

Theoretische und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in auf- und abwärts gerichteter Taylor-Strömung

Semih Kececi^{a,b}, Martin Wörner^b, Alexandru Onea^c, Hakan S. Soyhan^a

^aSakarya University, Department of Mechanical Engineering, Sakarya, Türkei

^bForschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kern- und Energietechnik, Karlsruhe

^cForschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorsicherheit, Karlsruhe

1 Einführung

Monolith-Reaktoren für heterogen katalysierte Mehrphasenprozesse

- Keramische Trägerstruktur
- Quadratische Kanäle
- Hydraulischer Durchmesser d_h ca. 0,5 mm – 3 mm
- Katalytisch beschichtete Wände
- Anwendung z.B. für die Fischer-Tropsch-Synthese



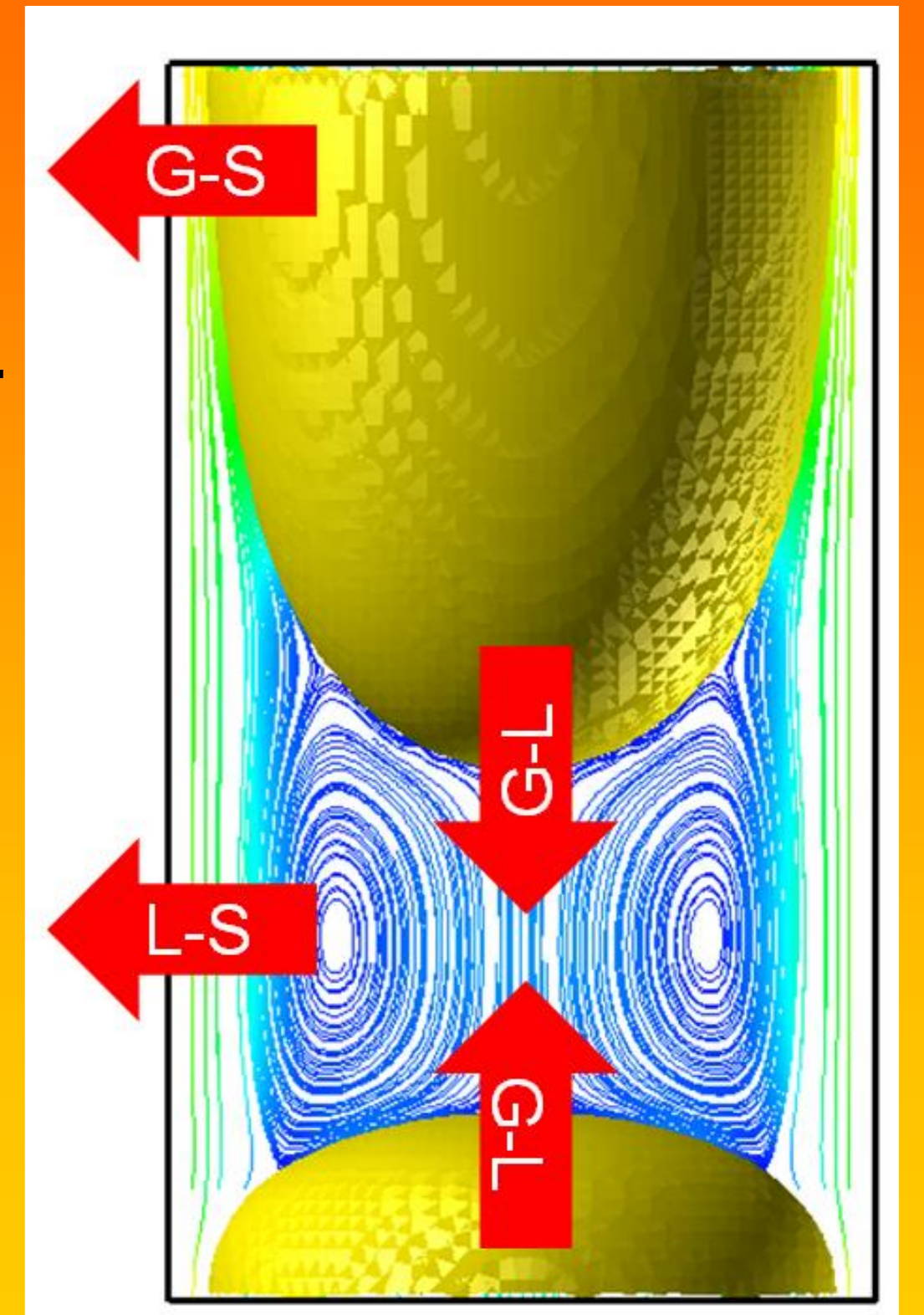
Vorteile der Taylor-Strömung

- Große spezifische Phasengrenzfläche
- Reduzierte axiale Dispersion
- Kurzer Diffusionsweg von der Blase zur Wand
- Gute Durchmischung im Flüssigkeitspfropfen durch Rezirkulationsströmung
- Sehr gute Wärme- und Stoffübertragung

2 Problemstellung

Einfluss der Orientierung des Kanals auf die Effizienz der Stoffübertragung

- Kawakami et al. [1]: Volumetrische Stoffübertragungskoeffizienten G-L und L-S sind in Aufwärts- höher als in Abwärtsström.
- Tsoligkas et al. [2] begründen dies mit einer kürzeren Rezirkulations-Zeit im Flüssigkeitspfropfen bei Aufwärtsströmung
- Definition der Rezirkulations-Zeit: Verhältnis der Zeit, die ein Flüssigkeitsteilchen benötigt, um sich vom einen zum anderen Ende des Flüssigkeitspfropfens zu bewegen, zu der Zeit, die der Flüssigkeitspfropfen benötigt, um sich eine seiner eigenen Länge entsprechenden Strecke weiter zu bewegen



3 Theoretische Ergebnisse

Theoretische Analyse der Rezirkulations-Zeit

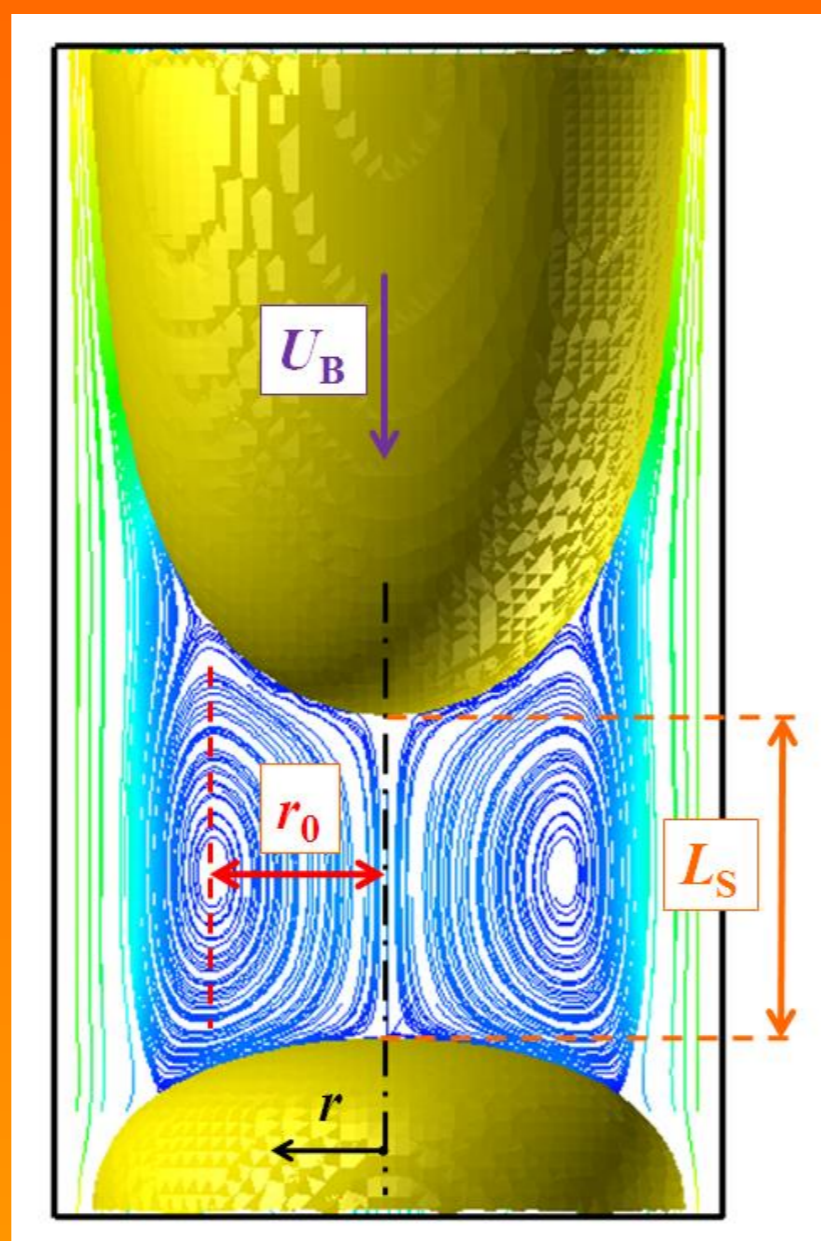
3.1 Kreisförmiger Kanalquerschnitt (siehe [3])

$$\tau = U_B r_0^2 \int_0^{r_0} V(r) r dr \quad V(r) = 2J \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) - U_B$$

$V(r)$ = Geschwindigkeit im mit-bewegten System
 $J = (Q_G + Q_L)/A$ = Gesamt-Leerrohrgeschwindigkeit

$$V(r_0) = 0 \Rightarrow \frac{r_0}{R} = \sqrt{1 - \frac{U_B}{2J}} \Rightarrow \tau_{\text{Rohr}} = \left(\frac{J}{U_B} - \frac{1}{2}\right)^{-1}$$

$$\frac{U_B}{J} \equiv \psi = \psi(Ca) \quad \text{mit} \quad Ca \equiv \frac{\mu_L U_B}{\sigma} \quad \text{und} \quad 1 \leq \psi \leq 2$$



3.2 Rechteckiger Kanalquerschnitt

$$V(y, z) = u(y, z) - U_B = \frac{64}{\pi^3} J \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^3} \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{n\pi z}{2a}\right)}{\cosh\left(\frac{n\pi b}{2a}\right)} \right] \cos\left(\frac{n\pi y}{2a}\right) - U_B$$

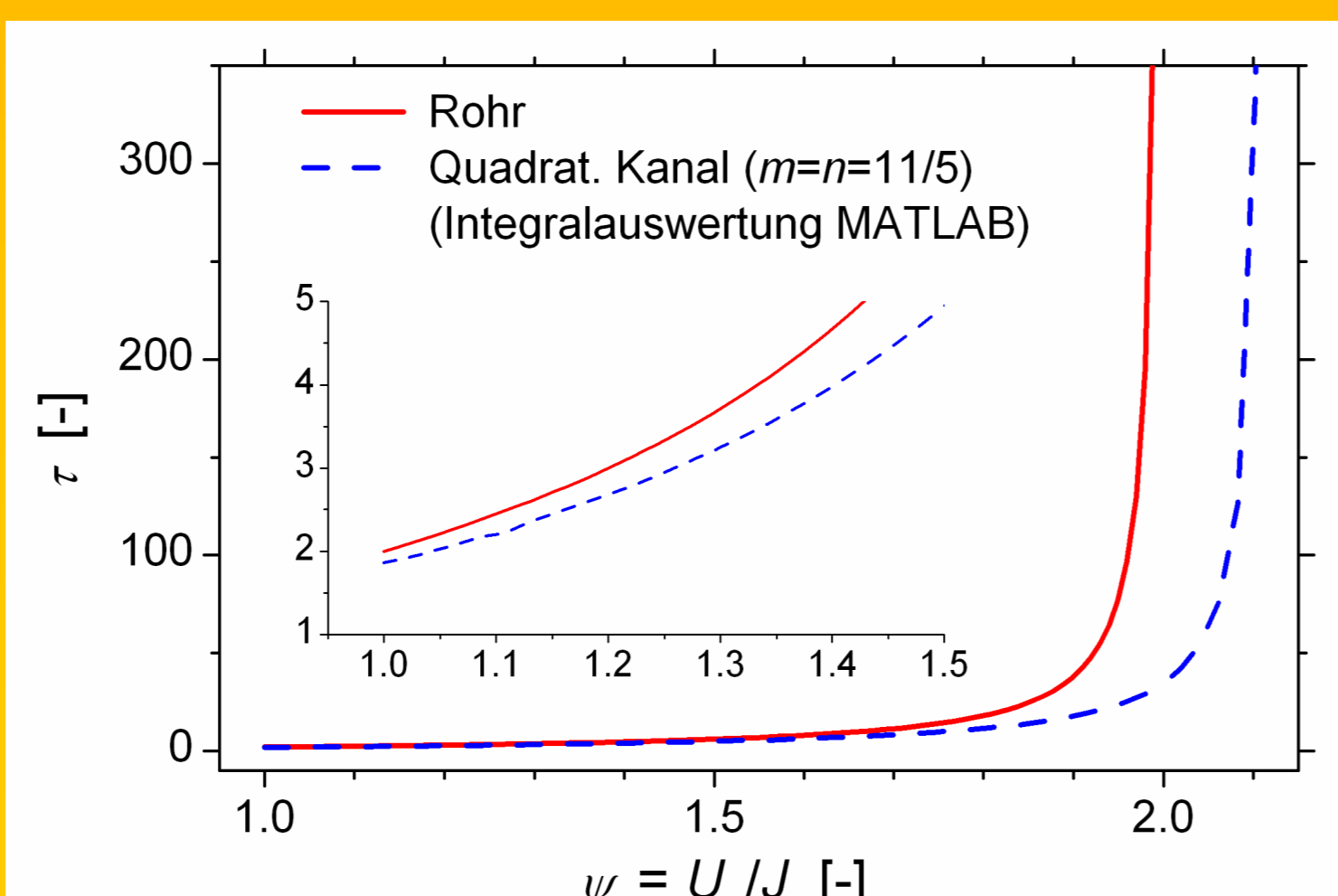
Approximation von Natarajan & Lakshmanan [4]:

$$u(y, z) \approx U_{\text{max}} \left[1 - \left(\frac{y}{a}\right)^m \right] \left[1 - \left(\frac{z}{b}\right)^n \right] \quad m = 1,7 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{a}\right)^{-1,4} \quad n = 2 + 0,3 \left(\frac{b}{a} - \frac{1}{3}\right) \quad \text{für} \quad \frac{b}{a} \geq \frac{1}{3}$$

$$\tau = \frac{n+1}{n} \frac{\phi}{1-\phi} \int_0^1 \frac{(1-u^m)^{\frac{1}{n}}}{(1-\phi)^{-1} - u^m} du + \frac{1}{1-\phi} \int_0^1 \frac{(1-u^m)^{\frac{1}{n}}}{(1-\phi)^{-1} - u^m} du$$

$$\phi = \frac{m}{m+n} \frac{n}{m+n}$$

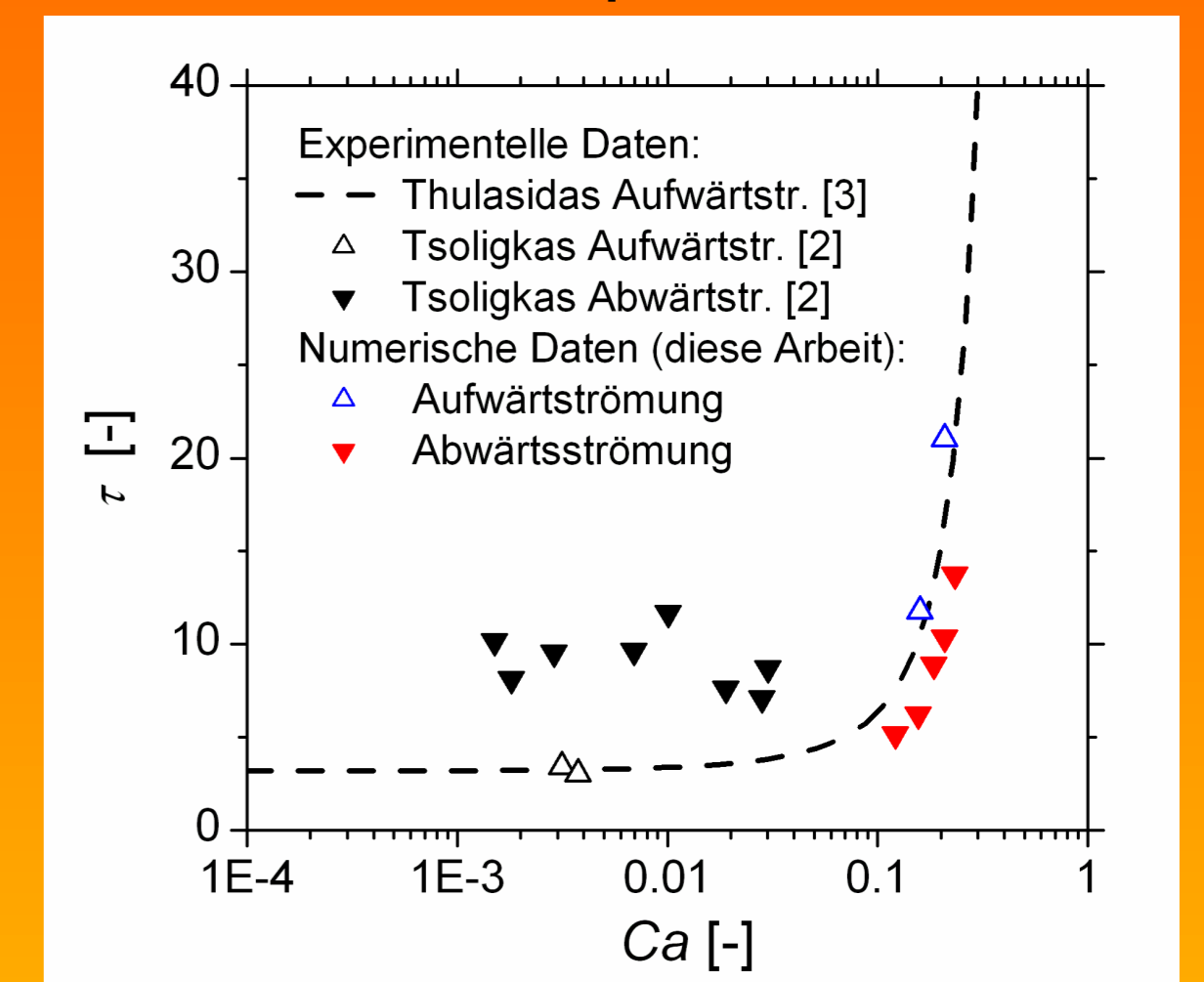
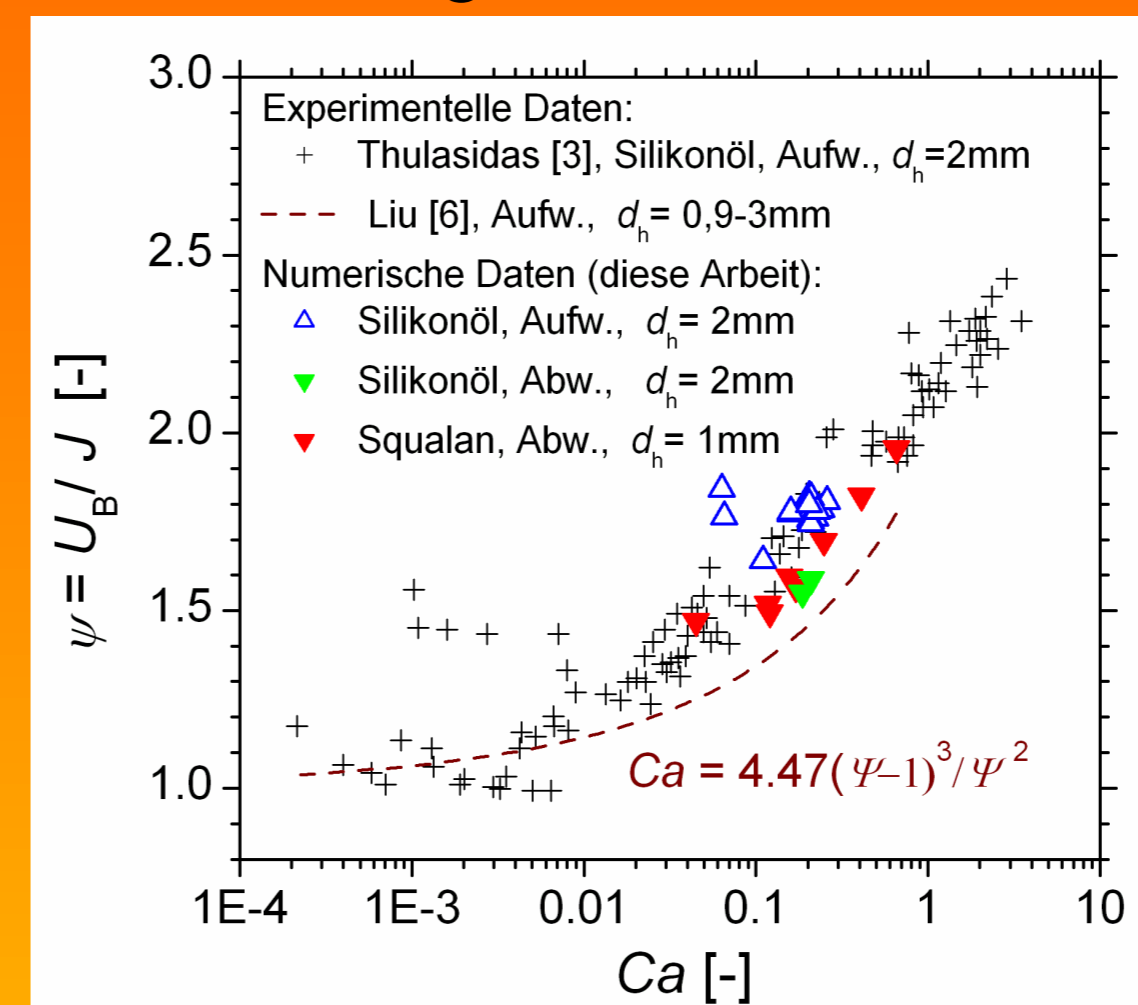
$$1 \leq \psi = \frac{U_B}{J} \leq \frac{m+1}{m} \frac{n+1}{n}$$



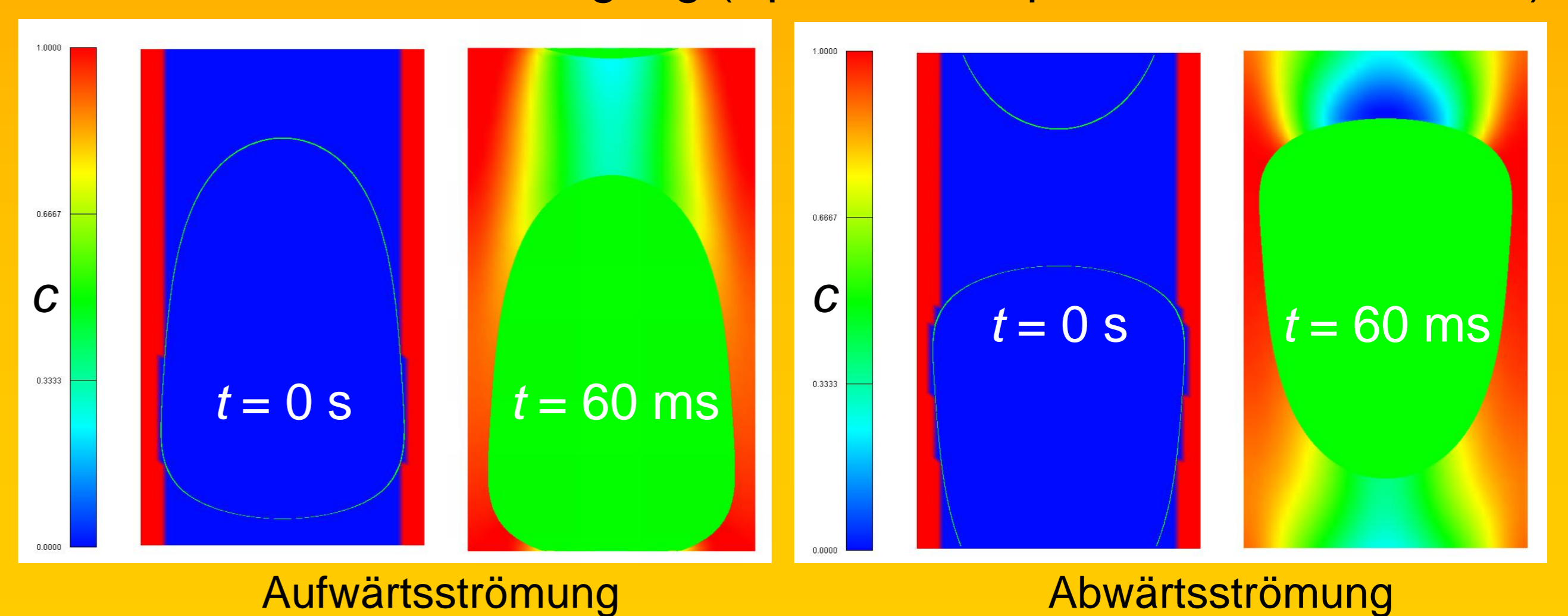
4 Numerische Ergebnisse

VoF-Simulation der Taylor-Strömung im quadratischen Mini-Kanal [5]

4.1 Auswertung der Rezirkulations-Zeit über der Kapillar-Zahl Ca



4.2 Simulation zum Stoffübergang (Speziestransport von Wand in Kern)



5 Schlussfolgerungen

- Die Rezirkulations-Zeit ist eine eindeutige Funktion von $\psi = U_B/J$
- Bei gleichem J ist ψ in Aufwärts- größer als in Abwärtsstr. (Auftriebskraft)
- Bei gleicher Kapillar-Zahl ist die Rezirkulations-Zeit größer in Aufwärts- als in Abwärtsströmung (Widerspruch zu experiment. Ergebnissen in [2])
- Der Stoffübergang G-L und L-S ist kleiner in Aufwärts- als in Abwärtsstr.

Literatur

- [1] K. Kawakami, K. Kyosuke, F. Shiraishi, K. Kusunoki: Performance of a honeycomb monolith bioreactor in a gas-liquid-solid three-phase system, *Ind. Eng. Chem. Res.* **28** (1989) 394–400.
- [2] A.N. Tsoligkas, M.J.H. Simmons, J. Wood: Influence of orientation upon the hydrodynamics of gas-liquid flow in square channels in monolith supports, *Chem. Eng. Sci.* **62** (2007) 4365–4378.
- [3] T.C. Thulasidas, M.A. Abraham, R.L. Cerro: Flow patterns in liquid slugs during bubble-train flow inside capillaries, *Chem. Eng. Sci.* **52** (1997) 2947–2962.
- [4] N.M. Natarajan, Lakshmanan: Laminar flow in rectangular ducts: prediction of velocity profiles & friction factor, *Ind. J. Technol.* **10** (1972) 435–438.
- [5] A. Onea, M. Wörner, D.G. Cacuci: A qualitative computational study of mass transfer in upward bubble train flow through square and rectangular mini-channels, *Chem. Eng. Sci.* **64** (2009) 1416–1435.
- [6] H. Liu, C.O. Vandu, R. Krishna: Hydrodynamics of Taylor flow in vertical capillaries: flow regimes, bubble rise velocity, liquid slug length, and pressure drop, *Ind. Eng. Chem. Res.* **44** (2005) 4884–4897.