



Ausgangssituation

Viele strömungsmechanischen Aspekte der Regenentstehung in Wolken werden noch unzureichend verstanden, vor allem wegen der **Komplexität der vorliegenden gekoppelten physikalischen Prozesse** (turbulente Strömung mit unterschiedlichen Skalen, zweite Population, Tropfen/Wirbel-Wechselwirkung, Tropfen/ Tropfen-Kollisionen verbunden mit Koaleszenz- und Zerteilungs-ereignissen, zusätzliche physikalische Parameter wie die Übersättigung...).

Für solche Probleme ist es in der Regel notwendig, **vereinfachte**

Modellexperimente zu entwerfen, die alle wesentlichen Aspekte abdecken aber **genauere und umfangreichere Messungen** erlauben. Diese können für ein **besseres Verständnis der einzelnen Kopplungsprozesse** herangezogen werden. Darüber hinaus dienen sie der **quantitativen Validierung** parallel entwickelter Simulationsmodelle. Dafür wird am LSS der verfügbare Zweiphasenwindkanal eingesetzt.

Dieser bietet eine flexible Plattform, um **unterschiedliche Wasser/Luft-Strömungen unter genau bestimmten Bedingungen zu untersuchen**.



Windkanal und Messmethoden

Anhand sechs verschiedener Luken in unterschiedlichen Abständen vor der Messstrecke, die eine Abmessung von 500x600x1100 mm bietet, können flexibel ein oder mehrere Sprayköpfe in den mehrphasigen LSS-Windkanal eingebracht werden. Dies bietet die Möglichkeit, nicht nur die **Luftströmungseigenschaften genau einzustellen**, sondern es können gleichzeitig auch alle **Eigenschaften der dispersen Flüssigphase** (Flüssigkeitsmenge, Tropfengrößenverteilung, Tropfengeschwindigkeiten, benetzte Querschnittsfläche in der Messstrecke) **zuverlässig und reproduzierbar ausgewählt** werden. Durch drei optisch transparente Fenster kann die geschlossene Messstrecke beleuchtet und visualisiert werden.

Verschiedene verfügbare optische Messsysteme werden im Rahmen dieses Projekts Verwendung finden:

- **Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)**: 2D, punktuelle Vermessung der Gasgeschwindigkeit inkl. turbulente Schwankungen.
- **Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA)**: punktuelle Vermessung der Geschwindigkeit und der Größenverteilung der dispersen Phase.
- **Particle-Image-Velocimetry (PIV)**: zwei-dimensionale Vermessung der Gasgeschwindigkeit, auch in Anwesenheit einer zweiten Phase.
- **Particle-Tracking-Velocimetry (PTV)**: drei-dimensionale, instationäre Vermessung der Partikelbahn (Lagrange-Betrachtung). Dieses Messverfahren wird am Lehrstuhl im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ weiterentwickelt.
- **Shadowgraphy**: zwei-dimensionale Vermessung der Geschwindigkeit und Größenverteilung der dispersen Phase.

Konfigurationen und Arbeitspakete

AP-E1 (2 Monate): gemeinsam von den zwei Doktoranden durchgeführt. Letzte Aktualisierung der Literaturrecherche, Überprüfung und Festlegung der **vier ausgewählten Konfigurationen für die Modellexperimente**.

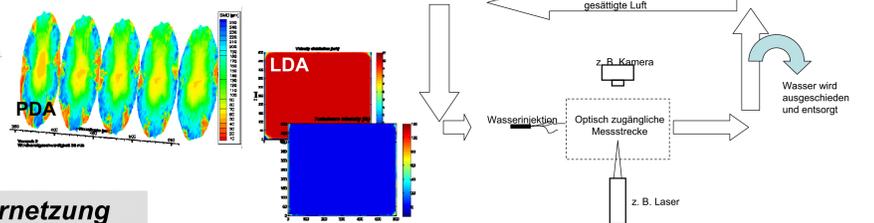
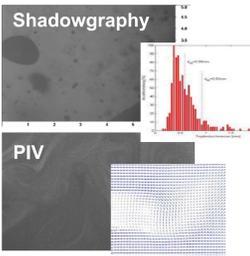
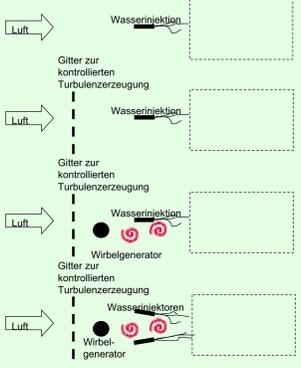
AP-E2 (6 Monate): komplette Vermessung der Konfiguration M1. Aufbau und Inbetriebnahme der Datenbank anhand dieser ersten Ergebnisse.

AP-E3 (5 Monate): Aufbau und komplette Vermessung der Konfiguration M2, Ergänzung der Datenbank.

AP-E4 (6 Monate): Aufbau und komplette Vermessung der Konfiguration M3, Ergänzung der Datenbank.

AP-E5 (5 Monate): Aufbau und komplette Vermessung der Konfiguration M4, Ergänzung der Datenbank.

AP-E6 (20 Monate, **parallel zu den anderen Arbeitspaketen ab AP-E2**): kritische **Auswertung der Messergebnisse**. Genauigkeit, physikalische Interpretation zu einem **besseren Verständnis** der Prozesse, **Vergleich mit der Numerik** und Bewertung der Übereinstimmung bzw. Erklärung der Diskrepanzen.



Ergebnisse und Vernetzung

Die umfangreichen Messungen, teilweise simultan eingesetzt, liefern quantitative Ergebnisse, die für das Prozessverständnis herangezogen werden. Darüber hinaus wird eine **umfangreiche Datenbank** hergestellt, in denen alle experimentellen Ergebnisse präzise dokumentiert werden. Diese Datenbank wird allen anderen SPP- Partnern zur Verfügung gestellt, wie zurzeit bereits im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1141 für eine andere Anlage durchgeführt. Die hier gewonnene **Erfahrung** wird direkt in die neue Arbeit einfließen, damit sichergestellt wird, dass alle Programmmitglieder **sinnvolle Validierungen und Vergleiche rechtzeitig realisieren können**.

Natürlich wird diese Datenbank auch für die **eigene detaillierte Validierung** der entwickelten Simulationswerkzeuge innerhalb dieses Teilprojekts genutzt werden (**s. Partner-Poster der AG John**).

Aus den Vorgesprächen scheint darüber hinaus eine besonders starke Vernetzung mit der AG **Schröder et al.** (RWTH Aachen) wichtig zu sein. Kontakte mit Partnern aus dem **SPP 1167** könnten auch sehr interessant sein.

REFERENZEXPERIMENTE IM MEHRPHASIGEN WINDKANAL, NUMERISCHE SIMULATION UND VALIDIERUNG

Volker John, Ellen Schmeyer

FR 6.1 – Mathematik, Universität des Saarlandes, Postfach 15 11 50, 66041 Saarbrücken



Variationelle Mehrskalmethoden (VMS) zur Simulation turbulenter Strömungen

- Navier-Stokes-Gleichungen (entdimensioniert):

$$\partial_t \mathbf{u} - 2\nabla \cdot (Re^{-1} \mathbb{D}(\mathbf{u})) + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} \quad \text{in } (0, T) \times \Omega,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } [0, T] \times \Omega,$$

- turbulente Strömungen:

- kleine Skalen nicht simulierbar
- Modellierung des Einflusses dieser Skalen auf aufgelöste Skalen nötig

Klassische Large Eddy Simulation (LES)

- Merkmale:

- Zerlegung der Strömung in große und kleine (nicht aufgelöste) Skalen
- Ziel: Simulation der großen Skalen
- Definition der großen Skalen durch Mittelung im Raum
- Turbulenzmodell wirkt direkt auf alle aufgelösten Skalen

- Nachteile:

- **Vertauschungsfehler** bei Herleitung von Gleichungen, von Bedeutung vor allem in Randnähe (Dunca, J., Layton (2004), Berselli, J. (2006), Berselli, Grisanti, J. (2007))
- Definition von **Randbedingungen** für große Skalen unklar (Piomelli, Balaras (2002), Borggard, Iliescu (2006))

variationelle Mehrskalmethoden (VMS)

- Grundlagen:

- basiert auf Ideen für allgemeine Mehrskalprobleme (Hughes (1995), Guermond (1999))
- turbulente Strömungen: Hughes, Mazzei, Jansen (2000)

- Merkmale:

- 3-Skalenzerlegung: große, aufgelöste kleine und nicht aufgelöste kleine
- Definition der Skalen durch Projektionen in Unterräume
- Vernachlässigung der nicht aufgelösten kleinen Skalen
- Turbulenzmodell wirkt direkt nur auf die aufgelösten kleinen Skalen

- **projektionsbasierte VMS-Methode für Finite-Elemente-Diskretisierungen** (J., Kaya (2005), J., Kaya, Layton (2006)): Finde $\mathbf{u}^h : [0, T] \rightarrow V^h$, $p^h : (0, T) \rightarrow Q^h$ und $\mathbb{G}^H : [0, T] \rightarrow L^H$ mit

$$(\partial_t \mathbf{u}^h, \mathbf{v}^h) + (2Re^{-1} \mathbb{D}(\mathbf{u}^h), \mathbb{D}(\mathbf{v}^h)) + ((\mathbf{u}^h \cdot \nabla) \mathbf{u}^h, \mathbf{v}^h) - (p^h, \nabla \cdot \mathbf{v}^h) + (\nu_T (\mathbb{D}(\mathbf{u}^h) - \mathbb{G}^H), \mathbb{D}(\mathbf{v}^h)) = (\mathbf{f}, \mathbf{v}^h) \quad \text{für alle } \mathbf{v}^h \in V^h,$$

$$(q^h, \nabla \cdot \mathbf{u}^h) = 0 \quad \text{für alle } q^h \in Q^h,$$

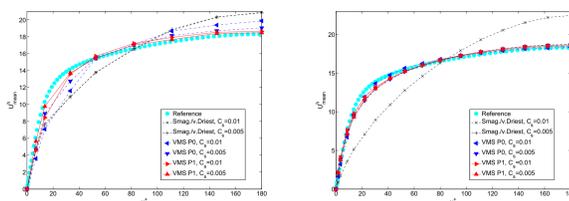
$$(\mathbb{D}(\mathbf{u}^h) - \mathbb{G}^H, \mathbb{L}^H) = 0 \quad \text{für alle } \mathbb{L}^H \in L^H$$

- (V^h, Q^h) – Standard-Finite-Element für Navier-Stokes-Gleichungen
- L^H – Großskalraum, unstetiger Finite-Element-Raum,
- ν_T – Turbulenzmodell (Wirbel-Viskositäts-Modell)

- **Strömung um einen Zylinder** (J., Kaya (2005)), Reynolds-Zahl $Re = 22000$

Methode	Widerst. \bar{c}_d	$c_{d,rms}$	Auftrieb \bar{c}_l	$c_{l,rms}$	Strouhal-Z.
Smagorinsky LES	2.48	0.08	0.00	1.19	0.152
VMS mit $L^H = P_0$	2.60	0.13	0.03	1.22	0.144
VMS mit $L^H = P_1$	2.61	0.15	0.02	1.27	0.132
Experimente	1.9-2.1	0.1-0.2		0.7-1.4	0.132

- turbulente Kanalströmung mit $Re_\tau = 180$ (J., Roland (2007))



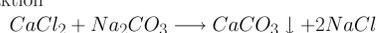
- **VMS-Methoden besser als klassische LES**: Collis u.a. (2004), Farhat u.a. (2006), Gravemeier (2006, 2007), Hughes u.a. (2001)

- **Fazit**: VMS-Methoden sind ein viel versprechender neuer Ansatz zur Simulation turbulenter Strömungen

Simulation von Populationsbilanzgleichungen

- **Modellproblem: Kalzium-Karbonat-Fällung**:

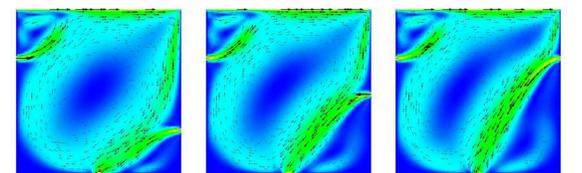
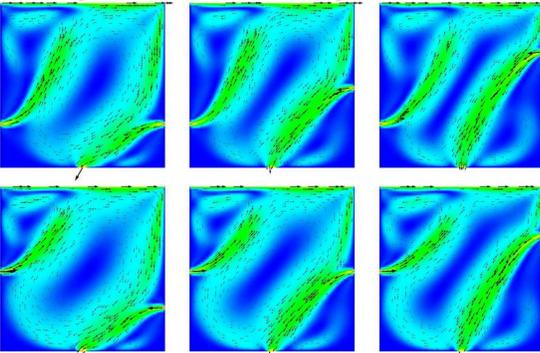
- 2D stationäre Strömung (Navier-Stokes-Gleichungen)
- chemische Reaktion



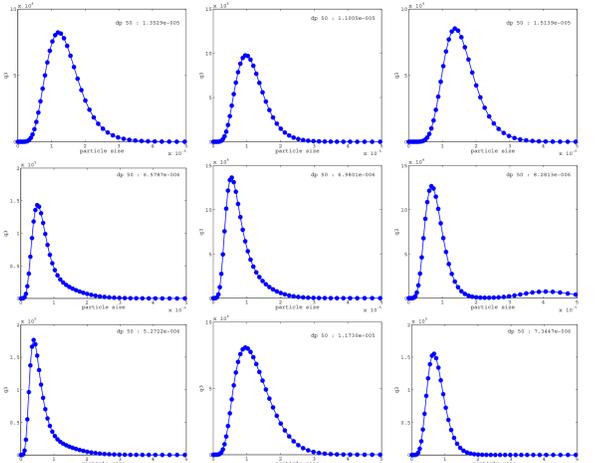
- System nichtlinearer Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichungen
- Populationsbilanz (Transportgleichung in 3D), Rückkopplung auf Konzentration von $CaCO_3$ durch Partikelbildung

- **betrachtete Mechanismen**: Keimbildung, Partikelwachstum

- **Betrachtung unterschiedlicher Einströmungen**



- **Volumenanteil und Median am Ausfluss nach 50 000 s**



Vorhaben: Simulation von Windkanalexperimenten

- turbulente Strömungen:

- Turbulenzmodellierung: VMS-Methoden, mit Modelladaptivität
- Zeitdiskretisierung: implizit, adaptive Zeitschrittweiten
- Ortsdiskretisierung: inf-sup stabile FE-Methoden, adaptive Gitter

- Gleichung(en) für Populationsbilanz(en) in \mathbb{R}^d , $d \geq 4$

- FE-Methoden, adaptive Gitter oder sparse Grids

- Lösung des gekoppelten Systems

- Ziele:

- akkurate Simulation der Windkanalexperimente
- Neu- und Weiterentwicklung von Verfahren zur Simulation gekoppelter Systeme von Strömungs- und Populationsgleichungen