

# **Dreidimensionale numerische Simulation von Einzelblasen und Blasenschwärmen mit dem Rechenprogramm TURBIT-VoF**

W. Sabisch, M. Wörner, G. Grötzbach, D.G. Cacuci  
Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorsicherheit

1. Workshop „CFD in der Praxis“  
Bad Dürkheim  
12. und 13. September 2000

---

## Gliederung

- Motivation
- Mathematische Beschreibung
  - Grundgleichungen
  - Numerik im Rechenprogramm TURBIT-VoF
- Ergebnisse
  - Einzelblasen verschiedener Form
  - Schwarm von Blasen
- Schlussfolgerungen

## Motivation

- Phänomene in Blasenströmungen
  - Blaseninduzierte Turbulenz („Pseudo-Turbulenz“)
  - Dämpfung von scherinduzierter Turbulenz
  - Schwarmverhalten von Blasen
  - ⚡ Vorgänge sind nicht vollständig verstanden
  - ⚡ keine zufriedenstellende Modellierung in CFD-Codes
- Zielsetzung: „direkte“ Simulationen mit der VoF-Methode
  - grundlegendes Verständnis erweitern
  - aus Datenbasis verbesserte Modelle entwickeln

## Dimensionslose Grundgleichungen

$$\nabla \cdot \vec{u}_m = 0$$

$$\rho_m \equiv f \rho_1 + (1 - f) \rho_2, \quad (f \equiv \alpha_1)$$

$$\vec{u}_m \equiv \frac{1}{\rho_m} \left( f \rho_1 \langle \vec{u}_1 \rangle_1 + (1 - f) \rho_2 \langle \vec{u}_2 \rangle_2 \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho_m \vec{u}_m + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \otimes \vec{u}_m + \underline{D}_{int}) &= -\nabla p_m \\ + \frac{1}{Re_{ref}} \nabla \cdot (\underline{\tau} + \underline{\tau}_{int}) + (1 - f) \frac{Eo_{ref}}{We_{ref}} \vec{e}_3 + \frac{a_{int} \kappa \vec{n}}{We_{ref}} \end{aligned}$$

## Volume-of-Fluid (VoF) Methode

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f \vec{u}_m) = 0$$

- 1.) Phasengrenzfl. rekonstruieren
- 2.) Phasengrenzfl. advektieren

Neuer Algorithmus zur Rekonstruktion der Phasengrenzfläche:

**EPIRA** = **E**xact **P**lane **I**nterface **R**econstruction **A**lgorithm

Eine ebene drei-dimensionale Phasengrenzfläche wird stets exakt rekonstruiert, unabhängig von ihrer Orientierung im Raum.

## Rechenprogramm TURBIT-VOF

- Finite Volume Methode auf strukturiertem versetztem Gitter
  - Continuum Surface-Force-Modell für Oberflächenspannung
  - Lösung der Druck-Poisson-Gleichung mit CG Verfahren
  - Explizites Runge-Kutta Zeitintegrationsverfahren (3. Ordn.)
  - Zentrales Differenzenschema für diffusive Terme (2. Ordn.)
  - **W-ENO Differenzenschema für konvektive Terme (3. Ordn.)**
- ➔ VoF Methode mit verbesserter Rekonstruktion (EPIRA) und hochauflösenden numerischen Verfahren

## Verifikation von TURBIT-VoF

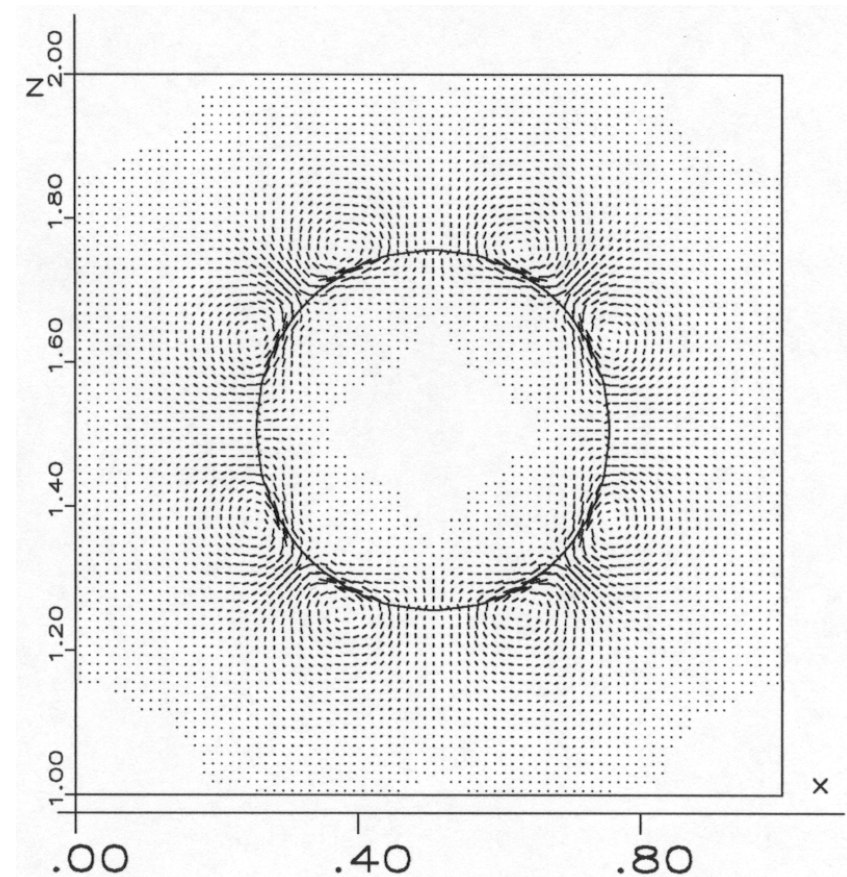
- einphasige Strömung (Taylor-Green Wirbel)
- Schwerewelle (Vergleich mit analytischer Lösung)
- Kapillarwelle (Vergleich mit analytischer Lösung)
- Rayleigh-Taylor Instabilität (2D und 3D)
- **Blase in Ruhe (Drucksprung)**

## Zweidimensionale Blase in Ruhe

- zylindrische Grenzfläche
- Gitter: 80 x 4 x 80
- Anfangsbedingung:  $u_i = 0$
- Laplace'scher Drucksprung:

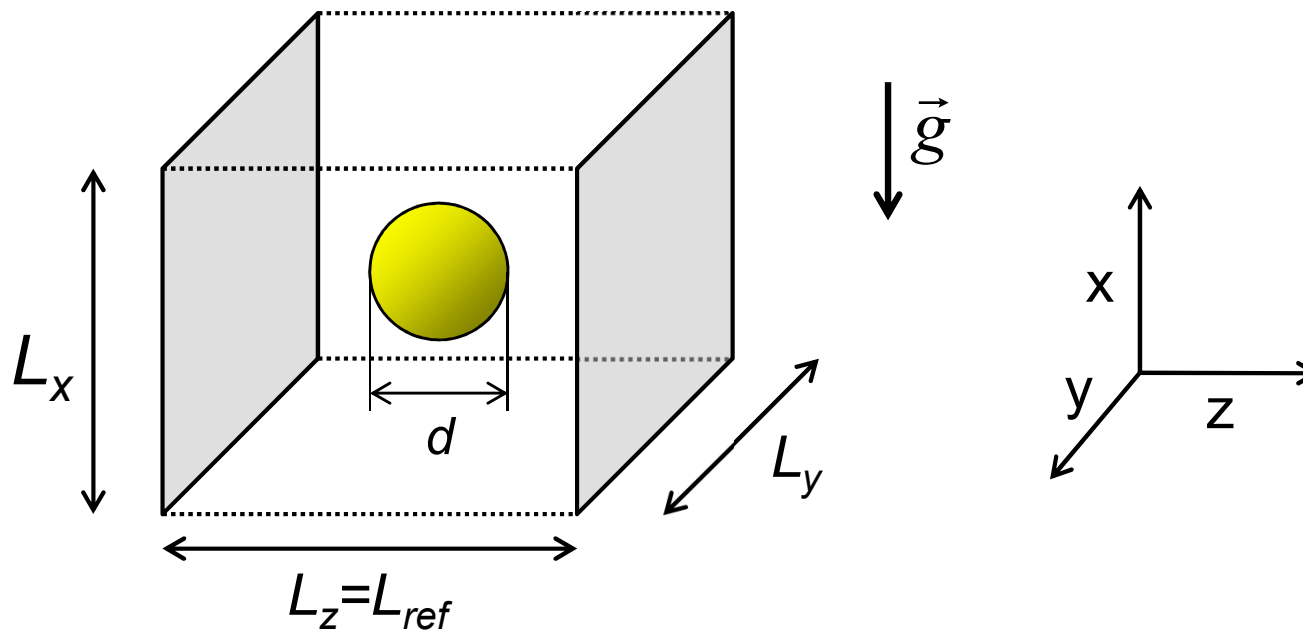
$$\Delta p = \frac{\sigma}{r_{Blase}} \quad \checkmark$$

- aber: artifizielle Strömungen  
(ca. 1% der Aufstiegsgeschw.)





## Geometrie und Randbedingungen



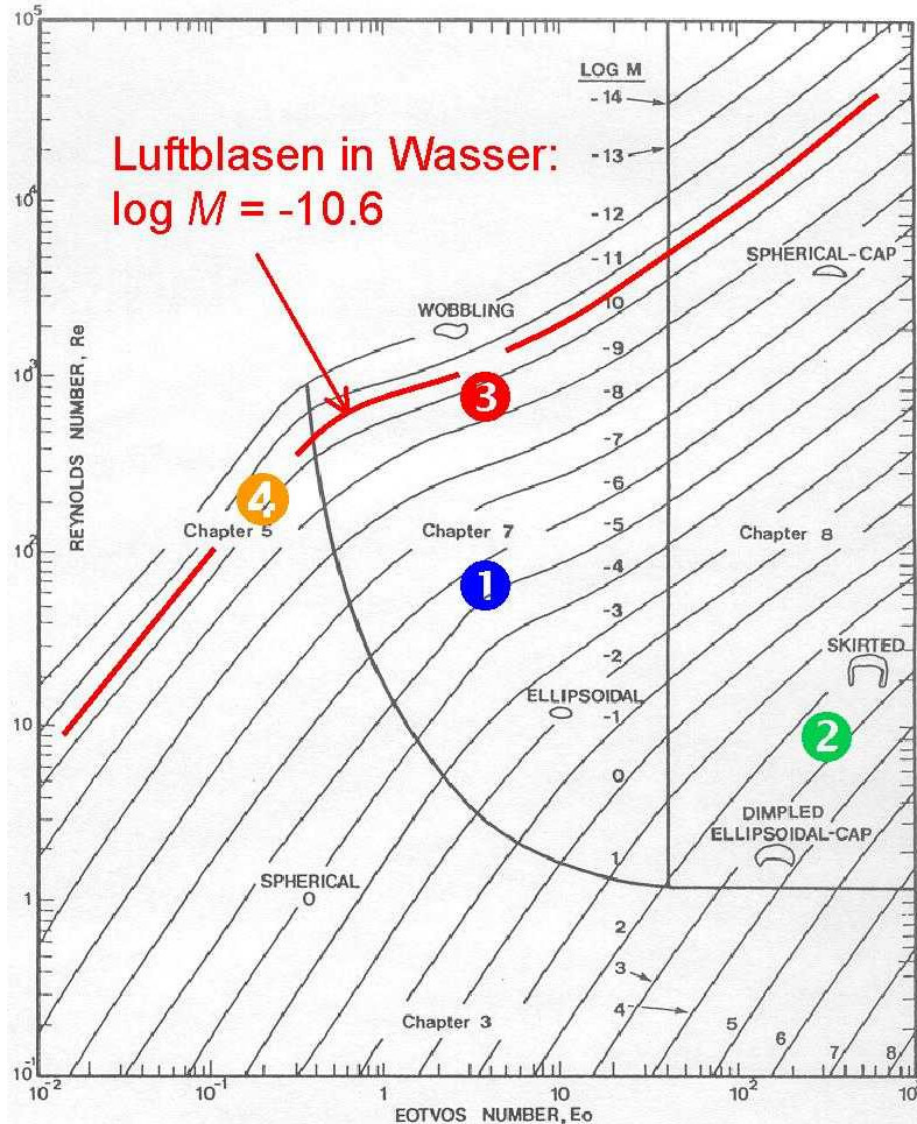
- x-, y-Richtung: periodische Randbedingungen
- z-Richtung: feste Wände

$$\rho_2 / \rho_1 = 1/2$$

$$\mu_2 / \mu_1 = 1$$

## Simulations-Parameter

Bez.	$E_0$	Log $M$	Gitter	Gebiet	$d / L$	Anf.-W.	Form
4 1BLc	0,2	-10,6	64*64*64	1x1x1	1 / 4	1BLa	kugelförmig
1 1BLa	3,07	-5,51	64*64*64	1x1x1	1 / 4	$U=0$	ellipsoid
1BLaa	3,07	-5,51	64*64*128	1x1x2	1 / 8	$U=0$	ellipsoid
1BLab	3,07	-5,51	128*64*64	2x1x1	1 / 4	$U=0$	ellipsoid
1BLac	3,07	-5,51	128*128*128	1x1x1	1 / 4	$U=0$	ellipsoid
1 5BLa	3,07	-5,51	64*64*64	1x1x1	1 / 4	$U=0$	ellipsoid
2 1BLb	243	2,42	64*64*64	1x1x1	1 / 4	1BLa	schirmförmig
3 1BLd	3,07	-9,6	64*64*64	1x1x1	1 / 4	1BLa	forminstabil



## Blasenformen nach Clift, Grace, Weber



### Kennzahlen:

$$Re_{ref} = \frac{\rho_l u_{Blase} d_{Blase}}{\mu_l}$$

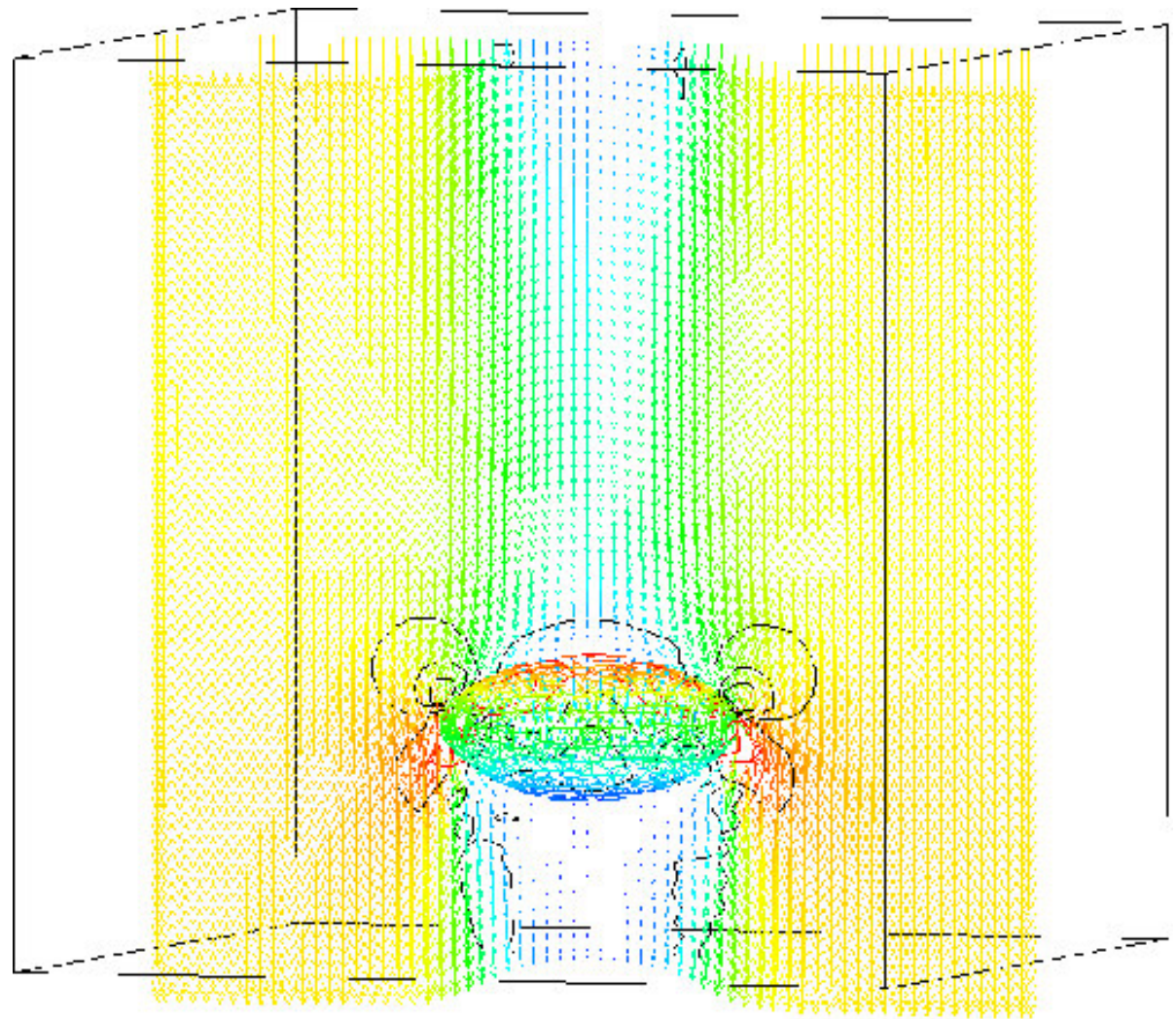
$$Eo_{ref} = \frac{(\rho_l - \rho_g) g d_{Blase}^2}{\sigma}$$

$$We_{ref} = \frac{\rho_l u_{Blase}^2 d_{Blase}}{\sigma}$$

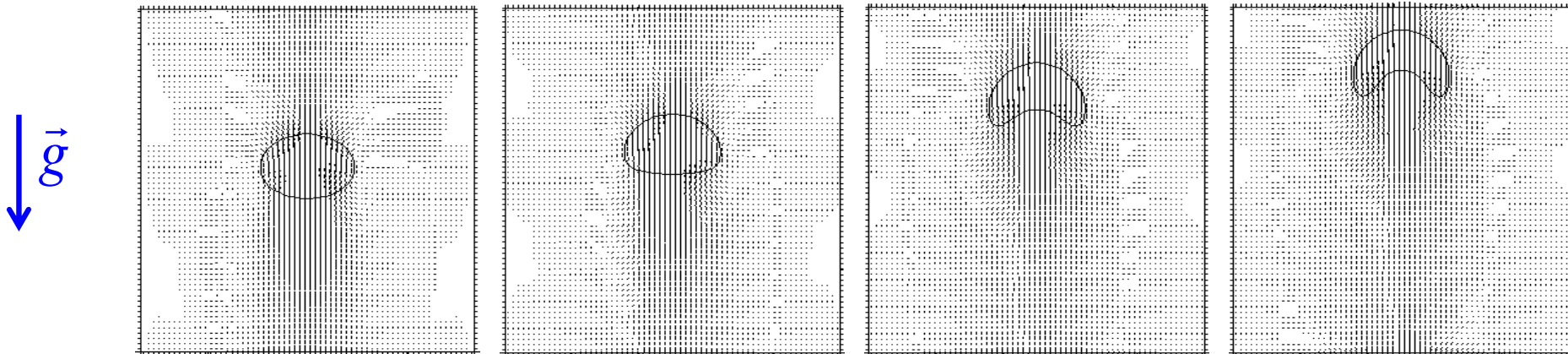
$$Mo_{ref} = \frac{g \mu_l^4 (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2 \sigma^3} = \frac{Eo \cdot We^2}{Re^4}$$

## Fall ①: ellipsoide Blase

	Exp.	Sim.
Halb- achsendv.	0,72	0,71
$Re_{Blase}$	50...70	61,5



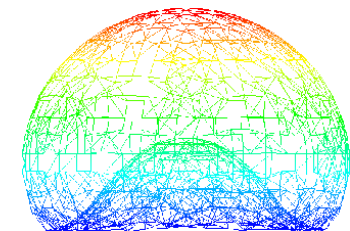
## Fall 2: schirmförmige Blase



Stationäre Blasenform:



Exp. Bhaga&Weber



Rechnung

## Fall ③: forminstabile Blase

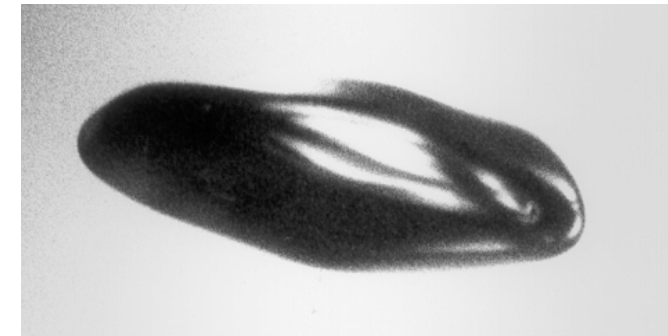
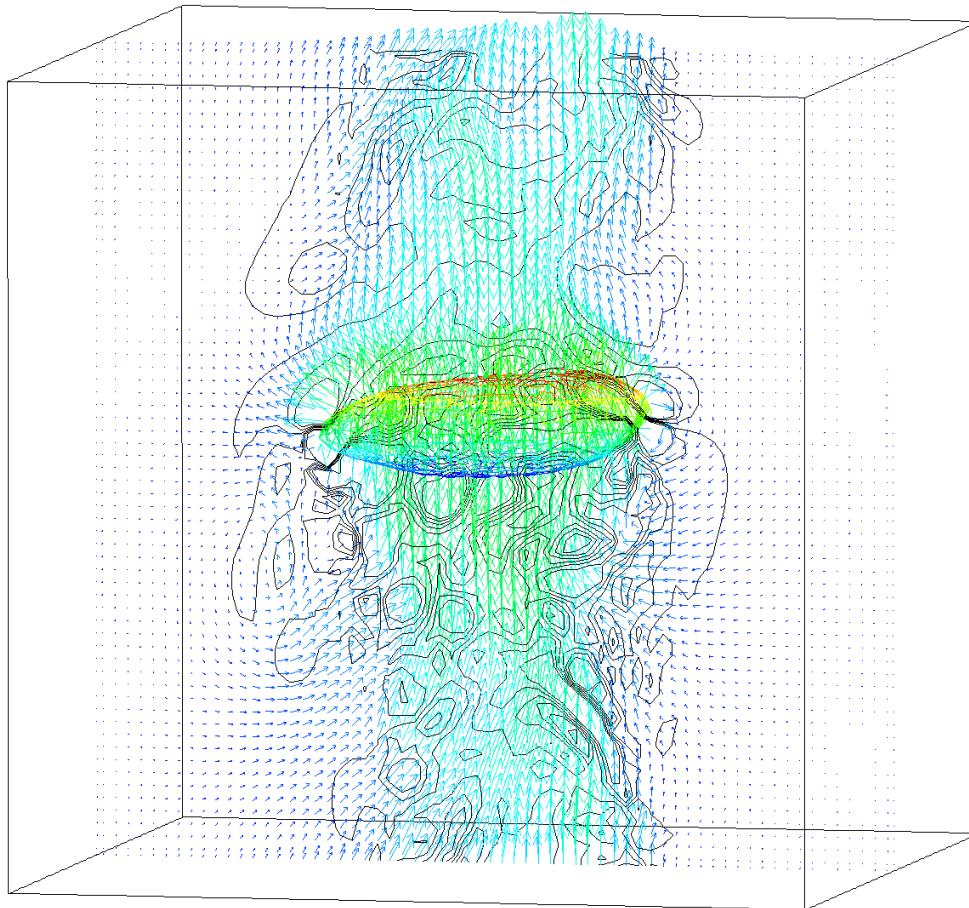
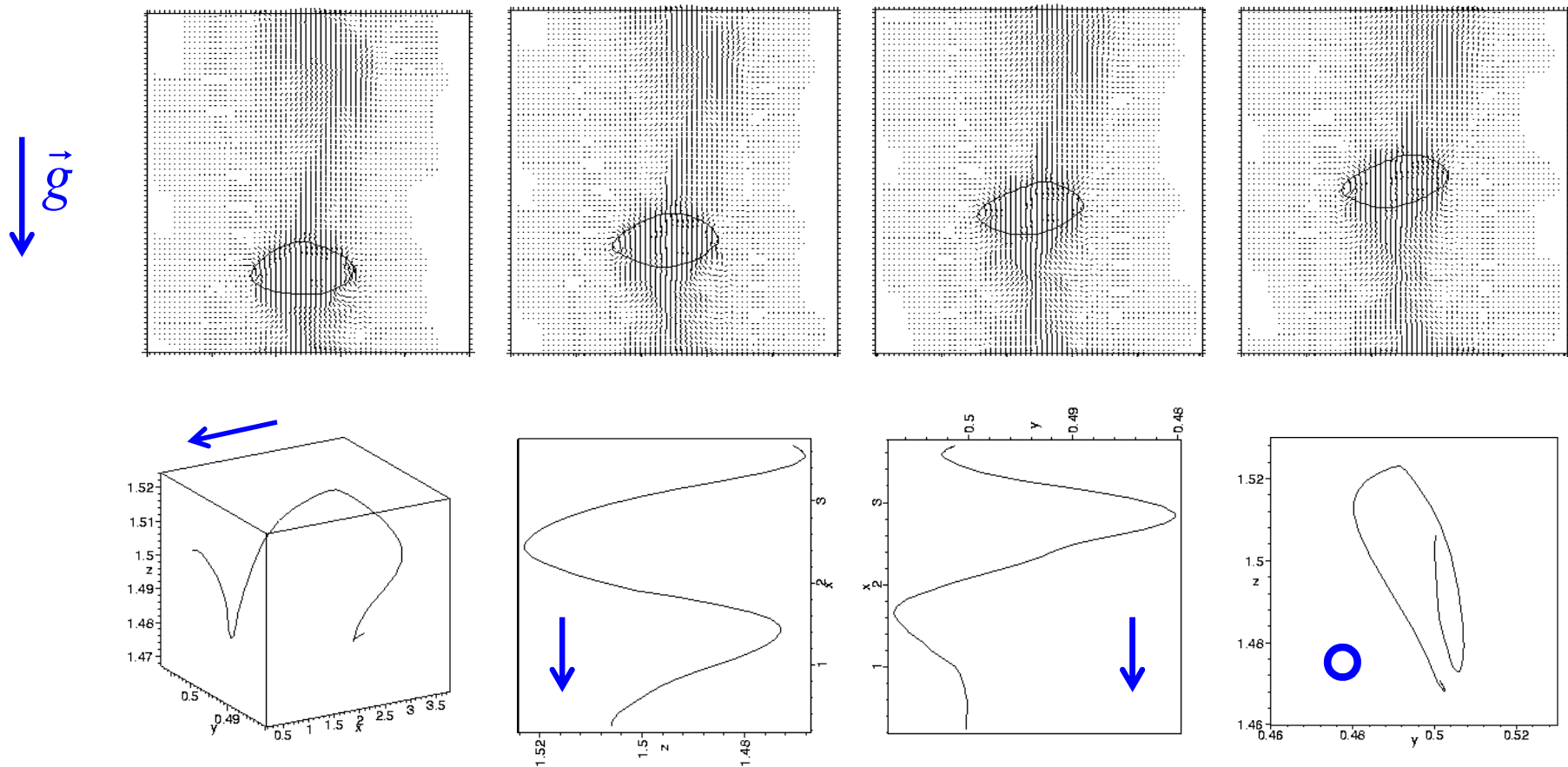
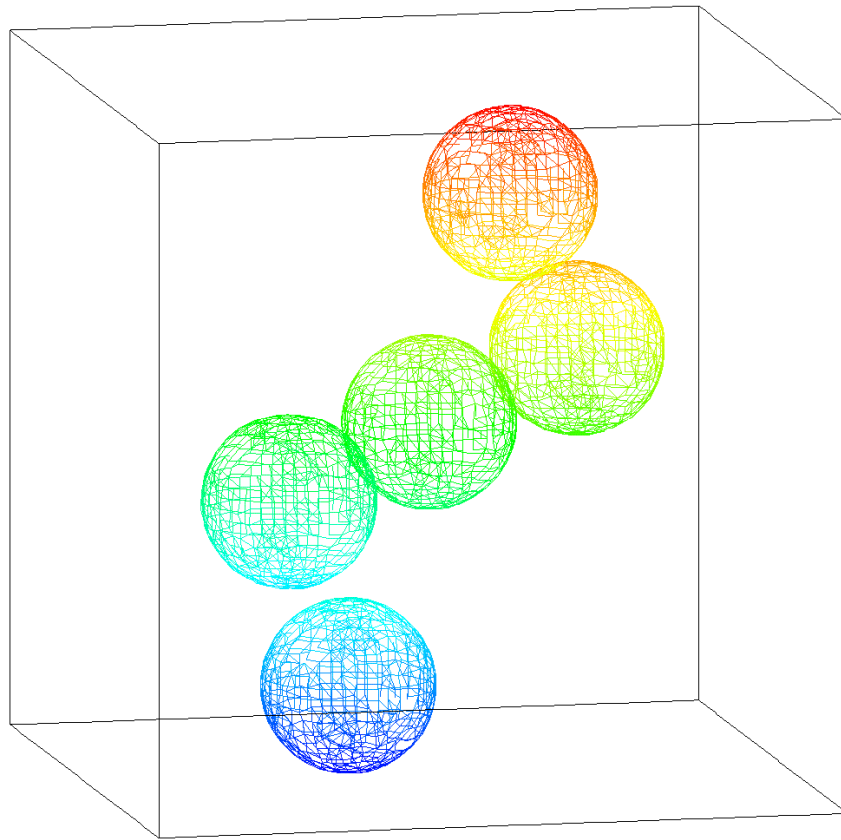


Foto einer forminstabilen  
Luftblase in Wasser

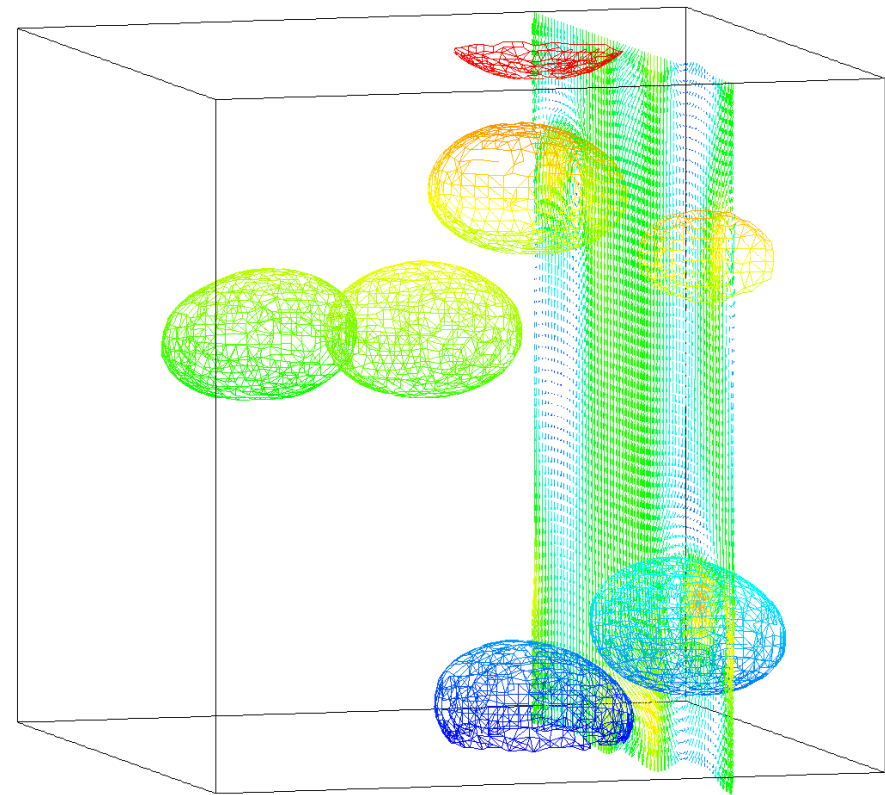
# Fall ③: Aufstiegsbahn der forminstabilen Blase



## Fünf ellipsoide Blasen (Fall 1, $\alpha = 4\%$ )



$t = 0$



$t = 2.29$



## Schlussfolgerungen und Ausblick

- verbesserte VoF-Methode für 3D Blasendynamik
- gute Ergebnisse auch bei „grober“ Blasenauflösung
- ➔ numerisches Tool zur Untersuchung von Blasen-Blasen Wechselwirkung und Blaseninduzierter Turbulenz

- 
- Entwicklung entsprechender physikalischer Modelle
  - Koaleszenz und Fragementierung von Blasen
  - Erweiterung für Wärme- und evtl. Stoffübergang