

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:

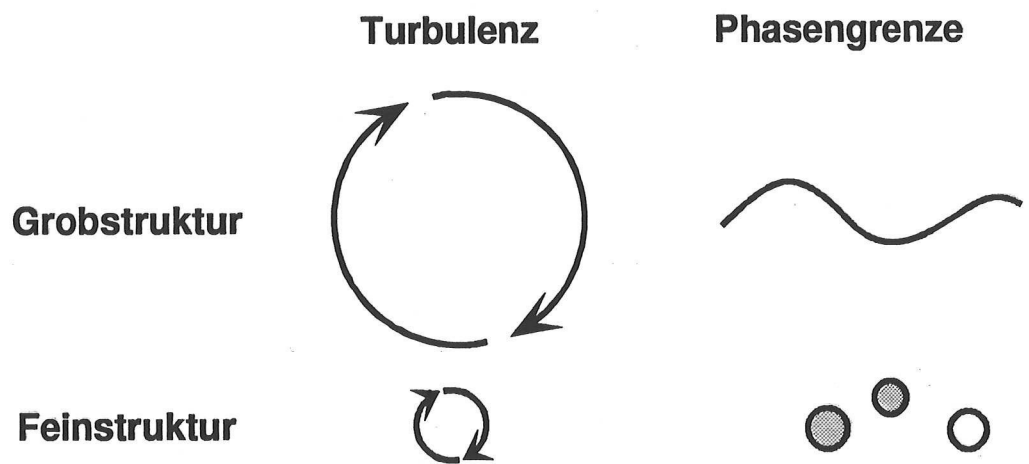
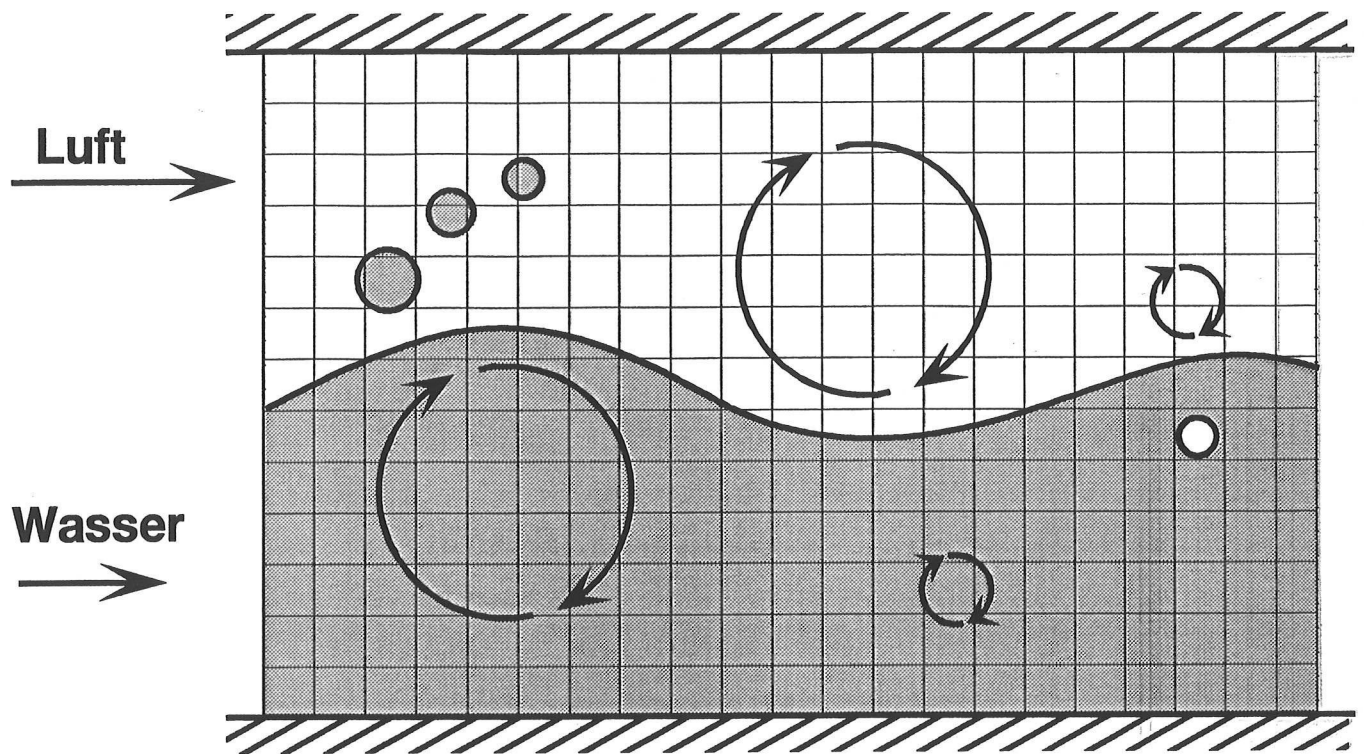
- lokale, momentane Beschreibung
- Erfassung von Topologie+Dynamik der Phasengrenze
- lokale Modelle für Phasenwechselwirkungsterme

Feinstruktur:

- Feinstrukturmodell für Turbulenz
- integrale Modelle für Phasenwechselwirkungsterme

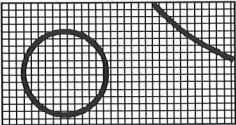
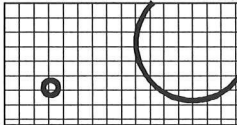
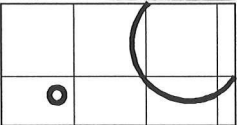
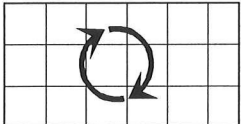
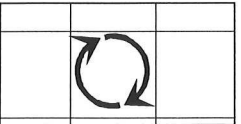
Maschennetzverfeinerung:

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



Längenskalen der Turbulenz:

- ## Längenskalen der Phasengrenzfläche:

- | | | | |
|--|--|---|--|
| Phasengrenzfl. \rightarrow
Turbulenz \downarrow | 
$d_b > 10 \Delta x$ | 
$d_b < 10 \Delta x < D_b$ | 
$D_b < 10 \Delta x$ |
| 
$\eta > \Delta x$ | DNS ¹ - RBS ³ | - | - |
| 
$\eta < \Delta x$ | LES ² - RBS | LES - LBS ⁴ | LES - DFM ⁵ |

¹DNS = Direct Numerical Simulation

²LES = Large Eddy Simulation

³RBS = Resolved Bubble Simulation

⁴LBS = Large Bubble Simulation

⁵DFM = Drift Flux Model

Grundgleichungen

Herleitung:

- 1.) Ausgangspunkt: Erhaltungsgl. für Phase k in Ω_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 ρ_m
- Standard Differenzenverfahren \Rightarrow Verschmierung der Diskontinuität durch numerische Diffusion
- hier: löse f -Gleichung mit speziellem Verfahren
= **Volume of Fluid Methode (VoF)**¹

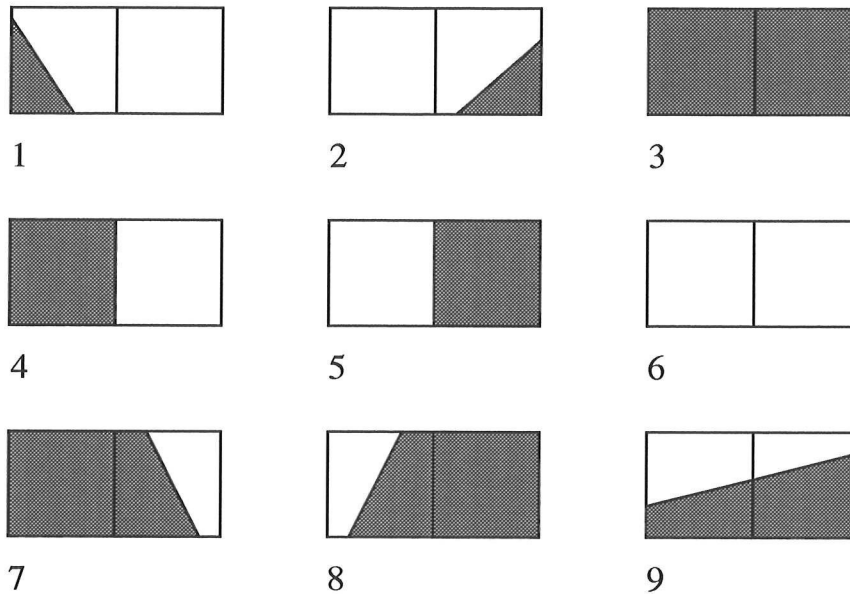
Zwei Schritte:

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

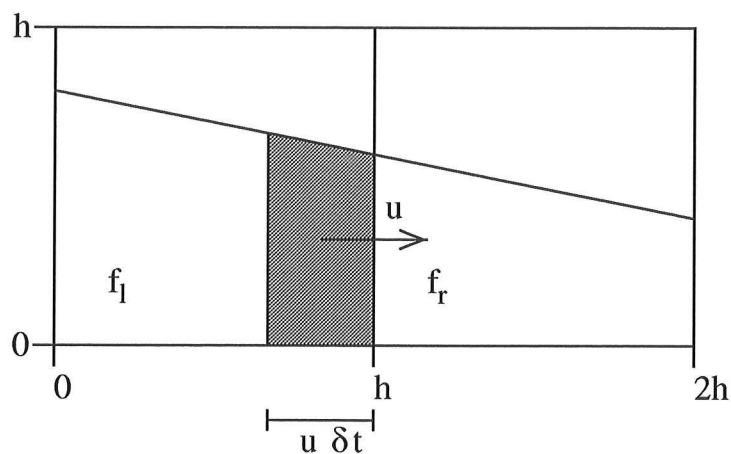
¹Hirt & Nichols, JCP **39**, 201-225 (1981)

FLAIR-Algorithmus¹

Fallunterscheidungen:



Advektion:



¹Ashgriz & 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 verfügbar¹

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)

¹Brackbill 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 \Rightarrow 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