

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA)
Fachgebiet Numerische Fluidodynamik
Prof. Dr. sc. techn. habil. J. Sesterhenn

Masterarbeit zum Thema

Untersuchung der nicht-reflektierenden Randbedingung in der anwendungsbezogenen Strömungssimulation

vorgelegt von

Farai Hetze
Matrikelnr. 332405

Berlin, den 24. Oktober 2017

Studiengang	Physikalische Ingenieurwissenschaft
Gutachter	Prof. Dr. sc. techn. habil. Jörn Sesterhenn Prof. Dr. rer. nat. Julius Reiß
Betreuer	Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff (CFX Berlin Software GmbH)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Nomenklatur	V
1 Einleitung	1
1.1 Ziele und Aufbau der Masterarbeit	1
1.2 Stand der Technik und Forschung	2
2 Grundlagen	5
2.1 Grundgleichungen der Strömungsmechanik	5
2.2 Randbehandlung	6
2.2.1 Charakteristische Zerlegung nach Thompson	6
2.2.2 NSCBC nach Poincot und Lele	10
2.3 Riemann-Problem	12
2.4 Phasenebene	14
2.5 Komplexe Wandimpedanz und Reflexionsfaktor	17
3 Vorstudien für den ein- und zweidimensionalen Fall	19
3.1 Randbehandlungen im eindimensionalen Fall	19
3.1.1 Akustischer Puls	22
3.1.2 Modifikationen der NSCBC-Randbehandlung	24
3.1.3 Spongeterm in ANSYS CFX	29
3.2 Nichtreflektierende Randbedingung in ANSYS CFX	30
3.3 Zweidimensionale Konvektion eines Potentialwirbels	33
4 Untersuchung der nichtreflektierenden Randbedingung für eine Drehschieberpumpe	37
4.1 Simulationsaufsatz	37
4.2 Nichtreflektierende Randbedingung	39
4.3 Nichtreflektierende Randbedingung mit Mittelung	40
4.3.1 Maskierung der Riemann-Invarianten	41
4.3.2 Vorstudie am Auslassgebiet	42
4.3.3 Sponge für die Drehschieberpumpe	43
4.4 Randbehandlung am Einlass	44
5 Zusammenfassung und Ausblick	49
Literatur	51
Danksagung	53

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung der nichtreflektierenden Randbedingung und die Identifikation einer Randbehandlung, welche unphysikalische Reflexionen in der Simulation rotierender Verdrängermaschinen in ANSYS CFX eliminiert.

Dazu wurde im ersten Kapitel das grundlegende Problem der Modellierung offener Strömungsränder eingeführt: Randbedingungen, die physikalische Größen wie Druck oder Geschwindigkeit festhalten, reflektieren Schallwellen, die zum Rand hin propagieren. Zudem erfolgte ein Überblick über bisherige Formulierungen nichtreflektierender Randbedingung und aktueller Erweiterungen.

Im Anschluss wurden essentielle Grundlagen für das Verständnis von Randbedingungen, welche auf der charakteristischen Zerlegung beruhen, etabliert. Dazu wurde die charakteristische Zerlegung sowie der NSCBC-Formalismus als gängige Variante für die Erzeugung von Randbedingungen auf dieser Grundlage hergeleitet. Zusätzlich wurde die Randbehandlung im Sinne eines Riemann-Problems betrachtet, um das Problem in der Phasenebene zu beschreiben.

Im dritten Kapitel wurden mehrere Vorstudien durchgeführt, um Verständnis für das Verhalten der nichtreflektierenden Randbedingung zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurde ein 1D-Finite-Differenzen-Löser implementiert. In einer Gitterstudie wurde eine geeignete Auflösung identifiziert, um einen akustischen Puls vom Einlass durch das Gebiet laufen zu lassen und das Reflexionsverhalten am Auslass zu beobachten. Es wurde das Reflexionsverhalten in Abhängigkeit des Koeffizienten der nichtreflektierenden Randbedingung des NSCBC-Formalismus vorgestellt. Zusätzlich wurden Erweiterungen der vorliegenden Randbedingung untersucht: Die Maskierung der Riemann-Invarianten nach Polifke et al. (2006) und die zonale Randbedingung nach Sandberg und Sandham (2006).

Weiterhin wurde die nichtreflektierende Randbedingung in ANSYS CFX, die ebenfalls auf dem NSCBC-Formalismus basiert, untersucht. Es wurde festgestellt, dass der Formalismus nur unvollständig umgesetzt wird, es werden die weichen, numerischen Kompatibilitätsbedingungen am Rand nicht gesetzt. Für die einfache 1D-Simulation zeigte sich dennoch eine hohe Übereinstimmung mit der Randbedingung aus dem 1D-Löser. Um Modifikationen an der Randbehandlung vorzunehmen, wurde eine Fortran-Routine implementiert, welche als User Function in ANSYS CFX verwendet werden kann. In Abstimmung mit ANSYS wurde das mathematische Vorgehen der Randbedingung reproduziert und nachvollziehbar gemacht. Ebendiese Randbedingung wurde ebenfalls mit dem 1D-Löser und der Randbedingung aus ANSYS CFX verglichen.

Um die Randbehandlung in komplexeren Strömungsfeldern zu untersuchen, wurde auf Basis des 1D-Lösers ein 2D-Finite-Differenzen-Löser implementiert, der die gleichen Diskretisierungsschemata anwendet. Es wurde am Beispiel des kanonischen Testfalls zur Konvektion eines Potentialwirbels die Veränderung der Struktur des Wirbelkerns

5 Zusammenfassung und Ausblick

am Auslassrand zwischen dem 2D-Löser und ANSYS CFX verglichen. Dabei wurden Artefakte im Geschwindigkeitsfeld in ANSYS CFX sichtbar, welche auf die abweichende Implementierung zurückzuführen sind.

Im vierten Kapitel wurde die Randbehandlung für die Simulation einer Drehschiebervakuumpumpe verwendet. Es konnte festgestellt werden, dass sowohl die in ANSYS CFX implementierte Randbedingung als auch die User Routine ein fehlerhaftes Geschwindigkeitsfeld am Rand induzieren. Um das Problem zu lösen, wurde eine flächengewichtete Mittelung des zu setzenden Drucks eingesetzt. Die neue Variante der Randbedingung zeigte gute Ergebnisse und konnte die Ausbildung einer stehenden Welle im Auslassgebiet verhindern. Zusätzlich wurde die Maskierung der Riemann-Invarianten eingeführt, um das Ergebnis weiter zu verbessern. Zwar konnten die Pulsation der Massenströme dadurch weiter reduziert werden, dies ging jedoch mit einer großen Erhöhung des Aufwands einher.

Als Alternative wurde ebenfalls die Anwendung eines Dämpfungsterms in einem erweiterten Strömungsvolumen nach Bogey et al. (2000) geprüft. Der Spongeterm ist ebenfalls geeignet unphysikalische Reflexionen zu unterdrücken, erfordert jedoch Kenntnisse über das Maschinenverhalten, welche aus Vorsimulationen mit reflektierenden Rändern gewonnen werden müssen.

Abschließend wurde die Randbedingung mit Mittelung auch für die Verwendung als Druckrandbedingung am Einlass geprüft. Auch hier konnten gute Ergebnisse erzielt werden, das Pumpverhalten der Maschine konnte ohne unphysikalische Pulsationen modelliert werden.

Im Hinblick auf zukünftige Studien sind weitere Untersuchungen denkbar. Zunächst wäre die Anwendbarkeit für weitere Verdrängermaschinen zu überprüfen. Erste Ergebnisse mit der 3D-CFD-Simulation eines Schraubenkompressors zeigten bereits eine Verbesserung der Modellierung des Förderverhaltens.

In dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass kein Wissen über das System hinter dem Rand zur Verfügung steht. Es wäre denkbar, diese Informationen über die Kopplung mit einer Systemsimulation in die CFD-Simulation einfließen zu lassen. So könnte die akustische Antwort eines angeschlossenen Systems geeignet modelliert werden.