



Diplomarbeit

**Untersuchung von
Realgaseigenschaften in ANSYS CFX
am Beispiel einer Lavaldüsenströmung**

vorgelegt von

cand. Ing. Nicole Nenn
Matrikel-Nr.: 210658

betreut von

Prof. Dr.-Ing Frank Thiele
Dipl.-Ing. Bert Günther

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik
Technische Universität Berlin

Dr. rer. nat. Andreas Spille-Kohoff
CFX Berlin Software GmbH

Berlin, im September 2010

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	2
1.2 Einsatzbereiche von Lavaldüsen	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Thermodynamische Grundlagen	5
2.1.1 Beschreibung idealer Gase	6
2.1.2 Beschreibung realer Gase	6
2.2 Quasi-Eindimensionale Strömungen	11
2.2.1 Bilanzgleichungen	11
2.2.2 Isentropenbeziehungen	13
2.2.3 Die Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung	14
2.2.4 Die Flächen-Machzahl-Beziehung	15
2.2.5 Die Durchflussfunktion	16
2.2.6 Stoßbeziehungen	18
2.3 Numerische Strömungsberechnung	19
2.3.1 Allgemeine Vorgehensweise	19
2.3.2 Turbulenzmodellierung	20
3 Simulationen mit idealem Gas	25
3.1 Kontur und Rechengitter	25
3.2 Setup	28
3.2.1 Randbedingungen	28
3.2.2 Solvereinstellungen	29
3.2.3 Simulation mit Wandgrenzschicht	32
3.3 Ergebnisse	34
3.3.1 Betriebszustände einer Lavaldüse	34
3.3.2 Skalierungsstudie	36
3.3.3 Gitterstudie	40

3.3.4	Einfluss der Wandreibung	43
3.4	Zusammenfassung	46
4	Simulationen mit realem Gas	47
4.1	Vorüberlegungen	47
4.2	Setup	52
4.2.1	Materialeigenschaften	52
4.2.2	Solvereinstellungen	56
4.3	Rechengitter	59
4.4	Ergebnisse	60
4.4.1	Vergleich zwischen realem und idealem Gas	60
4.4.2	Einfluss der Randbedingung	64
4.4.3	Diskussion der Ergebnisse	67
4.5	Zusammenfassung	70
5	Ausblick	73
6	Weitere nicht behandelte Realgasphänomene	75
	Literatur	77

Bestimmung des Expansionsverhältnisses in Abhängigkeit von der gewünschten Aus trittsmachzahl für kalorisch perfekte ideale Gase verwendet wurde (vgl. Kapitel 2.2.4). Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Isentropenexponenten ergibt sich eine andere Düsenkontur mit der Eigenschaft:

$$\left. \frac{A^*}{A_e} \right|_{ideal} < \left. \frac{A^*}{A_e} \right|_{real} \quad (4.12)$$

4.5 Zusammenfassung

Supersonische Strömungsprobleme sind in der Regel schwieriger zu lösen als subsonische oder inkompressible Strömungen. Dies ist bedingt durch die stark nichtlineare Natur supersonischer Strömungen, speziell beim Auftreten von Verdichtungsstößen. Für Überschallströmungen sind demnach besondere numerische Methoden notwendig um die Lösung zu stabilisieren und Konvergenz zu erreichen.

Desweiteren ist es von enormer Wichtigkeit die Stoffeigenschaften des strömenden Mediums wie dessen Dichte und Viskosität sowie Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von den thermodynamischen Größen wie Druck und Temperatur korrekt wiederzugeben.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten eines kalorisch perfekten idealen Gases und eines Realgases unter Verwendung der Redlich-Kwong Zustandsgleichung in einer Lavaldüsenströmung untersucht.

Die Simulationen haben gezeigt, dass durch die Annahme eines idealen Gases die Eigenschaften der Strömung nicht in jedem Fall korrekt wiedergegeben werden.

Das ideale Gasgesetz gilt nur für kompressible Fluide geringer Dichte als angemessene Näherung, also bei geringen Drücken und hohen Temperaturen. Mittels einer Visualisierung des Realgasfaktors konnte für das Redlich-Kwong Gas gezeigt werden, dass es im Gegensatz dazu für einen weitaus größeren Einsatzbereich eine gute Approximation des realen Verhaltens liefert.

Für reale Gase müssen die Stoffeigenschaften durch geeignete Modelle beschrieben werden, die die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen berücksichtigen. Diese Modelle müssen kritisch bewertet werden, da sie ebenfalls nur für einen bestimmten Druck- und Temperaturbereich gute Näherungen des realen Verhaltens gewährleisten.

Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität c_p bei konstantem Druck aus den thermodynamischen Relationen unter Zuhilfenahme empirischer Koeffizienten, gibt das reale Druck- und Temperaturverhalten in einem weiten Bereich ausgezeichnet wieder. Das hier verwendete *Rigid Non Interacting Sphere Model* zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität, vernachlässigt dagegen die Druckabhängigkeit gänzlich, wodurch es bei hohen Drücken schnell an seine Grenzen stößt. Gleiches gilt für das *Modified Eucken Model* zur Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit. Hier muss eine kritische Bewertung hinsichtlich des Gültigkeitsbereiches für den einzelnen Fall erfolgen.

In dem hier untersuchten Druck- und Temperaturbereich traten signifikante Unterschiede zwischen Ideal- und Realgas vor allem entlang der Wand auf.

Für Hyperschallströmung sind diese Unterschiede noch wesentlicher. Die dort hervorgegerufenen starken Temperaturerhöhungen entlang der Wand müssen in jedem Fall berücksichtigt werden um ein Versagen der Struktur zu verhindern.

In diesem Zusammenhang wurde deutlich, dass eine fein aufgelöste Grenzschicht mit $y^+ < 1$ unerlässlich ist um die Effekte in Wandnähe für ein Realgas gut wiedergeben zu können. Es stellt sich weiterhin die Frage, ob eine Modellierung mittels Wandfunktionen aufgrund ihrer empirischen Natur überhaupt in der Lage ist die Strömungsstruktur in Wandnähe richtig abzubilden.

Desweiteren konnte gezeigt werden, dass sich bei Vorgabe eines konstanten Massenstroms anstelle einer Totaldruck-Randbedingung am Einlass die berechnete Stoßposition signifikant ändert, wenn ein Gas als real statt ideal betrachtet wird. Auch dieses Wissen ist für die Vorhersage der weiteren Strömung in der Düse von Interesse, da dadurch u.a. deren Austrittsmachzahl beeinflusst wird.

Die Erwartungen haben demnach bestätigt, dass die sorglose Annahme eines idealen Gases immer zu (zumindest leichten) Abweichungen von der Realität, in einigen Fällen sogar abhängig von den Randbedingungen zu gravierenden Fehleinschätzungen des Strömungsfeldes und somit zu etwaigen Fehlkalkulationen von supersonischen Bauteilen führen kann.