

Implementierung und Untersuchung einer hoch effizienten Methode zur Druck-Geschwindigkeits-Kopplung Masterthesis



Fabian Gabel

Kolloquium, XX.XX.2015

Inhalt

Motivation

Aufgabenstellung und Bearbeitung

Implementierung

Performanceuntersuchung

Fazit und Ausblick

Inhalt

Motivation

Aufgabenstellung und Bearbeitung

Implementierung

Performanceuntersuchung

Fazit und Ausblick

Motivation

Herausforderungen für CFD-Applikationen:

- Schnelle Verfügbarkeit von Simulationsergebnissen
- Ergebnisse mit hoher Genauigkeit



- Einsatz robuster Algorithmen
- Skalierbarkeit der Lösungsmethode
- Effizienzsteigerung durch Adaptivität

Abbildung: Gasturbine (VDI)

Motivation

Vollständig gekoppelter Lösungsansatz für Navier-Stokes Gleichungen (Darwish 2009):

- Semi-implizite Druck-Geschwindigkeits Kopplung statt sequentieller Lösung
- Robuster Algorithmus ohne Unterrelaxation

Neue Herausforderung:

- Umgang mit Speicheranforderungen
- Auswahl geeigneter skalierbarer Gleichungslöser

Inhalt

Motivation

Aufgabenstellung und Bearbeitung

Implementierung

Performanceuntersuchung

Fazit und Ausblick

Aufgabenstellung und Bearbeitung

- Implementierung eines vollständig gekoppelten Lösungsansatzes
 - Finite-Volumen Diskretisierung der 3d Navier-Stokes Gleichungen auf block-strukturierten, lokal verfeinerten Gittern mit hängenden Knoten
 - Kopplungsansätze für Temperaturgleichung
 - MPI-Parallelisierung des Lösungsansatzes mit PETSc
- Skalierbarkeitsuntersuchung auf HHLR
- Performancevergleich mit herkömmlichem SIMPLE Verfahren für unterschiedliche Testfälle
 - Manufactured Solution
 - Kanalströmung mit komplexem Hindernis
 - Strömung in beheizter Kavität (Adaption MIT - Benchmark)

Inhalt

Motivation

Aufgabenstellung und Bearbeitung

Implementierung

Performanceuntersuchung

Fazit und Ausblick

Implementierung - Diskretisierung

Implementierung - Temperaturkopplung

Implementierung - Blockränder und Parallelisierung

Behandlung der Blockränder nach Lilek et. al

Implementierung - Assemblierung

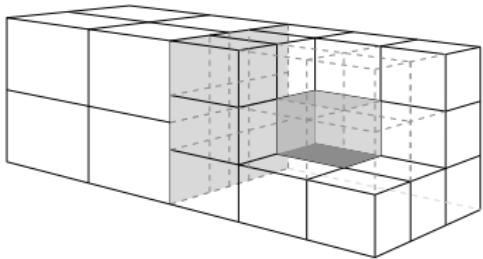
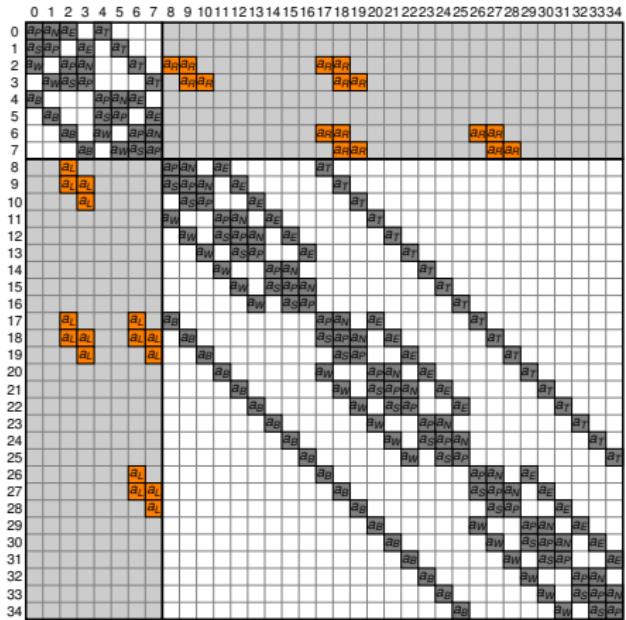
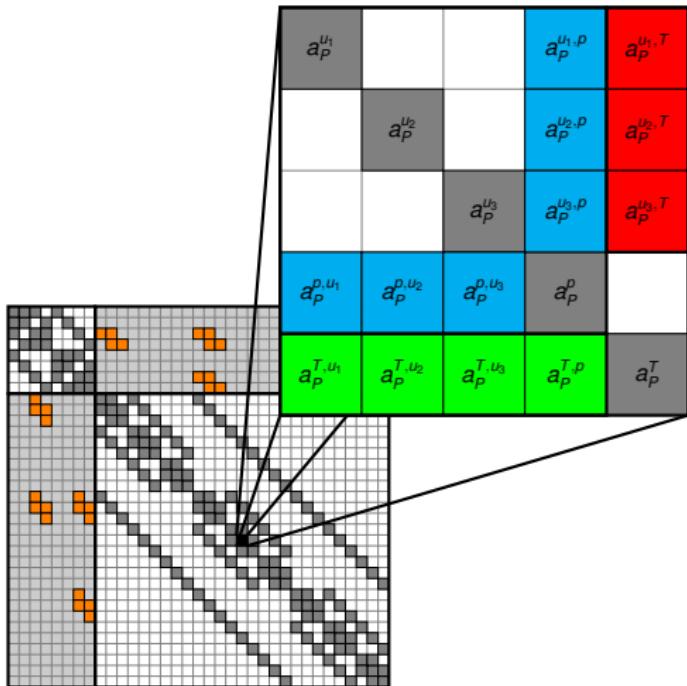


Abbildung: Blockstrukturiertes Gitter und resultierende Matrixbelegung für eine Variable ohne Kopplung



Implementierung - Assemblierung mit Kopplung



- blau: Druck-Geschwindigkeit
- rot: Geschwindigkeit-Temperatur
- grün: Temperatur-Geschwindigkeit/Druck

Implementierung - Lösungsalgorithmus

Algorithm 1 SIMPLE Algorithm

```
INITIALIZE variables
while (convergence criterion not accomplished) do
    SOLVE linearized momentum balances
    CALCULATE mass fluxes
    SOLVE pressure correction equation to assure continuity
    UPDATE pressure
    UPDATE velocities and mass fluxes
    if (decoupled scalar equation) then
        SOLVE scalar equation
    end if
end while
```

Implementierung - Lösungsalgorithmus

Algorithm 2 Fully Coupled Solution Algorithm

```
INITIALIZE variables
while (convergence criterion not accomplished) do
    if (temperature coupling) then
        SOLVE the linear system for velocities, pressure and temperature
    else
        SOLVE the linear system for velocities and pressure
    end if
    CALCULATE mass fluxes using
    if (decoupled scalar equation) then
        SOLVE scalar equation
    end if
end while
```

Inhalt

Motivation

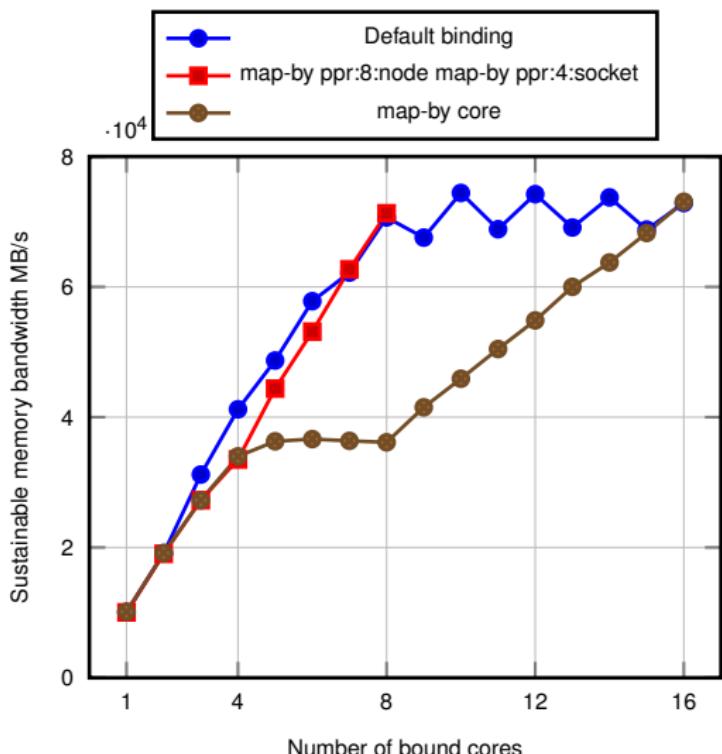
Aufgabenstellung und Bearbeitung

Implementierung

Performanceuntersuchung

Fazit und Ausblick

STREAM Benchmark - Sustainable Memory Bandwidth



- Nutzung eines Knoten der MPI1-Sektion des HHLR
- Low-level bechmark
- Für bandbreitenlimitierte Programmperformance
- Vectortriade:
 $a[i] = b[i] + scalar * c[i]$

Manufactured Solution

- Divergenzfreie Lösung für Geschwindigkeit
- $\mathbf{u} = \nabla \times \Psi$

$$u_1 = 2 \cos(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) x_2 + 2 \sin(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) x_3$$

$$u_2 = 2 \cos(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) x_3 - 2 \cos(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) x_1$$

$$u_3 = -2 \sin(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) x_1 - 2 \cos(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) x_2$$

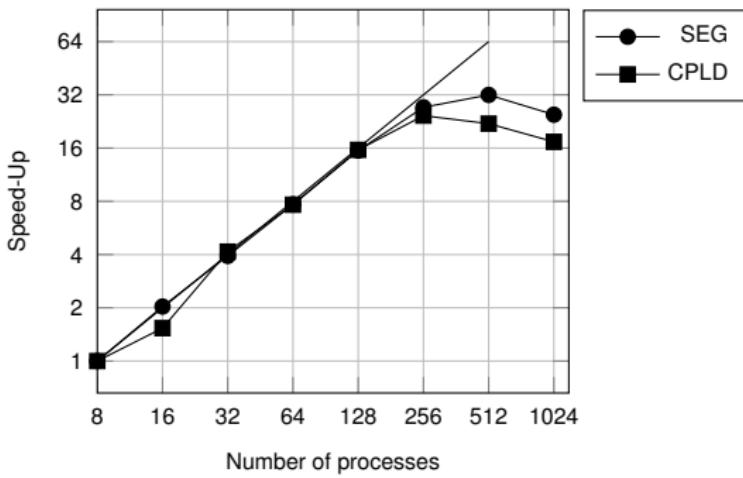
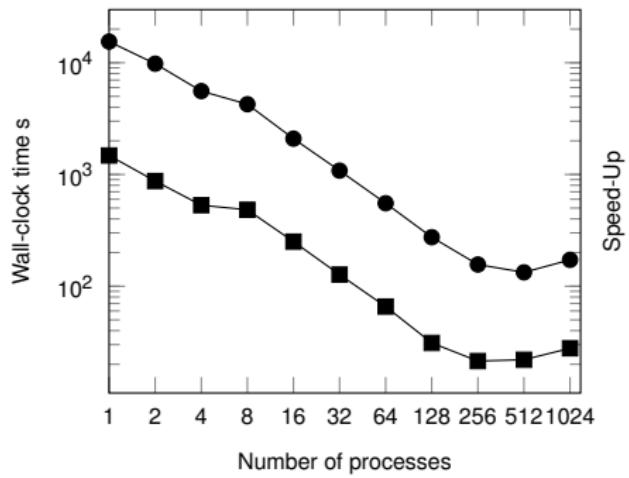
- Lösungen für Druck und Temperatur

$$p = \sin(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \cos(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$$

$$T = \sin(x_1^2) \cos(x_2^2) \sin(x_3^2).$$

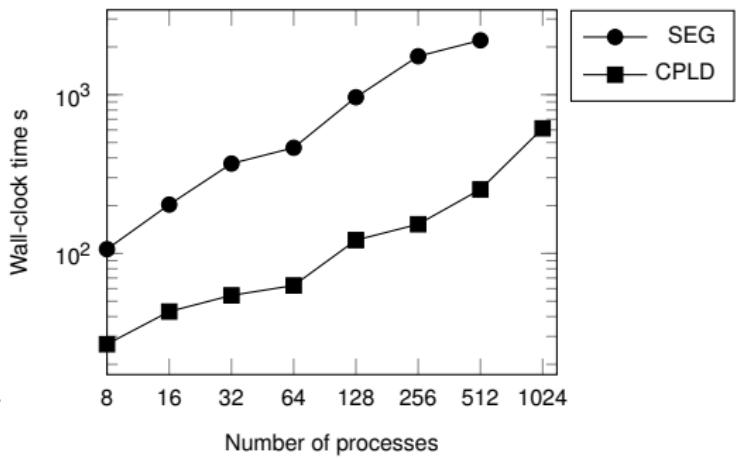
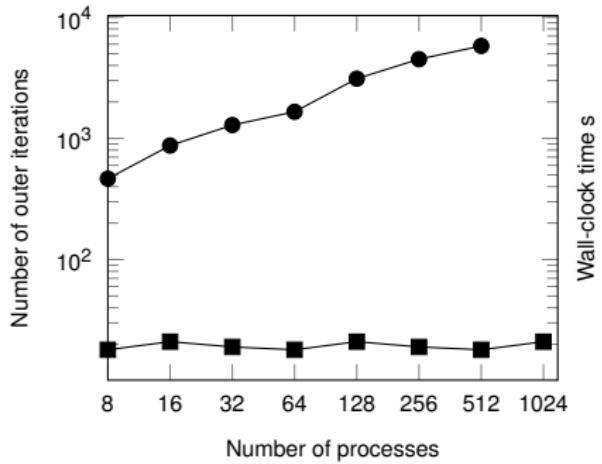
- Problemgebiet so wählen, dass Kontinuität im diskreten Sinne global erfüllt wird

Manufactured Solution - Strong-Scaling



- 128x128x128 Unbekannte auf Prozesse verteilt

Manufactured Solution - Weak-Scaling



- 32x32x32 Unbekannte pro Prozess
- Gekoppelter Algorithmus skaliert, die Implementierung aufgrund des Gleichungslösers nicht

Kanalströmung - Problemstellung

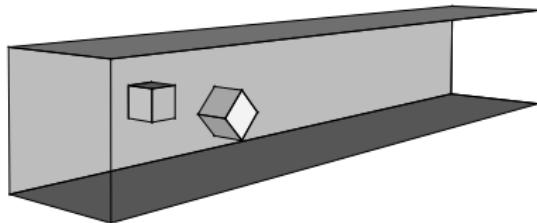


Abbildung: Sketch of the channel flow problem domain

- Würfel als Hindernisse
- Parabolisches Einstromprofil
- $Re \approx 20$
- Laminare Strömung

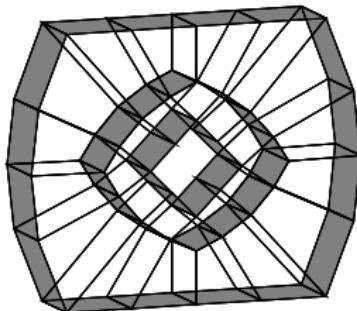
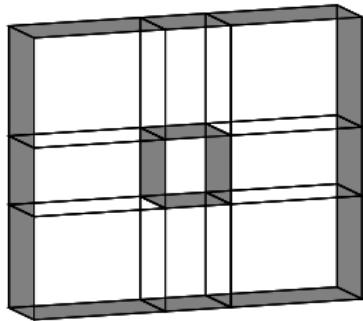


Abbildung: Blocking for the two different obstacles within the problem domain of the channel flow

Kanalströmung - Druck-Geschwindigkeitskopplung

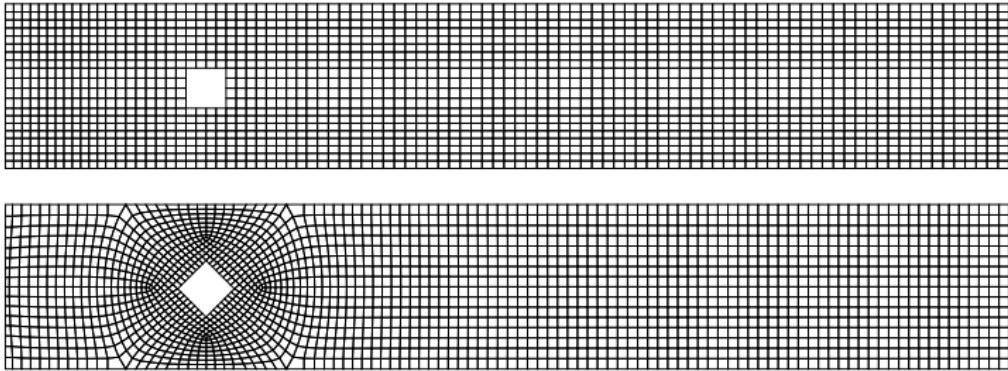


Abbildung: West and east boundary of the numerical grid for the channel flow problem

Tabelle: Performance analysis results of the channel flow problem for different numbers of unknowns comparing the segregated (SEG) to the fully coupled (CPLD) solution algorithm using one process on the MPI2 section of the HHLR supercomputer.

No. of Unknowns	SEG - time	CPLD - time	SEG - its	CPLD - its
75768	0.2226E+02	0.2674E+02	151	67
408040	0.4053E+03	0.1499E+03	355	42
2611080	1.1352E+05	0.3105E+04	1592	39



Beheizte Kavität - Problemstellung

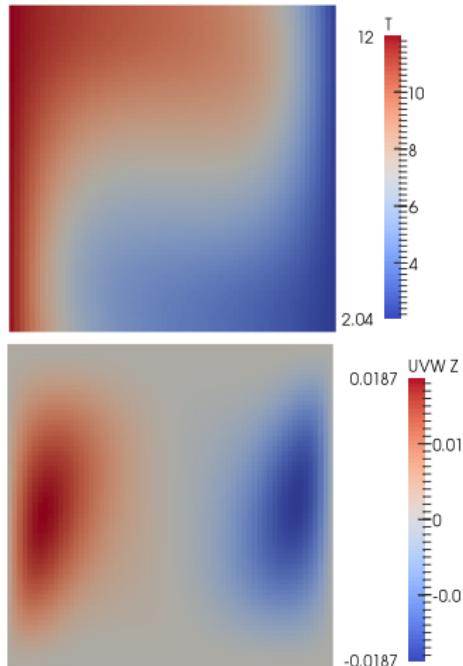


Abbildung: Temperatur- und w -Geschwindigkeitsfeld

Beheizte Kavität - Temperaturkopplung

Tabelle: Performance des SIMPLE algorithmus (SEG), des gekoppelten Algorithmus (CPLD) mit impliziter Boussinesq Approximation (TCPLD) und semi-impliziter Temperatur-Geschwindigkeits/Druck-Kopplung (NRCPLD).

Resolution	Solver configuration	Time	No. Non-linear its.
32x32x32	SEG	0.3719E+02	203
	CPLD	0.6861E+02	62
	TCPLD	0.1012E+03	31
	NRCPLD	0.2153E+02	22
64x64x64	SEG	0.1997E+04	804
	CPLD	0.7687E+03	63
	TCPLD	0.1278E+04	59
	NRCPLD	0.4240E+03	17
128x128x128	SEG	0.5197E+05	3060
	CPLD	0.1860E+05	74
	TCPLD	0.1950E+05	50
	NRCPLD	0.6155E+04	18

Inhalt

Motivation

Aufgabenstellung und Bearbeitung

Implementierung

Performanceuntersuchung

Fazit und Ausblick

Fazit

Ausblick