

Untersuchungen zur Genauigkeit von CFX-4.1 am Beispiel der schwingenden Wassersäule

Martin Wörner, Axel Blahak
Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Reaktorsicherheit

Workshop Mehrphasenströmungen
Bad Dürkheim

16. September 1998

Abteilung für Thermo- und Fluiddynamik im IRS

Einphasige Strömungen

- Turbulenzuntersuchungen zu Naturkonvektion
(Direkte numerische Simulation, TURBIT-Code)
- Entwicklung besserter statistischer Turbulenzmodelle
für Auftriebströmungen
- Anwendungsrechnungen für technische Strömungen
(FLUTAN-Code)

Zweiphasige Strömungen

- Experimente zu Blasenströmungen in Rohren
- Entwicklung von Methoden zur Grobstruktursimulation
von Zweiphasenströmungen

Realisierung:

- Grundlagencode: TURBIT-VoF
Volume-Tracking der Phasengrenzfläche
- Anwendungscode: Ankopplung der Methode und
Modelle an CFX

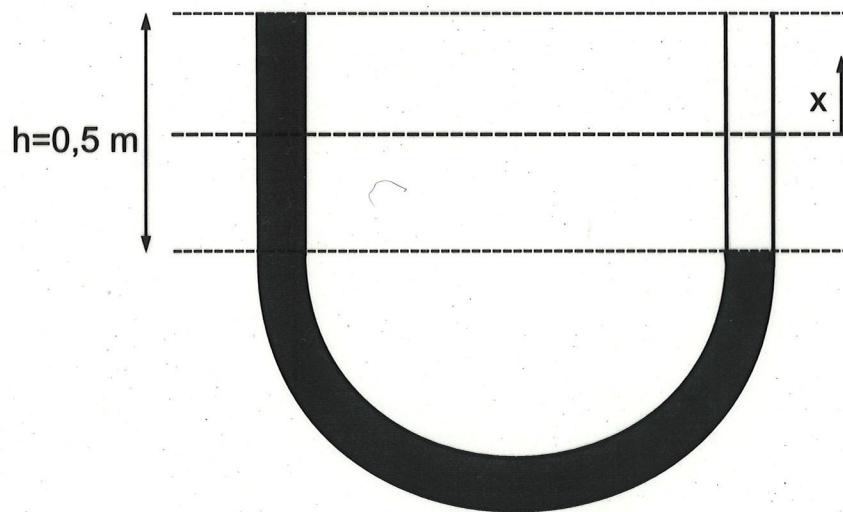
Genauigkeitsstudie zu CFX

Voraussetzung für Modell- und Methodenentwicklung:

Unterscheidung zwischen Effekten durch ungenaue Numerik und solchen durch physikalisches Modell

- ⇒ Bewertung der numerischen Diffusion etc.
- ⇒ Festlegung geeigneter Numerik-Parameter

Benchmark: Schwingende Wassersäule in U-Rohr



Analytische Lösung für reibungsfreien Fall:

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L}{g}} \quad (\text{hier: } T \approx 2.04 \text{ s})$$

Nachrechnung mit CFX 4.1

Ziel ist Bewertung von:

- numerischer Diffusion
(Verschmierung der Phasengrenze)
- numerischer Dissipation
(zeitliche Dämpfung der Schwingungsamplitude)
- Zeitgenauigkeit (Periodendauer)
- Rechenzeit

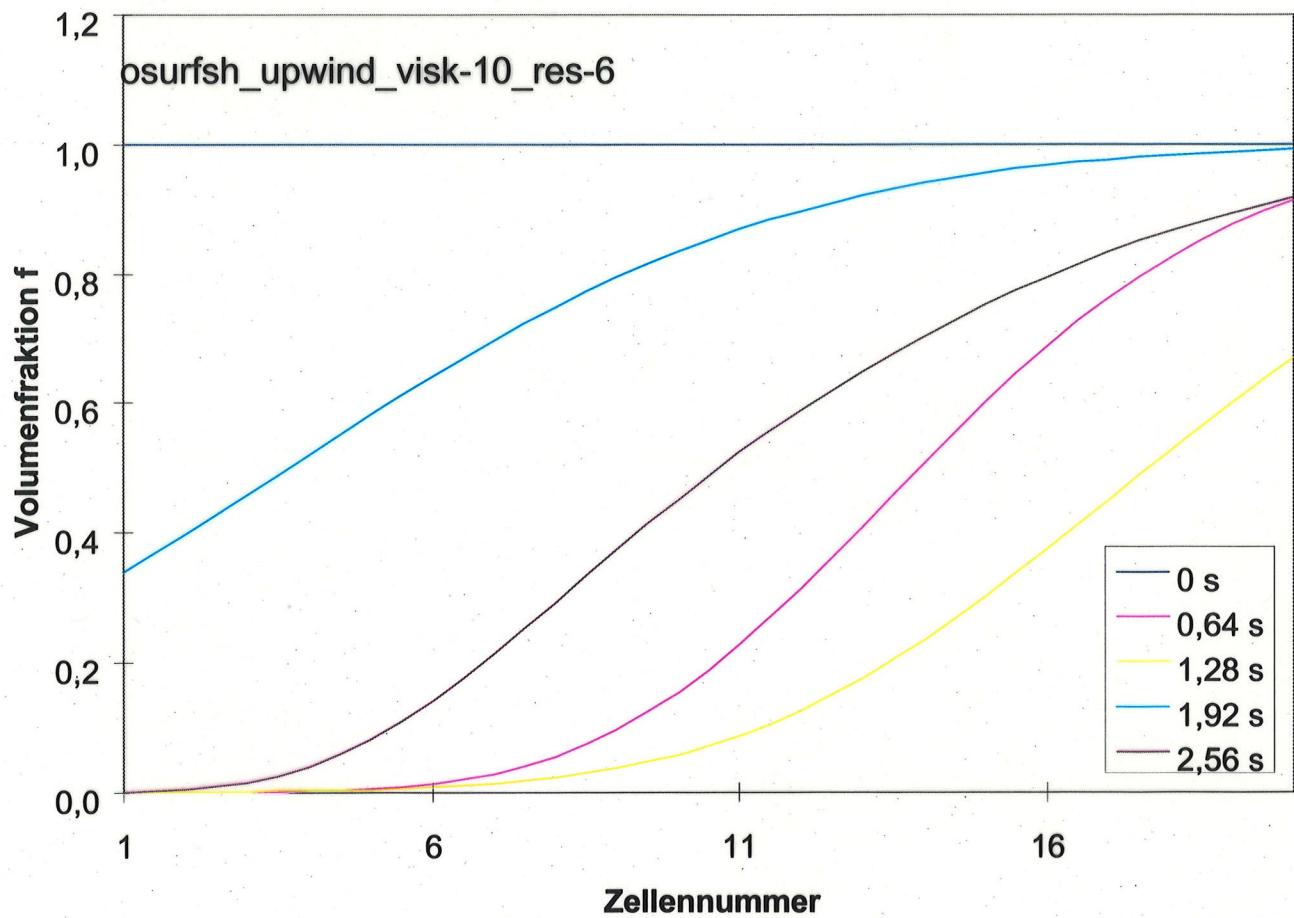
Feste Optionen:

- homogenes Modell in CFX
⇒ eine Impulsgleichung + zwei Volumenfraktionsgl.
- zweidimensional (2 * 102 Maschen)
- keine Wandreibung, reibungsfrei ($\nu = 10^{-10} m^2/s$)
- Rechnungen auf CRAY YMP-EL

Variation von:

- Surface Sharpening Algorithmus = SSA (ein/aus)
- Zeitschrittweite
- Rechengitter (Maschenweite)
- Abbruchkriterium (Residuum)
- Gleichungslöser

Numerische Diffusion ohne Surface Sharpening Algorithmus

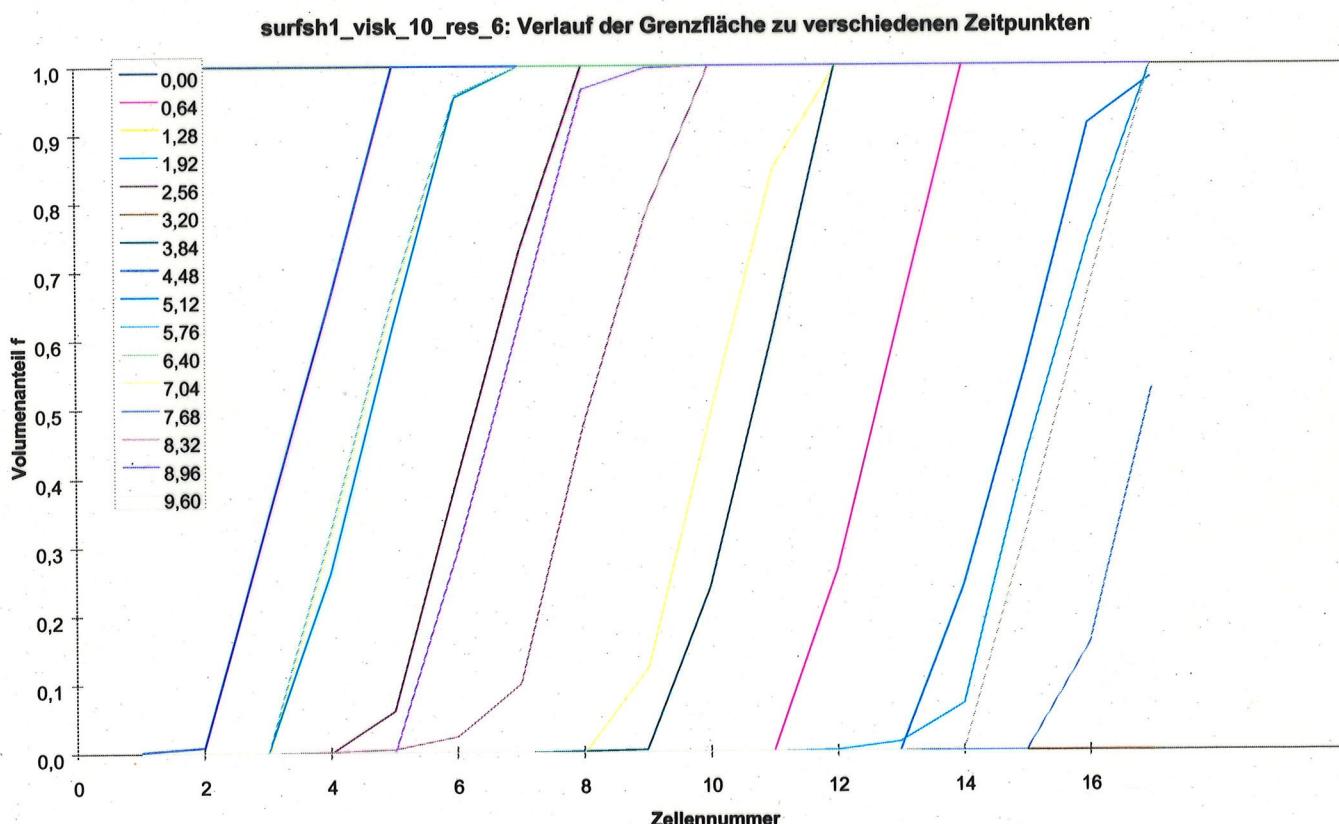


⇒ sehr starke Verschmierung der Grenzfläche

Numerische Diffusion mit SSA

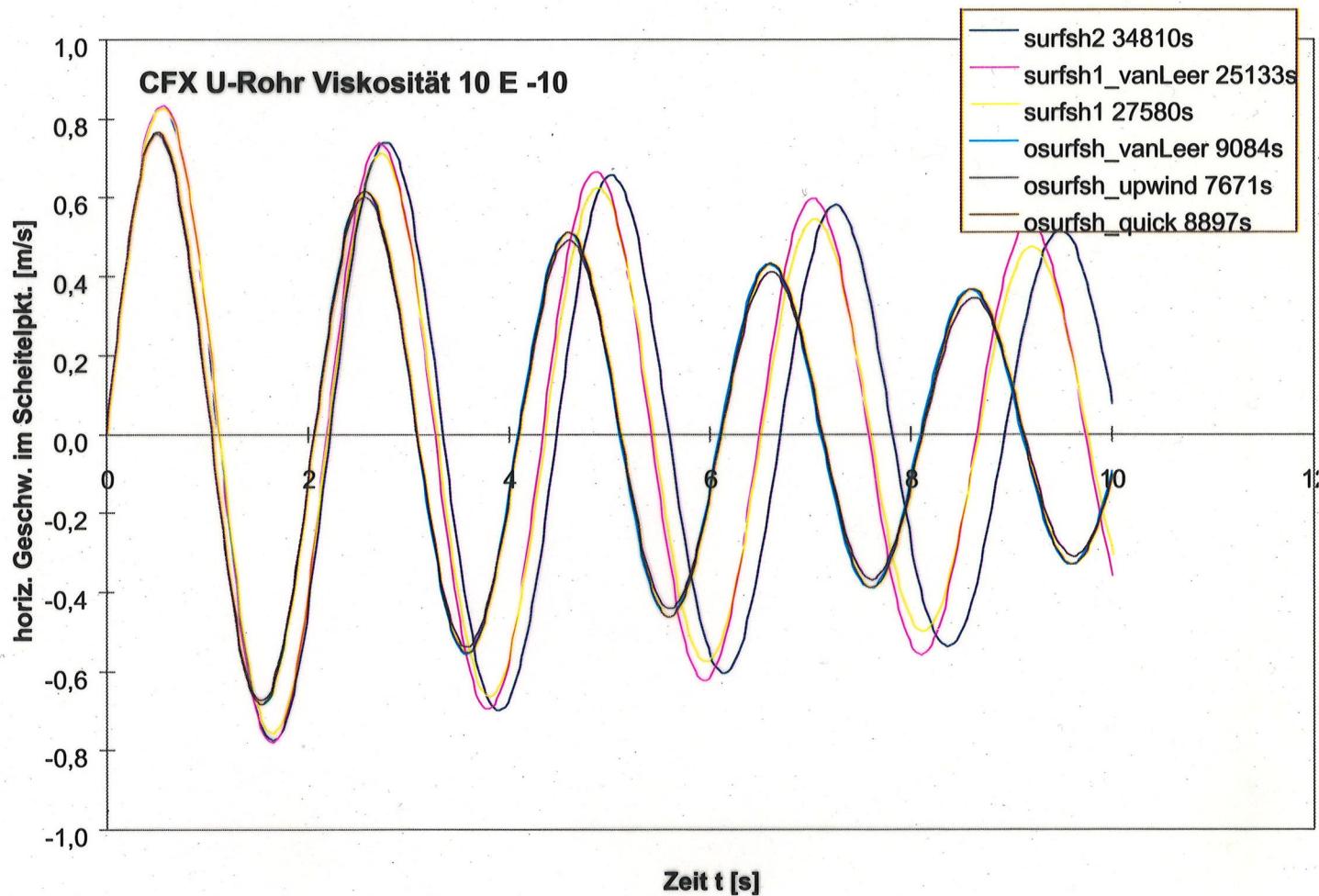
"the code identifies fluid on the wrong side of the interface and moves it onto the correct side of the interface ensuring that volume is conserved ..."

Stufe 1 - 4 (Empfehlung: St. 2, auf feinem Gitter 1)



⇒ Verschmierung über drei Zellen

Numerische Dissipation mit/ohne SSA



- mit SSA:
- weniger numerische Dissipation
 - um Faktor drei höhere Rechenzeit
 - T wird größer (\Rightarrow ungenauer)
 - Stufe 1: geringere Rechenzeit und etwas genauer als Stufe 2

Diskretisierung der Konvektionsterme

Volumenfraktionsgleichungen:

- in CFX 4.1 nur Upwind-Verfahren möglich

Impulsgleichung:

- Upwind (1. Ordnung)
- Quick (höherer Ordnung)
- Van-Leer (höherer Ordnung)

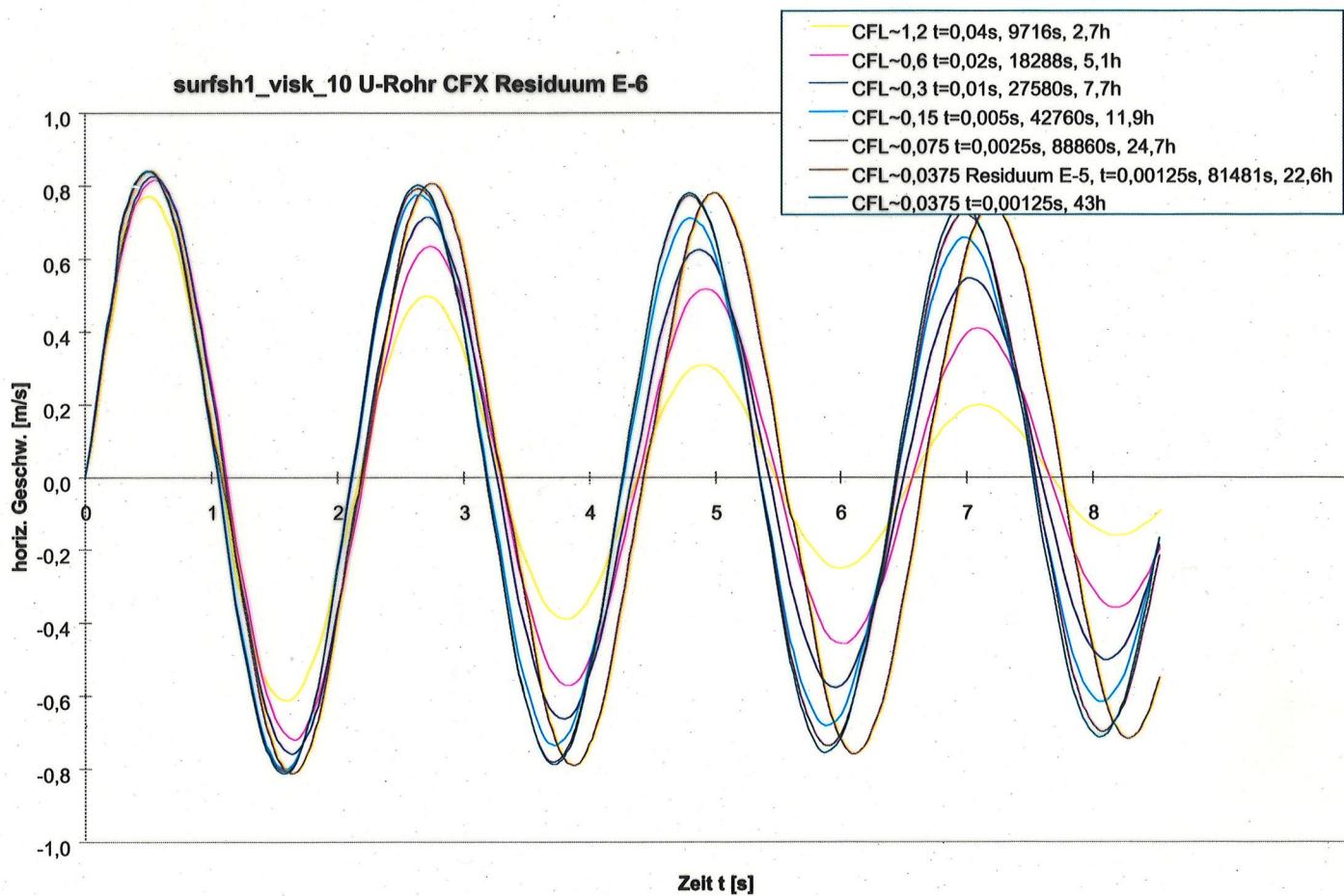
Kombination von Upwind-Verfahren für die Volumenfraktionsgleichungen und Verfahren höherer Ordnung für die Impulsgleichung führt für kleine Zeitschrittweiten zu Konvergenzproblemen

⇒ weitere Rechnungen mit Upwind-Verfahren

in CFX 4.2 Differenzenverfahren höherer Ordnung auch für Volumenfraktionsgleichungen
(noch nicht untersucht)

Einfluß der Zeitschrittweite

Variation der CFL-Zahl: $CFL = U_{max} \Delta t / \Delta x$



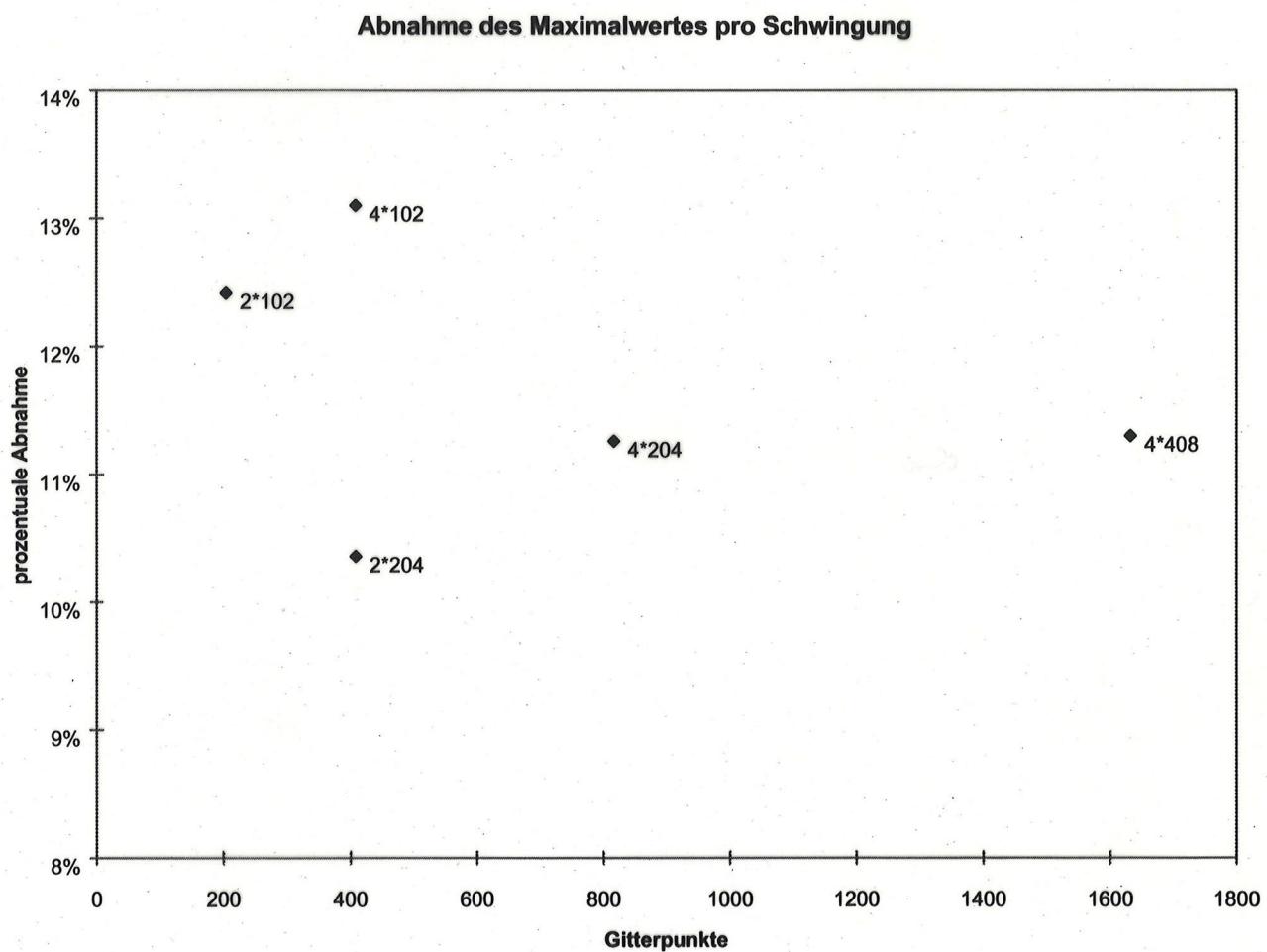
⇒ geringe numer. Dissipation nur für $CFL \leq 0.1$

adaptive Zeitschrittanpassung durch CFX

⇒ sehr starke numerische Dämpfung

Einfluß des Rechengitters

- Verdopplung der Gitteranzahl in Querrichtung
- Verdopplung/Vervierfachung in Längsrichtung



- kein eindeutiger Trend erkennbar
- mehr Maschen in Längsr. $\Rightarrow T$ wird ungenauer

Residuum und Gleichungslöser

Abbruchkriterium für Konvergenz in CFX:

Residuumswert der Massenbilanz pro Iterationsschritt, addiert über alle Zellen (dimensionsbehaftet)

maximaler Massenfluß im Benchmark $\approx 4\text{kg/s}$

Residuum in den vorgest. Rechnungen $= 10^{-6}\text{kg/s}$

Variation des Residuum-Wertes:

$10^{-7}\text{kg/s} \Rightarrow +50\%$ CPU-Zeit ohne Genauigkeitsgewinn

$10^{-5}\text{kg/s} \Rightarrow -40\%$ CPU-Zeit ohne Genauigkeitsverlust

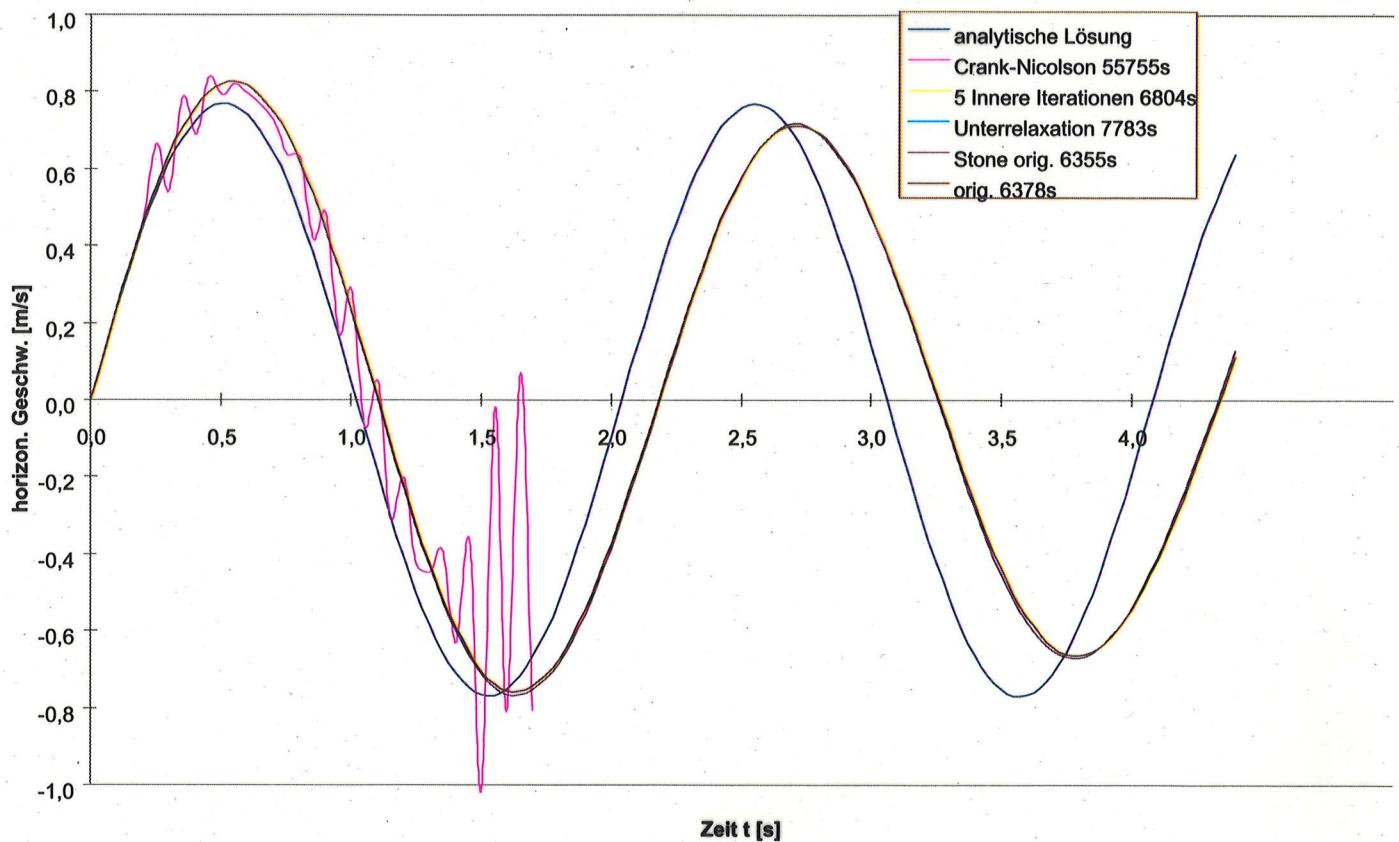
$10^{-4}\text{kg/s} \Rightarrow$ um Faktor 3 geringe CPU-Zeit, aber nicht akzeptabler Genauigkeitsverlust

Residuumswert ist dimensionsbehaftet und muß daher für jedes Problem aus Kompromiß zw. Rechenzeit und Genauigkeitsanforderungen optimiert werden

Variation des Gleichungslösers:

- kein Einfluß auf das Ergebnis
- AMG ist 3 mal langsamer als STONE oder ICCG

Vergleich mit analytischer Lösung



- erste Amplitude überschätzt die analytische Lösung
- Crank-Nicolson Zeitintegrationsverf. ist instabil

Schlußfolgerungen

Benchmark kann mit CFX nachgerechnet werden, allerdings nicht „blind“

Numerische Diffusion

- in CFX 4.1 scharfe Grenzfläche nur mit SSA
⇒ dreifache Rechenzeit, T wird ungenauer
- Problem in CFX 4.2 mit Differenzenverfahren höherer Ordnung für Vol.-Fraktionen behoben?

Numerische Dissipation

- starker Einfluß der Zeitschrittweite
- ausreichend gering nur für $CFL \leq 0.1$
- Bedarf an explizitem ZIV für transiente Strömungen

Maschennetzverfeinerung

- kein eindeutiger Trend zu genaueren Ergebnissen

Empfehlung für Abbruchkriterium

- normiertes dimensionsloses Residuum $\approx 10^{-5}$

Gleichungslöser

- ausprobieren lohnt ...

Anhang

```
Commandfile für CFX 4.1
>>CFXF3D
>>OPTIONS
  TWO DIMENSIONS
  NUMBER OF PHASES 2
  RECTANGULAR GRID
  CARTESIAN COORDINATES
  BUOYANT FLOW
  TRANSIENT FLOW
>>USER FORTRAN
  USRINT
>>MODEL DATA
>>TITLE
  PROBLEM TITLE 'U-Rohr 2-D'
>>PHYSICAL PROPERTIES
  >>BUOYANCY PARAMETERS
    GRAVITY VECTOR 0.000000E+00 -
      9.800000E+00 0.000000E+00
  >>STANDARD FLUID
    PHASE NAME 'PHASE1'
    FLUID 'WATER'
    STANDARD FLUID REFERENCE
      TEMPERATURE 293.15
  >>FLUID PARAMETERS
    PHASE NAME 'PHASE1'
    VISCOSITY 1.0E-10
  >>STANDARD FLUID
    PHASE NAME 'PHASE2'
    FLUID 'AIR'
    STANDARD FLUID REFERENCE
      TEMPERATURE 293.15
  >>FLUID PARAMETERS
    PHASE NAME 'PHASE2'
    VISCOSITY 1.0E-10
  >>MULTIPHASE PARAMETERS
    >>MULTIPHASE MODELS
      >>HOMOGENEOUS
        SURFACE SHARPENING ALGORITHM
        SURFACE SHARPENING LEVEL 1
    >>TRANSIENT PARAMETERS
      >>FIXED TIME STEPPING
        TIME STEPS 1000 * 0.01
      END
    >>SOLVER DATA
      >>PROGRAM CONTROL
        MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS 400
        MASS SOURCE TOLERANCE 1.0000E-06
    >>EQUATION SOLVERS
      U VELOCITY 'AMG'
      V VELOCITY 'AMG'
      VOLUME FRACTION 'AMG'
      PRESSURE 'AMG'
  >>MODEL BOUNDARY CONDITIONS
    >>SET VARIABLES
      PATCH NAME 'OFF-ENDE-1'
      PHASE NAME 'PHASE1'
      VOLUME FRACTION 0.0
      PRESSURE 0.0
    END
    >>SET VARIABLES
      PATCH NAME 'OFF-ENDE-1'
      PHASE NAME 'PHASE2'
      VOLUME FRACTION 1.0
      PRESSURE 0.0
    END
    >>SET VARIABLES
      PATCH NAME 'OFF-ENDE-2'
      PHASE NAME 'PHASE1'
      VOLUME FRACTION 0.0
      PRESSURE 0.0
    END
    >>SET VARIABLES
      PATCH NAME 'OFF-ENDE-2'
      PHASE NAME 'PHASE2'
      VOLUME FRACTION 1.0
      PRESSURE 0.0
    END
  >>WALL BOUNDARY CONDITIONS
    PATCH NAME 'WALL'
    TAUX 0.0
    TAUY 0.0
    TAUZ 0.0
  END
  >>OUTPUT OPTIONS
    >>ANIMATION DATA
      FILE NAME 'MANO1'
      FORMATTED
      PHASE NAME 'PHASE1'
      Z 0.025
      TIME INTERVAL 0.1
      ALL VARIABLES
    >>DUMP FILE FORMAT
      FORMATTED
    >>LINE GRAPH DATA
      FILE NAME 'BLOCK3_1_2_1'
      BLOCK NAME 'BLOCK-NUMBER-3'
      IJK 1 2 1
```