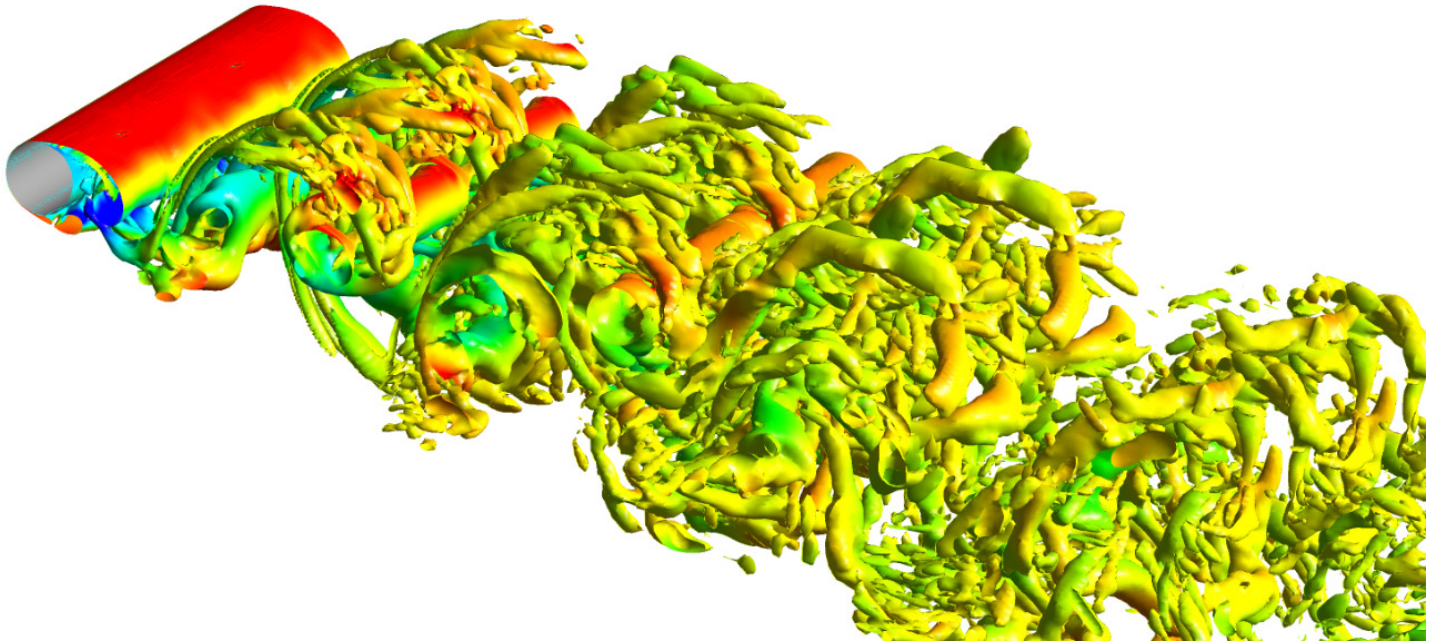
- Scale Adaptive Simulation (SAS)
  - Was ist die Scale Adaptive Simulation?
  - Grundprinzip
- Querangeströmter Zylinder
- Globale und lokale Instabilität
- Harmonic Flow Generator
- Rückspringende Stufe
- Runder Freistrahl
- Zusammenfassung

Scale Adaptive Simulation (SAS)
Was ist die Scale Adaptive Simulation?

CFX Berlin

- Scale Adaptive Simulation ist ein RANS-Modell
  - Basiert auf Reynold‘scher Mittelung
  - Darstellung aufgelöster Strukturen möglich

⟶ hybrides RANS-LES-Modell



Scale Adaptive Simulation (SAS)
Grundprinzip

CFX Berlin

- SAS-Modell basiert auf Zweigleichungsmodell von Rotta (1968)
  - Herleitung einer exakten Transportgleichung für turbulentes Längenmaß
  - Modellhafte Approximationen der auftretenden Korrelationen
  - Inklusion einer dritten Ableitung der Geschwindigkeit in Produktionsterm

- Weiterentwicklung durch Menter und Egorov (2004)
  - physikalische Inkonsistenz in der Herleitung von Rotta korrigiert
  - zweite Geschwindigkeitsableitung dominant im Produktionsterm
  - Inklusion einer natürlichen Längenskale
  - Befähigung des Modelles auf bereits aufgelöste Strukturen zu reagieren (skalen-adaptives Verhalten)

Scale Adaptive Simulation (SAS) Integration in das SST Modell

CFX Berlin

- Die Transportgleichungen des SST-SAS-Modelles lauten:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varrho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varrho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - c_\mu \varrho k \omega$$

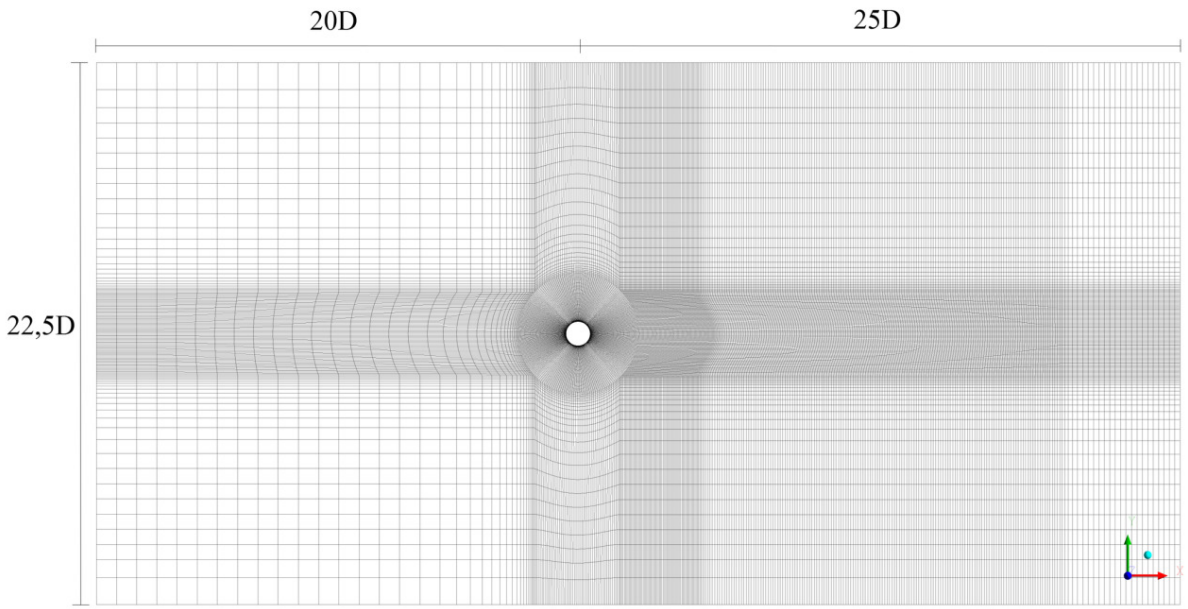
$$\frac{\partial}{\partial t}(\varrho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varrho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + (1-F_1)2\varrho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3\frac{\omega}{k}P_k - \beta_3\varrho\omega^2 \boxed{+ Q_{SAS}}$$

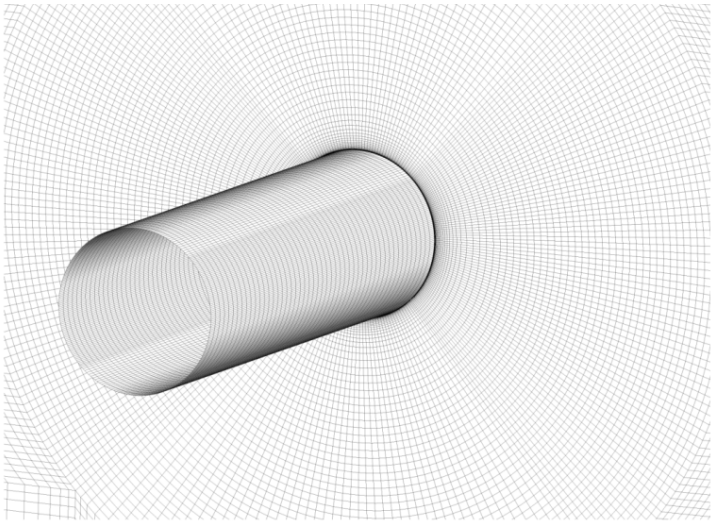
- Quellterm $$Q_{SAS} = \max\left[\varrho\xi_2\kappa S^2\left(\frac{L}{L_{vK}}\right)^2 - C\frac{2\varrho k}{\sigma_\Phi}\max\left(\frac{1}{\omega^2}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}, \frac{1}{k^2}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right), 0\right]$$

$$L_{vK} = \kappa\frac{S}{u''} \qquad \text{mit} \qquad u'' = \sqrt{\sum_i\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}\right)}$$

$$\xi_2 = 3.51\ , \qquad \sigma_\Phi = 2/3\ , \qquad C = 2$$

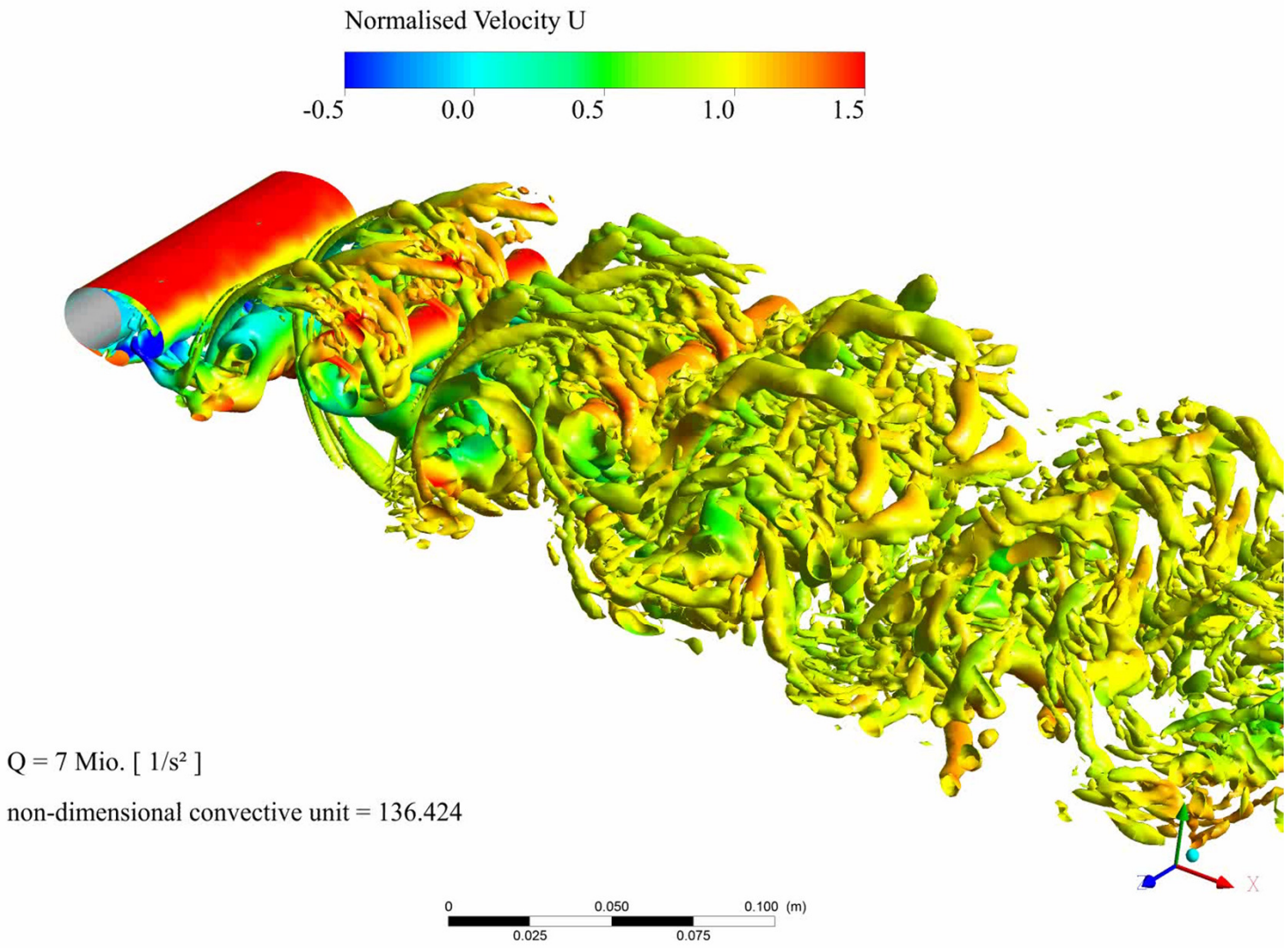
Querangeströmter Zylinder
Geometrie und numerisches Setup





- Re = 140 000
- Gitter: 2.95 Mio. Knotenpunkte
  - 50 Punkte in spannweitiger Richtung
  - z/D = 3
  - 256 Punkte in azimutaler Richtung
  - $y^+<1$
- γ-Re_θ -Transitionsmodell
  - Turbulenzgrößen am Einströmrand quasi-null
    - Tu = 0.001
    - Eddy Viscosity Ratio = 0.01
- Zeitschrittweite: Δt = 1.15 µs
- $CFL_{max} < 1$

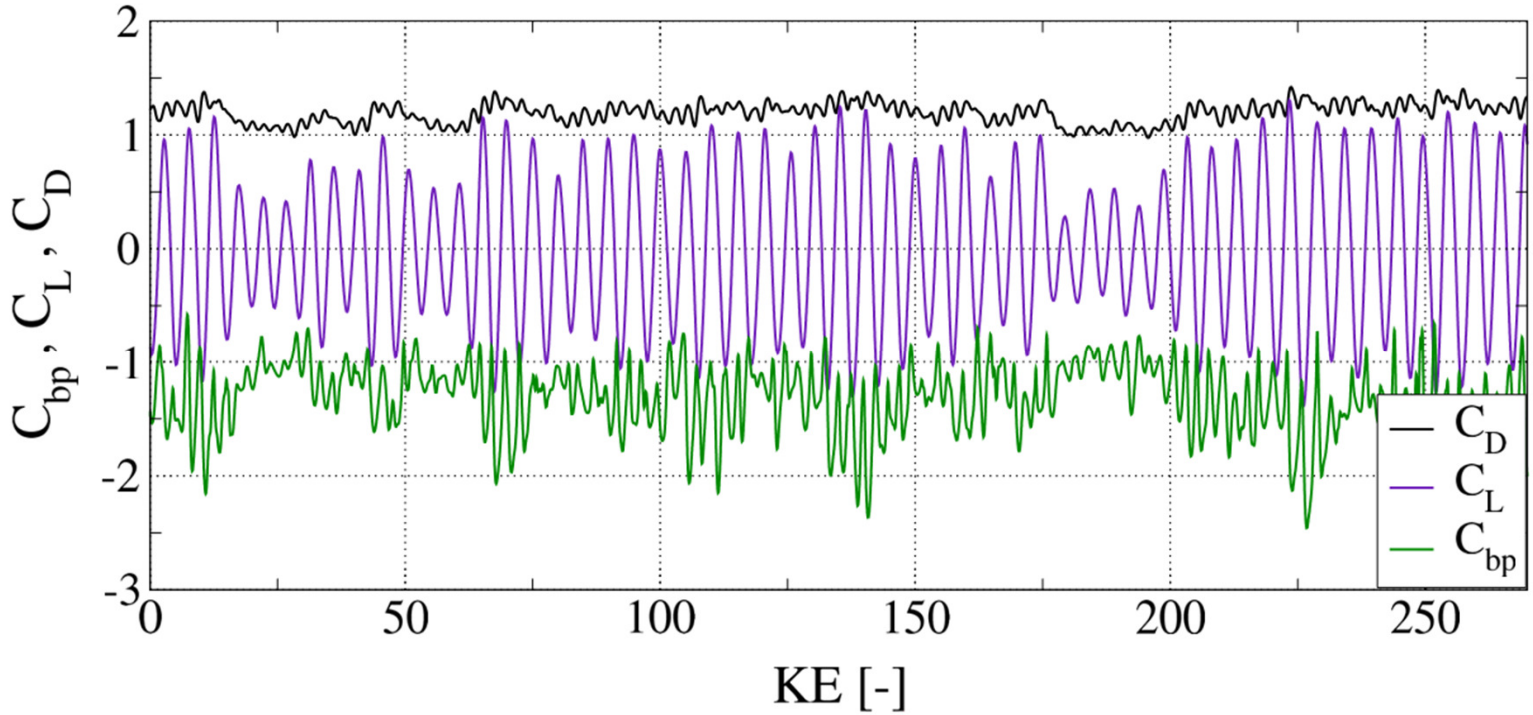
Querangeströmter Zylinder
Visualisierung



Querangeströmter Zylinder
Zeitschriebe integraler Größen

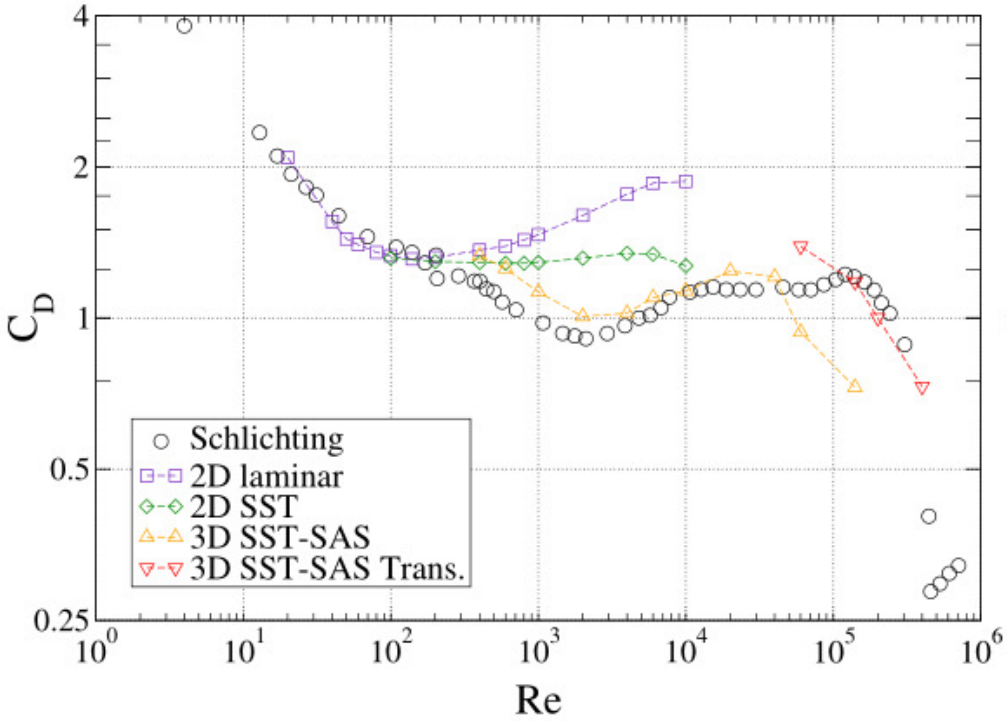
CFX Berlin

Widerstandsbeiwert C_D, Auftriebsbeiwert C_L, Druckbeiwert C_{bp}

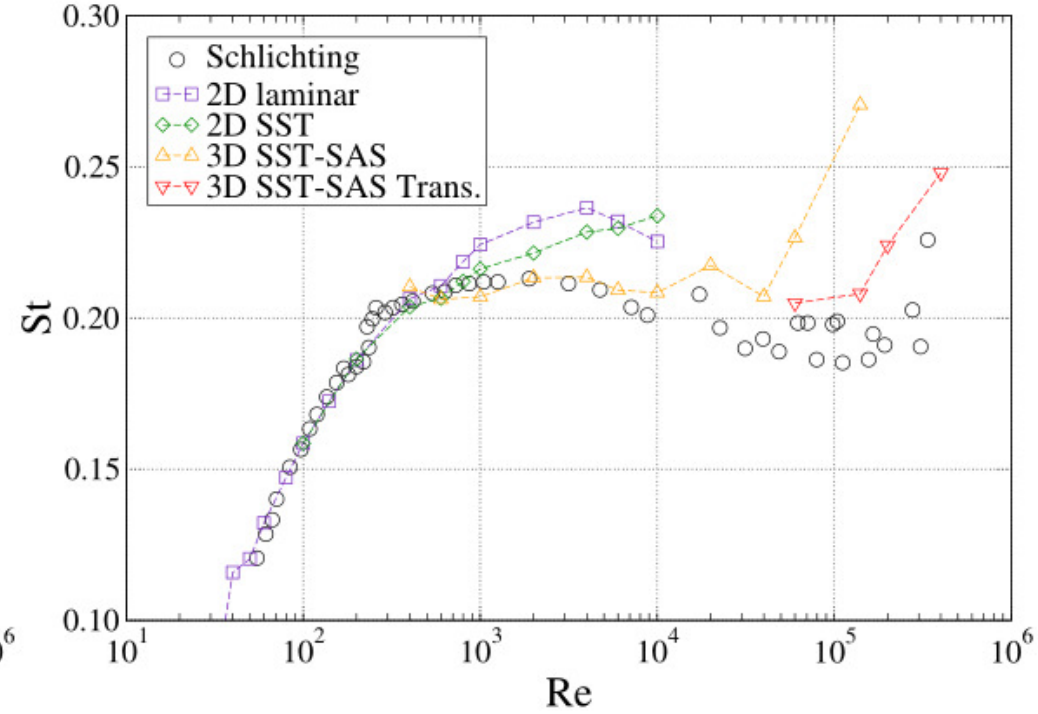


Querangeströmter Zylinder
Gemittelte integrale Größen

mittlerer Widerstandsbeiwert



mittlere Strouhal-Zahl

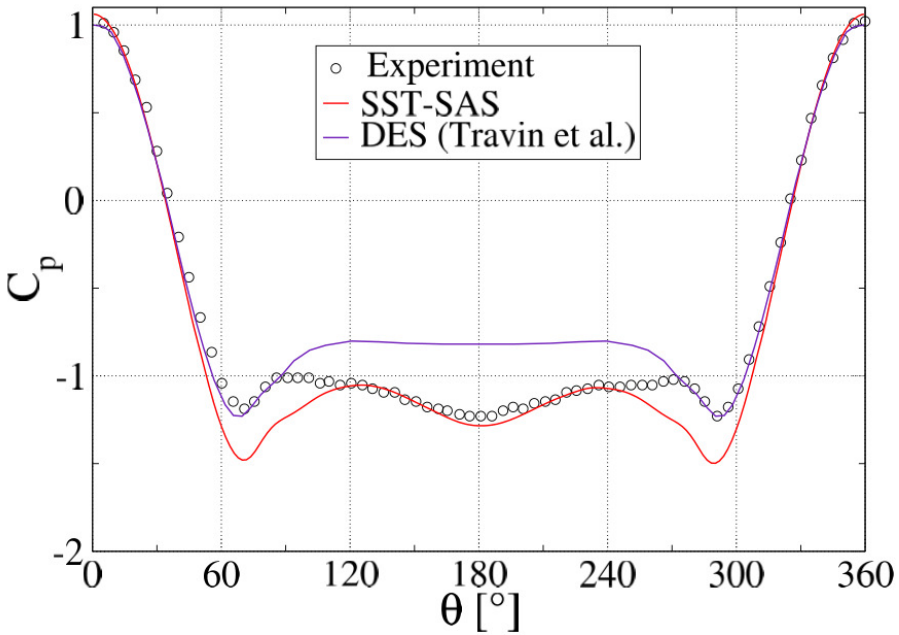


Hermann Schlichting, Klaus Gersten. (2006). Grenzschicht-Theorie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

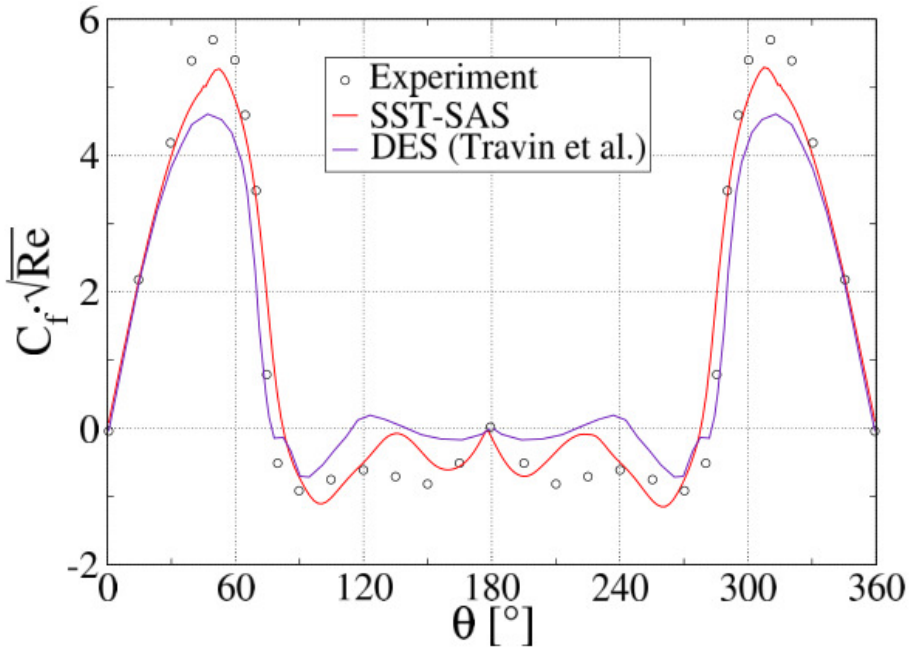
Querangeströmter Zylinder
Auswertung I: Referenzlösung I

Re = 140 000

mittlerer Druckbeiwert



mittlerer Reibungsbeiwert



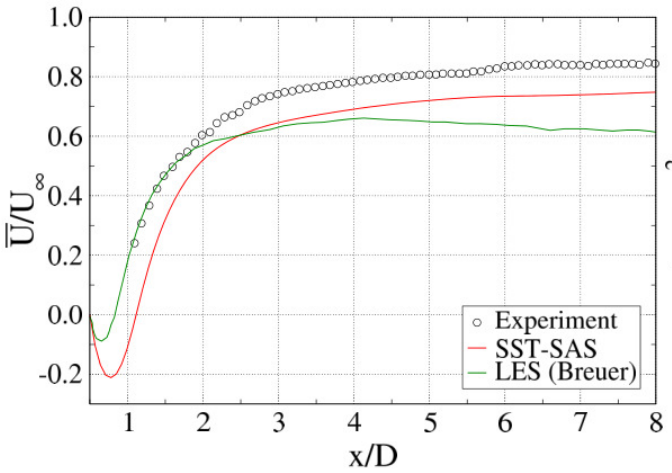
Brian Cantwell, Donald Coles. (1983). An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 136, S.321-374.

Andrei Travin, Micheal Shur, Michael Strelets, Philippe R. Spalart. (1999). Detached-Eddy Simulations Past a Circular Cylinder. Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 63, S.293-313.

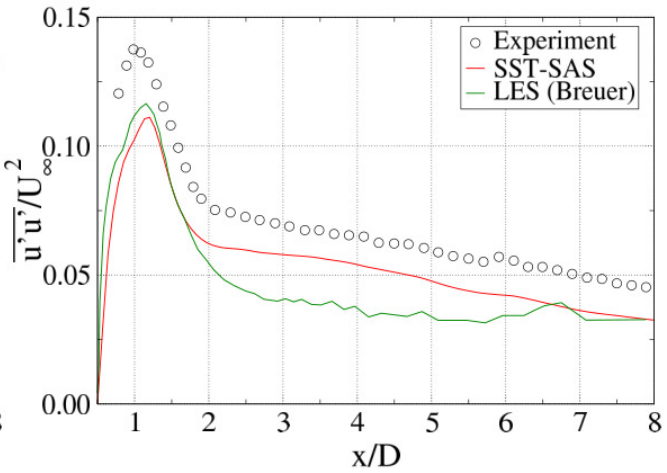
Querangeströmter Zylinder
Auswertung I: Referenzlösung II

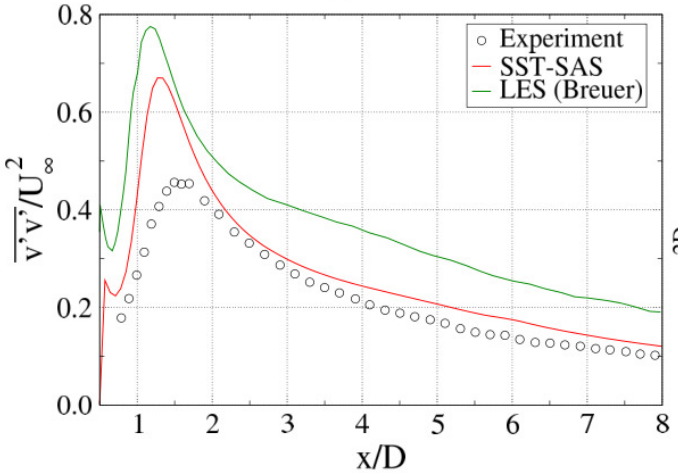
CFX Berlin

Geschwindigkeit

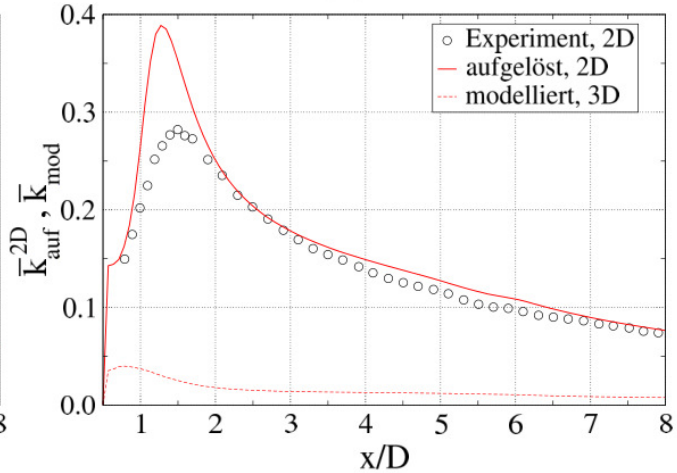


Normalspannung



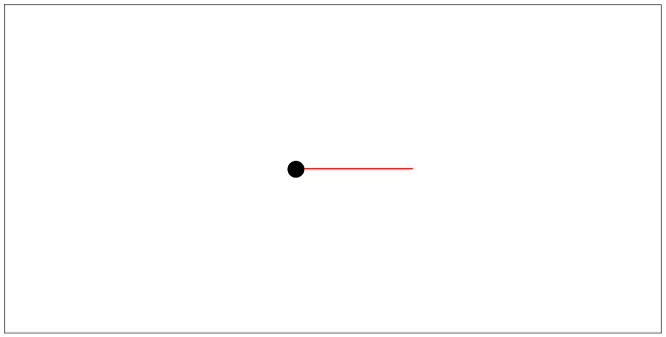


Normalspannung



Kinetische Energie

Auswertungslinie



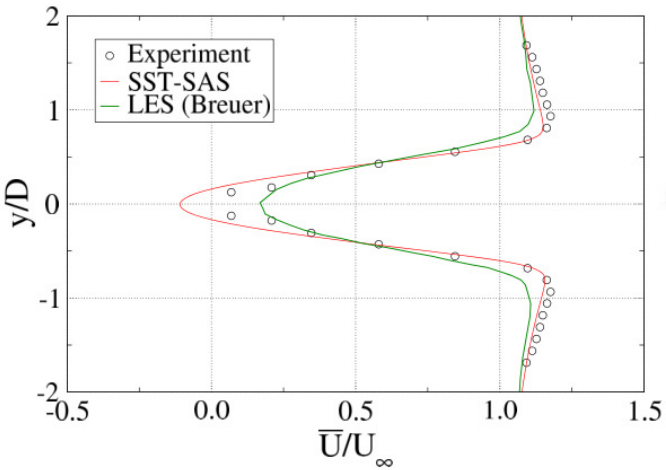
x-y-Ebene

Brian Cantwell, Donald Coles. (1983). An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 136, S.321-374.

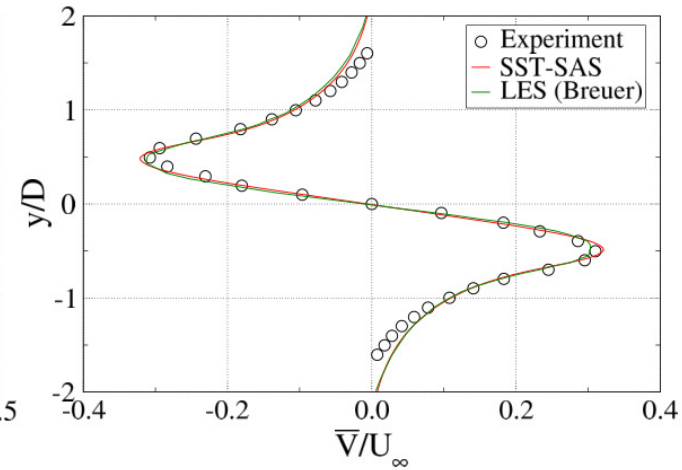
Michael Breuer. (2000). A challenging test case for large eddy simulation high Reynolds number circular cylinder flow. International Journal of Heat and Fluid Flow 21 (2000), S.648-654

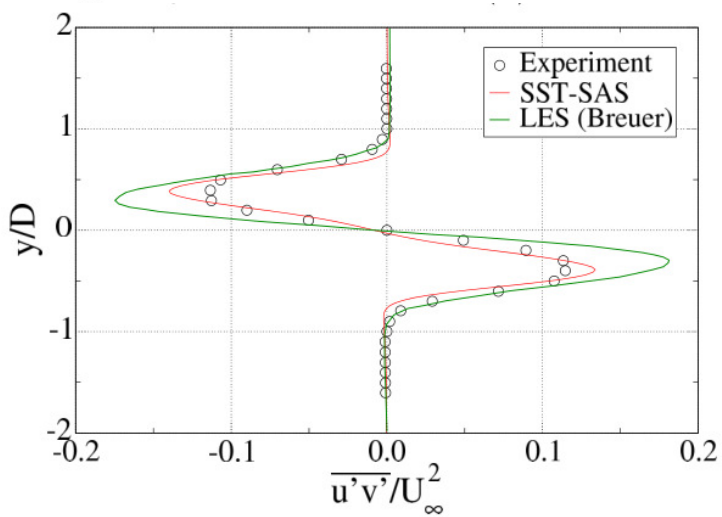
Querangeströmter Zylinder
Auswertung I: Referenzlösung III

Geschwindigkeit U



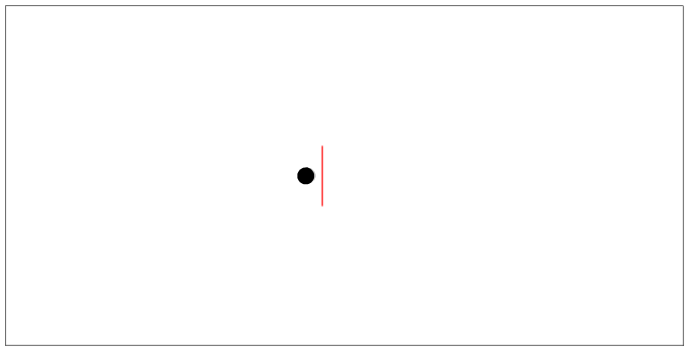
Geschwindigkeit V





Schubspannung

Auswertungslinie

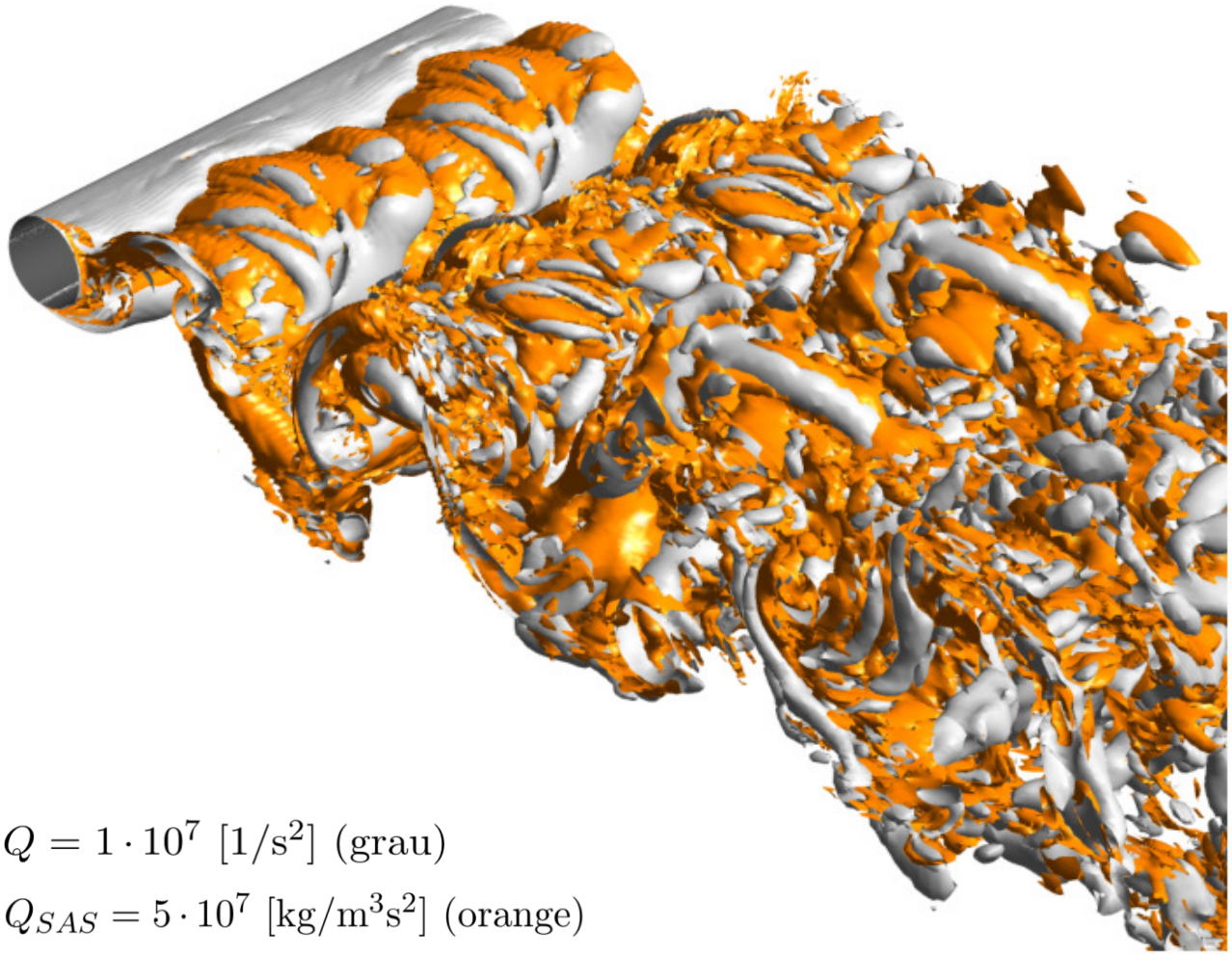


x-y-Ebene

Brian Cantwell, Donald Coles. (1983). An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 136, S.321-374.

Michael Breuer. (2000). A challenging test case for large eddy simulation high Reynolds number circular cylinder flow. International Journal of Heat and Fluid Flow 21 (2000), S.648-654

Querangeströmter Zylinder
Auswertung I: Referenzlösung IV



Q-Kriterium: $Q = 1 \cdot 10^7 \ [1/\mathrm{s}^2] \ (\mathrm{grau})$

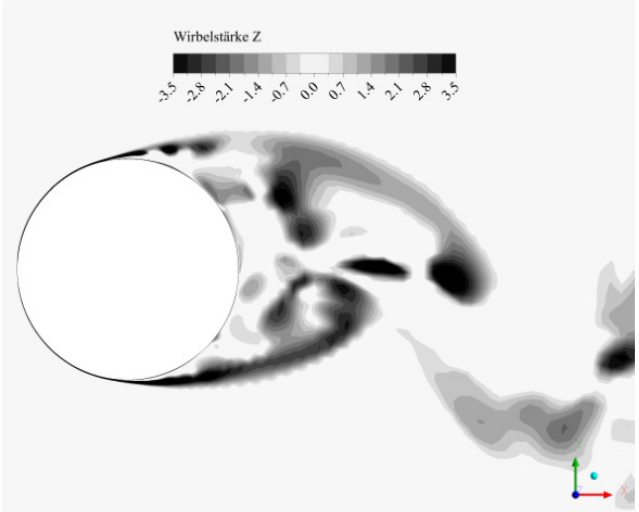
Quellterm: $Q_{SAS} = 5 \cdot 10^7 \ [\mathrm{kg/m^3 s^2}] \ (\mathrm{orange})$

Querangeströmter Zylinder
Auswertung II: Zeitschrittvariation I

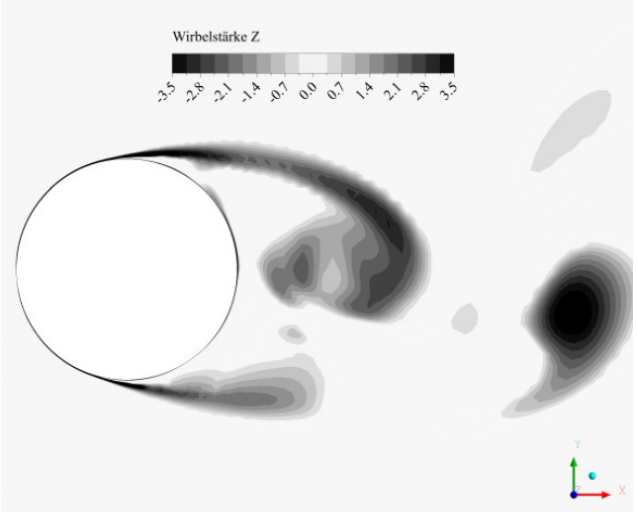
CFX Berlin

Wirbelstärke

Δt



(a) $\Omega_z D/U_\infty$, Δt

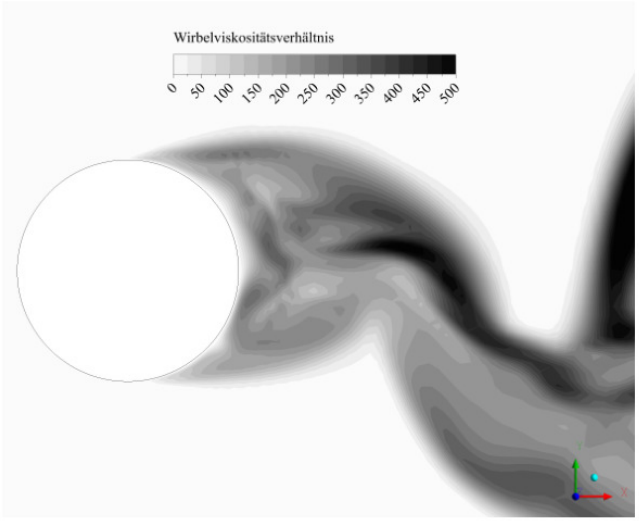


(b) $\Omega_z D/U_\infty$, $16\Delta t$

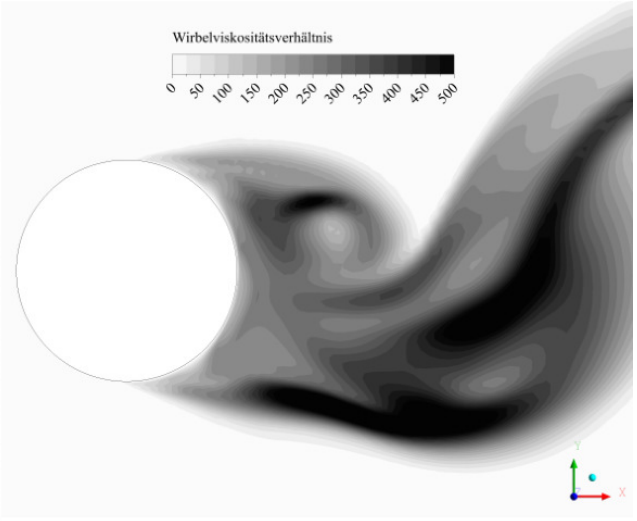
$16\Delta t$

Wirbelviskosität

Δt



(c) ν_t/ν, Δt



(d) ν_t/ν, $16\Delta t$

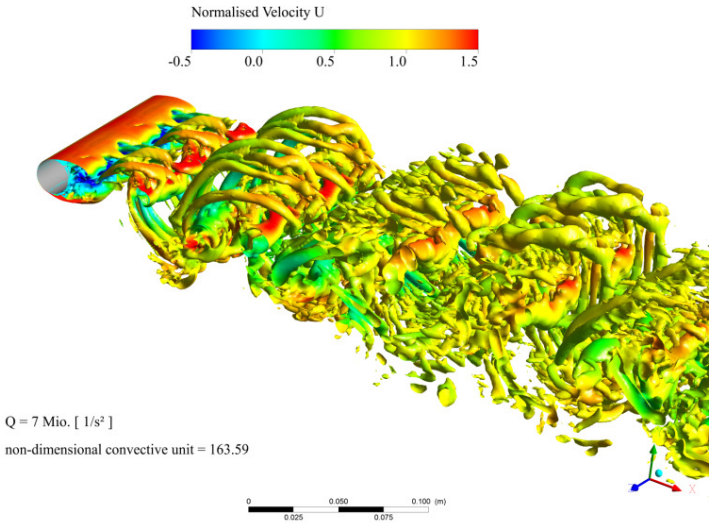
$16\Delta t$

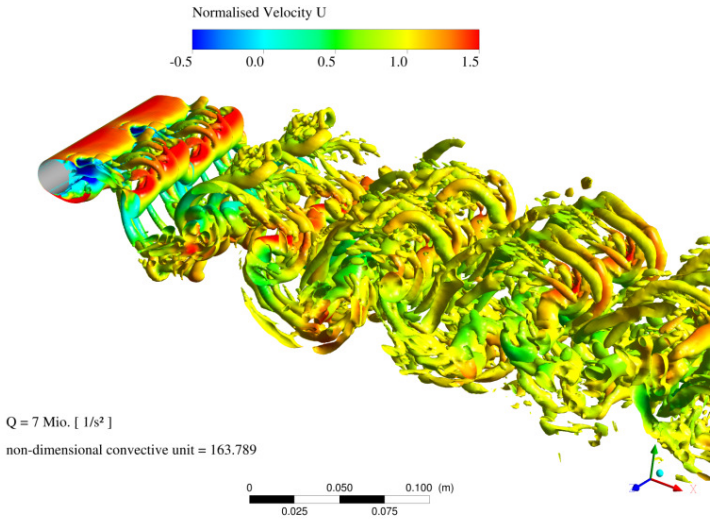
Querangeströmter Zylinder
Auswertung II: Zeitschrittvariation II

CFX Berlin

Δt

$CFL_{max} < 1$



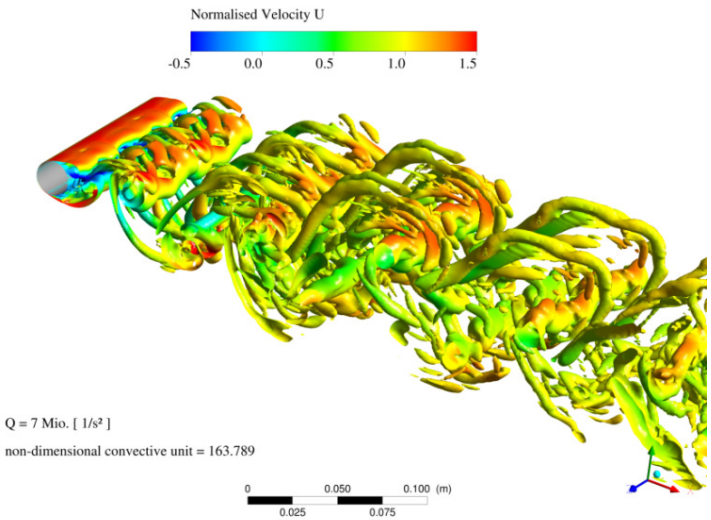


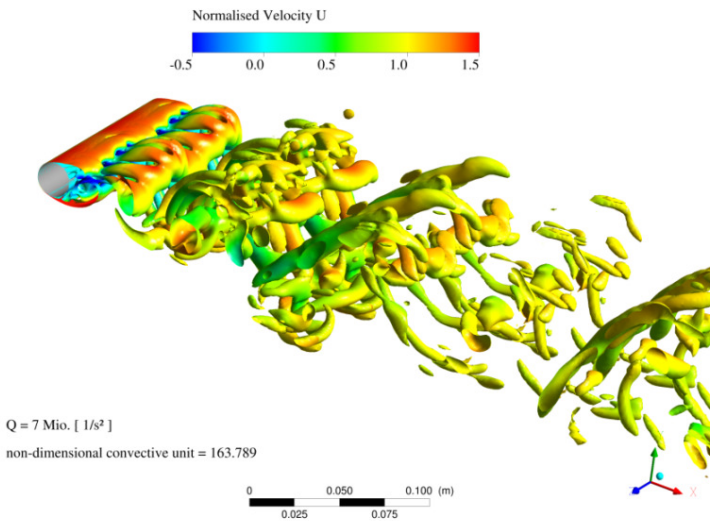
$4\Delta t$

$CFL_{max} < 4$

$8\Delta t$

$CFL_{max} < 8$





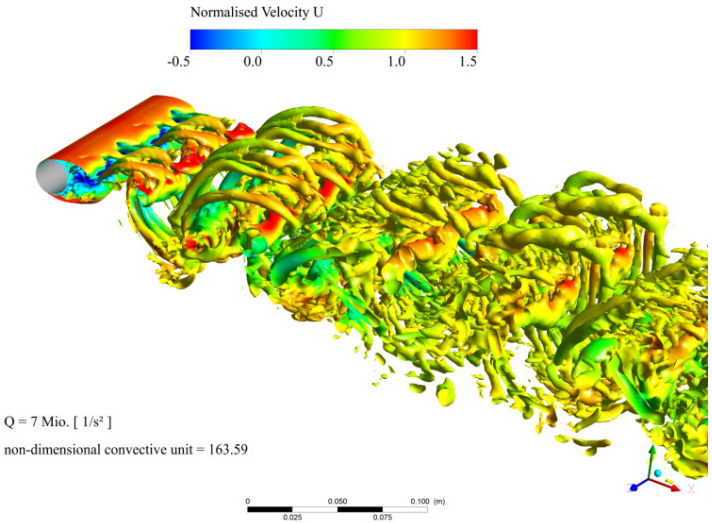
$16\Delta t$

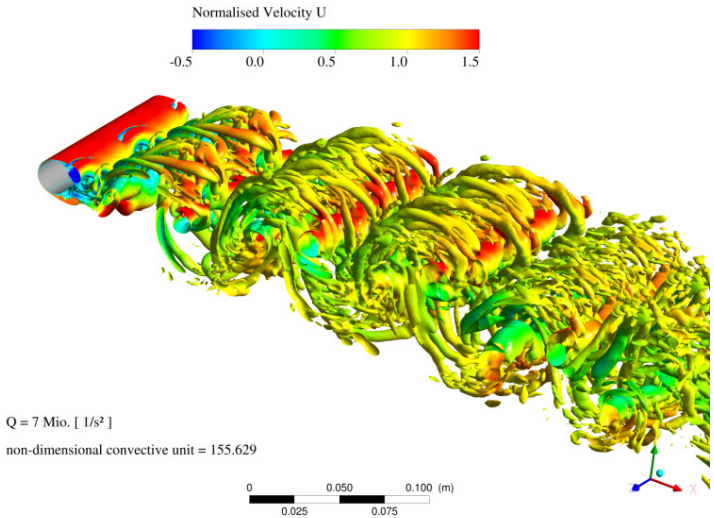
$CFL_{max} < 16$

Querangeströmter Zylinder
Auswertung III: Gittervariation

CFX Berlin

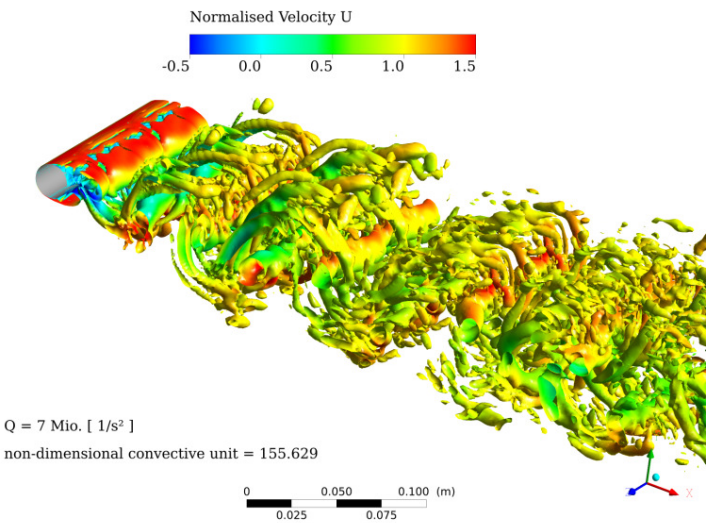
Referenz

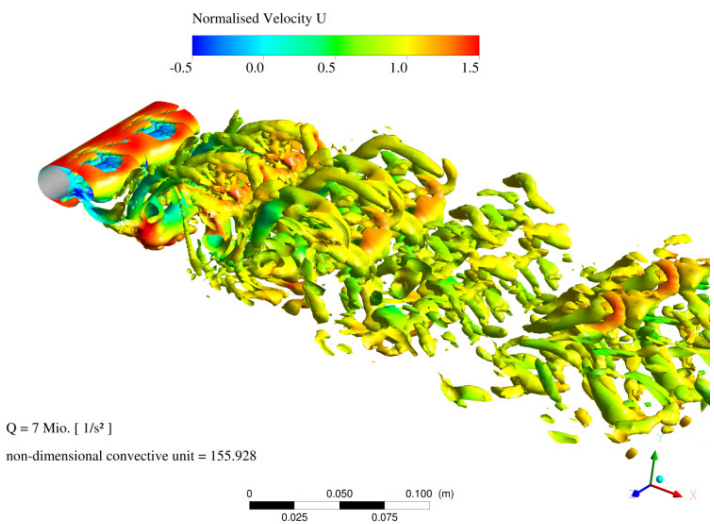




#z = 100

128 azimutale Knoten





$8\Omega_{KV}$

Globale und lokale Instabilität

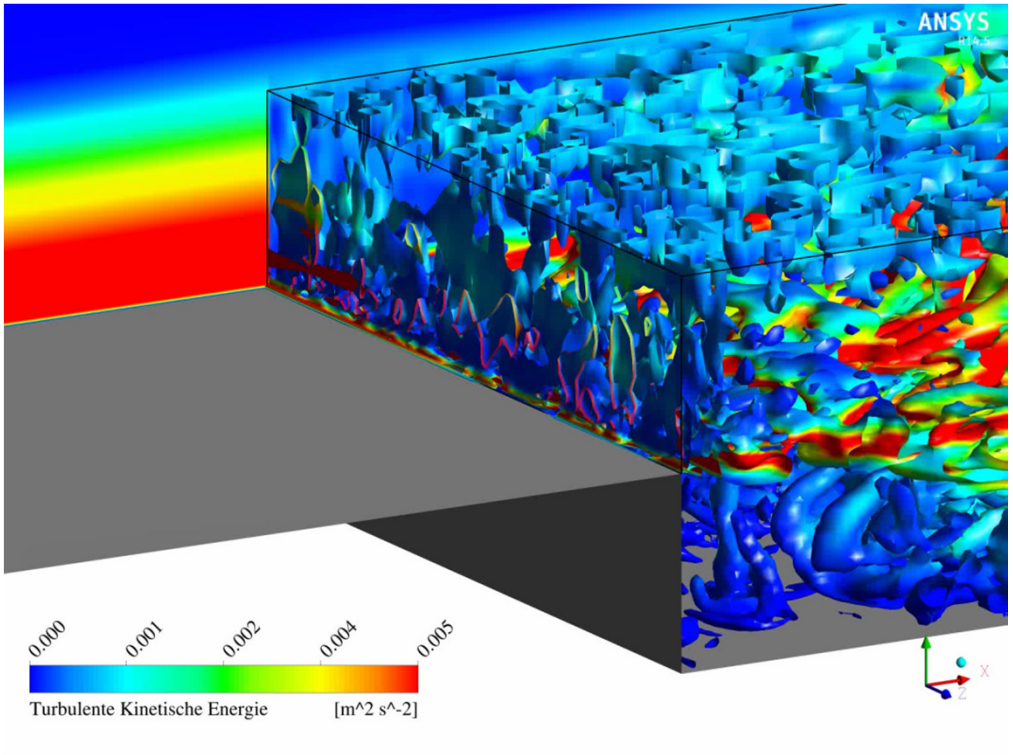
CFX Berlin

- SAS reagiert auf aufgelöste Strukturen
  - Verringerung der Wirbelviskosität
  - Wirbelzerfall bis Auflösungsgrenze des Gitters
  - Jedoch nur unter genügender Instabilität in Strömung
  - Sonst Verbleib im RANS-Modus
- Global instabile Strömungen (Strukturen entstehen von selbst)
  - Strömung hinter Stumpfkörpern
  - Fahrzeuge in Querströmung
  - Mischeinrichtungen
  - Drallströmungen (z.B. Verbrennungskammer)
- Lokal instabile Strömungen (Strukturen entstehen <u>nicht</u> von selbst)
  - Rückspringende Stufe
  - Alle freien Scherschichten, die von einer Wand ablösen (Freistrahlen, Nachlaufströmungen, Mischungsschichten)

➢ Erweiterung des Einsatzbereiches durch Einbringen von Instabilitäten (Forcing)

Harmonic Flow Generator

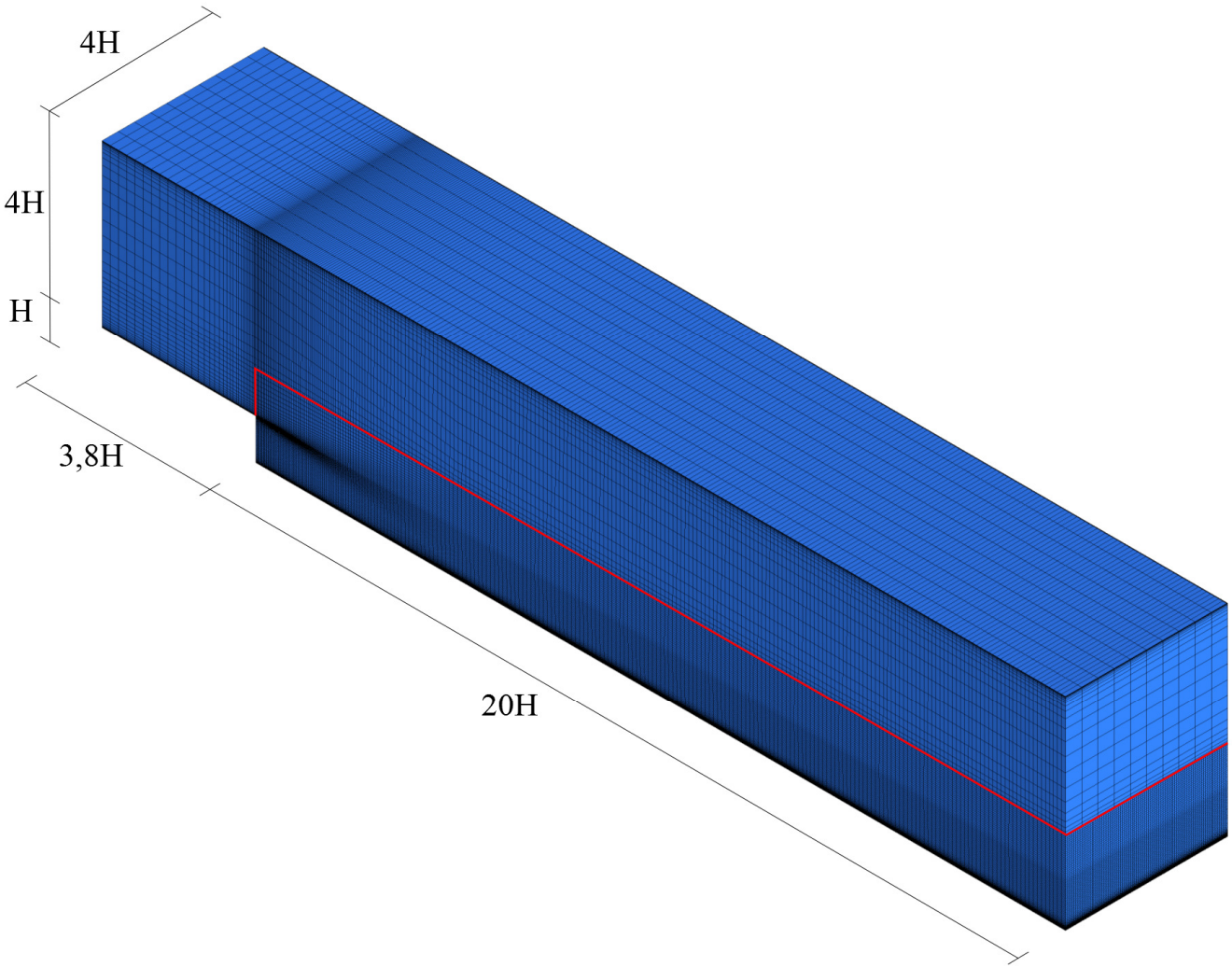
- Ermöglicht Übergang von RANS zum skalenauflösenden Turbulenzmodell
- Generierung synthetischer Turbulenz aus statistischen Größen der Turbulenzgleichungen
- rasche Formierung eines physikalisch realistischen Geschwindigkeitsfeldes



Achtung: Beta-Feature

- Gitteranforderungen:
  - Grenzschicht: mindestens 20-30 Zellen durch die Grenzschicht
  - Freie Scherschicht: 15-20 kubische Zellen in alle drei Raumrichtungen

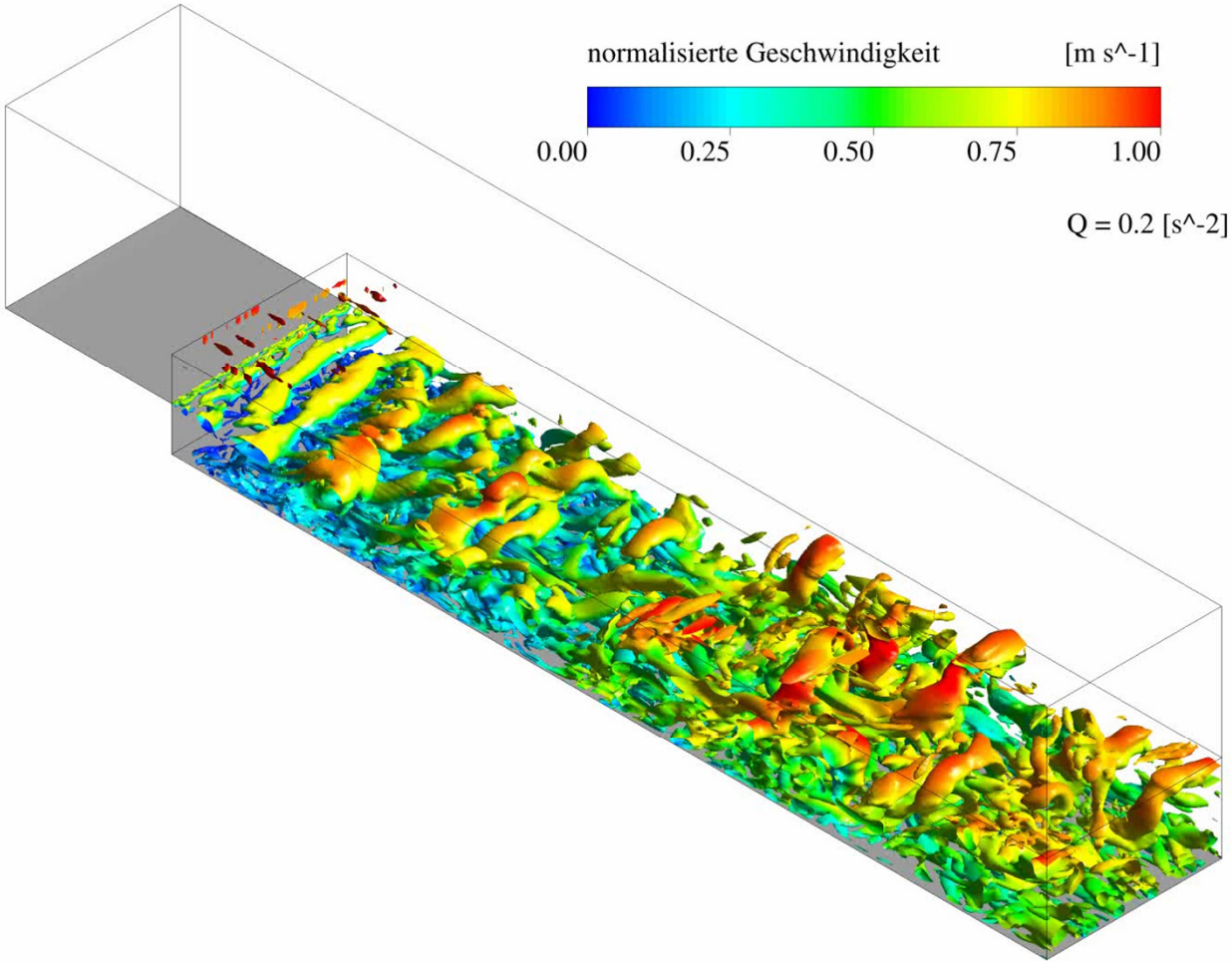
Rückspringende Stufe
Geometrie und numerisches Setup



Rückspringende Stufe:

- SST-SAS
- Re_H = 28 000
- Zeitschrittweite Δt = 20 ms
- Forcing-Interface auf Höhe der Stufenkante
- 1,95 Millionen Knoten
- 80 Knoten in spann-weitiger Richtung
- $y^+<1$
- SST-Grenzschichtprofil am Einlass

Rückspringende Stufe
Visualisierung



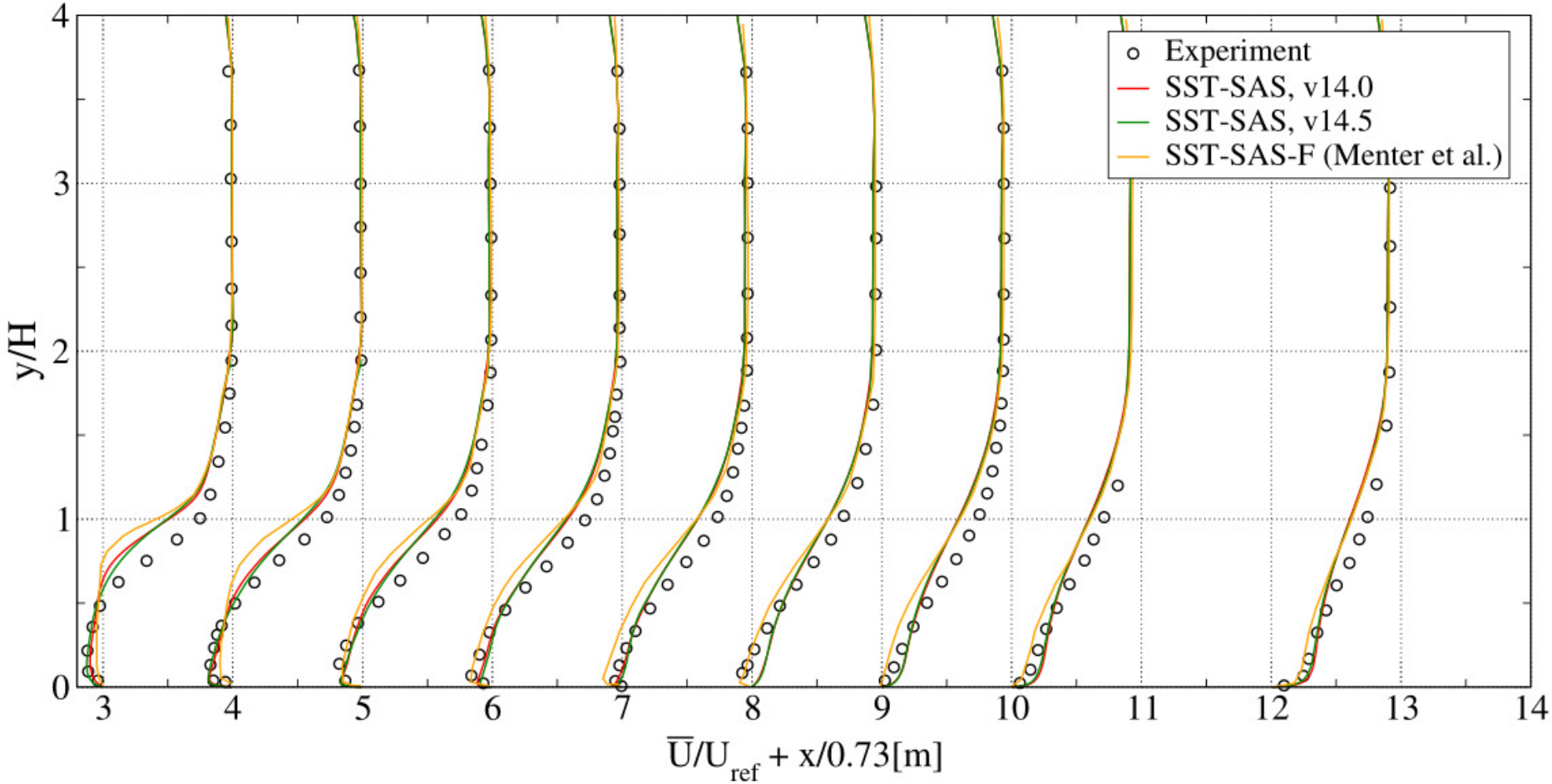
Rückspringende Stufe:

- SST-SAS
- Re_H = 28 000
- Zeitschrittweite Δt = 20 ms
- Forcing-Interface auf Höhe der Stufenkante
- 1,95 Millionen Knoten
- 80 Knoten in spann-weitiger Richtung
- $y^+<1$
- SST-Grenzschichtprofil am Einlass

Rückspringende Stufe
Auswertung

CFX Berlin

Mittlere Geschwindigkeitsprofile



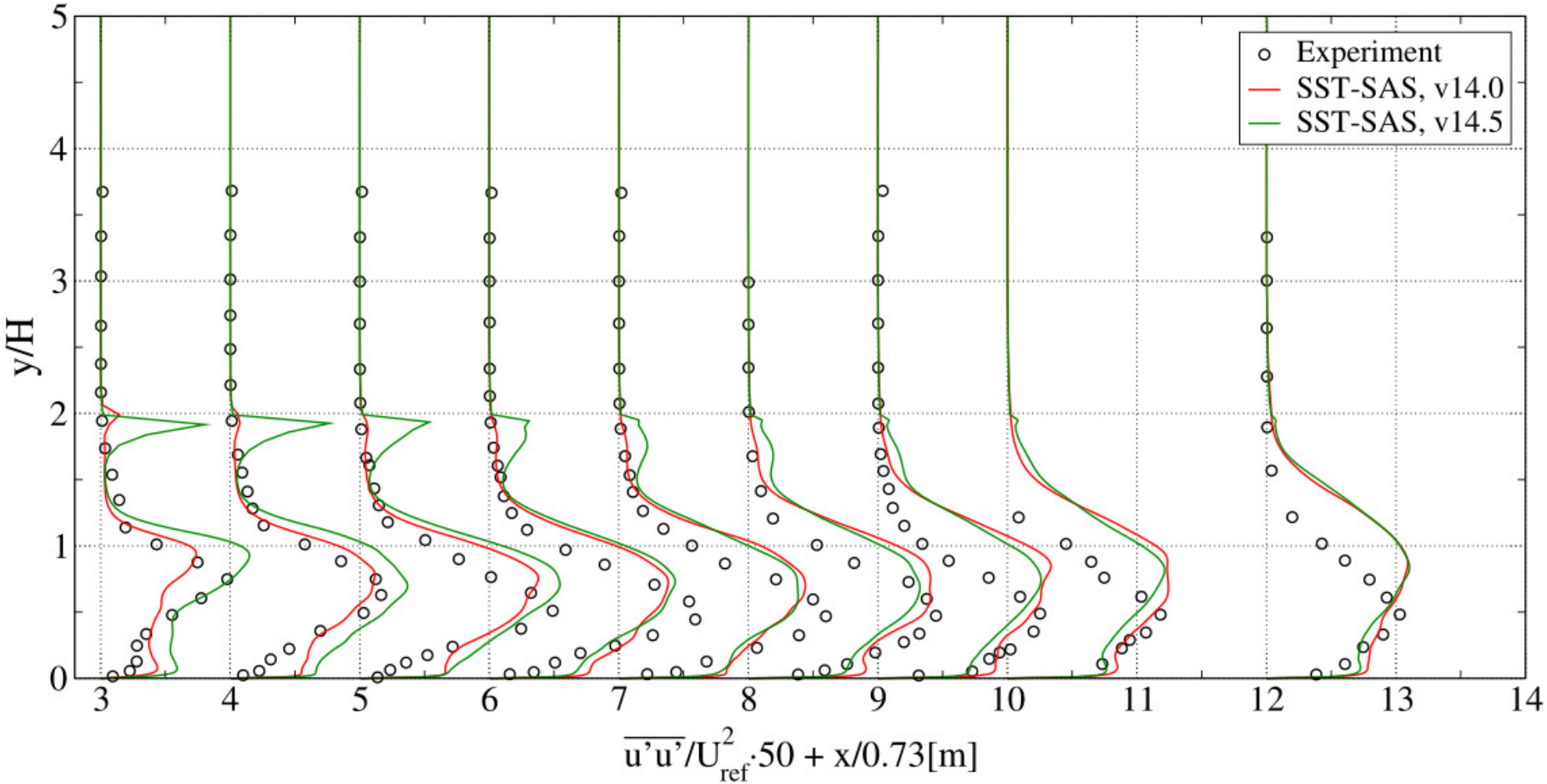
J.C. Vogel, J.K. Eaton. (1985). Combinded Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements downstream of a Backward-Facing Step. Transaction of the ASME, Volume 107, S.922-929

Florian R. Menter, A. Garbaruk, P.Smirnov, D. Cokljat, F. Mathey. (2009). Scale-Adaptive Simulation with Artificial Forcing. Third Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Poland

Rückspringende Stufe
Auswertung

CFX Berlin

Mittlere Schwankungsintensität

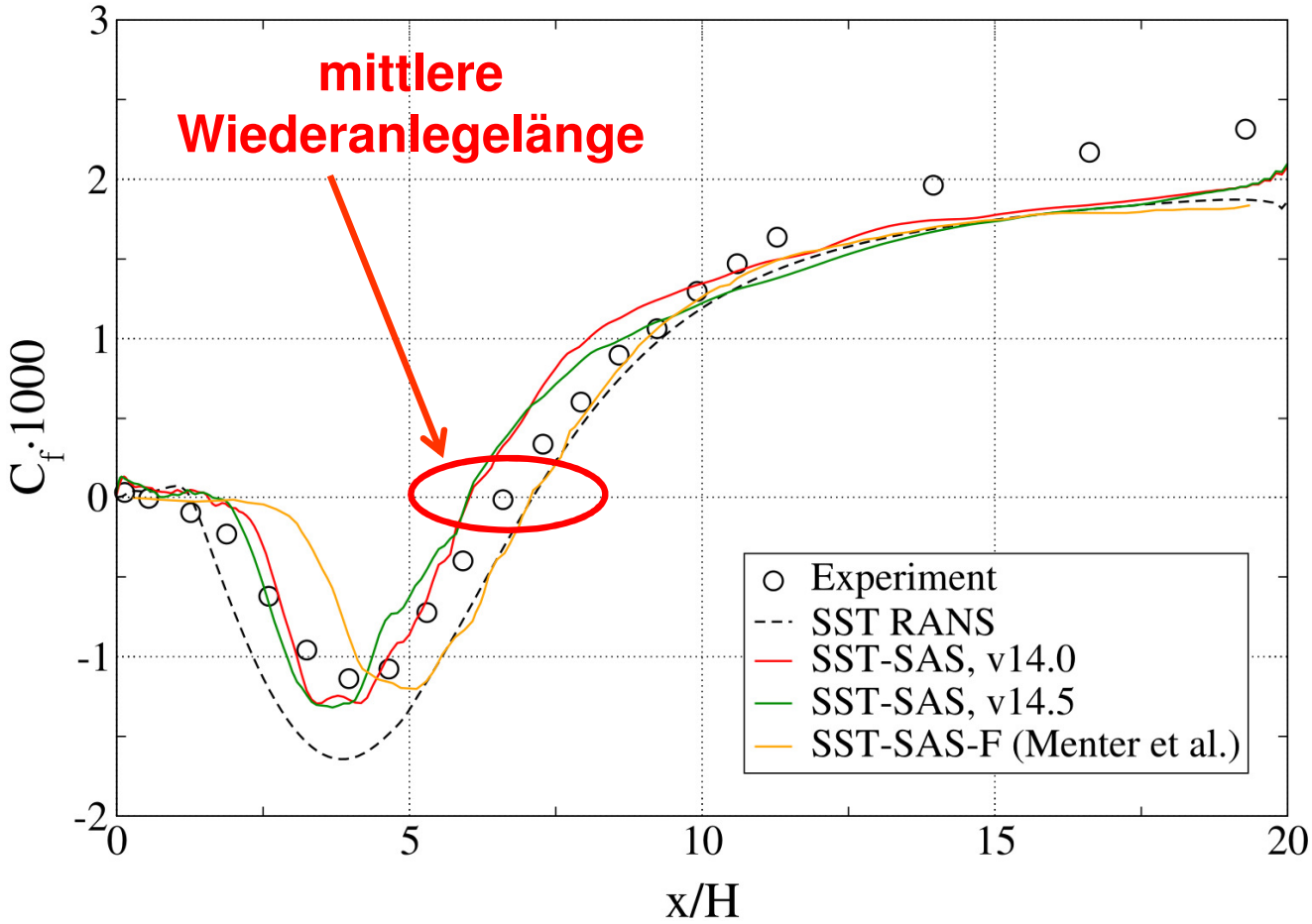


J.C. Vogel, J.K. Eaton. (1985). Combinded Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements downstream of a Backward-Facing Step. Transaction of the ASME, Volume 107, S.922-929

Rückspringende Stufe
Auswertung

CFX Berlin

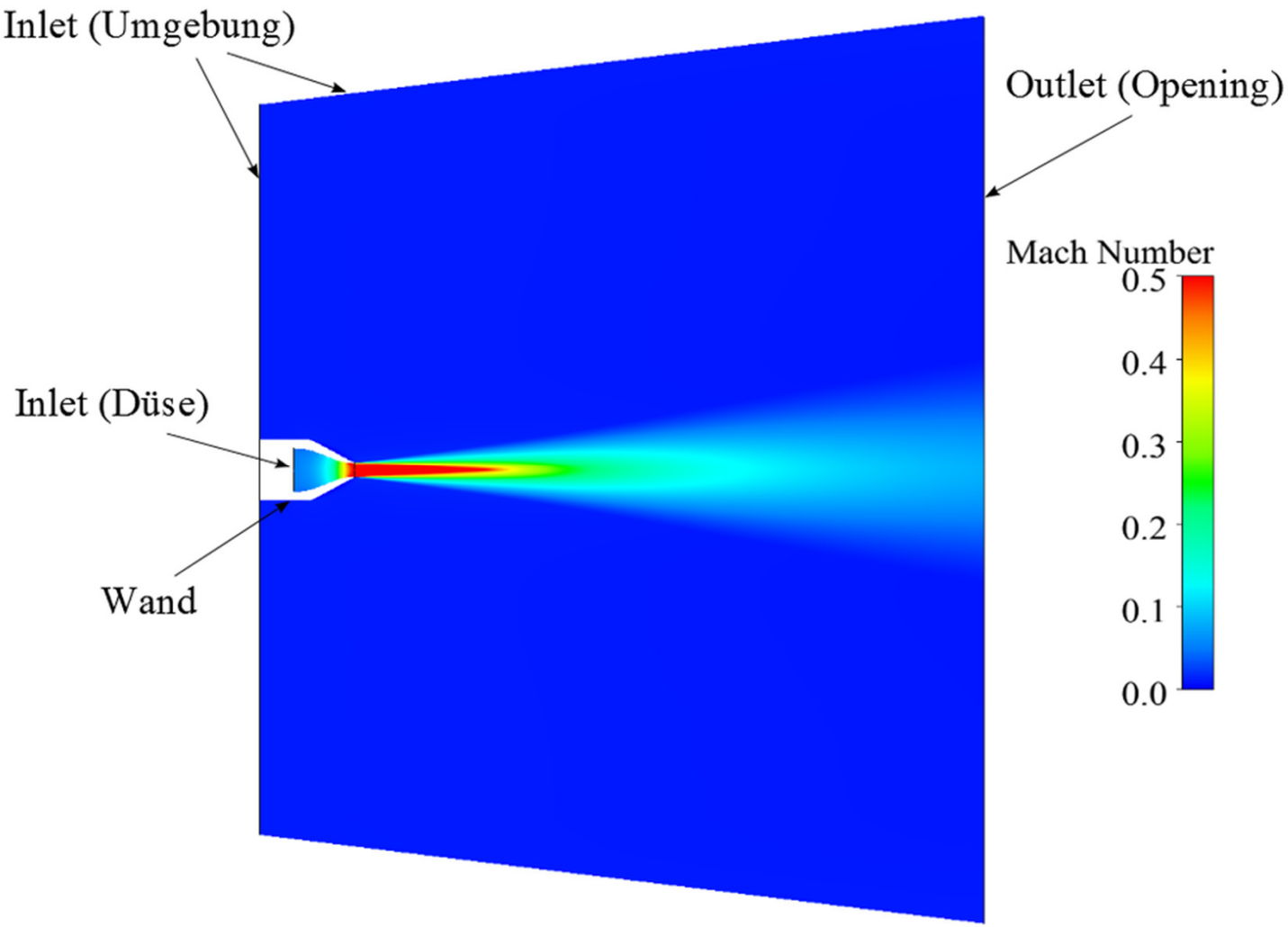
Mittlerer Oberflächenreibungsbeiwert



J.C. Vogel, J.K. Eaton. (1985). Combinded Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements downstream of a Backward-Facing Step. Transaction of the ASME, Volume 107, S.922-929

Florian R. Menter, A. Garbaruk, P.Smirnov, D. Cokljat, F. Mathey. (2009). Scale-Adaptive Simulation with Artificial Forcing. Third Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Poland

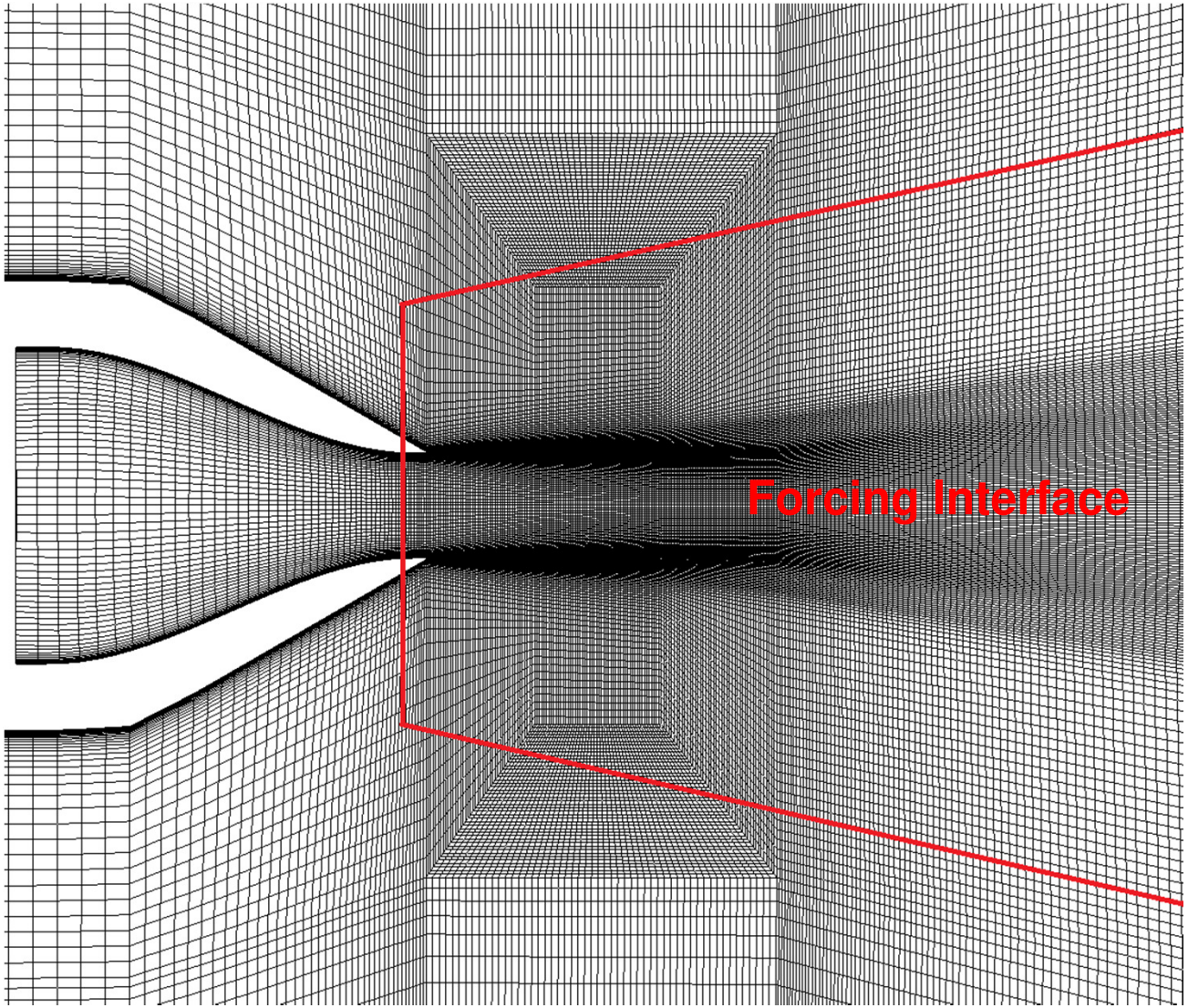
Runder Freistrahl
Geometrie und numerisches Setup I



Runder Freistrahl:

- SST-SAS
- kompressibel
- D = 1 in = 0.0254 m
- Re_D = 200 000
- Ma_D = 0.5
- Gitter:
  - 4,26 Mio. Knoten
  - 112 azimutal
- Zeitschrittweite Δt = 2 µs
- nicht-reflektierende Randbedingung
- Inlet (Düse) Geschwindigkeitsprofil
- Inlet (Umgebung) Ma = 0.01
- Forcing durch HFG

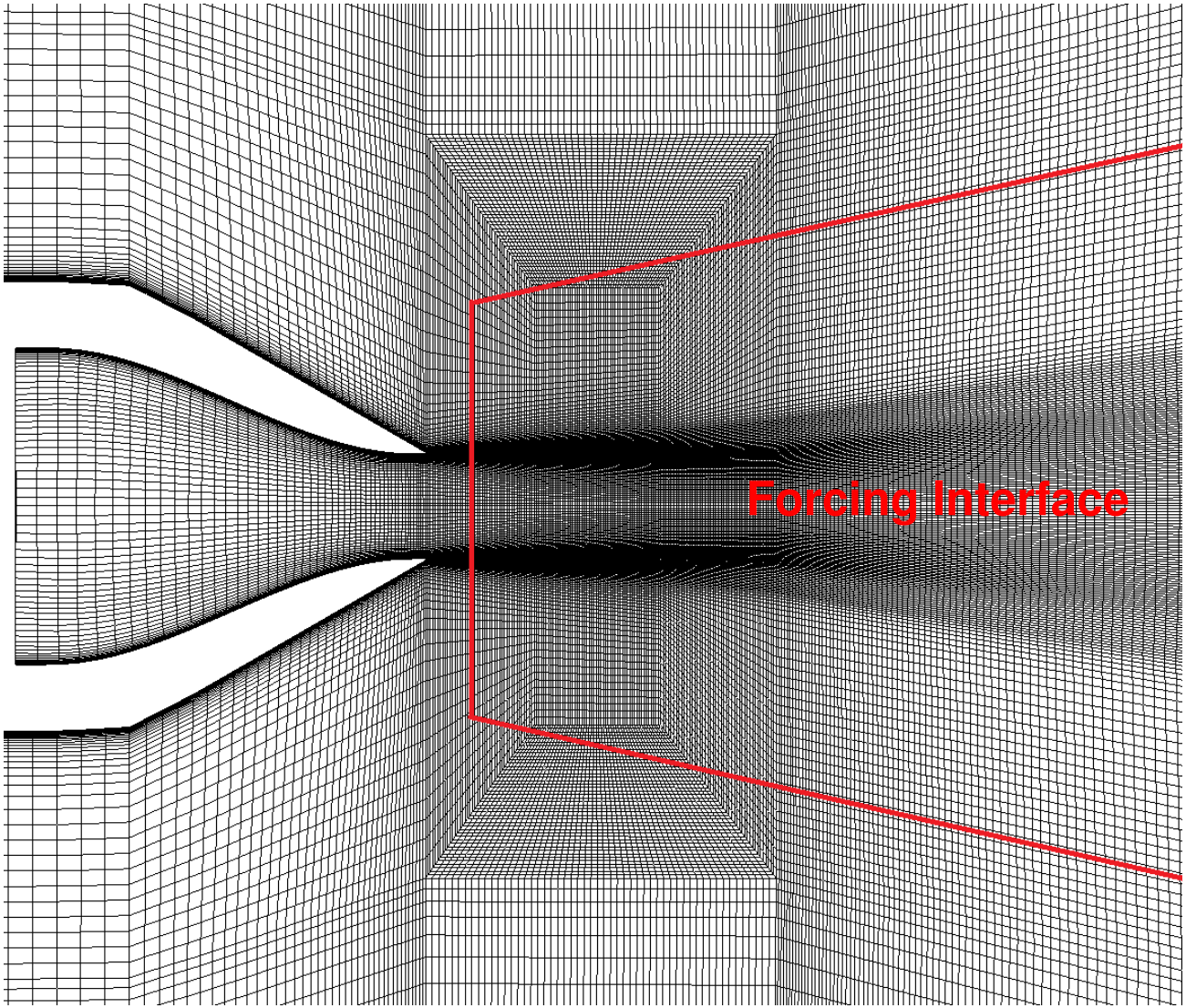
Runder Freistrahl
Geometrie und numerisches Setup II



Problem:

- keine LES-Auflösung der Grenzschicht
- SAS verbleibt im RANS-Modus

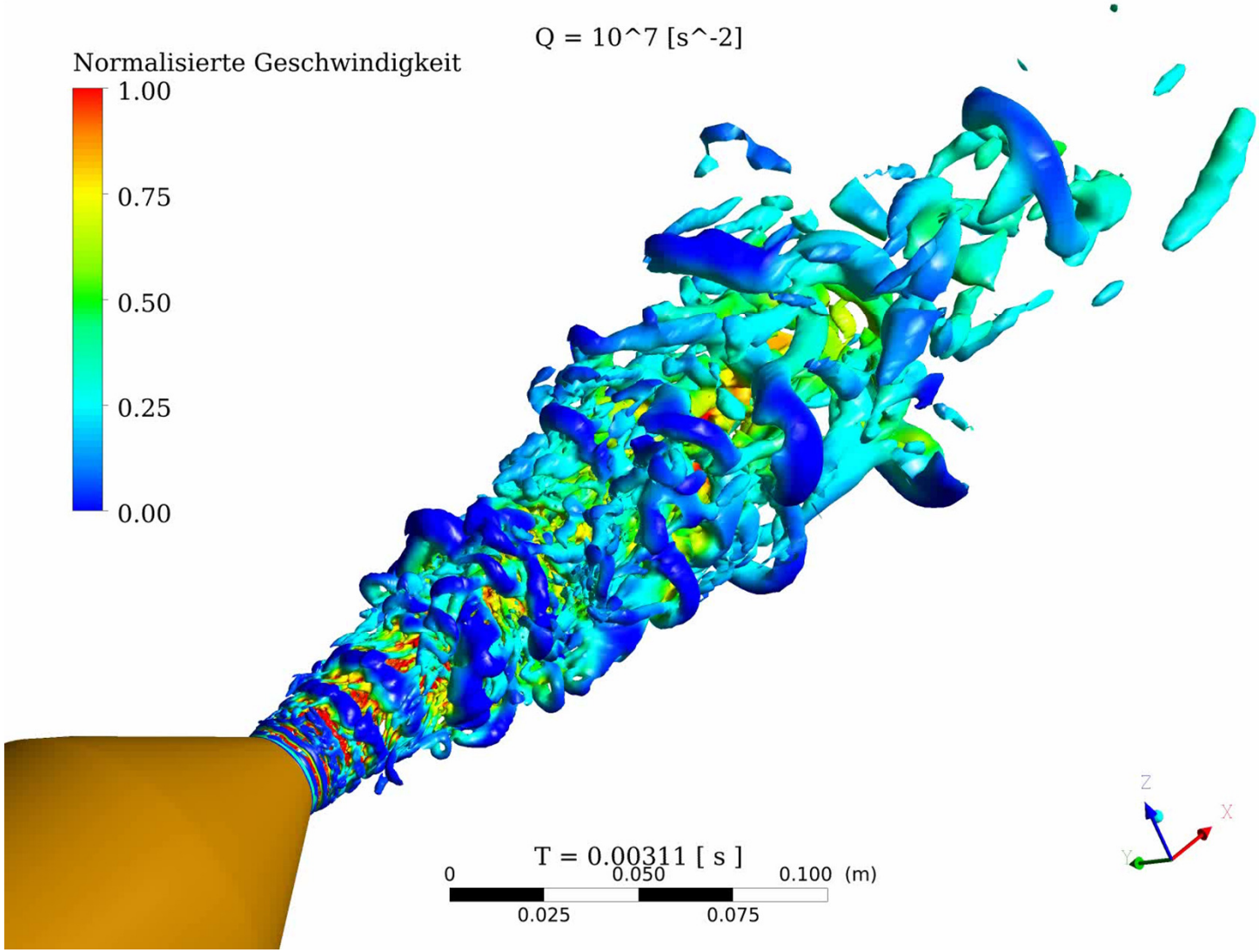
Runder Freistrahl
Geometrie und numerisches Setup III



Kompromiss:

- freie Scherschicht dicker als Grenzschicht
- leider immer noch keine adäquate Auflösung
- Turbulenzstrukturen zu großskalig

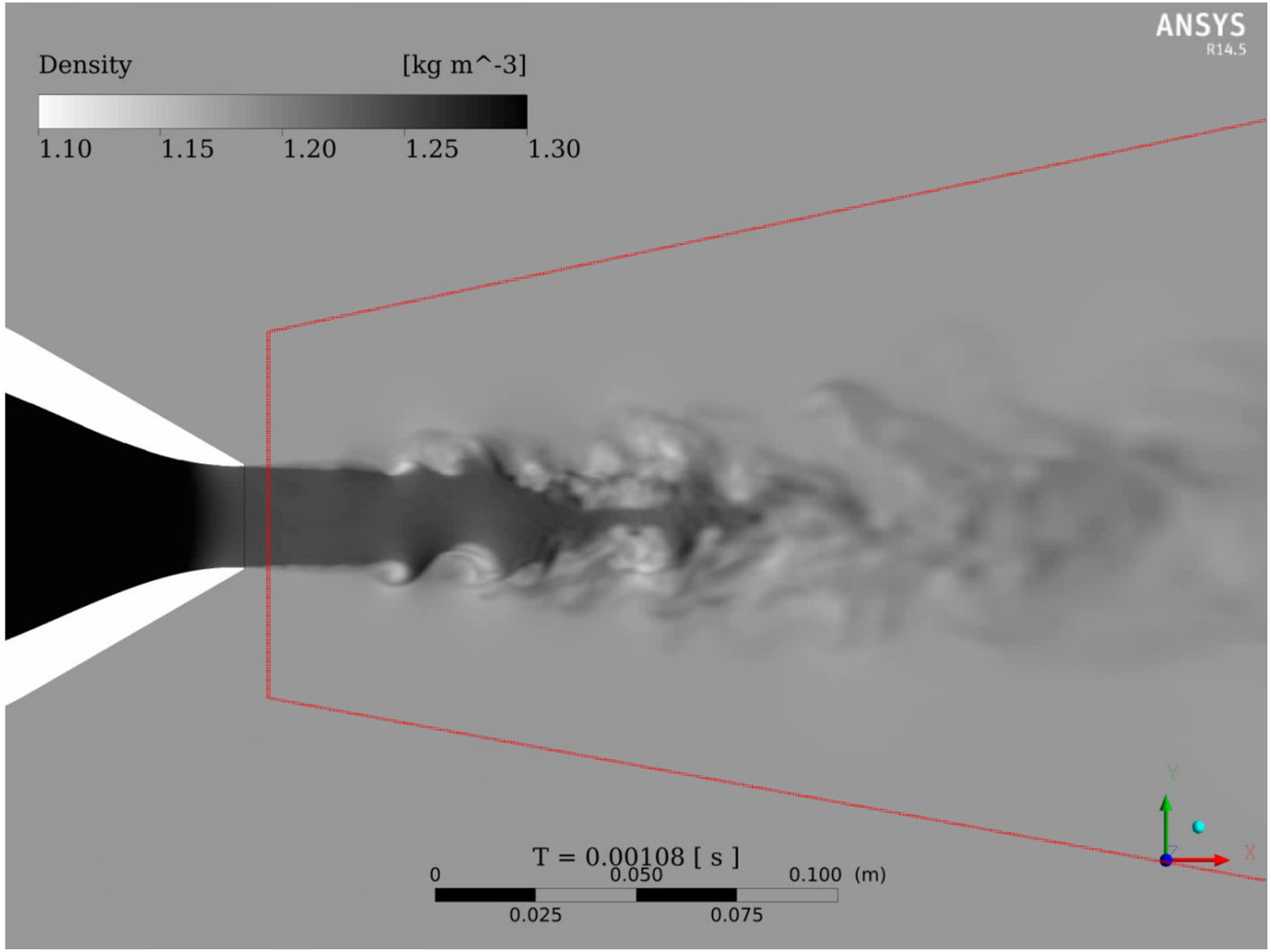
Runder Freistrahl
Visualisierung I



Runder Freistrahl:

- SST-SAS
- kompressibel
- D = 1 in = 0.0254 m
- Re_D = 200 000
- Ma_D = 0.5
- Gitter:
  - 4,26 Mio. Knoten
  - 112 azimutal
- Zeitschrittweite Δt = 2 µs
- nicht-reflektierende Randbedingung
- Inlet (Düse) Geschwindigkeitsprofil
- Inlet (Umgebung) Ma = 0.01
- Forcing durch HFG

Runder Freistrahl
Visualisierung II



Runder Freistrahl:

- SST-SAS
- kompressibel
- D = 1 in = 0.0254 m
- Re_D = 200 000
- Ma_D = 0.5
- Gitter:
  - 4,26 Mio. Knoten
  - 112 azimutal
- Zeitschrittweite Δt = 2 µs
- nicht-reflektierende Randbedingung
- Inlet (Düse) Geschwindigkeitsprofil
- Inlet (Umgebung) Ma = 0.01
- Forcing durch HFG

Zusammenfassung

CFX Berlin

- Scale Adaptive Simulation
  - kann exzellente Ergebnisse bei global instabilen Strömungen liefern
  - Erfolgreiche Interaktion mit dem γ-Re_θ-Transitionsmodell
  - Obwohl auf RANS-Basis, LES-ähnliches Verhalten

- Harmonic Flow Generator
  - kann den Einsatzbereich der SAS auf lokal instabile Strömungen erweitern
  - LES-adäquate Auflösung erforderlich
  - Stellt in kompressiblen Strömungen Lärmquelle dar
  - Bei lokal instabilen Strömungen auch Nutzung von LES und (ID)DES möglich

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Gregor Neuber: neuber@mailbox.tu-berlin.de
Andreas Spille-Kohoff: Andreas.Spille@cfx-berlin.de