Unerwünschte Reflexionen von Druckschwankungen an Strömungsrändern und deren Verminderung

Farai Hetze

Technische Universität Berlin

Dr. Andreas Spille-Kohoff

CFX Berlin Software GmbH

Inhalt

CFX BERLIN

- Motivation:
  - Warum nichtreflektierende Randbedingungen?
  - Nichtreflektierende Randbedingung in ANSYS CFX
- Grundlagen nichtreflektierender Randbedingungen
  - Charakteristische Zerlegung
  - Formalismus von Poinsot und Lele (1992)
- Auswertung der Vorstudien am 1D-Kanal
- Simulation einer Drehschieberpumpe mit nichtreflektierenden Randbedingungen

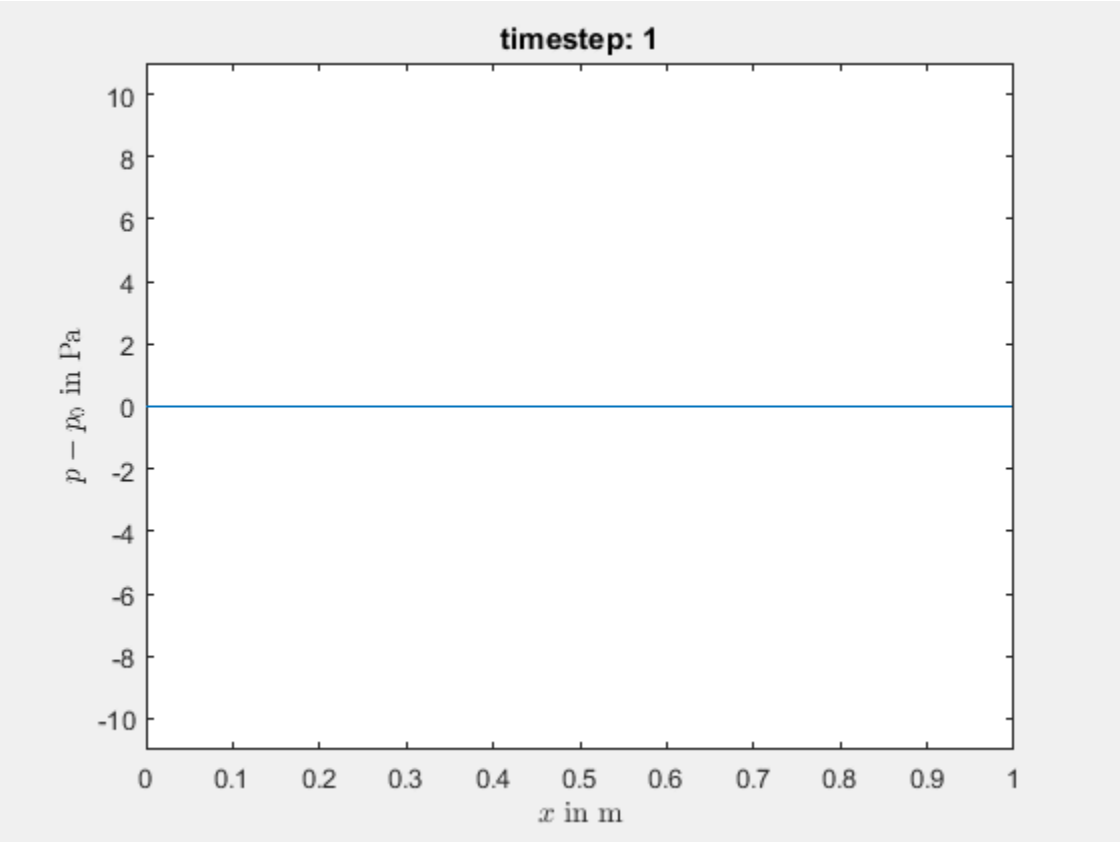
Motivation: Offene Strömungsränder

CFX BERLIN

- Für Simulationen müssen die untersuchten Systeme auf handhabbare Größe reduziert werden.
- Randbedingungen an Strömungsrändern werden oft als Dirichlet-Randbedingung durch das Setzen einer physikalischen Größe modelliert.
- Typische Beispiele
  - Einlass: Geschwindigkeit und Temperatur, Massenstrom…
  - Auslass: Druck
- Die resultierenden Randbedingung sind akustisch reflektierend, da Schnelle- und Druckknoten eine Wandbedingung bilden.
- Da bei der Verwendung von Diskretisierungsschemata mit geringer numerischer Dissipation die Schallwellen nicht abgebaut werden, verbleiben die Schallwellen im System.
- Problem: In ANSYS CFX eingebaute nichtreflektierende Randbedingung (Beta Feature) funktioniert in einigen Bereichen, kann jedoch nicht für die Simulation von Kompressoren mit TwinMesh eingesetzt werden.

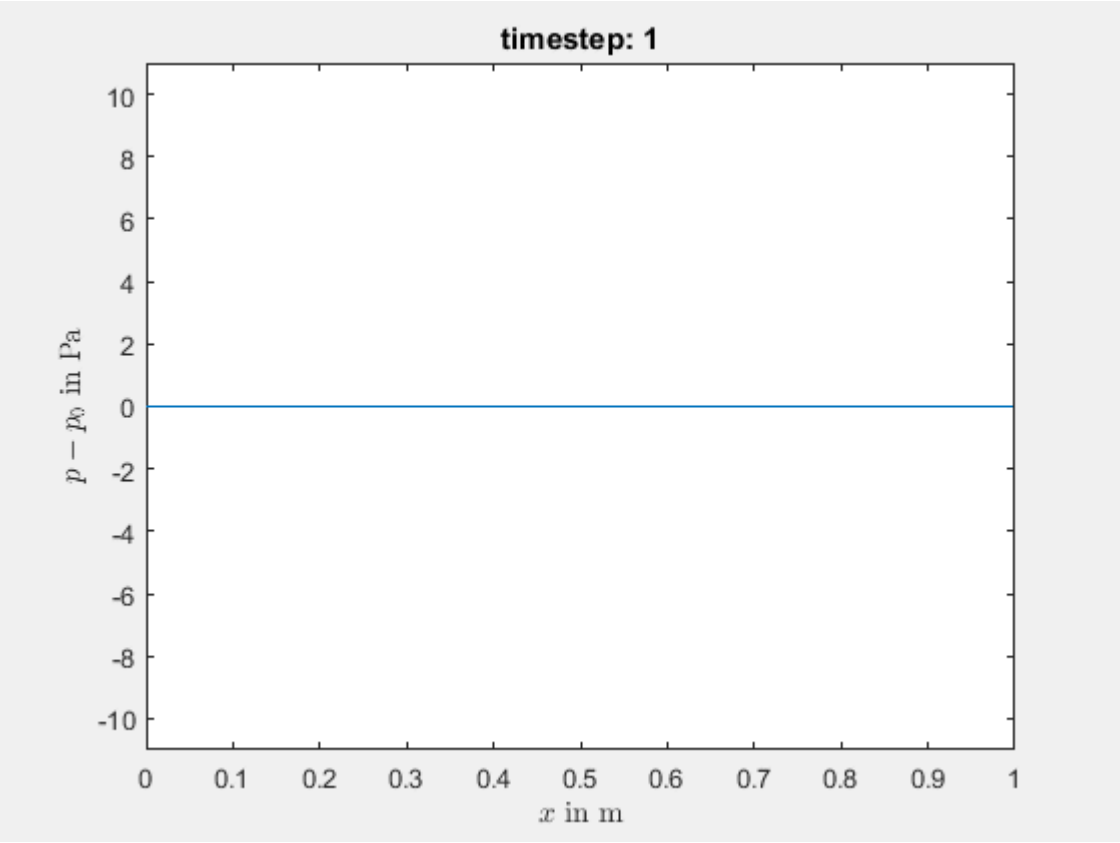
Reflexion am Strömungsrand – Beispiel I

- Ideal schallweiche Reflexion an einer Druckrandbedingung



Reflexion am Strömungsrand – Beispiel II

- Perfekt nichtreflektierende Druckrandbedingung



Charakteristische Zerlegung nach Thompson (1990)

CFX BERLIN

- 1D-Eulergleichung

$$\partial_t \widetilde{U} + \partial_x F^x = 0$$

mit dem Zustandsvektor $\widetilde{U} = (\rho,\ \rho u,\ \rho e_t)^T$

und dem Flussvektor $F^x = \left(\rho u, \rho u u + p, \rho u \left(e_t + \frac{p}{\rho}\right)\right)^T$

- Umschreibung zu einem Ausdruck mit Zustandsvektor aus primitiven Variablen mit $U = (\rho, u, p)^T$

Anwendung der Kettenregel

$$\partial_t \widetilde{U}_i = \underbrace{\frac{\partial \widetilde{U}_i}{\partial U_j}}_{\mathbf{P}} \partial_t U, \qquad \partial_x F_i = \underbrace{\frac{\partial F_i}{\partial U_j}}_{\mathbf{Q}} \partial_x U$$

Quasilineare Form mit $\mathbf{A} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{Q}$

$$\partial_t U + \mathbf{A} \partial_x U = 0$$

Charakteristische Zerlegung nach Thompson (1990)

CFX BERLIN

- Elemente des Operators $\mathbf{A}$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} u & \rho & 0 \\ 0 & u & \frac{1}{\rho} \\ 0 & \gamma p & u \end{pmatrix}$$

- Diagonalisierung

$$\Lambda = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{S} = \begin{pmatrix} - & l_1^T & - \\ - & l_2^T & - \\ - & l_3^T & - \end{pmatrix} \mathbf{A} \begin{pmatrix} | & | & | \\ r_1 & r_2 & r_3 \\ | & | & | \end{pmatrix}$$

- Darstellung in Eigenvektorbasis

$$\mathbf{S}^{-1}\partial_t U + \Lambda \mathbf{S}^{-1}\partial_x U = 0$$

- Mit den Komponenten

$$l_i^T \partial_t U + \lambda_i l_i^T \partial_x U = 0$$

mit $i = 1, 2, 3$

- Definiere $\mathcal{L}_i \equiv \lambda_i l_i^T \partial_x U$

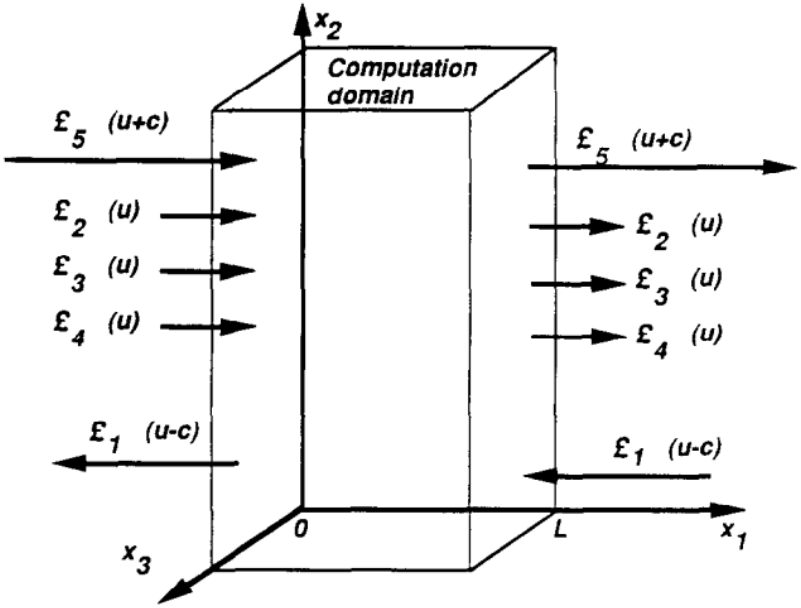
Randbedingung aus dem NSCBC-Schema

CFX BERLIN

- Mit $\mathcal{L}_i \equiv \lambda_i l_i^T \partial_x U$ lassen sich die Eulergleichungen schreiben

$$\partial_t U + \mathbf{S}\mathcal{L} = 0$$

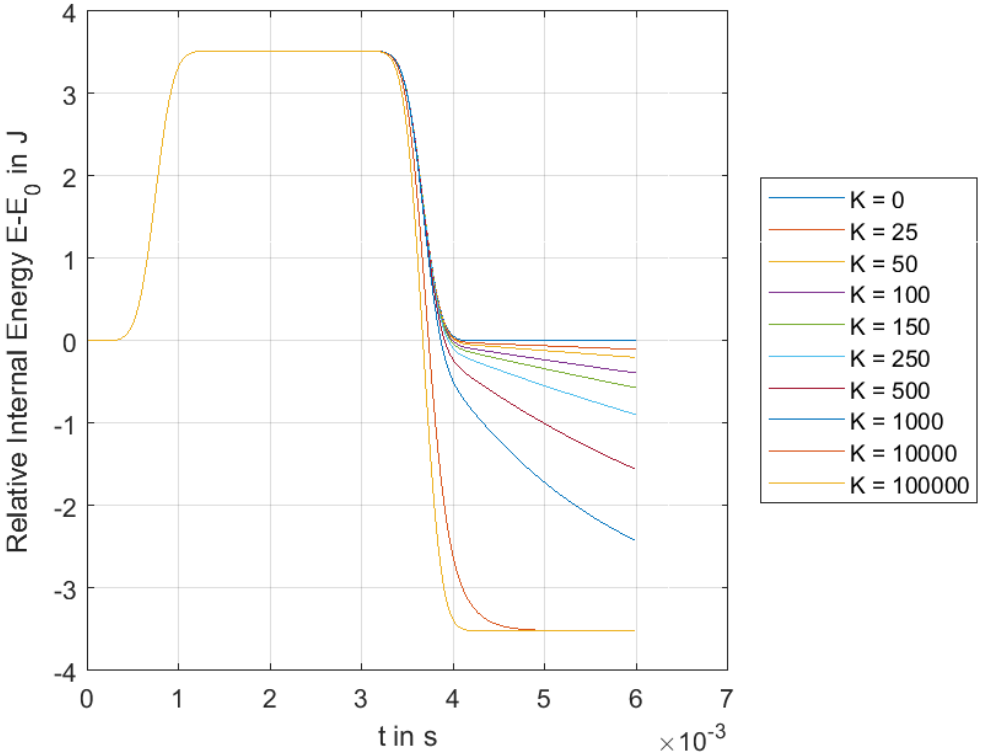
- Manipulation der ein- und auslaufenden charakteristischen Wellen möglich
- Einführung des Navier-Stokes-Characteristic-Boundary-Conditions-Formalismus (NSCBC) durch Poinsot und Lele (1992)
- Baukasten für Randbedingungen mittels charakteristischer Zerlegung
- „Klassische“ nichtreflektierende Druckrandbedingung: $\mathcal{L}_1 = K(p - p_\infty)$
- Vorgabe des Drucks an einem vom Auslass entfernten Ort p_∞
- weiche numerische Randbedingungen für sämtliche Erhaltungsgleichungen
- Transport der Druckinformation über Schallwellen



Quelle: Poinsot und Lele (1992)

Untersuchung der nichtreflektierenden Randbedingung

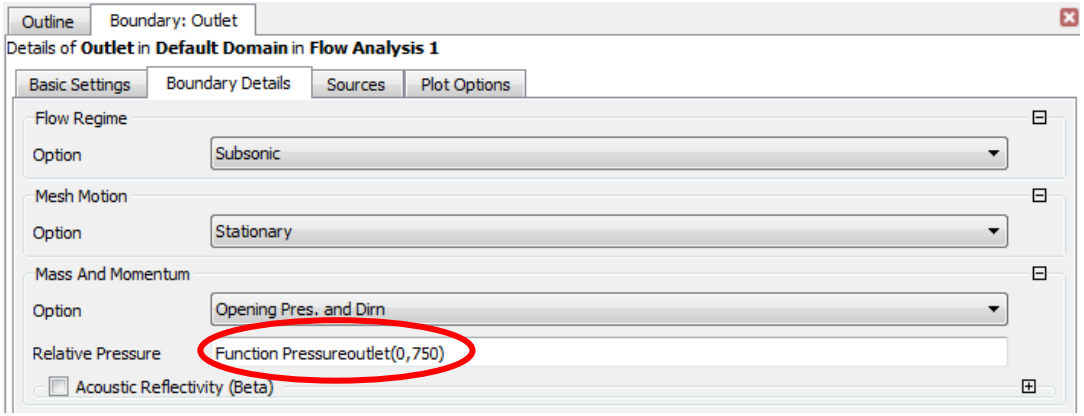
- Druckrandbedingung mit $\mathcal{L}_1 = K(p - p_\infty)$ mit dem Koeffizienten $K = \frac{\sigma(1-Ma^2)c}{L}$
- Parameterstudie für den akustischen Puls



Randbedingung mittels User Function

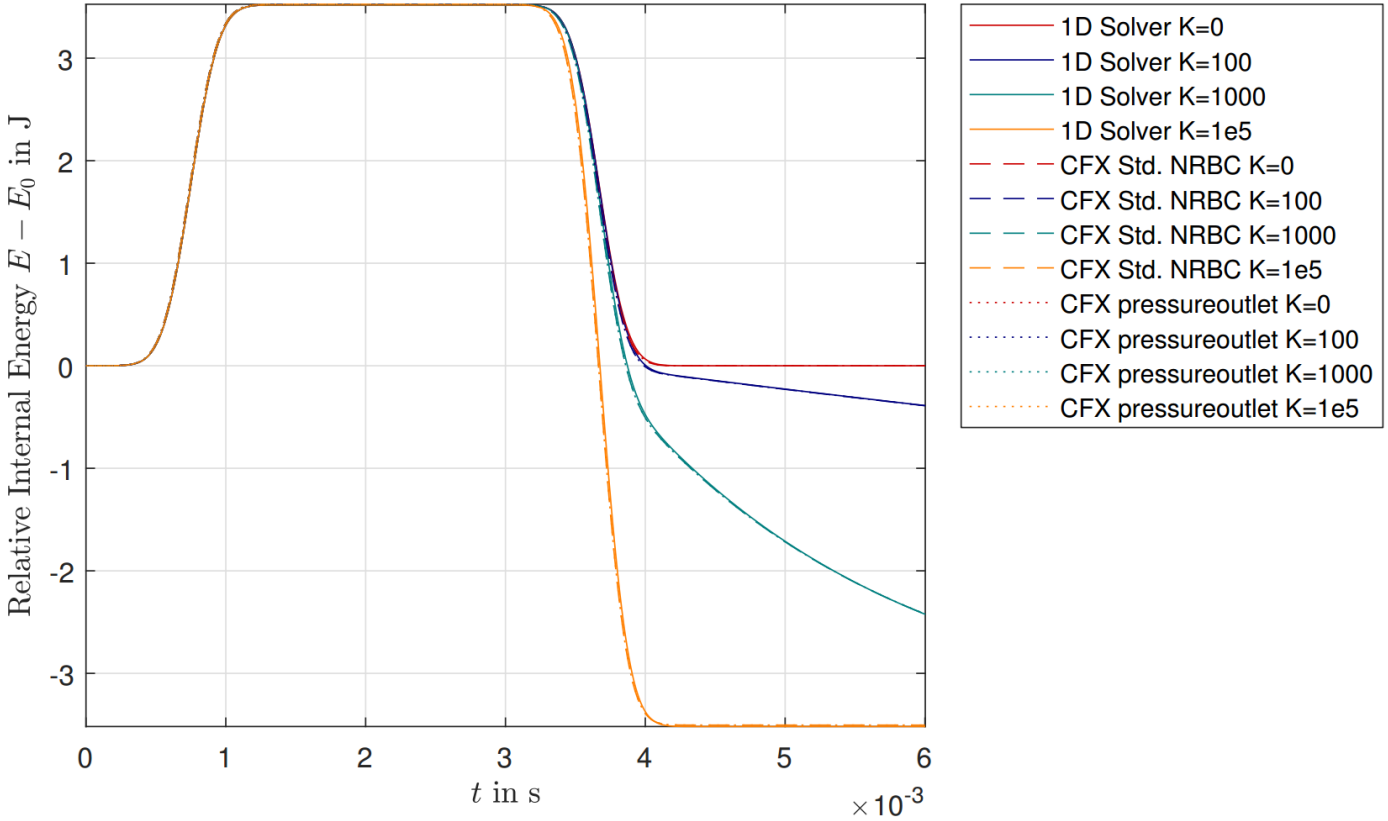
CFX BERLIN

- Nichtreflektierende Randbedingung in ANSYS CFX hat Probleme bei:
  - Austritt von Wirbeln am Auslass
  - Grenzschichtverhalten
  - Nachlauf/Jet am Auslass
- Implementierung einer Randbehandlung als User Function mit folgenden Zielen:
  - Verifikation der bereits in ANSYS CFX implementierten Randbedingung
  - Erleichterte Modifikation, um die Berechnung von Kompressoren mit TwinMesh zu ermöglichen
- Lässt sich in ANSYS CFX Pre als Druck für Randbedingungen angeben



Verifikation der Randbehandlung

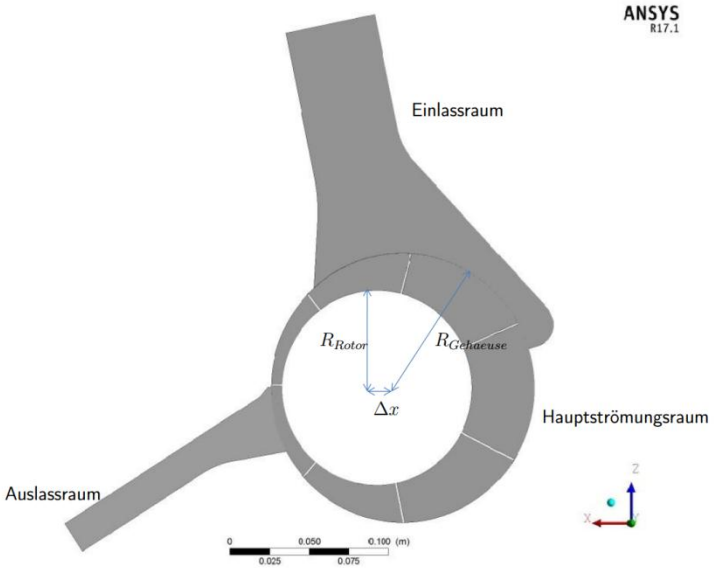
- Vergleich der User Function (CFX pressureoutlet) mit der nichtreflektierenden Behandlung aus ANSYS CFX (CFX Std. NRBC) und dem 1D-Finite-Differenzen-Löser

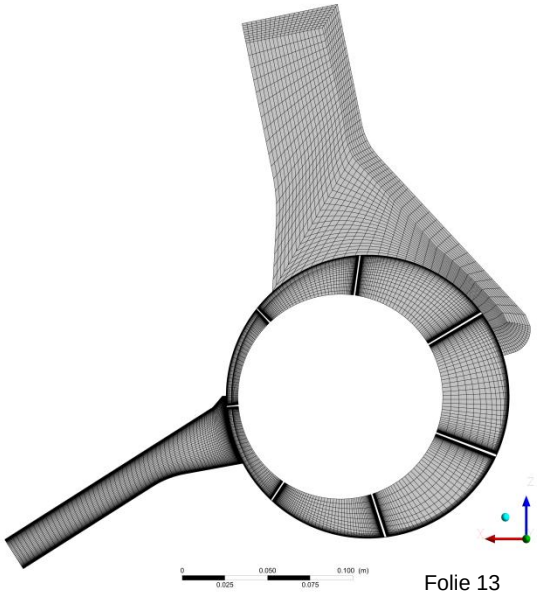


Simulation einer Drehschieberpumpe

CFX BERLIN

- Quasi-2D-Netz mit Netzbewegung über Moving-Mesh-Ansatz
  - 94 110 Knoten
  - 45 585 Elemente
- Fluid:
  - Luft als ideales Gas
- Randbedingungen:
  - Adiabate No-Slip-Wände
  - XZ-Flächen: Symmetrien
  - GGI-Interfaces zwischen den Domains
  - Einlass
    - Opening mit $p_{in} = 20\ \mathrm{kPa}$
  - Auslass:
    - Opening mit $p_{out} = 101{,}325\ \mathrm{kPa}$
  - Rotationsgeschwindigkeit
    - $n = 2380\ \mathrm{RPM}$

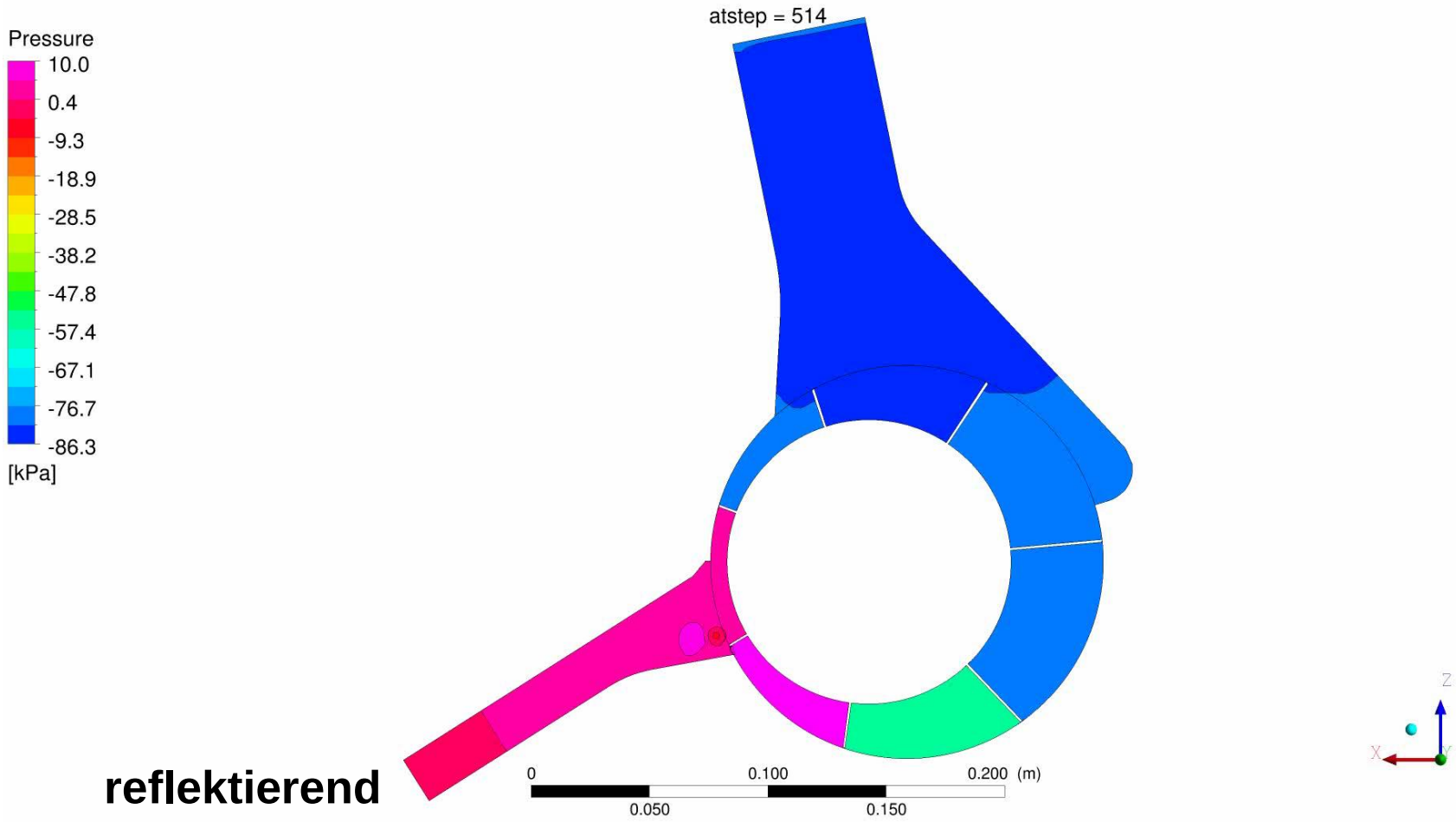




Reflektierende Randbedingungen
Konturlinien des Druckfelds

CFX BERLIN

reflektierend

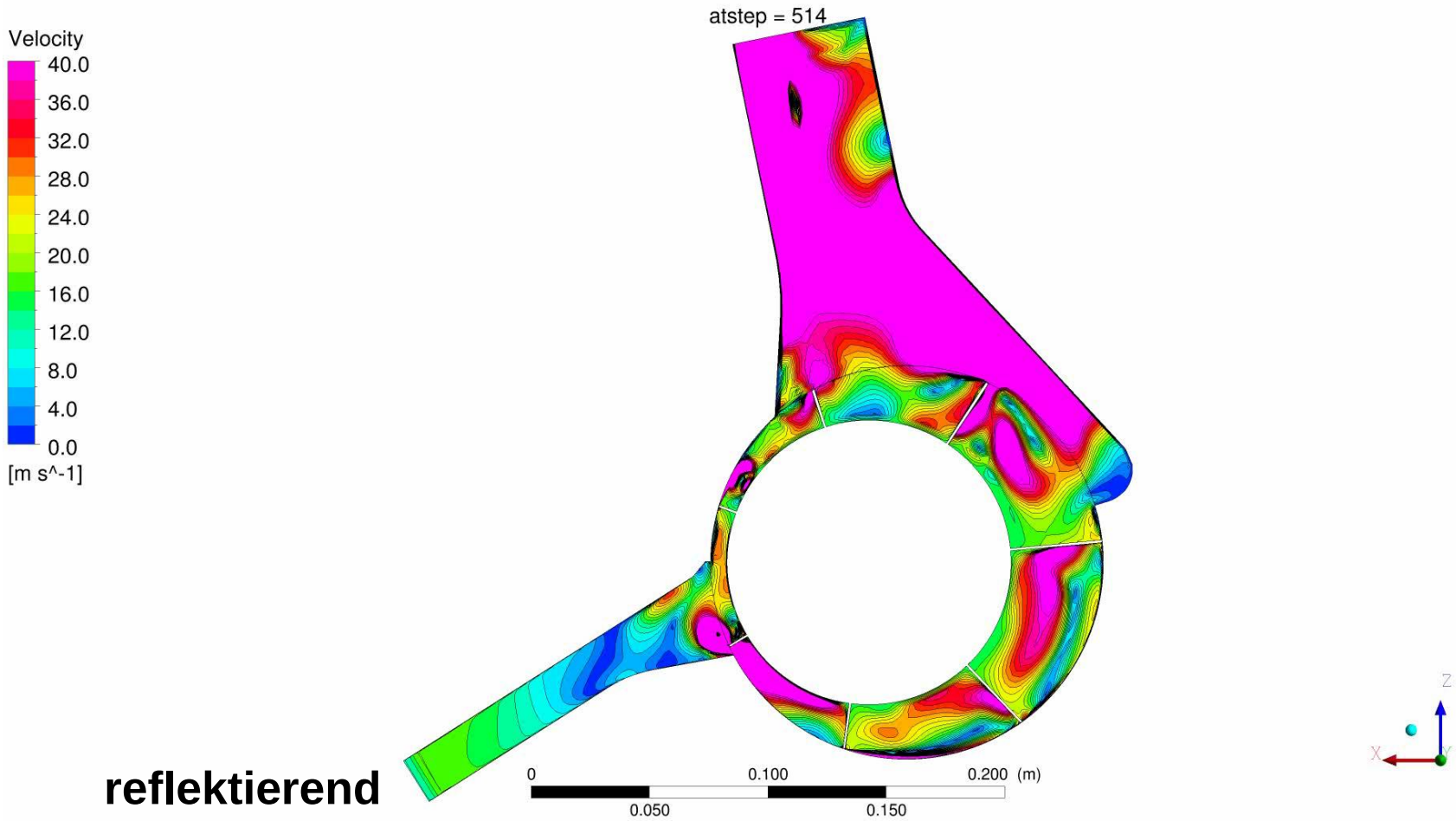


reflektierend

Reflektierende Randbedingungen
Konturlinien des Geschwindigkeitsfelds

CFX BERLIN

reflektierend

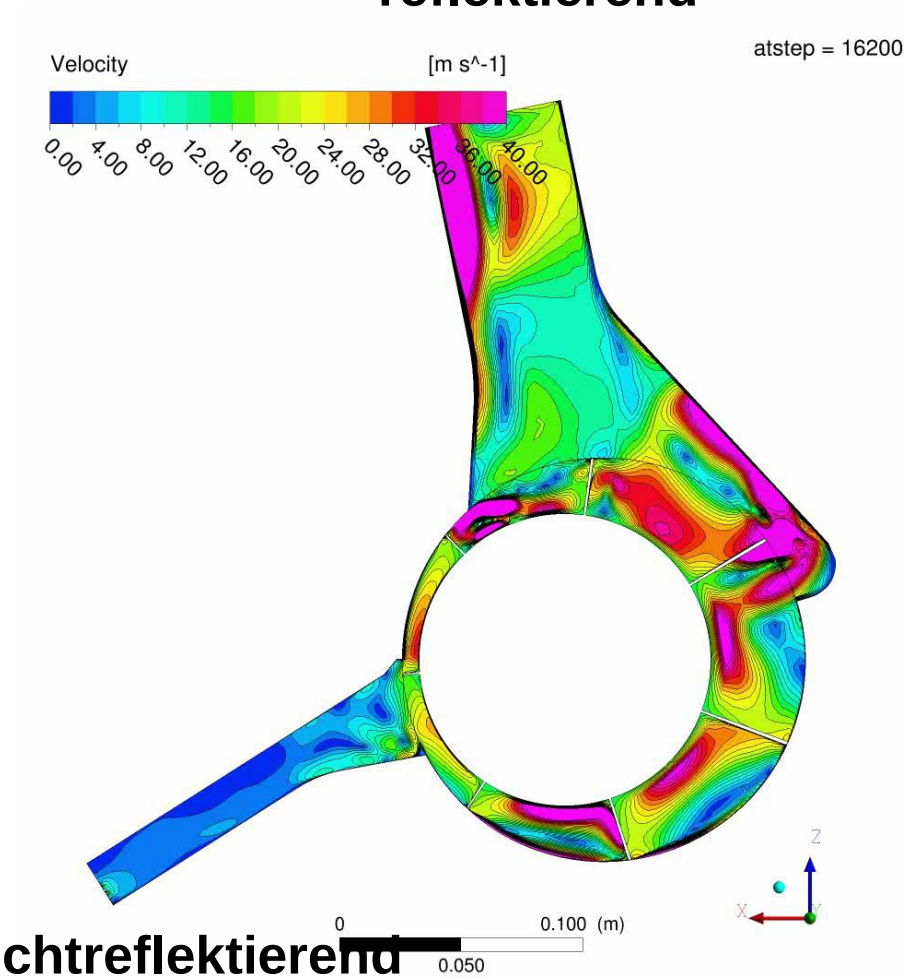


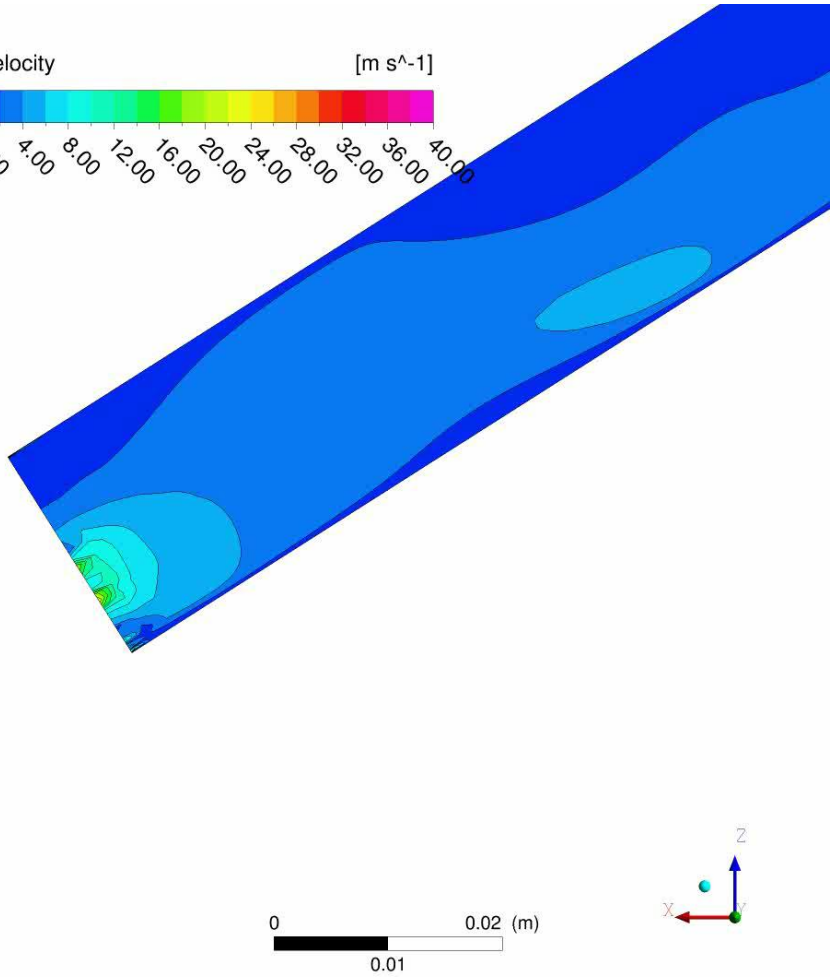
reflektierend

Nichtreflektierende RB als User Function
Konturlinien des Geschwindigkeitsfelds

CFX BERLIN

reflektierend



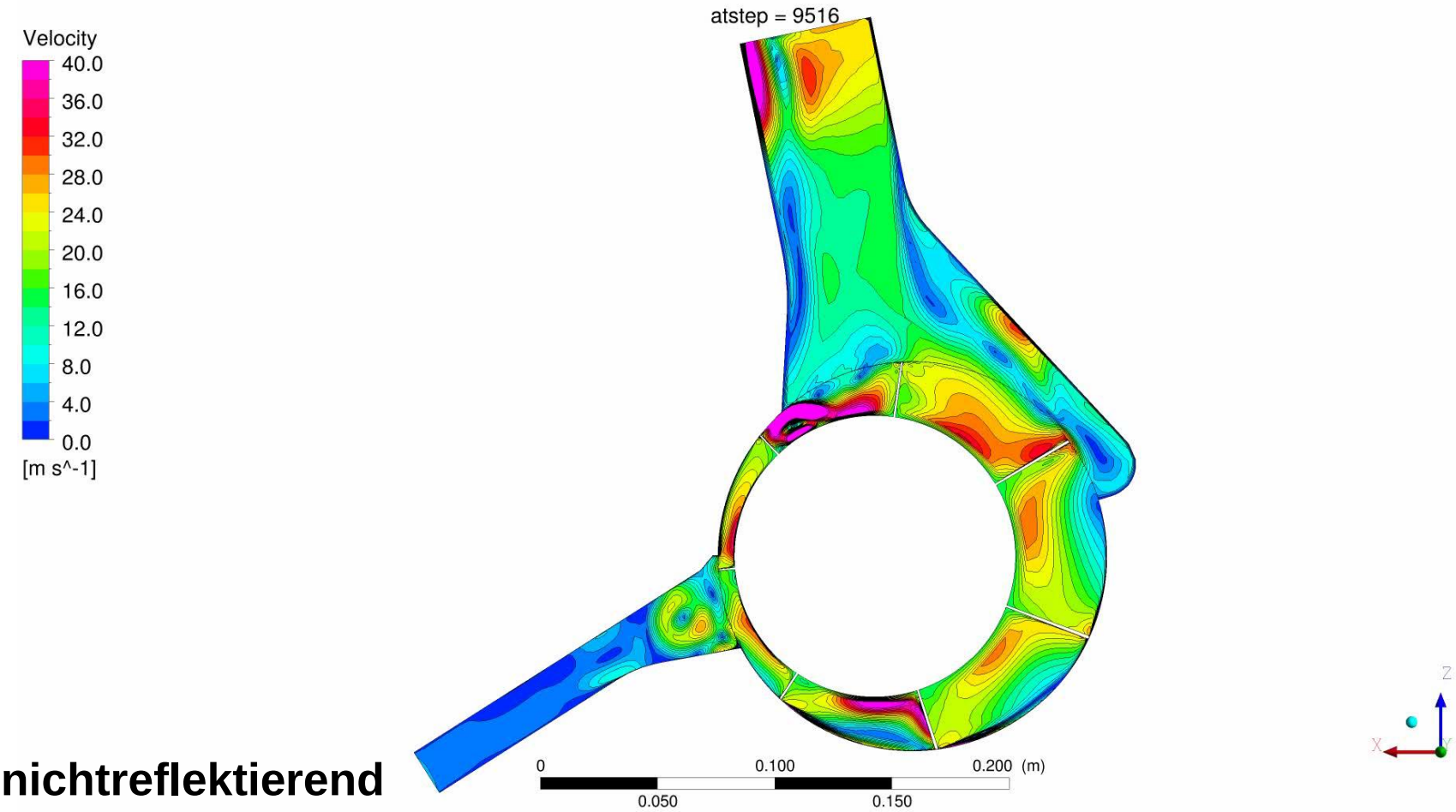


nichtreflektierend

Nichtreflektierende RB mit Mittelung
Konturlinien des Geschwindigkeitsfelds

CFX BERLIN

nichtreflektierend

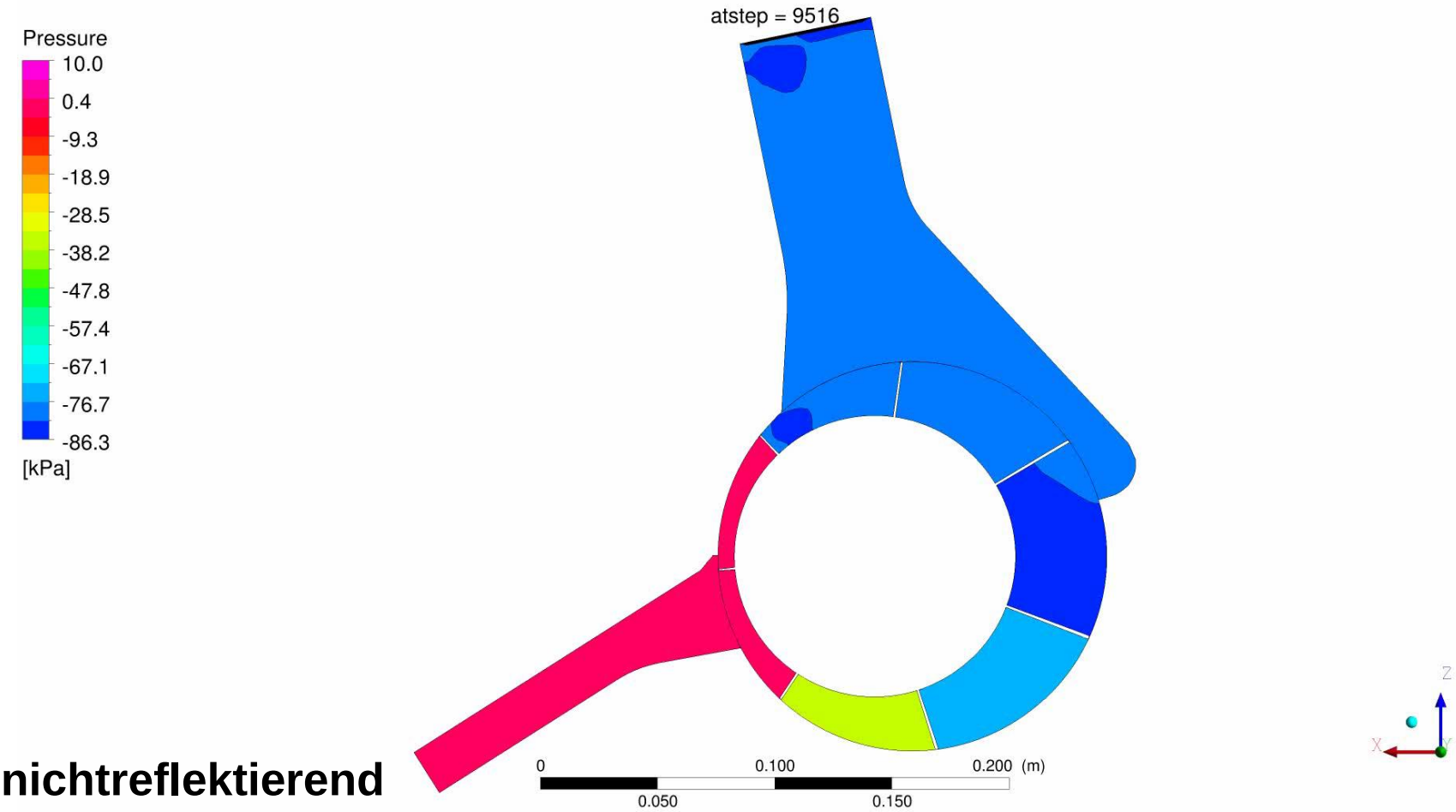


nichtreflektierend

Nichtreflektierende RB mit Mittelung
Konturlinien des Druckfelds

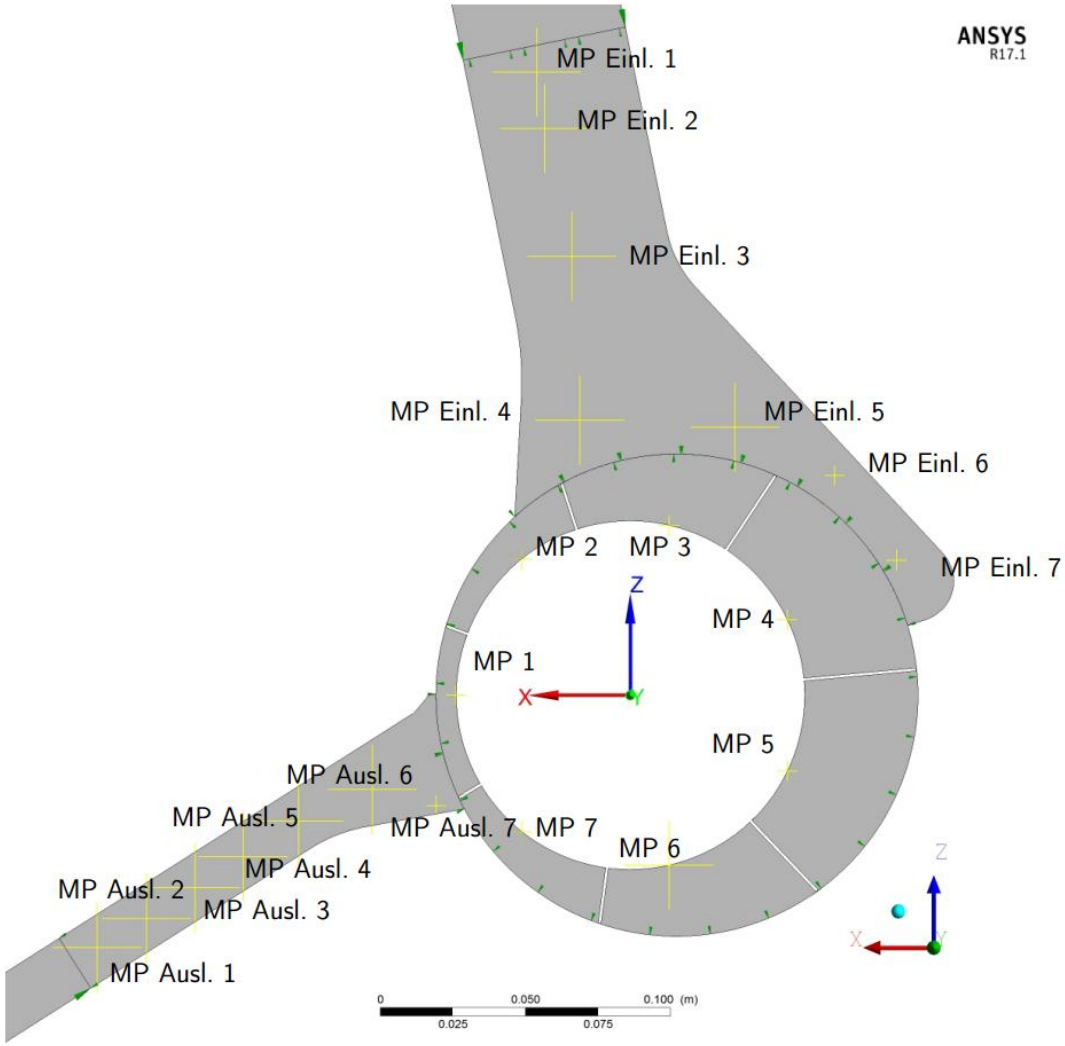
CFX BERLIN

nichtreflektierend



nichtreflektierend

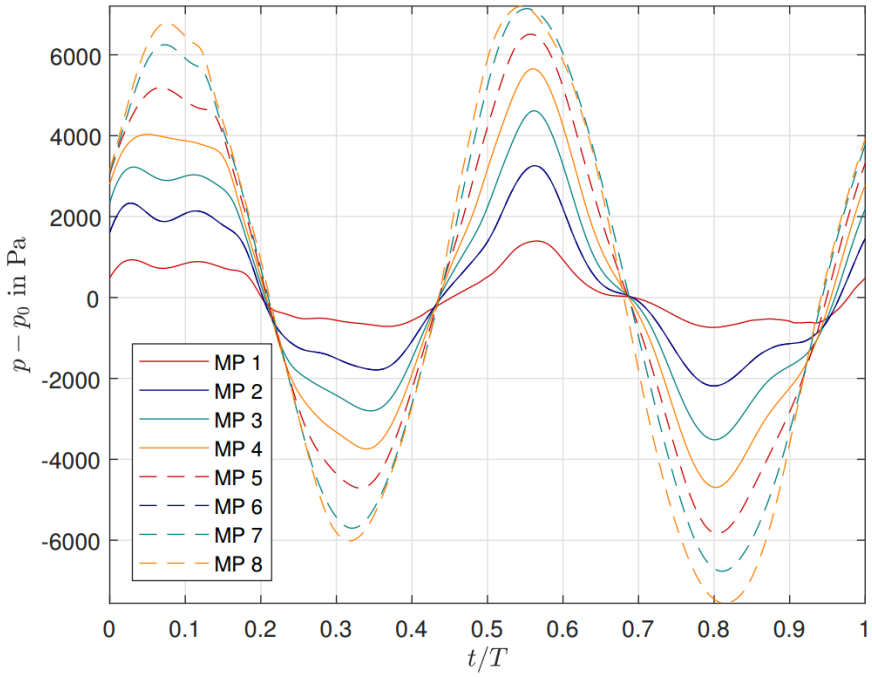
Monitorpunkte an der Drehschieberpumpe



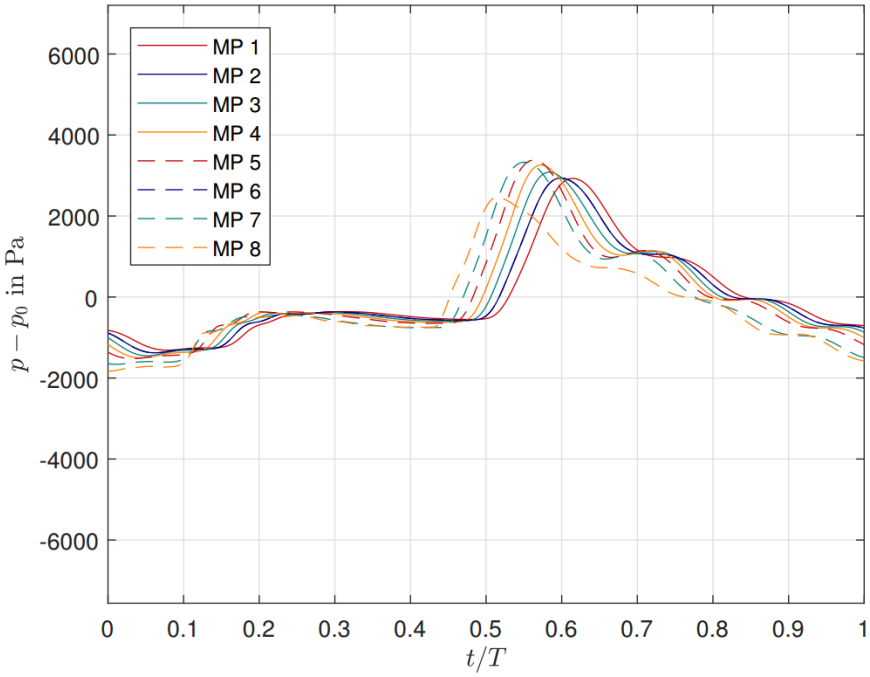
Drucksonden im Auslassrohr

CFX BERLIN

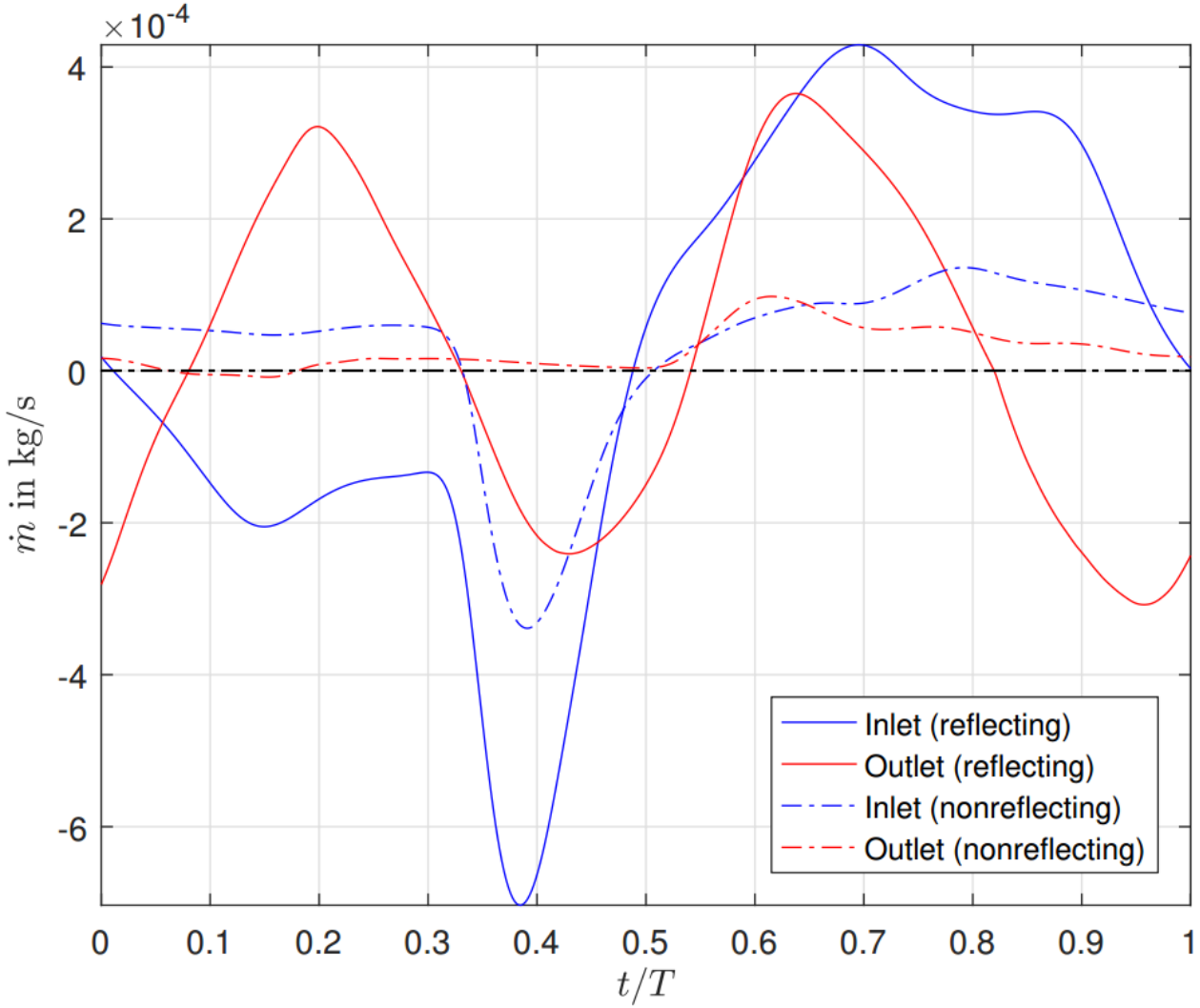
reflektierender Auslass



nichtreflektierender Auslass



Vergleich der Massenströme



Zusammenfassung und Ausblick

CFX BERLIN

- Motivation der Problematik bei der Modellierung offener Strömungsränder
- Vorstellung gängiger Randbehandlungen zur Unterdrückung unphysikalischer Reflexionen
- Implementierung einer Randbehandlung innerhalb einer Fortran-Routine für die Verwendung als User Function in ANSYS CFX
- Verifikation der Randbehandlung
- Simulation einer Drehschieberpumpe mit nichtreflektierenden Randbedingungen
- Ausblick
  - Kopplung der Simulation mit einer Systemsimulation
  - Analytische Beschreibung des angeschlossenen Systems

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

farai.hetze@cfx-berlin.de

Literatur

- Hetze, Farai (2017). „Untersuchung der nicht-reflektierenden Randbedingung in der anwendungsbezogenen Strömungssimulation". Masterarbeit. Berlin: Technische Universität Berlin.
- ANSYS (2007). *Non-Reflective Boundary Conditions in ANSYS CFX 12.0*. Technischer Bericht. ANSYS, Inc.
- Bogey, Christophe, Bailly, Christophe und Juvé, Daniel (2000). „Numerical Simulation of Sound Generated by Vortex Pairing in a Mixing Layer". In: *AIAA Journal* 38.12, S. 2210–2218.
- Galap, Simon (2017). „CFD-Simulation einer verdünnten Strömung am Beispiel einer Drehschieberpumpe". Bachelorarbeit. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Poinsot, Thierry J. und Lele, Sanjiva K. (1992). „Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows". In: *Journal of Computational Physics* 101.1, S. 104–129.
- Thompson, Kevin W. (1990). „Time-Dependent Boundary Conditions for Hyperbolic Systems, II". In: *Journal of Computational Physics* 89.2, S. 439–461.