

Berichts.-Nr.:

**DLR-IB 224-2011 A 51**

Verfasser:

**Robert Konrath**

Titel:

**Schlussbericht zum Lufo-4 Vorhaben Cryo-PIV  
„Strömungsfeldmessungen bei hohen Reynoldszahlen“**

Datum: 20.12.2010

Auftraggeber:

Auftrags-Nr.:

Vorgesehen für:

**Der Bericht umfaßt:**

35 Seiten einschl.  
2 Tabellen  
26 Bilder  
22 Literaturstellen

Vervielfältigung und Weitergabe dieser Unterlagen sowie Mitteilung ihres Inhalts an Dritte, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung **X** des DLR des Auftraggebers.

**DLR**

**Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
Abteilung Experimentelle Verfahren  
Bunsenstraße 10  
37073 Göttingen  
Germany**



## SCHLUSSBERICHT ZUM LUFO-4 VORHABEN CRYO-PIV

### „STRÖMUNGSFELDMESSUNGEN BEI HOHEN REYNOLDSZAHLEN“

#### **Abstract:**

Es wird die Weiterentwicklung der Particle Image Velocimetry (PIV) zur optischen Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeitsfeldern im Europäischen Transonischen Windkanal (ETW) beschrieben. Der ETW ist neben dem NTF (NASA, Langley) weltweit der einzige Windkanal, der durch Einhaltung der Mach- und Reynoldszahl Strömungen realer Transportflugzeuge korrekt simulieren kann, indem das Strömungsgas auf kryogene Temperaturen von bis zu  $-170\text{ °C}$  und auf erhöhte Drücke von maximal 4,5 bar gebracht wird. Die Messstrecke wird hierbei von einem großen Plenum mit Druckhülle und innenliegender Temperaturisolierung umschlossen. Die damit für eine Anwendung der PIV einhergehenden Probleme wurden in diesem Vorhaben bearbeitet, wie die Erzeugung von Strömungstracern im ETW, die Führung eines energiestarken Laserstrahls zur Messstrecke, die Platzierung von optischen Komponenten in kryogener Umgebung und die Kompensation von optischen und mechanischen Effekten infolge der Temperatur- und Druckänderungen im Windkanalplenum. Das entwickelte CryoPIV-Messsystem wurde am Ende des Vorhabens im ETW bei sub- und transonischen Machzahlen an einem Hochgeschwindigkeitswindkanalmodell und bei hohen Reynoldszahlen an einer Hochauftriebskonfiguration eines realen Transportflugzeugmodells unter industriellen Bedingungen eingesetzt.

#### **DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.**

#### **Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Abteilung Experimentelle Verfahren**

Institutsleiter:

(Prof. Dr. Andreas Dillmann)

Abteilungsleiter:

(Dr. Jürgen Kompenhans)

Autoren:

(Dr. R. Konrath) (D. Otter)

(Dr. R. Geisler) (J. Agocs)

(E. Roosenboom) (D. Pallek)

(J. Quest, ETW)

<b>Datum:</b>	20.12.2010	<b>Abteilung:</b>	Experimentelle Verfahren	<b>Bericht:</b>	224-2011 A 51
<b>Bearbeitet:</b>	Ilka Micknaus				



## Inhalt

<b>I.</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>2</b>
1	Aufgabenstellung	2
2	Voraussetzungen des Vorhabens	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	5
5	Zusammenarbeit	6
	Literatur	7
<b>II.</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>9</b>
1	Erzielte Ergebnisse	9
1.1	Seeding der Strömung (AP1)	9
1.1.1	Einspeisung von Seeding in den ETW	10
1.1.2	Einsatzbereich von Eispartikeln	11
1.1.3	Verfahren zur Generierung von Eispartikeln	12
1.1.4	Alternative Seeding-Substanz	19
1.2	Optische Systeme (AP2 - AP6)	20
1.2.1	Laserstrahlführung	20
1.2.2	Lichtschnittbox	23
1.2.3	Kamerabox	24
1.2.4	Kalibrierung	25
1.2.5	Software	26
1.3	Demonstrationstests im ETW (AP7)	28
1.3.1	Test 1: Hochgeschwindigkeitskonfiguration	28
1.3.2	Test 2: Hochauftriebskonfiguration	31
2	Zusammenfassung und voraussichtlicher Nutzen	34
3	Fortschritte bei anderen Stellen	34
4	Veröffentlichungen	35

# I. Kurzdarstellung

## 1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens ist es, das optische Strömungsmessverfahren der Particle Image Velocimetry (PIV) im Europäischen Transonischen Windkanal (ETW) zur Anwendung zu bringen und somit der Forschung und Luftfahrtindustrie erstmals quantitative Strömungsfelduntersuchungen im Windkanal bei realen Mach- und Reynoldszahlen von Transportflugzeugen zu ermöglichen. Die Aufgabenstellung besteht darin, Weiterentwicklungen bezüglich der PIV-Messtechnik durchzuführen, sowie Voraussetzungen am ETW zu schaffen, die eine Anwendung der Messtechnik unter den besonderen Bedingungen in dem kryogenen Windkanal des ETW ermöglichen. Dies soll am Ende des Vorhabens durch einen Demonstrationsversuch an einem Windkanalmodell einer realen Flugzeugkonfiguration im ETW nachgewiesen werden.

Der ETW in Köln [19] weist zur Simulation der Strömungsbedingungen realer Transportflugzeuge eine Messstrecke mit einem Querschnitt von  $2,4 \times 2 \text{ m}^2$  in Verbindung mit einem leistungsstarken Antrieb von 50 MW auf (Abbildung 1). Als Strömungsmedium wird kaltes Stickstoffgas mit Temperaturen bis herab zu  $-170 \text{ °C}$  verwendet, welches zudem auf einen Druck von bis zu 4,5 bar gebracht wird. Der Umlaufkanal besitzt eine aerodynamische Länge von ca. 142 m. Die Messstrecke wird von einer Druckhülle aus Edelstahl mit einem Durchmesser von max. 10 m (Plenum) umschlossen. Zur Erhaltung der niedrigen Temperaturen wird kontinuierlich flüssiger Stickstoff (LN<sub>2</sub>) in den Windkanalkreis eingespritzt und die inneren Kanalwände sind mit Isolationsmaterial ausgekleidet. Der hohe Verbrauch von elektrischer Energie und flüssigem Stickstoff führt zu sehr hohen Betriebskosten, die ein höchst effizientes Vorgehen bei den Abläufen einer Windkanalmessung erfordern.

Die Particle Image Velocimetry (PIV) [15] ist ein optisches Messverfahren, welches das momentane und auch mittlere Geschwindigkeitsfeld in einer Ebene der Strömung bestimmt. Hierzu wird eine Messebene von dem Licht eines leistungsstarken PulsLasers kurzzeitig (typ. 7 ns) zu zwei kurz aufeinander folgenden Zeitpunkten (typ.  $1 \mu\text{s}$  -  $100 \mu\text{s}$ , entspricht der Messzeit) ausgeleuchtet. Das Licht wird von feinen Partikeln (Durchmesser typ.  $1 \mu\text{m}$ ), die der Strömung beigegeben werden, gestreut und von speziellen CCD-Kameras aufgezeichnet. Aus der Bewegung der Partikel zwischen beiden Laserpulsen wird in einem anschließenden Auswertungsprozess mittels digitaler Bildverarbeitung das momentane Geschwindigkeitsfeld berechnet. Durch eine Aufnahme ganzer Bildserien (typ. 300 Samples mit 15 Hz Aufnahmezeit, 20 sec. Messzeit), kann auch ein mittleres Geschwindigkeitsfeld bestimmt werden. Typischerweise können so ca. 10 000 Geschwindigkeitsvektoren je Messebene und Zeitpunkt innerhalb eines Messfeldes (Größe von wenigen Zenitmetern bis zu einem Meter) bestimmt werden.

Die besonderen Testbedingungen im ETW (kryogenes Testgas, Druckhülle) verhinderten bislang einen Einsatz der PIV-Messtechnik in diesem Windkanal. Die Lösung der bestehenden Probleme, die in diesem Vorhaben bearbeitet wurden, lassen sich wie folgt gliedern:

- Erzeugung von Strömungstracern im ETW
- Führung eines energiestarken Laserstrahls zur Messstrecke
- Unterbringung von optischen Komponenten in kryogener Umgebung
- Kompensation von optischen und mechanischen Effekten infolge Temperatur und Druckänderungen (Laserstrahlnachführung)
- Zuverlässig arbeitende Systeme zur Vermeidung kostenintensiver Windkanalzugänge
- Automatisierung für industrielle Anwendungen

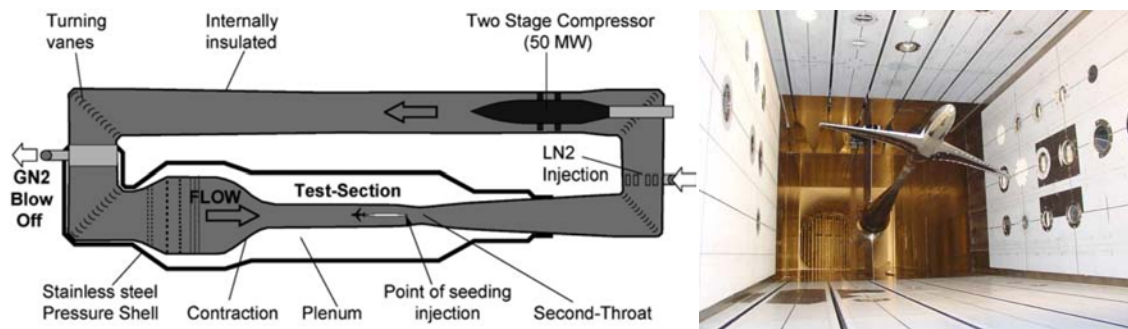


Abbildung 1: Prinzipbild des ETW und Foto mit Blick in die Messtrecke mit einem installierten Vollmodell (Referenzmodell).

## 2 Voraussetzungen des Vorhabens

Ein wichtiges Feld bei der Weiterentwicklung von modernen Verkehrsflugzeugen mit dem Ziel der Steigerung von Effizienz und Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Emissionen ist die Optimierung der Aerodynamik einer Flugzeugkonfiguration. Nachwievor besteht in der aerodynamischen Auslegung ein hohes Verbesserungspotential, wie beispielsweise eine Reduzierung des Luftwiderstandes durch Maßnahmen zur Laminarhaltung der Tragflügelumströmung oder der Erhöhung des maximalen Auftriebes beim Landeanflug durch die Optimierung von Hochauftriebssystemen wie Vorflügel und Klappen. Da die zu Grunde liegende Strömungsphysik, wie z.B. beim laminar / turbulenten Umschlag in der Grenzschicht oder dem Auftreten von Strömungsablösungen, nach wie vor nicht vollständig verstanden ist, bedürfen solche Entwicklungen Untersuchungen und Validierungen an Flugzeugmodellen in Windkanälen. Damit Messdaten an einem verkleinerten Flugzeugmodell auf die Großausführung übertragen werden können, sind neben der geometrischen Ähnlichkeit des Modells weitere Strömungskennzahlen einzuhalten. Die wichtigsten Kennzahlen für Transportflugzeuge sind hierbei die Mach-Zahl, die die Kompressibilität der Strömung beschreibt, und die Reynolds-Zahl, die das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften einer Strömung beschreibt. Die Einhaltung beider Kennzahlen für alle Flugphasen eines Verkehrsflugzeuges (Mach-Zahl 0,15 - 0,9 / Reynolds-Zahl 10 - 80 Millionen) ist derzeit nur in transonischen druckbeaufschlagten kryogenen Windkanälen möglich. Neben dem NTF (National Transonic Facility) bei der NASA in Langley [5][3] leistet dies weltweit nur der ETW (European Transonic Windtunnel) in Köln [19]. Beide Windkanäle basieren auf dem gleichen Arbeitsprinzip, d.h. die Verwendung eines kryogenen Strömungsmediums ( $T_0 \geq 100 \text{ K}$ ) und zusätzlich erhöhtem Gasdruck ( $p_0 \leq 450 \text{ kPa}$  im ETW).

Neben den klassischen Messmethoden zur Strömungsuntersuchung an Flugzeugmodellen in Windkanälen, wie z.B. Messsonden, nimmt die Bedeutung von modernen optischen Messmethoden zunehmend zu, da diese berührungslos arbeiten und damit die Strömung beispielsweise durch das Einbringen von Messsonden nicht beeinflussen. Die meist hohe Flexibilität bei der Anwendung optischer Messmethoden ermöglicht meist detailliertere Einblicke in die Strömungsvorgänge, was zu einem tieferen Verständnis der Strömungsphysik beiträgt und damit neue Optimierungsmöglichkeiten eröffnet. Die Particle Image Velocimetry (PIV) wird bereits in ‚warmen‘ Windkanälen in industriellen Messvorhaben zur Erfassung der Strömungsfelder als Standardmesstechnik eingesetzt, beispielsweise um die Wirkung von Strakes auf einer Triebwerksgondel oder den Wirbelnachlauf von Turboprop-Propellern auf die Tragflügelumströmung zu untersuchen. Aufgrund der hohen Datenmenge und der gleichzeitig erzielbaren Qualität der Messdaten eignet es sich auch zur Validierung numerischer Strömungssimulationen und unterstützt daher auch optimierte Untersuchungsmethoden durch eine geschickte Verzahnung von Strömungssimulationen und Windkanalmessungen [4][12]. Mit dem erfolgreichen Abschluss dieses Vorhabens werden solche Strömungsfelduntersuchungen in einem Windkanal bei realen Mach- und Reynoldszahlen von

Transportflugzeugkonfigurationen weltweit erstmals im ETW möglich, womit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Großausführung direkt gegeben ist.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In den ersten beiden Antragsjahren des Vorhabens standen Weiterentwicklungen zur Adaption der PIV-Messtechnik an den ETW und die Schaffung der technischen Voraussetzungen am ETW im Vordergrund. Im dritten Antragsjahr sollten die Anwendbarkeit der PIV in einem Demonstrationsversuch im ETW aufgezeigt werden. Die Arbeiten sind in folgende Arbeitspakete untergliedert:

#### 1. & 2. Vorhabensjahr

- AP 1: Partikelgenerierung und Partikelzufuhr
- AP 2: Laserpulslichtquelle im Plenum des ETW
- AP 3: Lichtschnittoptik
- AP 4: Kameraaufnahme
- AP 5: Simulation des optischen Aufbaus am ETW
- AP 6: Software für Datenerfassung

#### 3. Vorhabensjahr

- AP 7: PIV-Messung im ETW
- AP 8: Auswertung der Ergebnisse und Berichtslegung

Das Vorhaben wurde weitestgehend planmäßig bearbeitet, wobei die Laufzeit (2007 - 2009) um eine halbes Jahr kostenneutral verlängert wurde, da einerseits Verzögerungen bei der Fertigung von einzelnen Baugruppen des Messsystems aufgetreten sind und andererseits die Einplanung eines Demonstrationsversuches in Abstimmung mit anderen Messvorhaben seitens des ETW erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich war. Dies begründet auch dadurch, dass eigene Mittel im Vorhaben für Windkanalmessungen im ETW nicht zur Verfügung standen, und diese daher mit parallel laufenden Messungen anderer Projekte kombiniert werden mussten.

Im Verlauf des Vorhabens hat sich der Arbeitsumfang in den einzelnen Arbeitspaketen teilweise geringfügig geändert bzw. verschoben. So stellten sich die Entwicklung und der Aufbau der einzelnen Module für die Aufnahme der Lichtschnittoptik (AP3) und für die Kameras (AP4) als etwas zeitaufwändiger heraus. Dies konnte jedoch durch Verringerung der Anteile aus AP5 kompensiert werden, da sich diese Thematik als weniger problematisch herausstellte. Darüber hinaus wurden die Arbeiten in AP1 auf die gesamte Vorhabenslaufzeit ausgedehnt (z.T. aus Eigeninteresse selbst finanziert), da sich das Seeding im ETW als eines der wichtigsten Kernprobleme beim Einsatz der PIV herausstellte. Hier wurden auch über die vorgesehen Seeding-Tests in dem verkleinerten Pilotwindkanal (PETW) hinaus weitere Tests durchgeführt, wie z.B. im kryogenen Niedergeschwindigkeitskanal des DNW-KKK im Rahmen parallel laufender Messprojekte (DLR finanziert). Hier stand insbesondere der Einsatz eines alternativen Seeding-Materials im Fokus, welches einige Probleme der bestehenden Verfahren unter Verwendung von feinsten Eispartikeln beseitigt und daher die Qualität der Messergebnisse verbessert. Der Nachweis, dass dieses neue Seeding-Material im ETW einsetzbar ist, konnte während der Laufzeit dieses Vorhabens jedoch nicht mehr erbracht werden.

Es wurden zwei Demonstrationstests im ETW im ersten Halbjahr 2010 durchgeführt. Der erste Test wurde aus zusätzlichen Mitteln des DLR und des ETW finanziert. Hier wurden erstmalig PIV-Messungen im ETW unter kryogenen Bedingungen und bei sub- und transonischen Machzahlen durchgeführt. Vermessen wurde das Geschwindigkeitsfeld des Flügelspitzenwirbels stromab des ETW-Referenzmodells. Ein zweiter Demonstrationsversuch fand an einem Halbmodell einer realen Hochauftriebskonfiguration statt, finanziert durch den ETW. Hier konnten PIV-Messungen im Tragflügelnachlauf im Bereich der Nacelle erfolgreich bei kleiner Mach-Zahl unter kryogenen Bedingungen und mit erhöhtem Druck durchgeführt werden. Somit konnte die Anwendbarkeit der PIV an zwei typischen Messfällen im ETW demonstriert werden, d.h. an einer Hochgeschwindig-

keitskonfiguration bei transonischen Machzahlen sowie an einer Hochauftriebskonfiguration bei subsonischer Machzahl und hohen Reynoldszahlen. [12]

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

In den letzten Jahren besteht seitens der europäischen Luftfahrtindustrie und der Luftfahrtforschung das Bestreben, den ETW für intensive Strömungsuntersuchungen verstärkt einzusetzen [14][19], da neben dem NTF in Langley nur hier die wichtigen Strömungskennzahlen der Mach- und Reynoldszahl für Transportflugzeuge korrekt simuliert werden können. Als Beispiele einer Einbindung des ETW in Forschungsprojekte sind hier auf europäischer Ebene HIRETT, EUROLIFT I/II, REMFI, M-DAV, FLIRET und Desireh sowie auf nationaler Ebene Lufo (z.B. HINVA) zu nennen. Gleichmaßen steigt der Wunsch nach dem Einsatz von modernen optischen Messmethoden im ETW, um so wichtige Details der Strömung an Tragflügelkonfigurationen zu erhalten. Als Beispiel sei hier die Temperature Sensitive Paint (TSP) Technik zur Bestimmung der laminar / turbulenten Transitionslagen in der Grenzschicht eines umströmten Tragflügels genannt, die in den letzten Jahren vom DLR für den ETW weiterentwickelt wurde und bereits als Routine-Messtechnik im ETW angeboten werden kann [2]. Nicht standardmäßig verfügbar im ETW sind hingegen Messmethoden zur Bestimmung von Strömungsfeldern, d.h. Informationen aus dem Strömungsfeld abseits des umströmten Windkanalmodells lagen in der Regel nicht vor. In konventionellen Windkanälen sind hier die klassischen Messmethoden wie Pitot-Messsonden oder die Hitzdrahttechnik zu nennen, die jedoch selbst in industriellen Windkanälen zunehmend von der PIV-Messtechnik ersetzt werden [8]. Die Vorteile der PIV-Messtechnik sind die flächige Erfassung von momentanen Geschwindigkeitsfeldern, sodass ein zeitaufwendiges Abtasten eines ganzen Messfeldes entfällt. Darüber hinaus arbeitet die PIV als optisches Messverfahren berührungslos und die Strömung selbst wird nicht durch das Einbringen von Messsonden gestört. Aus den mit der PIV erhaltenen Geschwindigkeitsdaten können auch abgeleitete Größen wie die Wirbelstärke oder Strömungscharakteristika wie z.B. die Stärke (Zirkulation) von einzelnen Wirbeln bestimmt werden, die eine detaillierte und quantitative Bewertung von vorliegenden Strömungen zulassen [9][11]. Solche Untersuchungen mit der PIV können z.B. zur Analyse und Optimierung der Strömung in Spalten der Vorflügel und Klappen [1], der Wirkung von Strake-Wirbeln [20] oder Propeller-Nachläufen [12][17] auf die Tragflügelumströmung, Interferenzen zwischen Rumpf und Flügel bzw. zwischen Flügel und Flügelanbauten, die Ausgestaltung von Wing-Tips zur Reduzierung des induzierten Widerstandes oder die Wirksamkeit von Ruderausschlägen beim Auftreten von Strömungsablösungen zum Inhalt haben, bei denen es sich auch um Strömungsphänomene handelt, die mit numerischen Strömungs-Simulationen (CFD) nach heutigem Stand nicht zuverlässig erfassbar sind und daher den Wunsch nach PIV-Messungen im ETW auf Seiten der Luftfahrtforschung (HINVA, Desireh), den Windkanalbetreiber (ETW) und den Flugzeugherstellern bestärken.

Aufgrund der schwierigen Randbedingungen sind PIV-Messungen im ETW bzw. dem NTF bislang nicht durchgeführt worden. Nach dem Kenntnisstand des Antragstellers waren die wesentlichen Inhalte des Vorhabens nicht Gegenstand anderweitiger Forschungen / Entwicklungen / Untersuchungen / Patente. Es ist dem Antragsteller ebenfalls nicht bekannt, dass Schutzrechte oder Schutzrechtsanmeldungen bestehen, die einer Ergebnisverwertung entgegenstehen. Der überwiegende Teil von Arbeiten, an die in diesem Vorhaben angeknüpft werden konnte, wurde auf Seiten der Vorhabenspartner durchgeführt. Dies bezieht sich allgemein auf Erfahrungen bei der Anwendung der PIV-Messtechnik in industriellen Windkanälen bei sub- und transsonischer Anströmung [8], die den hohen Windkanalkosten Rechnung tragend effizient durchgeführt werden müssen und daher hohe Anforderungen an die Robustheit der mobil auszuführenden Messsysteme stellen. Darüber hinaus bestanden durch die Entwicklung anderer optischer Messtechniken im ETW, wie beispielsweise der TSP-Technik [2][14], Erfahrungen bei dem Betrieb von optischen Komponenten (Kameras) in kryogener Umgebung durch eine Unterbringung in wärmeisolierten und beheizten Gehäusen. Ebenso wurde eine Nachführung von Laserstrahlen bereits in dem transonischen Windkanal des DNW-TWG realisiert, die allerdings manuell durchgeführt wurde. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen druckbeaufschlagten



Windkanal mit Plenum, wo Strahlablenkungen infolge von Druckänderungen auftreten [18][11]. Erfahrungen mit Seeding von kryogenen Strömungen bestanden bei PIV-Anwendungen im DNW-KKK [16][11]. Der Niedergeschwindigkeitskanal (kleine Machzahl) wird ebenfalls mit kaltem Stickstoffgas betrieben, jedoch ohne Druckerhöhung, wodurch der maximale Reynoldszahlbereich eingeschränkt ist. Das hier verwendete Seeding-Material (Olivenöl) kann im ETW allerdings nicht zum Einsatz kommen, da im ETW die Gefahr einer Beschädigung des innenliegenden Isolationsmaterials besteht. Seedingtechniken mit Eispartikeln wurden erstmals in Verbindung mit einer Machbarkeitsstudie [22] zur Global-Doppler Velocimetry (GDV) im ETW eingesetzt. Bei der GDV handelt es sich ebenfalls um ein optisches Verfahren zur flächigen Bestimmung von Geschwindigkeiten. Jedoch können nur zeitlich gemittelte Strömungsfelder gemessen werden, da hier ein Dauerstrichlaser zur Ausleuchtung der Messebene verwendet werden muss, der über optische Fasern von außen durch das Plenum zur Messtrecke geleitet werden konnte. Dies ist mit den leistungsstarken Pulslasern für die PIV nicht möglich, da die optischen Fasern aufgrund der hohen Leistungsdichten zerstört werden. Die GDV-Messungen lassen keine eindeutigen Rückschlüsse auf die während dieser Studie erzielten Strömungstracergrößen zu, und somit sind Aussagen, inwieweit das verwendete Seeding für die PIV geeignet ist, nicht möglich. Darüber hinaus wurde von Vereisungsproblemen während dieser Tests im ETW berichtet. Im Unterschied zur PIV werden für die GDV meist sehr hohe Partikeldichten benötigt. Obwohl während dieser Tests erfolgreich Geschwindigkeiten gemessen werden konnten (erstmalig im ETW), wurde dieses Messprinzip aufgrund der aufgetretenden Vereisungsprobleme nicht weiter verfolgt. Auch in dem Lufo-Vorhaben AIRWI [7] wurde die gleiche Seeding- und Laserlichtschitttechnik eingesetzt, um anhand von Visualisierungen die Positionen der Flügelspitzenwirbel im Nachlauf eines Halbmodells zu bestimmen, allerdings ohne Aussagen bezüglich der Stärke der Wirbel, da mit der Lichtschnitttechnik keine Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt werden können. Letztlich haben die Erfahrungen aus insbesondere diesen beiden Projekten zu dem „Cryo-PIV“ Vorhaben geführt, mit dem Ziel, die PIV auch im ETW einsetzbar zu machen, da sich dieses Verfahren bereits in anderen industriellen Windkanälen bewährt hat.

## 5 Zusammenarbeit

Während des Vorhabens wurde mit Airbus-D bei der Durchführung des zweiten Demonstrationstests zusammengearbeitet. Von Airbus wurde das Windkanalmodell zur Verfügung gestellt.

## Literatur

- [1] Arnott AD, Schneider G, Neitzke K-P, Agocs J, Schröder A, Sammler B, Kompenhans J, (2004) Detailed characterisation, using PIV, of the flow around an airfoil in high-lift configuration. In: Particle Image Velocimetry: Recent Improvements, Stanislas, Westerweel, Kompenhans (eds.), Springer S. 31 – 42
- [2] Fey U, Egami Y, Engler RH (2006) „High Reynolds number transition detection by means of temperature sensitive paint“, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9 - 12 Januar, Reno (NV), AIAA Paper 2006-514
- [3] Gatlin GM, Tomek WG, Payne FM, Griffiths RC (2006) Recent improvements in semi-span testing at the National Transonic Facility, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9 - 12 Januar, Reno (NV), AIAA Paper 2006-508
- [4] Hummel D (2005) The Second International Vortex Flow Experiment (VFE-2) - Objectives and first results, Proc. of 2nd Int. Symp. on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics, Shrivenham (UK), Sept. 6-7
- [5] Igoe WB (1980) Characteristics and status of the U.S. National Transonic Facility, AGARD Lecture Series No. 111 „Cryogenic Wind Tunnels“, AGARD-LS-111, pp. 17-1 – 17-11
- [6] Kähler CJ, Sammler B, Kompenhans J (2002) Generation and control of tracer particles for optical flow investigations in air, Experiments in Fluids 33, pp. 736–742
- [7] Klinge F, Pallek D (2006) AIRWI-Abschlussbericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR-IB-224-2006-C30
- [8] Kompenhans J, Raffel M, Dieterle L, Dewhirst T, Vollmers H, et al. (2007) Particle Image Velocimetry in Aerodynamics: Technology and Applications in Wind Tunnels. Journal of Visualization 2: 229-244
- [9] Konrath R, Schröder W (2000) Stereoscopic Particle-Image Velocimetry (PIV): A new approach using telecentric lenses. Proc. of 10th Int'l Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 10-13 July, Paper 6.3
- [10] Konrath R, Pallek D, Mattner H, Carmer CF v. (2009) Analysis of flow field measurements obtained in a large tow tank regarding the decay of wake vortices in the far-field for two- and four-vortex systems. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, FL (USA), AIAA-Paper 2009-342
- [11] Konrath R, Klein Ch, Schröder A, de Groot K (2009) Experimental investigations on the VFE-2 configuration at DLR, Germany. In Understanding and Modeling Vortical Flows to Improve the Technology Readiness Level for Military Aircraft, RTO Technical Report TR-AVT-113, pp. 19-1 to 19-42, ISBN 978-92-837-0073-9
- [12] Konrath R, Otter D, Geisler R, Agocs J, Mattner H, Roosenboom E, Fey U, Quest J, Kühn Ch (2010) Adaptation of PIV for application in cryogenic pressurized wind tunnel facilities at high Reynolds numbers. Proc. of 15th Int'l Symp. on Applications Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 05-08 July, Paper 1572
- [13] Pallek D, von Geyr H, Schröder A (2008) Experimental and numerical study on the flow behind a TPS, Proc. of 14th Int'l Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 07-10 July, Paper 1333
- [14] Quest J, Leuckert J, Fey U, Konrath R, Egami Y (2008) Development & application of modern measurement techniques for pressurized cryogenic wind tunnels, Proc. of 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2008, Anchorage (Alaska, USA), 14 - 19 September, Paper 261, pp 1-12
- [15] Raffel M, Willert CE, Wereley ST, Kompenhans J (2007) Particle Image Velocimetry - A Practical Guide, 2nd Ed., Springer Berlin, ISBN 978-3-540-72307-3

- [16] Richard H, Becker W, Loose S, Thimm M, Bosbach J, Raffel M (2003) Application of Particle Image Velocimetry under cryogenic conditions. In: 20th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities ICIASF'03, 25. – 29. August, Göttingen, Germany
- [17] Roosenboom EM, Heider A, Schröder A (2009) Investigation of the propeller slipstream with Particle Image Velocimetry, *Journal of Aircraft* 46: 442-449
- [18] Sammler B, Schröder A, Arnott A, Otter D, Agocs J, Kompenhans, J (2003) Vortex investigations over a rolling delta wing model in transonic flow by stereo PIV measurements, In: 20th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities ICIASF'03, 25. – 29. August, Göttingen, Germany, Paper 10.3
- [19] Schimanski D, Jansen U, Ansell DM (2005) Advanced measurement techniques at high Reynolds number testing, *Proc. 21st International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, ICIASF '05 Record, Sendai, Japan, 29.8.–1.9.*, pp. 54 – 63
- [20] Schröder A, Agocs J, Heider A, Konrath R (2005) Investigations of strake wake vortices in a high-lift-configuration using Stereo-PIV, *Proc. of DLR/ONERA Meeting, 05-06 April, Lille (France)*
- [21] Taylor PA, Baibakov K, Brown S, Hecht MH, Hudson TL, Li P-Y, Langed CF, Prietod L, Savelyev S (2006) On the sublimation of ice particles on the surface of Mars: with applications to the 2007/8 Phoenix Scout mission, *Icarus* 181: 375–387
- [22] Willert C, Stockhausen G, Beversdorff M, Klinner J, Lempereur C, Barricau P, Quest J, Jansen U (2005) Application of Doppler global velocimetry in cryogenic wind tunnels, *Experiments in Fluids* 39: 420–430

## II. Eingehende Darstellung

### 1 Erzielte Ergebnisse

Die ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist in den folgenden Kapiteln untergliedert in Anlehnung an die festgelegten Arbeitspakete des Vorhabens (s. Kapitel I.3).

#### 1.1 Seeding der Strömung (AP1)

Die Particle Image Velocimetry benötigt zur Bestimmung lokaler Strömungsgeschwindigkeiten Marker im Strömungsmedium, deren Bewegung mit CCD-Kameras in der ausgeleuchteten Messebene optisch zu mindestens zwei Zeitpunkten festgehalten wird. Die Markerbewegungen werden mit korrelationsbasierten Auswerteverfahren in den digitalen Bildern bestimmt und über den Abbildungsmaßstab sowie der Zeitdifferenz in Geschwindigkeiten umgerechnet. Bei der Erzeugung von Strömungsmarkern ergeben sich für qualitativ hochwertige PIV-Messungen einige Anforderungen an das „Seeding“ der Strömung mit feinsten Partikeln bzw. Tröpfchen:

- Partikelgröße von ca. 1  $\mu\text{m}$   
diese Partikelgröße stellt einen Kompromiss zwischen einem guten Strömungsfolgeverhalten der Partikel auch bei transsonischen Strömungen und einer hinreichend hohen Lichtstreuung dar, sodass die Partikel von einer Kamera noch registriert werden können
- Partikelkonzentration von ca. 1-10 Partikel /  $\text{mm}^3$   
die Konzentration der Partikel bestimmt die maximal mögliche räumliche Auflösung der Messung, diese hängt auch von der Pixelanzahl der Kamera und der Messfeldgröße ab
- Homogenität hinsichtlich Partikelverteilung und Größenverteilungen  
die Auswertung der Partikelbilder erfolgt durch eine Zerlegung in Kleinfelder, in denen die Partikelbewegungen als Mittelwert bestimmt werden. Idealerweise entspricht das gemessene Geschwindigkeitsfeld einer räumlichen Tiefpassfilterung, wobei die Grenzfrequenz durch die Kleinfeldgröße bestimmt ist. Ist die Verteilung innerhalb der Kleinfelder inhomogen, d.h. es existieren ungleichmäßig verteilte oder vereinzelt unterschiedlich helle Partikel, weicht der statistische Mittelwert zu sehr von dem tatsächlichen ab, und es kommt zu einem erhöhtem Rauschen in den Geschwindigkeitsfeldern

Zu diesen Anforderungen von Seiten der Messtechnik kommen weitere durch die Erfordernisse am ETW hinzu:

- Chemische Eigenschaften  
die Seeding-Substanz muss ungiftig sein und darf Materialien im ETW, wie z.B. die innenliegenden Schaumstoffmaterialien zur Isolation des Windkanals, chemisch nicht angreifen
- Einsetzbar für möglichst großen Temperatur- und Druckbereich des ETW  
d.h. kryogene Bedingungen, nach Möglichkeit auch unter „warmen“ Bedingungen
- Die Substanz muss auf wirtschaftliche Art und Weise wieder aus dem Kanal entfernbar sein  
Hier besteht die Gefahr, dass die Seeding-Substanz nach einer Ablagerung in offenporige Schaumstoffmaterialien eindringt, dort verbleibt und die Isolationswirkung mindert. Zudem müssen ölige Rückstände auf Wänden und Böden auch aus Gründen der Sicherheit vermieden werden

Insbesondere der letzte Punkt verhindert den Einsatz von Standard-Seeding-Substanzen der PIV im ETW, wie z.B. DEHS, das in Form von 1  $\mu\text{m}$ -Tröpfchen in konventionellen Windkanälen eingesetzt wird. Die Tröpfchen selbst werden z.B. durch am DLR entwickelte Laskin-Generatoren

erzeugt, die auch die hohen Mengen für Applikationen in größeren Windkanälen bereitstellen können. Diese Technik findet auch Anwendung bei den kryogenen Bedingungen in dem Niedergeschwindigkeitskanal des DNW-KKK, allerdings wird hier anstelle von DEHS normales Speiseöl verwendet, da DEHS die im DNW-KKK verbauten Dichtungsmaterialien angreift [16][11]. Diese Öle bzw. DEHS sind jedoch aus dem Windkanalkreislauf des ETW nicht wieder zu entfernen. Insbesondere in Totwassergebieten kann sich das Seeding-Material ansammeln und in das offen liegende Schaumstoffmaterial eindringen. Ein Austausch des Schaumstoffmaterials (ca. 500 m<sup>2</sup>) bzw. entsprechende Schutzmassnahmen sind mit sehr hohen Kosten verbunden. Bislang ist es daher nur möglich, im ETW mit Eispartikeln (H<sub>2</sub>O) zu arbeiten, mit den folgenden Vor- und Nachteilen:

- + preiswert, umweltfreundlich
- + ohne großen Aufwand vollständig entfernbar durch Aufwärmvorgang und Trocknungsprozess im ETW
- + einfache Methode zur Erzeugung am ETW vorhanden
- nur möglich unter kryogenen Bedingungen
- Größenverteilungen der erzeugten Eispartikel sind nicht bekannt, Hinweise auf inhomogene Größenverteilungen aus Lufo-4 Vorhaben AIRWI [7], Eignung für die PIV daher ungewiss
- Gefahr von Vereisungen in der Messstrecke bei hohen Mengen (Beobachtungen in [22] sowie im Lufo-4 Vorhaben AIRWI [7])

Zu den Erfahrungen mit Eispartikeln als Seeding im ETW aus der Machbarkeitsstudie zur Global Doppler Velocimetry [22] und dem Lufo-4 Vorhaben AIRWI [7] (Lichtschnitttechnik) ist anzumerken, dass in beiden Projekten zur Ausleuchtung einer Messebene (Lichtschnitt) der Strahl eines Argon-Ionen-Dauerstrichlasers mit 1 Watt Laserlichtleistung zusammen mit einem rotierenden Polygonspiegel verwendet wurde (die optische Einheit zur Lichtschnitterzeugung wurde in [22] entwickelt). Die im Vergleich zu PIV-Pulslasern innerhalb einer kurzen Belichtungszeit zur Verfügung stehende geringe Lichtleistung wurde hier durch hohe Seedingmengen ausgeglichen, sodass es zu Vereisungen in der Messstrecke gekommen ist. Die Demonstrationsversuche im Rahmen dieses Vorhabens (s. Kap. 1.3) zeigen jedoch, dass die für PIV-Messungen notwendigen Seeding-Mengen um Größenordnungen kleiner sind und demzufolge auch während der Tests keine Vereisungen auftraten.

Bezüglich der Seeding-Substanz wurden in dem Vorhaben zwei Wege beschritten. Zum einem wurde das im ETW bereits verwendete Verfahren zur Erzeugung von Eispartikeln (H<sub>2</sub>O) hinsichtlich einer Eignung für PIV-Messungen weiter untersucht bzw. optimiert. Darüber hinaus wurden auch alternative Substanzen ermittelt und getestet. Auf diese Weise konnte einerseits das Risiko für das Vorhaben gering gehalten werden, d.h. das bestehende Verfahren bleibt eine Option als mögliche Seeding-Methode im ETW, und andererseits können bei den Untersuchungen alternative Verfahren mitberücksichtigt werden, die nicht die negativen Eigenschaften von Eispartikeln aufweisen.

### 1.1.1 Einspeisung von Seeding in den ETW

Bei der Entwicklung der Seeding-Verfahren muss die Art der Zuführung bzw. Injektion in den Windkanal mit einbezogen werden. Am ETW wird hierzu am einfachsten eine Bypassleitung verwendet, bestehend aus einer Rohrverbindung, die in der Windkanalhalle unterhalb des Plenums startet, weiter durch die Plenum-Druckhülle bis zur so genannten „Second Throat“ der Messstrecke führt. Dort befindet sich ein in Strömungsrichtung gerichteter Auslass mittig auf der Kanalachse. Die „Second Throat“ befindet sich hinter der Messstrecke und damit stromab des Windkanalmodells, so dass eine Strömungsbeeinflussung durch Injektionen an dieser Stelle ausgeschlossen werden kann. Da das Seeding von dieser Stelle aus einen kompletten Umlauf bis hin zur Messstrecke zurücklegen muss, ist weiterhin gewährleistet, dass eine gute Verteilung der Seedingpartikel vorliegt. Der große Innendurchmesser von 200 mm der Bypassleitung ermöglicht auch die Zufuhr von hinreichend großen Mengen, entsprechend den hohen Volumenströmen im ETW. Die Ruhedrucke  $p_0$  in der Rohrleitung passen sich denen in der Messstrecke an, d.h. alle

Einrichtungen, die an diese Rohrleitung angeschlossen werden, müssen gegen den maximalen Absolutdruck von 4,5 bar arbeiten bzw. hierfür ausgelegt sein.

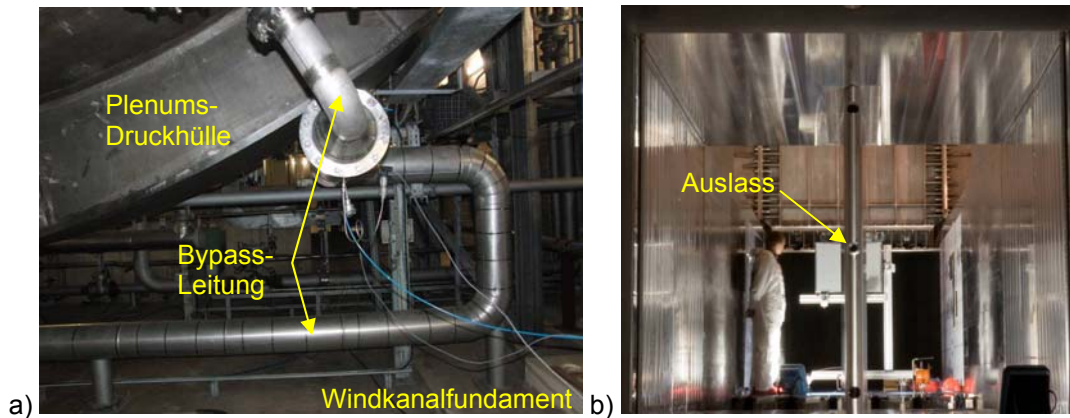


Abbildung 2: Fotos zum Verlauf der Bypassleitung zur Injektion von Seeding in den ETW  
 a) Verlauf außerhalb des Plenums b) Auslass in der „Second Throat“ stromab der Messtrecke.

Eine genaue Vorausberechnung der notwendigen Seedingmengen anhand der geforderten Partikelkonzentration (s.o.) in der Messebene ist schwierig, da eine gewisse Anzahl von Partikeln mit jedem Umlauf durch Ablagerungen am Boden (Setzgeschwindigkeit) bzw. durch ein Auftreffen auf Einbauten wie Umlenkschaufeln, Sieben und Strömungsgleichrichtern verloren gehen, oder im Fall von flüchtigen Stoffen, durch Sublimation und Verdunstung. Desweiteren entweicht in kryogenen Windkanälen ein Teil des Gases durch einen Blow-Off, der den Massenstrom an zugeführten flüssigen Stickstoff kompensiert.

### 1.1.2 Einsatzbereich von Eispartikeln

Abhängig von der Gastemperatur und dem Taupunkt der Stickstoffatmosphäre innerhalb des Windkanals sublimieren die Eispartikel. Um die Lebensdauer von  $1\ \mu\text{m}$  bzw.  $2\ \mu\text{m}$  großen Eispartikeln im Windkanal zu bestimmen, wurde die Sublimationszeit von Eispartikeln innerhalb einer absolut trockenen Stickstoffatmosphäre anhand des von Taylor et al. in [21] beschriebenen Berechnungsverfahren bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt und zeigt die Sublimationszeit, innerhalb welcher die Eispartikel einen Durchmesser von  $0,5\ \mu\text{m}$  unterschreiten, aufgetragen über die Temperatur für verschiedene Drücke zw. 125 kPa und 400 kPa. Die Grenze von  $0,5\ \mu\text{m}$  entspricht einer Partikelgröße, deren Lichtstreuung typischerweise von einem Standard PIV-Messsystem mit den Kameras gerade noch detektiert werden kann. Das Ergebnis zeigt, dass unterhalb von Gastemperaturen von 200 K die Eispartikel sich sehr lange in dem Windkanal halten können. In einem Übergangsbereich zw. 200 K und 240 K reduziert sich die Lebensdauer sehr schnell, sodass sich die Partikel hier nur wenige bzw. einen einzigen Umlauf im Kanal halten und entsprechend hohe Raten bei der Seedinginjektion zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Seedingdichte in der Messtrecke notwendig werden.

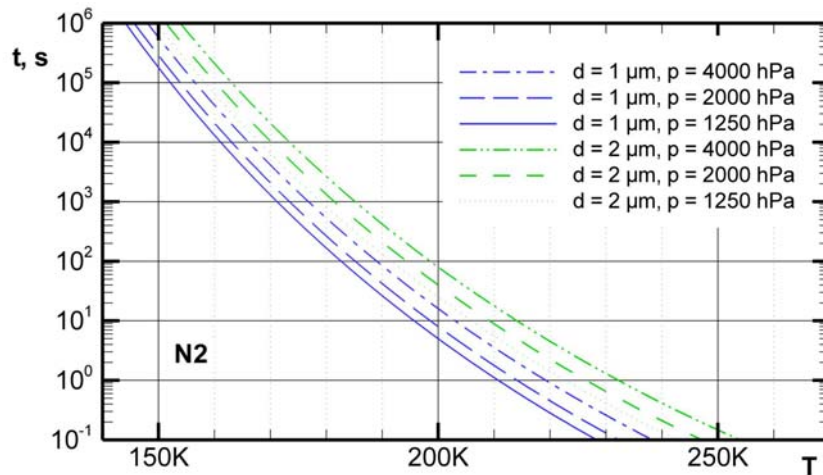


Abbildung 3: Berechnete Lebensdauer von Eispartikeln innerhalb einer trockenen Stickstoffatmosphäre, d.h. 1µm- bzw. 2µm-Eispartikel (H<sub>2</sub>O) unterschreiten einen Durchmesser von 0,5 µm durch Sublimation.

Mit weiter zunehmenden Temperaturen sublimieren die Eispartikel unmittelbar nach der Injektion bzw. Entstehung vollständig, womit die Begrenzung des möglichen Messbereichs gegeben ist. Die Lebensdauer ist dabei höher für größere Eispartikel und für höhere Drücke. Als obere Temperaturgrenze ergibt sich ein Bereich von ca. 220 K bis 240 K, der in Übereinstimmung mit den Testergebnissen aus dem PETW bzw. ETW ist.

### 1.1.3 Verfahren zur Generierung von Eispartikeln

Bei dem Verfahren des ETW, welches in den Demonstrationstests (s. Kap. 1.3) auch zum Einsatz gekommen ist, wird ein warmer und feuchter gesättigter Gasstrom dem kryogenen Stickstoffgas im Windkanal zugeführt. Die vorhandenen Keime in dem Gasgemisch lassen mit dem abrupten Abkühlen des Wasserdampfgasgemisches Eiskristalle entstehen, die durch Wasserdampfdiffusion zunächst weiter anwachsen. Der Vorteil dieser Methode ist die verhältnismäßig einfache Erzeugung von hohen Mengen an Seeding in kurzer Zeit.

Die komplexen physikalischen Vorgänge bei der Entstehung der Eiskristalle, dem Anwachsen und auch der Sublimation innerhalb der trockenen Stickstoffatmosphäre lassen eine gezielte Beeinflussung der Eispartikelgrößenverteilungen über diese Methode jedoch kaum zu. Um dies zu ermöglichen, wurde daher eine weitere Methode untersucht. Diese basiert auf der Erzeugung von Wassertröpfchen mit den Laskin-Tröpfchen-Generatoren des DLR [6]. Diese bestehen aus einem Behälter mit der Seedingflüssigkeit, in die über Laskindüsen Druckluft eingeblasen wird. Die Tröpfchen werden innerhalb von sich bildenden Gasbläschen durch Scherkräfte an den Grenzflächen beider Medien generiert, wobei die Gasblasen in der Flüssigkeit nach oben steigen und das sich bildende Aerosol so zum Austritt gelangt. Die Laskindüsen sind an einzeln zuschaltbaren Düsenstöcken angeordnet. Die 1µm-Wassertröpfchen werden in einer Mischkammer durch Zuleitung eines kalten Gasstroms abgekühlt. Das kryogene Aerosol wird dann der Bypassleitung dem Windkanal zugeführt.

Um die Wassertröpfchengrößen am Austritt der DLR-Tröpfchengeneratoren zu bestimmen, wurden Partikelgrößen-Messungen bei der Firma Sympatec durchgeführt. Hierbei wurde der Druck über die Laskindüsen und die Anzahl der zuschaltbaren Laskindüsen variiert. In Abbildung 4 ist die Messanordnung und ein Ergebnis dargestellt. Die dargestellte Verteilung zeigt, dass Wassertröpfchen mit einer mittleren Größe von 1 µm erzeugt werden können. Nur vereinzelt treten Tröpfchen zw. 2 µm bis maximal 3 µm auf.



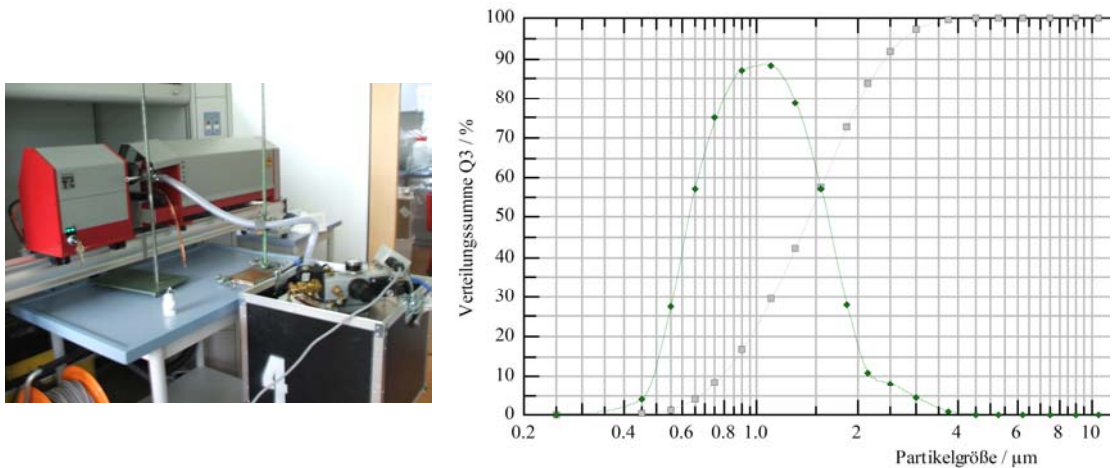


Abbildung 4: Links: HELOS-Messsystem der Fa. Sympatec und DLR-Tröpfchen-Generator  
Rechts: gemessene Größenverteilung der Wassertropfen bei einem Düsen-Druck von 1,6 bar.

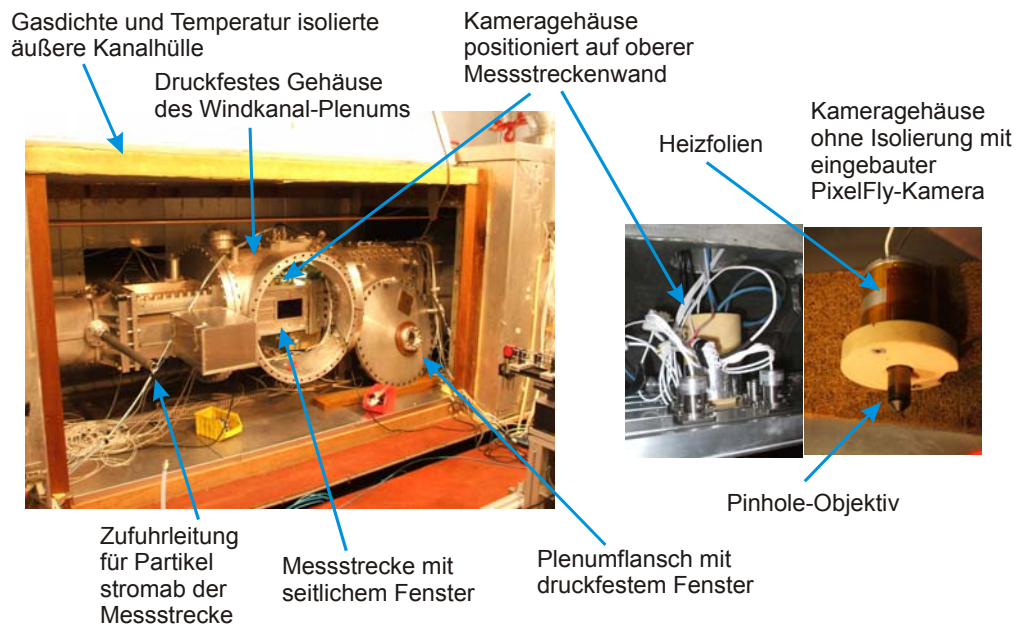


Abbildung 5: Seeding-Tests im PETW, geöffneter Windkanal mit Blick auf die Messstrecke und Unterbringung der Kamera in der oberen Messstreckenwand.

Tests zur Generierung von Eispartikeln aus dem Aerosol der Tröpfchengeneratoren erfolgten in der Klimakammer des DNW-KKK, in dem Pilot-Windkanal PETW des ETW sowie im Windkanal des DNW-KKK. Im Folgenden sollen kurz die Tests im PETW mit den Ergebnissen beschrieben werden.



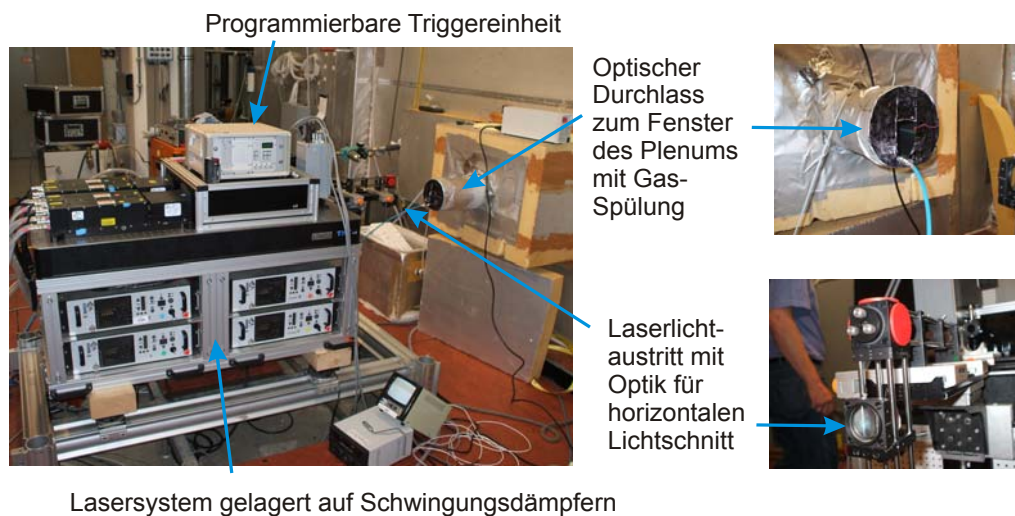
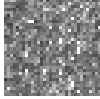
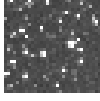


Abbildung 6: Seeding-Tests im PETW: geschlossener Windkanal mit externen Aufbauten (Pulslaser, Triggereinheit und Lichtschnittoptik).

Die Windkanalgeometrie des PETW entspricht der des ETW im Maßstab von 1:8,8. Der PETW weist die gleichen Betriebsparameter hinsichtlich Temperatur, Ruhedruck und Mach-Zahl des ETW auf und wird meist für Vortests von aufwendigen Messaufbauten am ETW eingesetzt. Für die Seedingtests wurde der Kanal ohne Windkanal-Modell betrieben. Ziel der PETW-Tests ist eine Bewertung der Seeding-Eigenschaften für die PIV sowie der Problematik von Vereisungen in der Messstrecke.

Daher wurde ein komplettes PIV-Messsystem aufgebaut, welches in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt ist. In der Mitte der Messstrecke wird ein horizontaler Lichtschnitt erzeugt. Der Lichtschnitt wird von außen durch ein druckfestes Fenster im Flansch des Plenums sowie durch ein Seitenfenster in der Messstrecke erzeugt. Eine kleine Messkamera (PCO-PixelFly) blickt senkrecht von oben auf den Lichtschnitt und wird innerhalb einer temperierten Box oberhalb der oberen Messstreckenwand untergebracht. Aufgrund des kurzen Abstandes zum Lichtschnitt wird ein spezielles Objektiv (Brennweite  $f = 4 \text{ mm}$ ) eingesetzt, welches in eine Bohrung der oberen geschlitzten Messstreckenwand hineinragt. Als Lichtquelle wird ein Pulslaser (CFR-400) mit vier separaten Laserköpfen eingesetzt, der sich außerhalb der äußeren Windkanalhülle befindet und eine Lichtenergie von ca.  $150 \text{ mJ / Puls}$  erzeugt. Die Innenseiten des Windkanals wurden geschwärzt, um störende Lichtreflexionen zu vermeiden. Die Außenseiten des Plenumsfensters wurde mit trockenem Gas beaufschlagt, um deren Vereisung bei niedrigen Kanal gastemperaturen zu verhindern. Ein Luftstrom mit Partikeln oder Tröpfchen wird außerhalb des Kanals generiert und über eine Zuleitung (s. Abbildung 5) dem Gasstrom des Windkanals kurz hinter der Messstrecke zugeführt. Somit durchlaufen die zugeführten Partikel mindestens einen kompletten Umlauf bevor sie die Messstrecke erreichen. Für das Seeding mit DEHS-Tröpfchen im Warmen wie auch für die Generierung von Wassertröpfchen unter kryogenen Bedingungen wurde jeweils ein DLR-Tröpfchengenerator verwendet.

Zur besseren Beurteilung des Seedings mit Eispartikeln wurden zum Vergleich auch DEHS-Tröpfchen unter warmen Bedingungen eingesetzt, wie es bei konventionellen Windkanälen Verwendung findet. Die folgenden Kanalparameter wurden in den PETW-Seedingtests verwendet:

DEHS-Tröpfchen:	$T = 290 \text{ K}$ $\rho_0 = 105 - 170 \text{ kPa}$ $M = 0,2 - 0,8$	
		(M = 0.2)
Eispartikel:	$T = 240 \text{ K} - 140 \text{ K}$ $\rho_0 = 105 - 170 \text{ kPa}$ $M = 0,2 - 0,8$	
		(T = 180 K, M = 0.2)

Für einen direkten Vergleich sind rechts typische Partikelbilder aus den Tests dargestellt. Mit dem DEHS-Seeding wird ein feineres und homogenes Seeding erzielt, wie es in konventionellen Windkanälen auch der Fall ist. Für die Eispartikel sind hinsichtlich der Helligkeit der Partikelbilder größere Variationen zu erkennen, die aus Unterschieden in den Lichtstreuungseigenschaften der einzelnen Partikel resultieren, die allerdings nicht notwendigerweise durch unterschiedliche Partikelgrößen zu erklären sind. Eine weitere mögliche Ursache hierfür kann auch die arbiträre Form der Eiskristalle sein. Die Partikelaufnahmen sind hinsichtlich der Signalstärke ausgewertet worden. In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die zeitlichen Streulichtverläufe nach einer kurzzeitigen Injektion von 5 s des DEHS- bzw. Eispartikel-Seedings für zwei Machzahlen  $M = 0,2$  und  $0,4$  dargestellt. Die DEHS-Tröpfchen sind wesentlich länger mit dem PIV-Messsystem detektierbar. Die unterschiedlichen Maxima für beide Machzahlen entsprechen in etwa den unterschiedlichen Volumenströmen. In Abbildung 7 sind jeweils zwei Kurven dargestellt mit geöffnetem und geschlossenem Blow-Off, woraus sich der Seedingverlust für die Machzahlen und diese Temperatur ablesen lässt.

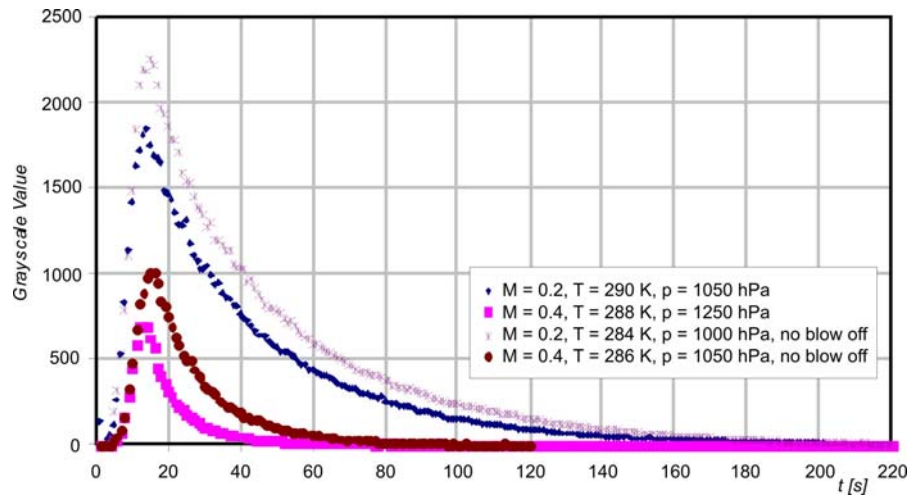


Abbildung 7: Seeding-Tests im PETW, Partikelstreulicht von DEHS-Tröpfchen in der Messstrecke in Abhängigkeit nach 5 s Injektion mit und ohne Gasablass.

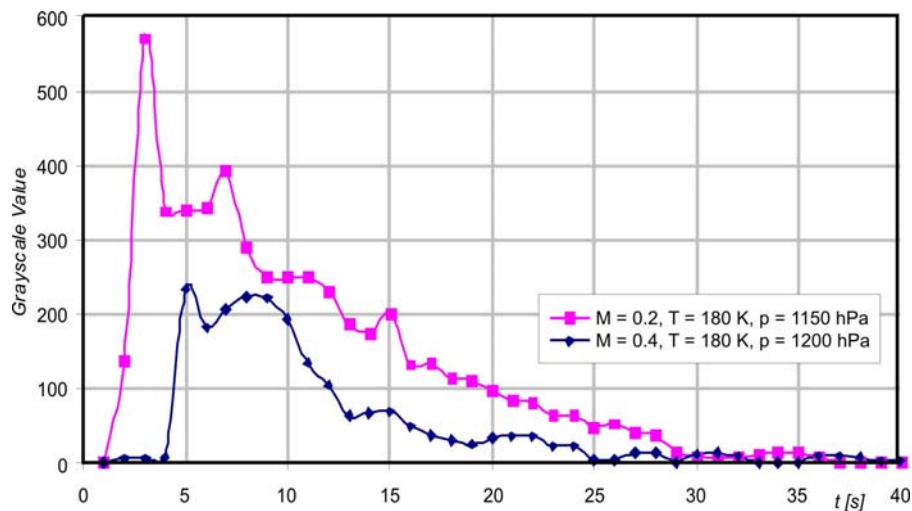


Abbildung 8: Seeding-Tests im PETW, Partikelstreulicht von Eispartikeln in der Messstrecke in Abhängigkeit der Zeit nach 5 s Injektion.

Für alle Machzahlen konnte auch mit den generierten Eispartikeln ein ausreichendes Seeding erzielt werden. Am Ende dieser Tests wurden, trotz der verhältnismäßig geringen zugeführten Menge an  $H_2O$ , Vereisungen in der Messstrecke beim Aufwärmvorgang zwischen den Temperaturen von 200 K und 230 K festgestellt. Daher wurden vom ETW auch Maßnahmen zur Vermeidung von Fenstervereisungen untersucht und eine beheizbare Fensterscheibe für einen Einbau in die ETW-Messstrecke hergestellt.

Für ein Seeding mit Eispartikeln als weitere Variante zum bestehenden Verfahren am ETW wurden für die geplanten Demonstrationstests neue Tröpfchengeneratoren vom DLR entwickelt und gefertigt. Dies einerseits, da die bestehenden Generatoren nicht für die hohen Gegendrücke von maximal 4,5 bar am ETW ausgelegt sind. Andererseits sollte der Volumenstrom der Generatoren erhöht werden, um mit diesem Verfahren ein hinreichendes Seeding für einen möglichst großen Betriebsbereich hinsichtlich Mach-Zahl und Temperatur einsetzen zu können. Zur Abkühlung der  $1\ \mu\text{m}$ -Wassertröpfchen ist am ETW eine Mischkammer realisiert worden, die zwischen den Tröpfchengeneratoren und der Bypass-Leitung geschaltet ist (Abbildung 9).

Im Folgenden sollen zunächst die Ergebnisse aus dem zweiten Demonstrationstest hinsichtlich der erzielten Seeding-Qualität im ETW beschrieben werden. Beide Varianten zur Erzeugung von Eispartikel-Seeding, d.h. die ‚ETW-Methode‘ (s.o.) und die gerade beschriebene Methode unter Verwendung der Tröpfchengeneratoren, wurden hierbei eingesetzt. Allerdings musste die Seeding-Anlage hierzu aufwendig umgebaut werden, was aus Kostengründen nur einmal während der Testzeit möglich war. Begonnen wurde bei einer niedrigen Temperatur von  $T = 125\ \text{K}$  mit dem Seeding über die DLR-Tröpfchengeneratoren. Hierbei wurde mit Vorkühlung, d.h. mit und ohne eingeschalteter LN<sub>2</sub>-Abkühlung (Precooler) in der Mischkammer gearbeitet. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass sich bereits nach kurzer Seeding-Injektion eine hinreichende Seedingdichte in der Messstrecke einstellt. Die generierten Eispartikel halten sich bei niedrigen Temperaturen sehr lange im Windkanal, was in Übereinstimmung mit der theoretisch bestimmten Lebensdauer von Eispartikeln (s. Abbildung 3) ist. Die während der Tests zugeführte Wassermenge ist um Größenordnungen weniger als die, die in den früheren Versuchen mit Eis seeding während der Machbarkeitsstudie zur GDV und dem Luf4-Vorhaben AIRWI mit der Lichtschnitttechnik verwendet wurden. Das dort berichtete Auftreten von Vereisungen in der Messstrecke konnte demzufolge während dieser Tests nicht beobachtet werden.



Abbildung 9: Aufbau zum Seeding des ETW mit Eispartikeln unter Verwendung der DLR Tröpfchengeneratoren.

Die in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellten Partikelbilder sind mit der in Kap. 1.3.2 beschriebenen PIV-Anordnung bei  $M = 0,2$  und  $p_0 = 125 \text{ kPa}$  aufgenommen worden. Es handelt sich um Momentanaufnahmen einer Kamera und eines Zeitpunktes. Es ist jeweils ein Ausschnitt von  $900 \times 900$  Pixel dargestellt, der einer Messfeldgröße von ca.  $37 \times 25 \text{ cm}^2$  entspricht. Da der Lichtschnitt eine Ebene im Tragflügel-Nachlauf einer stark wirbelbehafteten Strömung ausleuchtet, sind einige dunkle Stellen in den Bildern vorhanden, die sich in den Wirbelkernen einstellen. Die Partikel werden hier über die Zeit durch die auftretenden Fliehkräfte nach außen getragen. Die Abbildung 10 zeigt eine Aufnahme bei  $T = 180 \text{ K}$ . Diese Messreihe von über 650 Aufnahmen zeigt ein nahezu ideales Seeding hinsichtlich Größenverteilung und Homogenität. Es ist ein dichtes Seeding zu erkennen, was eine optimale räumliche Auflösung für diese PIV-Anordnung gewährleistet. Im Vergleich zum typischerweise erzielten Seeding mit beispielsweise Öltröpfchen in konventionellen Windkanälen ist jedoch häufig auch eine größere Streuung in der Größe der Partikelbilder infolge des unterschiedlichen Lichtstreuerverhaltens der Eispartikel zu erkennen, was zu den eingangs erwähnten Problemen bei der Auswertung führen kann. Dies zeigt, dass das Seeding mit Eispartikeln aufgrund der komplexen Vorgänge bei der Eispartikelbildung schwer zu kontrollieren ist. Eine Bewertung der Seeding-Technik bzw. bestimmter Maßnahmen fällt auch auf Grund der hohen Lebensdauer der Eispartikel bei den niedrigen Temperaturen schwer. Dies bedarf eingehender Untersuchungen, die auf Grund des limitierten Budgets für die Windkanalmessungen in diesem Vorhaben nicht möglich waren. Die Aufnahme in Abbildung 11 zeigt, dass ein sehr ähnliches Seeding auch mit der ‚ETW-Methode‘ erzielt werden kann. Allerdings musste die Einspritzdauer sehr reduziert werden, um ein ‚Über-Seeden‘ der Strömung zu vermeiden. Bei zu hohen Seedingdichten entstehen Speckle-Muster in den Bildern und die einzelnen Partikel können nicht mehr detektiert werden, was in der Regel dazu führt, dass die PIV-Aufnahmen nicht mehr ausgewertet werden können. Die Abbildung 11 zeigt auch, dass selbst bei einer verhältnismäßig hohen Temperatur von  $220 \text{ K}$  ein für PIV-Messungen gutes Seeding erzeugt werden kann.



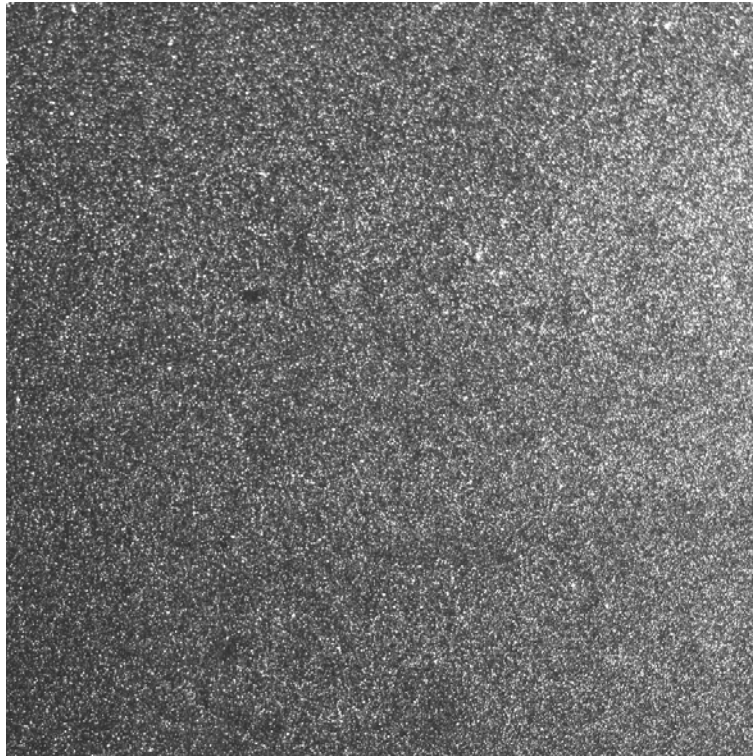


Abbildung 10: PIV-Aufnahme (ca. 37 x 25 cm<sup>2</sup>) von Eispartikeln im ETW, Test 2 / Run 017:  
 $M = 0,2$ ,  $T = 180$  K,  $p_0 = 125$  kPa, DLR Seeding ohne Precooler.

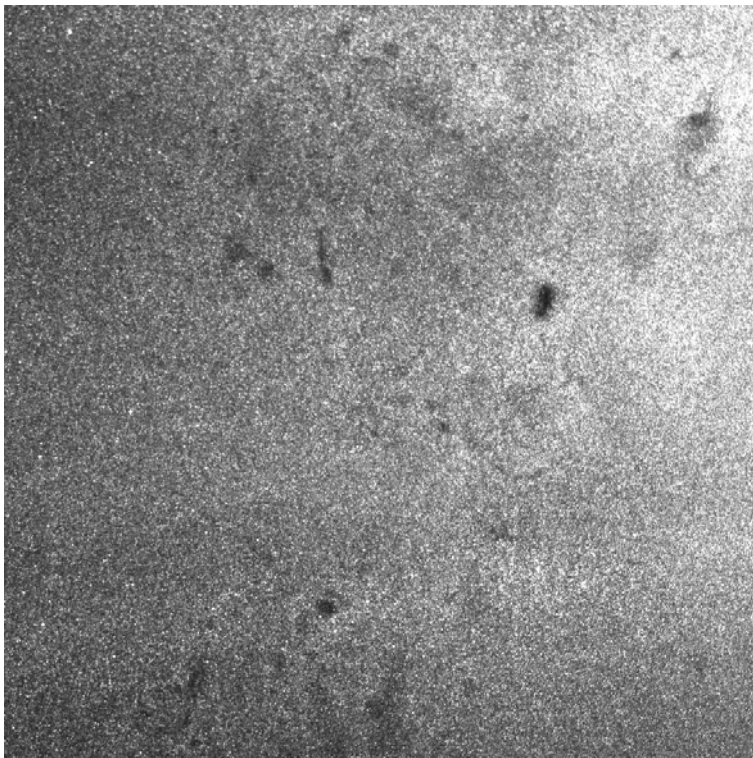


Abbildung 11: PIV-Aufnahme (ca. 37 x 25 cm<sup>2</sup>) von Eispartikeln im ETW, Test 2 / Run 026:  
 $M = 0,2$ ,  $T = 220$  K,  $p_0 = 125$  kPa, ETW Seeding.

Bei der niedrigen Kanaltemperatur von 125 K wurden am ersten Testtag der zweiten Demonstrationstestkampagne auch PIV-Aufnahmen bei höheren Absolutdrücken  $p_0$  aufgezeichnet. Hierbei zeigte sich, dass bei einem Gesamtdruck von  $p_0 = 300$  kPa die Durchmesser der einzelnen Partikelabbildungen auf dem Sensor zunimmt. Da die Bildgröße bei solch feinen Partikeln in der Größenordnung von  $1 \mu\text{m}$  im Wesentlichen beugungsbedingt ist, kann dies auf einen optischen Effekt zurückgeführt werden, bei dem die Auflösung des abbildenden Systems (Objektiv / CCD-Sensor) mit steigendem Gesamtdruck abnimmt. Die Zunahme der Partikelbildgrößen führt bei der PIV-Auswertung zu höheren Messunsicherheiten. Daher sollen zukünftig Maßnahmen untersucht werden, die diesen optischen Effekt beseitigen oder abmildern.

Eine Machzahl-Reihe mit  $M = 0.2, 0.4, 0.6$  und  $0.8$ , die während der ersten Demonstrationstests (Kap. 1.3.1) an einem Hochgeschwindigkeitsmodell durchgeführt werden konnte, zeigte, dass die Anzahl von stärker streuenden Eispartikeln mit der Machzahl zunimmt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass sich größere Eispartikel-Cluster aufgrund der höheren Setzgeschwindigkeiten mit der Zeit am Boden bzw. in den Gleichrichtern ablagern und so aus der Strömung herausgefiltert werden. Dies funktioniert offensichtlich bei den kleineren Mach-Zahlen von  $M = 0,2$  und  $0,4$ . Mit zunehmender Machzahl werden diese Partikel von der Strömung offenbar wieder aufgenommen.

#### 1.1.4 Alternative Seeding-Substanz

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Probleme bei der Erzeugung von für die PIV geeigneten Eispartikeln ( $\text{H}_2\text{O}$ ) waren Anlass, nach alternativen Substanzen zu recherchieren. Hierbei konnte insbesondere eine Substanz identifiziert werden, die als Seeding einige der positiven Merkmale von  $\text{H}_2\text{O}$  und Öl vereint:

- Chemisch nicht aggressiv und inert gegenüber den Isolations-Materialien im ETW
- Vollständige Verdunstung bei höheren Temperaturen ohne Rückstände zu hinterlassen
- Gleichmäßige und homogene Partikelverteilung unter kryogenen Bedingungen
- Erzeugung möglich über das am ETW im Vorhaben realisierte System mit DLR Tröpfchengeneratoren und kryogener Mischkammer

Im Unterschied zum Eis seeding könnten bei einem Einsatz im ETW somit insbesondere die Probleme mit größeren Partikelclustern und dem inhomogenen Seeding beseitigt werden, um so die Qualität der PIV-Messungen hinsichtlich der Anzahl von Fehlvektoren sowie der Messgenauigkeit zu steigern. Aber auch die Gefahr von Vereisungen würde entfallen, auch wenn diese während der Cryo-PIV-Demonstrationstests im ETW nicht zu beobachten waren.

Die Verdunstungseigenschaften des Seedings unter warmen Bedingungen wurden im 1-Meter-Windkanal in Göttingen getestet. Die neue Seeding-Substanz wurde mit einem Standard-Tröpfchen-Generator des DLR zerstäubt. Die Tests zeigen, dass die generierten Tröpfchen unter normalen Umgebungsbedingungen nur über eine kurze Wegstrecke sichtbar sind und einen kompletten Umlauf des verhältnismäßig kleinen Windkanals nicht überstehen bzw. darüber vollständig verdunsten. Um die Eigenschaften der Seeding-Substanz auch unter kryogenen Bedingungen zu ermitteln, wurden hierzu Seedingtests im KKK-Windkanal des DNW durchgeführt. Hierbei konnten die Seeding-Eigenschaften direkt mit denen von Öltröpfchen verglichen werden. Die Tests zeigen, dass mit der neuen Seedingsubstanz unter kryogenen Bedingungen eine sehr gute Seedingqualität erzielt werden kann und Unterschiede zum Seeding mit Öltröpfchen nicht festgestellt werden konnten.

## 1.2 Optische Systeme (AP2 - AP6)

### 1.2.1 Laserstrahlführung

Zur Ausleuchtung der Messebene werden spezielle Puls laser-Systeme verwendet, die genug Lichtenergie innerhalb einer kurzen Zeit (7 ns) emittieren können, damit das geringe Streulicht der ca. 1  $\mu\text{m}$  großen Strömungstracer von den CCD-Kameras noch registriert werden kann, ohne dass Bewegungsunschärfen auftreten. Ein weiterer Grund ist die hohe Kohärenz einer solchen Laserlichtquelle, die eine Fokussierung der Lichtenergie innerhalb einer dünnen Lichtebe ne ermöglicht. Typische Daten eines solchen PIV-Lasersystems, wie es in konventionellen Windkanälen auch eingesetzt wird, sind:

Bauart:	Nd:YAG Festkörperlaser mit zwei Laserköpfen
Pulsenergie:	$\geq 2 \times 300 \text{ mJ}$
Pulsdauer:	typ. 7 ns
Pulsrate:	10 - 30 Hz
Kühlung:	Interner Kühlkreislauf (Wasser) Externer Kühlkreislauf mit Wasser/Wasser- oder Wasser/Luft-Wärmetauscher
Ext. Triggerung:	TTL für Pumplampen und optischem Q-Switch
Temperatempfindlichkeit:	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Laserkopf)
Druckfestigkeit:	unbekannt
Typ. Baugröße (L x B x H):	Laserkopf: 1,2 m x 25 cm x 15 cm 2 Netzteile je 60 cm x 40 cm x 60 cm

Hierbei sind die Laserköpfe meist kompakt aufgebaut und über Versorgungsleitungen mit separaten Netzteilen verbunden. Ein solches Lasersystem innerhalb einer temperierten Box unter kryogenen Bedingungen nahe der Messstrecke im Windkanalplenum unterzubringen wurde vom ETW im Rahmen des Vorhabens geprüft und insbesondere aufgrund der erforderlichen Wasserkühlung des Primärkreislaufes als zu aufwendig angesehen. Daher sollte das Lasersystem außerhalb des Plenums betrieben werden, was auch Wartungsarbeiten an dem Laser während einer Messung ermöglicht. Dies bedeutet, dass der Laserstrahl einen langen Weg von ca. 8 m zurücklegen muss und dabei die Druckhülle und die Temperaturisolation des Plenums durchqueren muss. Die Verwendung von Lichtleitfasern zur Führung des Laserstrahls von außen zur Messstrecke des ETW, wie sie in dem GDV-System am ETW [22] in Verbindung mit einem Dauerstrichlaser verwendet wurden, ist hier aufgrund der hohen Leistungen, die pro Puls von dem Laser abgegeben werden und zu einer Zerstörung der Faser führen würden, nicht möglich. Daher wurde vom ETW ein kleines Fenster im Flansch einer so genannten Penetration eingebaut (Abbildung 12). Dieses muss den Drücken und Temperaturen im Plenum standhalten. Hinter dem Fenster durchläuft der Lichtstrahl den Vorraum der Penetration und gelangt über eine Öffnung in der Isolierung in das Plenum, wo der Strahl weiter auf die Rückseite der Messstrecke trifft und dort über Umlenkspiegel in die Lichtschnittbox geleitet wird. Die Lichtschnittbox wird direkt hinter einem Messstreckenfenster positioniert, durch welches die Optik innerhalb der Box einen dünnen Lichtschnitt in der Messebene der Strömung formt.

Die Messungen im ersten Demonstrationsversuch zeigten, ein Auftreten von starken Schlieren im Laserstrahl, die einzelne „Hot-Spots“ formen, sodass pro Fläche lokal erhöhte Lichtenergien auftreten, die auch zu Schäden an Optiken wie den Siegelbeschichtungen führen können. Aus diesem Grund konnten die Tests nur mit reduzierter Lichtenergie des Puls lasers und, da die Schlieren mit steigendem Totaldruck zunehmen, nur auf einem niedrigen Druckniveau von  $p_0 = 125 \text{ kPa}$  fortgesetzt werden. Die Schlieren konnten bis zu den zweiten Demonstrationsversuchen durch eine verbesserte Lichtstrahlführung soweit unterdrückt werden, dass Schlieren bei den niedrigen Drücken ( $p_0 = 125 \text{ kPa}$ ) nicht mehr und bei einem hohen Druck von  $p_0 = 400 \text{ kPa}$  nur noch schwach auftreten. In Abbildung 13 sind die entsprechenden Laserprofile,

wie sie mit dem Lasermonitor innerhalb der Lichtschnittbox bei  $T = 125 \text{ K}$  aufgenommen wurden, dargestellt.

Neben Schlieren sind auch andere Effekte zu erwarten, die Strahlablenkungen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck hervorrufen, wie sie beispielweise bei PIV-Anordnungen am transonischen Windkanal DNW-TWG in Göttingen beobachtet wurden [18]. Dies ist ebenfalls ein Windkanal mit einem Plenum, in welchem der Druck variiert werden kann. Diese Strahlablenkungen müssen ausgeglichen werden, damit der Laserstrahl auf der Achse der Lichtschnittoptik kurz hinter einem Messstreckenfenster bleibt und sich der Lichtschnitt in der Messstrecke nicht ändert. Die Strahlführung muss dabei auch Bewegungen der Messstrecke relativ zum Plenum infolge von Materialdehnungen kompensieren. Um die vier Freiheitsgrade der Strahlablenkung (Lage und Richtung) zu korrigieren, sind die beiden Umlenkspiegel, die den Strahl an der rückwärtigen Struktur der Messstrecke entlang zur Lichtschnittbox führen, motorisiert.

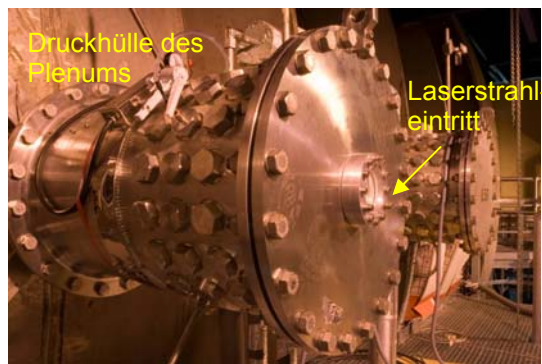


Abbildung 12: Durchlass des Laserstrahls am ETW von außen ins Plenum beim Durchgang durch die Druckhülle und die Temperaturisolation über ein Fenster im Flansch einer Penetration.

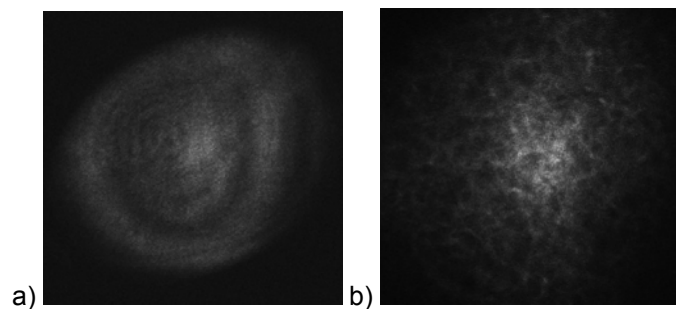


Abbildung 13: Einfluss des Druckes auf Schlieren im Laserstrahl: Laserstrahlprofile, aufgenommen mit dem Laserstrahlmonitor in der Lichtschnittbox während des zweiten Demonstrationstests bei a)  $p_0 = 125 \text{ kPa}$  (ohne Schlieren) b)  $p_0 = 400 \text{ kPa}$  (mit Schlieren).



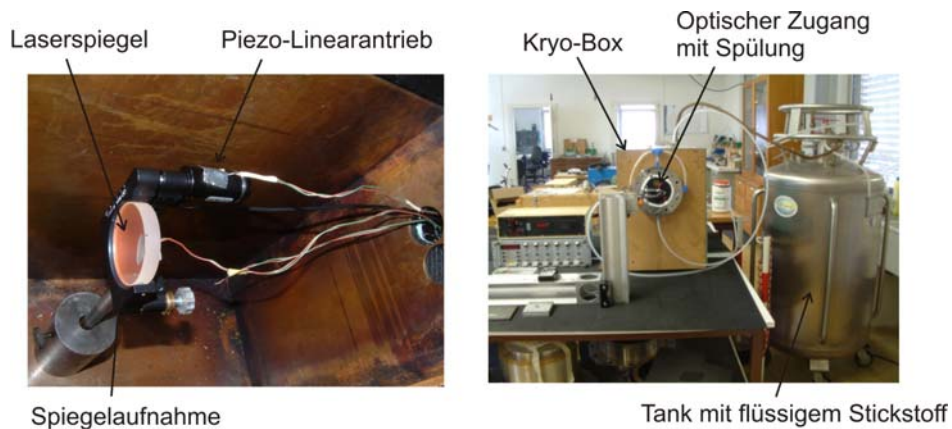


Abbildung 14: Tests der Spiegelverstellung in der Kryo-Box am KRG in Göttingen.

Die kompletten Spiegelstellereinheiten wurden für die eine Positionierung im Plenum bei kryogenen Temperaturen und den sehr hohen Laserlichtenergien speziell entwickelt. Zum Test wurden die Einheiten zunächst in einer Kryobox in Göttingen (Abbildung 14) niedrigen Temperaturen ausgesetzt. Angesteuert werden die Spiegelsteller von einer Elektronik in der Lichtschnittbox über eine speziell entwickelte Software auf einem Rechner in der Messwarte des ETW (MCR, Main Control Room), die auch eine automatische Strahlnachführung erlaubt. Die Strahlabweichungen werden von einem Strahlmonitor in der Lichtschnittbox ermittelt. Abbildung 15 zeigt die Anordnung der beiden Spiegeleinheiten an der Messstrecke des ETW während der Demonstrationstests.

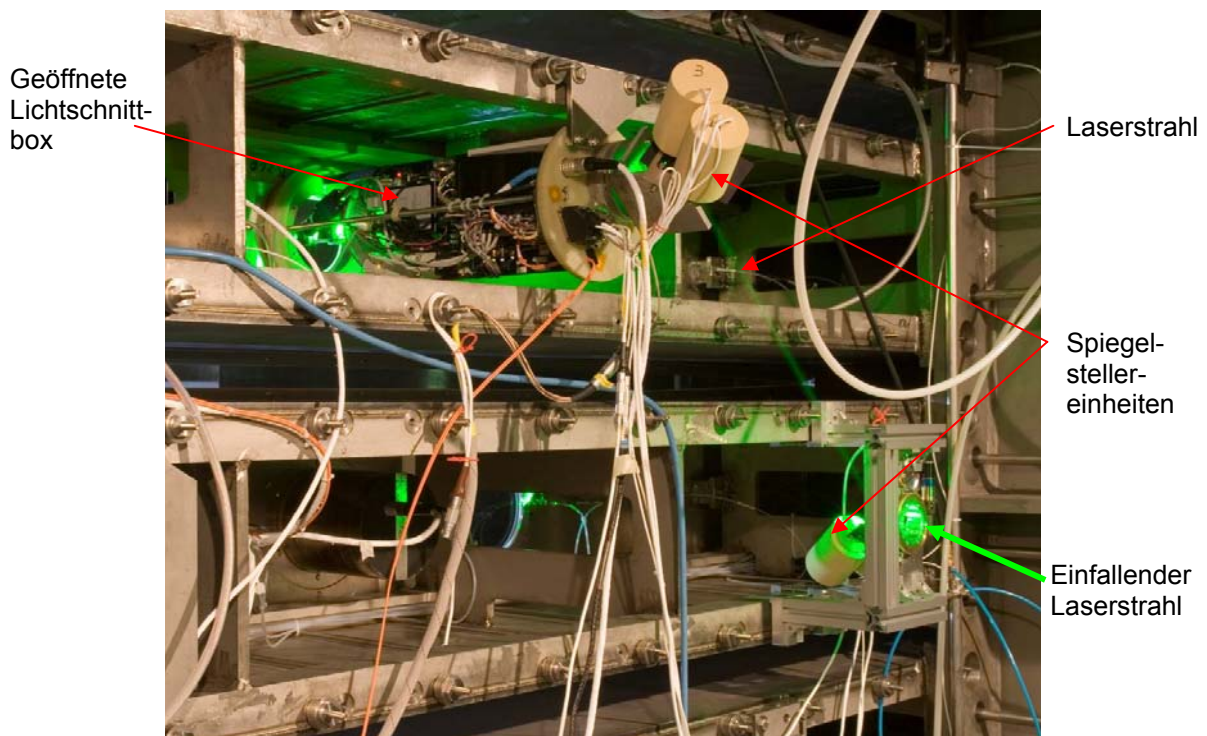


Abbildung 15: Laserstrahlführung an der rückwärtigen Struktur der Messstrecke des ETW über Umlenkspiegel mit jeweils zwei temperierten Piezospiegelstellereinheiten.

### 1.2.2 Lichtschnittbox

Das größte Modul des entwickelten CryoPIV-Messsystems für den ETW stellt die Lichtschnittbox dar. Diese wird direkt hinter ein Messstreckenfenster montiert und formt aus dem einfallenden Lichtstrahl den Lichtschnitt in der gewünschten Messebene in der Strömung am Windkanalmodell. Die Lichtschnittbox besteht aus folgenden Komponenten:

- Strahlmonitor
  - Optische Messung von Lage und Richtung des einfallenden Strahls
  - Aufnahme des aktuellen Strahlprofils und Messung der Lichtenergie
- Lichtschnittoptik
  - Optik zur Erzeugung des Lichtschnittes über Zylinderlinse und Teleskopoptik zur Einstellung der Lichtschnittdicke
- Elektronik
  - Steuereinheit der Spiegelstellereinheiten
  - Steuermodule für Servomotoren (Teleskopverstellung zur Lichtschnittdickeneinstellung, Versteller der Kameramodule)
  - GigE-Server für Ankopplung der Systeme an Steuer-PC über einzelne Ethernet-Glasfaserverbindung zum MCR
  - Heizfolien

Das gesamte System ist als zylindrisches Gehäuse für einen direkten Einbau in die Fensteröffnungen der Messstrecke ausgelegt (s. Abbildung 16). Zwei Halbschalen mit außen liegender Isolation verschließen das Gehäuse. Auf der Rückseite befinden sich Steckverbinder für die Versorgungsleitungen des CryoPIV-Messsystems. Des Weiteren befindet sich dort ein kleineres Fenster für den Laserstrahleintritt. Die frontseitige Glasscheibe am Austritt zur Messstrecke besitzt eine Apertur von  $\varnothing 142$  mm. Kurz vor dem Eintrittsfenster befindet sich der zweite Spiegel mit den Stelleinheiten, der über einen Winkel auf einem Drehteller montiert ist, womit der Lichtstrahl aus unterschiedlichen Richtungen in die Box gelenkt werden kann und somit unterschiedliche Fensterpositionen für die Lichtschnittgenerierung gewählt werden können. Innen trennt eine längs liegende optische Montageplatte die Box in zwei Bereiche. Auf einer Seite ist die Elektronik untergebracht und auf der anderen die Optik des Strahlmonitors und der Teleskopoptik. Im Bereich vor dem Austrittsfenster befindet sich derzeit nur eine Zylinderlinse zur Aufweitung des Lichtschnittes, hier ist bereits Raum für zukünftige Erweiterungen vorgesehen, um beispielsweise einen schwenkbaren Lichtschnitt zu realisieren.

Damit der Lichtstrahl relativ zur optischen Achse der Lichtschnittoptik in Position gehalten werden kann, muss die aktuelle Strahlposition und Ausbreitungsrichtung erfasst werden. Anstelle der üblicherweise hierfür verwendeten Quadrantendioden werden bei dem realisierten Konzept kleine CCD-Kameras eingesetzt. Dies hat einerseits den Vorteil, dass der Entwurf einer aufwendigen Elektronik zur Auswertung der Quadrantendiodensignale entfällt, und andererseits stehen damit weitere Informationen zur Verfügung, wie z.B. das aktuelle Strahlprofil, was die Möglichkeiten zur Beurteilung des Laserstrahls (Strahlabschattungen, Schlieren) verbessert und somit zu einer Verbesserung der Robustheit des gesamten Messsystems führt. Die Bilddaten der Beobachtungs-Kameras werden über die Ethernet-Verbindung von der Lichtschnittbox zu dem Steuerrechner übertragen. Die Auswertung erfolgt durch ein Software-Programm, welches mittels der graphischen Programmieroberfläche von LabView erstellt wurde (Kap. 1.2.5).

Eine dritte Beobachtungskamera des gleichen Typs blickt parallel zum Lichtschnitt durch das Austrittsfenster, um später den Auftreffpunkt des Lichtschnittes relativ zum Windkanalmodell zu beobachten. Dies soll sicherzustellen, dass sich der Lichtschnitt an der korrekten Messposition befindet.

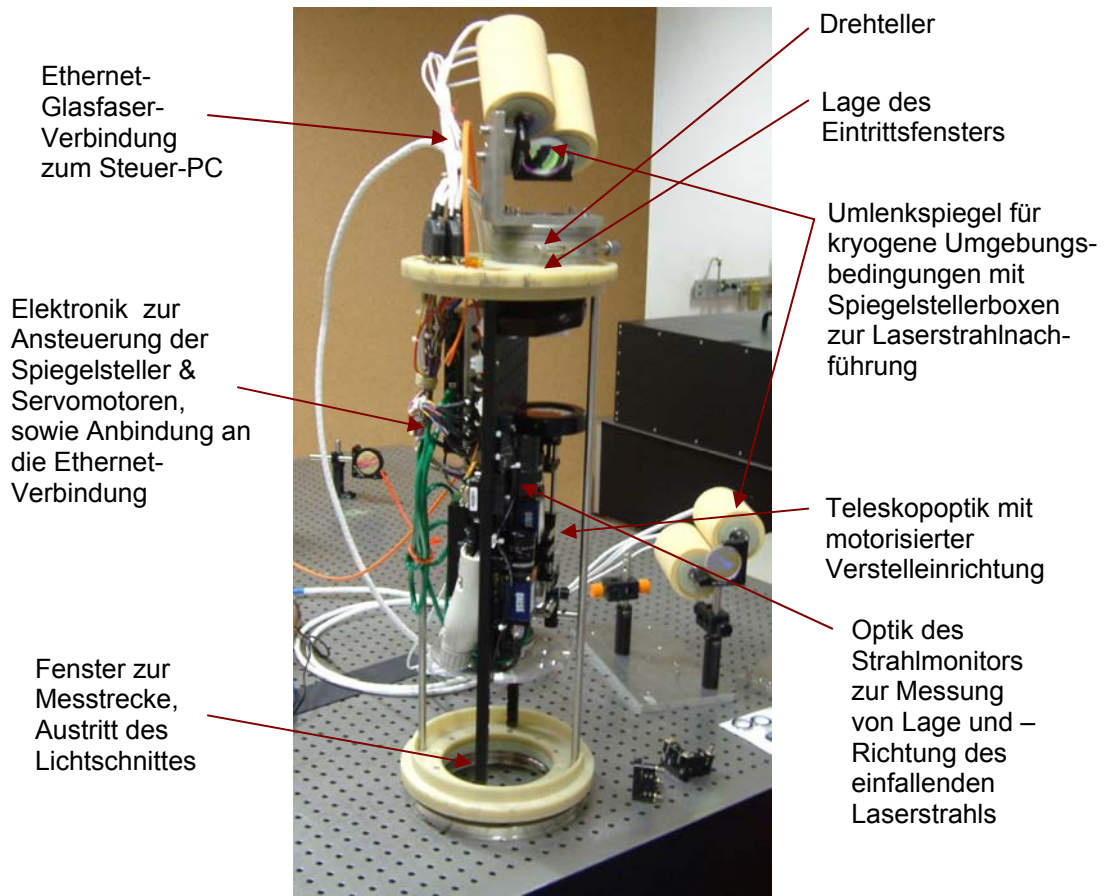


Abbildung 16: Innenaufbau der Laserlichtschnittbox, die durch zwei Halbschalen mit Heizelementen verschlossen wird.

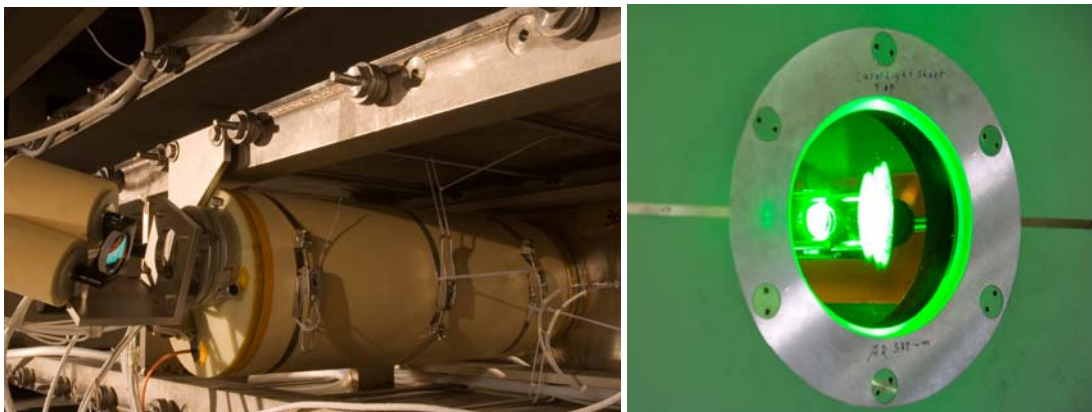


Abbildung 17: Montierte Lichtschnittbox und Austrittsfenster in der Messtrecke des ETW.

### 1.2.3 Kamerabox

Neben der Lichtschnittoptik müssen auch die Kameras dicht hinter den Fenstern der Messtrecke positioniert und in der kryogenen Umgebung des Windkanal-Plenums betrieben werden. Für stereoskopische PIV-Anordnungen wurden für die Aufnahme der PIV-Kameras zwei neue Winkelboxen entwickelt. Die Boxen ermöglichen Blickwinkel von etwa  $\pm 45^\circ$  zum Lichtschnitt, die üblicherweise bei einer stereoskopischen Messordnung angestrebt werden, da so die

Messgenauigkeiten aller drei Geschwindigkeitskomponenten ähnlich sind. Die Dimensionen der Kameraboxen sind so gehalten, dass eine Montage in den Fensteröffnungen der Messstrecke von der Innenseite aus erfolgen kann, was insbesondere bei möglichen Kamerapositionen im Boden bzw. der Decke der Messstrecke eine erhebliche Arbeitserleichterung darstellt. Die kompletten Boxen werden vorab im Labor mit den entsprechenden Kameras und Objektiven ausgestattet und getestet. Die Montagezeit in der Messstrecke selbst wird so auf ein Minimum reduziert, womit auch Kosteneinsparungen einhergehen. Die Boxen sind zur Aufnahme von speziellen Doppel-Shutter-Kameras der Fa. PCO ausgelegt, womit eine Reihe verschiedener Kameras mit unterschiedlichen Auflösungen und Aufnahmeraten für unterschiedliche Messaufgaben zur Verfügung stehen.

Der sich damit ergebende geringe zur Verfügung stehende Bauraum innerhalb der Boxen machte eine komplette Neukonstruktion von Kameraadaptern erforderlich. Da die Kameras unter einem schrägen Winkel auf die Lichtschnittebene blicken, und diese zur bestmöglichen Auflösung der Strömungstracer im gesamten Bild scharf abbilden müssen, ist die Scheimpflugregel anzuwenden. Dies bedeutet, dass die Kamera gegenüber dem Objektiv um einen bestimmten Winkel abhängig von Blickwinkel und Abbildungsmaßstab verkippt werden muss. Die Einstellung dieses Scheimpflugwinkels und auch die Fokussierung des Objektivs sollte über Servomotoren auch während des Windkanalbetriebes möglich sein, um die Schärfe der Partikelbilder insbesondere bei Änderungen von Druck und Temperatur während des Windkanalbetriebes jeweils optimieren zu können, da hiervon im Wesentlichen die Qualität der Messdaten abhängt. Die Auslegung der Antriebe als Servomotor ermöglicht hierbei reproduzierbare Einstellungen. Die Ansteuerung der Servomotoren erfolgt ebenfalls über die Ethernetverbindung der Lichtschnittbox von dem Steuerrechner im MCR. Zwei weitere GigE-Verbindungen sind zur Übertragung der Bilddaten zu einem Bilderfassungs-Rechner im MCR vorgesehen.

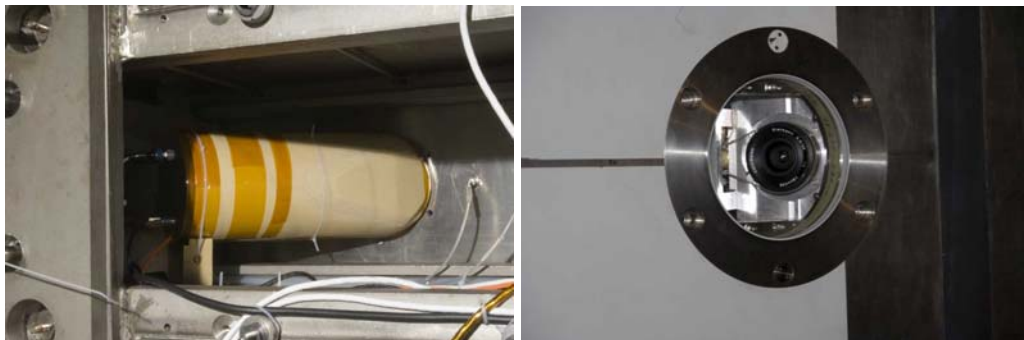


Abbildung 18: Montierte Kamerabox in der Messstrecke des ETW für die Demonstrationsversuche, links: Winkelbox mit Isolation in der hinteren Struktur der Messstrecken-seitenwand, rechts: Blick auf innere Seitenwand mit Kamerafenster und Einbaufansch.

#### 1.2.4 Kalibrierung

Der Einfluss von veränderlichen Kanaltemperaturen auf die Kalibrierung der PIV-Kameras wurde in diesem Vorhaben ebenfalls betrachtet. Zur Kalibrierung der Kameras wird eine Kalibrierplatte mit einem regulären Strich- oder Punktegitter mit bekannten Abständen sorgfältig zur Lichtschnittebene ausgerichtet und von den Kameras aufgezeichnet. Diese Gitterbilder dienen dann zur Entzerrung der Kamerabilder bzw. zur Ermittlung des Abbildungsmaßstabes. Bei einer Stereo-Anordnung werden hierbei ebenfalls die Punktreferenzen in den beiden Stereobildern hergestellt. Die mittels digitaler Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmten Entzerrungsparameter werden als Kalibrierdaten gespeichert, womit später die Entzerrung der Partikelbilder erfolgt. Direkte Kalibrierungen bei den verschiedenen Bedingungen im ETW sollten aus Kostengründen vermieden werden.



Inwieweit dies erforderlich ist, wurde im Rahmen von Windkanalmessungen [11] im kryogenen Windkanal KKK des DNW geprüft. Hierbei wurde ein Kalibriergitter innerhalb einer Schleuse zur Modellvorbereitung an dem Windkanalmodell befestigt und so in die Messstrecke bzw. Messposition gefahren. Dies wurde bei den Kanaltemperaturen von 240, 200, 150 und 125 K durchgeführt. Die beiden hier verwendeten Kameras blickten sowohl normal und als auch unter  $45^\circ$  auf die Kalibrierplatte. Die Auswertung mit der Kalibriersoftware zeigt nur kleine Unterschiede ( $< 1\%$ ) bezüglich des bestimmten Abbildungsmaßstabes. Die registrierten lateralen Bewegungen des Bezugspunktes relativ zum Windkanalmodell liegen in der Größenordnung von 1 mm. Bei Stereo-PIV-Systemen können die hierdurch entstehenden Fehler bei der Stereoverrechnung, d.h. wenn die korrespondierenden Punkte der Abtastgitter in beiden Bildern nicht mehr exakt übereinanderliegen, bei der PIV-Auswertung kompensiert werden, indem eine „Disparitymap“ anhand von Kreuzkorrelationen zwischen gleichzeitig aufgenommen Partikelbildern beider Stereokameras berechnet wird, und dann in das Mapping der Bilder mit einfließt. Nicht kompensiert werden hierdurch jedoch Shifts der Messebene gegenüber dem Modell. Diese sollen durch Markerpunkte, die auf der Modelloberfläche aufgebracht werden, bestimmt bzw. während der Messung korrigiert werden. Hierzu dient eine Beobachtungskamera in der Lichtschnittbox, die die Lage des Lichtschnittes auf dem Modell erfassen soll. Durch diese Maßnahmen ist die Durchführung einer einzelnen Kalibrierung der PIV-Kameras unter Umgebungsbedingungen in der Messstrecke ausreichend.

### 1.2.5 Software

Für die Ansteuerung des Lichtschnittmoduls und der beiden Kamera-Module des für den ETW entwickelten CryoPIV-Systems wurden spezielle Software-Programme unter der graphischen Entwicklungsumgebung „LabView“ von National Instruments erstellt. Das erste Programm dient der Überwachung des in die Lichtschnittbox einfallenden Laserstrahls, dessen Bedienoberfläche in Abbildung 19 dargestellt ist. Zunächst werden die beiden monochromen Kamerabilder des Beam-Monitors (Kap. 1.2.2) online dargestellt. Im linken Bild ist so das aktuelle Strahlprofil zu sehen, anhand dessen Abschattungen im Strahl oder auch das Auftreten von Schlieren erkannt werden können. Die Lage des Profils im Bild entspricht der aktuellen Strahlposition beim Eintritt in die Teleskopoptik. Die Software bestimmt mit jeder Bildaktualisierung anhand der Grauwertverteilungen in beiden Bildern die Abweichungen von der Sollposition. Im Fall von Abweichungen kann der Laserstrahl über die Spiegelstellereinheiten korrigiert werden. Dies ist manuell möglich durch die Buttons mit den Pfeilen links neben den Bildern. Darüber hinaus ist auch eine automatische Nachführung durch die Software möglich, wobei diese optional ein- bzw. ausgeschaltet werden kann.

Zusätzlich zu der Orientierung des einfallenden Laserstrahls werden zudem noch weitere Daten bestimmt, die Aufschluss über die Qualität des Laserstrahls geben. So wird weiterhin auch die anhand des Strahlprofils berechnete momentane Pulsenergie des Lasers angezeigt. Auch die vertikalen bzw. horizontalen 1d-Strahlprofile werden im unteren Bereich noch einmal separat angezeigt. Die damit zur Verfügung stehenden umfangreichen Daten geben Aufschluss über den aktuellen Zustand des Laserstrahls und ermöglichen bei Problemen ein frühzeitiges Eingreifen, um so die zur Verfügung stehende Windkanalzeit optimal zu nutzen.

Ein weiteres Programm dient der Überwachung des Lichtschnittes in der Messstrecke. Hierzu wird das Bild der dritten Beobachtungskamera angezeigt, die sich ebenfalls in der Lichtschnittbox befindet und parallel zum Lichtschnitt in die Messstrecke blickt. Weiterhin kann mit diesem Programm auch die Lichtschnittdicke eingestellt werden. Hierzu wird eine Linse der in der Lichtschnittbox untergebrachten Teleskopoptik mit einem Motor verfahren. Dieses Programm soll später in einer weiteren Ausbaustufe auch eine Korrektur der Lichtschnittposition relativ zum Modell ermöglichen.

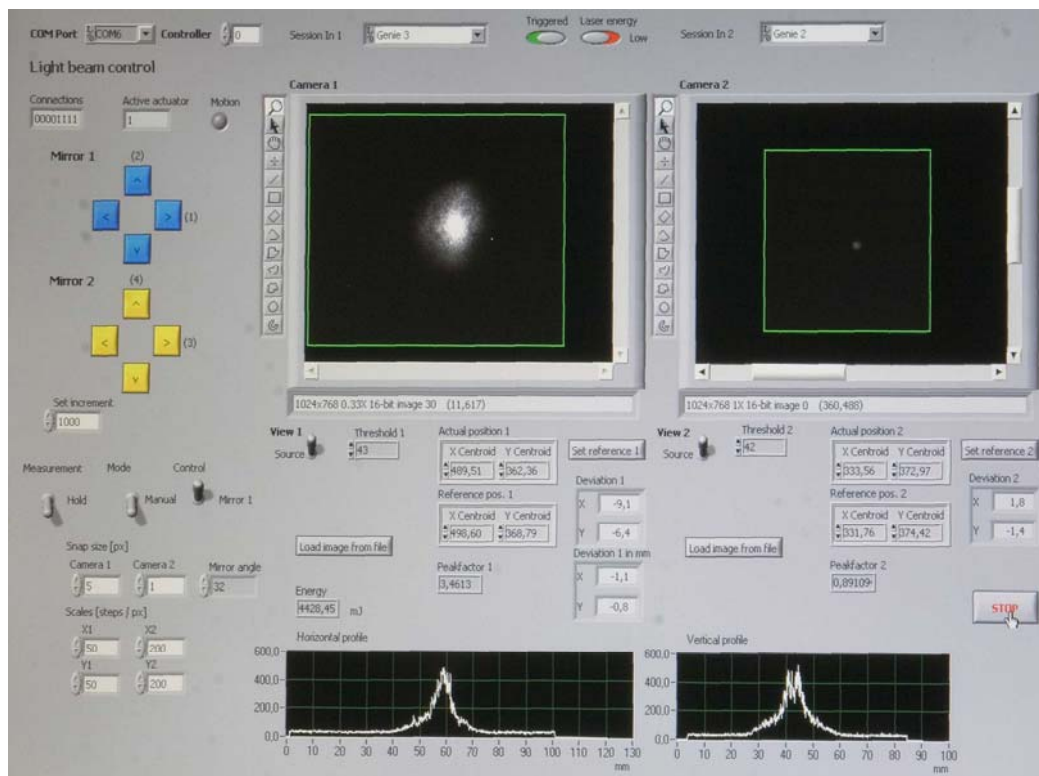


Abbildung 19: Programmoberfläche zum Laserstrahlmonitor und der Strahlregelung.

Das letzte Programm (Abbildung 20) dient der Schärfe-Einstellung der beiden PIV-Kameras, die das Streulicht der Strömungstracer aufzeichnen. Für die Qualität der Messdaten ist hier eine scharfe Abbildung essentiell. Daher ist separat für beide Kameras der Fokus über die Verstellung am Objektiv wie auch der Scheimpflugwinkel fein einstellbar. Die Software ermöglicht direkte Vorgaben des Scheimpflugwinkels in Grad und den Fokusabstand des Objektivs. Da diese Größen bereits bei der Planung bestimmt werden können, erleichtert dies auch die Einrichtung des Messsystems. Der notwendige Scheimpflugwinkel  $\beta$  kann nach den Gesetzen der linearen Optik über [9]

$$\beta = M \cdot \tan(\alpha)$$

aus dem Abbildungsmaßstab  $M$  und dem Blickwinkel  $\alpha$  relativ zur Messebene berechnet werden. Für eine Optimierung der Schärfe im gesamten Bild anhand eines Kalibriergitters bzw. der Partikelbilder nach dem Erreichen der Testbedingungen im Kanal sind nur noch kleinere Änderungen erforderlich.

Neben den LabView-Programmmodulen zur Überwachung und Steuerung des CryoPIV-Messsystems wurde auch eine automatisierte Erfassung und Ablage der Mess- bzw. Bilddaten auf Datenspeichern in Erwägung gezogen. Hierzu wurde beim DLR das universelle Programm-Paket „Semcollect“ entwickelt, welches auf das bestehende mobile PSP-Messsystem des DLR beruht und sich bereits in verschiedenen Windkanalmesskampagnen bewährt hat. Es können Daten beliebig vieler Geräte und Instrumente über ein allgemeines Handshake-Verfahren eingelesen werden, wobei eine entsprechende Adaption an Treiber bzw. Programme zur Hardware-Ansteuerung durchgeführt werden müssen. Dies schließt ebenfalls den Windkanal ein, um die aktuellen Windkanaldaten für jeden Messpunkt aufzunehmen, was die Protokollierung bei Messungen erleichtert. Eine Adaption an das PIV-Messsystem bzw. dessen Ankopplung an den ETW konnte jedoch aus Mangel an Personal-Ressourcen nicht mehr fertig gestellt werden.

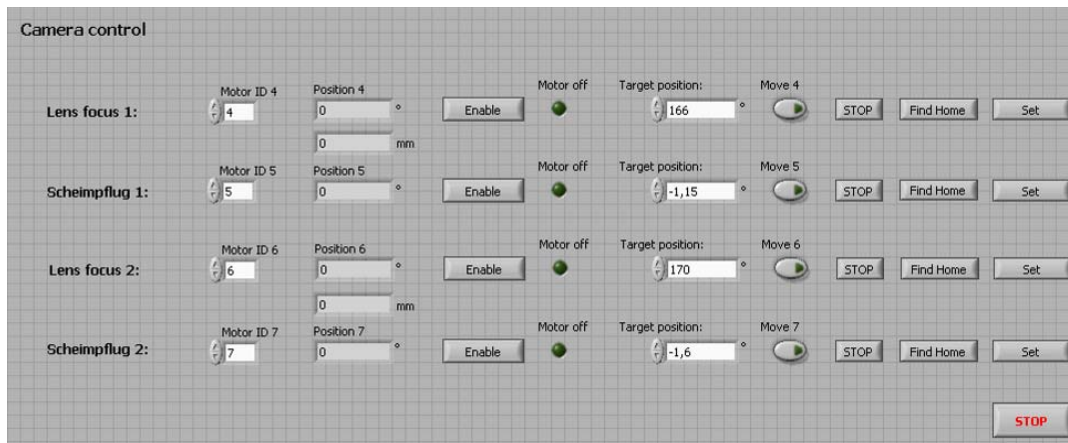


Abbildung 20: Programmoberfläche zu den Kamerafokus-Einstellungen.

### 1.3 Demonstrationstests im ETW (AP7)

Anhand von Demonstrationstests sollte die Durchführbarkeit von StereoPIV-Messungen im ETW unter kryogenen Bedingungen durch Verwendung des im Vorhaben entwickelten CryoPIV-Messsystems (Kap. 1.1 und 1.2) aufgezeigt werden. Es konnten im ersten Halbjahr 2010 zwei Demonstrationstests durchgeführt werden, der erste an einem Hochgeschwindigkeitsmodell und der zweite an einem Halbmodell einer realen Hochauftriebskonfiguration, wobei die PIV-Messkampagnen jeweils mit Messvorhaben anderer Projekte aufgrund fehlender vorhabenseigener Förderungsmittel für die Windkanalkosten kombiniert werden mussten.

#### 1.3.1 Test 1: Hochgeschwindigkeitskonfiguration

In diesen Tests wurden Messungen an dem Referenzmodell des ETW durchgeführt, welches als Vollmodell eine Spannweite von  $b = 1,427$  m aufweist und über einen geraden Stiel am 3D-Modellsupport der Messstrecke montiert wird. Die Messanordnung des CryoPIV-Messsystems am ETW ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Kameras und die Lichtschnittoptik wurden in die Seitenwände der Messstrecke montiert. Diese weisen je drei horizontale Fensterreihen auf mit einem vertikalen Abstand von 50 cm, wobei die mittlere auf der Höhe der Messstreckenachse liegt. In horizontaler Richtung sind die Fensteröffnungen in Abständen von 44 cm angeordnet. Mit diesem Fenstergitter sind somit die möglichen Positionen der Kameraboxen (Kap. 1.2.3) und der Lichtschnittbox (Kap. 1.2.2) vorgegeben, wobei einige Positionen nicht für die Winkelboxen der Kameras genutzt werden können, da hier Verstreungen in der rückwärtigen Struktur den Bauraum seitlich einschränken. Für diese Tests wurde eine Messebene senkrecht zur Anströmung an einer Fensterposition mit einem Abstand von ca. 44% der Spannweite des Windkanalmodells von den Tragflächenspitzen gewählt. Die Kameraboxen und die Lichtschnittbox wurden in der oberen Fensterreihe montiert, so dass keine Abschattungen im Lichtschnitt durch die Stielaufhängung auftreten. Damit der Flügelspitzenwirbel durch die erhöhte Lage der Messebene dennoch erfasst wird, wurde ein Rollwinkel von  $\varphi = 45^\circ$  für das Windkanalmodell bei einem geometrischen Anstellwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  eingestellt. Die Kameras sind symmetrisch zur Messebenenposition in der inneren Wandkanalwand in einem Abstand von vier Fensterpositionen (176 cm) angeordnet. Als Kameras wurden zwei PCO-1600 eingesetzt, die einen CCD-Chip mit 1600 x 1200 Pixel bei einer quadratischen Pixelgröße von 9  $\mu\text{m}$  besitzen. Mit der Blickrichtung von  $\pm 45^\circ$  und der Verwendung von Objektiven mit einer Brennweite von  $f = 35$  mm ergibt sich ein trapezförmiges Beobachtungsfeld von ca. 63 cm Weite und einer Höhe zw. 28 cm und 39 cm, wie in Abbildung 22 dargestellt.

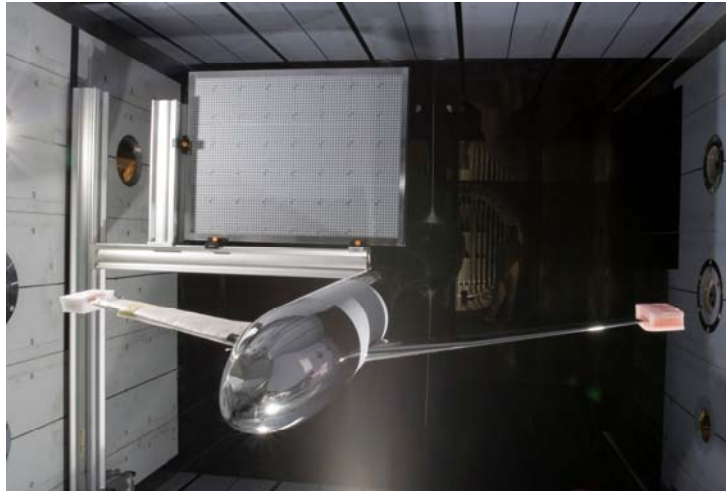


Abbildung 21: Vollmodell der Hochgeschwindigkeitskonfiguration (ETW-Referenzmodell) im ETW für den ersten Demonstrationstest mit in der Messebene ausgerichtetem Kalibriergitter.

Zur Beleuchtung der Lichtschnittebene wurde ein PIV-Puls laser Spotlight-1000 der Fa. Innolas mit einer max. Pulslichtenergie von  $2 \times 500$  mJ bei einer Wiederholrate von 15 Hz verwendet. Die geringe Strahldivergenz des Lasers von unter  $0,5$  mrad ( $M^2 < 2$ ) gewährleistet eine effektive Übertragung eines Lichtstrahls ohne hohe Energieeinbußen über eine große Distanz von über 8 m bis zur Lichtschnittbox. Die Führung des Laserstrahls von außen zur Lichtschnittbox erfolgt wie in Kap. 1.2.1 beschrieben.

Das ganze System wird von einem programmierbaren Sequencer des DLR getriggert, der sich am Ort des Lasersystems befindet. Von hier wird auch das Triggersignal für die PIV-Kameras und dem Beammonitor in der Lichtschnittbox in Plenum erzeugt. Insgesamt werden drei bestehende Glasfaser-Ethernet-Verbindungen von der Messstrecke zum „Main Control Room“ (MCR) genutzt, um die Daten- u. Steuersignale von der Lichtschnittbox sowie die Bilddaten der beiden PIV-Kameras zu übertragen. Hierzu befinden sich drei separate Rechner im MCR, je zwei zur PIV-Bilddatenerfassung und Prüfung der Auswertbarkeit und ein weiterer zur Kontrolle und Steuerung des CryoPIV-Messsystems (s. Kap. 1.2.5).

Trotz der Probleme mit Schlieren im Laserstrahl konnten erfolgreich PIV-Messungen an der Hochgeschwindigkeitskonfiguration durchgeführt werden, allerdings nur bei einem niedrigen Druck. Als Seeding wurde lediglich die Methode mittels Tröpfchengeneratoren des DLR zur Erzeugung von Eisparkeln eingesetzt (s. Kap. 1.1.3). Die folgende Temperatur- und Mach-Zahl-Reihe konnte hierbei aufgezeichnet werden:

$T_0$ , K	$p_0$ , kPa	M
160	125	0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8
120 / 140 / 180 / 200	125	0,2 / 0,6



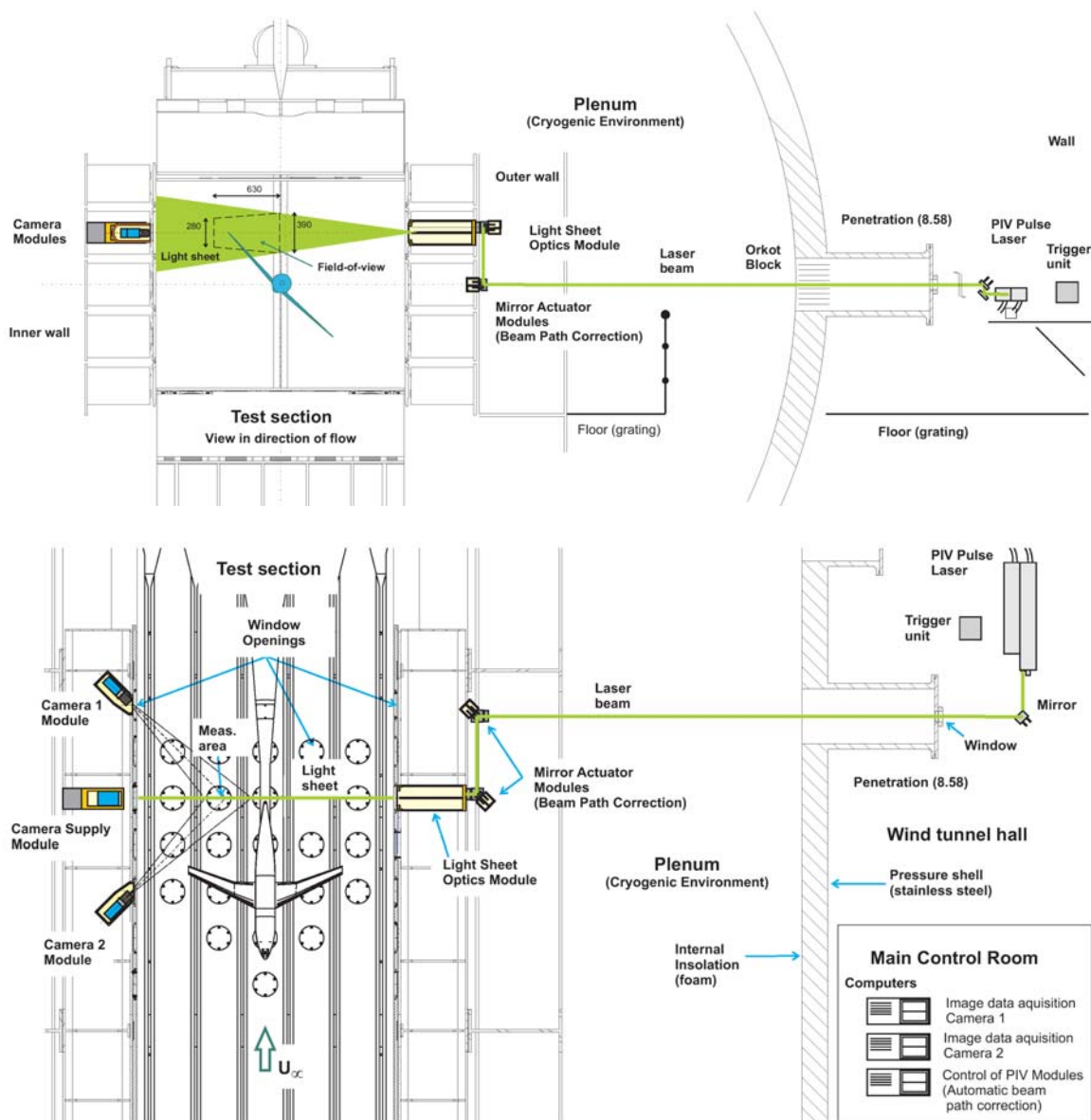


Abbildung 22: Stereo-PIV-Aufbau am ETW für den 1. Demonstrationstest an einem Vollmodell einer Hochgeschwindigkeitskonfiguration.

Die Schlieren im Laserstrahl beeinflussen auch die Helligkeitsverteilung im Lichtschnitt, sodass eine PIV-Auswertung über eine Kreuzkorrelation nicht immer möglich ist. Die Pulsabstände bei der Messung eines momentanen Geschwindigkeitsfeldes wurden abhängig von der Mach-Zahl zwischen  $7,5$  und  $30 \mu\text{s}$  (Messzeit) eingestellt. Die Abbildung 23 zeigt beispielhaft ein Ergebnis des montanen Geschwindigkeitsfeldes im ETW, welches den Flügelspitzenwirbel zeigt. Insbesondere konnte anhand der Tests das Seeding mit Eispartikeln für verschiedene Temperaturen und auch für transonische Mach-Zahlen getestet werden, sowie die Funktion des gesamten CryoPIV-Messsystems. Hierbei hat sich insbesondere der Beammonitor der Lichtschnittbox als sehr wertvoll erwiesen, um einerseits die Problematik beim Auftreten von Schlieren im Laserstrahl handhaben zu können wie auch das Nachführen des Laserstrahls bei sich ändernden Kanalgestemperaturen.

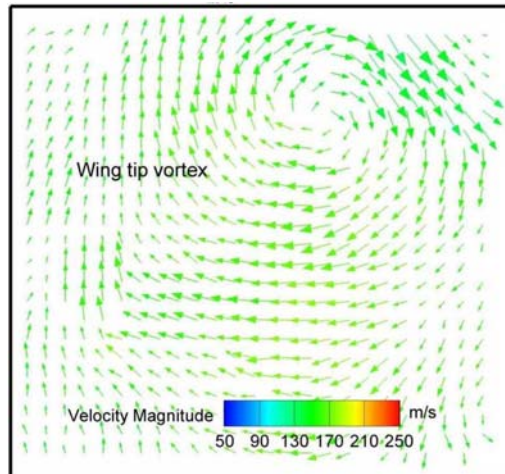


Abbildung 23: Gemessenes momentanes Geschwindigkeitsfeld im ETW des Flügelspitzenwirbels bei  $T = 160$  K,  $M = 0,6$  und  $R_{MAC} = 5,8 \cdot 10^6$  der Hochgeschwindigkeitskonfiguration.

### 1.3.2 Test 2: Hochauftriebskonfiguration

Ziel dieser Tests ist in einem weiteren Schritt die Anwendung der PIV im ETW mit dem entwickelten CryoPIV-Messsystem auch im Rahmen einer industriellen Messkampagne aufzuzeigen und hierbei insbesondere die Funktion einer Lösung zur Unterdrückung von Schlieren im Laserstrahl, die sich während der ersten Demonstrationstests gezeigt hatten, nachzuweisen. In diesen Tests wurde ein Halbmodell eines realen Transportflugzeuges verwendet, welches mit Klappensystemen im ausgefahrenen Zustand konfiguriert war. Verwendet wurde dasselbe CryoPIV-Messsystem wie bei den ersten Demonstrationstests, allerdings mit einer um eine Fensterposition versetzten Lichtschnittposition. Die Messanordnung ist in Abbildung 24 dargestellt. Erfasst wird nun das Strömungsfeld im Tragflügelnachlauf auf der Höhe der Triebwerke. Die stromauf liegende Kamera wurde um zwei Fensterpositionen versetzt, sodass sich wieder eine symmetrische Kameraanordnung ergibt, wobei sich das Messfeld nun etwa in der Kanalmitte befindet. Mit den nun verwendeten Objektiven mit einer Brennweite von  $f = 50$  mm ergibt sich ein ähnlich großes Messfeld wie bei den ersten Tests.

In diesen Tests konnte das Auftreten von Schlieren bei niedrigen Gasdrücken im Kanal vollständig beseitigt und bei den hohen Drücken soweit reduziert werden, dass PIV-Messungen mit voller Laserenergie möglich waren. Folgende Messreihen konnten während dieser Tests gefahren werden:

$T_0$ , K	$p_0$ , kPa	M
125	125 / 200 / 300 / 400	0,2
180	125 / 200	0,2
200 / 210 / 220	125	0,2

Die dabei erzielten Reynoldszahlen liegen im Bereich von  $R_{MAC} = 2,5$  bis  $18 \cdot 10^6$ . Ebenfalls konnten während dieser Tests beide Seeding-Methoden eingesetzt werden, wobei hierfür ein Umbau erforderlich war. Gestartet wurden die Tests bei der niedrigsten Gastemperatur im Kanal von 125 K und dem Seeding-System des DLR basierend auf den Tröpfchengeneratoren und einer kryogenen Mischkammer, in der die feinen Wassertröpfchen zu Eiskristallen gefrieren. Mit der Erhöhung der Kanaltemperatur fand der Wechsel auf das ETW-Seeding-System bei 180 K statt. Die Tests zeigten, dass unter kryogenen Bedingungen nur äußerst geringe Wassermengen

dem Kanal des ETW zugeführt werden müssen, um für die PIV ein hinreichend dichtes Seeding in Form von Eispartikeln zu erzeugen. Demzufolge sind auch keine Vereisungen in der Messstrecke während der Tests beobachtet worden. Auch zusätzlich vom ETW aufgenommen Druckverläufe am Tragflügel, zeigen mit und ohne Seeding der Strömung keine Unterschiede.

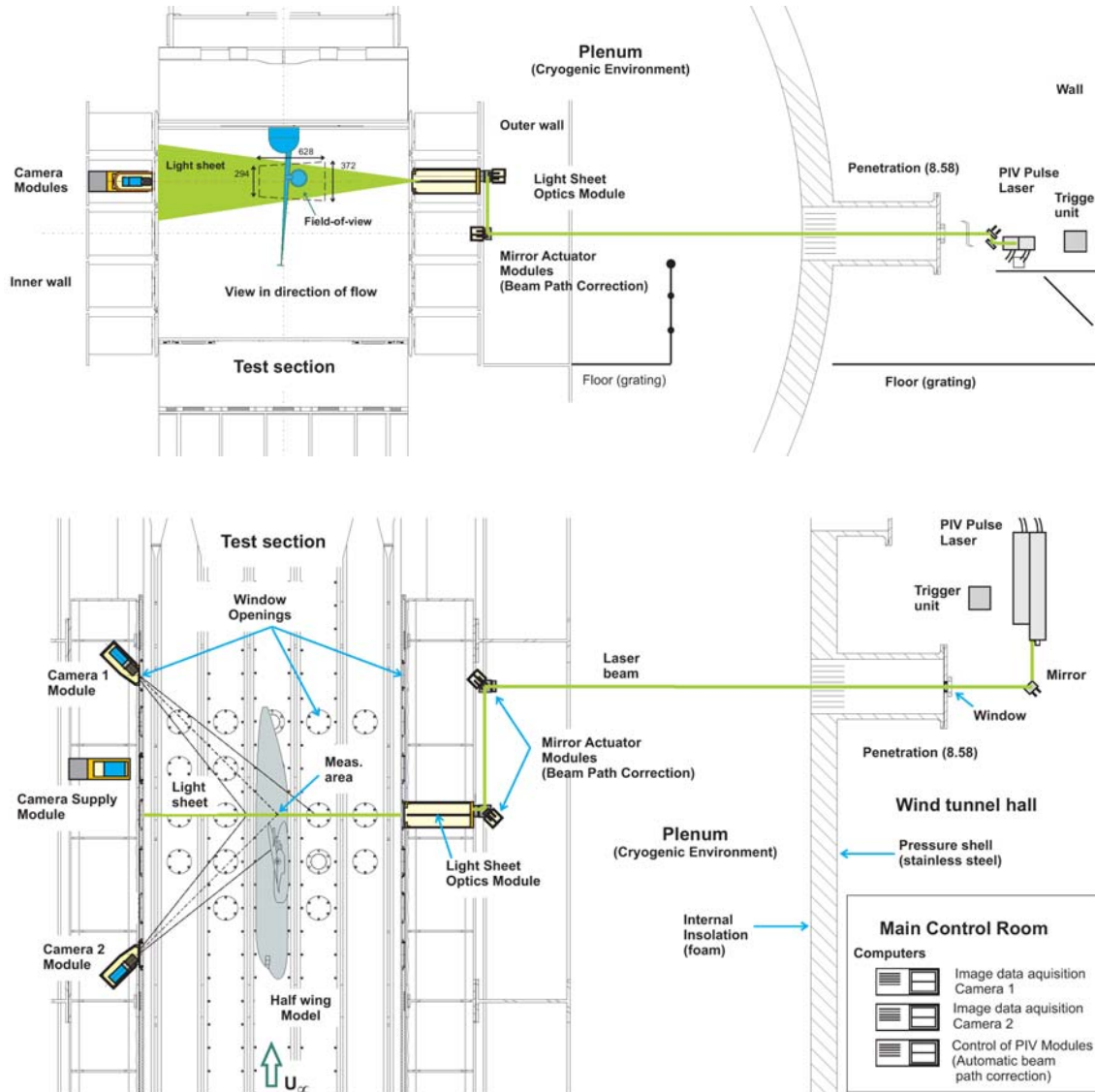


Abbildung 24: Stereo-PIV-Aufbau am ETW für den zweiten Demonstrationstest an einem Halbmodell einer Hochauftriebskonfiguration eines realen Transportflugzeuges.

Ein PIV-Ergebnis<sup>1</sup> der Messungen ist in Abbildung 26 dargestellt. Es zeigt ein momentanes Geschwindigkeitsfeld des stark wirbelbehafteten Tragflügelnachlaufes, welches bei den Kanalbedingungen  $T_0 = 125 \text{ K}$  und  $p_0 = 125 \text{ kPa}$  gemessen wurde. Die Vektoren repräsentieren die Geschwindigkeiten innerhalb der Messebene und die Farbe der Vektoren ist mit der Geschwindigkeitskomponente normal zur Messebene kodiert. Das Ergebnis zeigt nur einen Teil der Messebene, d.h. ca.  $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ , wo ca. 8500 Vektoren mit Schrittweiten von  $4 \text{ mm}$  ermittelt wurden. Die Messzeit (Zeitdifferenz der Laserpulse bzw. Doppelbilder) dieser Einzelmessung beträgt  $35 \mu\text{s}$ . Zu jedem Messpunkt werden immer mehrere Einzelmessungen

<sup>1</sup> An dieser Stelle können nicht alle PIV-Ergebnisse gezeigt werden aufgrund einer noch nicht vorliegenden Freigabe durch den Auftraggeber. Auch wurde deshalb auf quantitative Angaben in dem gezeigten Vektorfeld verzichtet.



durchgeführt, um auch die zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfelder zu erhalten. Mit der hier vorliegenden Messrate von 15 Hz ergibt sich für 300 Einzelmessungen eine Gesamtmesszeit von 20 s. In dem in Abbildung 26 dargestellten Ergebnis sind vereinzelt Fehlstellen zu erkennen, die im Wesentlichen auf eine ungleichmäßige Lichtstreuung der Eispartikel zurückzuführen sind. Ergebnisse mit höherer Qualität können erwartet werden, wenn es gelingt, eine homogenere Partikelverteilung in der Strömung zu erzeugen. Ansätze hierzu wurden im Vorhaben ebenfalls erarbeitet (s. Kap. 1.1.4).

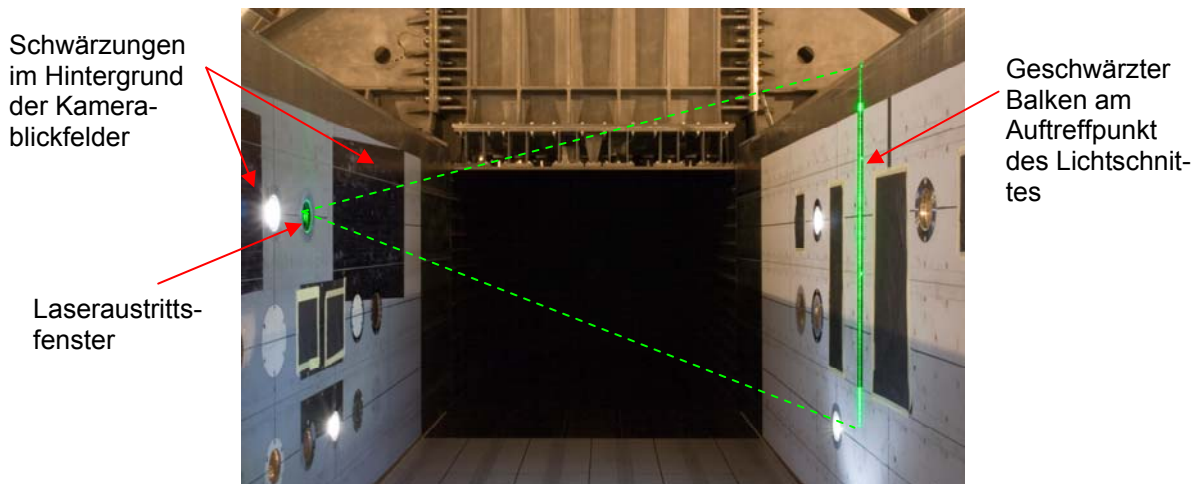


Abbildung 25: Foto der ETW-Messstrecke ohne „Model Cart“ mit einfallendem Lichtschnitt (grün) und Schwärzungen der Wände zur Reduzierung von Hintergrundlicht.

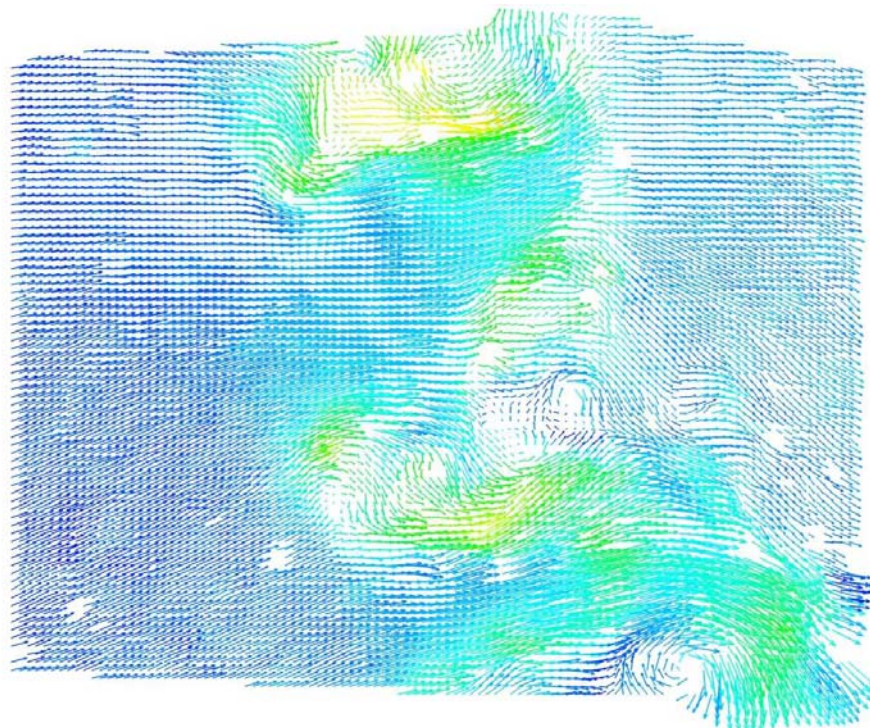


Abbildung 26: Während des zweiten Demonstrationstests gemessenes wirbelbehaftetes momentanes Geschwindigkeitsfeld (Messzeit 35  $\mu$ s) im Tragflügelnachlauf einer Hochauftriebskonfiguration eines realen Transportflugzeugmodells.

## 2 Zusammenfassung und voraussichtlicher Nutzen

Das im Vorhaben entwickelte CryoPIV-Messsystem ermöglicht weltweit erstmalig die quantitative Bestimmung von momentanen Geschwindigkeitsfeldern in einem kryogenen druckbeaufschlagten transsonischen Windkanal (ETW) und damit Strömungsfelduntersuchungen bei Mach- und Reynoldszahlen realer Transportflugzeuge unter den definierten Bedingungen eines Windkanals. Die Funktionalität des CryoPIV-Messsystems konnte am Ende des Vorhabens an zwei typischen Anwendungsfällen im ETW demonstriert werden, d.h. bei sub- und transsonischen Machzahlen an einem Hochgeschwindigkeitswindkanalmodell und bei hohen Reynoldszahlen an einer Hochauftriebskonfiguration eines realen Transportflugzeugmodells im ETW. Die besonderen Gegebenheiten am ETW erfordern bislang noch den Einsatz von feinsten Eispartikeln als Strömungsmarker, womit die PIV-Messungen auf kryogene Gastemperaturen, d.h.  $T_0 \leq 220$  K beschränkt bleiben. Bei den letzten Messungen konnte der Einsatz des CryoPIV-Messsystems auch unter industriellen Bedingungen unter Beweis gestellt werden. Das Messsystem zeigte sich hierbei als hinreichend robust, u.a. gegeben durch einen hohen Automatisierungsgrad, der auch im Hinblick auf eine kosteneffiziente Durchführung solcher Messungen realisiert wurde, was bei dem hohen Ressourcen-Verbrauch an flüssigem Stickstoff und elektrischer Energie während des Windkanalbetriebes ein entscheidendes Kriterium für den ETW darstellt.

Somit steht der Forschung und der Flugzeugindustrie ein weiteres wichtiges Messverfahren für die experimentelle Untersuchung aerodynamischer Fragestellungen im ETW zur Verfügung. Viele Strömungs-Phänomene werden derzeit auf Grund fehlender allgemeingültiger physikalischer Modelle nur unzureichend von numerischen Strömungssimulationen (CFD) erfasst, wie z.B. Strömungsablösungen. Die PIV-Messdaten bieten hierbei auch gute Validierungsmöglichkeiten solcher Strömungsberechnungen, da diese anhand von quantitativen Daten aus dem Strömungsfeld erfolgen können. Dies ist nun auch bei realen Mach- und Reynoldszahlen im ETW möglich. Der Einsatz des CryoPIV-Messsystem ist hierzu bereits in zukünftigen Messkampagnen im ETW vorgesehen, wie im Rahmen des Lufo4-Vorhaben HINVA zur Messung des Strömungsfeldes über dem Tragflügel im Bereich der Treibwerke sowie im Rahmen des EU-Projektes Desireh zur Messung eines Tragflügelnachlaufes.

## 3 Fortschritte bei anderen Stellen

Neue Fortschritte im Bereich der Messung von Strömungsfeldern bzw. Anwendung der PIV-Messtechnik in druckbeaufschlagten kryogenen Windkanälen bei anderen Stellen sind den Autoren nicht bekannt.

## 4 Veröffentlichungen

- [1] Quest J, Leuckert J, Fey U, Konrath R, Egami Y (2008) Development & application of modern measurement techniques for pressurized cryogenic wind tunnels, Proc. of 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2008, Anchorage (Alaska, USA), 14 - 19 September, Paper 261, pp 1-12
- [2] Quest J, Leuckert J, Fey U, Konrath R, Egami Y (2009) Development & Application of modern Measurement Techniques for pressurised cryogenic Wind Tunnels. Proc. of European Air and Space Conference, CEAS 2009, 26. - 29. Okt. 2009, Manchester, United Kingdom
- [3] Fey U, Konrath R, Kirmse T, Ahlefeldt T, Kompenhans J (2010) Advanced Measurement Techniques for High Reynolds Number Testing in Cryogenic Wind Tunnels. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 04.-07. Jan. 2010, Orlando (FL), AIAA Paper 2010-1301
- [4] Konrath R, Otter D, Geisler R, Agocs J, Mattner H, Roosenboom E, Fey U, Kompenhans J, Quest J, Kühn Ch (2010) Adaptation of PIV for Application in Cryogenic Pressurized Wind Tunnel Facilities at High Reynolds Numbers. Seminar an der Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA), 16. Sept. 2010, Nanjing, China
- [5] Konrath R, Otter D, Geisler R, Agocs J, Mattner H, Roosenboom E, Fey U, Quest J, Kühn Ch (2010) Adaptation of PIV for application in cryogenic pressurized wind tunnel facilities at high Reynolds numbers. Proc. of 15th Int'l Symp. on Applications Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 05-08 July, Paper 1572

### Bereits zur Veröffentlichung angenommene Konferenzbeiträge:

- [6] Quest J et al. (2011) Accepting a challenge? The development of PIV for application in pressurized cryogenic wind tunnels, AIAA Applied Aerodynamics Conference, 27-30 June, Honolulu, Hawaii, USA
- [7] Konrath R et al. (2011) Application of PIV in a large cryogenic wind tunnel (ETW), 9th Int. Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV'11, July 21-23, Tsukuba, Japan