

Simulationsmethoden für Windkraftanlagen: Interaktion von Umströmung und Struktur

Sigrun Ortleb

Universität Kassel
FB 10 Mathematik und Naturwissenschaften
AG Analysis und Angewandte Mathematik



Die Tacoma-Narrows-Brücke “Galoping Gertie”



- Einsturz 1940, 4 Monate nach Fertigstellung
- Grund: Brückenflattern

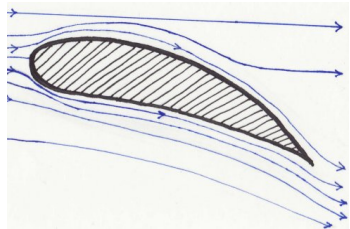
“Klassisches” Flattern an stromlinienförmigen Körpern



Dieses Flugzeug verunglückte am 11. Juli 1957
Grund: unkontrollierbares Leitwerkflattern

Fluid-Struktur-Interaktion (FSI)

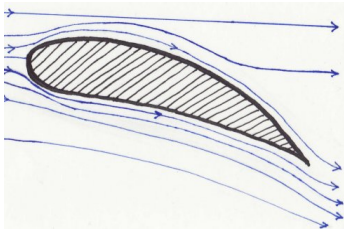
Wechselwirkung einer beweglichen oder verformbaren **elastischen Struktur** mit einer inneren oder umgebenden **Fluidströmung** durch Austausch von Kräften oder Hitze



Beispiele

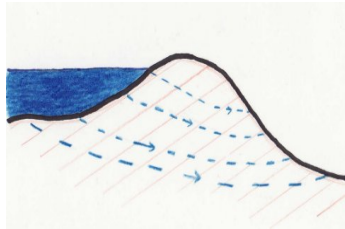
Fallschirme, Airbags, Blutströme in Arterien

Umströmung von Bauwerken, Tragflächen, heißem Stahl



Oberflächenkopplung

- Informationsaustausch an gemeinsamer Oberfläche "Interface"
- Umströmung elastischer Strukturen (Seilbrücken, Flugzeuge, Schiffe, [Windkraftanlagen](#))
- Strömungen in elastischen Strukturen (Tanks, Pipelines, Arterien)



Volumenkopplung

- Verschiedene physikalische Felder belegen selbes Gebiet
~> dort Informationsaustausch
- Strömung in porösen Medien
→ Grundwasserströmungen
→ Mülldeponien: Sickerströmungen



- Bewegung/Verformung der Rotorblätter



abhängig von

- Verhalten der Luftströmung

Von Interesse ist

- Aerodynamische Effizienz
- Lärmentwicklung
- Analyse von Flutterphänomenen
- Verhalten bei Windböen

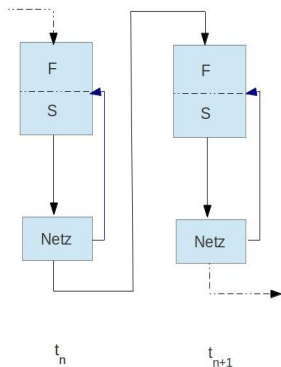
↔ Brauche FSI für realitätsnahe Simulation

1. Kontinuierliches Problem

- 1.1 Mathematische Beschreibung von Strömung und Struktur
- 1.2 ALE-Formulierung
- 1.3 Kopplungsbedingungen

2. Numerische Lösung

- 2.1 Grobe Einteilung numerischer Verfahren
- 2.2 Netzbewegung
- 2.3 Kopplung von Fluid und Struktur
- 2.4 Effizienzsteigerung



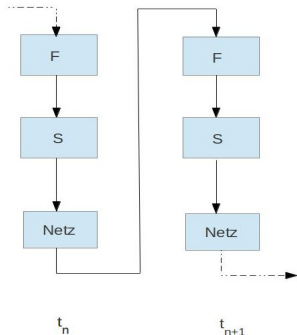
- Finde & programmiere Verfahren zur gemeinsamen Lösung von **Fluid + Struktur + Kopplung** (Gleichungen (2)-(5))
- Bestimme Netzveränderung **Iteriere F/S + Netz**

Vorteile Genauere Lösung,
Energieerhaltung einfach

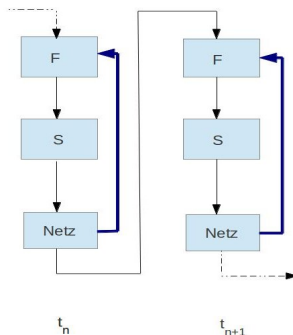
Nachteil Hoher Implementierungsaufwand

Partitioniertes Verfahren

Mit schwacher Kopplung:



Mit starker Kopplung:

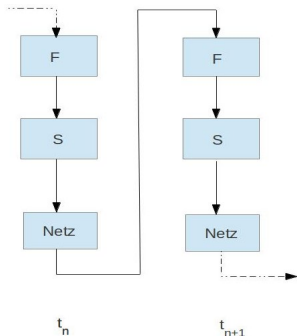


- Nutze bestehende Codes, löse separat **Fluid** (3) & **Struktur** (2)
- Finde Weg, Kopplungsbedingungen (4)+(5) zu erfüllen

Vorteil Geringerer Implementierungsaufwand

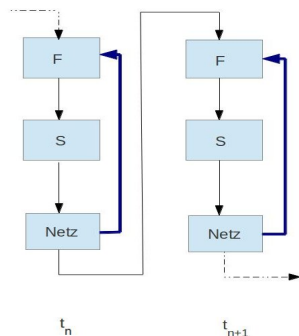
Nachteile schlechtere Lösungsqualität,
Probleme bei Energieerhaltung

Berücksichtige Wechselwirkung zwischen Teilsystemen durch Setzen der RB



Schwache Kopplung:

- Infoaustausch **nur einmal pro Zeitschritt**
- Starke Wechselwirkungen:
Verfahren instabil / nur für kleine Zeitschritte stabil



Starke Kopplung:

- **Wiederholte Lösung** der Teilsysteme innerhalb eines Zeitschritts (mit aktualisierten RB)
- Numerischer Aufwand steigt

- Fluidgebiet verändert sich aufgrund Strukturbewegung
- Zunächst einzige Bedingung an Bewegung Fluidgitter:

Übereinstimmende Normalengeschw. von Fluidrand, Gitterrand und Strukturrand

- Ansonsten beliebige Bewegung des Gitters, aber

Nur Randknotenverschiebung reicht bei großen Strukturbewegungen nicht, innere Knoten müssen ausgleichen

Ziele der Netzbewegung

- gute Netzqualität (keine Überschneidung/Entartung von Elementen)
- wenig komplette Neuvernetzung (höherer Aufwand, höhere Projektionsfehler)

Wie lässt sich die Randknotenverschiebung ins Gebietsinnere erweitern?

- Glättungsalgorithmen

Heuristisch, möglichst gleichmäßige Verteilung der Randversch. über gesamtes Netz, können schnell versagen

- Pseudostruktur-Ansatz

Fasse Fluidgebiet als Struktur auf, die lin. Elastizitätsgesetz unterliegt

$$\text{Erhalte lin. GLS} \quad \mathbf{K}_N \mathbf{x}_N = \mathbf{b}_N,$$

\mathbf{K}_N Steifigkeitsmatrix, \mathbf{x}_N Knotenversch., \mathbf{b}_N vorgeg. Randversch.

Besonderheit Fluidgitter:

Häufig stark unterschiedl. Größenordnung von Elementen

↪ Versteife kleinere/schmale Elemente

(typischerweise am Strukturrand, d.h. am Kopplungsinterface)

Große Rotationsbewegungen des Struktur- und Fluidgebiets

Eine Auswahl von Methoden zur Netzbewegung

- Chimera-Methode

Nachteile:

Finden von Background-Zellen für überlappende Knoten notwendig
↪ hoher Aufwand; Projektionsfehler

- Shear Slip Mesh Update Method (SSMUM) Behr, Tezduyar 1999

Idee: Schränke Netzbewegung/Neuvernetzung auf dünne Schicht von Elementen ein

Vorteil: Reduziert Projektionsfehler und Gittergenerierungskosten

- Zerlegung in Rotation und Auslenkung Bazilevs et al. 2011

Idee: Behandle Rotation exakt, nutze lineare Elastizitätstheorie nur für Auslenkung

- Fixpunktiteration \rightsquigarrow lineare Konvergenz

Alternativen zur Konvergenzbeschleunigung

- Newton-Verfahren
- Bessere Startwerte
- Relaxationsverfahren

- Effizienz des Fluidlösers \rightsquigarrow wichtiges Forschungsgebiet

Bei FSI ist dies in der Regel der kostspieligste Teil

- Zeitintegration

- Verfahren bisher nur erster Ordnung in der Zeit, unabhängig von Zeitdiskretisierung in Sublösern
 \rightsquigarrow kleine Zeitschritte bei geringer Fehlertoleranz
- Wesentlich effizienter: Kopplungsverfahren mit höherer Zeitgenauigkeit

Der partitionierte Ansatz führt zu

- Unterschiedlichen Programmiersprachen
- Unterschiedlichen Datenstrukturen
- Unterschiedlicher Visualisierung

Beispiele von Software-Bibliotheken

- CTL Component Template Library
Braunschweig
- FSI*ce Fluid Structure Interaction on Cartesian Grids
München
- MpCCI Mesh-Based Parallel Code Coupling Interface
Fraunhofer SCAI