

Anwendung von DGV in heißen Brennkammern

G. Stockhausen, M. Fischer, J. Heinze, J. Klinner, M. Müller
DLR, Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, D-51147 Köln

1 Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an den Umweltschutz bei gleichzeitiger Steigerung des Verbrauchs an elektrischer Energie zwingt heutzutage zu einem ökonomischen Umgang mit fossilen Brennstoffen. Auf dem Weg zu einer reduzierten Schadstoffemission und einer erhöhten Effizienz bei der Stromproduktion bzw. Antriebsleistung ist die Verbesserung der Gasturbinentechnologie einer der Schlüssel zur Erreichung dieser Ziele.

Die aussichtsreichste Methode zur Effizienzsteigerung liegt in der Erhöhung der Turbineneinlasstemperatur. Um die damit gekoppelte erhöhte Schadstoffemissionen zu verringern, benutzt man magere, vorgemischte Verbrennungssysteme. Solche Maßnahmen können allerdings die Stabilität der Verbrennung beeinträchtigen und zu thermo-akustischen Schwingungen führen. Zur Vermeidung und Kontrolle solcher Phänomene ist eine eingehende Untersuchung der Strömungsvorgänge in operierenden Brennkammern unerlässlich.

Die dabei auftretenden Probleme wie Sauberkeit des optischen Zugangs, Hintergrundleuchten und Einbringung von Seedingmaterial in die heiße, reagierende Strömung stellen eine Herausforderung für jede Messtechnik dar. Eine Alternative zu den etablierten Geschwindigkeitsmessverfahren, wie PIV oder LDA, bietet die Doppler Global Velocimetry (DGV). Diese Technik wird vor allem dann eingesetzt, wenn die optischen Voraussetzungen für die anderen Verfahren aufgrund von Brechungsindexvariationen oder Fensterverschmutzung nicht geeignet sind.

2 Prinzip der heißen Doppler Global Velocimetry

Das Anfang der neunziger Jahre entwickelte DGV-Verfahren [1,2] misst, wie auch LDA oder PIV, die Geschwindigkeit von Tracer-Partikeln, die der Strömung zugegeben werden müssen. Mit einem Laser-Lichtschnitt und einer Beobachtungsrichtung kann eine Komponente der Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden. Für die zeitlich gemittelte Messung von drei räumlichen Geschwindigkeitsrichtungen in einer Messebene wird diese mit Laserlicht aus drei verschiedenen Richtungen nacheinander beleuchtet [3]. DGV beruht auf der Tatsache, dass die Frequenz des an den bewegten Partikeln gestreuten Lichts aufgrund des Dopplereffektes verschoben wird:

$$df = f - f_0 \quad (1),$$

mit f_0 Laserfrequenz, f = Frequenz des Streulichtes, df = Dopplerverschiebung.

Diese Frequenzverschiebung hängt von der Partikelgeschwindigkeit \mathbf{v} , der Lichtschnittsrichtung \mathbf{l} sowie der Beobachtungsrichtung \mathbf{o} ab:

$$df = f_0/c (\mathbf{o} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{v} \quad (2).$$

Die grundlegende Idee von DGV beruht auf der direkten Messung der doppler-verschobenen Lichtfrequenz mithilfe einer jodgefüllten Absorptionszelle. Dazu werden die starken Absorptionsbanden des Jodmoleküls als Frequenz-Intensitätskonverter benutzt. Das Bild der Messebene wird von zwei Kamerasystemen aufgenommen, wobei die Absorptionszelle vor einer Kamera platziert wird. Durch pixelweise Division der beiden Bilder und weiterer Nachbearbeitung lassen sich nacheinander die Transmission, Frequenzverschiebung und schließlich eine zeitlich gemittelte Geschwindigkeitskomponente in der Lichtschnittebene berechnen. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Kenntnis des Transmissionsprofils $T(f)$ der Zelle, welches durch eine Kalibrierung bestimmt werden muss [4].

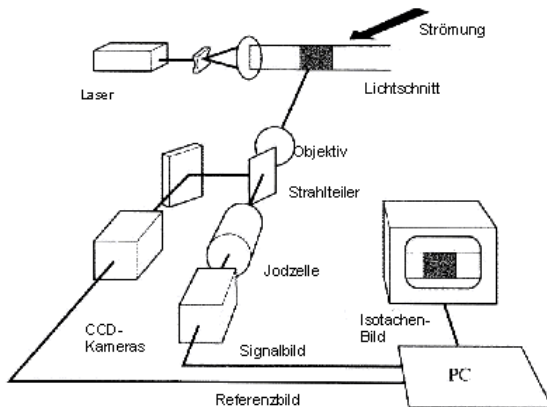


Abbildung1: DGV-Geschwindigkeitsmessung (Prinzipskizze)

Die Anwendung der DGV-Technik unter den heißen Bedingungen einer Brennkammer wird gegenüber den isothermen Randbedingungen erschwert durch eine Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses aufgrund eines erhöhten Hintergrundlichtes. Dieses Falschlicht setzt sich zusammen aus dem Eigenleuchten der Flamme, der Inkandescenz von aufgeheizten Tracer-Partikeln und dem durch gestreutes Laserlicht beleuchteten Bildhintergrund (Wand oder Brennerdüse). Das Flammen- und Partikelleuchten kann durch die Verwendung eines gepulsten Lasersystems in Kombination mit schaltbaren Kameras überwunden werden. Die zusätzliche Verwendung eines Linienfilters vor den beiden Kameras reduziert alle Störlichteinflüsse, die nicht im Durchlassbereich des Filters (532nm) liegen.

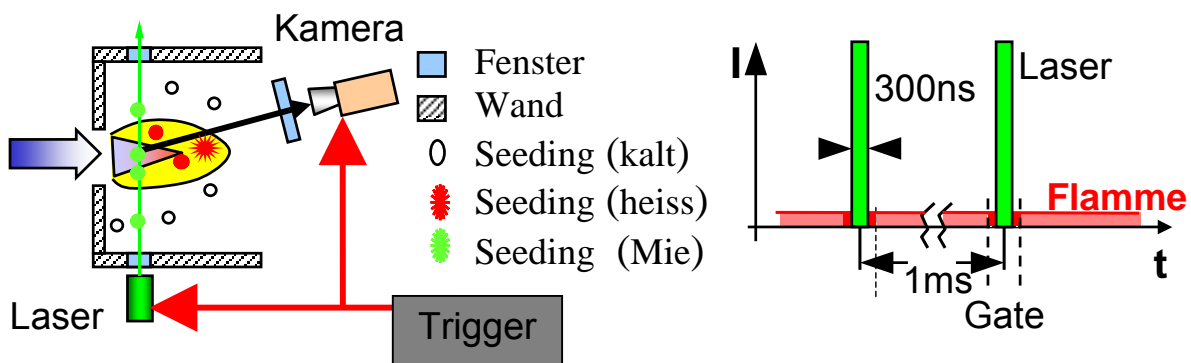


Abbildung 2: Prinzip der heißen DGV-Meßtechnik mit einem Pulslasersystem

Während eines Laserpulses ist die Intensität des durch Mie-Streuung entstandenen Nutzsignals viel größer als das Eigenleuchten von Flamme und Partikel. In der Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Laserpulsen sind die Kameras unempfindlich für Licht, da die Bild-Verstärker abgeschaltet werden. Eine geeignete Trigger-Elektronik synchronisiert den Laserpuls mit den beiden Kameras. Das hierfür verwendete Lasersystem ist ein selbst entwickelter Nd:Yag-Laser, welcher eingehend in [5] beschrieben wird. Die Besonderheit

dieses Lasers ist seine Pulslänge von 300ns (FWHM), die mit einer Fourier-limitierten Linienbreite von 1.5 MHz bei 532nm korrespondiert.

3 Experimenteller Aufbau

Die Daten sollten unter nahezu realistischen Verbrennungsbedingungen aufgenommen werden. Diese beinhalten stark verdrallte Strömungen, zusätzliche eindringende Freistrahlen zur Verbesserung der Mischung und Druckbereiche zwischen 2 und 10bar. Das Experiment wurde am Ein-Düsen-Sektor-Prüfstand des DLR-Institutes für Antriebstechnik aufgebaut (Abb. 3a). Die verwendete Brennkammer ist ein repräsentativer Ausschnittssektor einer ringförmigen Gasturbinen-Brennkammer mit einer Luft/Treibstoff-Düse in der unteren Primärzone. Diese besitzt 3 Fenster. Die Lichtschnitte wurden aus 3 verschiedenen Richtungen normal zur Hauptströmungsrichtung eingekoppelt. Das Kameraobjektiv wurde über einem der Fenster auf der Brennkammerdecke befestigt (Abb. 3b). Stromab der Primärzone wird Sekundärluft zur Mischung von zwei gegenüberliegenden Stellen in die Brennkammer eingeleitet. Diese Sekundärzone besitzt nur 2 optische Zugangsmöglichkeiten durch Fenster auf der Vorder- und Rückseite (Abb. 3c). Um dennoch eine dreikomponentige Geschwindigkeitsmessung zu erhalten, wurde das DGV-Verfahren mit einer PIV-Messung kombiniert. Dazu wird der Lichtschnitt über das obere Deckenfenster eingekoppelt und mit dem DGV- bzw. einem PIV-Kamerasystem durch eines der beiden Seitenfenster in der Sekundärzone aufgenommen. Während PIV die beiden Geschwindigkeitskomponenten in der Lichtschnittebene misst, ergänzt die eindimensionale DGV-Messung die Daten mit der Geschwindigkeit senkrecht zu dieser Ebene. Der gesamte Prüfstand kann in 3 Raumrichtungen verfahren werden, so dass hiermit das gesamte Brennkammervolumen in den beiden Zonen vermessen werden kann.

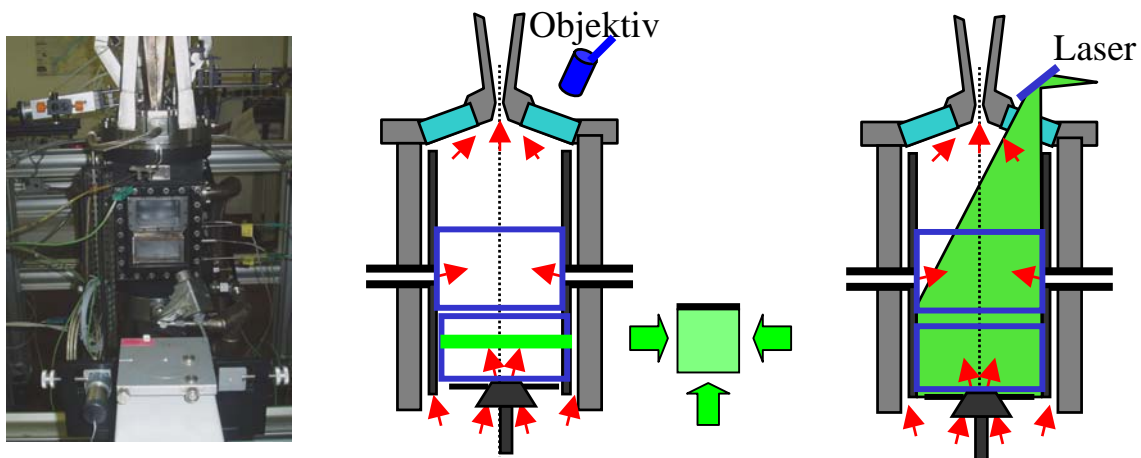


Abbildung 3a,b,c: Ein-Düsen-Sektor-Prüfstand (a) und DGV-Anordnungen für die Primär- (b) und Sekundärzone (c)

Für die Anwendungen unter hohen Temperaturen wurde ein Feststoff-Partikelgenerator eingesetzt, der einen Betrieb bis 20bar erlaubt. Als Seedingmaterial wird Aluminiumoxid verwendet. Es wurde nur die Primärluft mit Partikeln gemischt, da die eindringenden Freistrahlen in der Sekundärzone sich nahe an den Beobachtungsfenstern befinden. Bei zusätzlich mit Tracer-Partikeln angereicherter Sekundärluft war die Verschmutzung der Fenster schnell zu hoch, um Messungen durchzuführen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Zunächst sollen die Ergebnisse der DGV-Messungen in der Sekundärzone vorgestellt werden. Das Hauptproblem bei diesem Experiment war die schnelle Verschmutzung des Beobachtungsfensters durch anhaftende Seedingpartikel während der Messung. Diese

Verschmutzung betrifft zwar die gesamte Brennkammer, ist aber in der Sekundärzone besonders hoch, da dort der Flammenkegel aufplatzt und direkt auf das luftgespülte Fenster trifft. Dagegen war das Flammenleuchten durch das eingesetzte Filter für 532nm bei 2bar gar nicht und bei 10bar mit einer Intensität zu beobachten, die etwa nur 1% des Signalniveaus erreicht. Dies liegt hauptsächlich an der Verwendung eines sehr mageren Brennstoffgemisches.

Um das Problem des dynamischen Hintergrundes zu lösen, wurde die übliche DGV-Aufnahmeprozedur (zuerst ein Hintergrundbild ohne Seeding HGvor, dann das Gesamtbild mit Seeding) um die Aufnahme eines zusätzlichen Hintergrundbildes nach der Signalaufnahme HGnach erweitert. Aus den beiden Hintergrundbildern wurde der arithmetisch gemittelte Hintergrund und die Differenz gebildet. Da die geförderte Seedingmenge zeitliche Schwankungen aufweist, wurde die Rekonstruktion des reinen Signalbildes mit folgender Formel versucht:

$$\text{Signalbild} = \text{Gesamtbild} - (\text{HGvor} + \text{HGnach})/2 + a \cdot (\text{HGnach} - \text{HGvor}) \quad (3).$$

Dabei ist a ein unbekannter Parameter, der so gewählt wird, dass in allen Bildbereichen, wo kein Lichtschnitt vorhanden ist, die Intensität minimal wird (Abb. 4). Wäre die Verschmutzung kontinuierlich und exakt gleichmäßig, so würde $a=0$ diesen Umstand beschreiben. Tritt die Verschmutzung zu Beginn der Messung ein, beispielsweise durch einen erhöhten Anfangsausstoß von Seedingmaterial, so wird $a < 0$. Im Grenzfall $a = -0.5$ wird der vom Gesamtbild abzuziehende Hintergrund = HGnach. Im anderen Fall einer während der Messung erst spät auftretenden Verschmutzung ist $a > 0$ mit dem Grenzfall $a = 0.5$ und der abzuziehende Hintergrund geht gegen HGvor. Für die Messungen in der Sekundärzone lag a im Bereich $[-0.12, -0.04]$, was für eine relativ gleichmäßige Verschmutzung mit einem kleinen Anfangsburst spricht.

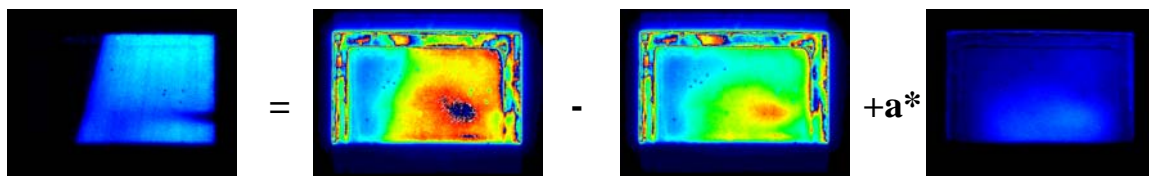


Abbildung 4 : Rekonstruktion des reinen Signalbildes

Am rechten Rand des rekonstruierten Signalbildes, welches in der Mitte der Brennkammer aufgenommen wurde, erkennt man den eindringenden Sekundärstrahl, der keine Seedingpartikel enthält. Das Intensitätsniveau des rekonstruierten Signalbildes liegt bei ca. 300 Counts. Der arithmetische Hintergrund variierte zwischen 500 und 1500 Counts, je nach fortgeschrittener Messdauer ohne zwischenzeitliche Reinigung. Der Differenz-Hintergrund erreichte 50-100 Counts. Aufgrund des ansteigenden Hintergrundes zeigen die resultierenden Bilder der Doppler-Frequenzverschiebung ein umso ausgeprägteres Rauschen, je höher der Hintergrund ist.

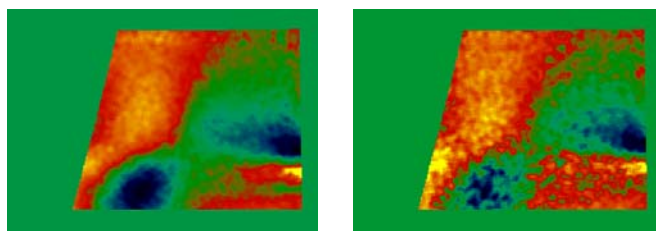


Abbildung 5: resultierende Frequenzbilder vor und nach einem Messdurchgang in der Kontrollebene (Brennkammermitte)

Daher wurde zur Kontrolle der Datenqualität das Volumen nach folgender Prozedur vermessen: Zuerst wurde die Mittelebene vermessen, anschließend weitere Parallelebenen und zuletzt wieder die Mittelebene. Einen Vergleich der Frequenzverschiebungen in der Kontrollebene zeigt Abb. 5. Durch Setzen einer unteren Grenze für das S/R-Verhältnis kann somit die tolerierbare Verschmutzung und die daraus resultierende Gesamtmesszeit für einen Durchgang bestimmt werden. Für die hier vorherrschenden Verhältnisse lag die Anzahl der messbaren Ebenen ohne Reinigung bei 5.

Die Messungen bei 10bar zeigen noch ein weiteres, bekanntes Phänomen – das Beamsteering. Dabei wird der Laserstrahl durch den hohen Druckgradienten an der Grenzfläche Fenster-Brennkammer gestört. Am Boden der Primärzone lässt sich diese Verbreiterung abschätzen, indem man die Bilder bei 2 und 10bar miteinander vergleicht. Während der Strahl unter atmosphärischen Druck und 2bar eine Dicke von etwa 3mm hat, so weitet er sich unter 10bar auf 6mm auf.

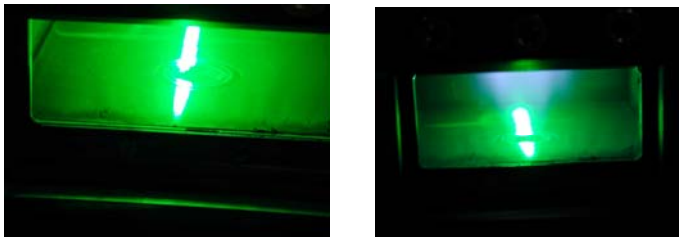


Abbildung 6: Ausmaß des Beamsteerings bei 2 und 10bar (mit Flamme) am Boden der Primärzone (man beachte den ungleichen Maßstab in beiden Aufnahmen)

Als Konsequenz ist das Ergebnis eine Mittelung über eine erhöhte Schichtdicke, was vor allem die Auflösung starker Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zum Lichtschnitt beeinträchtigt.

Die Messungen in der Primärzone zeigen ebenfalls eine Störung der Abbildungsqualität bei 10bar. Während bei 2bar die Brennerdüse scharf abgebildet wird, ist bei 10bar der Einfluss von Brechungsindexvariationen durch Druck- und Temperaturfluktuationen deutlich ausgeprägt.

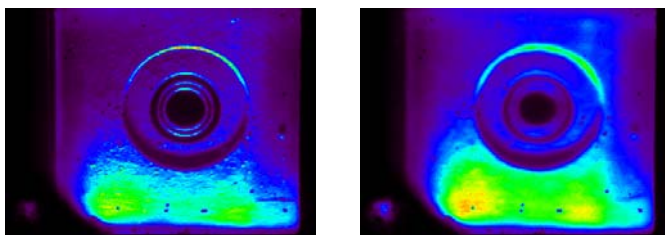


Abbildung 7: Vergleich der Bildschärfe bei 2 und 10bar in der Primärzone

Analog zum Beamsteering führt die entstehende Unschärfe ebenfalls zu einer Reduzierung der gemessenen Geschwindigkeitsgradienten. Die Behandlung des dynamischen Hintergrundes erfolgte analog zu den Messungen mit nur einem Lichtschnitt in der Sekundärzone, wobei in der Primärzone für jede der 3 Lichtschnittrichtungen Hintergrundaufnahmen vor und nach dem Signalbild gemacht wurden. Bei der Auswertung ergab sich, dass die dynamische Verschmutzung weitaus geringer war als in der Sekundärzone, was an dem Öffnungswinkel des Flammenkegels liegt. Das im Randbereich des aus dem Brenner austretenden Wirbels angereicherte Seeding wird an den Fenstern der Primärzone vorbeigeführt und trifft erst im Bereich der Sekundärzone auf die Seitenfenster. Ferner liegt bei dieser Messanordnung das Beobachtungsfenster weit stromab von der Flamme, so dass auch hier keine nennenswerte Zunahme der Verschmutzung festzustellen war. Daher konnte bei der Auswertung der Daten auf eine Anpassung des Parameters a

verzichtet werden. Als Hintergrundbild wurde bei allen Datensätzen der arithmetisch gemittelte Hintergrund verwendet.

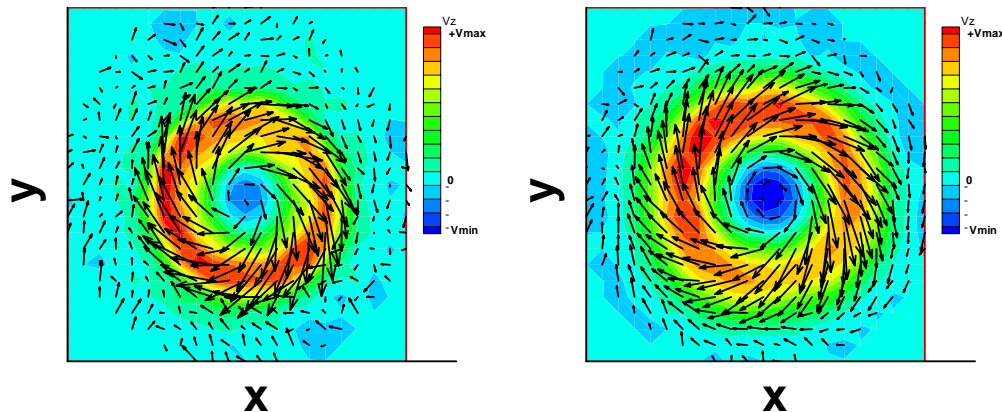


Abbildung 7: 3D-Geschwindigkeitsfelder in der Primärzone (dicht über der Brenneröffnung und Primärzonenmitte)

Zwei typische Geschwindigkeitsfelder in der Primärzone bei 2bar zeigt Abbildung 7. Die Verbreiterung des Wirbels und die Erhöhung der Geschwindigkeit in der Rezirkulationszone mit wachsendem Abstand zur Düse ist deutlich zu erkennen.

5 Zusammenfassung

Es wurden mit DopplerGlobalVelocimetry stationäre Geschwindigkeitsfelder unter realistischen Verbrennungsbedingungen vermessen. Dabei erwies sich diese Technik als robust gegen auftretende Effekte wie Beamsteering und Unschärfe durch Druck- bzw. Temperaturfluktuationen. Das größte Problem stellt die dynamische Hintergrundverschmutzung durch anhaftende Tracer-Partikel während des Messvorgangs dar. Durch die Messung des Hintergrundes vor und nach der eigentlichen Datenaufnahme und einem geeignetem Subtraktionsverfahren gelingt es, die Rohdaten zu rekonstruieren. Somit steht eine Messtechnik zur Verfügung, die auch unter schwierigen optischen Bedingungen Resultate erzielen kann.

6 Literatur

- [1] H. Komine, System for measuring velocity field of fluid flow utilising a laser-Doppler spectral image converter, US Patent 4 919 536, 1990.
- [2] J.F. Meyers, H. Komine, Doppler Global Velocimetry – A new way to look at velocity, ASME Fourth International Conference on Laser Anemometry, Cleveland Ohio, August 1991.
- [3] I. Röhle et al., Recent developments and applications of quantitative laser light sheet measuring techniques in turbomachinery components, Meas. Sci. Technol. 11 (2000), 1023-1035
- [4] M. Seifert et al., Bau einer Kalibriervorrichtung für Absorptionsfilterkennlinien von Jodzellen für die Doppler Global Velocimetry, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik 2003.
- [5] M. Fischer et al., Doppler Global Velocimetry in flames using a newly developed, frequency stabilized, tunable long pulse Nd:Yag laser, 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Session 35, Lisbon, Portugal