

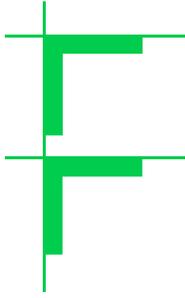
Direkte numerische Simulation von Blasenschwärmen und Analyse der turbulenten kinetischen Energiegleichung der flüssigen Phase

Martin Wörner¹, Milica Ilić¹, Dan G. Cacuci²

¹ Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorsicherheit

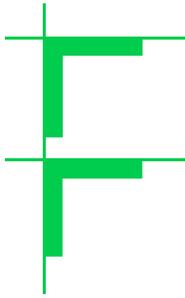
² Universität Karlsruhe, Institut für Kerntechnik und Reaktorsicherheit

Garching, 17. Januar 2005



Einführung

- Motivation:
 - Berechnung turbulenter Blasenströmungen mit 2-Fluid-Modell
- Problematik:
 - kein etabliertes und für weite Parameterbereiche gültiges Turbulenzmodell für Blasenströmungen verfügbar
- Gängige Vorgehensweise:
 - Verwendung des $k-\varepsilon$ Modells für die flüssige Phase
 - Standard-Satz der Koeffizienten (ermittelt aus Experimenten in einphasiger Strömung)

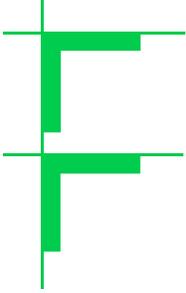


Zielsetzung

- Analytische Form der Transportgleichung für die kinetische Turbulenzenergie der Flüssigphase (k_L) ist bekannt:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L k_L) + \nabla \cdot (\alpha_L k_L \overline{\mathbf{u}}_L) = \underbrace{\frac{1}{Re_{\text{ref}}} \nabla \cdot (\alpha_L \overline{\mathbb{T}}'_L \cdot \mathbf{u}'_L)}_{\text{DIFFUSION}} - \nabla \cdot \left[\alpha_L \left(\overline{p'_L \mathbf{u}'_L} + \frac{1}{2} \overline{(\mathbf{u}'_L \cdot \mathbf{u}'_L) \mathbf{u}'_L} \right) \right]$$
$$\underbrace{-\alpha_L \overline{\mathbf{u}'_L \mathbf{u}'_L} : \nabla \overline{\mathbf{u}}_L}_{\text{PRODUKTION}} \quad \underbrace{-\frac{1}{Re_{\text{ref}}} \alpha_L \overline{\mathbb{T}}'_L : \nabla \mathbf{u}'_L}_{\text{DISSIPATION}} \quad \underbrace{\left[\frac{1}{Re_{\text{ref}}} \overline{\mathbb{T}}'_{L;\text{in}} - \overline{p}'_{L;\text{in}} \mathbb{I} \right] \cdot \mathbf{u}'_{L;\text{in}} \cdot \mathbf{n}_{L;\text{in}} a_{\text{in}}}_{\text{GRENZFLÄCHENTERM}}$$

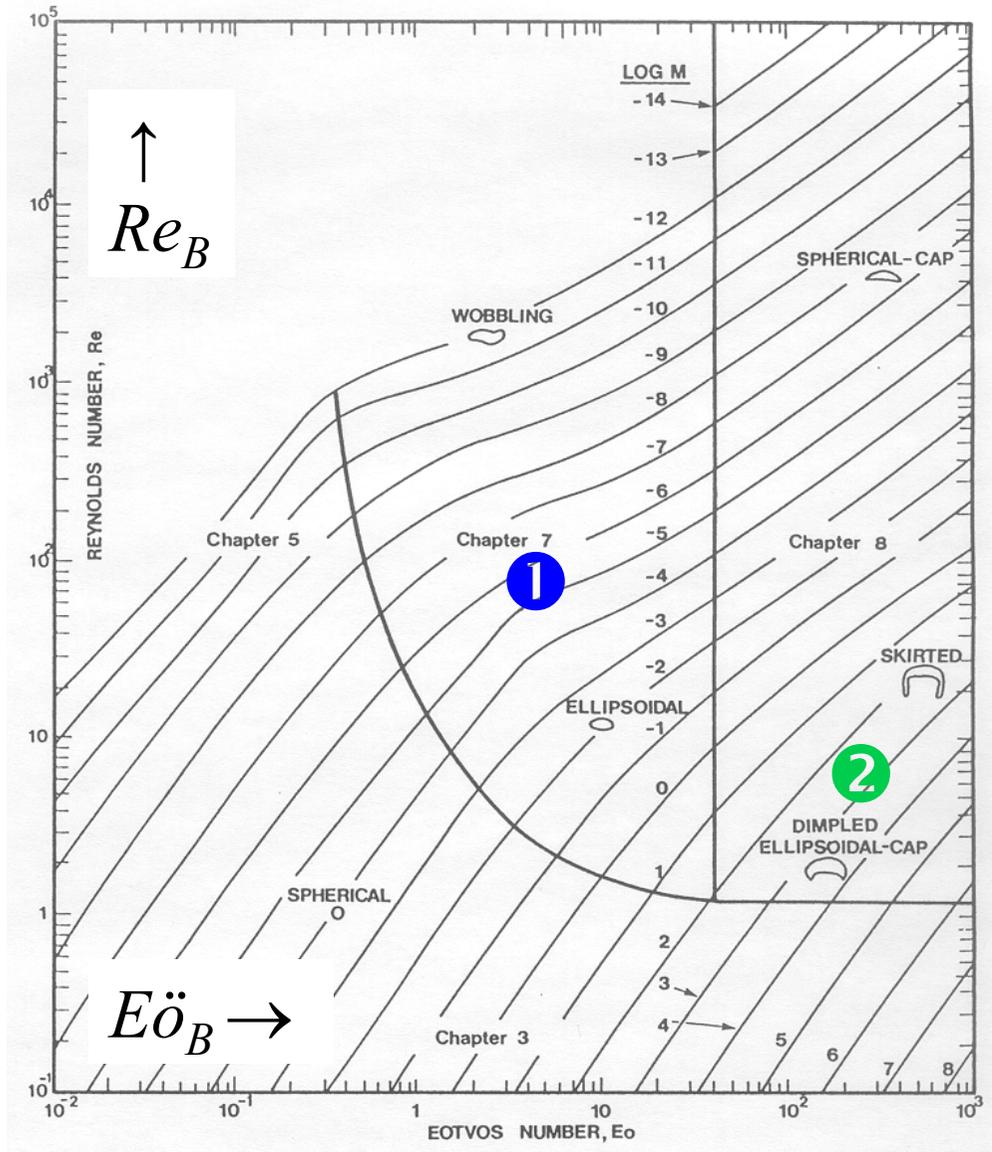
- Terme auf rechter Seite der Gleichung müssen modelliert werden
- Experimentelle Daten zu den einzelnen Termen fehlen
- ⇒ **Direkte numerische Simulation (DNS) von Blasenschwärmen**



Rechenprogramm TURBIT-VOF*

- Verfolgung der Phasengrenzfläche
 - Volume-of-fluid Methode
 - Phasengrenzfläche wird lokal durch eine Ebene approximiert
- Grundgleichungen für zwei inkompressible Fluide
 - Ein-Feld Impulsgleichung mit Oberflächenspannungsterm
 - Divergenz-Freiheit der Schwerpunktgeschwindigkeit
 - Advektions-Gleichung für Volumenfraktion f der flüssigen Phase
- Diskretisierung im Raum
 - Finite-Volumen Formulierung für reguläres versetztes Gitter
 - Zweiter Ordnung zentrale Differenzen Approximationen
- Lösungs-Strategie
 - Projektionsmethode führt auf Poisson-Gleichung für den Druck
 - Zeitintegration mit explizitem Runge-Kutta Verfahren 3. Ordnung

Beispiel für Verifikation von TURBIT-VOF



1 Mittlere Morton-Zahl

ellipsoidförmige Blase

DNS für $\Gamma_\mu = \mu_d / \mu_c = 1$,
 $Mo = 3,09 \cdot 10^{-6}$, $Eö_B = 3,06$

$\Gamma_\rho = \rho_d / \rho_c = 0,5; 0,2; 0,1; 0,02$

2 Hohe Morton-Zahl

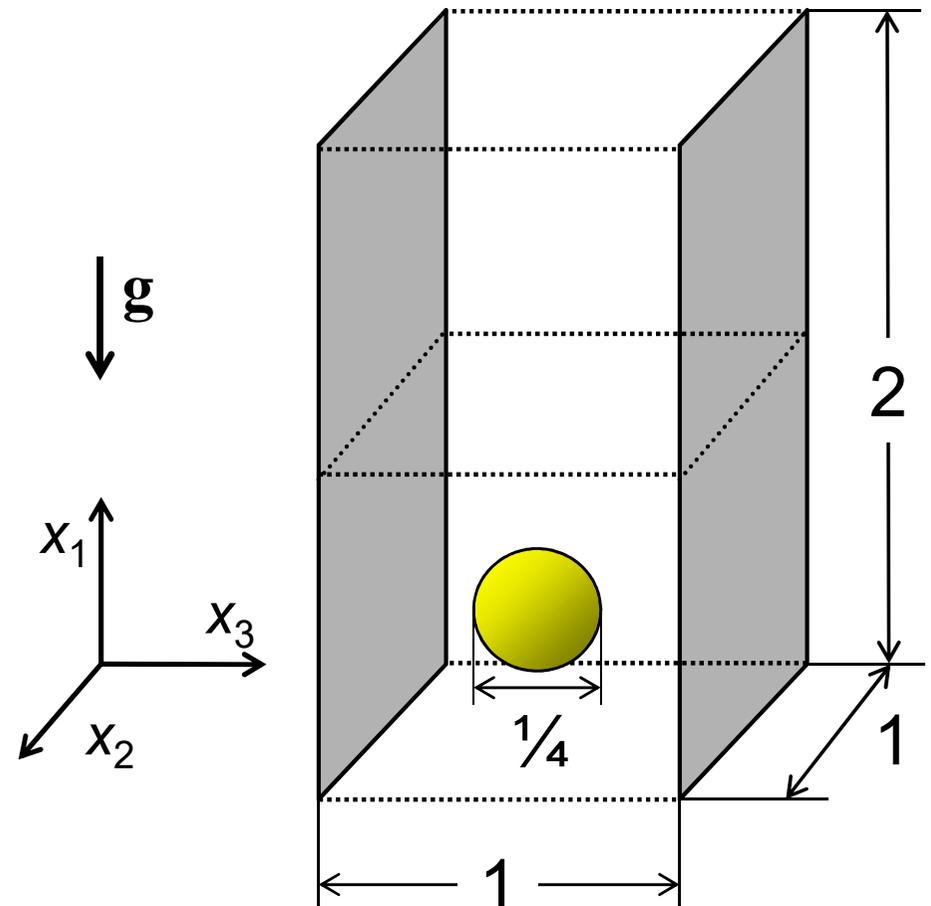
„ellipsoidal cap“ Blase

DNS für $\Gamma_\mu = \mu_d / \mu_c = 1$,
 $Mo = 266$, $Eö_B = 243$

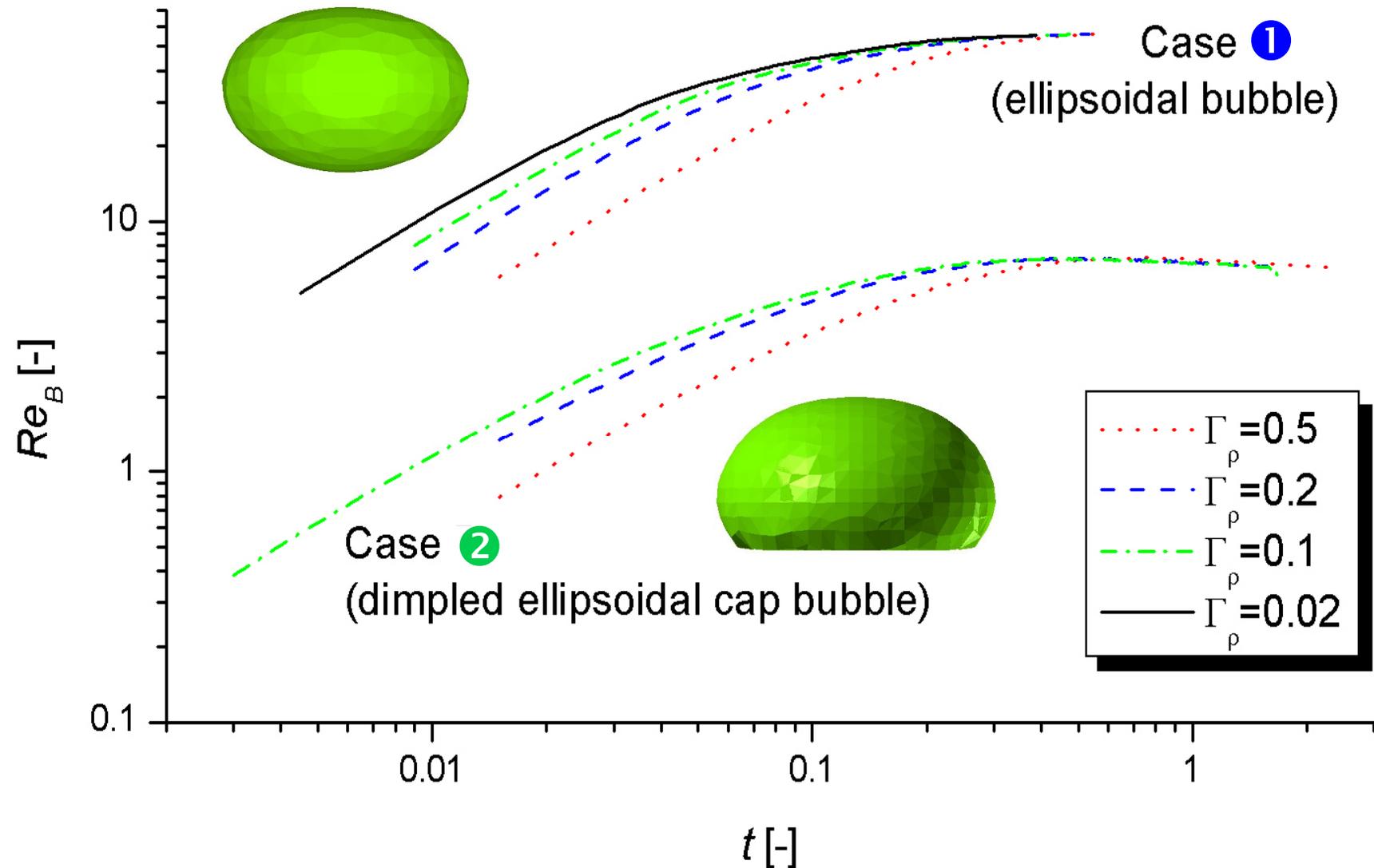
$\Gamma_\rho = \rho_d / \rho_c = 0,5; 0,2; 0,1$

Gitterparameter und Randbedingungen

- Gebiet: $2 \times 1 \times 1$
- Gitter: $128 \times 64 \times 64$
- Blasendurchmesser: $0,25$
(= 16 Gitterzellen)
- Gasgehalt: $\approx 0,4\%$
- Randbedingungen
 - Wände bei $x_3 = 0$ und $x_3 = 1$
 - periodisch in x_1 und x_2
- Flüssigkeit & Gas in Ruhe



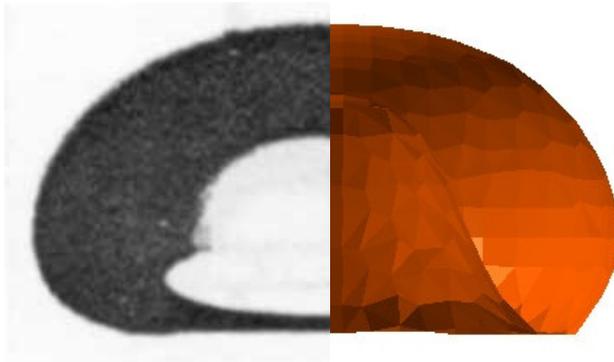
Zeitverlauf der Blasen-Reynolds-Zahl



Vergleich der Blasenform (Fall ②)

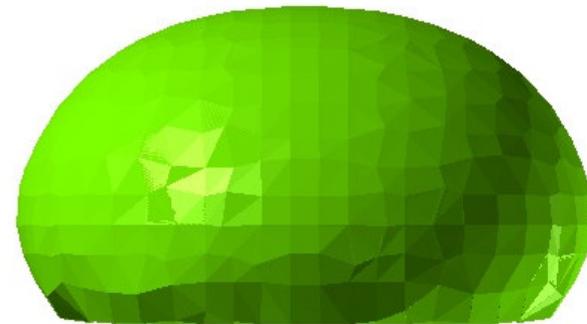
Experiment Bhaga & Weber

$(\Gamma_\rho \approx 0,0008, \Gamma_\mu \approx 10^{-5})$



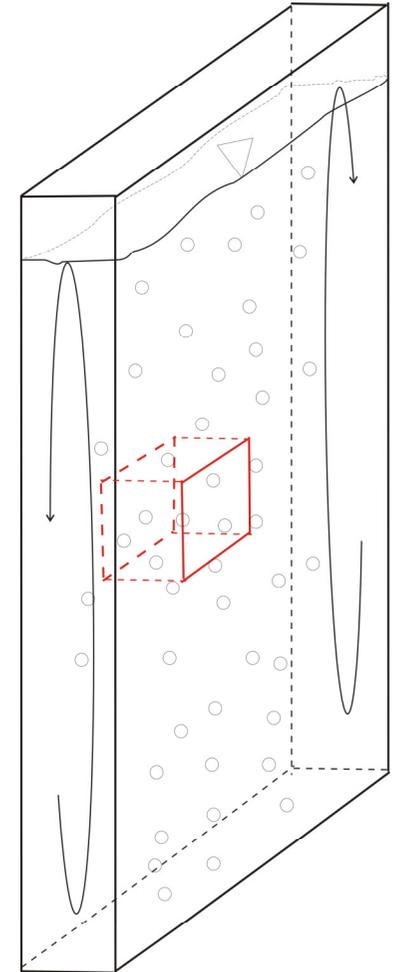
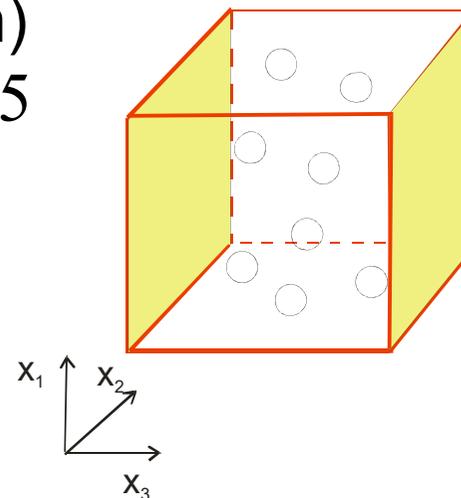
TURBIT-VOF

$(\Gamma_\rho = 0,5, \Gamma_\mu = 1)$

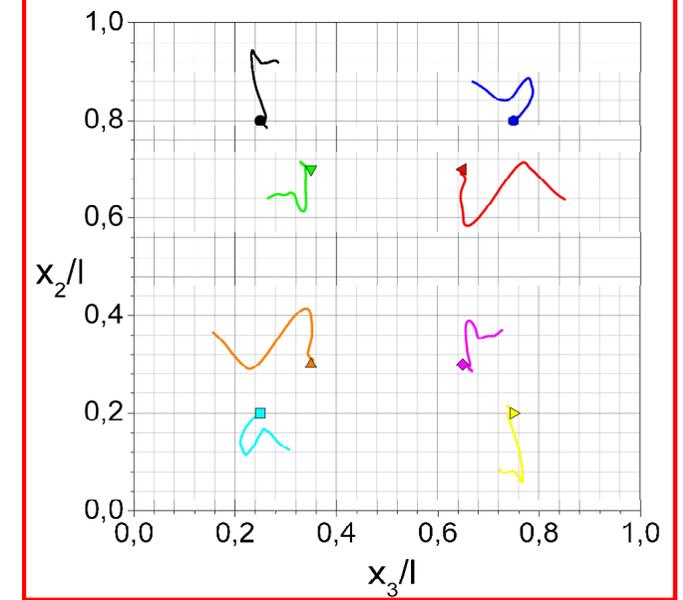
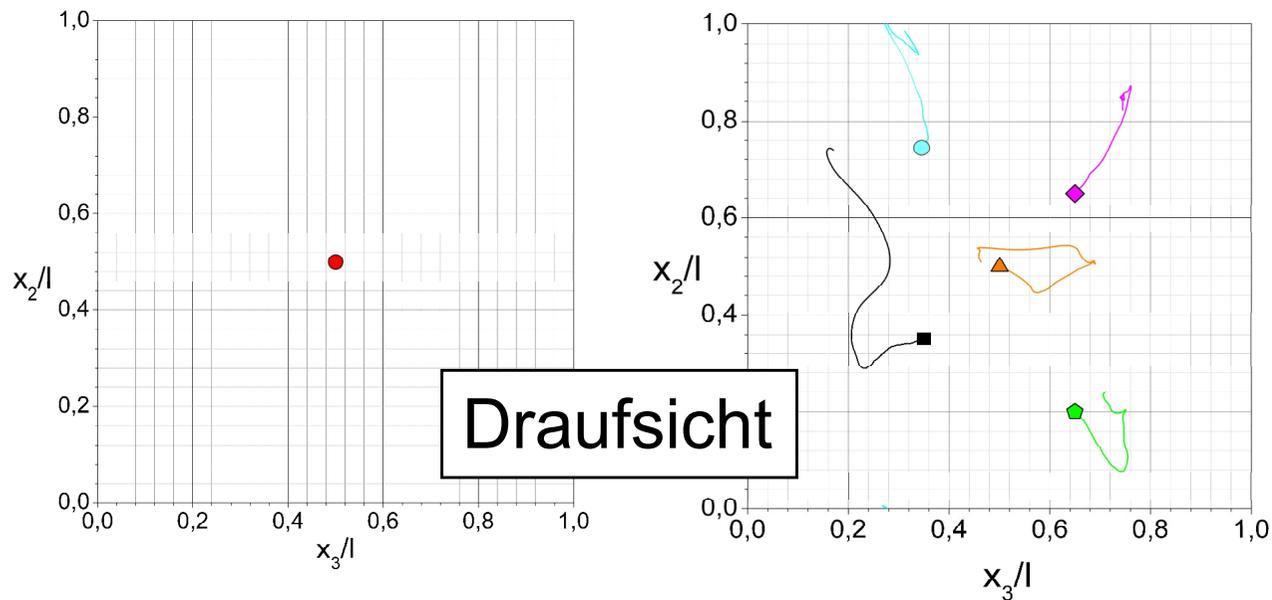
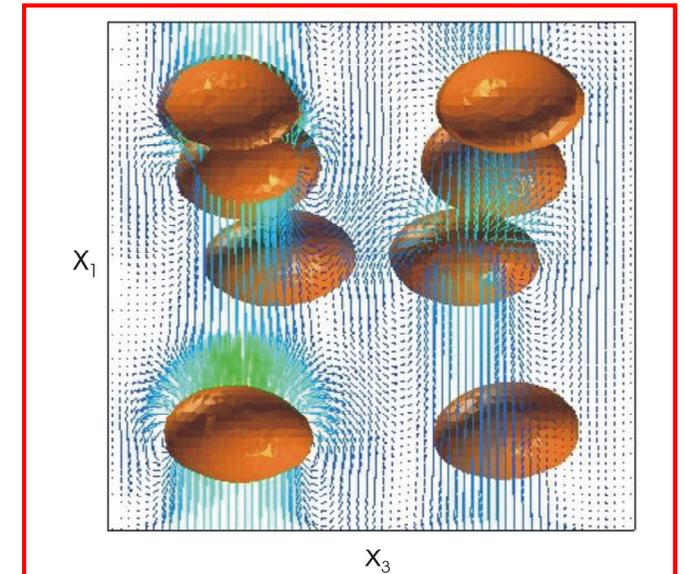
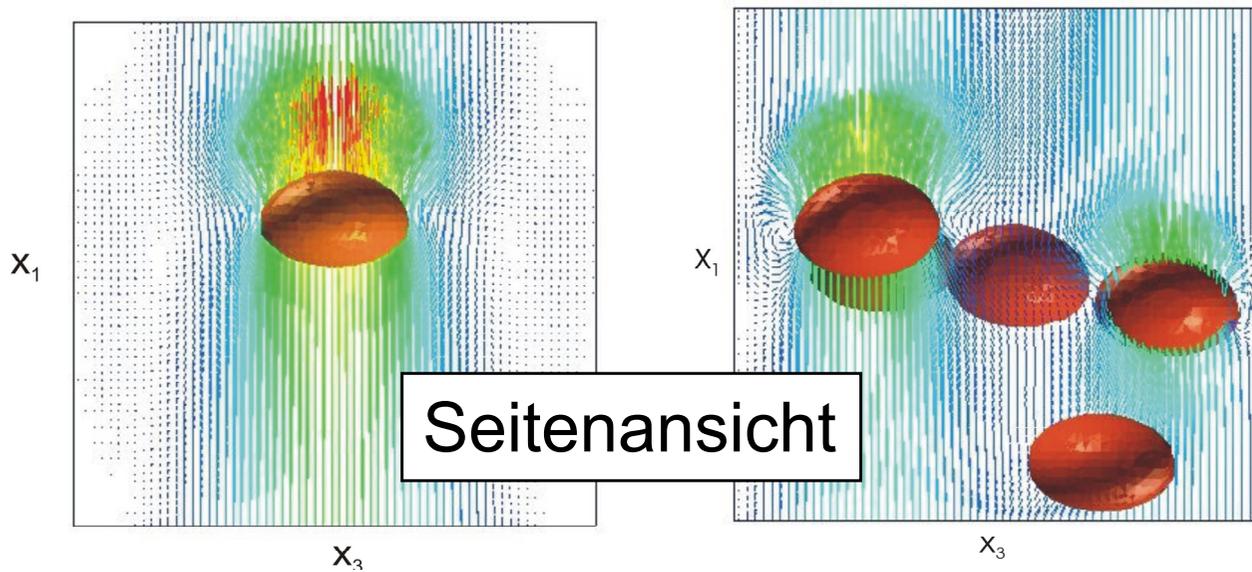


Simulation eines Blasenschwarms

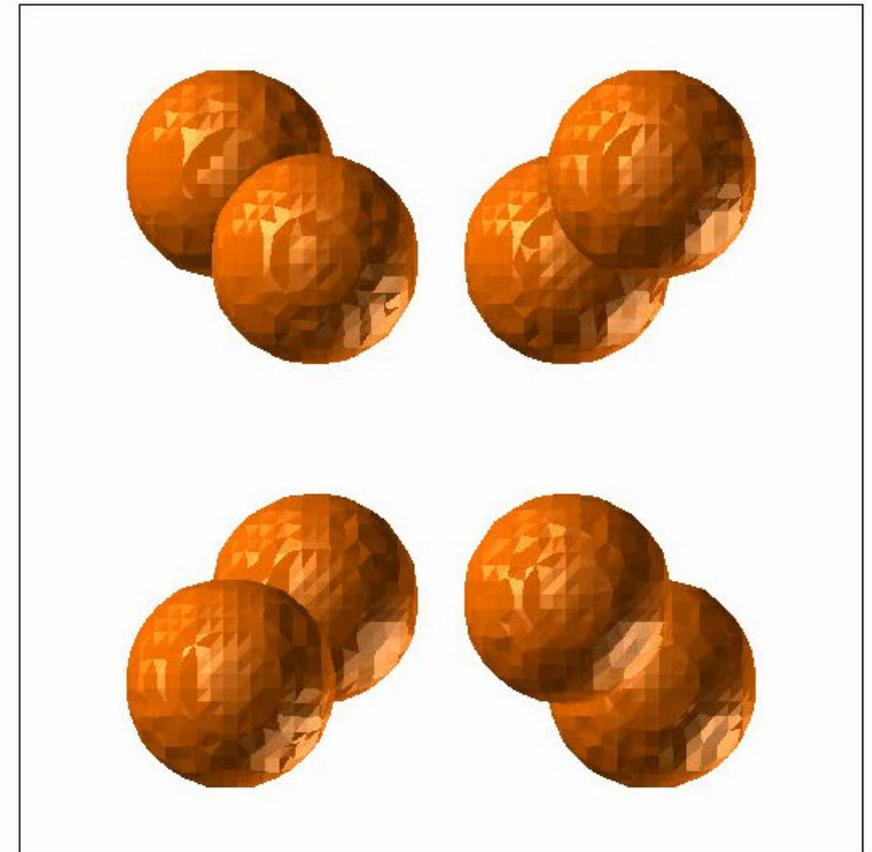
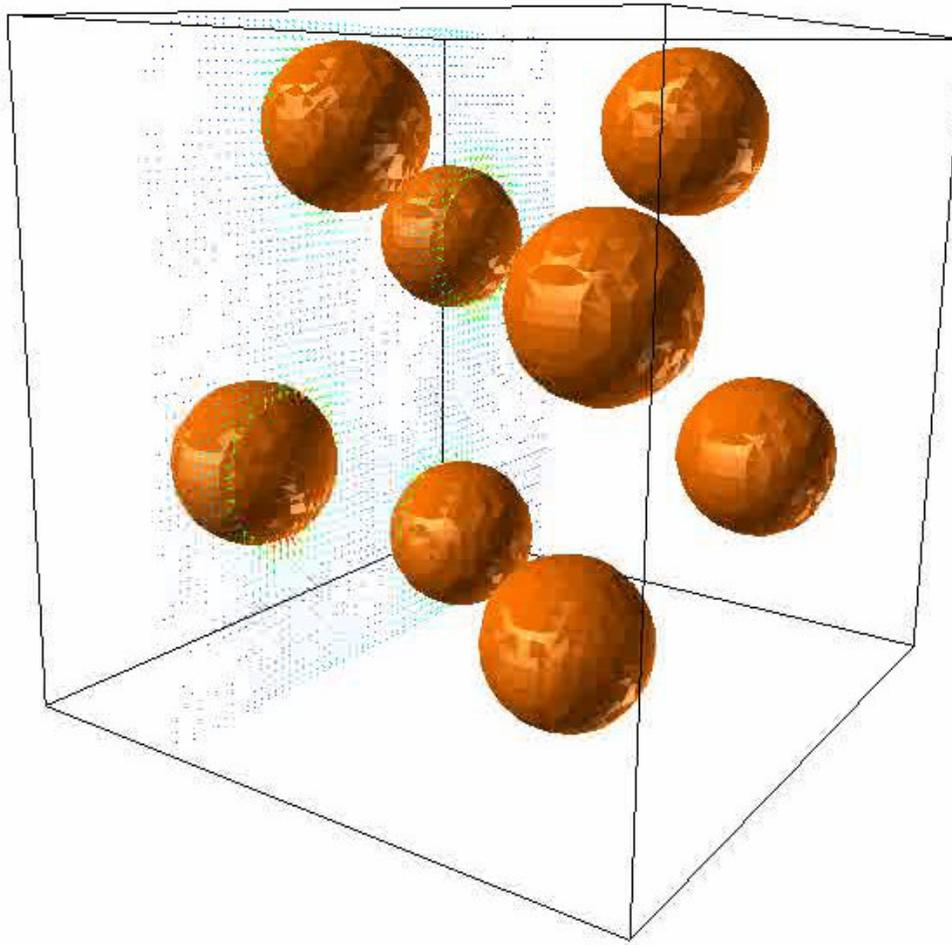
- Simulation bildet einen Ausschnitt aus einer flachen Blasensäule nach
 - zwei seitliche Wände
 - periodische Randbedingungen in vertikaler und seitlicher Richtung
- Untersuchung des Einflusses von
 - Gasgehalt (1, 5 und 8 Blasen)
 - Parameter Fall **1** mit $\Gamma_\rho = 0,5$
 - Viskosität der Flüssigkeit (Variation der Morton-Zahl)
- Kubisches Rechengebiet mit $64 \times 64 \times 64$ Maschen



Blasenform und -bahnen (Fall 1)

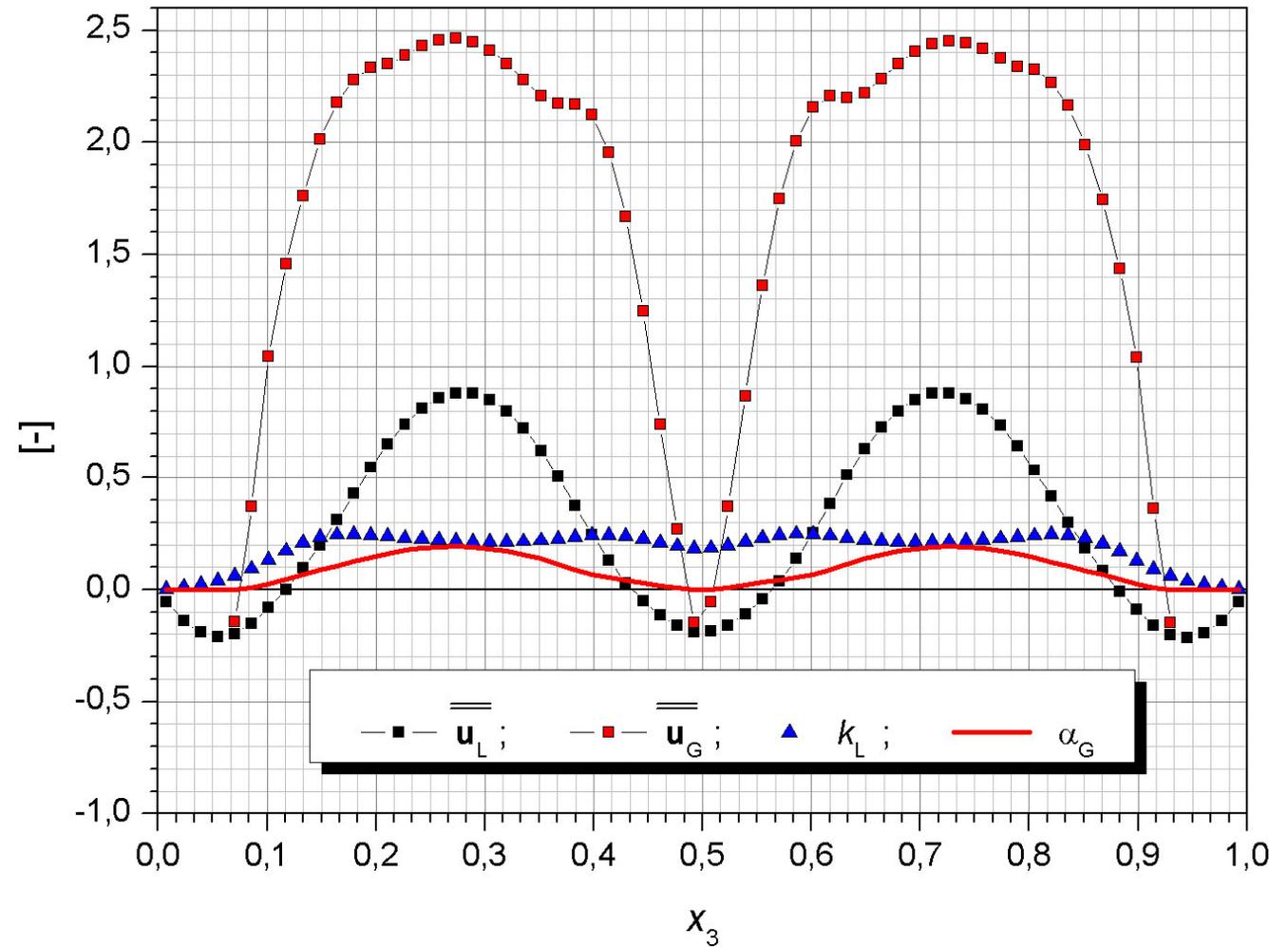
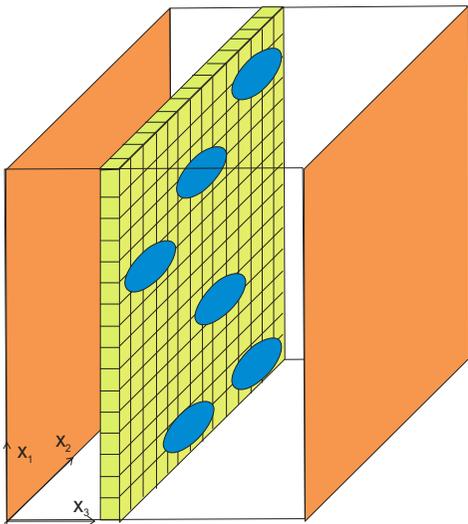


Animation der Simulationsergebnisse



Mittlung der Simulationsergebnisse

Mittlung über
wandparallele
Ebenen



Terme in der k_L -Gleichung

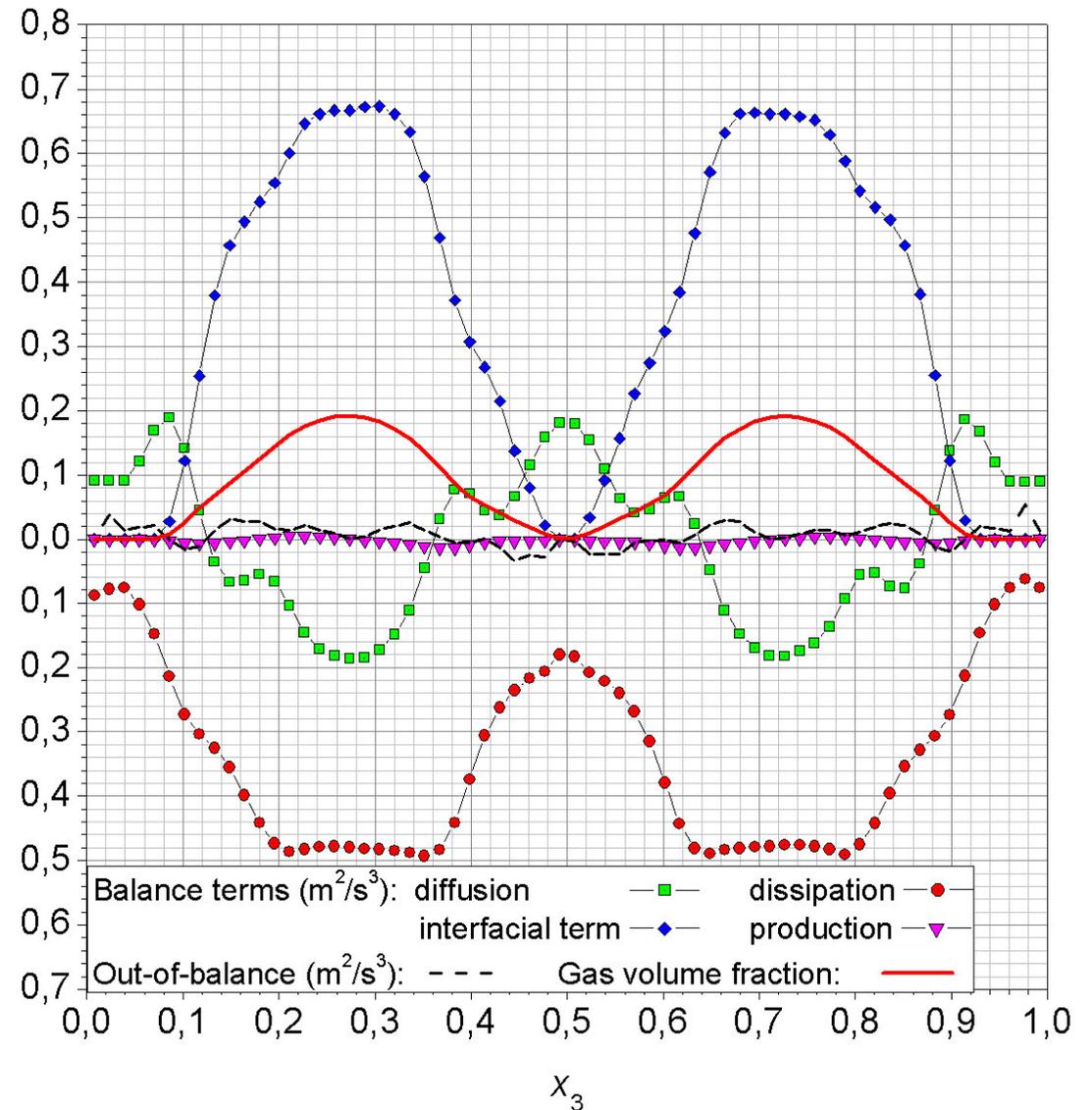
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_L k_L) + \nabla \cdot (\alpha_L k_L \overline{\mathbf{u}}_L) =$$

$$\underbrace{\frac{1}{Re_{ref}} \nabla \cdot (\alpha_L \overline{\mathbb{T}}'_L \cdot \mathbf{u}'_L) - \nabla \cdot \left[\alpha_L \left(\overline{p}'_L \mathbf{u}'_L + \frac{1}{2} \overline{(\mathbf{u}'_L \cdot \mathbf{u}'_L)} \mathbf{u}'_L \right) \right]}_{DIFFUSION}$$

$$\underbrace{-\alpha_L \overline{\mathbf{u}'_L \mathbf{u}'_L} : \nabla \overline{\mathbf{u}}_L}_{PRODUKTION}$$

$$\underbrace{-\frac{1}{Re_{ref}} \alpha_L \overline{\mathbb{T}}'_L : \nabla \mathbf{u}'_L}_{DISSIPATION}$$

$$+ \underbrace{\left[\frac{1}{Re_{ref}} \mathbb{T}'_{L,in} - p'_{L,in} \mathbb{I} \right] \cdot \mathbf{u}'_{L,in} \cdot \mathbf{n}_{L,in} a_{in}}_{GRENZFLÄCHENTERM}$$



Modelle für Produktionsterm

- Exakter Term:

$$\text{Prod}(k_L) = -\alpha_L \overline{\overline{\mathbf{u}'_L \mathbf{u}'_L}} : \nabla \overline{\overline{\mathbf{u}_L}}$$

- Üblicher Ansatz:

$$\text{Prod}(k_L) \approx \alpha_L \nu_L^{\text{eff}} \left[\nabla \overline{\overline{\mathbf{u}_L}} + \nabla \overline{\overline{\mathbf{u}_L}}^T \right] : \nabla \overline{\overline{\mathbf{u}_L}}$$

- Eingleichungs-Modell:

$$\nu_L^{\text{eff}} = \beta_1 l_{\text{TP}} \sqrt{k_L} \quad \text{mit} \quad \beta_1 = 0,56 \quad \text{und} \quad l_{\text{TP}} = \alpha_G d_B / 3$$

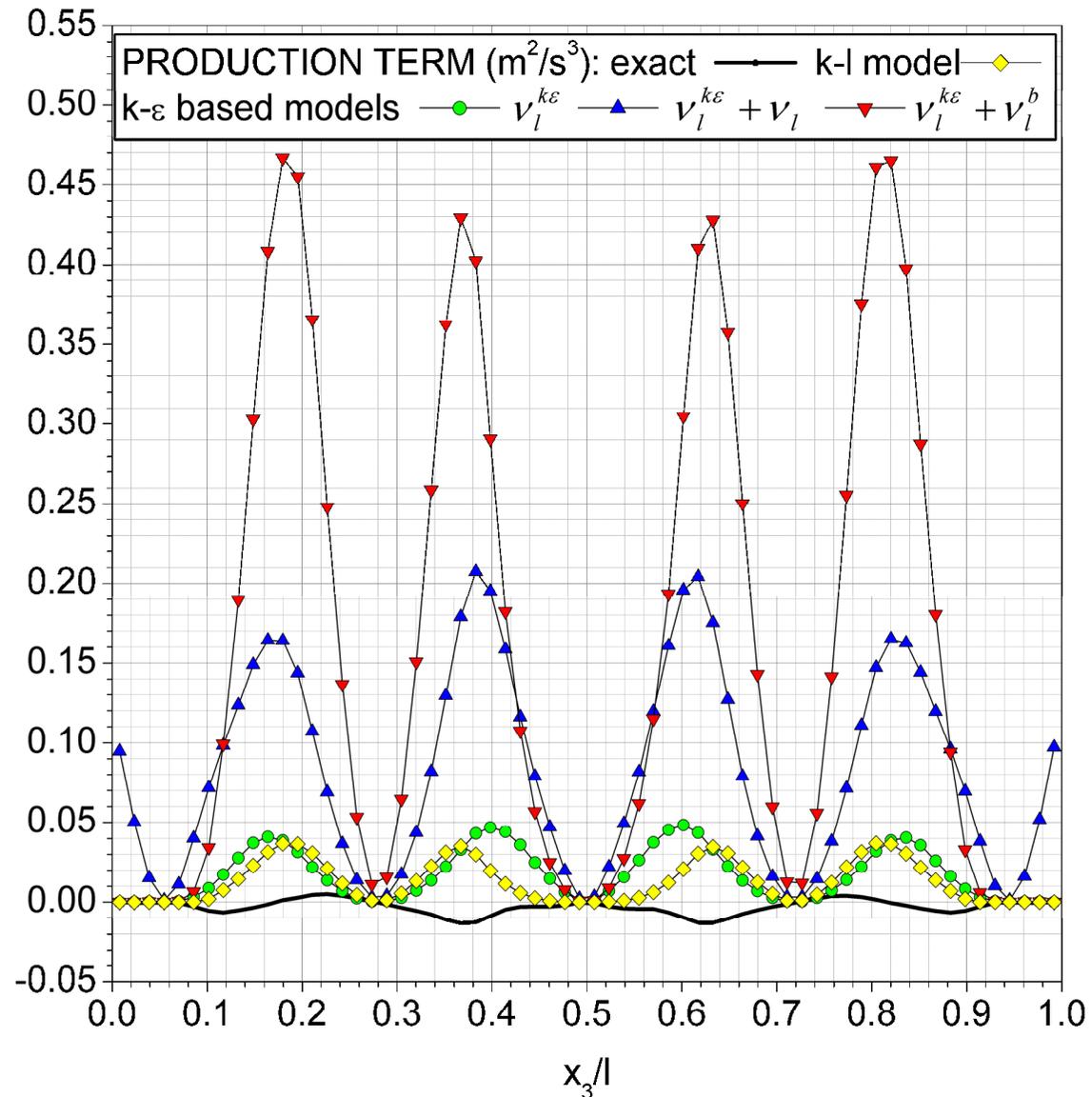
- Zweigleichungs-Modelle:

$$\nu_L^{\text{eff}} = \nu_L^{k-\varepsilon} = C_\mu k_L^2 / \varepsilon_L$$

$$\nu_L^{\text{eff}} = \nu_L^{k-\varepsilon} + \nu_L$$

$$\nu_L^{\text{eff}} = \nu_L^{k-\varepsilon} + 0,6 \alpha_G d_B \left| \overline{\overline{\mathbf{u}_r}} \right| = \nu_L^{k-\varepsilon} + \nu_L^{\text{B}}$$

Modellbewertung für Produktionsterm



Modelle für Diffusionsterm

- Exakter Term:

$$\text{Diff}(k_L) = \nu_L \nabla \cdot \left(\alpha_L \overline{\mathbb{T}'_L \cdot \mathbf{u}'_L} \right) - \nabla \cdot \left[\alpha_L \left(\overline{p'_L \mathbf{u}'_L} + \frac{1}{2} \overline{(\mathbf{u}'_L \cdot \mathbf{u}'_L) \mathbf{u}'_L} \right) \right]$$

- Üblicher Ansatz: $\text{Diff}(k_L) \approx \nabla \cdot \left(\alpha_L \nu_L^{\text{Diff}} \nabla k_L \right)$

- Eingleichungs-Modell:

$$\nu_L^{\text{Diff}} = 0,5 \nu_L + \beta_2 l_{\text{TP}} \sqrt{k_L} \quad \text{mit} \quad \beta_2 = 0,38 \quad \text{und} \quad l_{\text{TP}} = \alpha_G d_B / 3$$

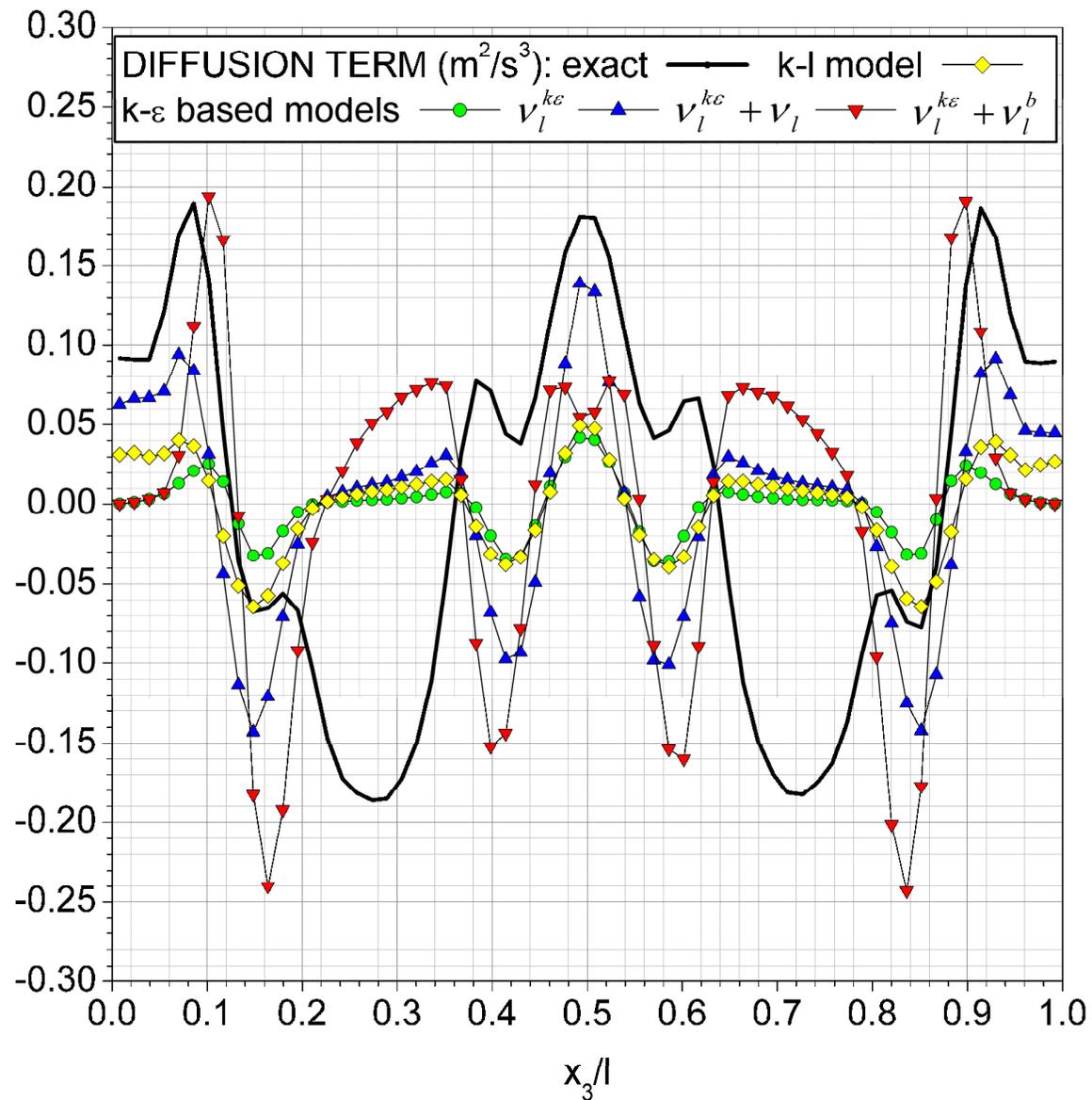
- Zweigleichungs-Modelle:

$$\nu_L^{\text{Diff}} = \nu_L^{k-\varepsilon} = C_\mu k_L^2 / \varepsilon_L$$

$$\nu_L^{\text{Diff}} = \nu_L^{k-\varepsilon} + \nu_L$$

$$\nu_L^{\text{Diff}} = \nu_L^{k-\varepsilon} + 0,6 \alpha_G d_B \left| \overline{\mathbf{u}_r} \right| = \nu_L^{k-\varepsilon} + \nu_L^{\text{B}}$$

Modellbewertung für Diffusionsterm



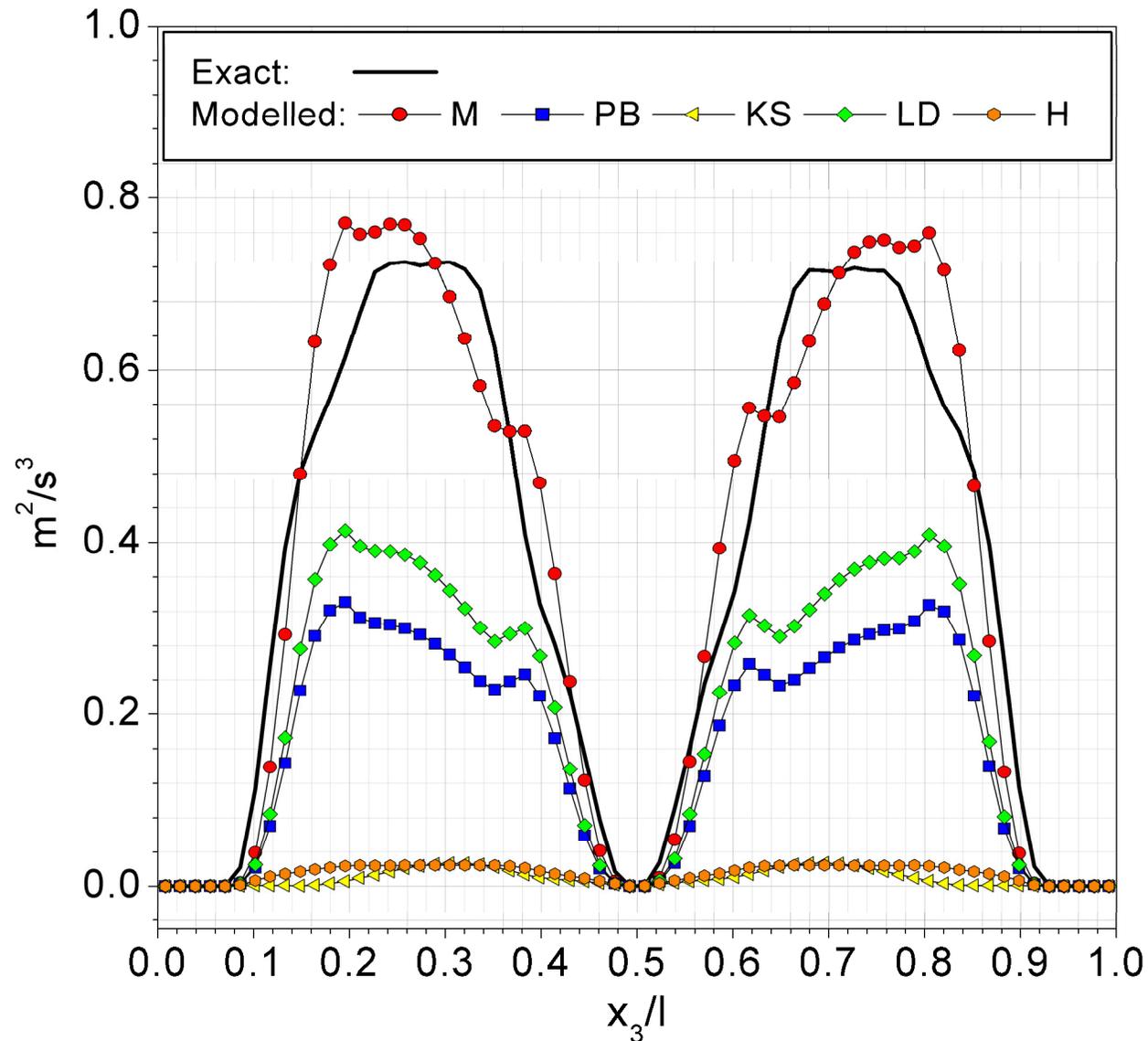
Modelle für Grenzflächenterm

Exakter Term:

$$\text{GFT}(k_L) = \left[\frac{1}{Re_{\text{ref}}} \mathbb{T}'_{L;\text{in}} - p'_{L;\text{in}} \mathbb{I} \right] \cdot \mathbf{u}'_{L;\text{in}} \cdot \mathbf{n}_{L;\text{in}} a_{\text{in}}$$

Reference	Work of drag force, W_D^*	Other contributions, W_{ND}^*
Kataoka & Serizawa (1997) Model 1, KS	$0.075 f_w \left[\frac{3}{4} \alpha_G \frac{C_D}{d_B^*} U_T^{*3} \right]$	$-\alpha_G \frac{k_L^{*3/2}}{d_B^*}$
Hill <i>et al.</i> (1995) Model 2, H	$\frac{3}{4} \frac{\alpha_G C_D}{d_B^*} \left \overline{\mathbf{u}_R^*} \right \left\{ \frac{\mu_L^* \overline{\mathbf{u}_R^*} \cdot \nabla^* \alpha_G}{0.3 \rho_L^* \alpha_L \alpha_G} + 2k_L^* (C_t - 1) \right\}$	None
Lahey & Drew (2000) Model 3, LD	$\frac{1}{4} \alpha_L (1 + C_D^{4/3}) \alpha_G \frac{\left \overline{\mathbf{u}_R^*} \right ^3}{d_B^*}$	None
Morel (1997) Model 4, M	$\frac{3}{4} \alpha_G \frac{C_D}{d_B^*} \left \overline{\mathbf{u}_R^*} \right ^3$	$\frac{1 + 2\alpha_G}{2\alpha_L} \alpha_G \left\{ \frac{D_G \overline{\mathbf{u}_G^*}}{Dt^*} - \frac{D_L \overline{\mathbf{u}_L^*}}{Dt^*} \right\} \cdot \overline{\mathbf{u}_R^*}$
Pfleger & Becker (2001) Model 5, PB	$1.44 \alpha_L \left[\frac{3}{4} \alpha_G \frac{C_D}{d_B^*} \left \overline{\mathbf{u}_R^*} \right ^3 \right]$	None

Modellbewertung für Grenzflächenterm





Zusammenfassung und Ausblick

- Erstmals detaillierte Analyse der Transportgleichung für die kinetische Turbulenzenergie der Flüssigkeit bei Blasenströmung
 - Produktion durch Scherkräfte ist vernachlässigbar
 - Grosse Bedeutung von Grenzflächen- und Diffusionsterm
- Bewertung von Modellansätzen
 - Produktionsterm, Diffusionsterm 🗑️
 - Grenzflächenterm 👍
- Ausblick
 - Entwicklung verbesserter Modelle
 - Implementierung in CFX und Nachrechnung von Experimenten
 - Antrag für Promotionsstelle eingereicht, noch keine Begutachtung