ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

SGVC
Schweizerische Gesellschaft der Verfahrens- und ChemieingenieurInnen
Swiss Process and Chemical Engineers

Investigation of axial dispersion and simulation of flow within metal foam

Adrian Zenklusen

Institut für Verfahrenstechnik, ETH Zürich

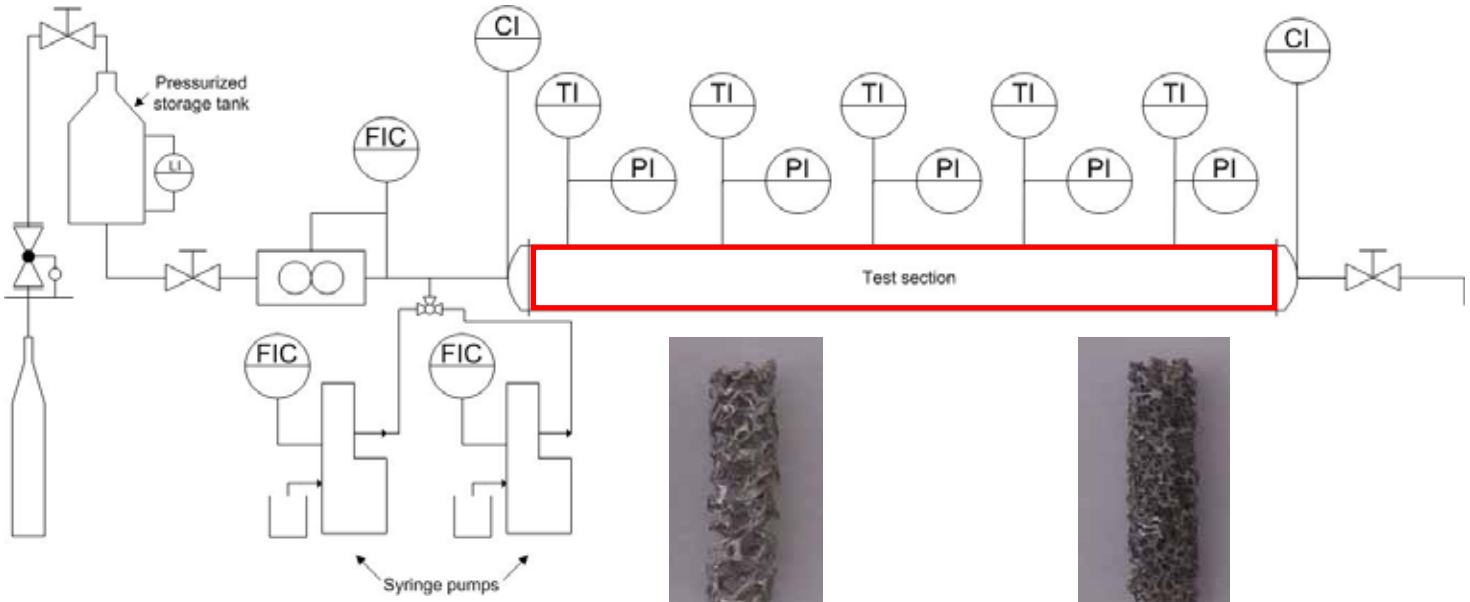
Motivation

- breite Anwendung von metallischen Schäumen (Wärmetauscher, Leichtbau, Dämpfer, Filter usw.)
- Eigenschaften: zufällige Struktur, grosse innere Oberfläche, hohe Porösitat, gute Wärmeleitfähigkeit
- neue Anwendung: kontinuierlicher Reaktor

Inhalt

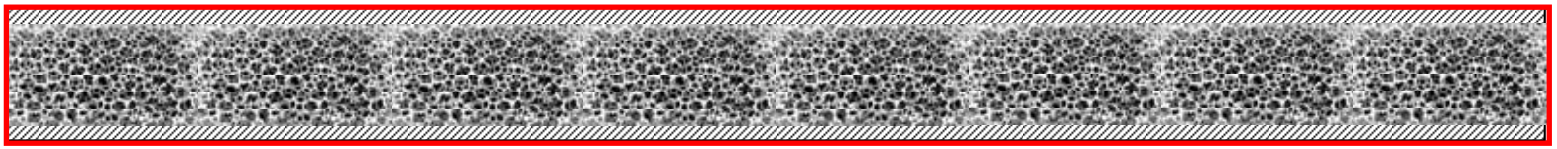
- Kontinuierlicher Reaktor auf Basis metallischer Schäume
- Verweilzeitverhalten des Reaktors
- Strömung im Reaktor mittels Simulationen
- Schlussfolgerungen

Kontinuierlicher Reaktor auf Basis metallischer Schäume



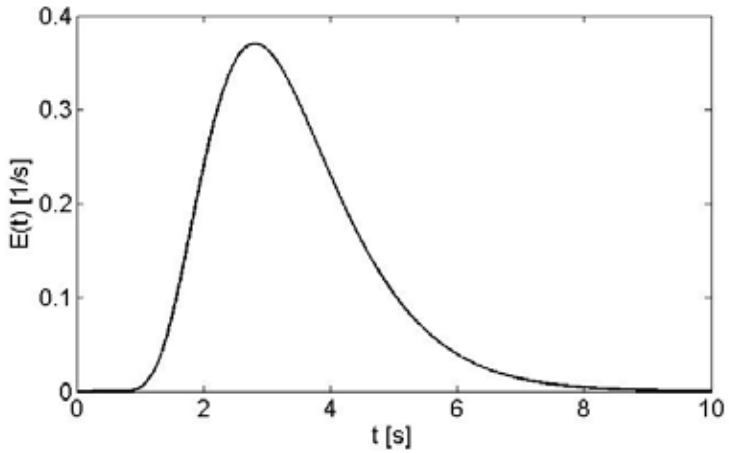
20 ppi

30 ppi

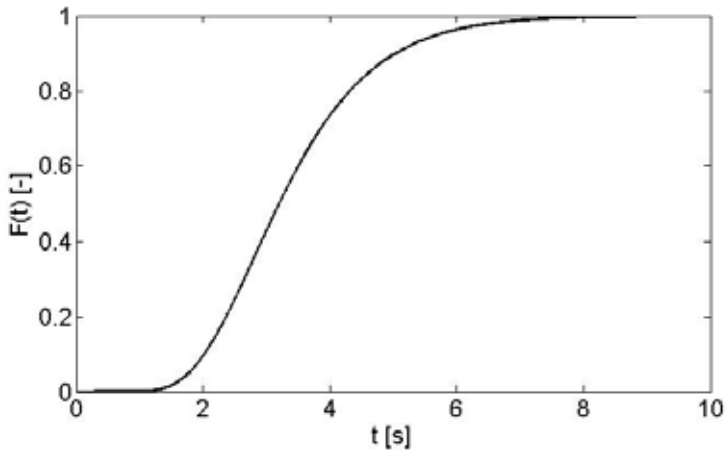


Verweilzeitverhalten des Reaktors

- Verweilzeit: Zeit, welche ein Fluidelement in einem System verweilt
- Verweilzeitverteilung in einem kontinuierlichen Reaktor:



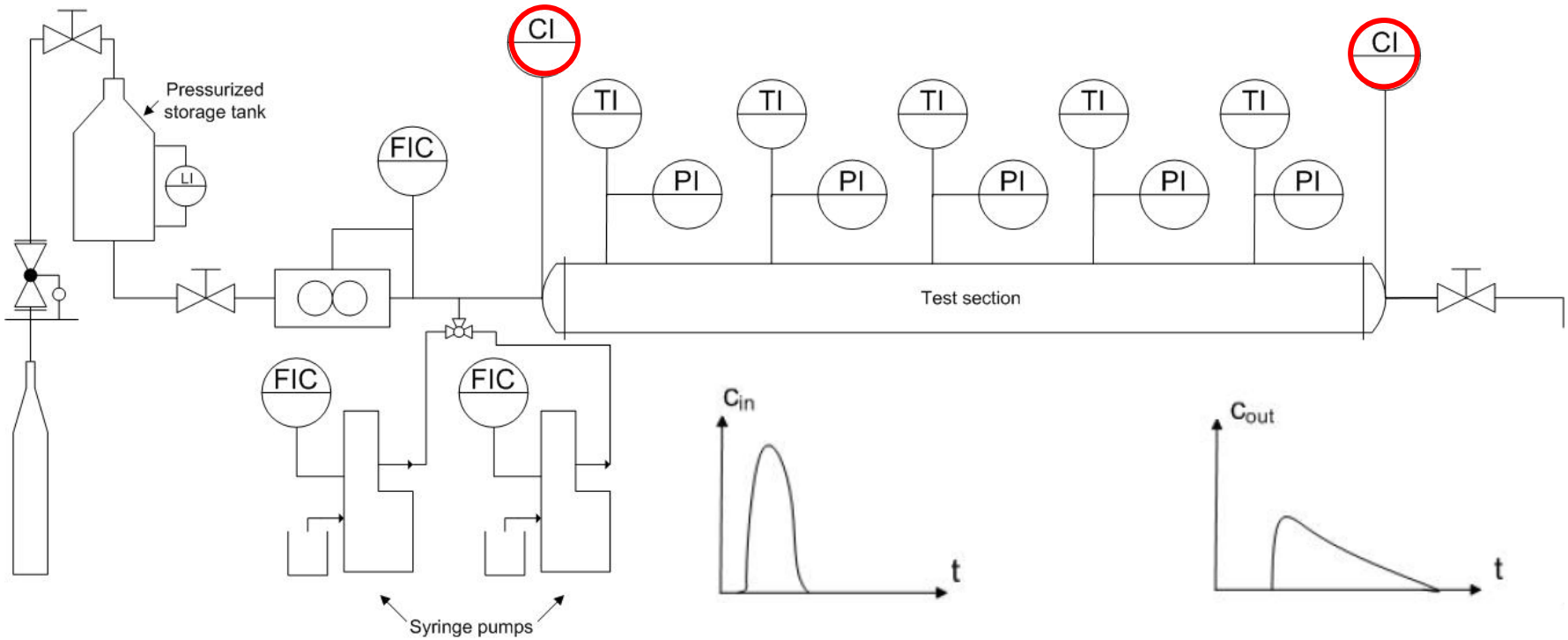
Verweilzeitverteilung: $E(t)$



Kumulative Verweilzeitverteilung: $F(t) = \int_0^t E(t)dt$

Verweilzeitverhalten des Reaktors

- Messtechnik: Konzentration eines KCl Tracers wurde vor und hinter dem Reaktor gemessen



Verweilzeitverhalten des Reaktors

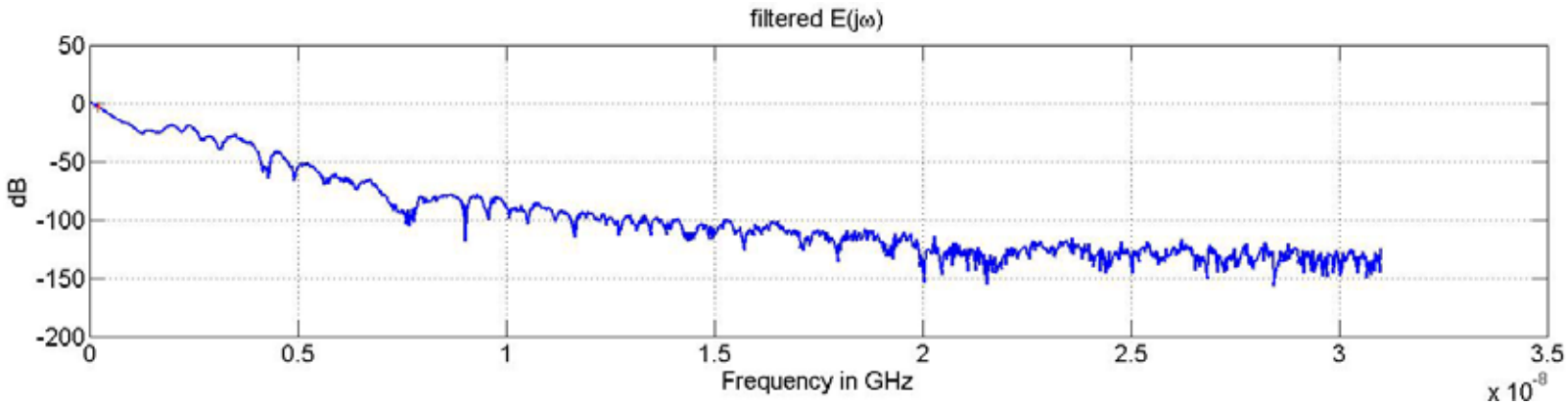
- Verweilzeitverteilung E(t): Deconvolution Methode

$$c_{out}(t) = \int_0^t c_{in}(t')E(t-t')dt'$$

$$c_{out}(t) = c_{in}(t) * E(t)$$

$$C_{out}(j\omega) = C_{in}(j\omega)E(j\omega)$$

$$E(j\omega) = \frac{C_{out}(j\omega)}{C_{in}(j\omega)} \quad F(j\omega) \rightarrow E(t)$$



Verweilzeitverhalten des Reaktors

- Axiales Dispersionsmodel

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial z} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

- Verweilzeitverteilung für ein offenes System

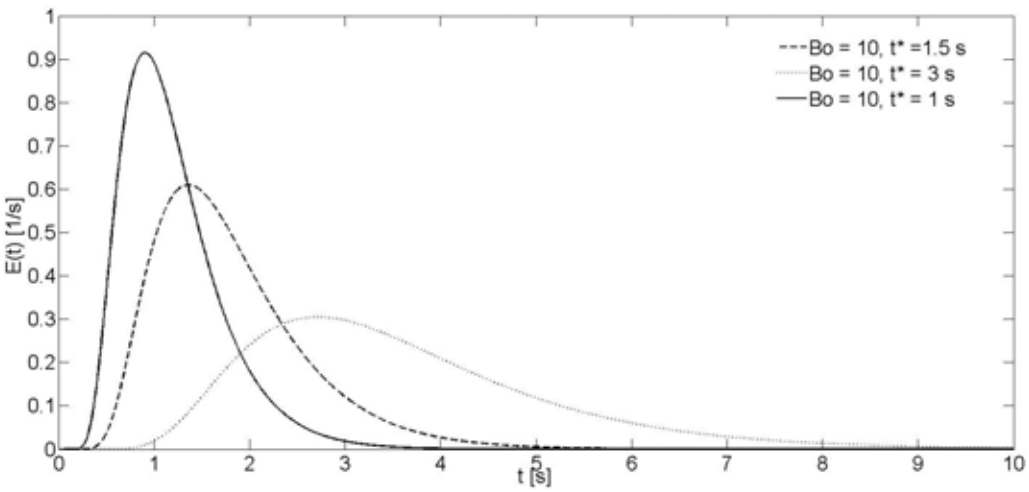
$$E(t) = \frac{1}{2\tau\sqrt{\frac{\pi}{Bo}\frac{t}{\tau}}} \cdot e^{\left(\frac{-Bo(1-\frac{t}{\tau})^2}{4\frac{t}{\tau}}\right)} \quad with\ Bo = \frac{uL}{D_L}\ and\ \tau$$

Hill C. G., J. (1977). An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor Design, John Wiley & Sons, Inc.

Verweilzeitverhalten des Reaktors

- Einfluss von Bo und τ auf Verweilzeitverteilung

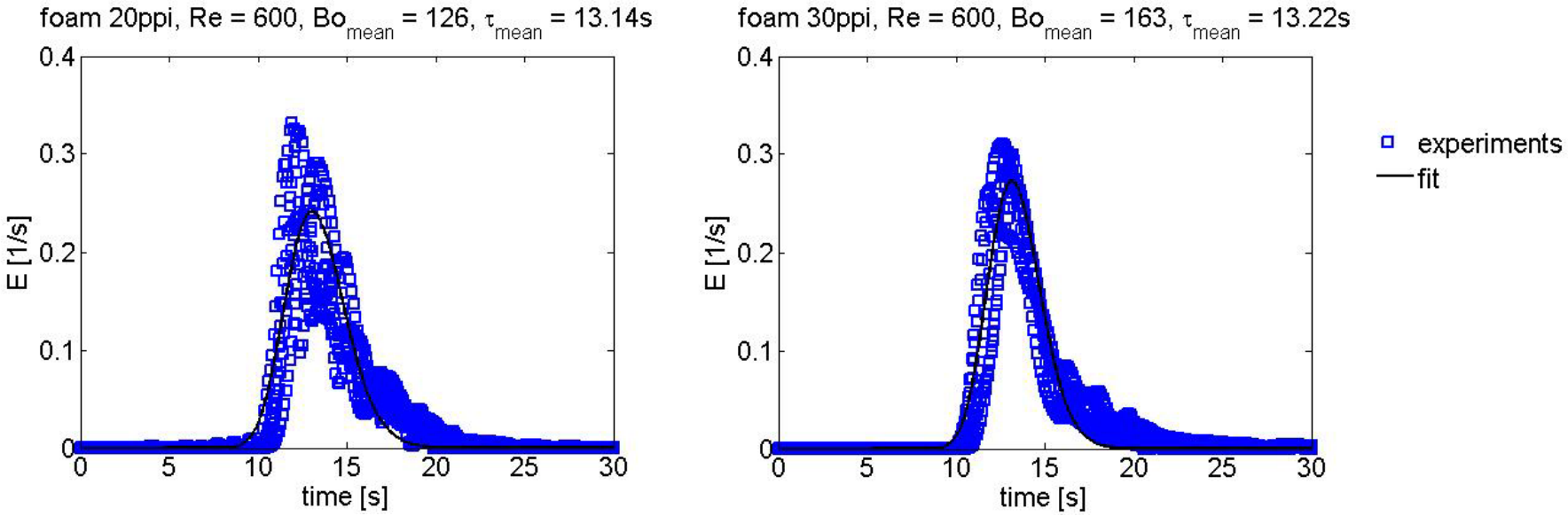
$$E(t) = \frac{1}{2\tau\sqrt{\frac{\pi}{Bo}\frac{t}{\tau}}} \cdot e^{\left(\frac{-Bo(1-\frac{t}{\tau})^2}{4\frac{t}{\tau}}\right)} \quad with\ Bo = \frac{uL}{D_L}$$



Verweilzeitverhalten des Reaktors

- Verweilzeitverteilung E(t): Resultate

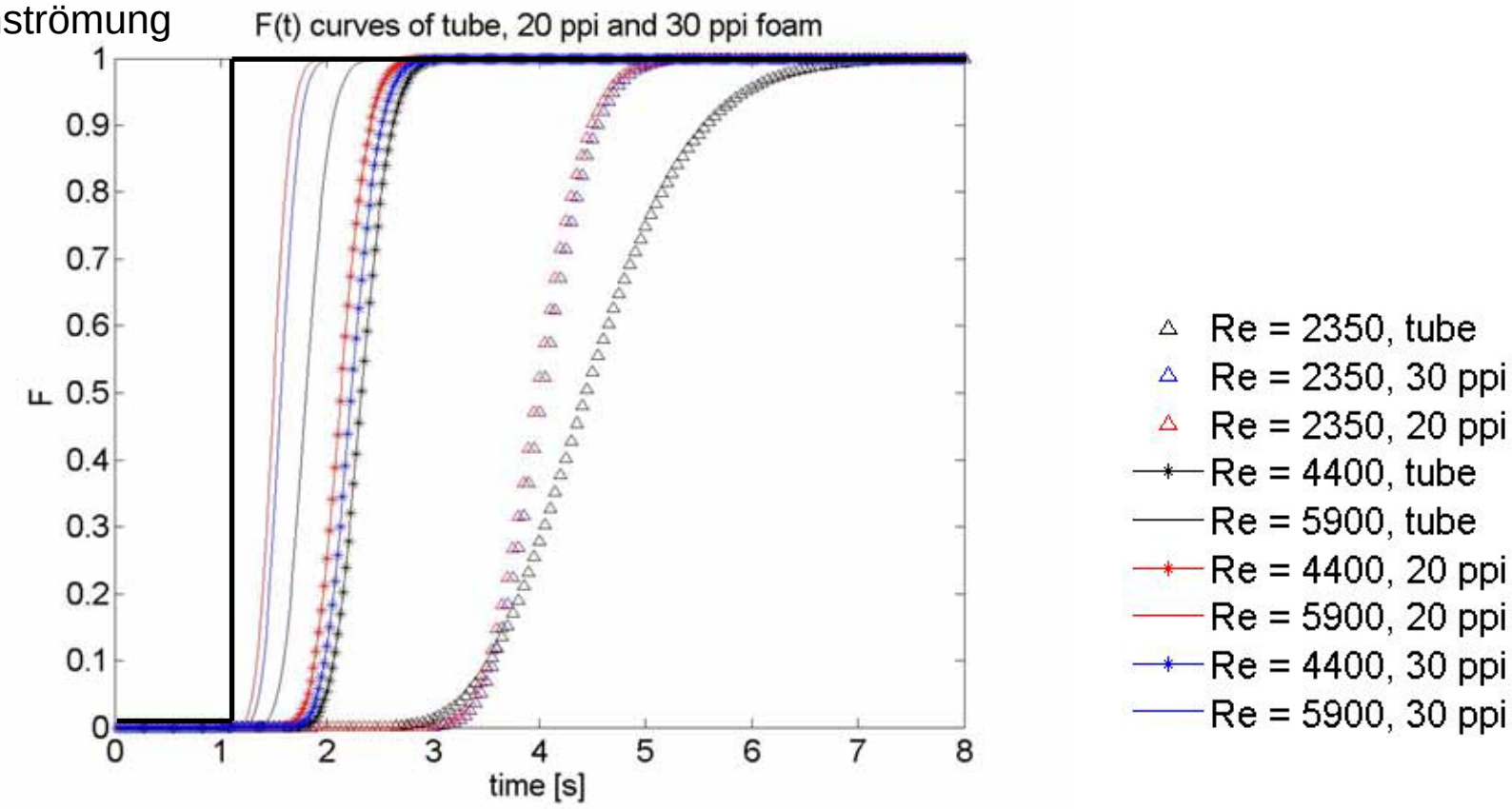
$$\mathrm{Re}_d = \frac{u_{empty\ tube} d}{\nu}$$



Verweilzeitverhalten des Reaktors

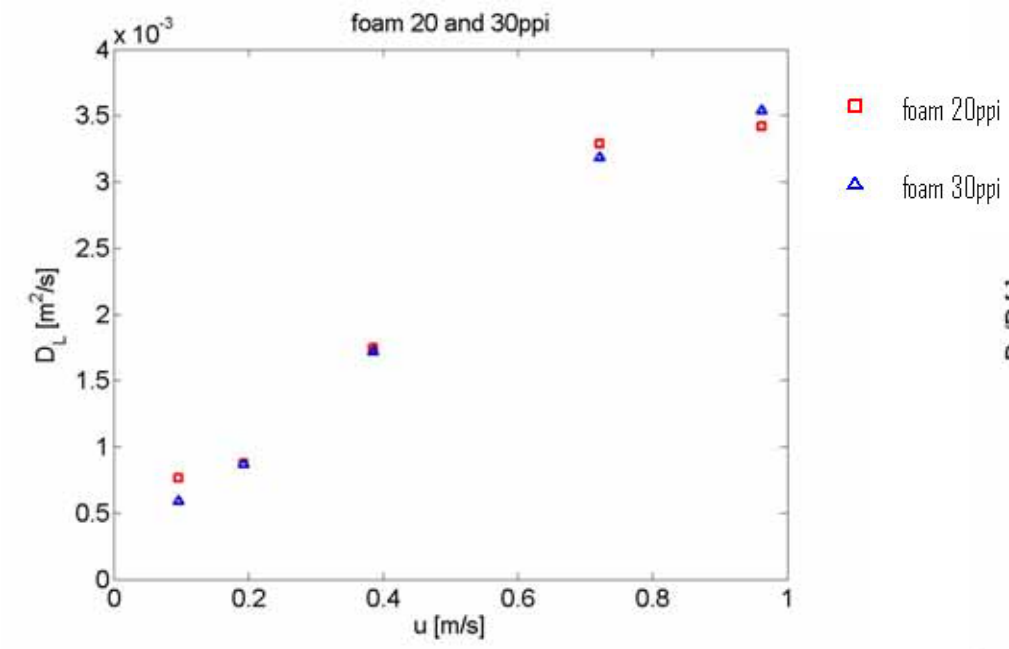
- Kumulative Verweilzeitverteilungen $F(t) = \int_0^t E(t)dt$

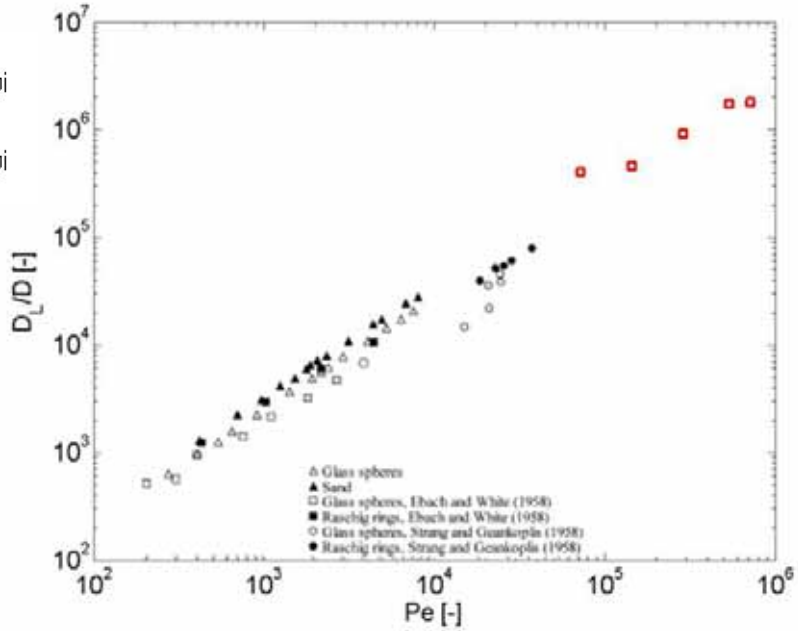
Propfenströmung



Verweilzeitverhalten des Reaktors

Axiale Dispersionskoeffizienten D_L aus $Pe = Bo = \frac{uL}{D_L}$

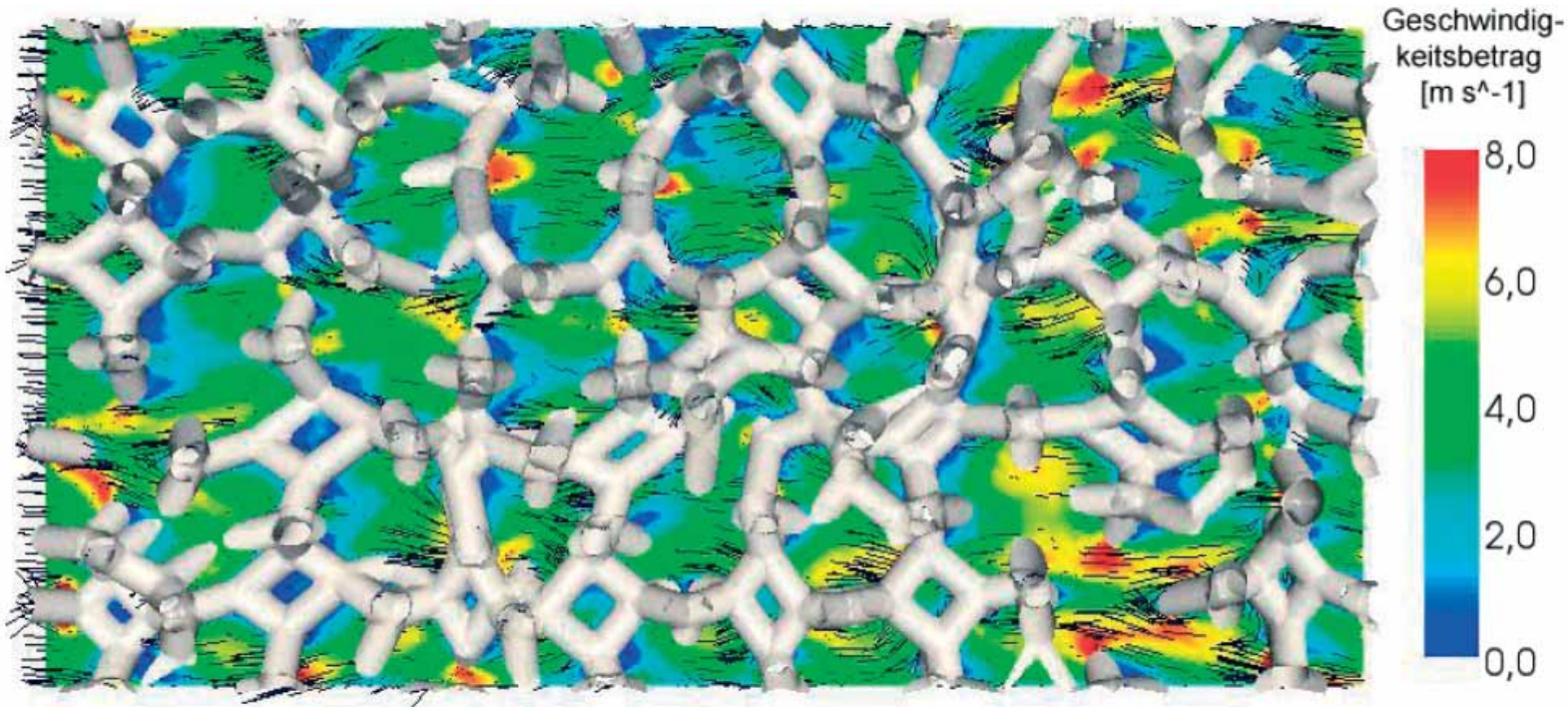




Delgado, J. (2006). "A critical review of dispersion in packed beds." Heat and Mass Transfer **42**(4): 279-310.

Strömung im Reaktor mittels Simulationen

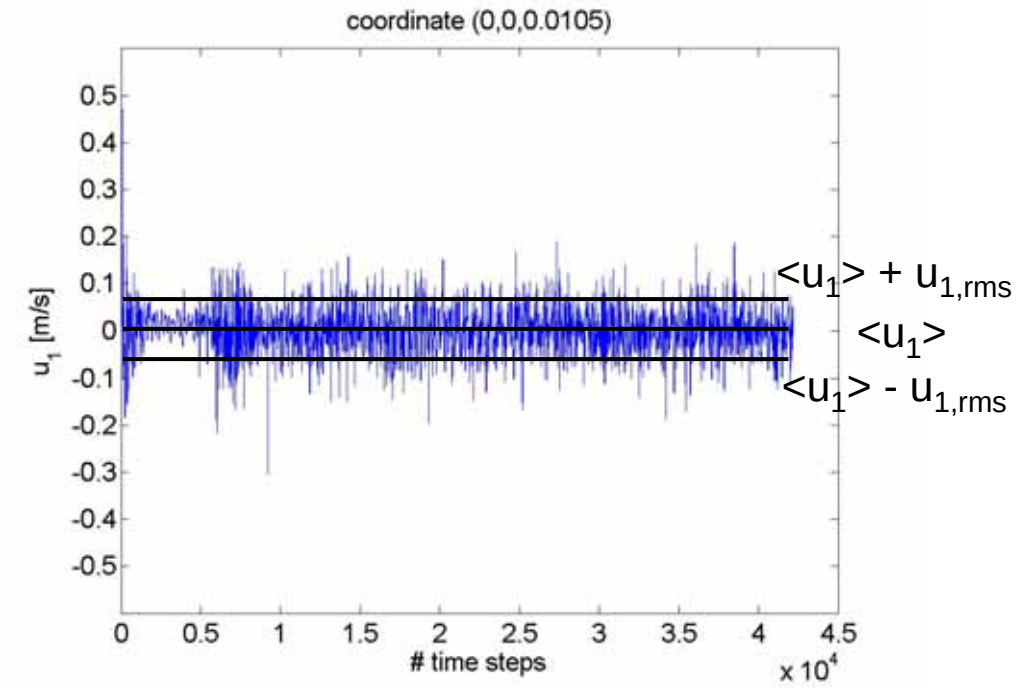
- Gleichungen für Masse- und Impulserhaltung (Geschwindigkeits-komponenten und Druck)



Peter Habisreuther, N. D., Nikolaos Zarzalis (2008). "Numerische Simulation der Mikroströmung in porösen inerten Strukturen." Chemie Ingenieur Technik **3**: 14.

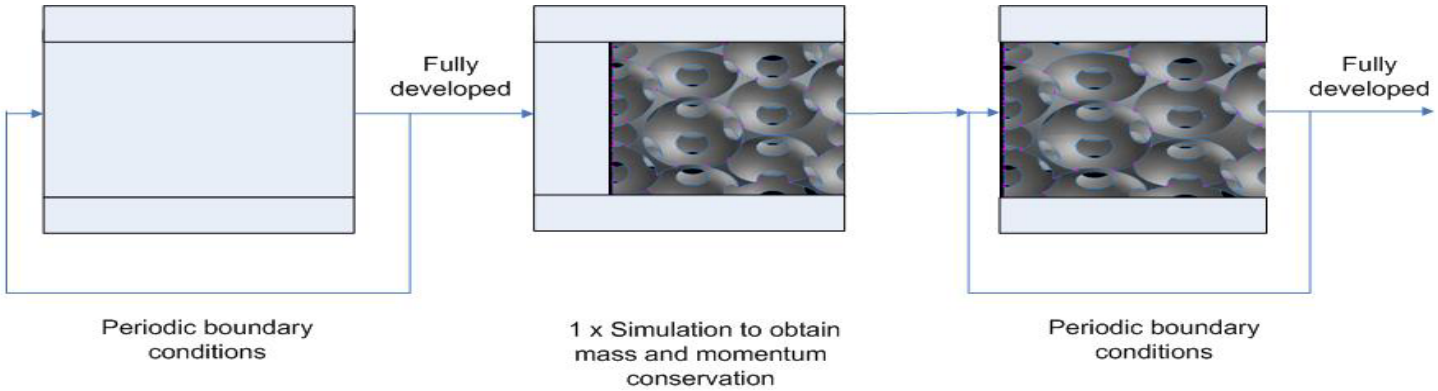
Strömung im Reaktor mittels Simulationen

- Turbulenz: - Geschwindigkeitsfeld ist 3d, zeitabhängig und chaotisch



- grosse Längen- und Zeitskalenunterschiede → **hohe Auflösung**

Strömung im Reaktor mittels Simulationen



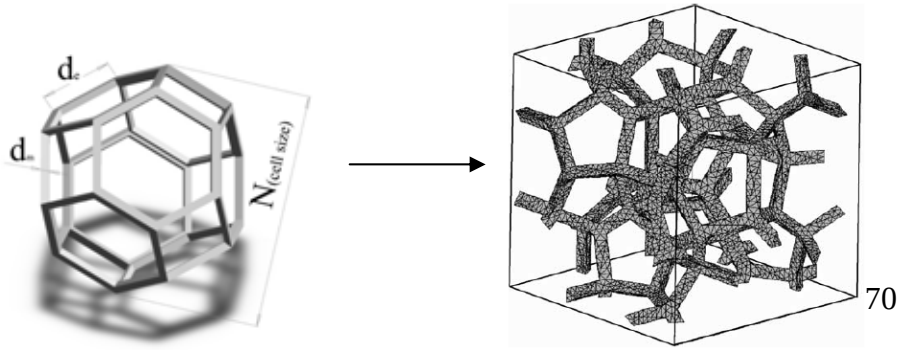
- Fluid: Wasser mit Stoffeigenschaften (20 C)

- Turbulenzmodell: LES (Large eddy simulation) löst Grobstrukturen direkt, modelliert Feinstrukturen

- System: - Fluent
  - 16 Computer parallel
  - Rechenzeit 5 Tage

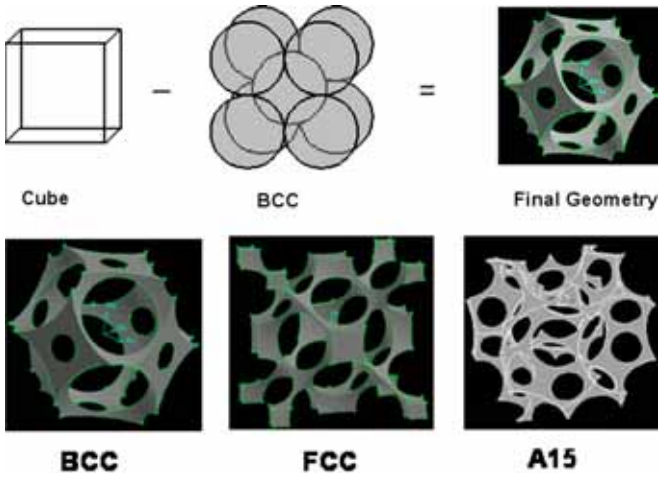
Strömung im Reaktor mittels Simulationen

- Boomsma 2003[1]



$$Re_{d_p} = 170$$

- Krishnan 2006[2]

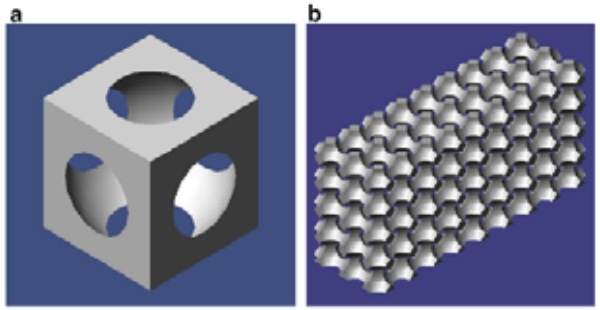


$$Re_{d_p} = 20$$

[1]Boomsma, K., D. Poulikakos, et al. (2003). "Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure." International Journal of Heat and Fluid Flow **24**(6): 825-834.
[2]Krishnan, S., J. Y. Murthy, et al. (2006). "Direct simulation of transport in open-cell metal foam." Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme **128**(8): 793-799.

Strömung im Reaktor mittels Simulationen

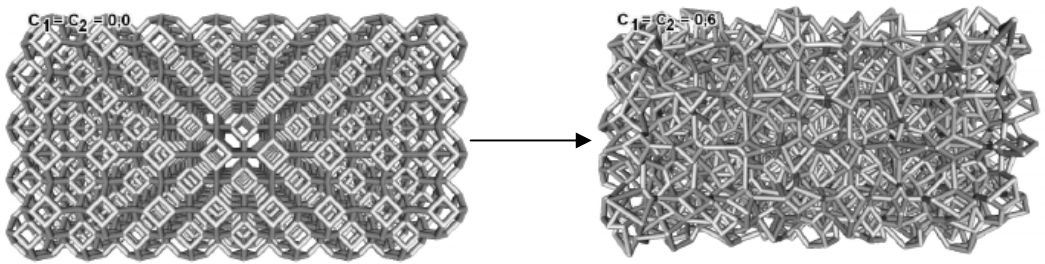
- Karimian 2008[1]



$$\mathrm{Re}_{d_p} = 40$$

$$\mathrm{Re}_{d_p} = 100$$

- Habisreuther 2008[2]

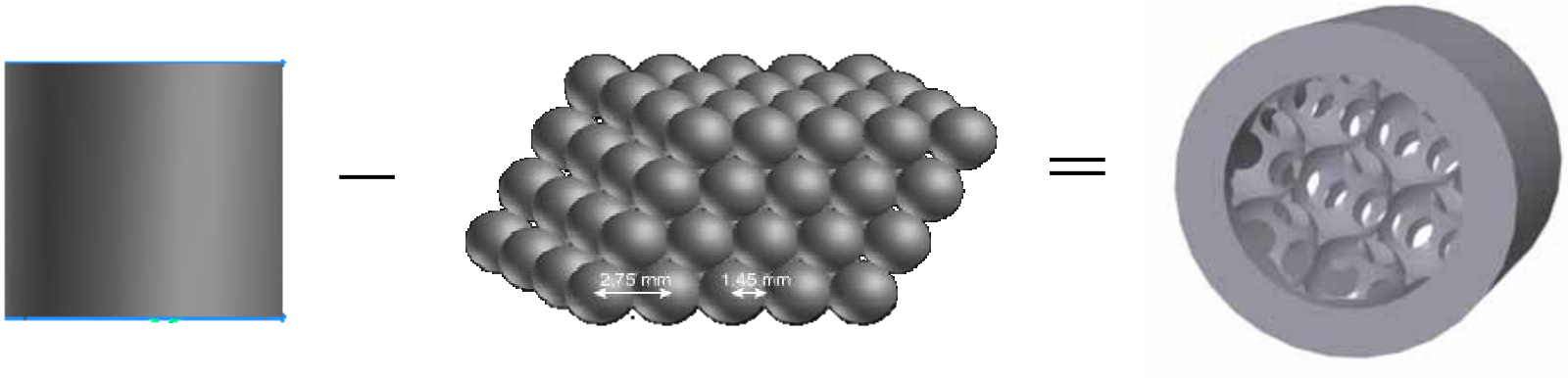


$$\mathrm{Re}_{d_p} = 500$$

[1]Karimian, S. A. M. and A. G. Straatman (2008). "CFD study of the hydraulic and thermal behavior of spherical-void-phase porous materials." International Journal of Heat and Fluid Flow **29**(1): 292-305.
[2]Peter Habisreuther, N. D., Nikolaos Zarzalis (2008). "Numerische Simulation der Mikroströmung in porösen inerten Strukturen." Chemie Ingenieur Technik **3**: 14.

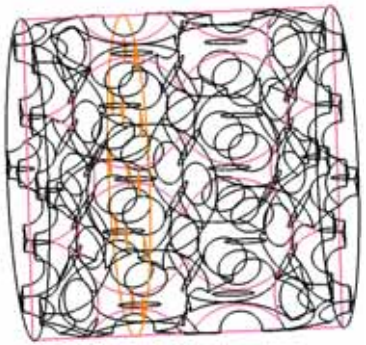
Strömung im Reaktor mittels Simulationen

- Verwendete Schaumgeometrie

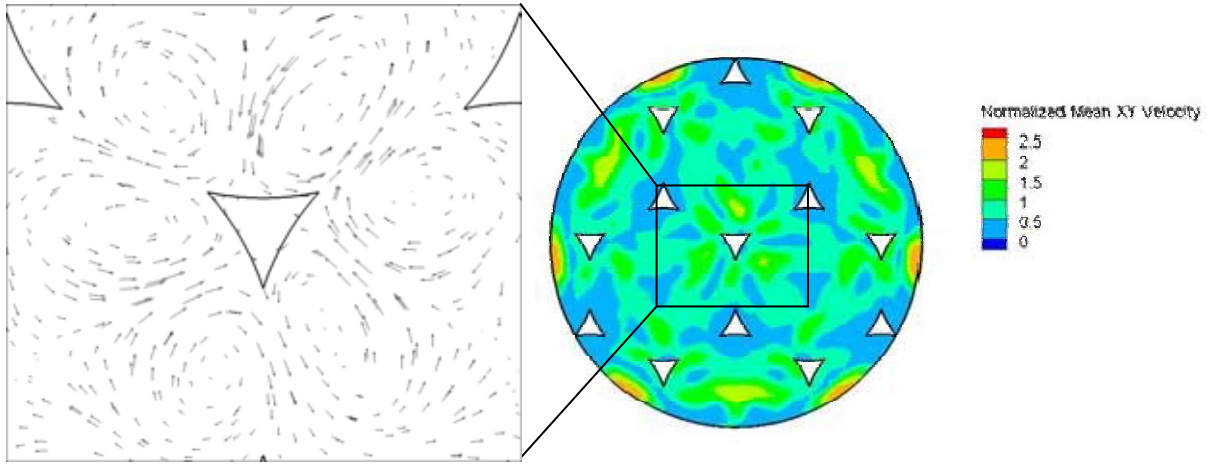


- Periodischer Schaum

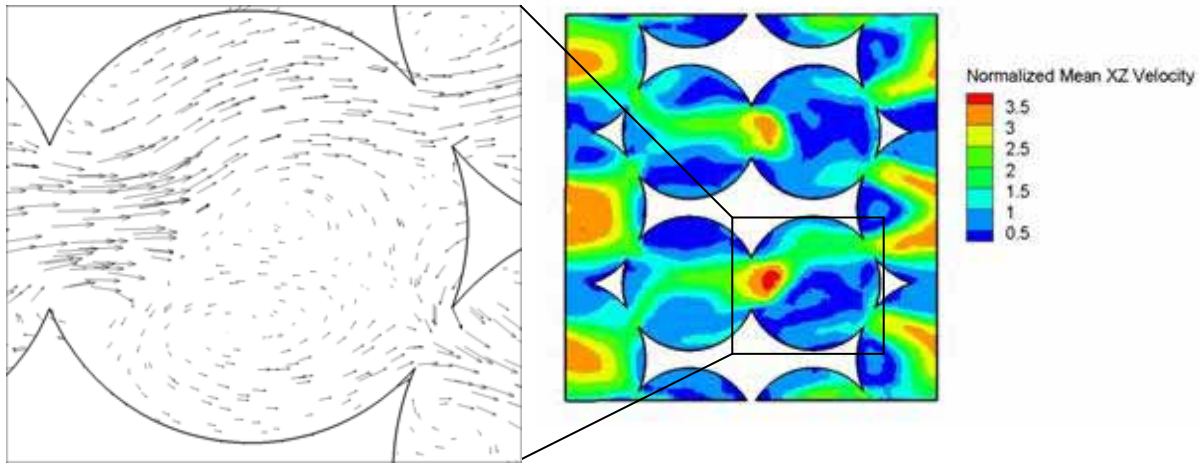
Strömung im Reaktor mittels Simulation



Schaum:



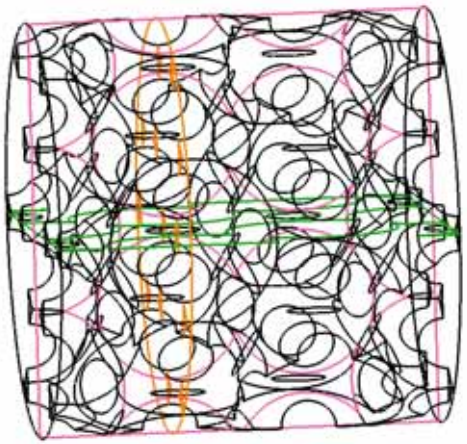
$$\frac{\sqrt{<u_1>^2 + <u_2>^2}}{u_{bulk}}$$

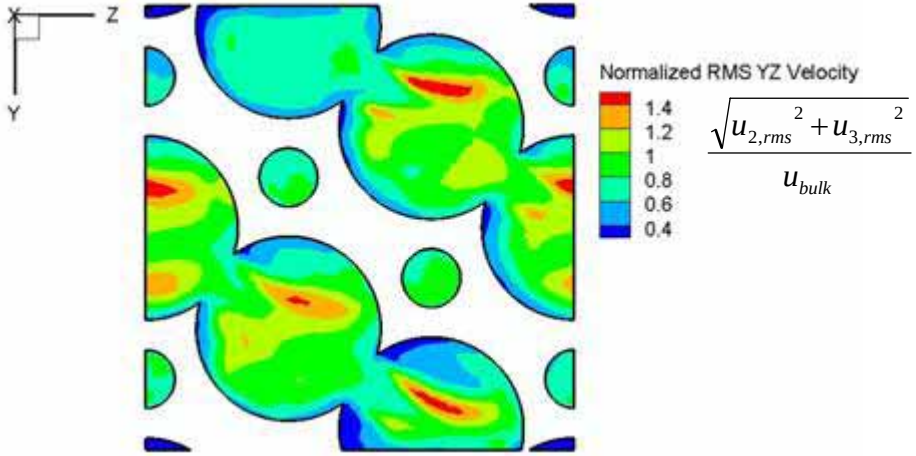


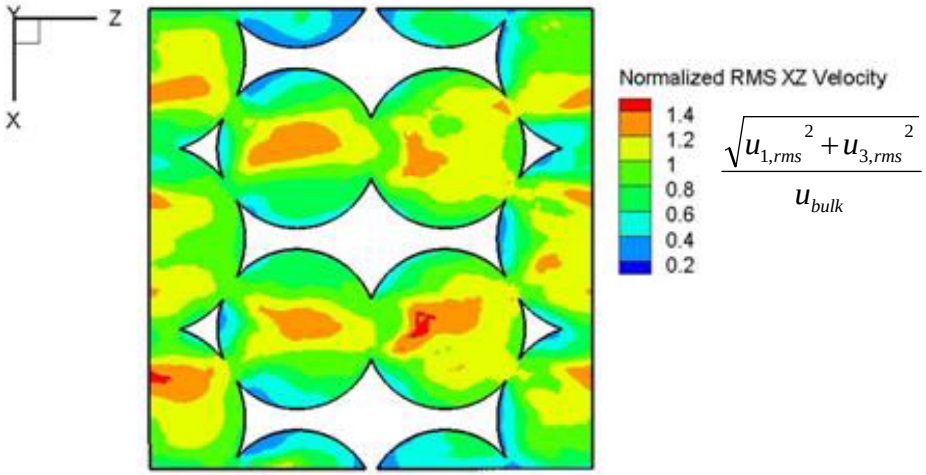
$$\frac{\sqrt{<u_1>^2 + <u_3>^2}}{u_{bulk}}$$

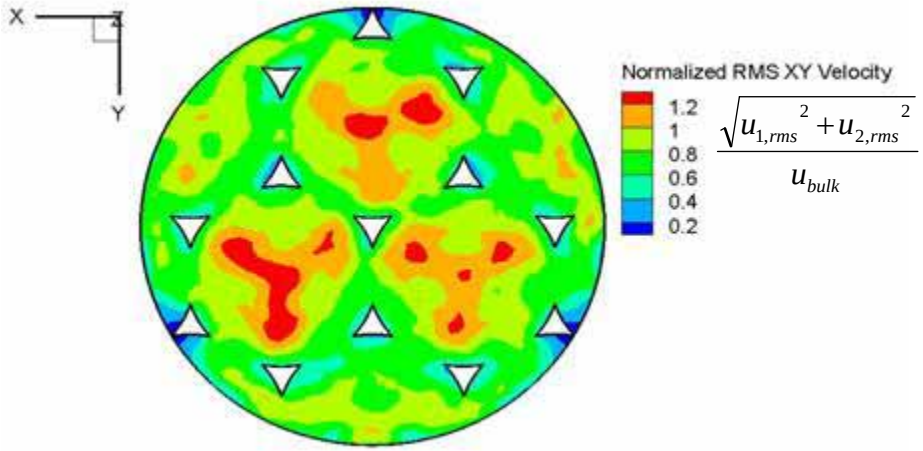
Strömung im Reaktor mittels Simulationen

Schaum:



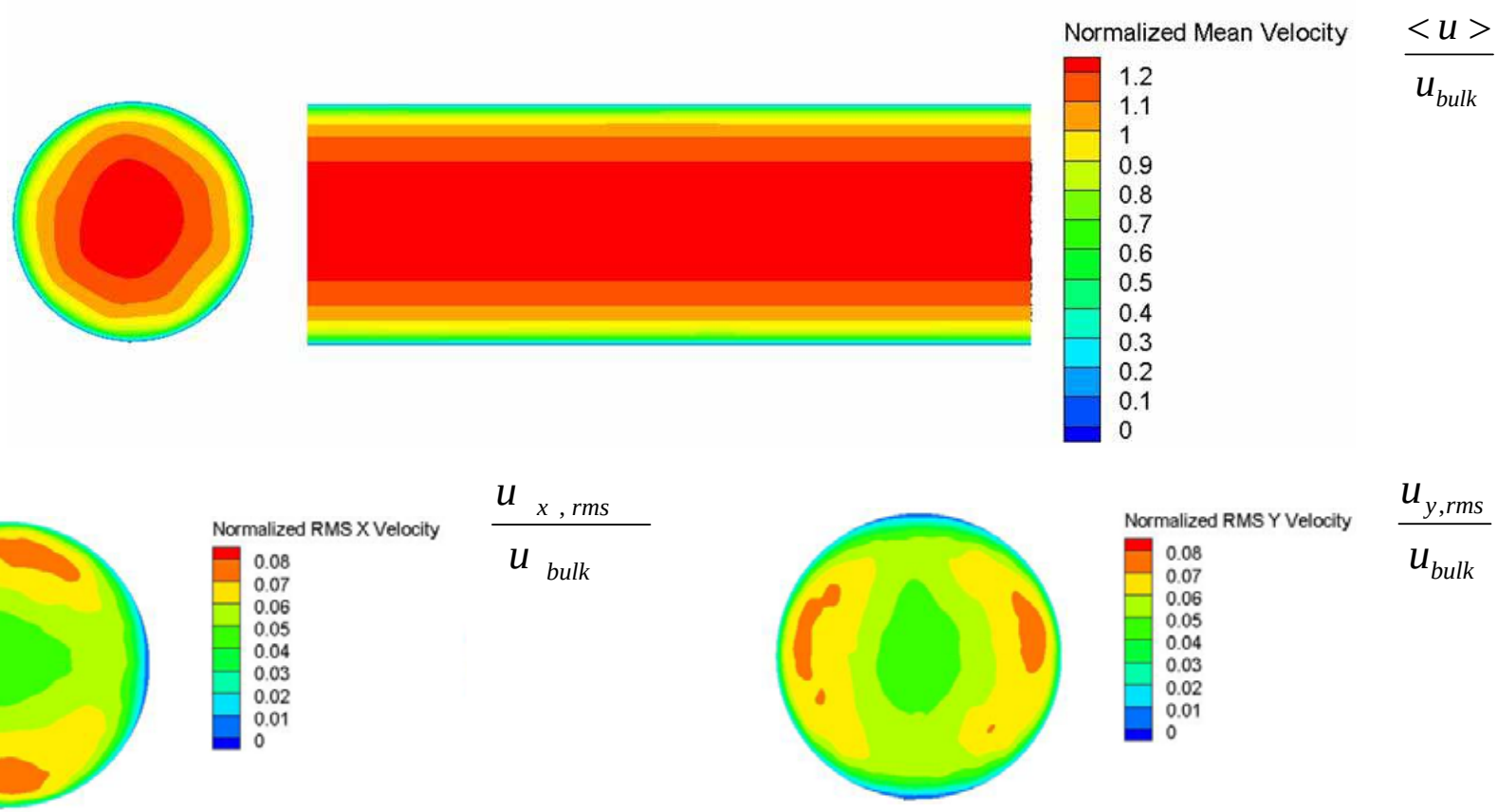






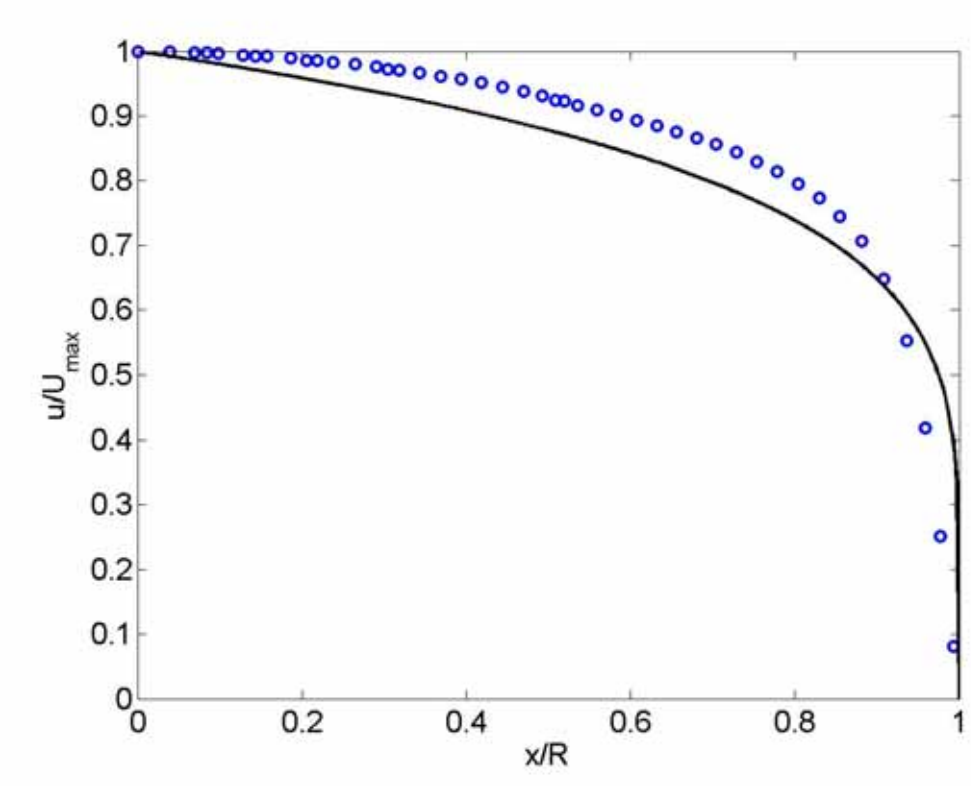
Strömung im Reaktor mittels Simulationen

Rohr:



Strömung im Reaktor mittels Simulationen

Rohr:



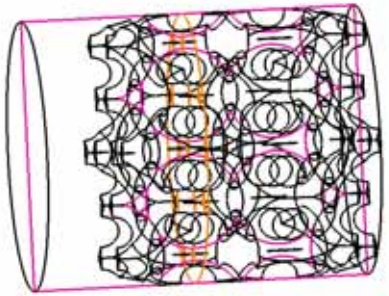
simulation
theoretical prediction

$$\left(\frac{\Delta p}{l}\right)_{sim} = 5'424\,\frac{Pa}{m}$$

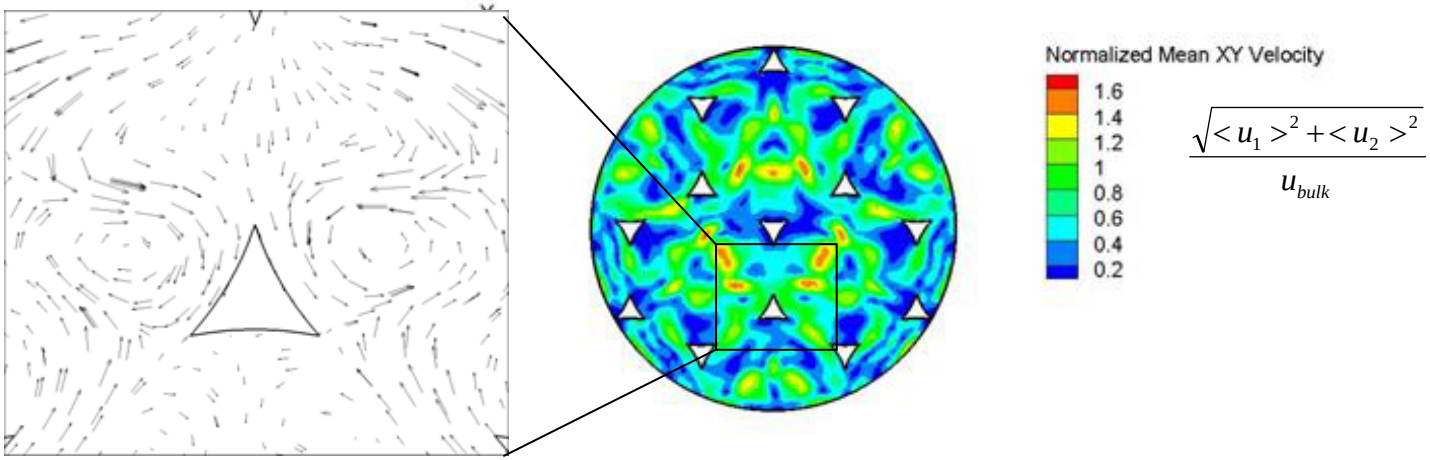
$$\left(\frac{\Delta p}{l}\right)_{theo} = 5'583\,\frac{Pa}{m}$$

Nikuradse, J. (1932). "Gesetzmaessigkeiten der turbulenten Stroemung in glatten Rohren." Forschungs- Arb. Ing.- Wesen **356.**

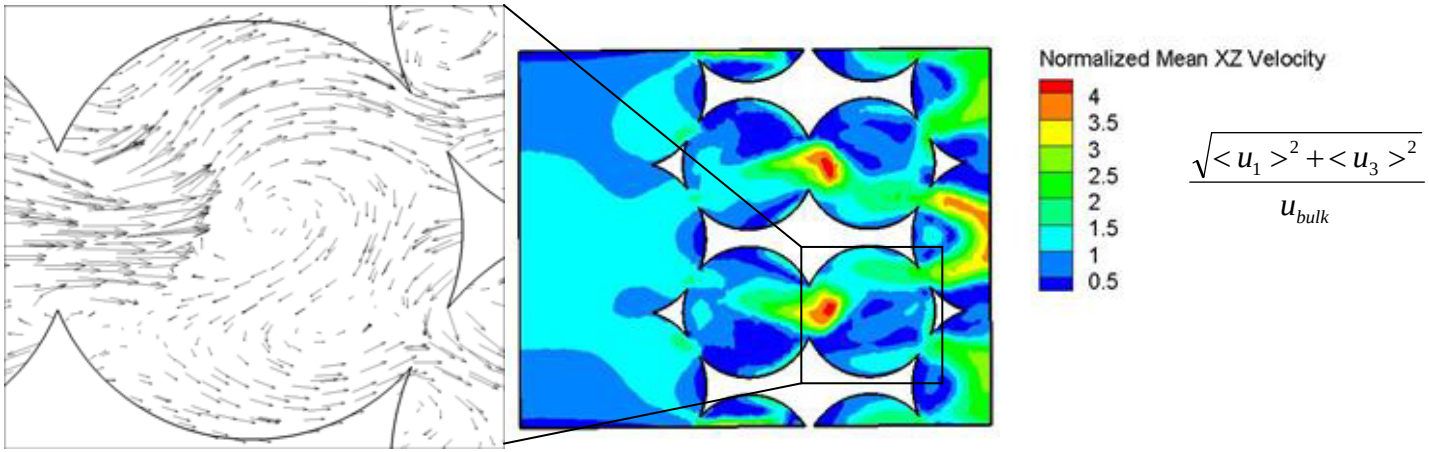
Strömung im Reaktor mittels Simulation



Zwischenstück:



$$\frac{\sqrt{<u_1>^2+<u_2>^2}}{u_{bulk}}$$



$$\frac{\sqrt{<u_1>^2+<u_3>^2}}{u_{bulk}}$$

Schlussfolgerungen

- Axiales Dispersionsmodel nähert gemessene Verweilzeitverteilungen gut an
- Verweilzeitverhalten von Schäumen zu anderen porösen Medien ist gleich
- Die Verweilzeitverteilung von laminare oder Übergangsrohrströmung wird durch eingesetzte Schaumelemente wesentlich verengt

- Simulation zeigt gute radiale Vermischung auf
- Turbulentes Regime bestätigt durch die Grössenordnung der RMS Werte
- Strömung in der Einlaufslänge ist ähnlich zur Strömung im entwickelten Fall
- Simulation dient als scaling tool

Vielen Dank für ihre

Aufmerksamkeit