

Numerischer Ansatz zur Simulation von Strukturbewegung induziert durch Fluidschwingungen

I. Pantle¹, G. Bardossy², M. Gabi³

Fachgebiet Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe, 76131 Karlsruhe, Deutschland

¹ pantle@ism.uka.de , ² gbardossy@gmail.com , ³ martin.gabi@ism.uka.de

Einleitung

Die Untersuchung von strömungsinduzierten Strukturschwingungen und die sich daraus ergebende Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur (FSW) ist für viele Bereiche der Technik, aber auch der Medizin von Bedeutung. So kann die Schwingungsanregung in Resonatoren, wie beispielsweise beim Auftreten von Brennkammerschwingungen, zur Anregung der Resonatorwände führen. Bei technischen Anwendungen stellt sich sofort die Frage nach Materialbelastung und langfristiger Stabilität. Darüber hinaus kann über die schwingende Struktur Lärm nach außen abgestrahlt werden, was in zunehmendem Maße aus Gründen der Lärmbekämpfung, aber auch der Effizienz und Wirtschaftlichkeit technischer Geräte möglichst vermieden werden soll.

Um FSW zu untersuchen, wird zunehmend auf numerische Simulation gesetzt. Hier gibt es verschiedene Verfahren. Speziell im nieder- bzw. mittelfrequenten Bereich bieten sich, aufbauend auf den klassischen, hocheffizienten Simulationen von CFD (Computational Fluid Dynamics) und CSD (Computational Structure Dynamics) kombinierte Methoden an: Dabei werden aus einer CFD-Rechnung über eine Schnittstelle die relevanten Daten zum CSD-Verfahren und die Ergebnisse wieder zurück zum CFD-Verfahren transferiert. Meist werden Interpolationsverfahren zwischen unterschiedlich aufgebauten Berechnungsnetzen benötigt. Hohe Effizienz und Genauigkeit der Interpolationsverfahren stellen eine Herausforderung dar. Im Rahmen dieser Präsentation wird das hybride, von den Autoren entwickelte FSW-Verfahren vorgestellt. Möglichkeiten und geplanten Entwicklungsschritte werden zur Diskussion gestellt.

Vorgehensweise

Abb. 1 zeigt schematisch den prinzipiellen Ablauf einer Fluid-Struktur-Berechnung innerhalb des instituts-eigenen Fluidlösers SPARC [2]. Über eine in SPARC implementierte Schnittstelle werden die relevanten Daten zwischen SPARC und dem Strukturlöser Z88 ausgetauscht. Z88 steht als leistungsfähiges Open-Source-Paket der Universität Bayreuth zur Verfügung [1]. Es wird von der Schnittstelle in SPARC angesteuert. Dabei werden die Quelldateien von Z88 zusammen mit SPARC kompiliert. Dies hat den Vorteil, dass die Eingabe von für Z88 relevanten Steuerungsparametern, die aus den SPARC-Ergebnissen bestimmt werden, über die SPARC-Schnittstelle erfolgen.

Die Berechnung kann sowohl stationär als auch insta-

tionär erfolgen. Bei stationärer Betrachtung wird absolute Konvergenz der Fluidberechnung zu einem stationären Gleichgewichtszustand hin verfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die durch Fluidkräfte erzeugten Strukturdeformationen eine Änderung des Fluidnetzes erzeugen. Die Strömung muss also nach der Deformation erneut berechnet werden (ausgehend vom Strömungsbild des vorigen Zustands). Durch geeignete Relaxation und ggf. durch sinnvolle Einschränkung von Freiheitsgraden ist dafür zu sorgen, dass die Deformationsschritte in vertäglichen Grenzen bleiben, um stabile und konvergente Zwischenlösungen zu gewährleisten.

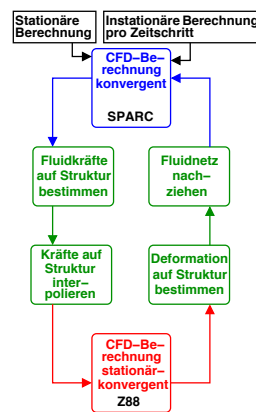


Abbildung 1: CFD-CSD Ablauf-Schema

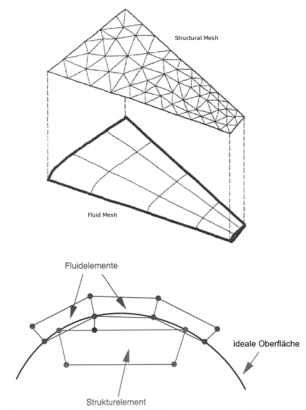


Abbildung 2: Interpolation der Netze

Mit instationärer Berechnung ist gemeint, dass auf Fluidseite zeitabhängige Lösungen eine Anregung von um- oder durchströmter Struktur zu Vibrationen hervorrufen. Die Implementierung fußt hierbei auf einem impliziten Zeitschrittverfahren (Dual Time Stepping), wobei die Lösung innerhalb eines Zeitschritts Δt und ggf. mit durch Deformation verändertem Fluidnetz zu relativer Konvergenz gebracht wird.

Merkmale

Interpolationsmechanismen

Der Interpolationsmechanismus zur Übertragung der Daten von Fluid- auf Strukturnetz und umgekehrt muss folgende Kriterien erfüllen:

- möglichst Einhaltung von Konservativität,
- effizienter Suchalgorithmus für Interpolation,
- Parallelisierbarkeit,

- ggf. sinnvolle Anpassung von Zeitschritten.

Es wurden zweierlei Mechanismen implementiert:

- Suchfunktion startet von Strukturseite und findet für jede Oberflächenelemente eine passende Fluidzelle;
- Suchfunktion startet von Fluidseite und findet für jede Oberflächenelemente eine passende Strukturzelle.

Entscheidend ist, dass jede Zelle, die eine Information übertragen werden muss, beim Suchalgorithmus behandelt wird, aber ausschließlich so oft und nicht mehr als nötig beaufschlagt wird. Gekrümmte Oberflächen und unterschiedlichen Zellverteilungen auf Fluid- und Strukturseite führen zu „Löchern“ (vgl. Abb. 2) und damit zu Interpolationsfehlern.

Parallelisierung

Der Fluidlöser SPARC ist ein mit MPI parallelisierter, 3D instationärer Navier-Stokes-Code. Die CFD-Simulation kann laminar, turbulent mit Reynolds gemittelten Navier-Stokes Modellen (RANS) oder als Large Eddy Simulationen (LES) erfolgen. Da die CSD-Rechnung bislang nicht parallelisiert ist, werden die relevanten, parallel ermittelten CFD-Daten gesammelt und dann der CSD-Berechnung zugeführt. Dieser Engpass wird dann wesentlich ineffizient, wenn die Anzahl der Zellen des CSD-Netzes der Größenordnung der Zellenzahl des CFD-Netzes entspricht.

Fluidkräfte

Als Fluidkräfte \mathbf{f}_{Fl} werden sowohl die Druck- als auch die Scherkräfte ($\mathbf{f}_{\text{Druck}}$, $\mathbf{f}_{\text{Scher}}$) auf die Struktur übertragen, wobei die Summe der Kräfte auf beiden Seiten (Fluid und Struktur) identisch sein muss. In Gleichung 1 wird die Summation der Kräfte auf der Fluidseite bezogen auf Kontaktflächenelemente der Oberflächenelemente A_i zur Summation der auf die Kontaktflächen der Strukturelemente A_j wirkenden Kräfte in Beziehung gesetzt:

$$\sum_i \mathbf{f}_{\text{Fl},i} = \sum_i (\mathbf{f}_{\text{Druck},i} + \mathbf{f}_{\text{Scher},i}) = \sum_j \mathbf{f}_{\text{Str},j} \quad (1)$$

wobei die jeweiligen Summationsindizes i und j nicht notwendigerweise verschieden sein müssen, es aber bei problemangepassten Netzen meistens sind.

Beispielberechnung

Zur Demonstration des Verfahrens wurde ein durchströmtes Rohr mit einem inneren Kreisquerschnitt vom Radius $r_i = 4,7 \cdot 10^{-3}$ m (vor der Berechnung) gewählt, das ein elastisches Zwischenstück besitzt. Dieses wurde als Strukturnetz diskretisiert und besitzt eine Dicke von $d = 3,2 \cdot 10^{-3}$ m, was zu einem Außenradius von $r_a = 7,9 \cdot 10^{-3}$ m führt. Die Innenseite des Zwischenstücks wurde als Fluid-Kontaktfläche definiert. Alle übrigen Wände wurden als starr angenommen. Die Längen des starren Rohrteils vor und hinter dem elastischen Stück betragen $l_v = 0,3$ m bzw. $l_h = 0,15$ m, die Länge des Zwischenstücks beträgt $l_e = 0,15$ m. Das Zwischenstück ist durch die Charakteristika aus Tab. 1

definiert. Auf Fluidseite wurde Wand-Randbedingungen

Tabelle 1: Konfiguration der Beispiele

Charakteristik	Beispiel
Struktur-Tetra-Elemente	329 876
Struktur-Knoten	69 167
E-Modul [10^6 Pa]	1,1
Querkontraktionszahl	0,44
Zellen Fluidnetz	552 960

jeweils als Hafttrandbedingung formuliert. Die Strömungsgeschwindigkeit am Rohreintritt wurde auf $U = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gesetzt. Die Berechnung wurde stationär, kompressibel und laminar durchgeführt. Bis zum elastischen Zwischenstück bildet sich ein typisches, laminar-parabelförmiges Strömungsprofil aus. Die Konfiguration der Strukturberechnung und des Netzes orientiert sich an experimentellen Untersuchungen einer Vene [3].

Diskussion

Abb. 3 zeigt die Strömung und die schon aufgrund des Strömungsdrucks deformierte Struktur an Eintritt und an Austritt des elastischen Zwischenstücks. Diese wurde radial nach außen gedehnt. Das anfangs vollständig parabolische Geschwindigkeitsprofil ändert sich innerhalb des Zwischenstücks. Zunächst tritt ein Rückströmgebiet auf, die Strömung legt später wieder an und es entsteht ein verbreitertes Profil. Im Rahmen der Konferenz-

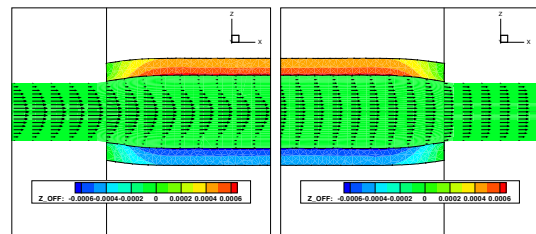


Abbildung 3: Strömung und Struktur an Eintritt (links) und Austritt (rechts) des elastischen Zwischenstücks

präsentation werden weitere Beispiele vorgestellt, anhand derer Fragen zu Deformation und Neukonfiguration des Fluidnetzes und zum Vorgehen bei instationärer Simulation aufgezeigt und diskutiert.

Literatur

- [1] Rieg, F.: Z88. Z88 homepage, URL: <http://z88.uni-bayreuth.de/deutsch.html>
- [2] Magagnato, F.: KAPPA - Karlsruhe Parallel Program for Aerodynamics. TASK Quarterly - Scientific Bulletin of Academic Computer Centre in Gdansk 2(2), 1998, pp. 215-270
- [3] Buescher, C. D., Nachiappan, B., Brumbaugh, J. M., Hoo, K. A., Janssen, H. F.: Experimental Studies of the Effects of Abnormal Venous Valves on Fluid Flow. Biotechnol. Prog. 21, 2005, pp. 938-945