

# **Ein Konzept zur Grobstruktursimulation turbulenter Zweiphasenströmungen**

M. Wörner, A. Blahak, W. Sabisch, G. Grötzbach,  
Prof. D.G. Cacuci

Forschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Reaktorsicherheit

GVC Fachausschußsitzung  
„Mehrphasenströmungen“  
3. März 1998

## Gliederung

- Motivation
  - Konzeption der Methode
  - Grundgleichungen
  - Numerik
  - Schließungsterme und Modellierungsbedarf
  - Realisierung in Rechenprogrammen
  - Zusammenfassung und Ausblick
-

## Motivation

### Zweiphasenströmung (gasförmig-flüssig)

- Phasen sind durch Grenzfläche getrennt
- komplexe Topologie und Dynamik der Grenzfläche
- Austauschvorgänge über die Phasengrenze

### Turbulenz

- unregelmäßig, dreidimensional, instationär
  - mischungsintensiv
  - Spektrum von Längenmaßstäben (Wirbeln)
- 

### bisher: Zwei-Fluid-Modell

- einander durchdringende kontinuierliche Phasen
- Strömungsform ist „Eingabegröße“
- statistisches oder kein Turbulenzmodell

### neu: Grobstruktursimulation

- Phasen sind durch Grenzfläche getrennt
  - Strömungsform ist Ergebnis der Simulation
  - Feinstrukturmodell für die Turbulenz
-

---

# Grobstruktursimulation von Zweiphasenströmungen

## Aufteilung von Turbulenz und Phasengrenze in:

- Grobstrukturanteil = durch Maschennetz aufgelöst
- Feinstrukturanteil = nicht aufgelöst

### Grobstruktur:

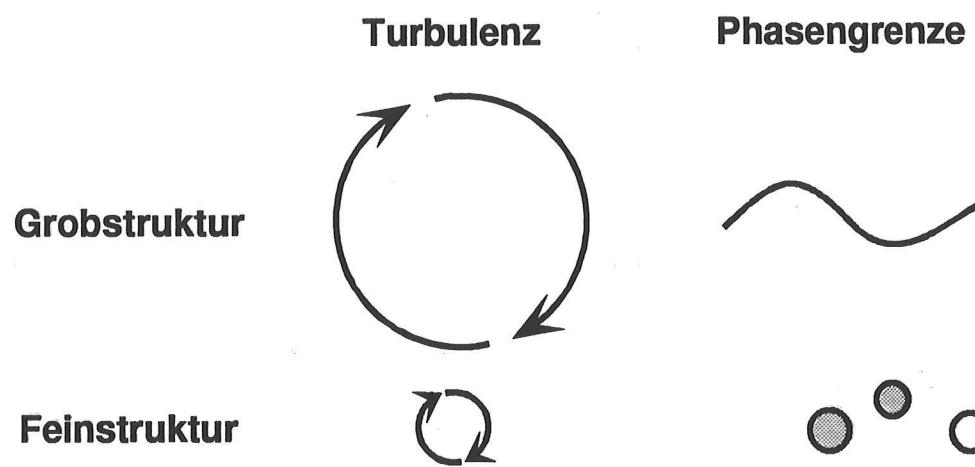
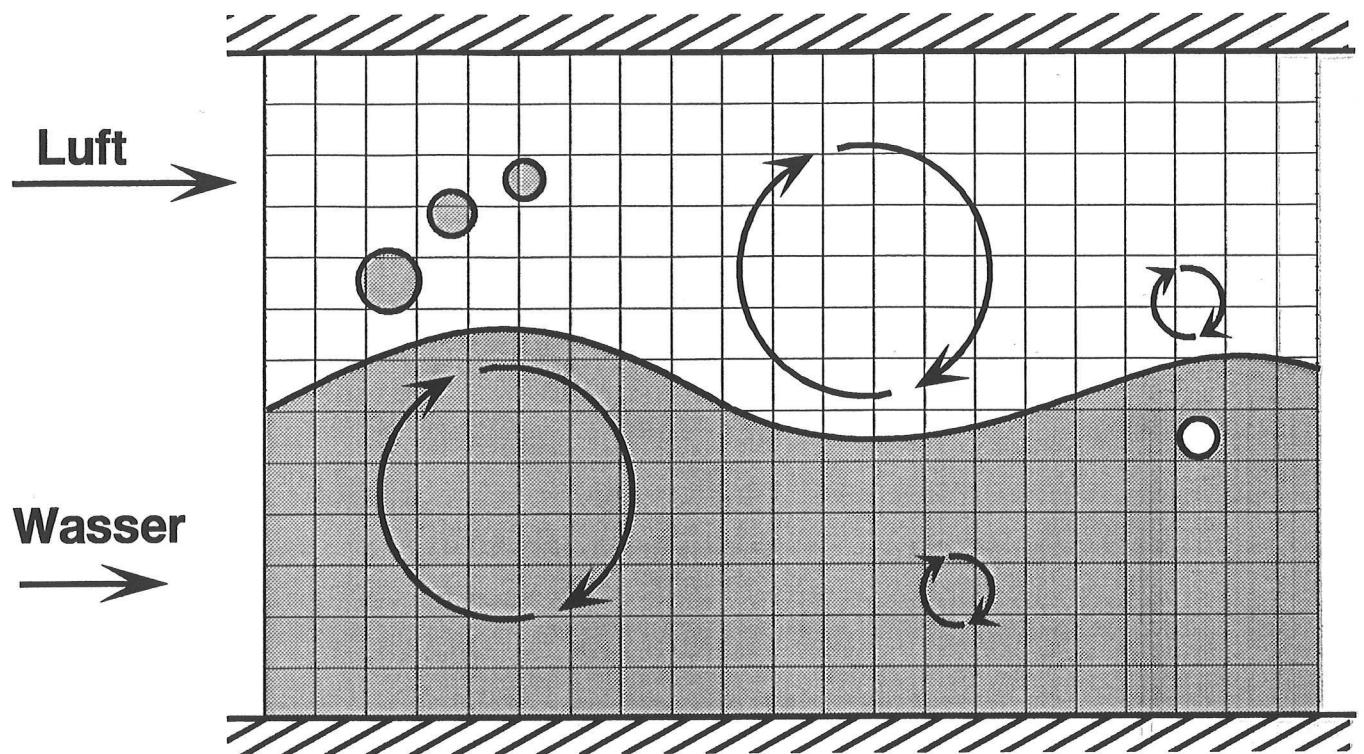
- lokale, momentane Beschreibung
- Erfassung von Topologie+Dynamik der Phasengrenze
- lokale Modelle für Phasenwechselwirkungsterme

### Feinstruktur:

- Feinstrukturmodell für Turbulenz
- integrale Modelle für Phasenwechselwirkungsterme

### Maschennetzverfeinerung:

- Grobstrukturanteil ↑
- Feinstrukturanteil ↓
- physikalischer Modellierungsbedarf ↓
- Grenzfall: volle lokale Beschreibung



# Klassifizierung der Methode

## Längenskalen der Turbulenz:

- Kolmogoroff Mikroskala  $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$
- Filterweite der Turbulenz =  $\Delta x$

## Längenskalen der Phasengrenzfläche:

- Durchmesser der größten Blasen  $D_b$
- Durchmesser der kleinsten Blasen  $d_b$
- Filterweite für Blasen  $\approx 10\Delta x$

Phasengrenzfl. → Turbulenz ↓			
	DNS <sup>1</sup> - RBS <sup>3</sup>	-	-
	LES <sup>2</sup> - RBS	LES - LBS <sup>4</sup>	LES - DFM <sup>5</sup>

<sup>1</sup>DNS = Direct Numerical Simulation

<sup>2</sup>LES = Large Eddy Simulation

<sup>3</sup>RBS = Resolved Bubble Simulation

<sup>4</sup>LBS = Large Bubble Simulation

<sup>5</sup>DFM = Drift Flux Model

## Grundgleichungen

### Herleitung:

- 1.) Ausgangspunkt: Erhaltungsgl. für Phase  $k$  in  $\Omega_k$
- 2.) Mittelung über Maschenvolumen (Symbol:  $\langle \dots \rangle_k$ )
- 3.) Aufspaltung:  $\Psi_k = \langle \Psi_k \rangle_k + \Psi'_k$
- 4.) Anwendung der Mittelwerttheoreme
- 5.) Addition der Erhaltungsgl. für beide Phasen

### Kontinuitätsgleichung des Gemisches:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = \Gamma_1^m + \Gamma_2^m = 0$$

Scheinbare Dichte:  $\rho_m = f \langle \rho_1 \rangle_1 + (1 - f) \langle \rho_2 \rangle_2$

Volumenfraktion der flüssigen Phase:  $f \equiv \alpha_1$

Schwerpunktgeschwindigkeit:

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

---

---

## Grundgleichungen (II)

- Impulsgleichung des Gemisches
- Enthalpiegleichung des Gemisches
- Kontinuitätsgleichung für die flüssige Phase  
⇒ Bestimmung der Phasenverteilung

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f \langle \vec{u}_1 \rangle_1) = \Gamma_1^m - \frac{f}{\langle \rho_1 \rangle_1} \frac{D}{Dt} \langle \rho_1 \rangle_1$$

- Zustandsgleichungen für beide Phasen

# Numerik

## Finite Volumen Verfahren:

- **Problem:** Diskontinuität von  $\rho_m$
- Standard Differenzenverfahren  $\Rightarrow$  Verschmierung der Diskontinuität durch numerische Diffusion
- hier: löse  $f$ -Gleichung mit speziellem Verfahren  
= **Volume of Fluid Methode (VoF)**<sup>1</sup>

## Zwei Schritte:

- 1.) Rekonstruktion der Phasengrenzfläche aus  $f_{i,j,k}^t$
- 2.) Advektion der Phasengrenzfläche und Berechnung von  $f_{i,j,k}^{t+\Delta t}$

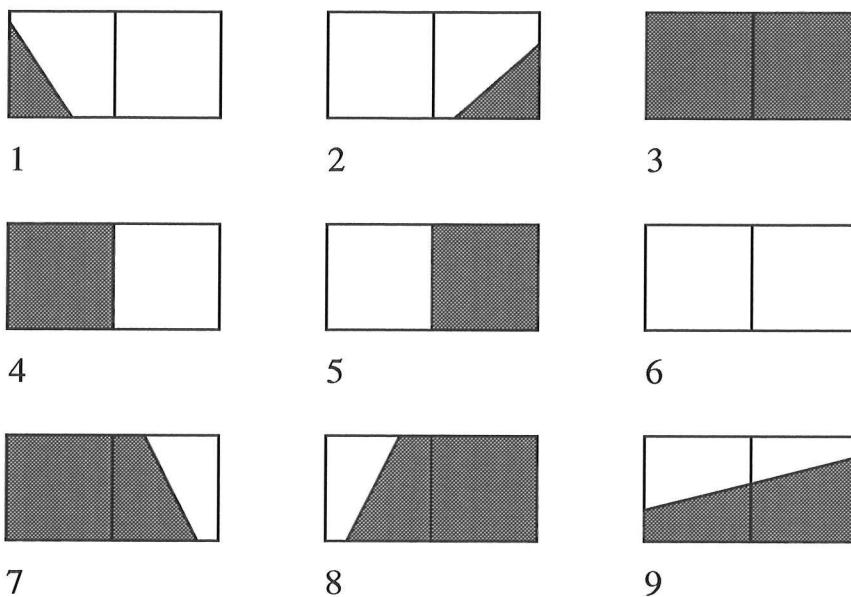
---

<sup>1</sup>Hirt & Nichols, JCP 39, 201-225 (1981)

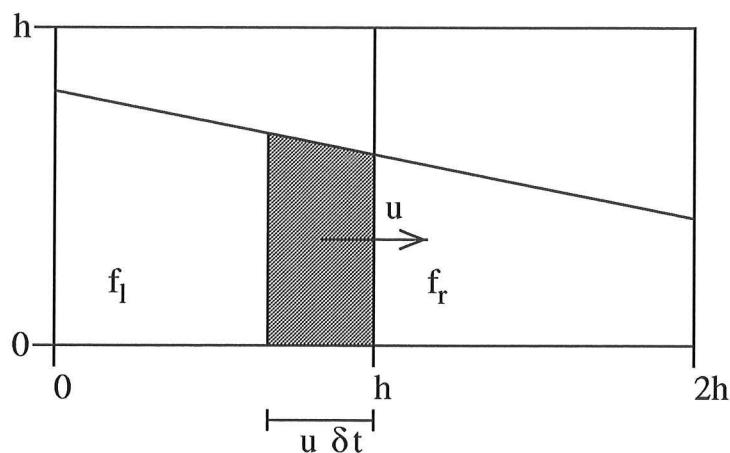
---

# FLAIR-Algorithmus<sup>1</sup>

## Fallunterscheidungen:



## Advektion:



<sup>1</sup>Ashgriz & Poo, JCP 93, 449-468 (1992)

## Schließungsterme

In allen Maschen:

- Feinstrukturgrößen, z.B.  $\langle \vec{u}_1' \vec{u}_1' \rangle_1$

In wenigen Maschen mit Grenzfläche ( $0 < f < 1$ ):

- Impulssprung durch Oberflächenspannung
- Drift-Geschwindigkeit ( $\langle \vec{u}_1 \rangle_1 - \langle \vec{u}_2 \rangle_2$ )
- Zwischenphasenreibung

## Bedarf an Modellentwicklung

### Feinstrukturgrößen der Phasen:

- entfällt bei DNS
- für LES Modellierung mit Feinstrukturmodell

### Impulssprung durch Oberflächenspannung:

auf VoF zugeschnittene Modelle in Literatur verfügbar<sup>1</sup>

### Drift-Geschwindigkeit:

- Grobstruktur: Modell ist zu entwickeln
- Feinstruktur: Modelle aus Literatur übernehmen

### Zwischenphasenreibung:

- Grobstruktur: lokales Modell ist zu entwickeln  
(z.B. für Blase: unterschiedliche Modellierung für Anström- und Nachlaufbereich)
- Feinstruktur: integrale Modellierung für die ganze Blase über Widerstandsbeiwert  
(entsprechend zu Zwei-Fluid-Modell)

---

<sup>1</sup>Brackbill et al., JCP 100, 335-354 (1992)

---

---

## Realisierung in Rechenprogrammen

- **TURBIT-VoF** (FZK, IRS)

Erweiterung von einphasiger DNS auf DNS-RBS

Geplante Anwendungsfälle (3d):

- Einzelblasen in ruhender Flüssigkeit, laminarer und schwach turbulenter Kanalströmung
- Blasenschwarm ( $n < 10$ )
- Reynoldszahl der Kanalströmung  $Re \leq 5000$

- **Programmpaket CFX** (Firma AEA Technology)

Ankopplung der neuen Methode und Modelle über User-Subroutinen

- zunächst DNS-RBS
- später Erweiterung auf LES-LBS

## Zusammenfassung

### Grobstruktursimulation von Zweiphasenstr.

- Aufspaltung von Turbulenz und Phasengrenze in Grobstruktur + Feinstruktur
  - ↓
  - lokale Modelle
  - ↓
  - statistische Modelle
- Maschennetzverfeinerung: Grobstr. ↑ Feinstr. ↓
- Methode liefert Strömungsform der Grobstruktur
- einphasige Bereiche ⇒ einphasige Gleichungen  
„einphasig wo möglich, zweiphasig wo nötig“

### Ausblick

- Entwicklung lokaler physikalischer Modelle für
  - Drift-Geschwindigkeit
  - Zwischenphasenreibung
- Rechnungen und Validierung für DNS-RBS
- Erweiterung auf LES-LBS