

## Entwicklung eines laseroptischen Punktsensors auf Basis der Filtered Rayleigh Scattering Technik zum Einsatz unter kryogenen Bedingungen

### Development of a laser optical point sensor based on the Filtered Rayleigh Scattering technique for use under cryogenic conditions

**Ann-Katrin Hensch<sup>1</sup>, Peter Guntermann<sup>1</sup>, Michael Dues<sup>2</sup>, Jonas Steinbock<sup>2</sup>, Adi Siswanto<sup>2</sup>, Guido Stockhausen<sup>3</sup>, Michael Fischer<sup>3</sup>, Eike Burow<sup>3</sup>, Manfred Beversdorff<sup>3</sup>**

- 1) European Transonic Windtunnel GmbH, 51147 Köln, Deutschland
- 2) ILA R&D GmbH, 52428 Jülich, Deutschland
- 3) Institut für Antriebstechnik (AT), DLR, 51147 Köln, Deutschland

Schlagworte: Filtered Rayleigh Scattering, FRS, LDV, berührungsloser Strömungssensor  
Key words: Filtered Rayleigh Scattering, contactless freestream sensor, FRS

#### Zusammenfassung

Die vorliegende Veröffentlichung beschreibt die Entwicklung und den Test eines berührungslosen Strömungssensors auf Basis des Filtered Rayleigh Scattering Prinzips für den Einsatz im European Transonic Windtunnel (ETW) unter kryogenen Bedingungen. Der dazu notwendige Sensor wurde in mehreren Schritten entwickelt und unter kryogenen Bedingungen im Windkanal getestet. Der innovative Ansatz besteht aus der Kombination von kryo-tauglicher, nicht-intrusiver endoskopischer Hardware mit schneller Messwerterfassung bei konstanter Laserfrequenz, um das bereits entwickelte und erfolgreich getestete langsame Frequenzscan-Verfahren für stationäre flächige Messungen in ein instationäres Punktmessverfahren zu überführen.

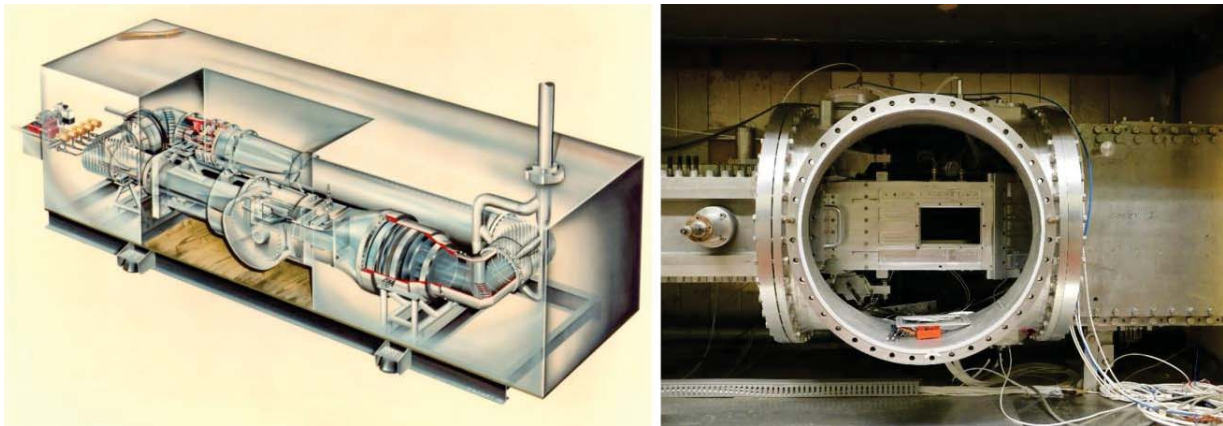
#### Einleitung

Für die Durchführung von aerodynamischen Untersuchungen im European Transonic Windtunnel (ETW) unter kryogenen Bedingungen ist die reproduzierbare Einstellung des Betriebspunktes, sowie die genaue Kenntnis der Geschwindigkeit der Kernströmung in der Messkammer oder an anderen Referenzpunkten für die Vergleichbarkeit von Messungen von großer Bedeutung. Bisher werden für diese Zwecke Gesamtdrucksonden und statische Drucksonden verwendet, die regelmäßig kalibriert und mit Referenzmessungen verglichen werden. Andere Sonden, wie etwa Hitzdraht-Anemometer können zwar zur Vermessung verwendet werden, stellen aber eine intrusive Messmethode dar und deren Betrieb unter kryogenen Bedingungen ist mit vergleichsweise hohem Aufwand verbunden. Letztere sind als permanente Messeinrichtung im Windkanal ungeeignet, da sie sehr empfindlich sind und dort einer starken mechanischen Belastung ausgesetzt werden. Ziel eines gemeinsamen Forschungsvorhabens zwischen dem ETW, dem DLR und der ILA R&D GmbH ist daher die Entwicklung eines laseroptischen Sensors zur genauen Erfassung der Strömungsparameter, der darüberhinaus ohne die Zugabe von Seeding-Partikeln auskommt. In dem LuFo V-3-Projekt mit dem Titel OFRS (Optischer Strömungssensor für Kryobedingungen auf Basis von FRS) soll ein Punkt-Sensor auf der Basis der Filtered Rayleigh Scattering Technik entwickelt werden, der auch das Potential für zeitaufgelöste instationäre Messungen liefert. Dazu wurden Versuche im Pilot European Transonic Windtunnel (PETW) durchgeführt, dessen Ergebnisse in dieser Veröffentlichung

gezeigt werden. Die Versuche wurden mit Sensoren in unterschiedlichen Entwicklungsstadien durchgeführt.

### **Messumgebung Pilot European Transonic Windtunnel (PETW)**

Die Erprobung des Sensors erfolgte im Pilot European Transonic Windtunnel (PETW), welches die Pilot-Einrichtung des ETW ist und gebaut wurde, um die kryogene Windkanaltechnologie vorab zu testen und zu validieren, bevor der ETW ausgelegt und gebaut wurde. Bis heute wird der PETW noch immer als Testeinrichtung genutzt, um neue Messverfahren oder Hardwarekomponenten unter kryogenen Bedingungen zu qualifizieren. Der PETW ist eine um den Faktor 1:8,8 skalierte Version des ETW und ermöglicht die Einstellung identischer Betriebspunkte (Druck, Temperatur, Geschwindigkeit). Es ist ein Windkanal Göttinger Bauart, der charakteristische Reynoldszahlen von Transportflugzeugen erreicht, indem der Druck erhöht wird (125 kPa bis 450 kPa) und die Temperatur durch die Einspritzung von flüssigem Stickstoff gesenkt wird (300 K bis 115 K), siehe Abb. 1 (links). Die dabei entstehende große (Molekül-) Dichte stellt einen entscheidenden Vorteil bei der Nutzung von FRS als Messmethode bzw. Strömungssensor dar.



*Abb. 1: Schaubild des PETW Strömungskreislauf. Blick in die Messstrecke des PETW*

Die Messstrecke des PETW hat eine Dimension von 0,229 m x 0,271 m (Höhe x Breite) mit geschlitzten Decken- und Bodenwänden. Ein optischer Zugang zur PETW Messstrecke ist durch ein in der Seitenwand installiertes rechteckiges Fenster (vergleiche Abb. 1) und zwei Bullaugen im Flansch der Druckhülle (hier nicht dargestellt) möglich. Plenum und äußere Isolierung des PETW unterscheiden sich von der im ETW, was für die hier beschriebenen Messungen bezüglich des optischen Zugangs als nachteilig gegenüber einer potentiellen Anwendung im ETW erwies, aber dennoch ein „proof-of-principle“ zuließ.

### **FSM-FRS-Messprinzip**

Die FRS Methode beruht auf der Auswertung der Rayleigh-Streuung des Laserlichts an den Gasmolekülen in der Strömung. Die an den Gasmolekülen auftretende Rayleigh-Streuung weist eine spektrale Verteilung von einigen GHz Breite auf und enthält Informationen über Temperatur, Druck, Geschwindigkeit und Dichte im beleuchteten Messbereich. Reflexionen von Laserlicht an Wänden (geometrische Streuung) oder an Partikeln (Mie-Streuung) werden jedoch nicht in der Frequenz verbreitert und können mit Hilfe eines molekularen Filters, hier einer Jodzelle, aus dem Messsignal herausgefiltert werden. Abb. 2 zeigt die Entstehung des FRS Spektrums.

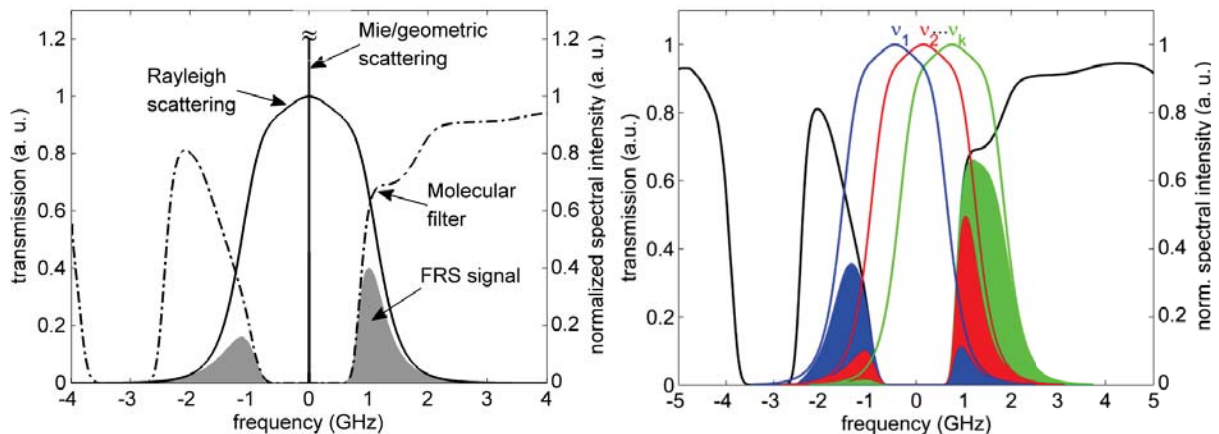


Abb. 2: Aus Doll u. a. (2014): Das an den Fluidmolekülen Rayleigh-gestreute Licht des schmalbandigen Lasers wird mit einer Jodzelle gefiltert, wodurch Reflexionen an Oberflächen und Streuung an großen Partikeln (Mie-Streuung) entfernt werden. (rechts) Frequenz-Scan Methode: Die Laserfrequenz wird entlang des Transmissionsprofils des molekularen Filters verschoben. Aus den resultierenden Intensitätsspektren können zeitlich gemittelte Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder (Doppler-Verschiebung) simultan ermittelt werden. Abb. 9 zeigt die sich ergebenden Intensitätsspektren exemplarisch.

Das an den Molekülen gestreute Licht wird durch die Jodzelle auf einen Photomultiplier abgebildet und in einen Intensitätswert übertragen. Dadurch geht jedoch die spektrale Information über Temperatur, Druck, Dichte und Geschwindigkeit verloren. Entsprechend dem vom DLR Köln weiterentwickelten Frequenz-Scan-FRS-Verfahren (FSM-FRS) wird daher die Frequenz des Lasersystems in diskreten Schritten entlang der Filterkurve der Jodzelle variiert, so dass ein Intensitätsverlauf abhängig von der Laserfrequenz entsteht. Aus diesem Intensitätsverlauf kann mit Hilfe eines geeigneten Messmodells die Temperatur, der Druck, die Geschwindigkeit und die Dichte rekonstruiert werden, siehe Dues u. a. (2018).

### ILA FRS Sensor / DLR FRS Sensor

In dem vorliegenden Forschungsvorhaben werden zwei verschiedenen FRS-basierte Punktsensoren entwickelt. Der DLR-Sensor wird hinsichtlich der Signalqualität optimiert und daher mit möglichst großen Aperturen aufgebaut. Damit können die Möglichkeiten und Grenzen der Technik ausgetestet werden. Der Sensor der ILA wird basierend auf den Erfahrungen des DLR so konzipiert, dass der Sensor auch später im ETW unter sehr eingeschränkten Platzbedingungen eingebaut werden kann. Dazu ist eine deutliche Verkleinerung des Sensors notwendig, die jedoch mit einer Verschlechterung des Signal / Rausch-Verhältnisses verbunden ist. Inwieweit diese ILA Sonde dann auch noch eine ausreichende Signalqualität für Messungen unter kryogenen Bedingungen aufweist, wird in einem Proof-of-Principle Test im PETW erprobt. Aufgrund der zeitlich eingeschränkten Verfügbarkeit des PETW und der relativ hohen Betriebskosten erfolgt eine eingehende Untersuchung der Messunsicherheit an einem Prüfstand der ILA.

Im ersten Entwicklungsabschnitt werden sowohl DLR-Sensor als auch der ILA Sensor mit einem zentralen Sendestrahl aufgebaut und dessen Fokus rückwärtig auf einen in der Sonde befindlichen Photomultiplier abgebildet. Das Messvolumen wird daher durch die Überlagerung des Sendefokus mit dessen Abbildung auf ein Pinhole vor dem Detektor gebildet. Beide Sen-

soren arbeiten mit einer polarisationserhaltenden PCF-Faser zur Übertragung des Laserlichtes zur Sonde. Als Laser wird ein Faserlaser des Herstellers Azurlight Systems (5 W, 532,3 nm) in Verbindung mit einem NKT Seedinglaser verwendet. Der Laser zeichnet sich durch eine relativ geringe spektrale Breite von kleiner 200 kHz und einem weiten Einstellbereich aus. Durch Ansteuerung des Seeding Lasers kann die Frequenz des Fiberlasers im Bereich von 10 GHz verschoben werden. Die Wellenlänge des Fiberlasers wird mit dem Wellenlängenmessgerät im Vergleich zu einem stabilisierten HeNe-Laser erfasst und mit einem Regelausgang zum Seedinglaser geregelt.

### Experimenteller Aufbau und Proof-of-Principle am PETW

Der PETW wurde für die Qualifizierung der Sensoren in der Konfiguration „leere Messstrecke“ verwendet, damit die Punktmessung der Strömungsparameter durch den Sensor in der Kernströmung der Messkammer erfolgen kann. In der Seitenwand der Messstrecke, sowie in dem Bullauge der Druckhülle, wurden speziell für die FRS Messtechnik beschichtete Glasscheiben mit einer Antireflexbeschichtung im Bereich von 532 nm für Durchtrittswinkel des Lasers von 0-30° verbaut. Dies ist von großer Bedeutung, da bei den Windkanalversuchen unterschiedliche Winkel der Sendeeinheit des Sensors getestet wurden, um somit den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf das Messsignal unterschiedlich stark ausprägen und diese bestimmen zu können. Die Sende- sowie die Empfangseinheiten beider Sensoren wurden für alle Untersuchungen am PETW in ein geheiztes Gehäuse integriert, damit der Sensor so nah wie möglich am Messort positioniert ist. Abb. 3 (links) zeigt die Einhausung der FRS Sonde am PETW. Abb. 3 (rechts) zeigt die Einbaukonfiguration für 0 Grad.

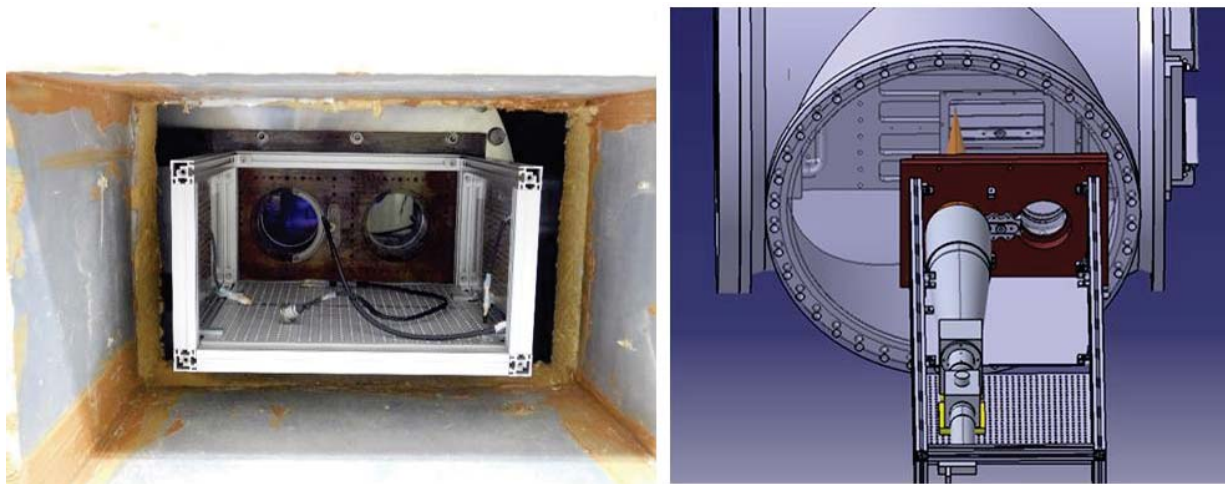


Abb. 3: Beheizte Umgebung zur Sensorinstallation (links). Positionierung der Sonde unter 0 Grad (rechts).

Die Versuche erfolgten für zwei Konfigurationen. Zunächst fand eine Kalibrierung des FRS Signals im Plenum des PETW bei bekannten Temperatur- (275 K – 115 K) und Druckbedingungen (150 kPa – 390 kPa) ohne Strömung statt. Dazu wurde der Fokus des Sensors in den Bereich zwischen Messstrecke und beheiztem Gehäuse in das Plenum verschoben. Anschließend fanden die Messungen in der Messstrecke bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen und Sensorwinkeln statt. Es wurden Geschwindigkeiten in der Messstrecke von  $Ma=0,3$  bis 0,6 eingestellt bei Temperaturen von 250 K bis 120 K sowie variierendem statischen Druck von 150 kPa bis 250 kPa.

Abb. 4, zeigt die Installation des DLR- und ILA-Sensors am PETW. Mit dem DLR-Sensor konnten für unterschiedliche Geschwindigkeiten Abweichungen zur vom ETW gemessenen Geschwindigkeit von 4-7 % realisiert werden. Die Abweichung in der statischen Temperatur lag bei 2-3 %, wobei anzumerken ist, dass die statische Temperatur im Plenum des PETW bestimmt wurde und nicht in der FRS-Messebene.

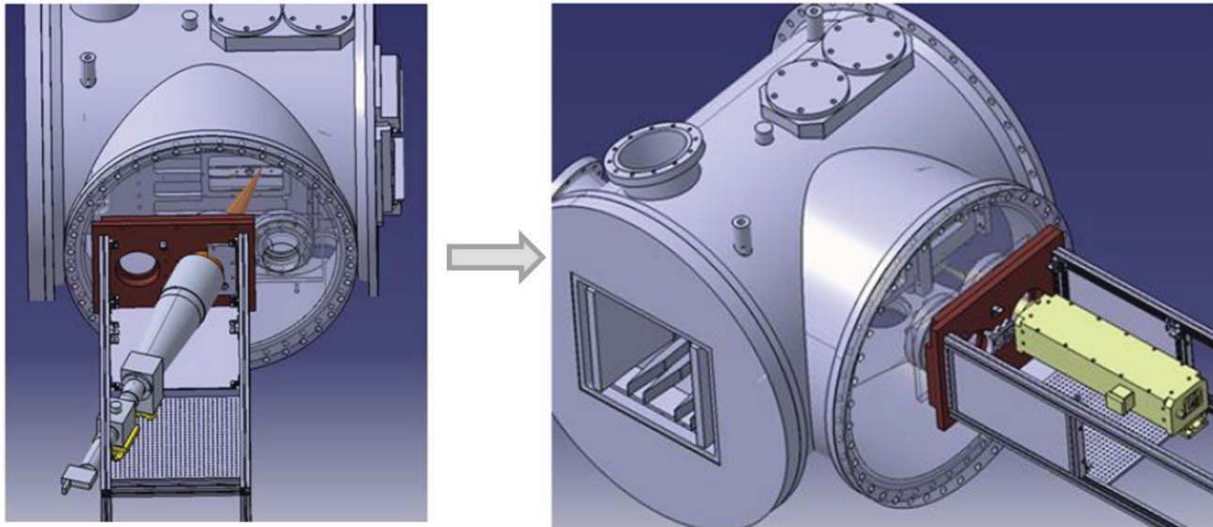


Abb. 4: Aufbau des DLR-Sensors am PETW unter einem Winkel von etwa  $20^\circ$ , sowie Installation des kleineren ILA-Sensors am PETW.

Der ILA-Sensor erreichte im Vergleich zu den vom ETW bestimmten Werten bezüglich der Geschwindigkeit eine Abweichung von 3,6 % im Mittel bei einer Streuung von 3 %.

Damit haben beide Sensoren im Proof-of-Principle-Test des PETW die Funktionstüchtigkeit unter kryogenen Bedingungen nachgewiesen. Die Messungen zeigen aber auch noch Optimierungsmöglichkeiten für beide Sensoren, die im Folgenden erläutert werden.

### **Weiterentwicklung der OFRS Sonden des DLR und der ILA**

Der DLR Sensor wurde mit einem zweiten Detektor erweitert, der zusätzlich zum in der Jodzelle gefilterten FRS Signal noch die Intensität vor der Jodzelle misst. Dieses Signal kann dann einerseits zur Normierung und andererseits zur Messung der Dichte genutzt werden, vergleiche Abb. 6.

Hinsichtlich der ILA-Sonde zeigte sich, dass die Sonde zwar grundsätzlich für Messungen unter kryogenen Bedingungen geeignet ist, jedoch für die spätere Integration in den großen ETW-Kanal noch zu viel Bauraum benötigt. Daher wurde ein grundsätzlich neues, von der bisherigen DLR-Methodik abweichendes Konzept umgesetzt. Als Ausgangspunkt für die neue ILA-OFRS-Sonde wurde der klassische Aufbau einer ungeschifteten LDV-Sonde gewählt, die mit einem Polarisator und mit einer Referenzmessung der Laserleistung erweitert wurde. Das OFRS-Signal kommt nun aus dem Schnittpunkt der beiden gekreuzten Laserstrahlen, dem LDV-Messvolumen, welches auf eine multimode Lichtleitfaser abgebildet wird. Das OFRS-Signal wird durch die Faser zur außerhalb der Sonde angeordneten Jodzelle übertragen, siehe Abb. 5.



Abb. 5: Temperaturstabilisierte Jodzelle mit Lichtleitfaseranschluss und Photomultiplier.

Durch diesen neuen Aufbau ergeben sich folgende Vorteile:

Durch die Verlagerung der Jodzelle außerhalb der Sonde kann diese deutlich verkleinert werden. Dadurch ist die Sonde auch deutlich unempfindlicher gegen die starken Temperaturschwankungen, wie sie trotz temperierten Gehäusen im Kryowindkanal zu erwarten sind.

Die örtliche Auflösung kann durch die Reduzierung des Messvolumens im Schnittpunkt der LDV-Strahlen deutlich von ca. 30 mm auf 3,2 mm verbessert werden. Das Messvolumen ist hier definiert als der Bereich in dem die Laserleistung auf  $1/e^2$  abgefallen ist.

Ohne Umbau der Sonde kann im gleichen Aufbau bei kurzzeitiger Zugabe von Seeding eine Kalibrierung der OFRS-Messungen mit einer genauen und rückführbaren LDV-Messung durchgeführt werden. Damit ist die Messung unabhängig von der Messgenauigkeit der im Windkanal eingebauten Sensorik.

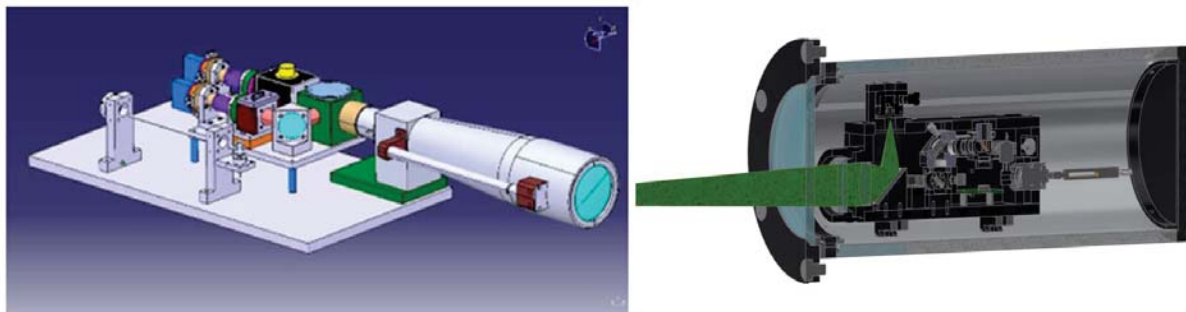


Abb. 6: Optimierung des DLR-Sensors mit einem zusätzlichen Detektor (links), Einbau der kombinierten LDV-/OFRS-Sonde in das temperaturstabilisierte Gehäuse des ETW (rechts).

Die Untersuchung der Messunsicherheit des neuen ILA-OFRS-Sensors wurde an einem ILA-Prüfstand bei Umgebungstemperaturen durchgeführt, da der PETW nur zeitlich sehr begrenzt zur Verfügung steht und relativ hohe Betriebskosten verursacht. Da die Amplitude des OFRS-Signals proportional zum Druck eingeht, ist von einer deutlich höheren Signalstärke im ETW-Kanal auszugehen, da dieser bei bis zu 4,5 bar betrieben wird.

### Messumgebung ILA Prüfstand

Der vereinfachte Versuchsaufbau (Abb. 7) besteht im Wesentlichen aus einer konditionierten Rohrströmung (Rohr-Innendurchmesser 80 mm, vergl. Abb. 8 oben) in deren Messquerschnitt Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 30 bis 100 m/s erzeugt werden können. Der optische Zugang erfolgt über ein entspiegeltes Glasrohr.

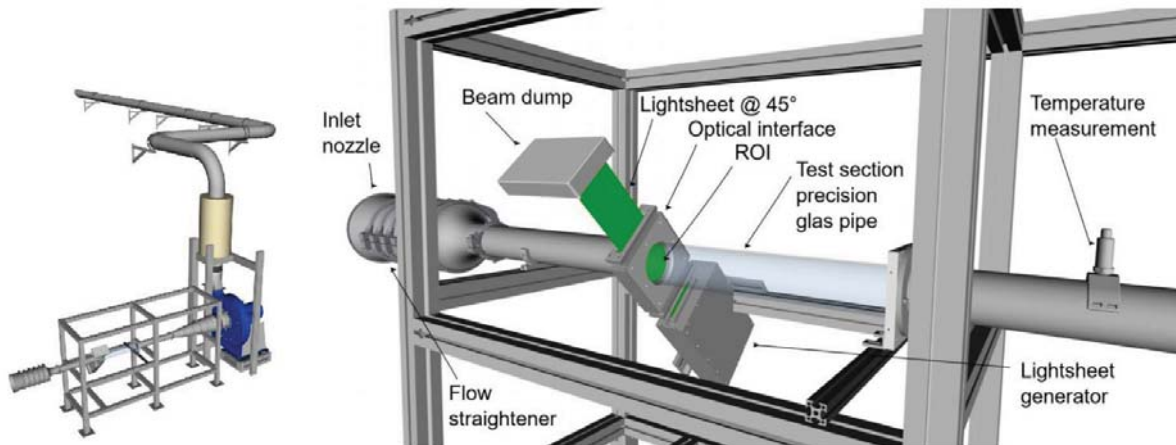


Abb. 7: Prüfstand für die Untersuchung von Rohrströmungen.

Bedingt durch den Strömungsgleichrichter, der Kontraktion der Strömung in der Einlaufdüse und der relativ kurzen Distanz zum Messquerschnitt wird dort kein voll ausgebildetes Rohrströmungsprofil erwartet.

Zur Charakterisierung des Prüfstandes erfolgten Netzmessungen bei drei verschiedenen Betriebspunkten mit einem kalibrierten LDV-System. Da sich das normierte Strömungsprofil für diese Betriebspunkte nicht ändert, kann der Volumenstrom über eine Punktmessung in der Rohrmitte und zusätzlich eine Kalibrierung der Differenzdruckmessung an der Messdüse durchgeführt werden, vergleiche Dues u. a. (2023). Vor allem zeigt sich, dass aufgrund des flachen Strömungsprofils in der Rohrmitte der Geschwindigkeitsverlauf dort örtlich konstant ist. Daher treten kaum Fehlereinflüsse durch Abweichungen in der Positionierung der OFRS-Sonde auf, siehe Abb. 8.

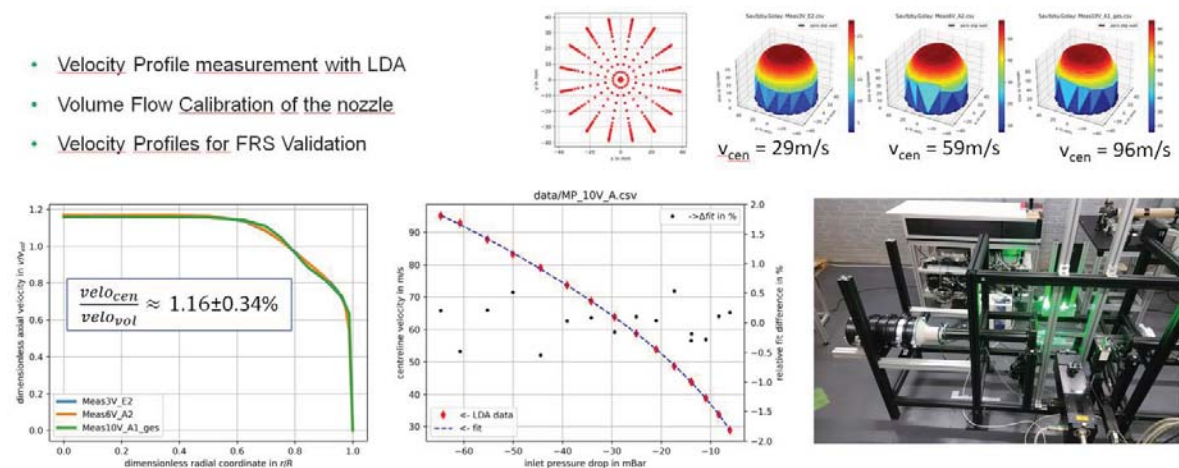


Abb. 8: Charakterisierung des Prüfstandes hinsichtlich Geschwindigkeitsprofil und Druckverlust an der Eintrittsdüse für verschiedene Betriebspunkte.

## Untersuchung der Messunsicherheit am ILA Prüfstand

Aus der Bewegung eines Moleküls resultiert bei der FRS Messung eine Dopplerverschiebung des Rayleigh Signals. Die Dopplerverschiebung ist proportional zur Geschwindigkeit und der Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf die Differenz zwischen Beobachtungs- und Laser-Vektor. Zur Rückrechnung der Geschwindigkeit aus der Dopplerverschiebung wird daher die geometrische Anordnung berücksichtigt. Im vorliegenden Fall einer konditionierten Düsenströmung wird nur die axiale Strömungskomponente ermittelt.

Zur Bestimmung der effektiven Ausrichtung der OFRS Sonde zur Längsachse der Rohrleitung wird die Sonde zunächst im  $90^\circ$  Winkel zur Rohrleitung am ILA-Prüfstand positioniert. Das Messvolumen wird in das Zentrum des Querschnitts positioniert, wobei die LDV-Sonde die axiale Geschwindigkeits-Komponente erfasst. Der Prüfstand wird bei verschiedenen Geschwindigkeiten betrieben, die Mittengeschwindigkeit (LDV) und der Druckabfall an der Einlaufdüse werden aufgezeichnet. Da die FRS Optik unter  $90^\circ$  keine Dopplerverschiebung erfassen kann, muss zur Bestimmung der axialen Strömungskomponente eine Messung unter einem Inklinationwinkel zur Hauptachse der Rohrleitung vorgenommen werden. Im vorliegenden Fall wird die Sonde unter einem Winkel ( $\sim 45^\circ$ ) zur Längsachse montiert, wobei das Messvolumen an der gleichen radialen Position verbleibt. Die nun gemessene LDA-Geschwindigkeit kann über den Drehwinkel in die  $90^\circ$  Messung umgerechnet werden unter der Voraussetzung, dass an der Einlaufdüse der gleiche Druckverlust auftritt. Zur Bestimmung des effektiven Drehwinkels werden jeweils 14 Betriebspunkte aufgenommen und die summierte Differenz zwischen den umgerechneten Geschwindigkeiten durch Variation des angenommenen Drehwinkels minimiert. Der berechnete Inklinationwinkel ergibt sich zu  $46,4^\circ$ .

Die Messungen bei 27 m/s wurden von der Bewertung ausgenommen, da bedingt durch die offene Bauart des Prüfstands nicht ausgeschlossen werden kann, dass bei diesen Messungen äußere Einflüsse (Wind) eine Rückwirkung auf den angezeigten Druckverlust der Einlaufdüse haben. Es wurden die verbleibenden 7 Messungen mit jeweils 5 Wiederholungen ausgewertet, in Abb. 9 sind die sich ergebenden FRS Spektren exemplarisch für eine Messung dargestellt.

Für die Messungen am Laborprüfstand (ILA) ergibt sich nach Berücksichtigung eines statischen Geschwindigkeitsoffsets eine mittlere Abweichung von 0,45 m/s beziehungsweise 0,7 % für die Geschwindigkeiten, vergleiche Tabelle 1. Als Referenz dienen die zuvor erfolgten LDV Messungen, die Unsicherheit wird für die Geschwindigkeitsreferenz  $< 1\%$  abgeschätzt. Der statische Offset für die axiale Geschwindigkeit beträgt circa 9 m/s und kann mit der mit der absoluten Unsicherheit der Frequenzmessung begründet werden kann. Die korrespondierende Frequenzverschiebung liegt mit 2,3 MHz innerhalb der maximalen Frequenzabweichung von 10 MHz des Wellenlängenmessgeräts (HighFinesse WS). Die maximale Abweichung der so ermittelten Geschwindigkeit beträgt 0,8 m/s bzw. 1,35 %. Die Standardabweichung für die Ermittlung der Geschwindigkeit in einer Wiederholungsmessung beträgt in allen Fällen unter 2 %.



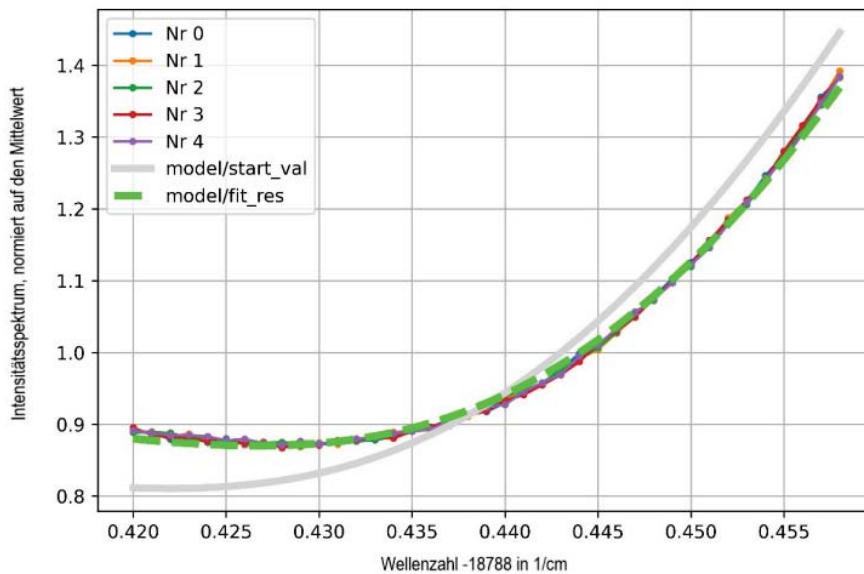


Abb. 9: Gemessene und gefittete FRS Spektren, nach Normalisierung auf den Mittelwert des dargestellten Wellenzahlbereichs. Nr 0 bis 4 Messwerte für 5 Frequenzscans bei einer nominellen Geschwindigkeit von ca 70 m/s; Für die berechneten Spektren wird das ML-RBS Modell (Melnikov u. a. (2023)), sowie die Faltung mit der kalibrierten Jodlinie berücksichtigt. Graue durchgängige Linie: Startspektrum für die Ausgleichsrechnung mit dem Modell; gestrichelte grüne Linie: resultierendes Intensitätsspektrum nach dem Fit.

Messung	Ref-Geschw.[m/s]	FRS-Geschw.[m/s]	Abw.[m/s]	Abw.[%]
4V	37,49	37,84	0,35	0,94
5V	48,14	47,49	0,65	1,35
6V	58,99	58,84	0,15	0,25
7V	69,59	68,82	0,77	1,10
8V	79,57	79,57	0,00	0,00
9V	88,77	89,57	0,80	0,90
10V	96,39	96,80	0,41	0,43
		<b>Mittelwert</b>	0,45	0,71
		<b>Standardabweichung</b>	0,28	0,45

Tab. 1: Messabweichung des FRS-Systems am ILA Prüfstand. Als Referenz dienen die LDV Messungen unter 90°. Die Spalte „Messung“ beinhaltet die Regelspannung die nominell am Frequenzumrichter des Ventilators anliegt, zur Einstellung einer gewünschten Geschwindigkeit.

## Zeitaufgelöste FRS-Messung des DLR mit der f0-Methode

Eine Möglichkeit zur Messung mit einer zeitlichen Auflösung von 0,1-1 kHz stellt die „f0“-Methode dar. Dabei wird die Frequenz des Lasers am Rand eines Absorptionsminimums stabilisiert und nur der Amplitudenwert des Spektrums bei dieser Frequenz bestimmt. Mit dieser Methodik können die Schwankungen der Geschwindigkeit, Temperatur und des Druckes erfasst werden, für eine absolute Bestimmung der Messgrößen reicht im Moment die erreichte Messunsicherheit noch nicht aus. Diese Messmethodik wurde bei Testmessungen im PETW bereits erfolgreich erprobt.

Dazu wurde die Geschwindigkeit im PETW in Form einer Rampe verfahren. Dabei konnte allerdings der Kanaldruck nicht konstant gehalten werden. Abb. 10 zeigt die Variation der gemessenen Geschwindigkeit und des gemessenen statischen Drucks. Das FRS f0-Signal folgt der Geschwindigkeitsänderung deutlich, weist aber auch noch Abweichungen bedingt durch die gleichzeitige Änderung des statischen Druckes auf. Durch eine einfache Normierung des FRS-f0-Signals mit einem Faktor für den statischen Druck kann dieser Einfluss beseitigt werden.

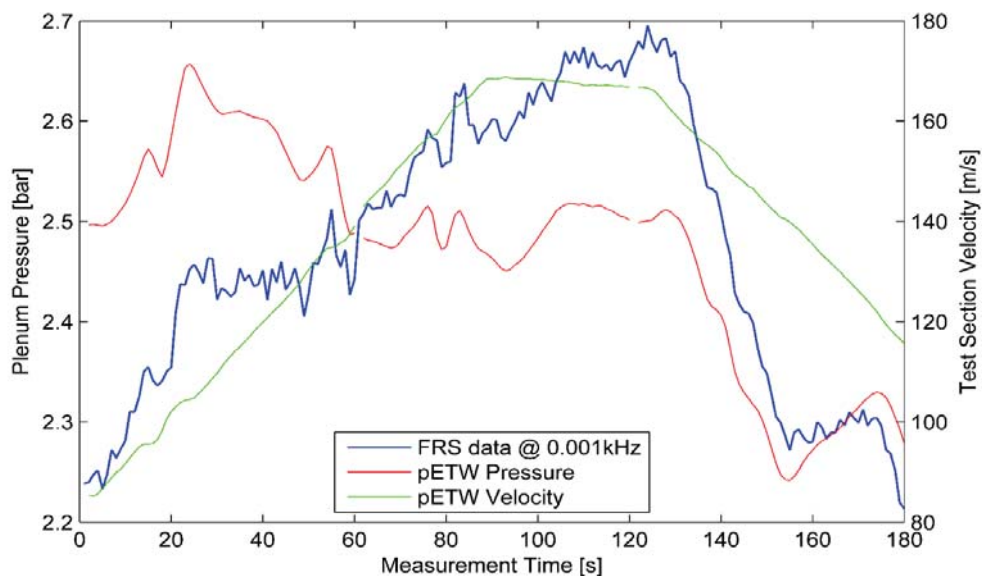


Abb. 10: FRS-Messung nach der f0-Methode bei variabler Geschwindigkeit und damit verbundener Druckänderung im PETW Kanal

Abb. 11 verdeutlicht, das FRS-f0-Signal deutlich der Geschwindigkeitsänderung im Signal folgt. Durch eine zukünftige Normierung des Signals auf die ungefilterte Rayleigh-Intensität, welches proportional zur Dichte ist, die mit einem zweiten Photo-Detektor zeitgleich erfasst werden kann, ist eine deutliche Verbesserung der Messabweichung zu erwarten.

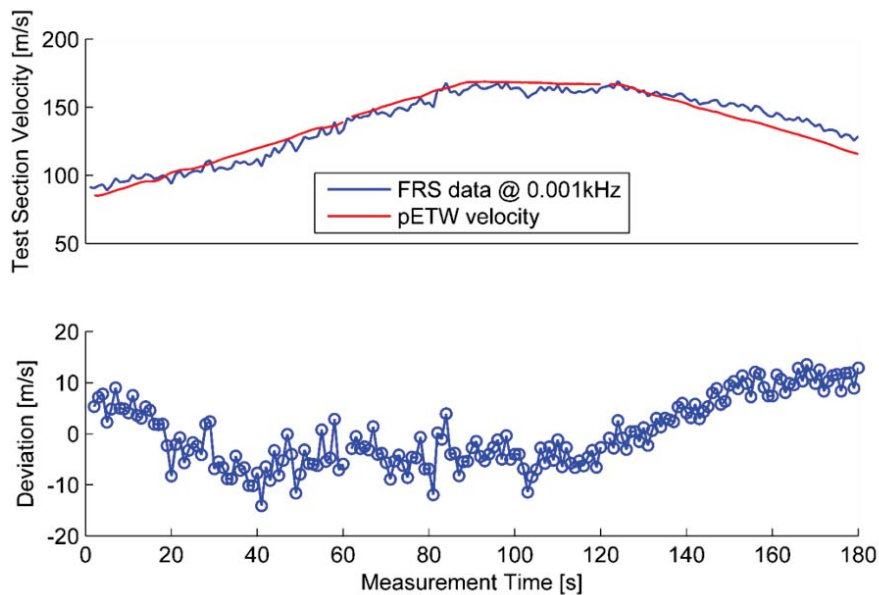


Abb. 11: FRS-f0-Signal, normiert auf den statischen Druck und auf 1Hz gemittelt, damit eine Vergleichbarkeit mit dem PETW-Drucksensor möglich ist

## Zusammenfassung und Ausblick

Im vorgestellten Projekt wurde ein Punktsensor entwickelt, der prinzipiell die gleichzeitige Erfassung von Geschwindigkeit, Temperatur und Druck mit einer zeitlichen Auflösung von einigen Hertz ermöglicht. Der Sensor wurde für den Einsatz unter kryogenen Bedingungen entwickelt und arbeitet ohne die Zugabe von Seeding. Die Einsatzfähigkeit unter kryogenen Bedingungen wurde durch Messungen am Pilotkanal des ETW nachgewiesen. Weil mit der entwickelten Optik auch ohne Systemumbau LDV-Messungen durchgeführt werden können, ist eine rückführbare Kalibrierung des FRS-Sensors im eingebauten Zustand bei kurzzeitiger Partikelzugabe möglich. Für das FRS-System wurde eine durchschnittliche absolute Abweichung von  $< 0,5$  m/s im Vergleich zu den LDV-Referenz-Messungen nachgewiesen.

Der Sensor steht nun für den Einsatz im Windkanal zur Verfügung, vor allem in Anwendungen, in denen das Seeden der Strömung mit Partikeln schwierig oder unerwünscht ist. Dies ist sicherlich bei Kryokanälen oder auch bei transsonischen Windkanälen der Fall.

## Dankesworte

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des LuFo V-3 Projektes „OFRS“ mit dem Förderkennzeichen 20Q1729B. Des Weiteren möchten sich die Autoren bei den involvierten Kollegen des Instituts für Antriebstechnik, der ILA R&D sowie des ETW bedanken, ohne die eine Durchführung der Messung und die Aufnahme der entsprechenden Ergebnisse nicht möglich gewesen wäre.

## Literatur

Doll, U., G. Stockhausen, und C. Willert. 2014. „Endoscopic filtered Rayleigh scattering for the analysis of ducted gas flows“. *Experiments in Fluids*, 3 (55). <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1690-z>.

Dues, M., U. Doll, T. Bacci, A. Picchi, G. Stockhausen, und C. Willert. 2018. „Laseroptische Untersuchung des Strömungsfeldes hinter dem Turbinengitter eines Simulationsprüfstandes mittels Filtered Rayleigh Scattering“. *Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"*.

Dues, M., J. Steinbock, U. Doll, I. Röhle, S. Melnikov, P. Zachos, und M. Migliorini. 2023. „Planar seeding free measurement of time-averaged 2D3C velocity, pressure and temperature fields using the Filtered Rayleigh Scattering method“. *Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“*.

Melnikov, S., I. Röhle, U. Doll, M. Dues, J. Steinbock, M. Migliorini, und P. Zachos. 2023. „Machine learning approach for fast evaluation of filtered Rayleigh scattering measurement data“. *Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“*.