

## 3D PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY ZUR UNTERSUCHUNG VON GROß-SKALIGE STRUKTUREN IN RAYLEIGH-BÉNARD KONVEKTION

### INVESTIGATION OF LARGE-SCALE FLOW STRUCTURES IN RAYLEIGH- BÉNARD CONVECTION USING 3D PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY

E. Lobutova<sup>1</sup>, C. Resagk<sup>1</sup>, R. Rank<sup>2</sup>, D. Müller<sup>2</sup>, T. Putze<sup>3</sup>, H.-G. Maas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau

<sup>2</sup> Institut für Energietechnik, Technische Universität Berlin

<sup>3</sup> Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden

Thermische Konvektion, Strukturbildung, PTV

Thermal convection, Large-scale structures

#### Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über die Entwicklung und Validierung einer innovativen Messtechnik für Luftströmungen berichtet. Dreidimensionale Particle Tracking Velocimetry (3D PTV) wird angewendet, um groß-skalige Strömungsstrukturen und Partikeltrajektorien zu untersuchen. Als Tracerpartikel werden mit Helium gefüllte Seifenblasen eingesetzt. Statt des konventionellen Laserlichtschnittverfahrens, welches wegen des dreidimensionalen Charakters der Strömungsstrukturen nicht anwendbar ist, wird das gesamte Messvolumen mit Blitzlampen beleuchtet. Die charakteristische Länge des Messvolumens beträgt 7 m. Die Rekonstruktion des Geschwindigkeitsfeldes basiert auf Partikelabbildungen von vier Kameras und digitale Photogrammetry.

#### Einleitung

Groß-skalige Strukturen in turbulenter thermischer Konvektion treten in vielen Bereichen von Natur und Technik auf. Sie reichen von Strömungen in Büroräumen über die Klimatisierung von Fahrzeugkabinen bis zur Bewegung der Luft in der Erdatmosphäre. Diese Geschwindigkeitsfelder sind allerdings durch hoch turbulentes und streng dreidimensionales Verhalten gekennzeichnet. Die darin zu beobachtenden kohärenten Strukturen beeinflussen signifikant den konvektiven Wärmetransport und sind deshalb sowohl für die Grundlagenforschung (Turbulenz) als auch für die technische Anwendung (Behaglichkeit von Raumluftströmungen) von großem Interesse. Bisher gibt es keine Messtechnik, um diese groß-skalige turbulenten Strömungsfelder in Volumen mit einer charakteristischen Länge von 7m zu analysieren.

Die 3D PTV ist eine berührungslose Technik zur Bestimmung von zeitaufgelösten, räumlichen Geschwindigkeitsfeldern. Das Verfahren basiert auf der digitalen Photogrammetrie und verwendet vier Kameras, um Bildsequenzen von kleinen, reflektierenden Tracerpartikeln aufzunehmen. Durch eine Mehrbildauswertung können so die 3D Partikelkoordinaten bestimmt und daraus die Partikelbahnen rekonstruiert werden (Putze 2005).

Das „Ilmenauer Fass“ (IF) ist eine einzigartige Experimentieranlage zur Untersuchung der Rayleigh-Bénard-Konvektion (Du Puits et al. 2007). Diese große Anlage besteht aus einem zylindrischen Behälter mit variabler Höhe von 0,1 m bis 6,3 m und einem konstanten Durch-

messer von 7,15 m. Die Luft im Behälter wird durch thermische Konvektion von einer beheizten Platte (Boden) und einer frei hängenden gekühlten Platte (Decke) in Bewegung gesetzt. In vorangegangenen Arbeiten wurde die Visualisierung der Konvektionsströmung im IF mittels eines konventionellen PIV-Verfahrens durchgeführt (Resagk et al. 2005). Mit dieser Methode kann jedoch nur das Geschwindigkeitsfeld in der Lichtschnittebene bestimmt werden. Außerdem ließ die Auflösung der PIV-Kameras und die limitierte Leistung des Laserlichtschnitts nur die Messung in einem Viertel der Querschnittsfläche des IF zu. Der größte Nachteil der bisherigen Untersuchungen besteht aber in der nur zweidimensionalen Analyse der an sich dreidimensionalen, zeitabhängigen Strömungsstrukturen.

### Versuchsaufbau

Um alle Komponente des 3D PTV-Systems zu testen, wurde zunächst eine rechteckige Testzelle mit 4,2 m Länge, 3,0 m Breite und 3,6 m Höhe aufgebaut (Abb. 1 links). Die Kameras sind an einer Wand montiert und das Messvolumen wird mit Blitzlampen beleuchtet. Ein Axialgebläse sollte für eine Konvektion in Form einer großen Strömungswalze sorgen. Die vier CANON EOS 20D Kameras wurden wegen der notwendigen hohen räumlichen Auflösung ausgewählt. Um das gesamte Messvolumen aufnehmen zu können, ist jede Kamera mit einem 10-20 mm Zoomobjektiv ausgestattet. Die maximale Aufnahmefrequenz beträgt 5 Bilder pro Sekunde und die Synchronisation aller Kameras erfolgt mittels eines Pulsgenerators über die Fernbedienungsfunktion (Abb. 1 rechts).

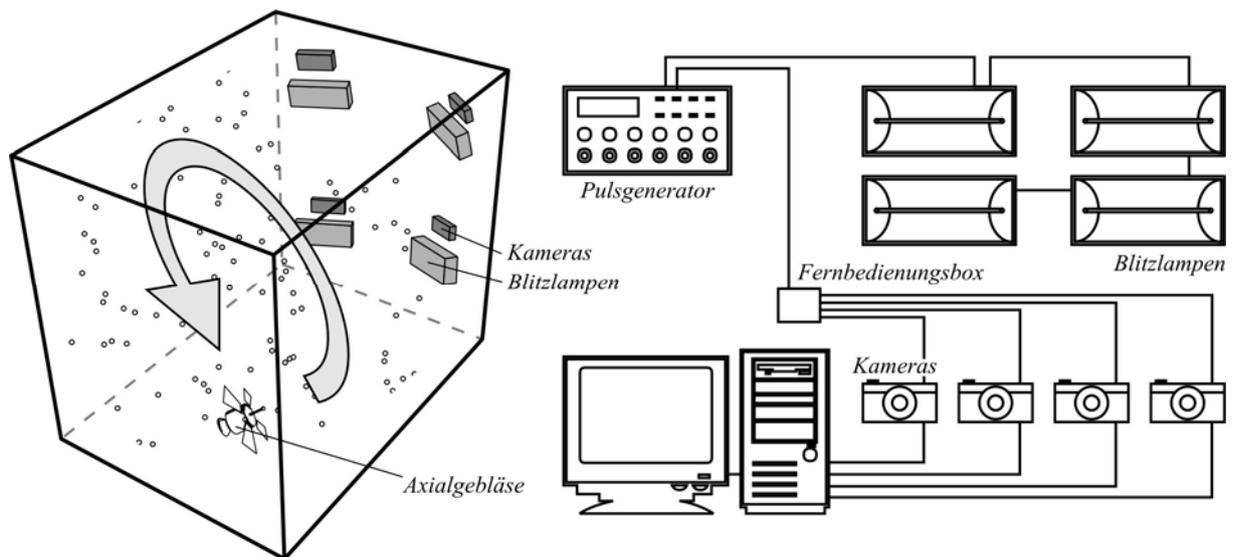


Abb. 1: Links: Schematische Darstellung der 3D PTV-Testzelle mit 4,2 m Länge, 3,0 m Breite und 3,6 m Höhe; Rechts: Blockdiagramm der Kamera-Blitzlampen-Synchronisation

Um adäquate Abbildungen von kleinen Partikeln in einem großen Volumen zu bekommen, sind Lichtquellen mit sehr hoher Intensität notwendig. Andererseits dürfen die Lichtquellen keine nennenswerte Wärme erzeugen, damit die Konvektionsströmung dadurch nicht beeinflusst wird. Im Ergebnis des Vergleiches verschiedener Lichtquellen wie Halogenlampen, Kaltlichtlampen und Kamerablitzlampen erwiesen sich konventionelle 1500 W starke Stroboskop-Blitzlampen am bestens geeignet. Die Blitzlampen sind miteinander synchronisiert und werden mit den Kameras mittels des oben genannten Pulsgenerators angesteuert (Abb. 1 rechts). Die Positionierung der Lichtquellen neben jede Kamera ist das Resultat der Berechnung der optischen Eigenschaften der eingesetzten Tracerpartikel (heliumgefüllte Seifenblasen) (Abb. 2).

Wenn wir annehmen, dass ein Lichtstrahl aus 2 m Entfernung auf eine Blase trifft, wird nur 3% des Lichtes reflektiert, dagegen beträgt der Transmissionsanteil 53%. Der Rest wird gleichmäßig zur Seite gestreut. Demzufolge würde die optimale Position der Lichtquelle genau gegenüber den Kameras sein. Dies ist jedoch mit einer Übersteuerung der Kameras durch andere, nicht auf Blasen treffende Lichtstrahlen verbunden und ist deshalb nicht praktikabel. Somit bleibt als einzig akzeptable Lösung die Anordnung der Lichtquellen unmittelbar neben den Kameras.

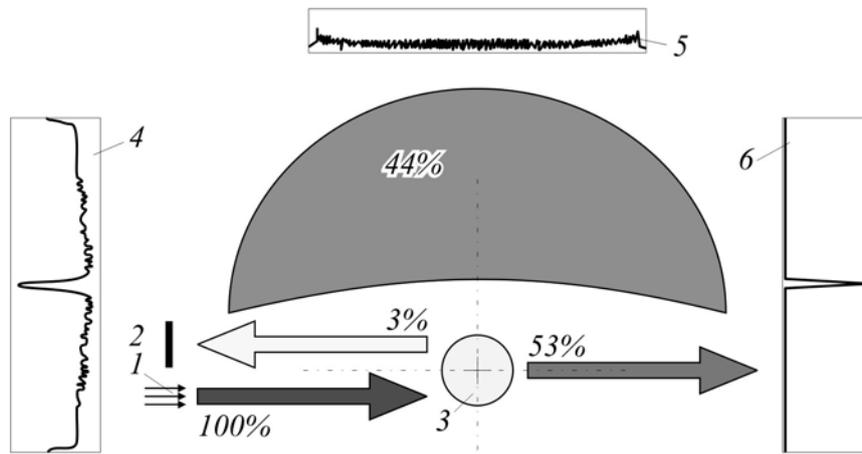


Abb. 2: Schematische Darstellung der optischen Eigenschaften einer Seifenblase; 1 – einfallender Lichtstrahl, 2 – Lichtsensor (Kamera), 3 – Seifenblase (Durchmesser ca. 4 mm); 4,5 und 6 - Intensitätsverteilung für den reflektierten, durchgehenden und gestreuten Anteil des Lichtes (mit freundlicher Genehmigung von B. Mitschunas, TU Ilmenau)

Wie schon erwähnt, werden als Tracerpartikel heliumgefüllte Seifenblasen eingesetzt. Der Durchmesser der Blasen beträgt ca. 4 mm. Der speziell entwickelte Blasengenerator ist durch hohe Blasenproduktionsrate, lange Lebensdauer der Blasen (über 250 s) und stabilen Betrieb über mehrere Stunden charakterisiert. Die Partikel werden durch Schlauchleitungen vom Generator ins Messvolumen geleitet. Um die Austrittsgeschwindigkeit zu reduzieren, ist am Ende jeder Leitung ein Diffusor angebracht.

### Validierung des 3D PTV-Verfahrens

Für die Validierung des 3D PTV-Verfahrens mit einem bekannten Geschwindigkeitsfeld wurden zwei Experimente durchgeführt. Erstens – Trajektorie eines einzelnen Modellpartikels, das sich auf einer Kreisbahn bewegt und zweitens – Trajektorien von frei fallenden Polystyrolpartikel (EPS).

### Modellpartikel

Als Modellpartikel diente eine kleine Glaskugel mit einem Durchmesser von 13 mm, welche mit einem 1500 mm langen Faden an einem 500 mm langen horizontal rotierenden Arm befestigt war (Abb. 3 links). Das gesamte System wurde mit einem Schrittmotor angetrieben. Mit bekannter Winkelgeschwindigkeit und gemessenem Bahnradius konnte die Bahnkurve des Modellpartikels berechnet werden.

Die Kreisbahn der Kugel wurde gleichzeitig mit den vier Kameras in einzelnen Zeitschritten aufgenommen. Die Bildaufnahmefrequenz betrug dabei 3 Bilder pro Sekunde, die Gesamtzahl der Bilder war 60, sodass ca. 5 Umdrehungen erfasst wurden. Die Beleuchtung erfolgte mittels der schon genannten Blitzlampen.

## 37.4

Der Vergleich der berechneten Bahnkurve mit der mittels 3D PTV rekonstruierten Trajektorie zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die Abweichungen von der realen Bahn betragen weniger als 1% (Abb. 3 rechts) und die gemessene Geschwindigkeit stimmt genau mit dem berechneten Wert überein. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet.

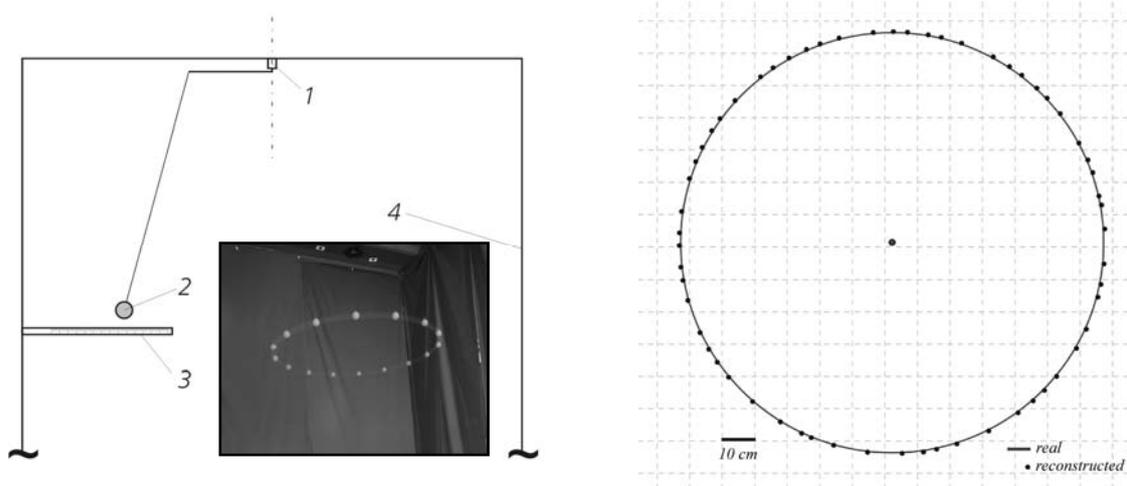


Abb. 3: Validierung des 3D PTV-Verfahrens mit rotierender Glaskugel. Links: Aufbau, 1 – Schrittmotor, 2 – Glaskugel, 3 – Lineal zur Messung des Durchmessers, 4 – Testzelle. Teilbild - Stroboskopaufnahme von einer Kamera. Rechts: Berechnete (Punkte) und rekonstruierte (Linie) Trajektorie

	Gemessen	Rekonstruiert	Fehler
Bahndurchmesser, m	1,30	1,31	0,8%
Geschwindigkeit, m/s	1,14	1,14	0%

Tabelle 1: Vergleich zwischen berechneten und rekonstruierten Bahnparametern: Bahndurchmesser und Geschwindigkeit

### Frei fallende EPS-Partikel

Für die Validierung mit frei fallenden Modellpartikeln wurde ein 1,5 m langer drehbarer Stab horizontal an der Decke der Testzelle in 3 m Höhe befestigt. Auf diesem Stab befanden sich EPS-Partikel mit einem Durchmesser von 6 mm, die in kleinen Mulden mit konstantem Abstand angeordnet sind. Durch die Drehung des Stabes fielen diese Partikel gleichzeitig senkrecht zu Boden (Abb. 4 links). Mit Hilfe einfacher fluidmechanischer Berechnungen kann die Orts-Zeit-Funktion bzw. die ortsabhängige Fallgeschwindigkeit bestimmt werden. Diese Werte wurden mit den mittels 3D PTV rekonstruierten Bahnkurven der EPS-Partikel verglichen, indem vier Epochen (Momentaufnahmen) der Partikelbewegung aufgenommen und photogrammetrisch ausgewertet wurden (Abb. 4 rechts). Die Ergebnisse in Tabelle 2 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten, der Rekonstruktionsfehler von Position und Geschwindigkeit ist kleiner als 1%. In Abbildung 5 ist die theoretische zeit- bzw. ortsabhängige Fallgeschwindigkeit im Vergleich zu den rekonstruierten Werten dargestellt. Die kleinen Abweichungen der experimentellen Daten von den berechneten kann man mit der nicht ideal kugelförmigen Gestalt der EPS-Partikel erklären. Außerdem zeigt die Rekonstruktion der Partikelpositionen in der dritten und vierten Epoche eine zunehmende Abweichung von der linienförmigen Anordnung in der Startposition (Abb. 4) infolge individueller Schwankungen der Fallgeschwindigkeit.

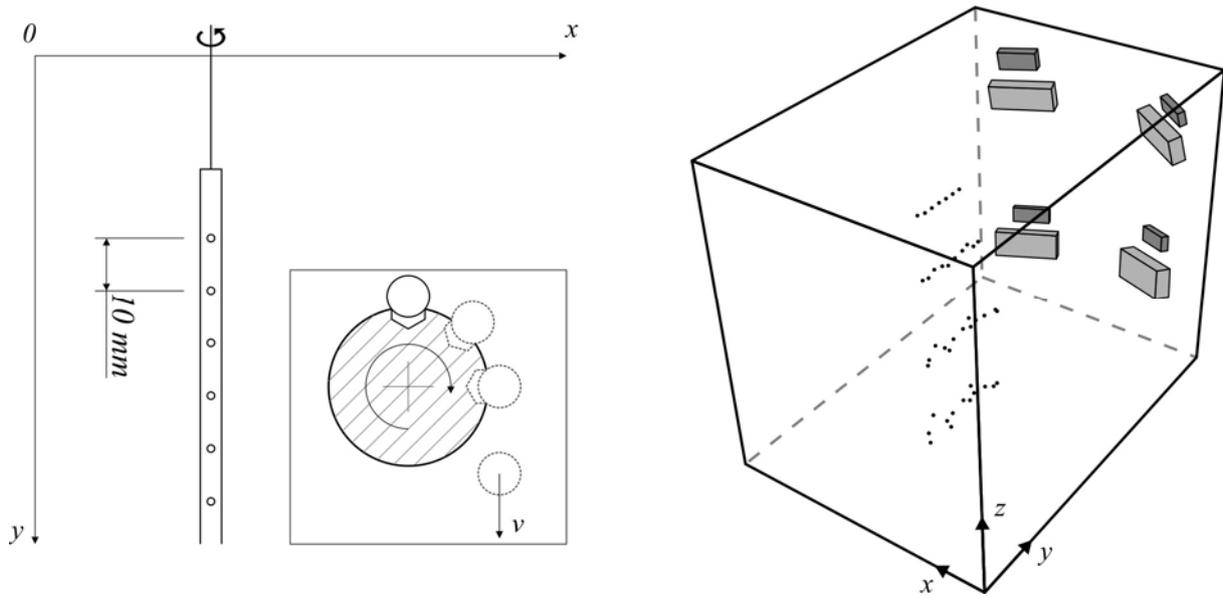


Abb. 4: Validierung des 3D PTV-Verfahrens mit frei fallenden EPS-Partikeln. Links: drehbarer Stab mit gleichmäßig angeordneten Partikel und Prinzip des Fallversuches, rechts: Rekonstruktion der Partikelpositionen für vier Bewegungsepochen.

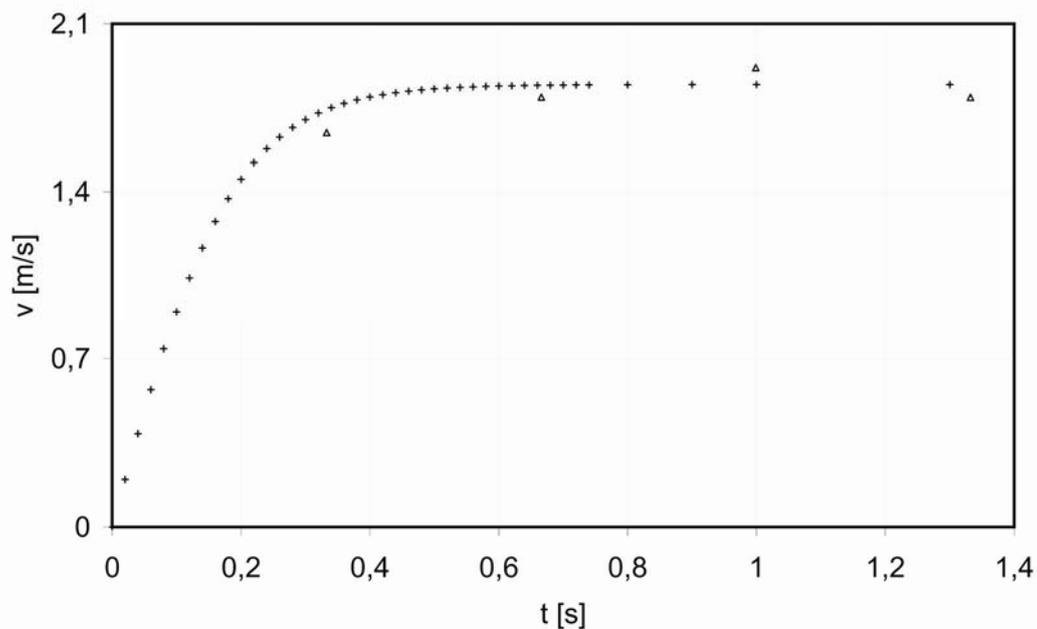


Abb. 5: Vergleich zwischen theoretischer (Kreuze) und mittels 3D PTV rekonstruierter Fallgeschwindigkeit der EPS-Partikel (Dreiecke) als Funktion der Zeit.

	Gemessen	Rekonstruiert	Fehler
Abstand, mm	100,00	99,84	0,2%
Fallgeschwindigkeit, m/s	1,85	1,83	0,9%

Tab. 2: Vergleich von Abstand (Startposition) und Endgeschwindigkeit der EPS-Partikel, ermittelt aus analytischer Berechnung und Rekonstruktion mittels 3D PTV.

## Ergebnisse

### Erzwungene Konvektion in der Testzelle

Bei der ersten Anwendung des entwickelten 3D PTV-Verfahrens wurde die Konvektionsströmung eines Axialgebläses in der Testzelle untersucht. Dabei war das Gebläse in der Mitte der Zelle vertikal positioniert und über vier Zuleitungen wurden heliumgefüllte Seifenblasen eingeleitet. Obwohl mit dem Gebläse nicht die gewünschte stabile Konvektionswalze erzeugt werden konnte, zeigen Langzeitaufnahmen der turbulenten Strömungsstrukturen von einer Kamera eine gute qualitative Übereinstimmung mit den rekonstruierten Partikeltrajektorien (Abb. 6).

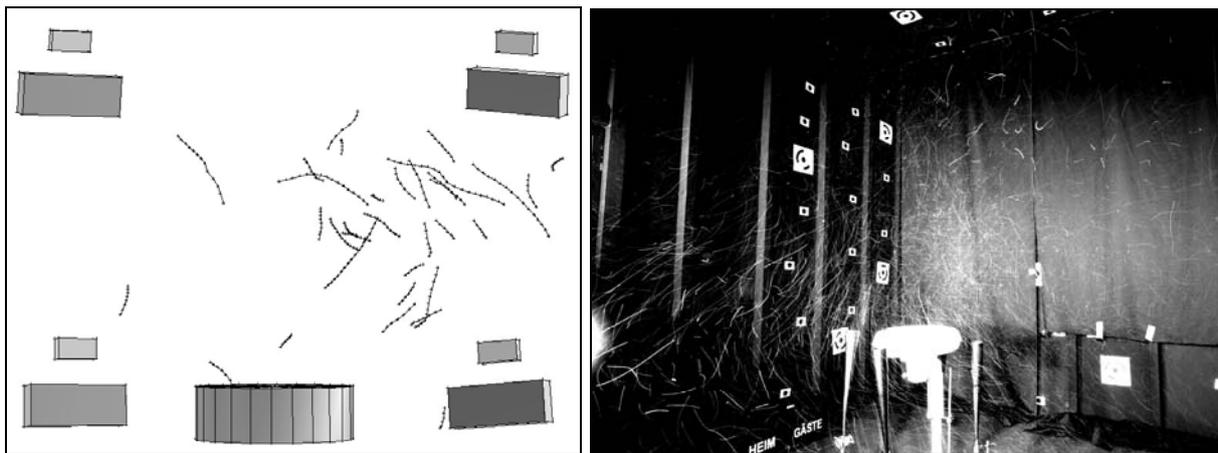


Abb. 6: Vergleich von mittels 3D PTV rekonstruierten Partikeltrajektorien (links) mit einer Langzeitaufnahme (rechts) in einer turbulenten, mit einem Gebläse angetriebenen Konvektionsströmung.

### Thermische Konvektion im Ilmenauer Fass

Gegenwärtig wird das 3D PTV-System im Ilmenauer Fass installiert werden. Nach der Kalibrierung und Validierung sollen zunächst die großskaligen Strömungsstrukturen bei einem Aspektverhältnis  $A = 2$  (Höhe: 3,5 m, Durchmesser 7,0 m) mit der neuen Messtechnik untersucht werden. Frühere Stereo-PIV-Daten (Resagk et al. 2005) zeigten bei diesem Aspektverhältnis einen Übergang von einer großen Konvektionswalze zu zwei kleinen Walzen bzw. zu einer ringförmigen Strömungsstruktur.

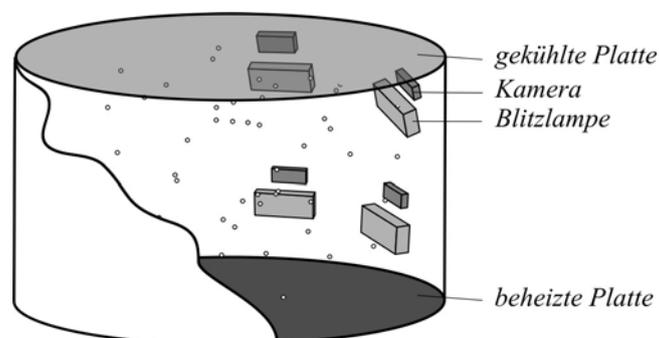


Abb. 7: Prinzipieller Aufbau des 3D PTV-Systems zur Untersuchung von großskaligen Strukturen in thermischer Konvektion im "Ilmenauer Fass" bei einem Aspektverhältnis  $A = 2$ .

In der Zukunft sind Messungen zur groß-skaligen Strömungsstruktur bei einem Aspektverhältnis  $A = 1$  (Höhe: ca. 7m, Durchmesser: 7 m) geplant. In Abbildung 7 ist der schematische Aufbau des 3D PTV-Systems in der Rayleigh-Bénard-Zelle zu sehen. Ähnlich der Anordnung in der kleineren Testzelle werden vier Kameras und sechs Blitzlampen an einem Segment der Innenwand der zylindrischen Konvektionszelle installiert. Die Zuführung der heliumgefüllten Seifenblasen erfolgt über vier Schlauchleitungen von oben über den Rand der Kühlplatte. Erste Testmessungen mit diesen Tacerpartikeln im IF bei Temperaturen von ca. 40°C und einer CCD-Kamera zeigten in einem Laserlichtschnitt (Abb. 8) gute Ergebnisse bezüglich Anzahl, Lebensdauer und Sichtbarkeit in einer Beobachtungsfläche von ca. 7 m x 7 m.

### Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms "Bildgebende Messverfahren zur Strömungsanalyse" (SPP 1147, RE 1066/5-1)

### Literatur

- Du Puits, R., Resagk, C., Thess, A., 2007: Breakdown of wind in highly turbulent convection. Phys. Rev. E 75, 016302
- Resagk, C., du Puits, R., Maystrenko, A., Thess, A., Bosbach, J., Wagner, C., 2005: Large-scale particle image velocimetry in convective airflow. 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA, September 21-23
- Putze, T., 2005 Geometric modeling and calibration of a virtual four-headed high speed camera-mirror system for 3-D motion analysis. Grün, A., Kahmen, H., (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII. Vol. II, pp. 167-174, Institute of Geodesy and Geophysics, TU Vienna