

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Fakultät Maschinen- und Energietechnik
Studiengang Maschinenbau

**Simulation von
Fluid-Struktur-Interaktion mit
ANSYS CFX**

Masterarbeit Nr. 117/10

von

Markus Schildhauer, B.Eng.

geb. am 24.02.1985

in Lutherstadt Wittenberg

Matrikel-Nr.: 49020

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Carsten Klöhn

Betrieblicher Betreuer: Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff

Berlin, Oktober 2010 - März 2011

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	8
1 Einleitung	11
1.1 Motivation und Einführung	11
1.2 Stand der Technik	13
1.3 Aufgabenstellung und Übersicht	15
2 Grundlagen der FSI-Simulation	17
2.1 Modellierung der Fluid-Struktur-Interaktion	17
2.1.1 Einführung	17
2.1.2 Bewegung von Körpern in unterschiedlichen Betrachtungsweisen	18
2.1.3 Die allgemeine Bilanzgleichung in der ALE-Form	21
2.1.4 Erhaltungsgleichungen, Materialgesetze und FSI-Randbedingungen	23
2.2 Ein analytisch lösbares Beispiel und der <i>Added mass effect</i>	27
2.2.1 Problemstellung und analytische Lösung	27
2.2.2 Monolithische Lösung	30
2.2.3 Partitionierte Lösung	32
2.3 Der ANSYS FSI-Lösungsansatz	36
2.3.1 Diskretisierung der Anfangsrandwertprobleme und numerische Lösung	36
2.3.2 Vernetzung	37
2.3.3 Rechengitterbewegung	38
2.3.4 FSI-Simulation mit ANSYS MFX	40
2.3.5 Fluid-Starrkörper-Interaktion mit ANSYS CFX	43
3 Der Turek-FSI-Benchmark	46
3.1 Problembeschreibung	46
3.2 CFD1- und CFD3-Test	49
3.2.1 Gittererstellung und CFD-Setup	49
3.2.2 Durchführung und Auswertung	51
3.3 CSM-Tests	54
3.3.1 CSM-Setup	54
3.3.2 Auswertung	55
3.4 Gitterbewegung	56
3.5 FSI-Setup und Behandlung der Instabilität	58
3.6 Durchführung und Auswertung der FSI-Simulationen	60
3.6.1 FSI1-Test	60
3.6.2 FSI3-Test	64
3.6.3 Kurzes Zwischenfazit	69
4 Aeroelastisches Aufschaukeln eines Brückenprofils	71
4.1 Die <i>Tacoma Narrows Bridge</i> und ein aeroelastisches Brückenmodell	71
4.2 Numerische Umsetzung des Modells mit ANSYS CFX	74

4.3	Setup und bewegte Rechengitter	75
4.4	Durchführung und Auswertung der Simulation	78
4.5	Vergleich der Lösungsverfahren	84
5	Experimenteller Vergleich anhand einer luftgedämpften Plattenschwingung	87
5.1	Beschreibung und Auswertung des Experiments	87
5.2	Modellierung und Vernetzung	89
5.3	Durchführung der Simulation und Vergleich mit dem Experiment	92
6	Druckluftentweichung an einem Lamellenventil	97
6.1	Motivierende Einführung und Modellbildung	97
6.2	Erläuterungen zum CSM-Modell	100
6.3	CFD-Setup und Gitterbewegung	102
6.4	Ergebnisse der FSI-Simulation	107
7	Zusammenfassung	112
7.1	Überblick	112
7.2	Wesentliche Erkenntnisse	113
7.3	Ausblick	114
	Literaturverzeichnis	115
	Bilderverzeichnis	117
	Tabellenverzeichnis	120

7 Zusammenfassung

7.1 Überblick

Die Fluid-Struktur-Interaktion ist durch eine *nicht* vernachlässigbare Wechselwirkung zwischen Fluid- und Festkörperbewegung gekennzeichnet. Ihre numerische Simulation erfordert infolgedessen eine permanente wechselseitige Übergabe von Randbedingungen an den entsprechenden Grenzflächen und ist somit nur durch eine bidirektionale Kopplung der CFD- und CSM-Teilprobleme realisierbar. Im Zuge stetig voranschreitender Rechner- und Softwareentwicklung hat die numerische Lösung solch gekoppelter Probleme für viele technische und naturwissenschaftliche Anwendungen eine wachsende Bedeutung.

Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die Anwendung des ANSYS-Softwarepaketes auf die transiente Simulation der bidirektionalen Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) in den folgenden demonstrativen Beispielen:

1. Turek-FSI-Benchmark (2D)
2. Aeroelastisches Aufschaukeln eines Brückenprofils (2D)
3. Luftgedämpfte Plattenschwingung (3D)
4. Druckluftentweichung an einem Lamellenventil (3D)

Mit einem impliziten partitionierten Kopplungsansatz erfolgten die strömungs- und strukturelle Teilberechnungen über ANSYS CFX bzw. den allgemeinen ANSYS FEM-Löser. Neben der eingehenden Untersuchung des Kopplungsansatzes stand insbesondere die Steuerung der CFD-Rechengitterbewegung mit dem ANSYS CFX *Displacement Diffusion Modell* im Mittelpunkt.

Ausgehend von den Grundlagen der FSI-Simulation bezüglich der theoretischen Modellierung und der impliziten ANSYS-Kopplung wurde anhand eines analytischen Beispiels die für partitionierte Ansätze typische *Artificial added mass*-Instabilität erläutert und ein Eindruck der FSI-Problematik insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Diskretisierung vermittelt.

Das Turek-FSI-Testszenario ermöglichte eine Verifikation der Lösungen, da eine gute Übereinstimmung mit den Referenzergebnissen realisiert wurde. Die bei der partitionierten Lösung des Problems inhärente *Artificial added mass*-Instabilität konnte durch eine sehr stark implizite Kopplung – das heißt durch massive Unterrelaxation und viele Koppeliterationen – effektiv eingedämmt werden, wodurch sich der Rechenaufwand entsprechend erhöhte.

Im zweiten Beispiel wurde der Zusammensturz der *Tacoma Narrows Bridge* durch eine Fluid-Starrkörper-Interaktion qualitativ simuliert. Die ANSYS CFX *Rigid Body*-Algorithmen fanden hierfür Verwendung. Es wurde bestätigt und anschaulich dargestellt, dass das

fatale Aufschaukeln auf ein aeroelastisches Phänomen der Selbstanfachung und *nicht*, wie häufig angenommen, auf die Resonanz mit einer Kármánschen Wirbelstraße zurückgeführt werden muss.

Die Simulation der luftgedämpften Plattenschwingung erlaubte eine Validierung der FSI-Kopplung im Rahmen eines Ergebnisvergleichs mit der experimentell ermittelten Abklingkurve. Durch eine implizite Kopplung mit einer hinreichend zeitschrittweiten- und gitterunabhängigen Lösung wurde eine sehr gute Annäherung an die Realität erreicht. Dabei musste der zeitlichen Auflösung eine höhere Relevanz zugesprochen werden als der räumlichen.

Das abschließende Beispiel war die realitätsnahe Simulation der komplexen Dynamik eines Drucklamellenventils beim Ladungsausstoß, welche für die konstruktive Auslegung von Kolbenverdichtern von hoher Relevanz ist. Die wesentlichen Herausforderungen waren CSM-seitig die schnell wechselnden Kontaktzustände zwischen mehreren Festkörpern und CFD-seitig die Gewährleistung einer robusten Gitterbewegung durch eine geeignete Definition der Gittersteifigkeit für das ANSYS CFX *Displacement Diffusion Modell*. Außerdem waren die Einflüsse der Kompressibilität, der thermischen Energie und der Turbulenz des Fluids von Bedeutung.

Das übergeordnete Ziel war es, die Machbarkeit der Simulationen aufzuzeigen. Deswegen erfolgte bei jedem Beispiel eine ausführliche Darstellung der Arbeitsweise mit der Software. Der Umgang mit den konvergenzkritischen Parametern, ihr Ergebniseinfluss und der damit verbundene Rechenaufwand wurden detailliert erläutert. Ebenso geht aus der Arbeit hervor, wie die Gitterbewegungen bei einer dauerhaft hinreichenden Gitterqualität realisiert wurden.

7.2 Wesentliche Erkenntnisse

Üblicherweise sind im Vorfeld der FSI-Rechnungen reine CFD- und CSM-Tests sinnvoll, um die räumliche und zeitliche Mindestauflösung, das Konvergenzverhalten und den Rechenaufwand abschätzen zu können. Anschließend muss mittels reiner Gitterbewegungstests eine geeignete Definition der Gittersteifigkeit entwickelt werden. Hierbei kann eine Einteilung des Rechengebietes in problemangepasste *Subdomains* und die Berechnung des Abstandes von ausgewählten Randflächen hilfreich sein. Eine direkte räumliche Abhängigkeit der Steifigkeit ist generell zu empfehlen, wobei von der Eigenschaft profitiert werden kann, dass ein hyperbolischer Anstieg der Gittersteifigkeit die Gitterverzerrungen an der Polstelle gegen null gehen lässt. Zusätzliche zeitliche Abhängigkeiten können unter Umständen gewinnbringend eingesetzt werden, Abhängigkeiten von der Gitterqualität hingegen nicht. Eine ausreichende Lösungskonvergenz bei der *Moving Mesh*-Berechnung ist stets zu beachten.

Die einzelnen Setups der Teilprobleme können für die FSI-Simulation zusammengeführt werden. Neben der beiderseitigen Zuordnung der Fluid-Struktur-Grenzflächen ist vor allem die Auswahl der Zeitschrittweite und der numerischen Kopplungsparameter von großer Bedeutung. Hierbei muss der Rechenaufwand gegen die Genauigkeit und die Stabilität der Kopplung abgewägt werden. Eine optimale Parameterwahl ist stark problemabhängig und kann somit nicht pauschal angegeben werden. Es ist zu berücksichtigen, dass konvergierende Teillösungen notwendig aber nicht hinreichend für die Konvergenz der FSI-Lösung sind. Weiterhin ist zu beachten, dass die durch den *Artificial added mass*

effect hervorgerufene Neigung einer partitionierten Kopplung zur Instabilität insbesondere den folgenden verstärkenden Einflüssen unterliegt: Verkleinerung der Zeitschrittweite, hohe Dichte des Fluids im Verhältnis zur Struktur und hohe Viskosität sowie Strukturflexibilität.

Durch den Verzicht auf eine Unterrelaxation der Koppelgrößen und der Durchführung von lediglich einer Koppeliteration pro Zeitschritt wird eine explizite Kopplung realisiert, die sich durch den geringsten Rechenaufwand auszeichnet, aber bei einer Erhöhung der zeitlichen Auflösung keine Möglichkeiten zur Stabilisierung der Berechnung bietet. Die implizite Kopplung ermöglicht dagegen die Bewältigung der *Artificial added mass*-Instabilität, eine Verringerung der Zeitschrittweitenabhängigkeit der Lösung, eine bessere Konvergenzkontrolle und somit eine freiere Einflussnahme auf die Genauigkeit. Für eine implizite Kopplung mit ANSYS MFX müssen die Unterrelaxationsfaktoren kleiner als eins gesetzt und vorzugsweise eine ungerade Anzahl an Koppeliterationen größer oder gleich drei zugelassen werden. Außerdem sind Konvergenzkriterien für die Koppeliterationen definierbar. Eine günstige Festlegung der genannten Parameter ist stets im Zusammenhang mit der Zeitschrittweite herauszufinden. Es sollte generell versucht werden – insofern es die Stabilität zulässt – die Zeitschrittweite zugunsten weniger Koppeliterationen bis hin zu einer expliziten Kopplung zu verringern, da dies zu einem besseren Aufwand-Nutzen-Verhältnis führt, denn die Rechenzeit erhöht sich gegenüber einer expliziten Kopplung um den Faktor der durchschnittlichen Anzahl von Koppeliterationen. Allerdings ist durch eine geschickte Festlegung der Abbruchkriterien der inneren CFD-Iterationen eine gewisse Einsparung möglich.

7.3 Ausblick

Der partitionierte Lösungsansatz von ANSYS wurde als im Ingenieurbereich einsetzbares Werkzeug zur realitätsnahen Simulation von Fluid-Struktur-Interaktionen anhand überschaubarer Probleme beschrieben. Das Anwendungsfeld berührt auch die Akustik, da die FSI eine Ursache von Schallwellen sein kann. Diesbezüglich konnte bereits die prinzipielle Darstellbarkeit der Dynamik einer durchschlagenden Stimmzunge gezeigt werden. Darauf aufbauend wäre nachzuweisen, ob es möglich ist die daraus folgende Tonentstehung zu simulieren.

Besonders wünschenswert ist die Anwendung der Software auf die Simulation von Strömungen um flexible Tragflügel. Es gilt unter anderem herauszufinden, ob in diesem Zusammenhang vielleicht unter Verwendung von Schalen- und Balkenelementen aeroelastische Effekte berechnet werden können.

Auch das Umsetzen der Möglichkeiten hinsichtlich laminiertes Materialien, hyperelastischer Materialmodelle oder der Definition von Spannungs-Verzerrungs-Kurven steht noch aus. Hierbei ist beispielsweise an Leichtbaukonstruktionen, biomechanische Anwendungen oder an Hydrolager zu denken. Letztere dienen der Schwingungsdämpfung auf Grundlage einer interessanten Wechselwirkung, die sich durch den Einschluss einer viskosen Flüssigkeit in einem nahezu inkompressiblen Gummikörper ergibt. Ebenso interessant wäre das Ausprobieren thermomechanischer Kopplungen.