

UNTERSUCHUNG VON LAGRANG'SCHEN PARTIKELTRAJEKTORIEN IN THERMISCHER KONVEKTION MITTELS 3D PTV

INVESTIGATION OF LAGRANGIAN PARTICLE TRAJECTORIES IN THERMAL CONVECTION USING 3D PTV

Elka Lobutova, Christian Resagk

Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, PF 100565, 98684 Ilmenau
elka.lobutova@tu-ilmenau.de

Schlagworte: Particle Tracking Velocimetry, thermische Konvektion, kohärente Strukturen

Key words: particle tracking velocimetry, coherent flow structures in thermal convection

Zusammenfassung

Mittels 3D PTV werden in einem großen Modellexperiment zur natürlichen Konvektion Trajektorien von heliumgefüllten Seifenblasen und Latexballons gemessen und statistisch ausgewertet. Das Modellexperiment besteht aus einer großen Rayleigh-Bénard-Zelle, einem luftgefüllten Zylinder mit einem Durchmesser von 7 m und einer maximalen Höhe von 6,3 m. Die Zelle hat adiabatische Seitenwände und wird von unten erwärmt und von oben gekühlt. Ein Messsystem aus vier Kameras, zwei Blitzlampen und einer Rekonstruktionssoftware erlaubt die Aufnahme von Partikelbildern, die Berechnung Partikelkoordinaten und die Darstellung von Trajektorien. Mit diesen Daten lassen sich charakteristische großskalige Strömungsstrukturen und statistische Eigenschaften der turbulenten Konvektionsströmung bestimmen.

Einleitung

Die Untersuchung und Modellierung von thermischer Konvektion in Luft gehört zu den großen ingenieurtechnischen Herausforderungen unserer Zeit. Es ist heutzutage fast unmöglich, in Räumen mit vielen Menschen oder vielen wärmeabgebenden Geräten wie z.B. in Großraumbüros, in Hörsälen, in Konzerthallen oder in Flugzeugkabinen und Bahnabteilen eine sowohl gute Klimatisierung als auch eine gute Behaglichkeit für die Insassen zu gewährleisten. Die Luftströmungen in diesen geschlossenen oder teilweise offenen Räumen werden durch die Geometrie, durch die Anzahl der Fenster und Türen, durch die Verteilung von Wärmequellen und durch die Zwangsventilation der Klimaanlage sehr stark beeinflusst. Durch die Überlagerung dieser Einflussfaktoren ist die Strömungsstruktur in Innenräumen sehr komplex, sehr turbulent, streng dreidimensional und deshalb sehr schwer vorhersagbar. Deshalb versucht man zunächst in Modellzellen mit einfacher Geometrie und ohne Zwangsventilation die Eigenschaften der thermischen Konvektion in „Reinkultur“ zu erforschen. Die „Rayleigh-Bénard(RB)-Zelle“ ist so ein Modell mit definierten Randbedingungen, indem man die Eigenschaften der Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder in den Grenzschichten und im Volumen untersucht. Dabei ist die Kopplung der kleinen und mittleren Strömungsstrukturen der Grenzschichten mit den auftretenden großskaligen kohärenten Strukturen, auch Wind genannt, im

Volumen der Modellzelle von besonderem Interesse. Darüber hinaus bietet die RB-Zelle die Möglichkeit, die Feinstruktur der hochgradig turbulenten Strömung mit statistischen Methoden zu analysieren.

Experimenteller Aufbau

Die Experimente wurden im „Ilmenauer Fass“ (IF), einer klassischen zylindrischen RB-Zelle mit einem Durchmesser von $D = 7,15 \text{ m}$ und einer variablen Höhe $H = 0,06 - 6,3 \text{ m}$ durchgeführt. Die luftgefüllte Konvektionszelle wird von unten beheizt, von oben gekühlt und hat adiabatische Seitenwände (Abb. 1). Die Temperatur der Heizplatte am Boden kann zwischen 20°C und 80°C variiert werden, die Temperatur der Kühlplatte an der Decke wird in der Regel auf 20°C eingestellt. Durch Veränderung der Lage der Kühlplatte lassen sich unterschiedliche Zellhöhen einstellen, was einem variablen Aspektverhältnis $A = D/H = 1 - 100$ entspricht. Mehr Details des „Ilmenauer Fass“ sind von du Puits et al. 2007 publiziert worden.

Unser 3D PTV-System besteht aus vier 8 MP Canon EOS 20D Digital-Kameras, die an den Wänden des IF befestigt sind (Abb. 1). Die Kameras werden mittels Pulsgenerator elektrisch ferngesteuert und lösen ihrerseits zwei externe Blitzlampen aus. Dabei handelt es sich um Hochleistungs-Studioblitzlampen der Fa. Elinchrom mit einer Energie von $1,5 - 6 \text{ J}$. Mit diesem System ist eine Bildwiederholfrequenz bis 3 Hz realisierbar. Die damit aufgenommenen Bilder werden zunächst on bord in jeder Kamera gespeichert und nach der Messung via USB von einem PC ausgelesen. Die Einstellung von Belichtungszeit, Blende und Auflösung erfolgt ebenfalls über die USB-Verbindung.

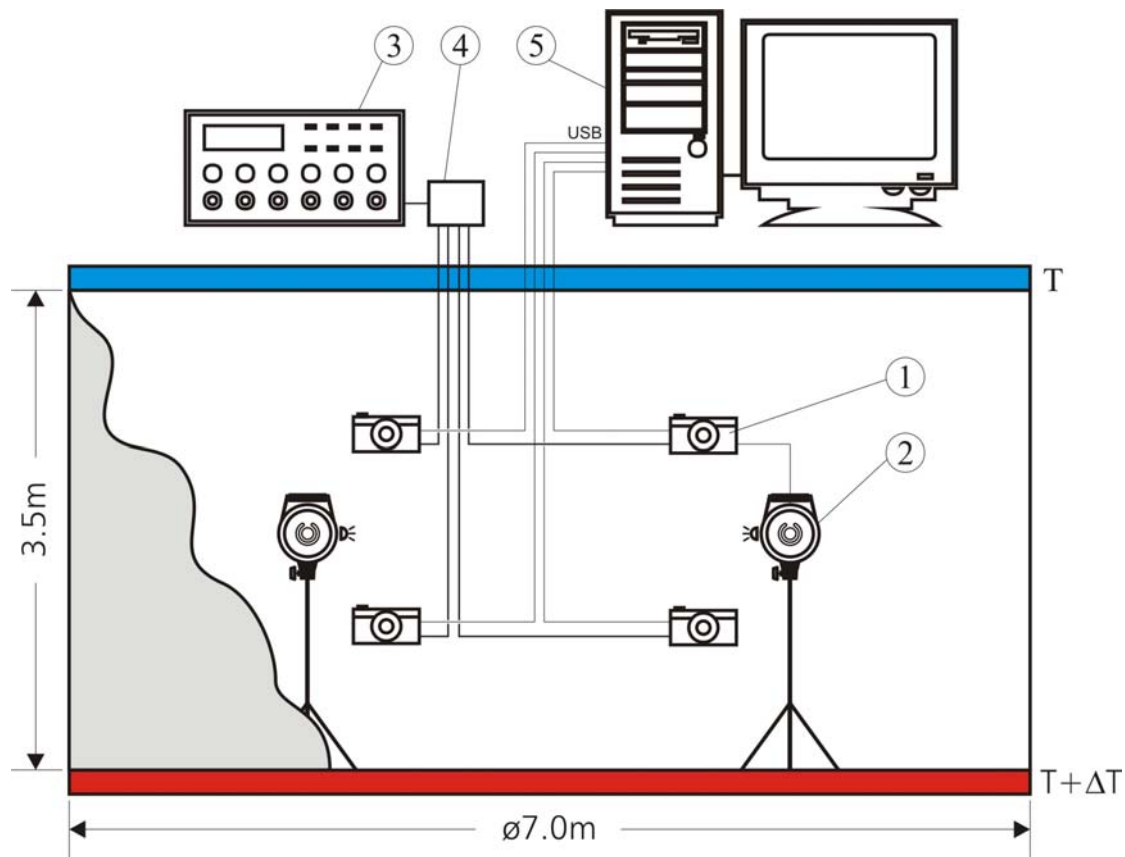


Abb. 1: Schematische Darstellung des 3D PTV-Systems im „Ilmenauer Fass“ mit einem Durchmesser von $D=7,15 \text{ m}$ und einer Höhe $H = 3,5 \text{ m}$. 1 – vier 8MP Canon EOS 20D, 2 – zwei Elinchrom Blitzlampen, 3 – Pulsgenerator, 4 – Kamerafernsteuerung, 5 – PC.

Als Tracer wurden zwei verschiedene Partikelarten verwendet: 3 mm heliumgefüllte Seifenblasen und 15 mm heliumgefüllte Latexballons. Der dafür entwickelte vierkanalige Seifenblasengenerator zeichnet sich durch eine hohe Generationsrate und stabile Betriebsweise über mehrere Stunden aus. Mittels spezieller Seifenlösungen konnte eine Blasenlebensdauer bis zu 250 s erreicht werden. Die manuell mit Helium gefüllten Latexballons schweben in Luft in der Regel fünf Stunden lang.

Die Analyse und Auswertung der aufgenommenen Partikelbilder erfolgt photogrammetrisch (Maas et al. 1993). Hierbei benötigt man mindestens zwei Kameras, die Verwendung von vier Kameras erhöht die Genauigkeit der Bestimmung der Partikelkoordinaten erheblich. Wichtig dabei sind präzise in-situ Kalibrierungstechniken und subpixel-genaue Bildauswertungsmethoden (Putze 2006).

Bestimmung der 3D Trajektorien

Die Analyse der aufgenommenen Bildsequenzen erfolgt mittels digitaler Photogrammetrie. Zuvor ist die Kalibrierung jeder Kamera mit Hilfe eines Punkt-Testfeldes notwendig. Dazu werden Markierungsmarken an den Wänden sowie an Heiz- und Kühlplatte des IF platziert. Dabei ist eine Genauigkeit bei der Kameraachsenbestimmung von 0,6 mm theoretisch erreichbar. Daraus folgt eine 2 mm genaue Positionsbestimmung der Partikel im gesamten Raum der Konvektionszelle. Allerdings führen zurzeit noch thermisch induzierte Verschiebungen der Kamerabefestigungen an der Wand des IF zu räumlichen Abweichungen der rekonstruierten Partikelpositionen bis zu 10 mm.

Für die Segmentierung und für die Koordinatenbestimmung der aufgenommenen Partikelbilder wurden zwei verschiedene Methoden angewendet. Bei der Verwendung von Seifenblasen (Bilddurchmesser = 4 Pixel) kamen Hintergrundsubtraktion, Standardsegmentierung und Schwerpunktbestimmung zur Anwendung. Die Ballonbilder wurden dagegen mit morphologischen Filtermethoden und Grauwertschwellwerten vom Hintergrund separiert und danach wird der Mittelpunkt des Ballons graphisch ermittelt. Damit ist keine Subpixel-Genauigkeit erreichbar – aber auch nicht erforderlich.

Mittels Multi-Image-Matching auf der Grundlage des Schnittpunktes von Epipolarlinien (siehe Maas et al. 1993) werden zunächst die 3D Koordinaten eines jeden erkannten Partikels berechnet und danach unter Verwendung eines 4-Bild-Tracking-Algorithmus (Malik et al. 1993, Ouellette et al. 2006) die 3D Partikeltrajektorien rekonstruiert.

Ergebnisse

Es wurde zwei verschiedene Messserien im IF durchgeführt: 1. unter Verwendung von einer großen Anzahl von kleiner Seifenblasen und 2. mit einzelnen großen Latexballons. Die Bildwiederholrate betrug bei den Seifenblasen 2,5 Hz, dagegen bei den Ballons nur 1 Hz. Beide Messserien wurden bei konstantem Aspektverhältnis $A = 2$ und bei zwei verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen Heiz- und Kühlplatte von 20°C und 40°C durchgeführt.

Strömungsstrukturen aus Blasenmessungen

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für die Strömungsvisualisierung im 7 m x 3,5 m großen Messvolumen des IF bei 20°C Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlplatte. Die von einem vierkanaligen Generator produzierten heliumgefüllten Seifenblasen füllen mit ausreichender Konzentration das gesamte Messvolumen gleichmäßig aus. Vergleicht man zwei hintereinander folgende Momentaufnahmen, erhält man eine qualitative Information über die großskaligen Strukturen im Geschwindigkeitsfeld. Wir sehen in Abbildung 2 eine große Rolle, die die gesamte Querschnittfläche des IF ausfüllt. Langzeitaufnahmen dieser großen Rolle zeigen, dass diese Struktur nicht stabil ist und sie sich in eine kleine Rolle, welche sich nur der Hälfte des Querschnittes der Konvektionszelle umbildet. Beide kohärenten Strukturen weisen Umfangsgeschwindigkeiten von 0,1 -1,0 m/s auf.

Eine vollständige Auswertung dieser Blasenaufnahmen mit dem 3D PTV-Algorithmus scheiterte bisher an zu großen Kalibrierungsfehlern bei der Lagebestimmung der Kameraachsen. Trotz stabiler Befestigung der vier Kameras an der Innenwand der Konvektionszelle führen minimale thermische Ausdehnungen der Wand zur Verdrehung der Kameras und somit zur Verschiebung des Schnittpunktes der optischen Achsen. Die daraus resultierenden Fehler bei der Blasensegmentierung von einigen Millimetern führen zu Zuordnungsfehlern beim Tracking. Dieses Problem soll durch eine Nachkalibrierung mit nur wenigen Marken und anschließender softwaremäßige Verschiebung der Blasen aufnahmen in die Ausgangslage behoben werden. Für die Rekonstruktion von Ballontrajektorien ist dies jedoch nicht relevant.

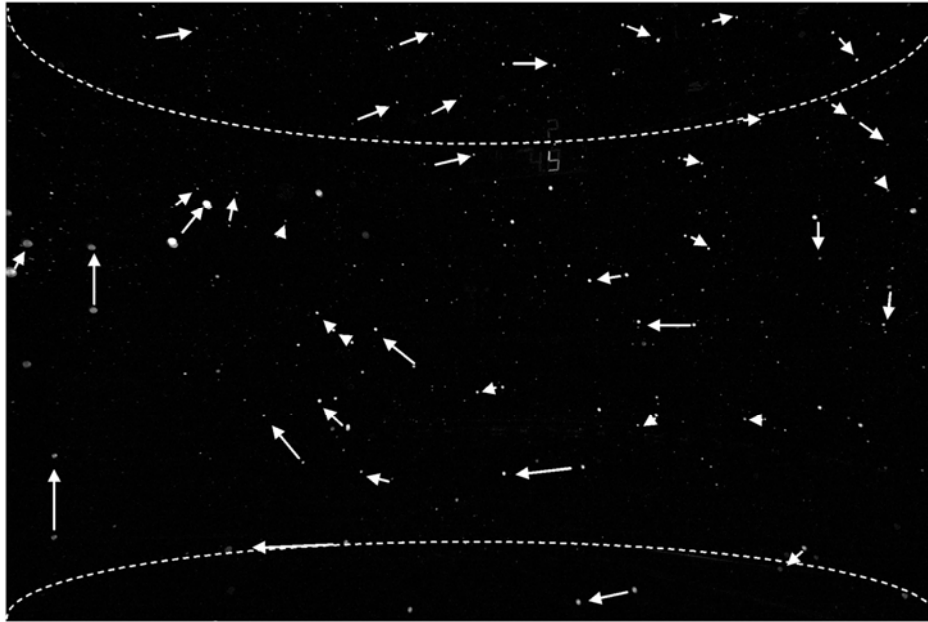


Abb. 2: Subtraktion von zwei Momentaufnahmen mit Seifenblasen von einer Kamera mit 500 ms Zeitdifferenz aus dem IF. Die Pfeile zeigen den qualitativen Verlauf einer großskaligen Strömungsstruktur im gesamten Querschnitt der 7 m x 3,5 m großen zylindrischen Konvektionszelle mit einem Aspektverhältnis von 2.

Charakteristische Strukturmoden aus Ballontrajektorien

Im Ergebnis der Beobachtung von Ballontrajektorien können wir die Konvektionsströmung im IF bei den gegebenen Randbedingungen mit vier Moden kohärenter Strukturen beschreiben. In Abbildung 3 sieht in prinzipieller Darstellung in der Konvektionszelle folgende Moden: 1. große Rolle über die gesamte vertikale Fläche, 2. kleine Rolle über den halben vertikalen Querschnitt, 3. horizontale Zirkulation entlang der Seitenwand und 4. kleine Wirbelstrukturen mit Achsen senkrecht zu Heiz- und Kühlplatte.

Bei früheren Stereo-PIV-Untersuchungen konnten in einer festen Lichtschnittebene schon die beiden Rollenstrukturen sowie die wandparallele Strömung nachgewiesen werden (Resagk et al. 2004, Raffel et al. 2007). Doch erst mit dem 3D-PTV-Verfahren war es möglich, alle 3D Strukturen eindeutig zu identifizieren. Die rekonstruierten Ballontrajektorien in Abbildung 4 zeigen eine relativ stabile große Rolle in der x-z-Ebene. Erst die Darstellung der dritten Komponente im rechten Bild lässt den dreidimensionalen Charakter mit ausgeprägten Geschwindigkeitskomponenten in y-Richtung erkennen. In Abbildung 5 sehen wir ein Beispiel für das instabile Verhalten der großskaligen Strukturen: den Übergang von einer großen Rolle zu einer kleinen Rolle entlang einer Ballontrajektorie.

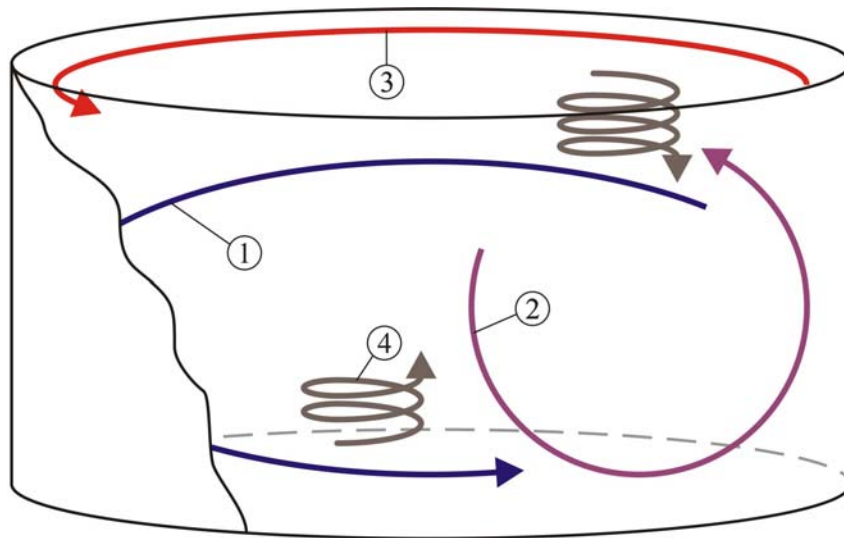


Abb. 3: Verschiedene Moden von kohärenten Strömungsstrukturen im IF bei Aspektverhältnis 2: 1 – große Rolle, 2 – kleine Rolle, 3 – azimuthale Wandströmung, 4 – Wirbel

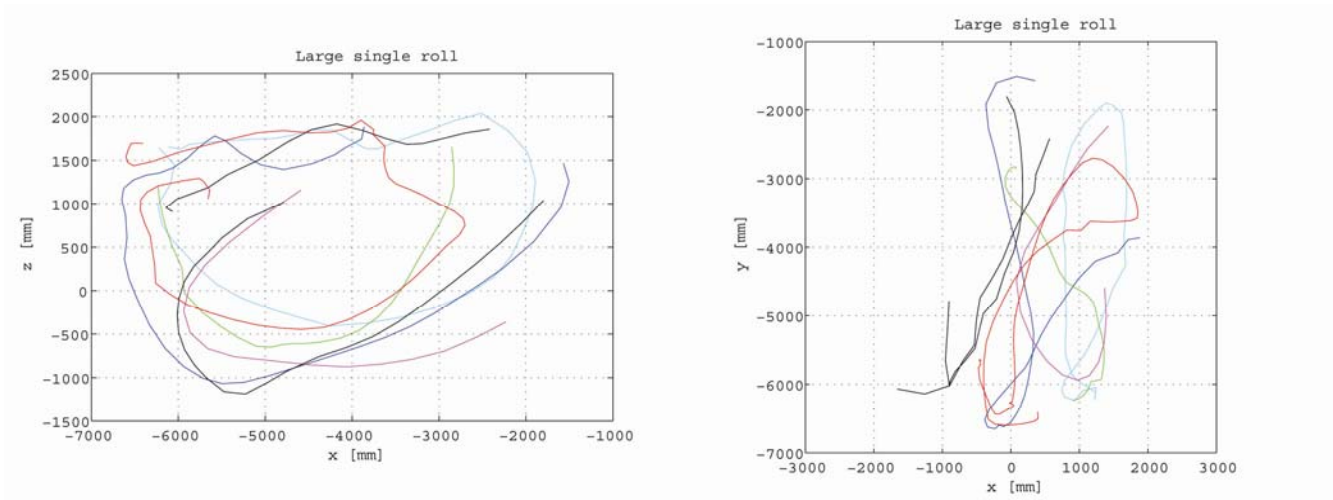


Abb. 4: Kohärente Strömungsstrukturen aus mittels 3D PTV rekonstruierten Ballontrajektorien. Links: große Rolle von vorn gesehen, rechts: große Rolle von oben gesehen zeigt Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung.

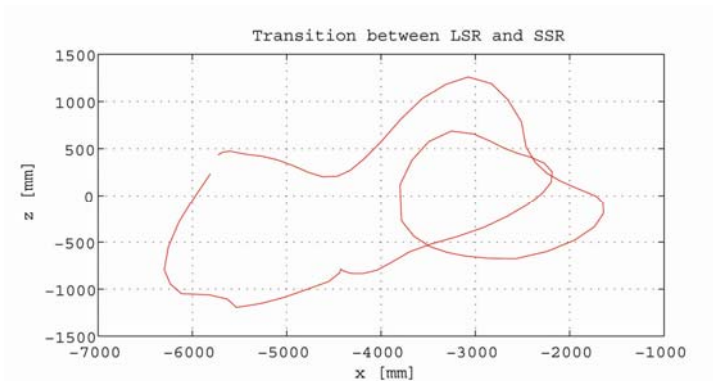


Abb. 5: Langzeitmessung (82 Sequenzen) einer Ballontrajektorie zeigt den Übergang einer kohärenten Strömungsstruktur von einer großen Rolle in eine kleine Rolle.

Zusammenfassung

3D PTV ist eine gut geeignete Messtechnik für die Untersuchung von komplexen Strömungsstrukturen in Konvektionsexperimenten mit großen Messvolumen. Sowohl heliumgefüllte Seifenblasen, als auch heliumgefüllte Latexballons sind als Tracer-Partikel in der Lage, die großskaligen kohärenten Strukturen in turbulenten Konvektionsströmungen zu visualisieren. Die erzielten 3D PTV-Ergebnisse erlauben eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Moden der Strukturen im Volumen des IF bei Aspektverhältnis 2. Die Ergebnisse zeigen weder eine stabile Zirkulation über die gesamte vertikale Querschnittsfläche der Konvektionszelle noch eine symmetrische Zwei-Rollen-Struktur, welche aus früheren Stereo-PIV-Messungen abgeleitet wurde. Es wurden dagegen insgesamt vier verschiedene Strukturmoden gefunden: große Rolle, kleine Rolle, azimuthale Zirkulation und Wirbel mit Durchmessern kleiner als 1 m an der Heiz- und Kühlplatte. Alle diese Moden sind bei Aspektverhältnis 2 nicht stabil, es findet ein permanenter Übergang zwischen den Moden statt.

3D PTV erlaubt neben der Untersuchung der kohärenten Strömungsstrukturen auch die Analyse von Einzeltrajektorien über einen langen Zeitraum. Aus diesen Daten erhält man die Variation der Geschwindigkeit- und der Beschleunigung entlang der Bahnkurve. Die Analyse der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung dieser Größen liefert wichtige Parameter zur Charakterisierung von turbulenten Konvektionsströmungen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“.

Literatur

- du Puits, R., Busse, F. H., Resagk, C., Tilgner, A., Thess, A., 2007: „Structure of thermal boundary layers in turbulent Rayleigh-Bénard convection“. J. Fluid Mechanics, Vol. 572, pp. 231-254
- Maas, H.-G., Grün, A., Papantoniou, D., 1993: “Particle Tracking in threedimensional turbulent flows – Part I: Photogrammetric determination of particle coordinates“. Experiments in Fluids, Vol. 15, pp. 133-146
- Putze, T., 2006: “Quality analysis of flow field data determined by 3D PTV in gas flows“. Proc ISFV12, Göttingen, Germany, 69.1
- Resagk, C., du Puits, R., Thess, A., Raffel, M., Bosbach, J., Aroussi, A., 2004: “Large-scale flow visualization and particle image velocimetry in convective airflows“. Proc ISFV11, Notre Dame, USA
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhans, J., 2007: Particle Image Velocimetry. 2nd edition, Springer
- Malik, N. A., Dracos, T., Papantoniou, D. A., 1993: “Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows – Part 2: Particle tracking“. Experiments in Fluids, Vol. 15, pp. 279 – 294
- Ouellette, N. T., Xu, H., 2006: “A quantitative study of three-dimensional Lagrangian particle tracking algorithms“. Experiments in Fluids, Vol.40, pp. 301 – 313