

# Hydrodynamik der Taylor-Strömung im quadratischen Mini-Kanal: Experimentell validierte numerische Simulationen

Ö. Keskin<sup>1,2</sup>, M. Wörner<sup>2</sup>, T. Bauer<sup>3</sup>, H. Soyhan<sup>2</sup>, R. Lange<sup>3</sup>



<sup>1</sup> **Sakarya University**  
Mechanical Engineering  
Department,  
Sakarya, Turkey



Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

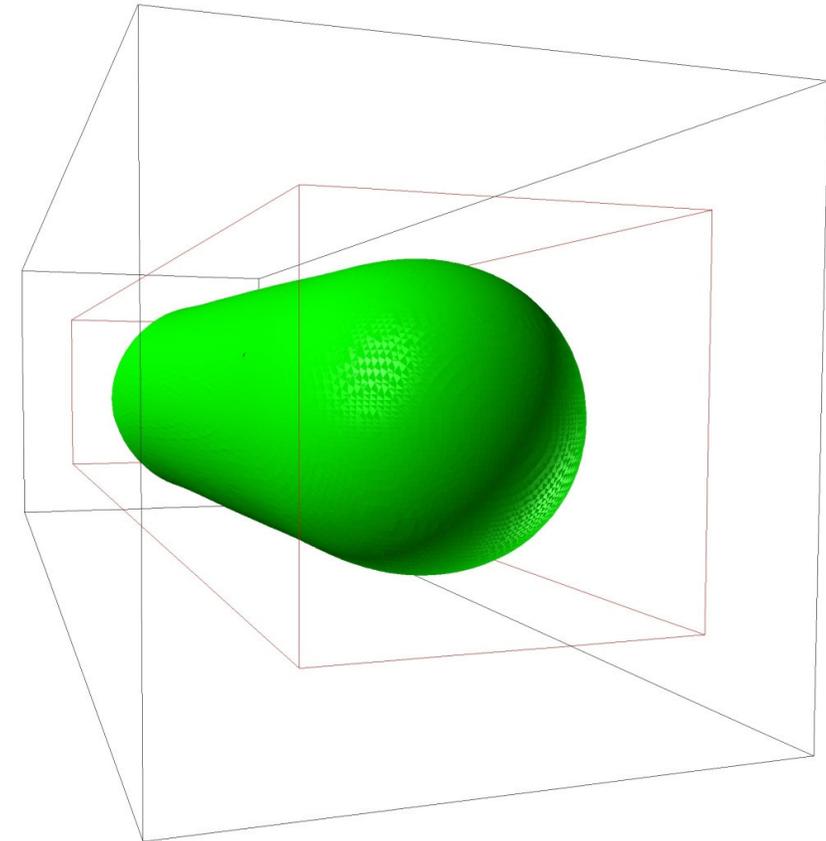
<sup>2</sup> **Forschungszentrum Karlsruhe**  
Institut für Reaktorsicherheit und  
Institut für Kern- und Energietechnik  
Karlsruhe



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

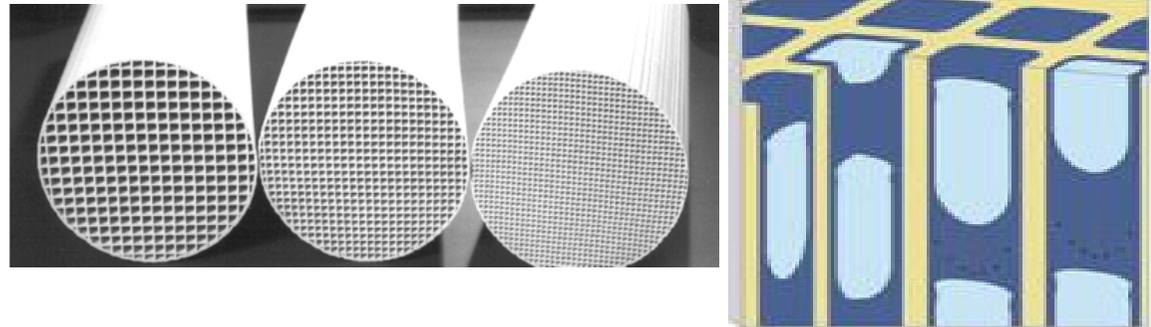
<sup>3</sup> **Technische Universität Dresden**  
Institut für Verfahrenstechnik und  
Umweltechnik  
Dresden

- Einführung und Motivation
  - Taylor-Strömung in Monolith-Reaktoren
- Experimente
  - Taylor-Strömung im quadratischen Mini-Kanal
- Numerische Simulation
  - Methode und Set-Up
  - Validierung anhand der Blasenform
  - Ausgewählte weitere Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick



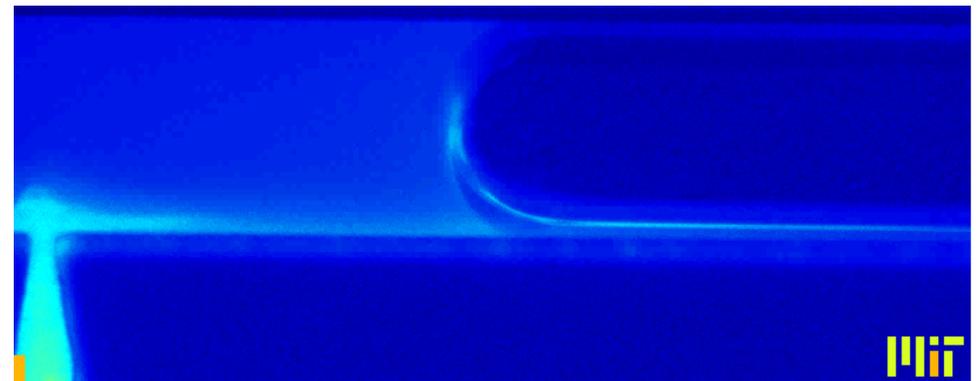
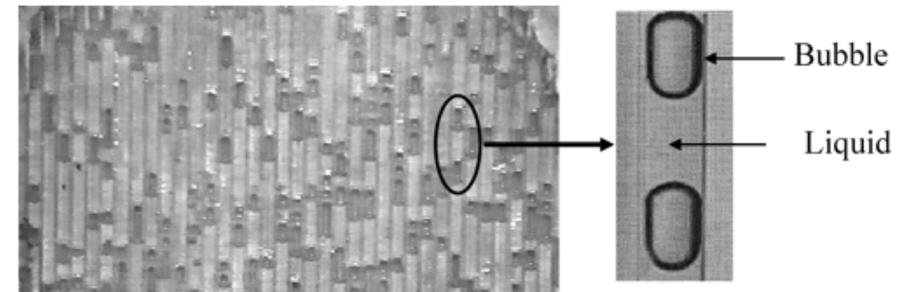
- Strukturierte Reaktoren für die Prozess-Intensivierung

- Monolith-Reaktoren für katalytische Gas/Flüssig Reaktionen, z.B. für die Fischer-Tropsch Synthese



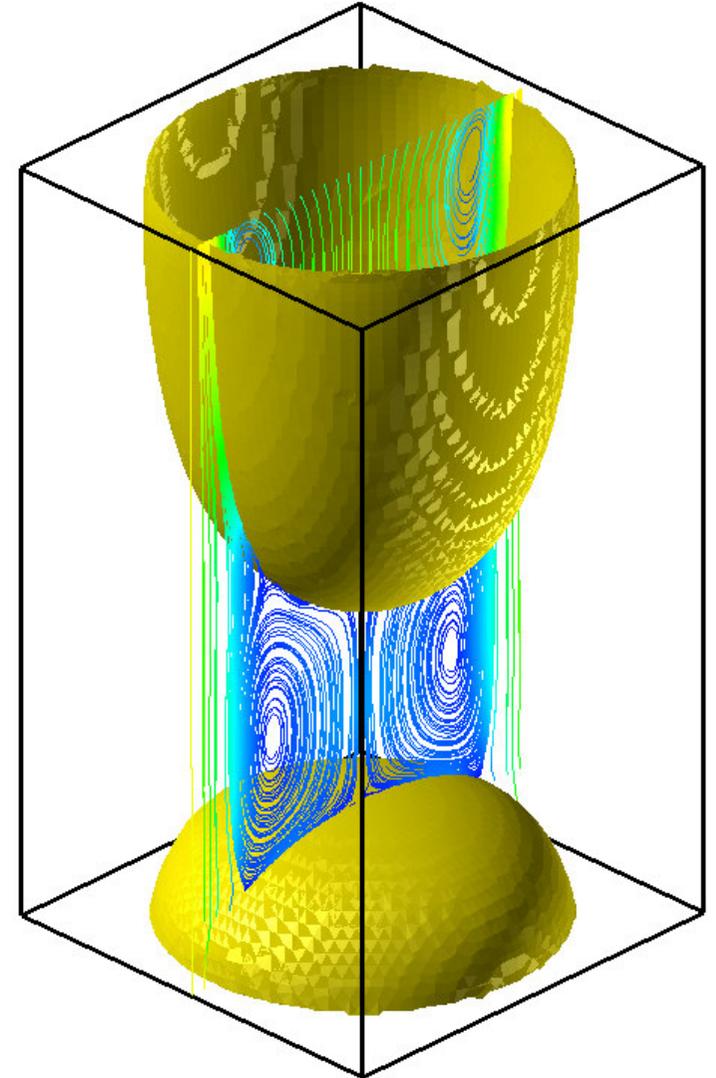
- Taylor-Strömung

- Gute Stoffübertragung durch hohe spezifische Grenzfläche und kurze Diffusionswege über dünnen Flüssigkeitsfilm
- Gute Durchmischung im Flüssigkeitspfropfen bei geringer axialer Dispersion



(Film von A. Günther, MIT)

- Transportprozesse (TP) in Taylorströmung
  - G-S über dünnen Flüssigkeitsfilm
  - G-L über Front und Ende der Blase
  - L-S im Flüssigkeitspfropfen
  - Im quadratischen Kanal: 3D-Effekte
- Ziel:  
TP verstehen und quantifizieren mit numerischer Strömungssimulation
  - Hier: Validierung der Hydrodynamik durch 1:1 Nachrechnung von Experimenten im quadratischen Mini-Kanal ( 1mm × 1mm)

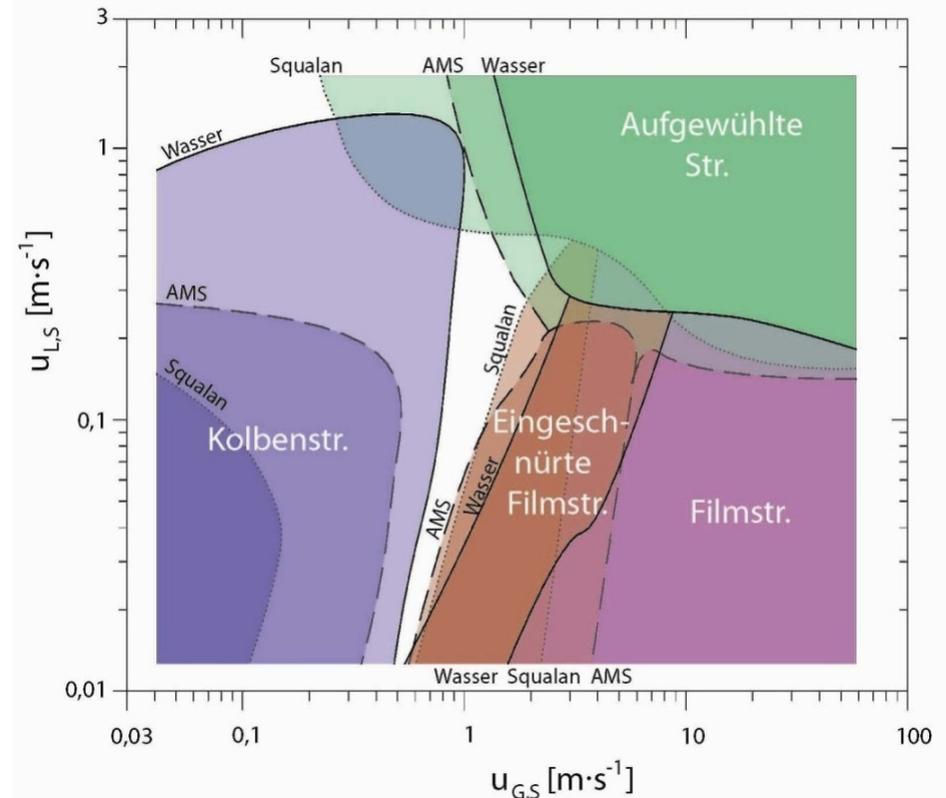
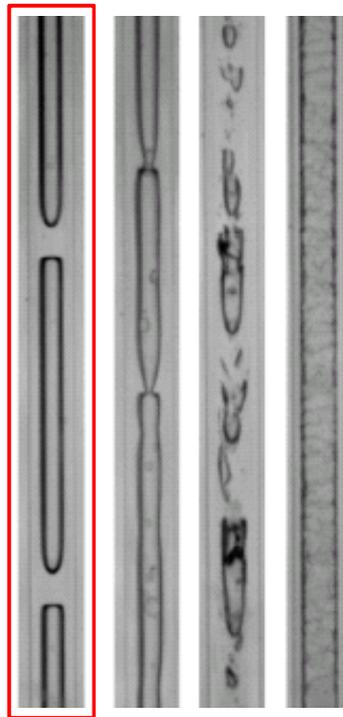


# Experimentelle Untersuchungen

- Einzel-Kanal Experimente an der TU Dresden\*

- Quadrat. Kanal (1 mm × 1 mm)
- N<sub>2</sub> + verschiedene Flüssigkeiten und Drücke (1, 2, 20, 40 bar)
- Gleichgerichtete Abwärtsströmung

	AMS (C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> )	Wasser	Squalan (C <sub>30</sub> H <sub>62</sub> )
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	904	998	802
$\mu$ [mPa s]	0,91	1,0	29,0
$\sigma$ [mN/m]	32,1	72,1	28,6



\* T. Bauer, R. Lange, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

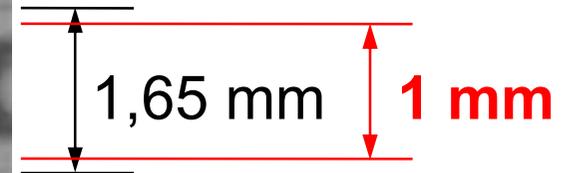
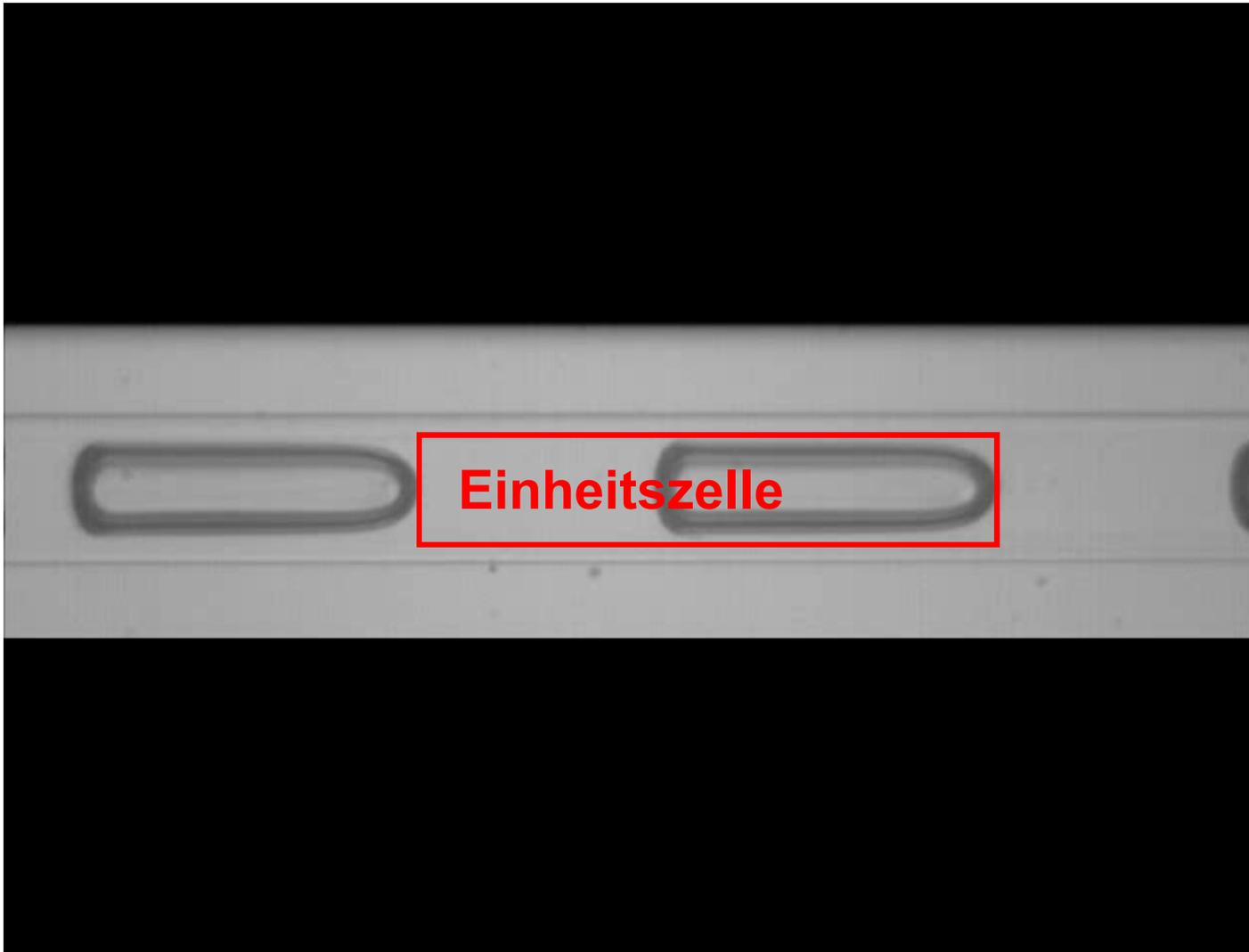
# Taylor-Strömung Squalan-Stickstoff



$$A = 1 \text{ mm}^2$$

$$J_L = Q_L / A = 0,017 \text{ m/s}; \quad J_G = Q_G / A = 0,05 \text{ m/s}; \quad J = J_L + J_G = 0,067 \text{ m/s}$$

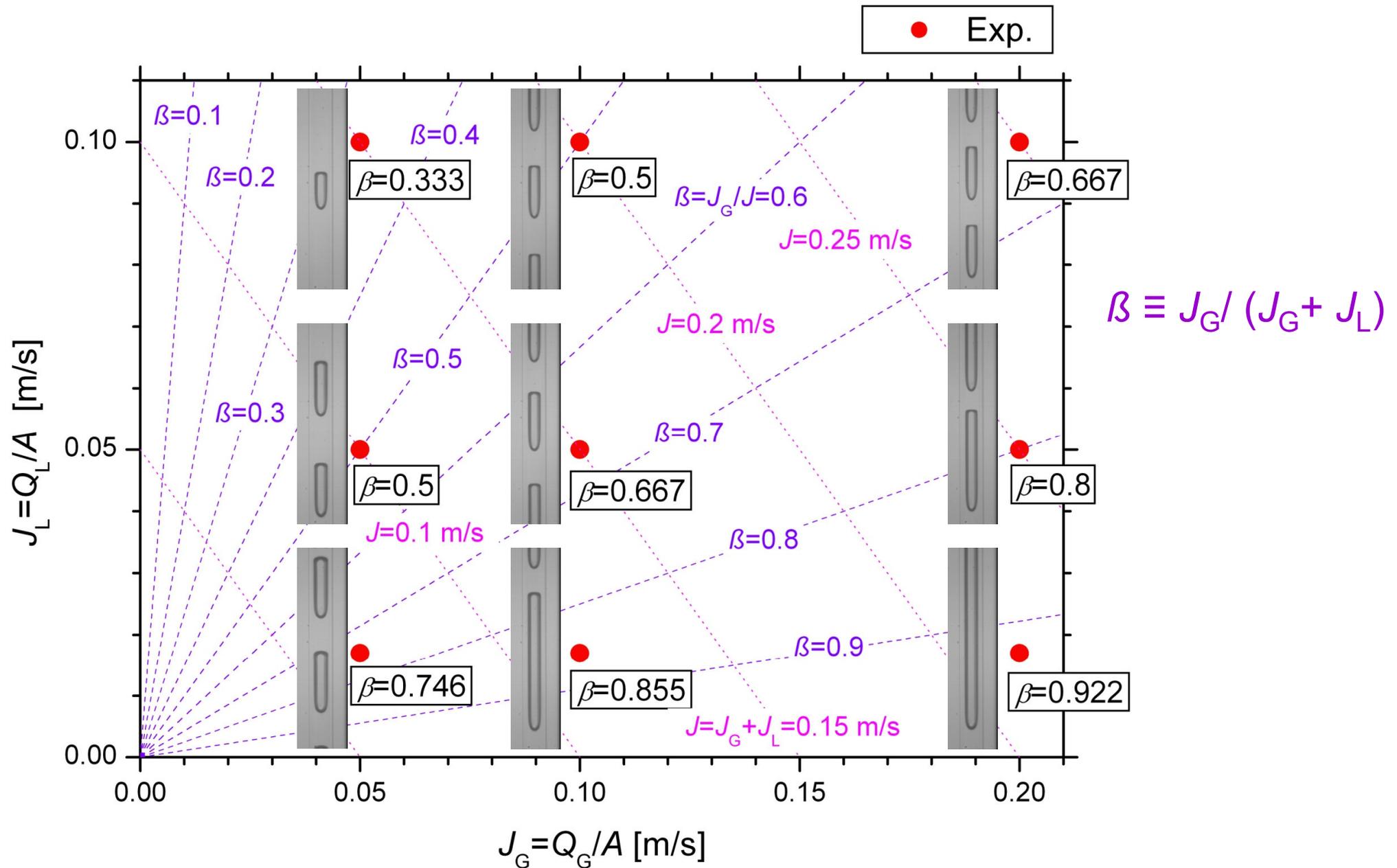
# Taylor-Strömung Squalan-Stickstoff



$$A = 1 \text{ mm}^2$$

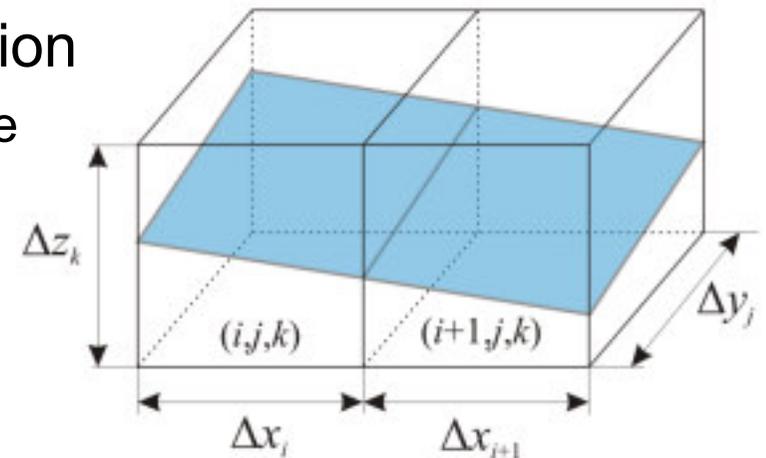
$$J_L = Q_L / A = 0,017 \text{ m/s}; \quad J_G = Q_G / A = 0,05 \text{ m/s}; \quad J = J_L + J_G = 0,067 \text{ m/s}$$

# Taylor-Strömung Squalan-Stickstoff



- Methode

- In-house Rechenprogramm TURBIT-VOF
- Navier-Stokes-Gleichung für zwei nicht mischbare Fluide mit konstanten Stoffwerten ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ )
- Volume-of-Fluid Methode mit Rekonstruktion
  - In jeder Gitterzelle wird die Phasengrenzfläche lokal als Ebene approximiert
- Diskretisierung im Raum
  - Finite-Volumen-Methode
  - Strukturiertes, kartesisches, versetztes Gitter für einfache quaderförmige Rechengebiete
  - Zentrale Differenzen-Approximationen 2. Ordnung
- Lösungsstrategie
  - Projektionsmethode (Druck-Poisson-Gleichung)
  - Explizites Runge-Kutta Zeitintegrationsverfahren 3. Ordnung

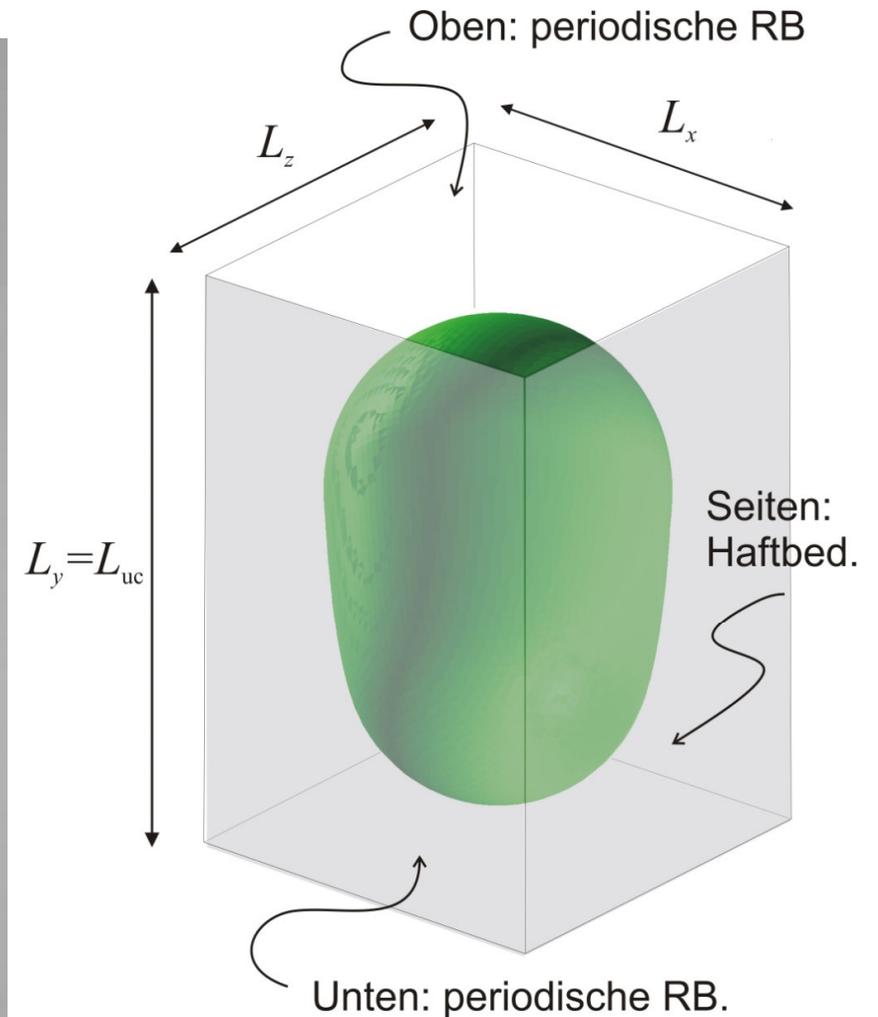
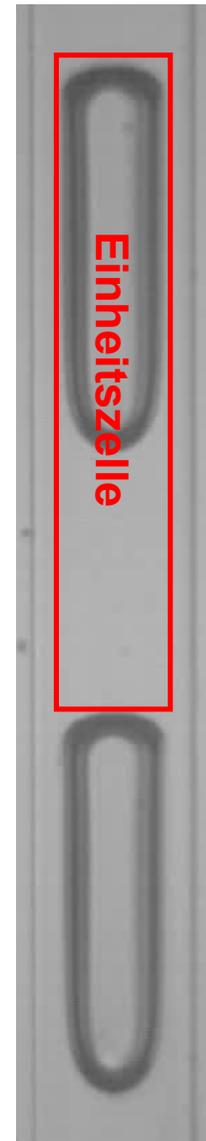


- Set-up

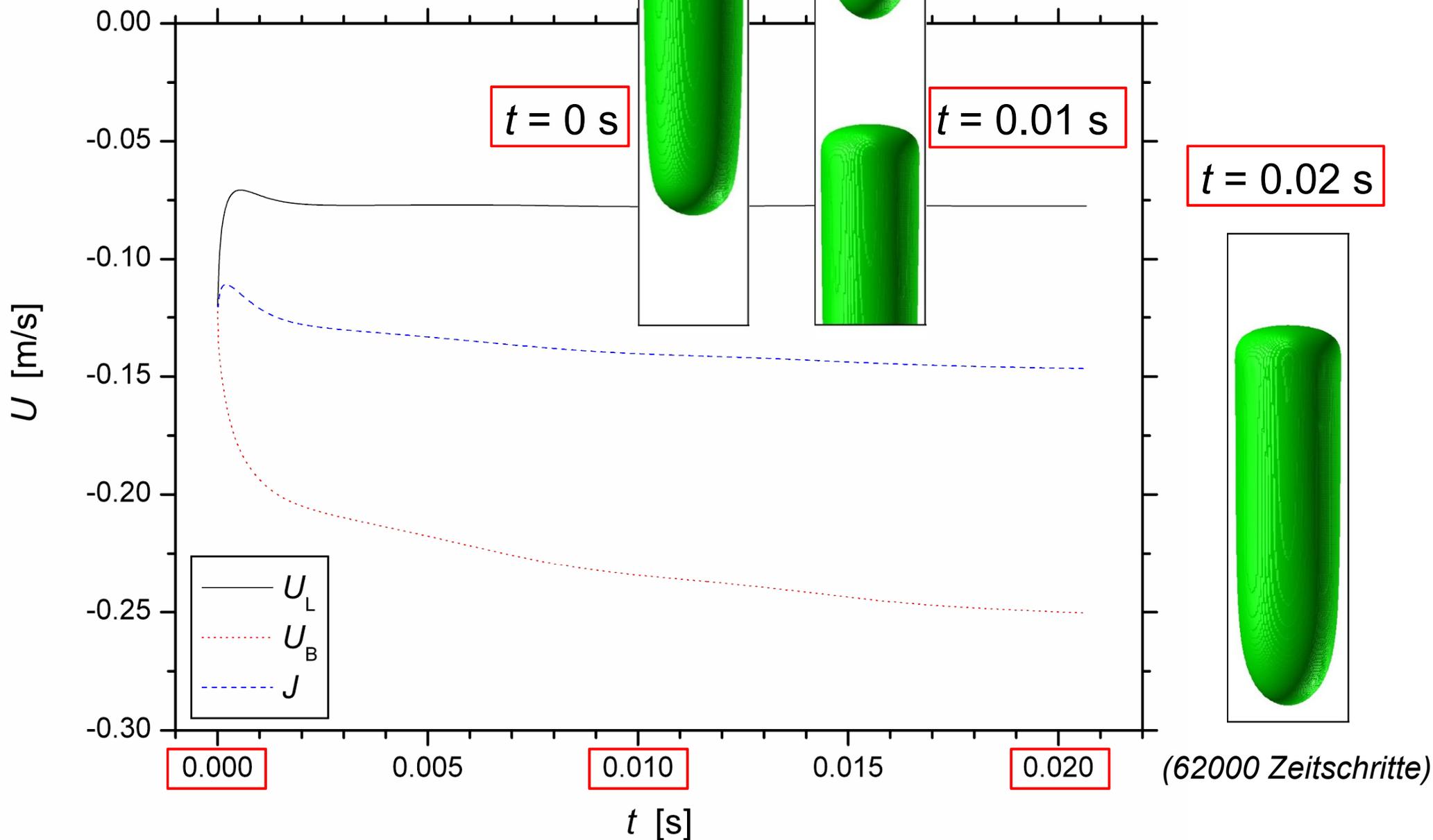
- Querschnitt 1 mm × 1 mm
- Betrachtung einer **Einheitszelle** der Taylor-Strömung
- periodische Randbedingungen in axialer Richtung

- Parameter

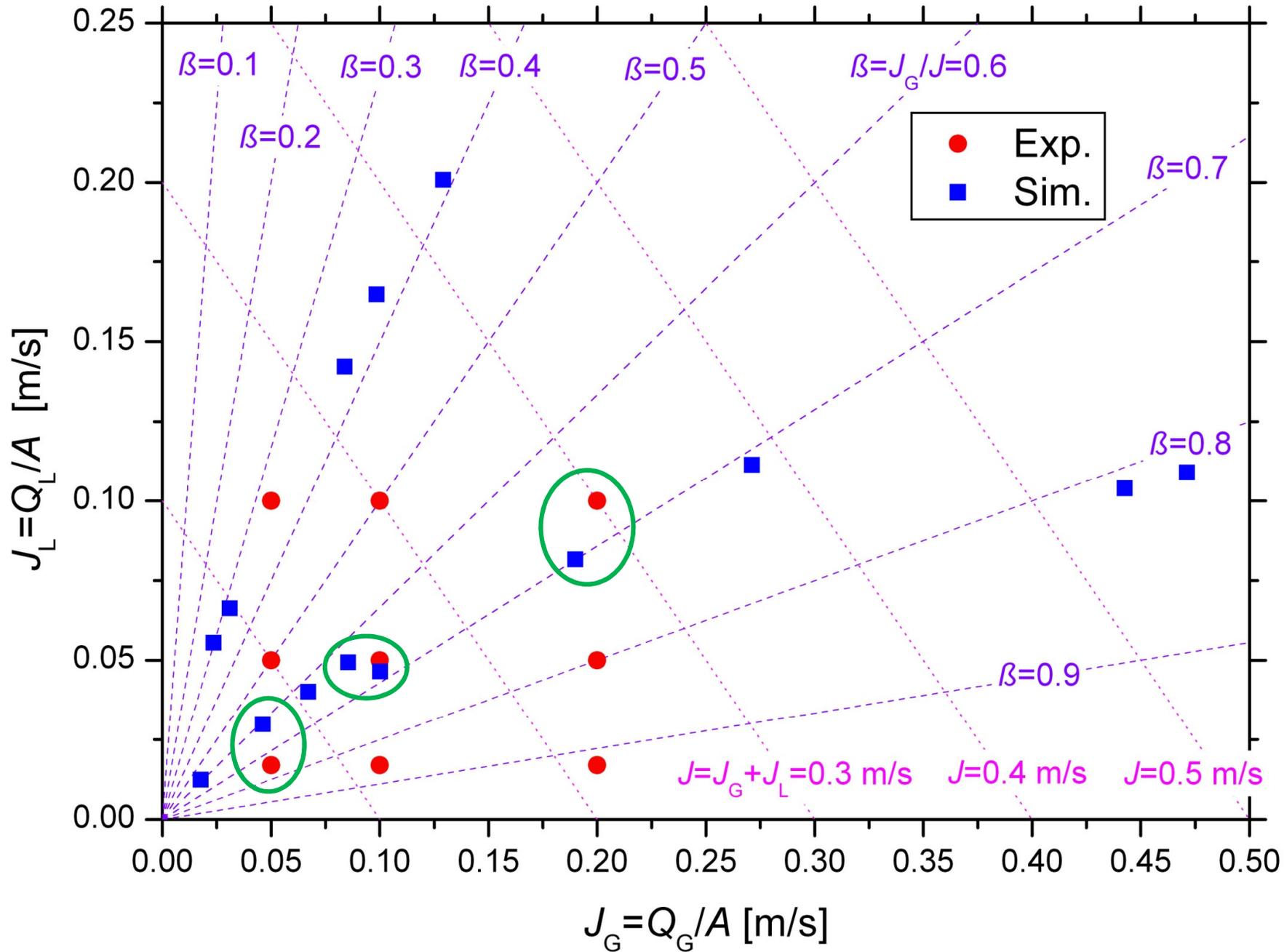
- Gasgehalt in Einheitszelle  
Hier:  $\varepsilon_G = 0,2$  und  $\varepsilon_G = 0,4$
- Druckdifferenz über die Einheitszelle (Abschätzung)
- Länge der Einheitszelle  
Hier:  $L_y = 4$  mm und 6 mm
- Gitter:  $80 \times 320 \times 80$  bzw.  $80 \times 480 \times 80$



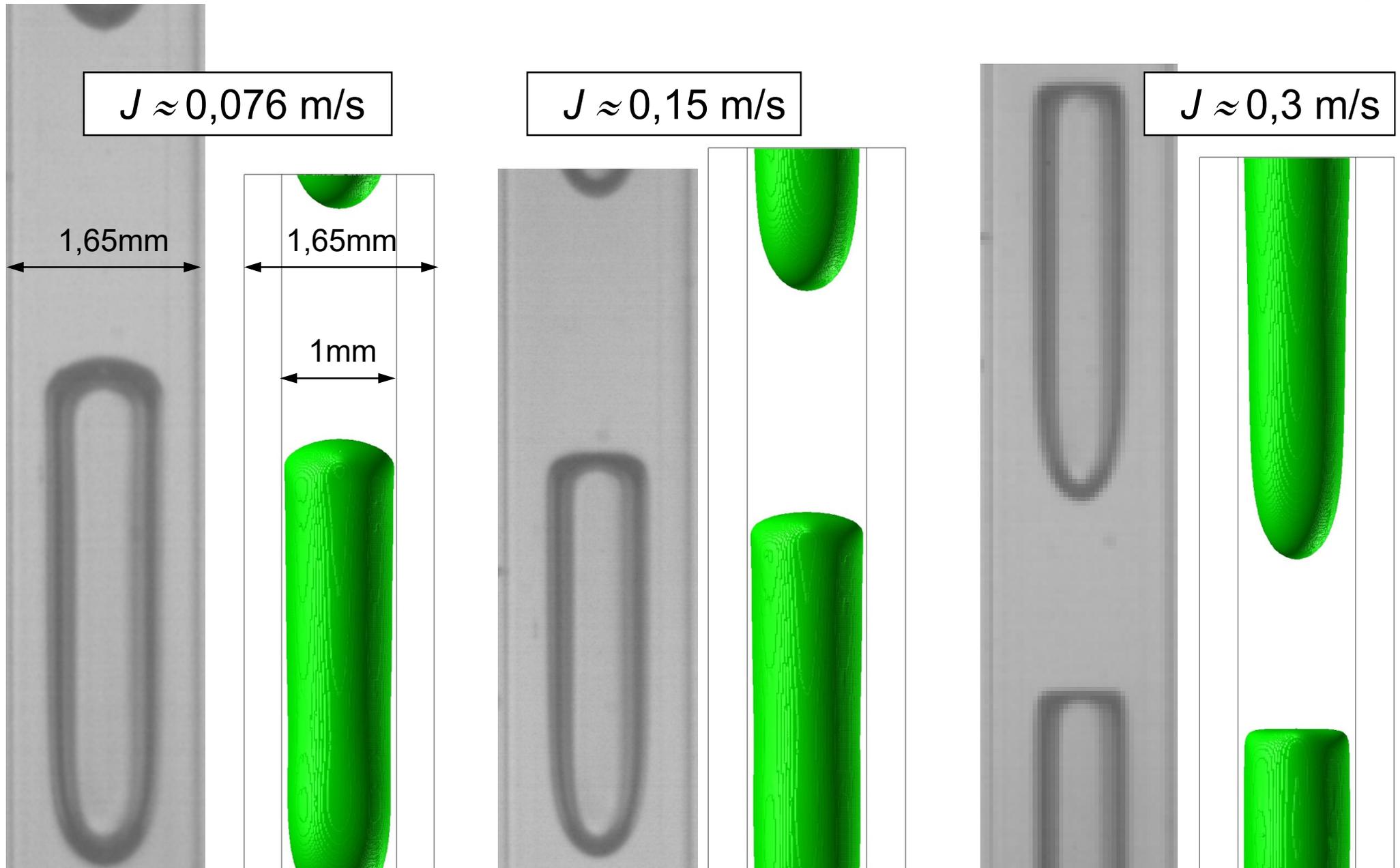
# Simulationsverlauf



# Überblick über die durchgeführten Simulationen



# Vergleich der Blasenform



# Einfluss der Kapillar- und Reynolds-Zahl

$$Ca \equiv \frac{\mu_L U_B}{\sigma}$$

$$Re_B \equiv \frac{\rho_L D_h U_B}{\mu_L} = La \cdot Ca$$

$$La \equiv \frac{\sigma \rho_L D_h}{\mu_L^2} = 27.27$$

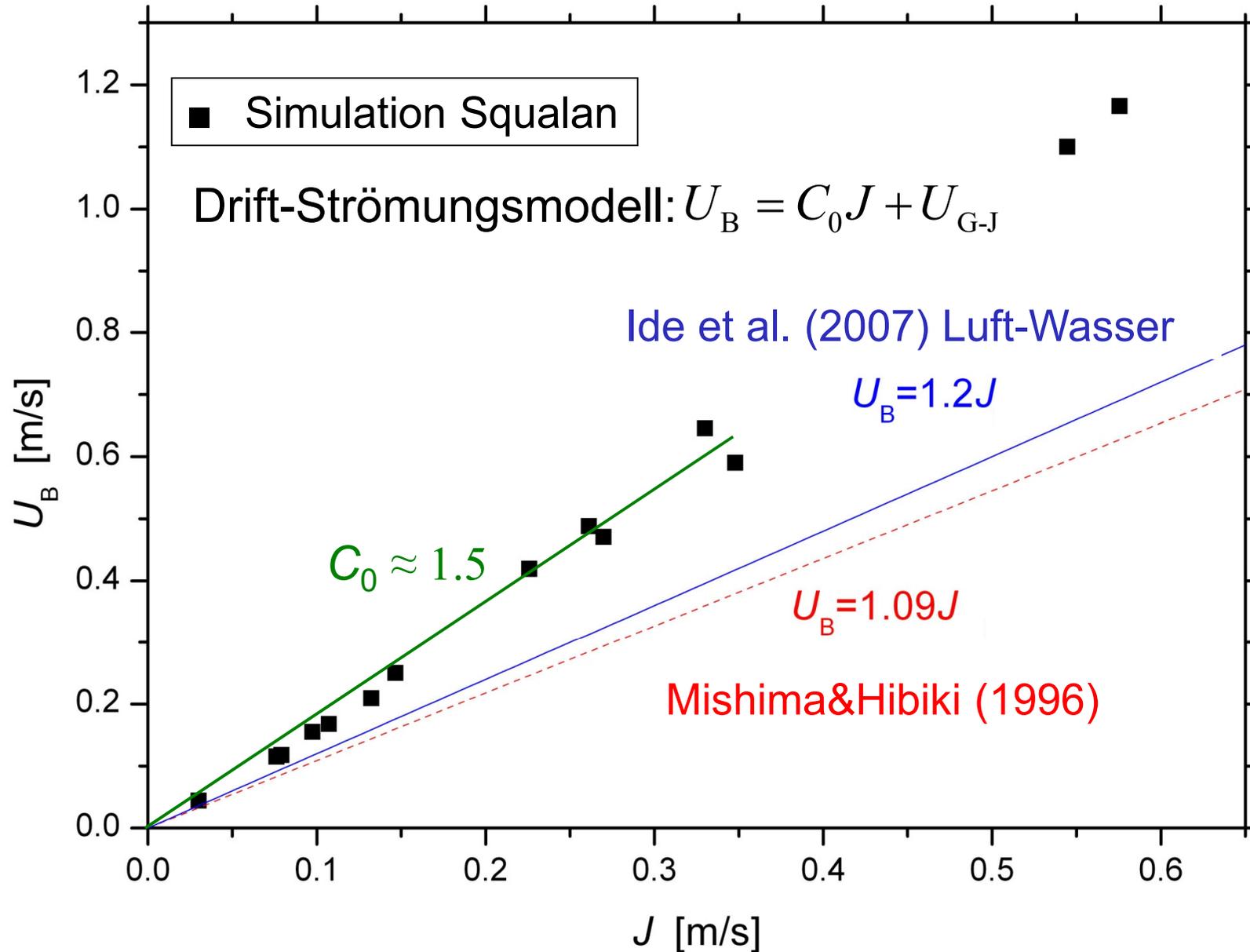
$$\varepsilon_G = 0,4$$



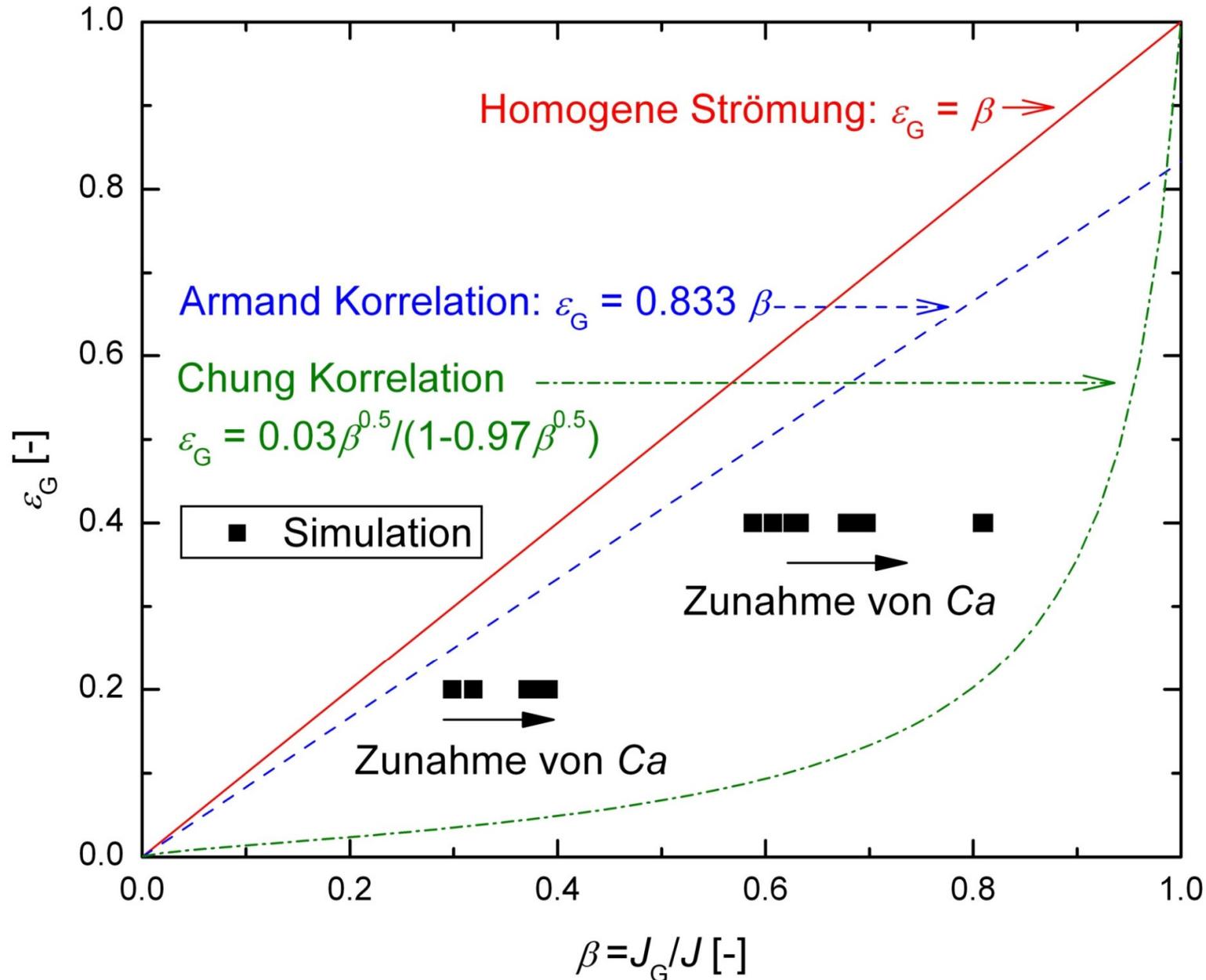
$Ca =$	0,045	0,12	0,17	0,21	0,48	0,60	1,18
$Re_B =$	1,22	3,19	4,64	5,79	13,0	16,3	32,2

- Bei gegebenen Volumenströmen der Phasen (also bekanntem  $J_G$  und  $J_L$ ), welche Werte ergeben sich für
  - Blasengeschwindigkeit und statischen volumetrischen Gasphasenanteil ( $J_G = \varepsilon_G U_B$ )
  - Blasenform, speziell Filmdicke entlang des Blasenumfangs und spezifische Phasengrenzfläche (Funktion der Kapillar-Zahl  $Ca = \mu_L U_B / \sigma$ )
  - Druckverlust
  - ...
- Umkehrung der Fragestellung:
  - Welche Volumenströme der Phasen muss man vorgeben, damit sich z.B. eine bestimmte Filmdicke einstellt

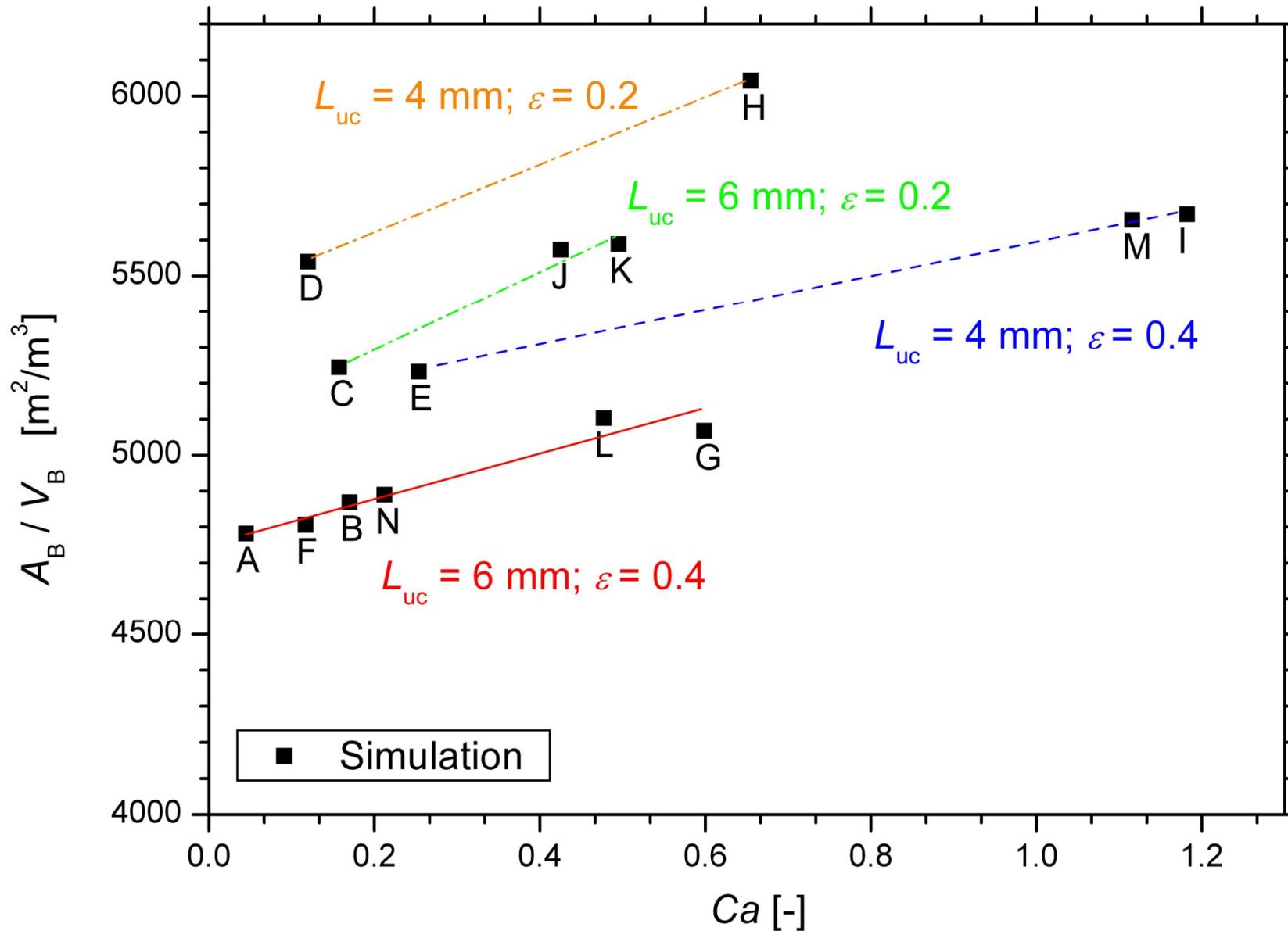
# Beziehung zwischen $U_B$ und $J$



# Beziehung zwischen $\varepsilon_G$ und $\beta$



# Phasengrenzfläche zu Blasenvolumen



- Validierung eines VOF Codes für Taylor-Strömung
  - Gute Übereinstimmung der Blasenform mit Experimenten der TU Dresden bei verschiedenen Durchflussraten
  - Untersuchung des Einflusses der Kapillar-Zahl
- Noch anstehende Auswertungen
  - Beziehungen für den Druckverlust
  - Analyse des lokalen Geschwindigkeits- und Druckfeldes
- Simulationen für kleinere Werte der Kapillar-Zahl
  - Für  $Ca < 0,04$  ist die Blase nicht mehr rotationssymmetrisch und dringt in die Ecken des Kanals vor
  - Flüssigkeitsfilm wird dünner  $\Rightarrow$  feineres Gitter ist notwendig
- Simulationen mit Stofftransport und chem. Reaktion