



BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
University of Applied Sciences

Fachbereich II Mathematik-Physik-Chemie

Masterarbeit

von

Ing. Ind. Mec. Luis Costero Sánchez

zur Erlangung
des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

Im Studiengang
Computational Engineering Master

Thema:

**Untersuchung des adjungierten Lölers
in ANSYS FLUENT**

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. P. Bartsch
Betreuer extern: Dr. rer. nat. A. Spille-Kohoff
Gutachter: Prof. Dr. math. N. Kalus

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xii
Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.3 Ziel der Arbeit und methodisches Vorgehen	4
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Numerische Strömungssimulation	6
2.1.1 Grundgleichungen	6
2.1.2 Numerische Lösung der Grundgleichungen mit der Finite-Volumen-Methode	8
2.1.3 Turbulenzmodelle	13
2.1.4 Arbeitsweise mit ANSYS und ANSYS Fluent	18
2.2 Grundlagen der Optimierung	20
2.2.1 Einleitung	20
2.2.2 Topologie-, Form- und Parameteroptimierung	21
2.2.3 Formulierung eines Optimierungsproblems	24
2.2.4 Die Lagrange-Funktion und die KKT-Optimalitätsbedingungen	26
2.2.5 Gradientenbasierte Methoden	26
2.3 Das adjungierte Verfahren	30
2.3.1 Sensitivitätsanalyse	30
2.3.2 Die alternative Lagrangesche Formulierung: "One-Shot"-Methode	38
2.4 Die Geometrie- und Gitteränderung in der Formoptimierung	40
2.4.1 Einleitung	40
2.4.2 Parametrische Bézierkurven und -flächen	41
2.4.3 <i>Free-Form Deformation</i> (FFD)	43
3 Die Optimierungsschleife in ANSYS Fluent	48
3.1 Überblick	48
3.2 Durchführung der Strömungsberechnung	49
3.3 Durchführung der adjungierten Berechnung	52
3.4 Festlegung der Kontrollpunkte und Schrittweite	53

4	Anwendungsbeispiele	58
4.1	Optimierung des Druckverlustes einer 2D-Leitung mit einer <i>Ausbuchtung</i>	59
4.1.1	Aufgabenstellung	59
4.1.2	Gittererstellung	61
4.1.3	Strömungsberechnung: Einstellungen	62
4.1.4	Gitterstudie	63
4.1.5	Ergebnisse der Strömungsberechnung	65
4.1.6	Adjungierte Berechnung: Einstellungen und Durchführung	68
4.1.7	Parameterstudie beim <i>Control-Volume Morphing Controls</i>	69
4.1.8	Durchführung des Optimierungsprozesses	72
4.1.9	Ergebnisse des Optimierungsprozesses	74
4.1.10	Schlussbemerkung zum ersten Beispiel	76
4.2	Optimierung des Druckverlustes einer 2D-Leitung mit einer <i>Einbuchtung</i>	77
4.2.1	Aufgabenstellung: Definition der Geometrie und des Gitters	77
4.2.2	Strömungsberechnung: Einstellungen und Durchführung	78
4.2.3	Ergebnisse der Strömungsberechnung	79
4.2.4	Durchführung des Optimierungsprozesses	82
4.2.5	Ergebnisse des Optimierungsprozesses	86
4.2.6	Untersuchung der Sensitivitäten vom <i>Adjoint Solver</i> mit Python	88
4.2.7	Schlussbemerkung zum zweiten Beispiel	91
4.3	Formoptimierung des Hecks eines <i>Ahmed Body</i>	92
4.3.1	Einleitung	92
4.3.2	Definition der Geometrie und Gittererstellung	95
4.3.3	Strömungsberechnung: Einstellungen und Durchführung	97
4.3.4	Ergebnisse der Strömungsberechnung	99
4.3.5	Durchführung des Optimierungsprozesses	101
4.3.6	Ergebnisse des Optimierungsprozesses	108
4.3.7	Kurzfassung des dritten Beispiels	109
5	Zusammenfassung und Ausblick	110
6	Anhang	113
6.1	Standard- k - ϵ -Modell	113
	Literatur	115

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegende Masterarbeit war die Untersuchung des diskreten adjungierten Löser in der Software ANSYS Fluent Version 14.5 und seine Anwendung an praxisrelevanten Beispielen. Die Schwerpunkte dieser Untersuchung waren die Entwicklung und Verifizierung der Methode des adaptiven *Scale Factor*, welche die optimale Schrittweite in jeder Optimierungsschleife berechnet, und die Rolle der Sensitivitäten in der Modifikation der Geometrie und des Gitters bei der *Free-Form Deformation* unter Berücksichtigung der Gitterqualität.

Vor der Behandlung dieser Schwerpunkte wurden die Beschränkungen in den Einstellungen des Strömungslösers überprüft. Bevor der adjungierte Löser die adjungierten Variablen berechnen kann, müssen als wichtigste Einschränkungen des Strömungslösers die folgenden beachtet werden: stationäre Fälle mit $k-\epsilon$ oder *Reynolds-Stress-Strain* als Turbulenzmodelle, ein druckbasierter Löser, die Green-Gauss *Cell Based*-Methode und das *Upwind*-Verfahren erster Ordnung für die räumliche Diskretisierung sowie die Geschwindigkeit am Einlass und der Druck am Auslass als zulässige Randbedingungen.

Bei der üblichen Vorgehensweise in ANSYS Fluent muss zuerst die Strömungsberechnung durchgeführt, anschließend der adjungierte Löser zum Einsatz gebracht und zum Abschluss jeder Optimierungsschleife der Strömungslöser erneut eingesetzt werden. Dieser Prozess wird mit einer beliebigen Schrittweite wiederholt, bis eine akzeptable Verbesserung erreicht ist.

Es wurde eine adaptive *Scale Factor*-Methode zur Berechnung der optimalen Schrittweite, die den Optimierungsprozess beschleunigt, entwickelt, um zu vermeiden, dass zufällige Schrittweiten ausgewählt werden und sich damit die Leistung des Systems verschlechtert. Mit dieser Methode wird gewährleistet, dass in jeder Optimierungsschleife nicht nur eine Verbesserung sondern die größtmögliche für das System erzielt wird. Der Erfolg dieser Methode wurde am ersten Beispiel durch Vergleich mit einer Methode, in der eine konstante Schrittweite verwendet wurde, bestätigt. Der verhältnismäßig große Rechenaufwand dieser Methode stellt einen vermeintlichen Nachteil zur Methode mit einer konstanten Schrittweite dar. Wenn man jedoch erwägt, dass mit einer konstanten und sehr kleinen Schrittweite mehr Optimierungsschleifen notwendig sind, um das Minimum zu erreichen, wiegt der Rechenaufwand nicht so schwer. Darüber hinaus nimmt der Rechenaufwand nach einigen Optimierungsschleifen ab, da sich die Modifikationen der Geometrie während des Optimierungsprozesses reduzieren.

Da die Gitterqualität im Optimierungsprozess eine wesentliche Rolle spielt, wurden zwei Strategien, die die Gitterqualität berücksichtigen, entwickelt und in die adaptive *Scale Factor*-Methode implementiert. Beide Strategien basieren auf der Idee ein Intervall zu definieren, in dem die optimale Schrittweite liegt und sich die Gitterqualität nicht wesentlich verschlechtert. Damit werden die Konzepte von Schrittweite und Gitterqualität verknüpft, um plötzliche Unterbrechungen des Optimierungsprozesses auf Grund schlechter Gitterelemente zu vermeiden.

Darauf aufbauend wurden drei Anwendungsbeispiele untersucht. Beim ersten Beispiel wurde der Druckverlust einer 2D-Leitung mit einer Ausbuchtung reduziert. Nach der Durchführung

einer Parameterstudie wurde sowohl die Rolle der Kontrollpunkte als auch der Bedarf einer ausreichenden Kontinuitätsbedingung (*Boundary Continuity*) für die Übergänge zwischen dem Kontrollvolumen und der nicht optimierten Geometrie festgestellt. Darüber hinaus wurde die Wirksamkeit der adaptiven *Scale Factor*-Methode bestätigt. Die erhaltene Geometrie ähnelte der erwarteten, zeigte aber nicht vollständig deren Form.

Beim zweiten Beispiel wurden die Ergebnisse des ersten Beispiels verifiziert und die Wirksamkeit der angewendeten adaptiven Strategie bestätigt. Mit der Programmiersprache Python wurde versucht, die in ANSYS Fluent implementierte *Free-Form Deformation*-Methode nachzuvollziehen. Die erhaltene Geometrie mit dem Python-Skript stimmte nicht mit der optimierten Geometrie von ANSYS Fluent überein, obwohl sie eine ähnliche Tendenz zeigte. Mögliche Gründe dafür sind, dass die veröffentlichte Theorie der *Free-Form Deformation* von ANSYS Fluent nicht alle Details offenlegt oder, dass bei ANSYS Fluent Unklarheiten über die Definition der Sensitivitäten bestehen.

Im dritten Beispiel wurde das Modul *Adjoint Solver* mit einem 3D-Modell getestet. Das Heck des *Ahmed Body* wurde mit Verbesserungen des Widerstandsbeiwertes von ca. 35% erfolgreich optimiert. Zur genaueren Überprüfung der Auswirkung des Gitters auf die erhaltenen Ergebnisse wäre es sinnvoll, weitere Berechnungen durchzuführen, da die Werte des Widerstandsbeiwerts vor der Optimierung nicht mit der recherchierten Literatur übereinstimmen.

Die dargestellten Beispiele zeigen das Potenzial eines sehr nützlichen Tools zur Verbesserung der Leistung komplexer Systeme. Nach Untersuchung des *Adjoint Solver* können mehrere Vorschläge zur weiteren Verbesserung der Software gemacht werden. Obwohl die Wirksamkeit des k - ϵ Turbulenzmodells in verschiedenen Bereichen bewiesen wurde, wäre die Verwendung vom SST- k - ω Turbulenzmodell, zur besseren Modellierung der Phänomene (Ablösungen etc.) auch in der Grenzschicht, empfehlenswert. Darüber hinaus wäre es ratsam ein *Upwind*-Verfahren von mindestens zweiter Ordnung beim Advektionsterm für die räumliche Diskretisierung anzuwenden, um die Genauigkeit der Lösung zu verbessern. Für viele Fälle in der Industrie ist die Anwendung von stationären Berechnungen ausreichend. Wenn jedoch transiente Berechnungen durchgeführt werden könnten, würde die Formoptimierung von Geometrien, die z.B. Kármánsche Wirbelstraßen verursachen, möglich werden. In den dargestellten Beispielen war zu erkennen, dass die erhaltenen Geometrien gewellte Zonen aufweisen. Aus diesem Grund wäre die Implementierung eines Geometriebearbeitungstools sinnvoll, welches die resultierende Geometrie nach der *Free-Form Deformation*-Methode am Ende des Optimierungsprozesses durch Glättung oder andere Methoden verbessert, um die Übertragung in eine CAD-Software zu erleichtern.

Die Version 15 von ANSYS Fluent hat bereits eine Verbesserung implementiert, die für Fälle wie die untersuchten interessant ist. Es handelt sich dabei um die zur Verfügung stehende adjungierte Temperatur, was die Möglichkeit bietet, Geometrien gemäß der Temperaturverteilung eines Systemes optimieren zu können.

Während dieser Untersuchung entstanden mehrere Ideen zu möglichen Entwicklungen, deren Realisierung jedoch die Grenzen dieser Masterarbeit gesprengt hätten. Die wichtigste wäre die Automatisierung des Optimierungsprozesses mit der Programmiersprache *Scheme*. Damit könnte erstens der gesamte Prozess flüssiger gemacht und zweitens die Fehler der "per-Hand"-Arbeit reduziert werden. Zu dieser Automatisierung sollte die adaptive *Scale Factor*-Methode hinzugefügt werden, damit immer die größte Verbesserung appliziert werden kann. Darüber hinaus

wäre die Verifizierung der entwickelten Strategien zur Bestimmung der optimalen Schrittweiten mit anderen Beispielen sinnvoll. Außerdem spielt die Parallelisierung dieses Prozesses eine wichtige Rolle bei der Festsetzung der Berechnungsreihenfolge (adjungiert).