

PIV-MESSUNGEN UM PORÖSE QUADER IN QUERSTRÖMUNGEN IM VERGLEICH MIT DEM DARCY-FORCHHEIMER MODELL

PIV MEASUREMENT FOR POROUS RECTANGULAR PRISM IN CROSSFLOW BY COMPARISON WITH THE DARCY-FORCHHEIMER MODEL

Norbert Riefler, Philipp Haselbach, Matthias Nickelt, Udo Fritsching

FB 4, Fachgebiet Mechanische Verfahrenstechnik

Badgasteiner Str. 3

28359 Bremen

email: riefler iwt.uni-bremen.de

PIV-Messung, Poröse Körper, Darcy-Forchheimer-Modell

Particle Image Velocimetry, Porous Media, Darcy-Forchheimer-Model

1 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die Veränderung von Querströmungen in einem Kanal aufgrund von nicht querschnittsfüllenden, porösen Körpern. Mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) werden die Strömungsverhältnisse gemessen und anhand von Geschwindigkeitsprofilen quantitativ charakterisiert. Andererseits lassen berechnete Geschwindigkeitsprofile aus CFD-Simulationen auf Basis einer Darcy-Forchheimer-Beschreibung der porösen Objekte den Vergleich zwischen Messung und dem zugrundeliegenden, theoretischen Modell zu.

2 Einleitung

Poröse Medien werden in vielen technischen Anwendungen eingesetzt wie beispielsweise als Filtermedien in der Prozessindustrie, als funktionale Membrane in Brennstoffzellen, oder als Isolationsmedium in Brennern von Gas-Turbinen. Um solche technischen Applikationen zu verbessern, bedarf es der Kenntnis eines Modells, um den jeweiligen porösen Körper adäquat beschreiben zu können. Der grundlegende Zusammenhang zwischen dem Druckabfall Δp und dem das poröse Medium mit einer mittleren Geschwindigkeit \vec{v} durchströmende Fluid wird mittels des Darcy-Gesetzes ausgedrückt:

$$\nabla p = -\frac{\eta}{K} \vec{v} \quad (1)$$

Der Druckabfall ist abhängig von der Viskosität des Fluids η sowie der Permeabilität des porösen Körpers K . Auf dem Darcy-Gesetz (1) basieren Anwendungen, die speziell auf die Geometrie des Problems zugeschnitten sind wie etwa die Carman-Kozeny-Gleichung für den Druckverlust bei der Durchströmung einer porösen Schüttung. Die Gültigkeit des Darcy-Zusammenhangs ist beschränkt auf Strömungen, bei denen die Reynolds-Zahl für

Porositäten, $Re_p = \vec{v}D_p/\nu$ mit der volumengemittelten Geschwindigkeit \vec{v} dem mittleren Porendurchmesser D_p und der kinematischen Viskosität der Fluids ν , kleiner ist als 3, $Re_p < 3$. Eine Erweiterung auf Strömungen bei höherer Reynolds-Zahlen fand das Darcy-Gesetz durch Forchheimer (1901). Hassanizadeh und Gray (1987) fanden das Einsetzen des nicht-linearen Verhaltens a $Re_p > 10$ b, die mit dem Darcy-Forchheimer-Ansatz (manchmal auch als Dupuit-Darcy-Gleichung bezeichnet) beschrieben werden kann (siehe auch Nield und Bejan (2006)):

$$\Delta p = -\frac{\eta}{K}\vec{v} - \rho\frac{c_F}{\sqrt{K}}|\vec{v}|\vec{v} \quad (2)$$

mit einem Formwiderstands-Koeffizienten c_F , dem sogenannten Forchheimer-Koeffizient. Auch für diese Beschreibung des Druckabfalls gibt es eine speziell auf Schüttungen angepasste Anwendung, die Ergun-Gleichung (siehe Ergun (1952)).

In experimentellen Untersuchungen wird die lokale Strömung oft nicht-invasiv gemessen mittels laserbasierter Messtechniken. So erlaubt beispielsweise die Laser-Doppler-Anemometrie die Messung der Strömungsgeschwindigkeit an einer Position, wobei dafür Tracer-Partikel benötigt werden. 2D- oder 3D-Messungen werden häufig mittels Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt (siehe u.a. Adrian (1991); Westerweel (1993); Raffel u. a. (2007)). Diese Technik wird z.B. dazu verwendet, um Strömungen in der Gegenwart von Hindernissen zu charakterisieren. Aufgrund der hier in dieser Arbeit vorgestellten speziellen Geometrie eines Strömungskanals sei die Arbeit von Agelinachaab und Tachie (2008) angeführt, in der Strömungsmessungen an quadratischen, rechteckigen sowie halbkreisförmigen Hindernissen in einem offenen Kanal untersucht wurden.

Eine frühe Arbeit mittels PIV-Messungen in der Gegenwart von porösen Schichten wurde von Saleh u. a. (1993) durchgeführt. Dabei wurden die voll entwickelte, laminare Strömung entlang eines flachen, porösen Mediums gemessen und mit dem Ergebnis basierend auf einem Darcy-Brinkmann-Modell verglichen.

3 Experimenteller Aufbau

Zur Durchführung der Experimente wurde ein Strömungskanal aus Acrylglas verwendet. Die Geometrie wurde entsprechend der Abhandlung in Tavoularis (2005) entworfen und ist in Abbildung 1 zu sehen. Weitere wertvolle Design-Hinweise können der Arbeit von Günther und v. Rohr (2003) entnommen werden. Zur Erzeugung wohldefinierter Strömungsverhältnisse insbesondere bei Strömungen mit einer Reynoldszahl deutlich oberhalb der kritischen Reynoldszahl von $Re > 2300$ ist der Kanal mit einem Kontraktor vor dem Eingang sowie einem Diffusor am Ausgang ausgestattet.

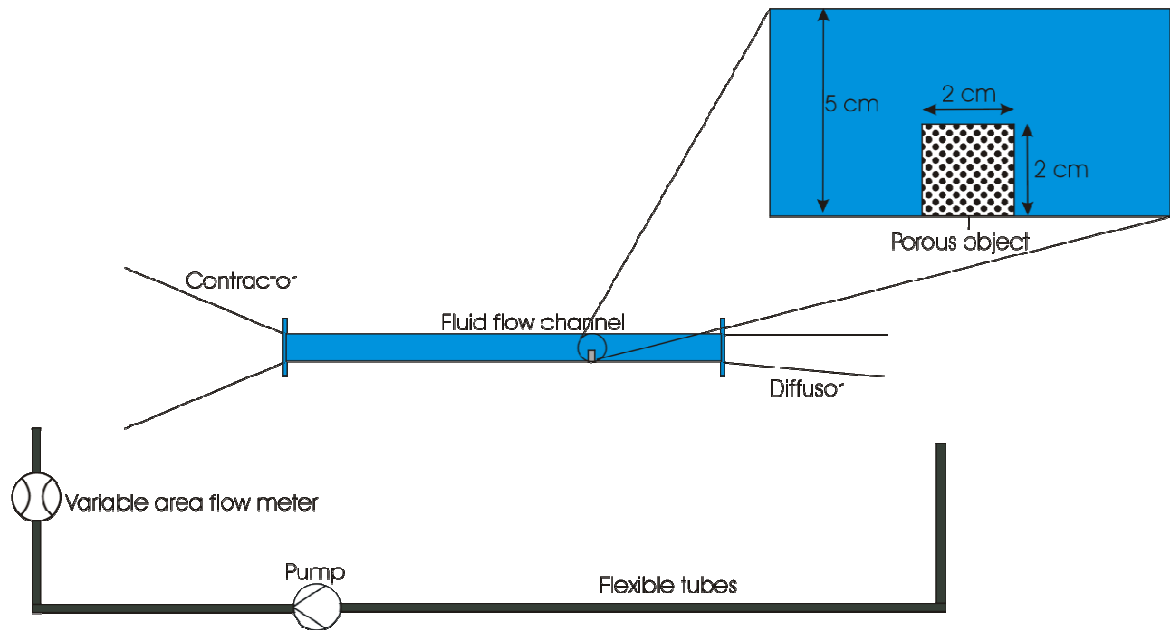


Abbildung 1: Darstellung des Strömungskanals; die Strömungsgeschwindigkeit wird mittels einer Bypass-Leitung (nicht dargestellt) samt darin befindliches Ventil eingestellt; in dem skizzierten Ausschnitt sind die geometrischen Verhältnisse um den porösen Körper dargestellt.

Für den Strömungskanal mit quadratischem Querschnitt von $D_q = 5 \text{ cm}$ ergibt sich für $Re > 2300$ eine kritische Strömungsgeschwindigkeit von $v = 4.6 \text{ cm/s}$. Der in dieser Arbeit verwendete Volumenstrom von $Q=20 \text{ l/min}$, gemessen mit einem Durchflussmesser (KSM-1010MF, Kobold Messring GmbH), führt zu einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v=13.3 \text{ cm/s}$. Die Strömung wurde mit einem PIV-System (Dantec Dynamics) gemessen. Zwei triggerbare Kavitäten mit je einem Nd:YAG-Pulslaser (Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$, Pulslänge 5 ns , Pulsenergie bis zu 200 mJ) beleuchteten per Lichtschnittoptik mittig entlang des Kanals im Abstand von 3 ms die Tracer-Partikel (Zirkoniumdioxid, $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$). Das gestreute Licht wird senkrecht zum Lichtschnitt mittels einer CCD-Kamera (Pixelauflösung 2048×2048) detektiert. Der Bildausschnitt der CCD-Kamera umfasste einen Bereich von ca. $4.8 \times 4.8 \text{ cm}^2$ des Strömungskanals, d.h. sowohl der obere Deckel als auch der Boden des Kanals werden ausgeblendet, um eventuelle Streulicht-Störungen aufgrund an den Acrylglasswänden anhaftende Partikel zu vermeiden. Um den Strömungsverlauf in einem Bereich von etwa $5\text{-}8 \text{ cm}$ vor sowie ca. 20 cm hinter dem porösen Objekt untersuchen zu können, wurden die seitlich zum Kanal befindliche Kamera und die Lichtschnittoptik oberhalb des Kanals auf einem Lineartisch befestigt, so dass ein weiter Bereich entlang des Strömungskanals abgefahren werden kann verbunden mit aneinander gereihten Ausschnitten. Der Überlappungsbereich zwischen den etwa $6 - 8$ verschiedenen Kanal-Ausschnitten beträgt ca. $0,7 \text{ cm}$. Die Auswertung erfolgt für jeden Bildausschnitt mittels dem unter der GNU GPL stehenden MatPIV. PIV-Toolbox für Matlab (siehe Svenn (2004)). Nach der Ermittlung eines Hintergrundbildes wurden diese von den gemessenen Doppelbildern abgezogen. Die Ermittlung der Kreuzkorrelation für jedes Interrogation-Window (128×128 Pixel) ergibt dann das Geschwindigkeitsfeld für jede Messung. Das Postprocessing besteht im Aussortieren der ermittelten Geschwindigkeits-Vektoren zum Einen entsprechend dem Signal-Rausch-Verhältnis der Geschwindigkeitsbeträge und zum Anderen nach berschreiten des Medians bzgl. der Standardabweichung.

4 Ergebnisse

Untersucht wurde zuerst ein offenporiger Schaumstoff mit der Bezeichnung Basotect G (BASF). Die Permeabilität des Basotect-Schaumstoffes wurde mit einem Porengrößen-Messgerät Topas PSM 165 (Topas GmbH) anhand von Dry-Flow-Messungen ermittelt¹. Diese Messungen liefern den aufgewendeten Druck gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit. Unter Einbeziehung des idealen Gasgesetzes bei der Bestimmung der Viskosität des verwendeten Gases (Luft) bei unterschiedlichen Drücken kann die Permeabilität K mittels des Darcy-Ansatzes bzw. der Permeabilität K zusammen mit dem Forchheimer-Koeffizienten c_F ermittelt werden. Als Resultat aus einer Messreihe, wobei nur der Darcy-Ansatz verwendet wurde, ergab sich eine mittlere Permeabilität von $K = 1.19 \pm 0.25 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. Der Forchheimer-Koeffizient wurde anhand zweier Einzelmessungen bestimmt zu $c_F = 1.58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Eine mittels der obigen Prozedur gewonnene Messung für Basotect ist in Abb. 2 dargestellt. Anhand der Geschwindigkeitsverteilung bzw. der hohen Umströmungsgeschwindigkeit um den Körper sowie an den niedrigen Geschwindigkeiten hinter dem Körper läßt sich erkennen, dass trotz der recht großen Permeabilität (verglichen mit vielen technischen Keramiken) in diesem Fall wenig Fluid durch den Körper dringt.

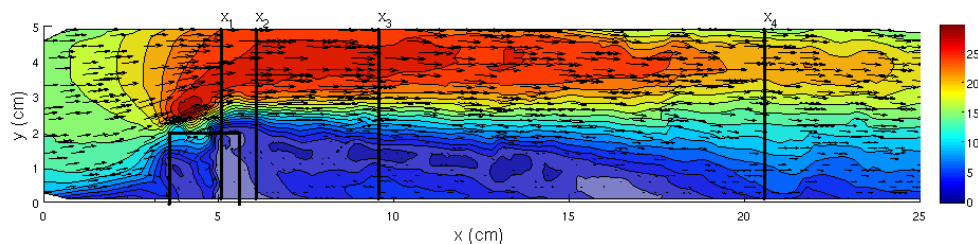


Abbildung 2: Mittels PIV gemessene Querströmung mit Basotect als porösen Körper; die mit x_1, \dots, x_4 bezeichneten Striche deuten die Stellen der weiter unten (Abb. 3 ff.) ausgewerteten geschwindigkeitsprofile an; die Strömungsbereiche innerhalb des Quaders sind interpolierte Werte, die den wahren Strömungsverlauf nicht widerspiegeln, jedoch als Näherungswerte gelten können.

Für einen quantitativen Vergleich mit Simulationsrechnungen werden Strömungsprofile an den in Abb. 2 dargestellten Stellen, die sich auf die Rückseite in Strömungsrichtung des porösen Körpers beziehen, erstellt. Dabei wurden die oben erwähnten Werte für die Permeabilität bzw. für den Forchheimer-Koeffizienten verwendet. Die daraus resultierenden simulierten Strömungsprofile können mit den gemessenen in Abbildung 3 verglichen werden.

¹ Siehe Abschnitt 6 „Dankesworte“

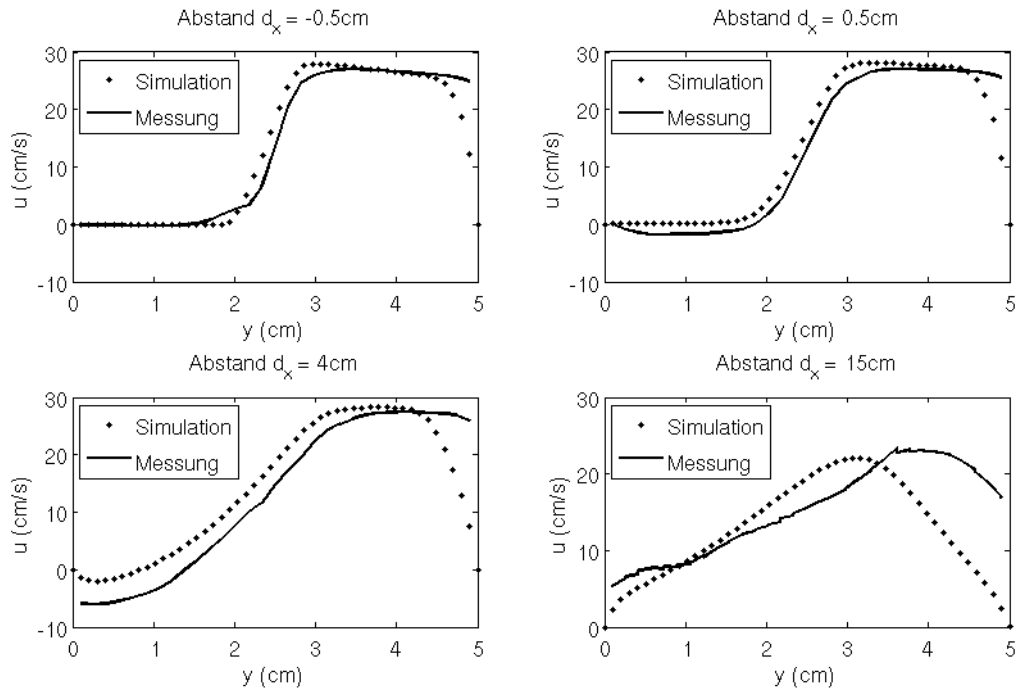


Abbildung 3: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile für den Basotect-Schaumstoff aus der Messung sowie aus der Simulation mit einer verwendeten Permeabilität von $K = 1.19 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$

Der Vergleich zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung. Im Bereich des oberen Kanalrandes weichen Messung und Simulation, insbesondere hinter dem porösen Körper, deutlich voneinander ab, was aber nicht auf das Permeabilitätsmodell zurückgeführt werden kann. Um den Einfluss verschiedener poröser Objekte auf die Strömung zu untersuchen, wurde eine weitere Simulation mit veränderter Permeabilität durchgeführt. Die sich bei einer Verdoppelung der Permeabilität ergebenden Strömungsprofile sind in Abbildung 4 dargestellt.

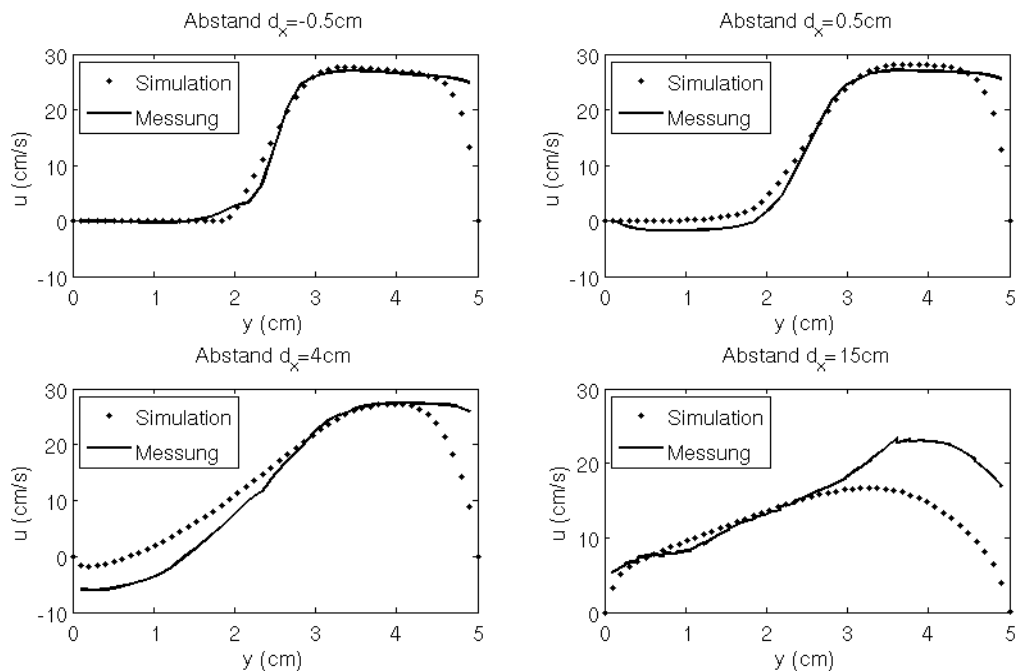


Abbildung 4: Siehe Abb. 3, allerdings mit einer doppelt so hohen Permeabilität von $K = 2.38 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$.

Hier schmiegen sich die Strömungsprofile aus der Simulation und der Messung in der Nähe des Körpers sehr gut an. Allerdings sind die Profile hinter dem Körper wiederum sehr unterschiedlich. Um die für diese Unterschiede zugrundeliegenden Ursachen herauszufinden, wurde eine weitere Messung Simulationsreihe durchgeführt an einer hochporösen, zellulären Keramik, siehe Barg u. a. (2008). Die aus sieben Einzelmessungen zusammengesetzte Strömung ist in Abbildung 5 dargestellt.

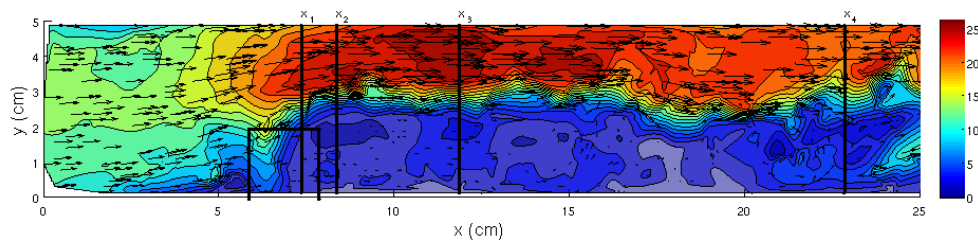


Abbildung 5: Gemessene Querströmung an einer makroporösen Keramik; die über mehr als hundert Einzelmessungen gemittelte Strömung zeigt im unteren Bereich des Strömungskanals ($y < 2.5$ cm) ein uneinheitliches Strömungsbild.

Die Momentaufnahme der Strömungsverteilung zeigt eine ausgeprägte Wirbelbildung in der Scherschicht im Nachlauf des Körpers. Dieses Phänomen wird bei den hier durchgeführten, stationären Simulationen nicht auftreten, weshalb beim Vergleich der Strömungsprofile immer gemittelte PIV-Messungen verwendet werden. Die Durchströmung des Körpers ist deutlich höher als für den porösen Schaumstoff Basotect, was bei gemittelter Betrachtung (126 Messungen) zu einem Ausbleiben der in Abbildung 5 zu sehenden Wirbel hinter dem Körper führt. Die Existenz zweier Hauptströmungsbereiche verzögert ausserdem die Ausbildung eines normalen Strömungsprofils, so dass im oberen Bereich des Strömungskanals deutlich höhere Geschwindigkeiten als im unteren vorzufinden sind.

5 Schlußfolgerungen

Ansatzpunkt der Untersuchung ist, dass poröse Körper mit verschiedener Permeabilitäten die Strömungsverhältnisse – insbesondere bei stark differierender Permeabilitäten – in jeweils voneinander unterscheidbarer Weise verändern. Um diese Auswirkung genauer zu verstehen, wurden für einen Vergleich mit den PIV-Messwerten Simulationen mit einem CFD-Programm (OpenFoam) mit verschiedenen Permeabilitäten durchgeführt. Dabei wurden zur Charakterisierung der porösen Objekte zuerst Permeabilitätswerte verwendet, die aus Messungen mittels eines Gas-Permeameters erzielt wurden. Modellansatz war die integrale Methode nach Darcy und Forchheimer.

6 Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei Nicolas Fries und Malte Meistering, Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM), Universität Bremen, für die freundliche Unterstützung bei der Permeabilitätsbestimmung des Basotect-Schaumstoffes. Diese Arbeit

wurde gefördert durch die DFG innerhalb des Graduiertenkollegs 1375 „Nichtmetallische poröse Strukturen für physikalisch-chemische Funktionen – PoreNet“.

Literatur

- Adrian, R. J., 1991: "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", In: *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23 (1991), pp. 261–304
- Agelinachaab, M.; Tachie, M. F., 2008: "PIV Study of Separated and Reattached Open Channel Flow Over Surface Mounted Blocks", In: *J. Fluids Eng.* 130 (2008), pp. 061206–1–9
- Barg, S.; SOLTMANN, C. ; ANDRADE, M. ; KOCH, D. ; GRATHWOHL, G., 2008: "Cellular Ceramics by Direct Foaming of Emulsified Ceramic Powder Suspensions", In: *J. Am. Ceram. Soc.* 91 (2008), pp. 2823–2829
- Ergun, S., 1952: "Fluid flow through packed columns", In: *Chem. Eng. Prog.* 48 (1952), pp. 89–94
- Forchheimer, P., 1901: „Wasserbewegung durch Boden“, In: *Z. Ver. Deutsch. Ing.* 45 (1901), pp. 1782–1788
- Günther, A. ; Rohr, P. R. v. 2003: "Large-scale structures in a developed flow over a wavy wall", In: *J. Fluid Mech.* 478 (2003), pp. 257–285
- Hassanizadeh, S. M.; Gray, William G. 1987: "High Velocity Flow in Porous Media", In: *Transp. Porous Med.* 2 (1987), pp. 521–531
- Nield, D. A. ; Bejan, A. 2006: "*Convection in Porous Media*", New York : Springer
- Raffel, M. ; Willert, C. E. ; Wereley, S. T. ; Kompenhans, J. 2007: "*Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*", Heidelberg: Springer
- Saleh, S. ; Thovert, J. F. ; Adler, P. M., 2005: "Flow Along Porous Media by Particle Image Velocimetry". In: *AIChE J.* 39 (1993), pp. 1765–1776
- Svinn, J. K., 2004: "*An introduction to MatPIV v. 1.6.1*".
- Tavoularis, S.: "*Measurement in Fluid Mechanics*", New York: Cambridge University Press
- Westerweel, J., 1993: "*Digital Particle Image Velocimetry. Theorie and Applications*", Technische Universiteit Delft, Dissertation