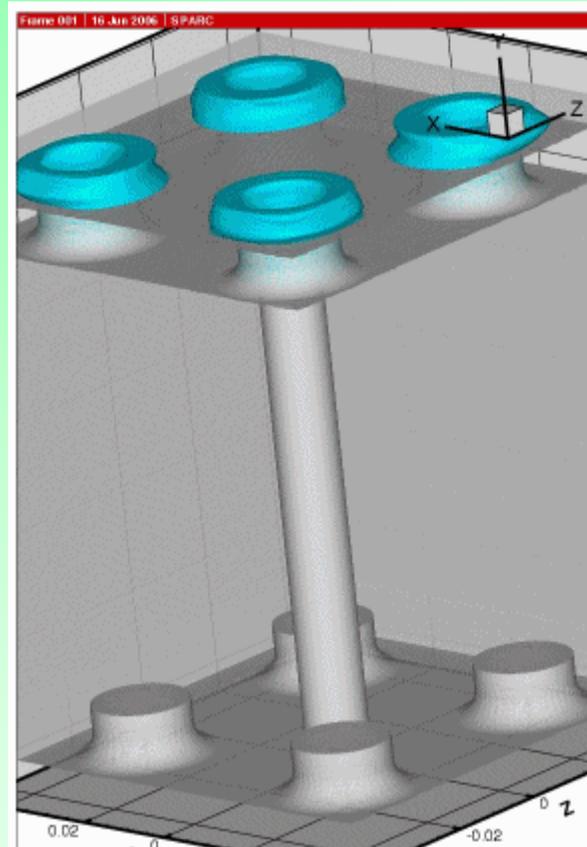


Large Eddy Simulation eines Einhubtriebwerks mit bewegten Gittern

Franco Magagnato
Fachgebiet Strömungsmaschinen



SFB 606: Instationäre
Verbrennung

Gliederung

1. Motivation
2. Formulierung der Raumerhaltungsgleichung
3. Numerisches Verfahren für bewegte Gitter
4. Simulation des Einhubtriebwerks
5. Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

- LES bietet gegenüber RANS bei Motorinnenströmungen Zyklusvariationen z.B. turbulente Geschwindigkeit am Einlass, Variable Flammengeschwindigkeit, Restgasanteil im Zylinder
- Reynoldszahlen sind bei Motorströmungen relativ niedrig => LES ist jetzt schon möglich
- Einhubtriebwerk dient als vereinfachtes Modell zu Untersuchung des Einflusses von Turbulenz, Wandtemperatur usw. auf Verbrennung
- Probleme bei Motorinnenströmungen:
 - Singuläre Gitter (Volumen wird Null) z.B. am Ventilsitz oder Turbulenzgenerator beim Einhubtriebwerk
 - Sehr großer Machzahlbereich ($0.001 < Ma \leq 1$)
 - Modellierung des Wandeinfluss auf Verbrennung

Kompressible N-S-Gleichungen im bewegten Koordinatensystem

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V dV - \iint_S \rho u_g \cdot ndS = 0 \quad \leftarrow \text{Raumerhaltungsgl.}$$

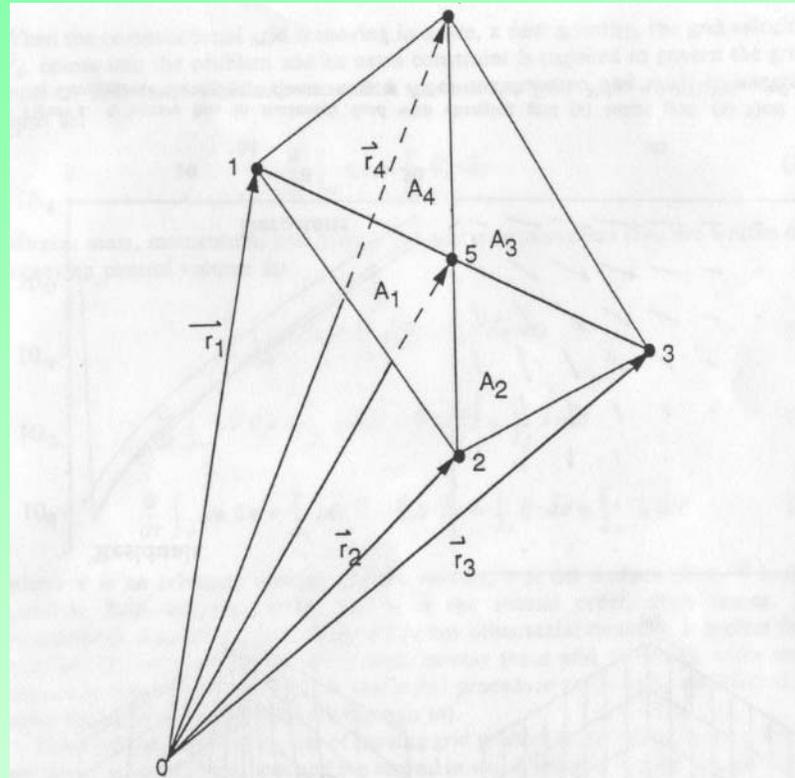
$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_S \rho(u - u_g) \cdot ndS = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho u dV + \iint_S \rho u(u - u_g) \cdot ndS = \iint_S \bar{\sigma} \cdot ndS$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho E dV + \iint_S \rho E(u - u_g) \cdot ndS = \iint_S u \bar{\sigma} \cdot ndS - \iint_S q \cdot ndS$$

Konservative Berechnung der Netzgeschwindigkeit

Nach
Lai/Przekwas(1994)

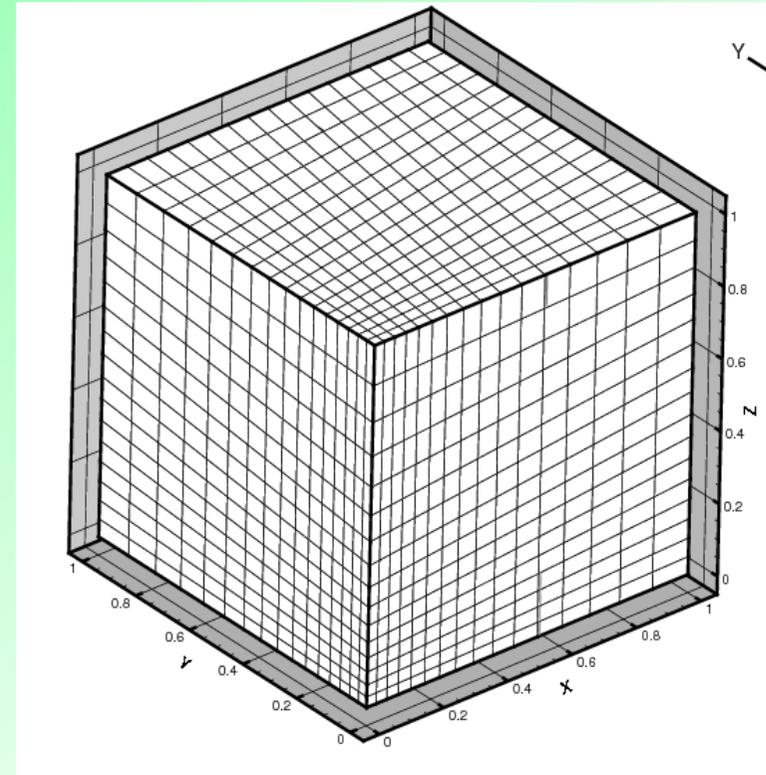
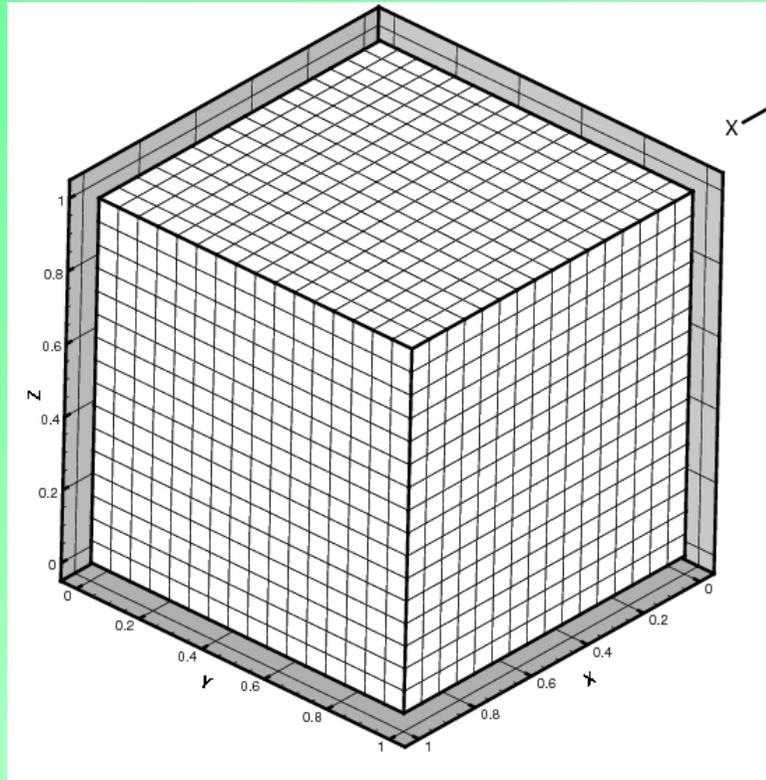


$$r_5 = \frac{1}{4} \sum r_i$$

$$n = \frac{\sum n_i A_i}{\sum A_i}$$

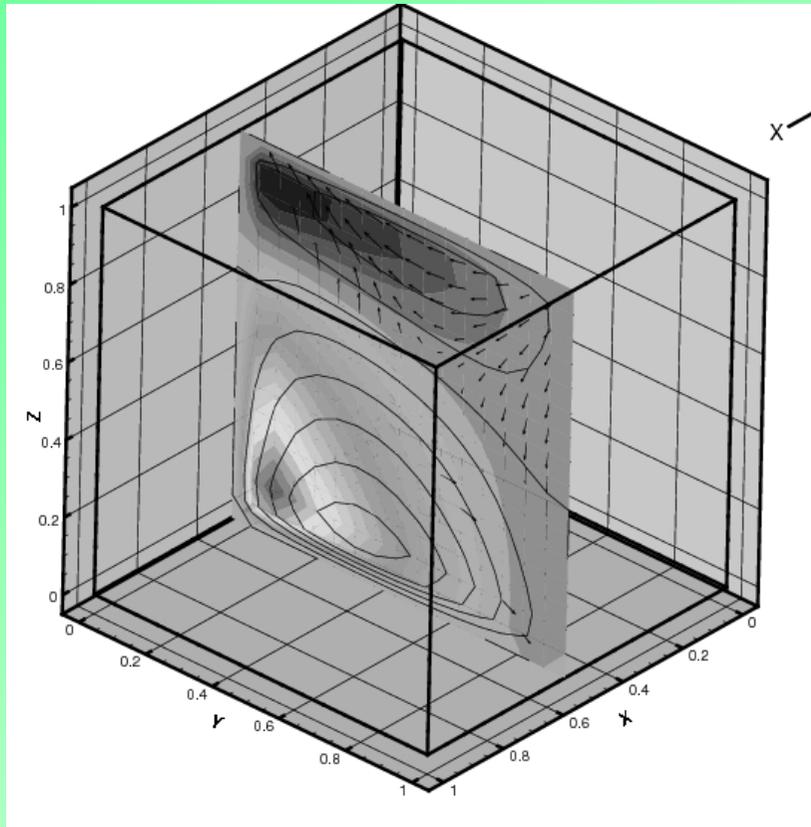
$$Vol = \frac{1}{3} \sum (r_5 \cdot n) \cdot \sum A_i$$

Berechnung der Netzgeschwindigkeit

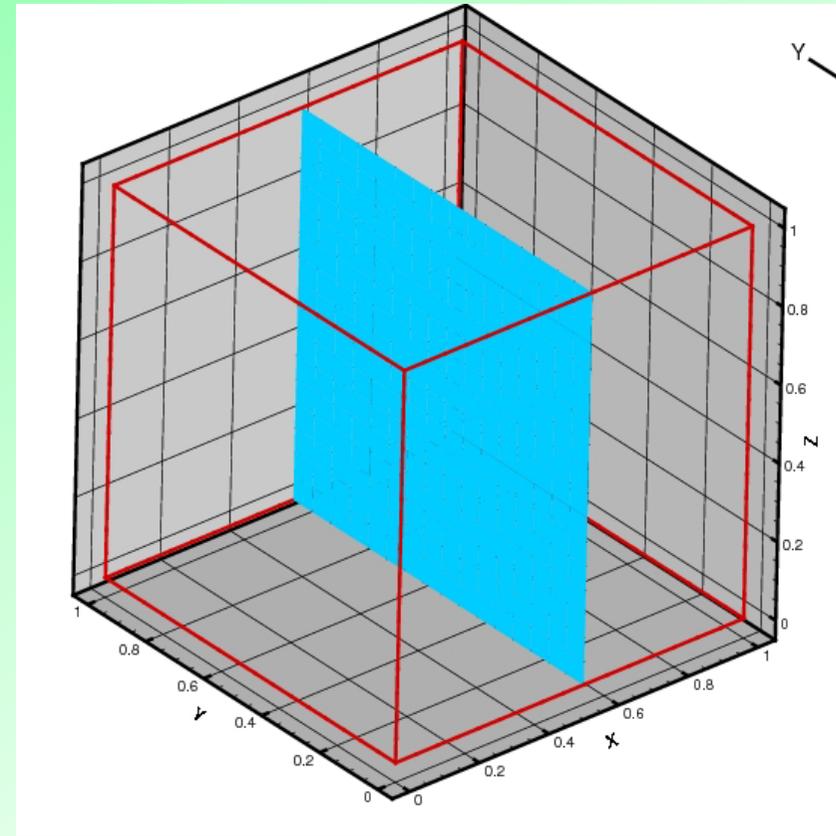


Bewegtes Gitter in einem Würfel: $U = 0\text{m/s}$

Berechnung der Netzgeschwindigkeit



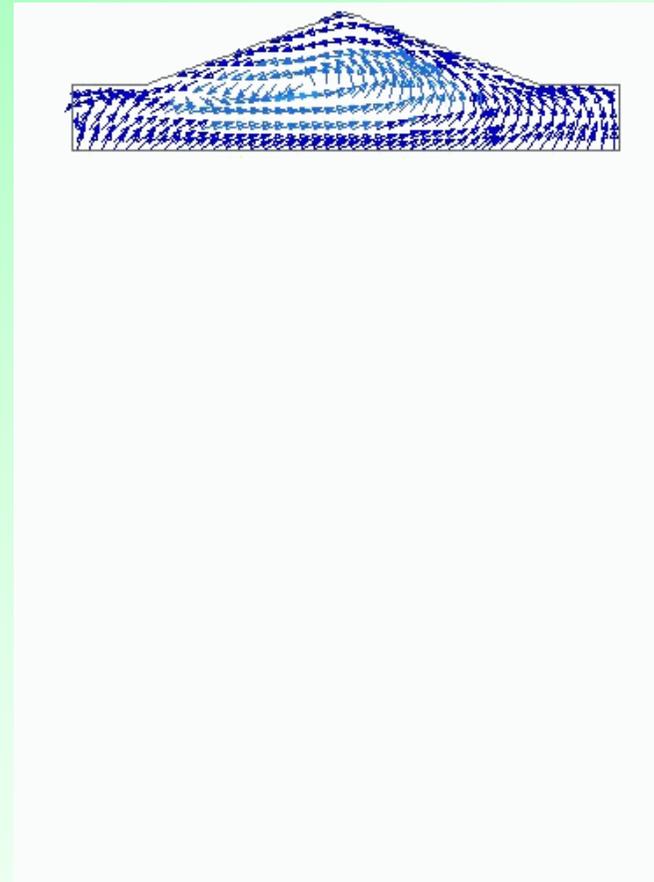
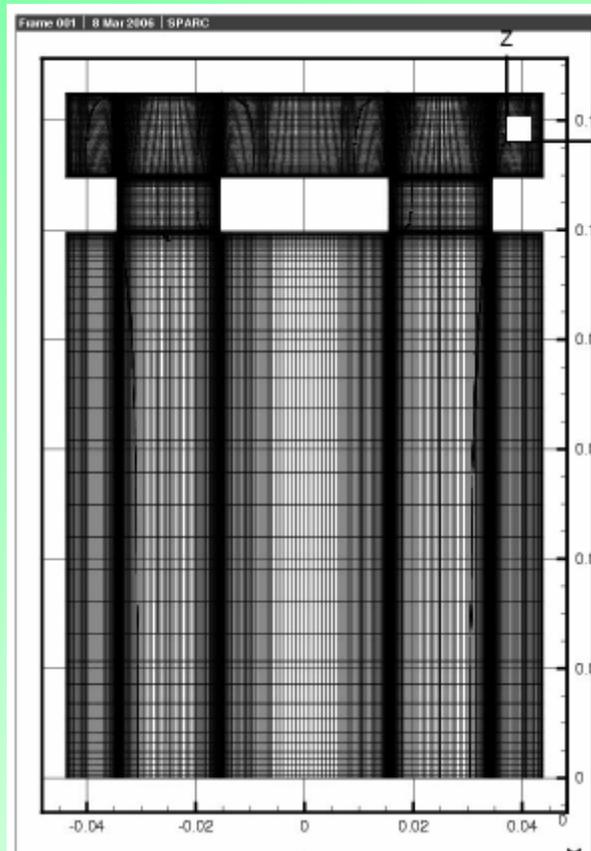
Links: Koplanare Berechnung



Rechts: Konservative Berechnung

Numerisches Verfahren für bewegte Gitter

- Eulersche Beschreibung der Bewegung
- Euler-Lagrange Beschreibung



Numerisches Verfahren für bewegte Gitter

Eulersche Beschreibung der Bewegung (z.B. Star-CD)

Einfügen bzw. entfernen von Gitterpunkten

Vorteile: Einfache Netzgenerierung,
gleichförmige, orthogonale Zellen,
gleichmäßige Auflösung über gesamten Hub

Nachteile: Auflösung in Wandnähe gering,
Auflösung im oberen Totpunkt gering,
Übergang zwischen Blöcken schlecht,
Parallelisierung problematisch

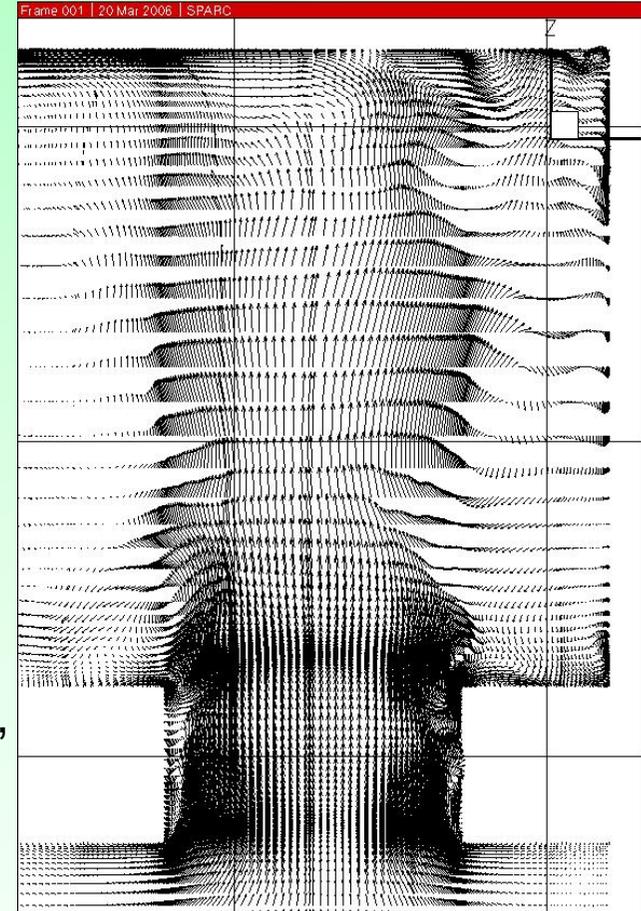
Numerisches Verfahren für bewegte Gitter

Euler-Lagrange Beschreibung der Bewegung (z.B. Sparc)

Dehnung und Streckung des Rechengitters –
Aktuelle Geometrie wird zwischen mehreren,
verschiedenen Netzen interpoliert

Vorteile: Parallelisierung einfach,
Rechengeschwindigkeit hoch,
Auflösung in Wandnähe gut,
Auflösung im oberen Totpunkt sehr gut

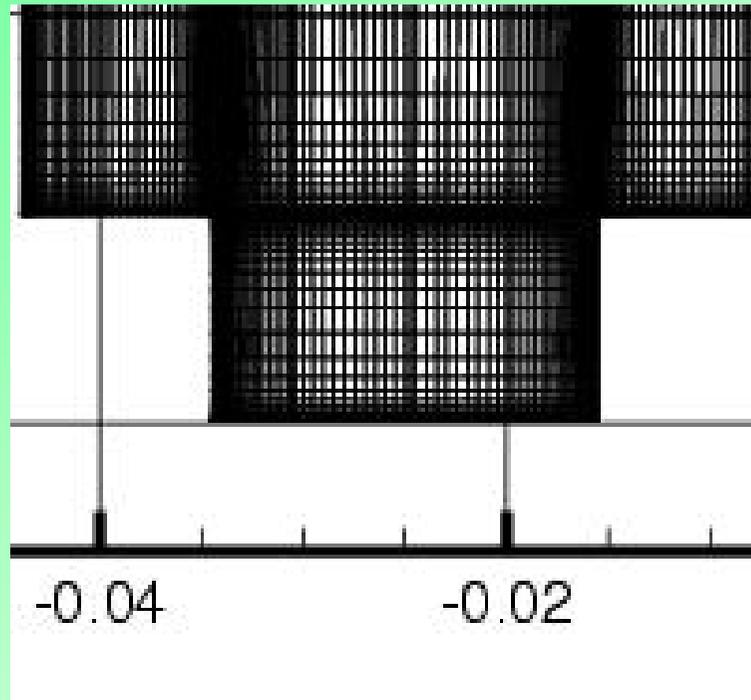
Nachteile: Netzgenerierung aufwendiger,
geringe Auflösung im unteren Totpunkt,
Gitterzellen anisotrop



Numerisches Verfahren für bewegte Gitter

Wenn zwei Wände aufeinander liegen entstehen singuläre Zellen.

Folge: Hohe Drücke (>1000 bar) und Temperaturen (>2000 K) entstehen, sehr kleine Zeitschritte (10^{-10} s) und hohe Geschwindigkeiten bzw. Machzahlen behindern Konvergenz.

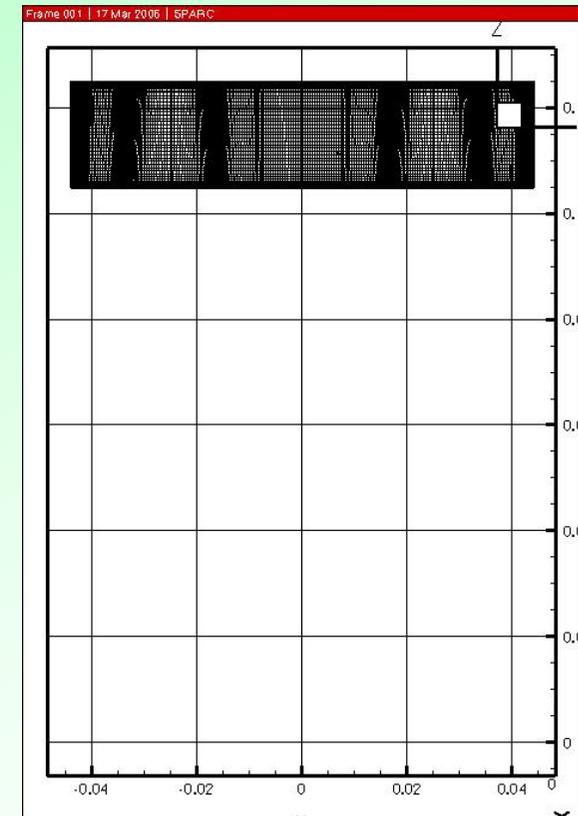
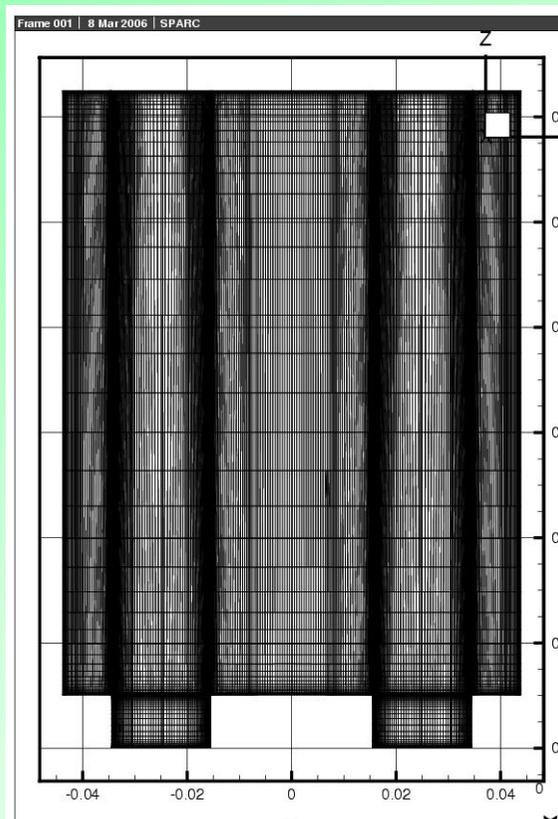
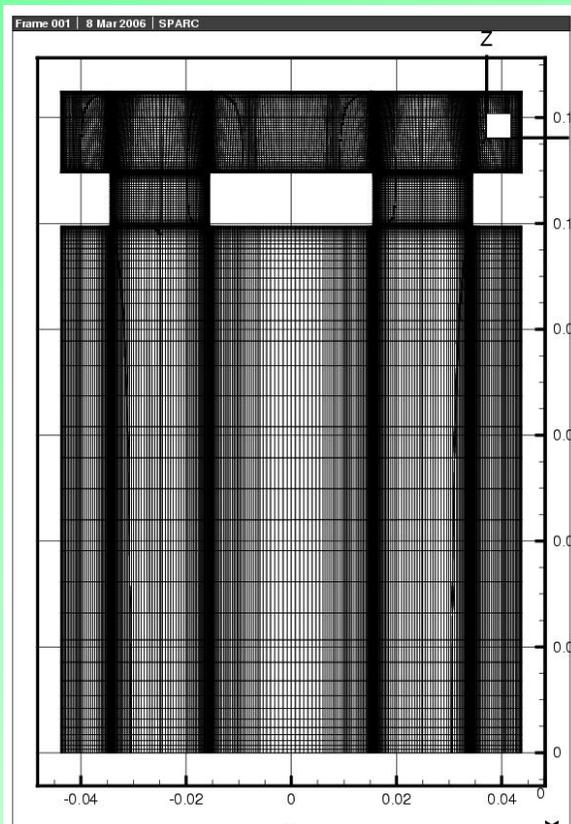


Lösung:

- 1.) Ein kleiner Spalt (0.1mm) wird generiert.
- 2.) Alle Zellen in den degenerierten Blöcken werden nicht mehr gelöst.
- 3.) Übergänge zu den Nachbarblöcken werden durch Wände ersetzt.
- 4.) Neuverteilung der Blöcke auf die verschiedenen Prozessoren.

Simulation des Einhubtriebwerks

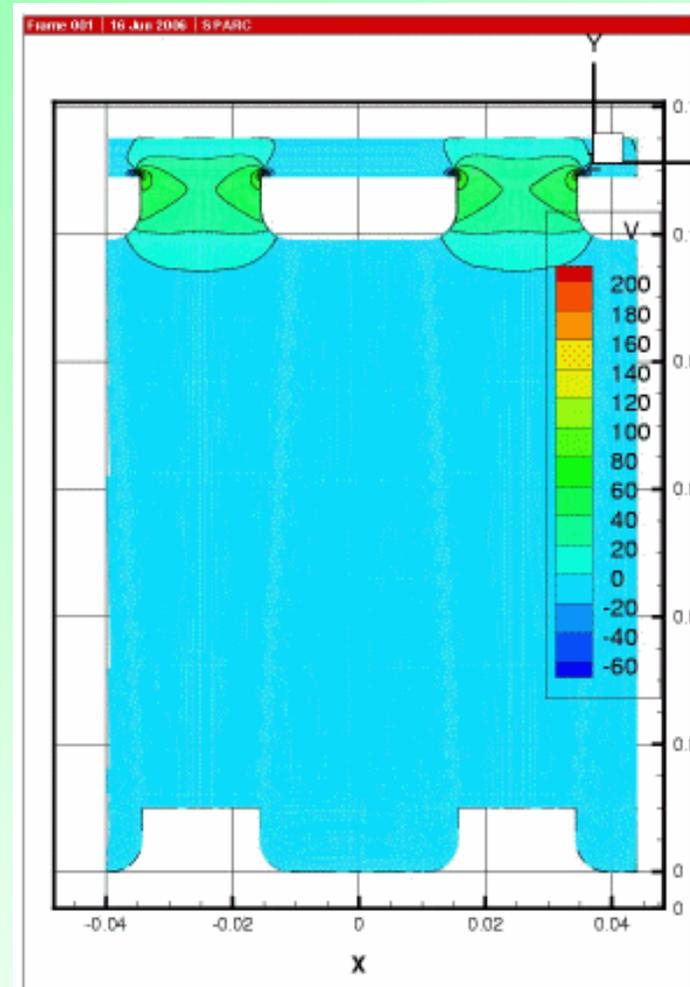
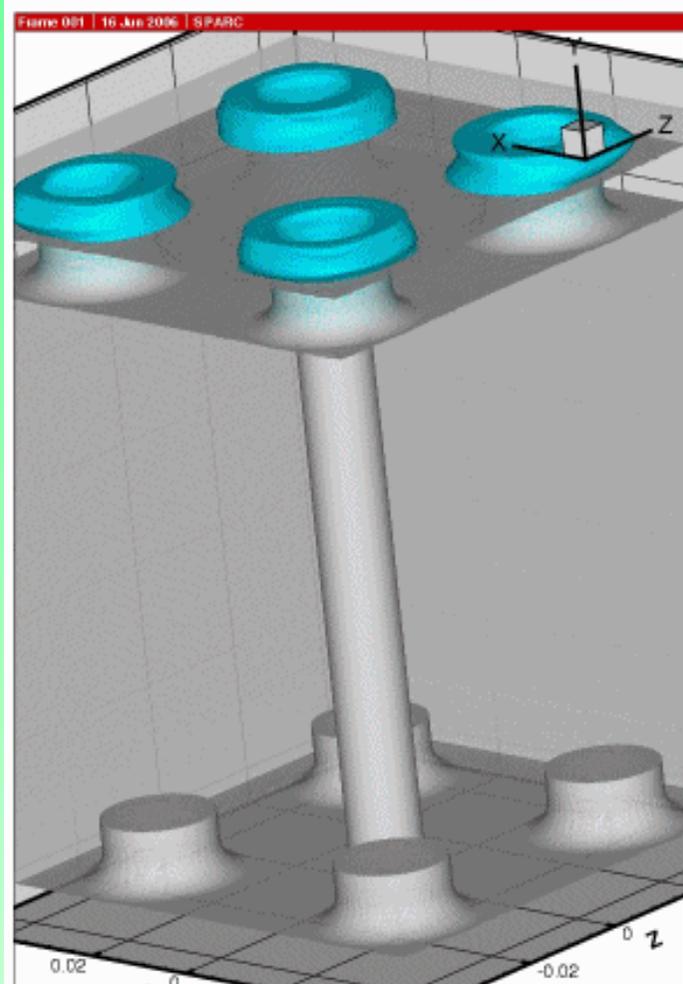
1. Phase : Abwärtsbewegung des Turbulenzgenerators (20 ms)
2. Phase : Unterschiedliche Wartezeiten am unteren Totpunkt (15-65 ms)
3. Phase : Kompressionshub des Kolbens (9-20 ms)



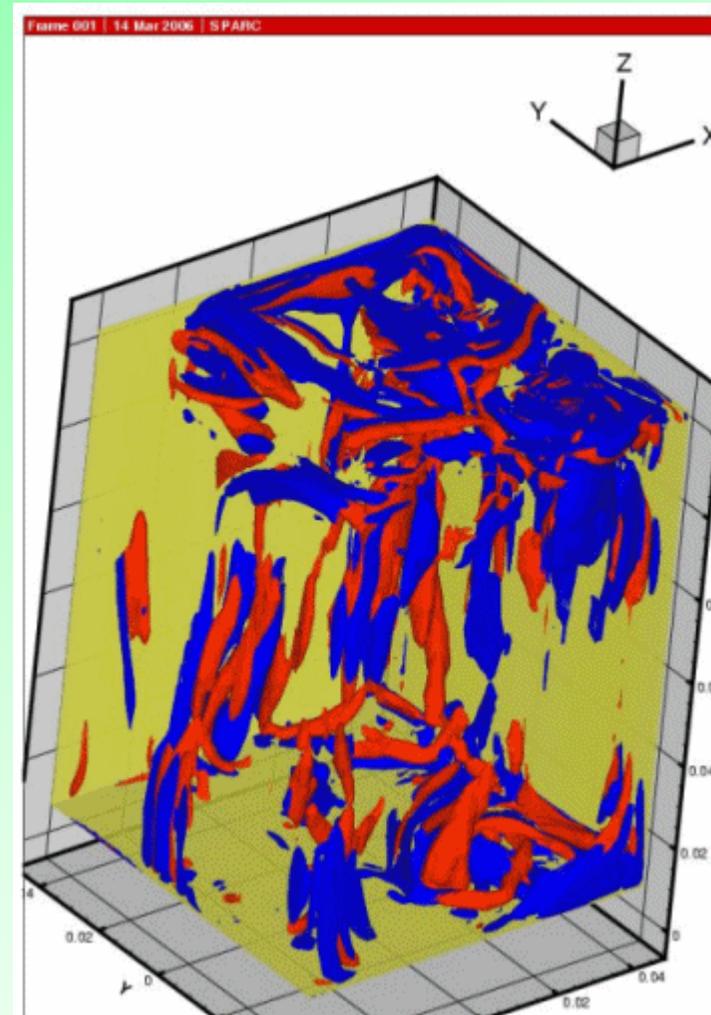
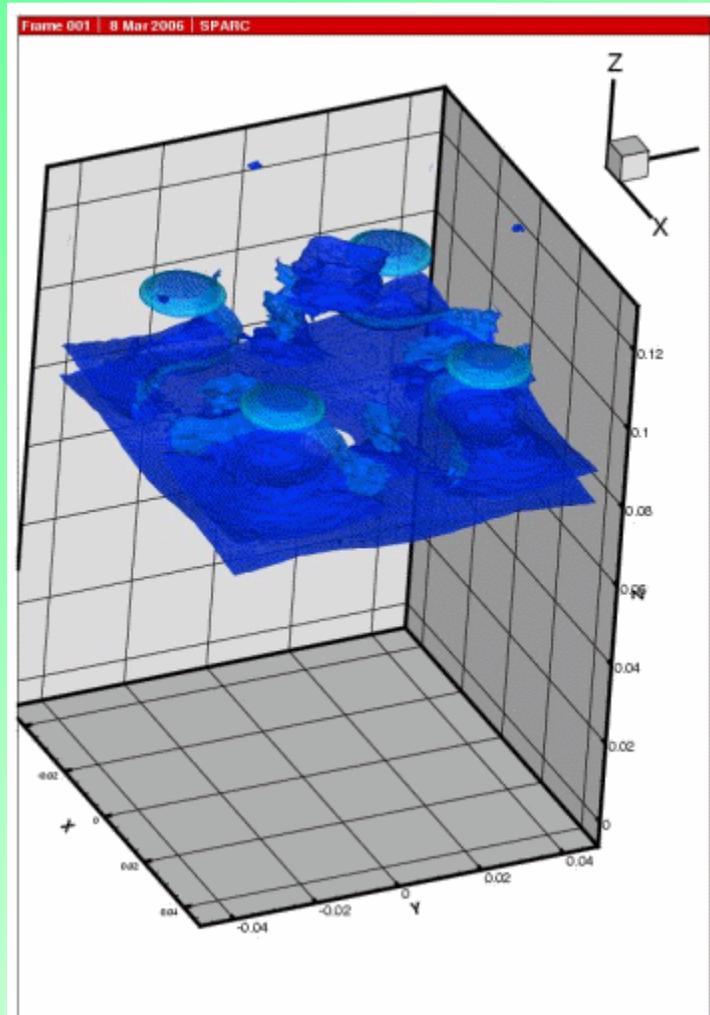
Simulation des Einhubtriebwerks mit SPARC

- Phase 1: $8.6 \cdot 10^6$ Gitterpunkte (Turbulenzgenerator + Zylinderinnenraum)
- Kompressionsphase: $5.2 \cdot 10^6$ Gitterpunkte
- Implizites Dual Time Stepping $\Delta t = 2 \cdot 10^{-6} \text{s}$
- Vorkonditionierung der NS-Gleichungen wegen niedrige Machzahlen
- MILES approach für Feinstrukturmodellierung
- Feinauflösung zur Wand ($y^+ < 1$) und in den Scherschichten
- Verfahren 2. Ordnung in Zeit und 4. Ordnung im Raum verwendet
- 34 Itaniumprozessoren (Rechenzeit ca. 14 + 5 Tage)

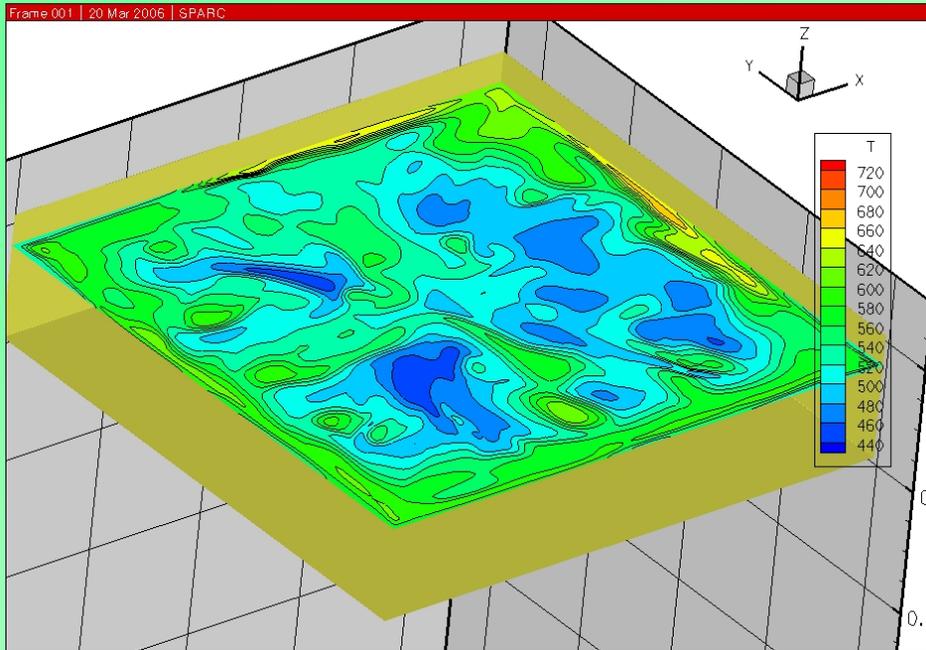
Simulation des Einhubtriebwerks



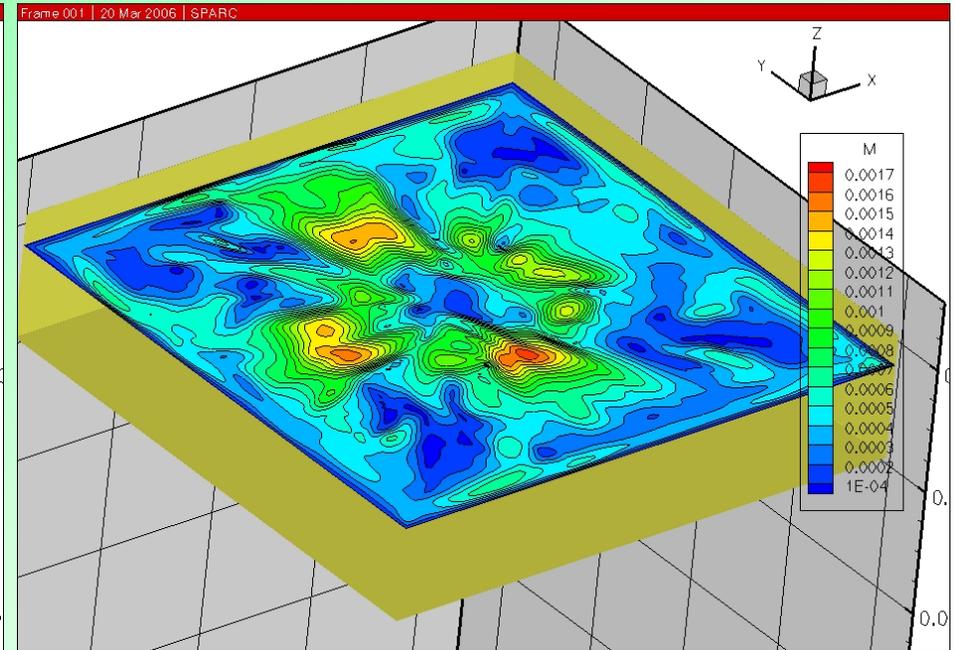
Simulation des Einhubtriebwerks



Simulation des Einhubtriebwerks

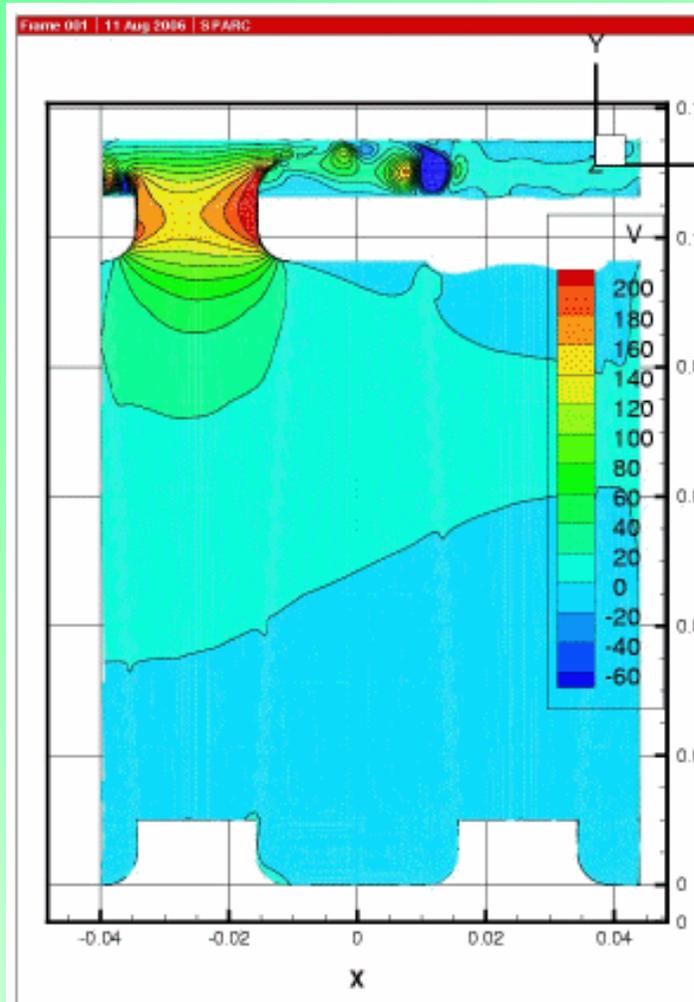


Temperaturverteilung in horizontaler Ebene



Machzahlverteilung in horizontaler Ebene

Simulation des Einhubtriebwerks Turbulenzgenerator mit Tumble



Numerische Simulation der Tumblebewegung durch Ausblenden der entsprechenden Netzblöcke in den Bohrungen

Aufgrund der Querschnittsverkleinerung entstehen jetzt Transschallbereiche und temporäre Verdichtungsstöße bzw. Expansionen

Numerisch sehr schwierig, da Stöße mit hochauflösenden Verfahren simuliert werden müssen und mit expliziten Feinstrukturmodellen wechselwirken.

Zusammenfassung

- Vorkonditionierung der kompressiblen NS-Gleichungen für Motorinnenströmungen zwingend notwendig
- Konservative Berechnung der Gitterbewegung durch Methode von Lai/Przekwas
- Simulation des Einhubtriebwerks mit LES bis zur Zündung wurde durchgeführt
- Singuläre Zellen wurden durch Elimination aus dem Lösungsprozess vermieden
- Feinauflösung der Wand bzw. Scherschichten ermöglicht bessere Vorhersage Strömung und Wärmeübergang
- Hohe Netzauflösung bei Zündung und Verbrennung möglich

Ausblick

- Vergleich mit Messungen vom Institut für Kolbenmaschinen (Uni-Karlsruhe) sobald verfügbar
- Die Modellierung der turbulenten Feinstruktur in Verbindung mit hohen Machzahlen muss untersucht werden.
- Verbrennungsmodelle (Flammenfront- und Flammenflächenmodell) werden für kompressible Strömungen untersucht und angepasst.
- Einfache Verbrennungsmodelle kritisch in Wandnähe ($k = 0$) trotz ITNFS von Poinot/Menevaux
- Implementierung eines Strahlungsmodell erscheint sinnvoll