

## Frequenz-scannende gefilterte Rayleigh-Streuung für Temperaturfeldmessung und Strömungscharakterisierung

### Frequency scanning filtered Rayleigh scattering for temperature field measuring and flow field characterization

U. Doll<sup>1</sup>, G. Stockhausen<sup>1</sup>, C. Willert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln, email: [ulrich.doll@dlr.de](mailto:ulrich.doll@dlr.de)

Rayleigh-Streuung, Frequenz-Scan, Molekularer Filter, Endoskopisch, Sonden  
Rayleigh scattering, frequency scanning, molecular filter, endoscopic, probe

#### Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags soll ein auf dem bildgebenden Verfahren der gefilterten Rayleigh-Streuung (FRS) basierendes Messsystem vorgestellt werden, das mittels Durchstimmen einer schmalbandigen Laserlichtquelle zur Ermittlung zeitlich gemittelter Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder geeignet ist. Die FRS Messtechnik nutzt den Effekt der molekularen Absorption, um starke elastische, die Rayleigh-Streuung überlagernde Störlichtereignisse wie an Oberflächen oder an Partikeln in der Strömung gestreutes Licht (Mie-Streuung) vom Nutzsignal zu trennen. Mit Hilfe der gefilterten Rayleigh-Streuung wurde zum einen die Interaktion der Luftkühlung einer Brennkammerwand mit der Brennerflamme als Temperaturfeld visualisiert. Zum anderen wurde mittels FRS die Strömung eines Glockeneinlaufs im Hinblick auf Temperatur, Druck und Strömungsgeschwindigkeit charakterisiert. Dabei erfolgte im Fall des Glockeneinlaufs die Bilddatenerfassung endoskopisch unter Verwendung einer optischen Sonde und eines Bildleiters.

#### Einleitung

Die Charakterisierung komplexer Strömungsphänomene unter realen, maschinennahen Bedingungen bedarf Messdaten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Der Einsatz laserbasierter planarer optischer Messverfahren unter den Bedingungen des Prüfstandbetriebs stellt die Messtechnik vor große Herausforderungen. Umwelteinflüsse wie Temperatur- und Schwingungsbelastung, beengte Verhältnisse und unzureichende optische Zugänglichkeit verlangen nach Robustheit und Flexibilität. Insbesondere an Oberflächen gestreutes Laserlicht in der Nähe von Wänden, Fenstern oder komplexer Geometrien bringt die optische Messtechnik oft an die Grenzen der Anwendbarkeit.

Die laserinduzierte Rayleigh-Streuung ist, im Vergleich zu Mie-Streuung von großen Partikeln (Staub, Ruß) oder den oben genannten geometrischen Streueffekten von Wänden oder Fenstern, um einige Größenordnungen schwächer. Die gefilterte Rayleigh-Streuung (FRS) [Miles1990] nutzt die Absorptionsbanden von Atomen oder Molekülen, um diese starken elastischen Störlichtereignisse von der Rayleigh-Streuung zu trennen. Die FRS Messtechnik eignet sich aus diesem Grunde in besonderem Maße zur Visualisierung von Strömungseigenschaften in der direkten Umgebung von Wänden.

Die Anwendung optischer Messverfahren in maschinennahen Umgebungen geht oftmals mit einer eingeschränkten optischen Zugänglichkeit einher. Um auch unter diesen Bedingungen messen zu können, ist eine sondenbasierte Implementierung der Messtechnik in vielen Fällen erforderlich. Verfahren wie die Particle Image Velocimetry (PIV), die hoch aufgelöste

Aufnahmen von der Strömung folgenden Partikeln (Seeding) in der Messebene benötigt, sind für eine endoskopische Bilddatenerfassung aufgrund der geringen optischen Qualität der Abbildung ungeeignet. Stattdessen werden intensitätsbasierte Messtechniken wie die Doppler Global Velocimetry (DGV) für sondenbasierte Anwendungen bevorzugt [Wilt2007]. Da die FRS Messtechnik ebenso intensitätsbasiert ist und zusätzlich keine Zugabe von Seeding zur Strömung erforderlich ist, ist das Ziel dieser Arbeit das Verfahren für eine sondenbasierte Verwendung zu qualifizieren.

Da sich die FRS Implementierung dieses Beitrags auf die Bestimmung zeitlich gemittelter Messgrößen konzentriert, kann die Frequenz-Scan-Methode FRS (FSM-FRS) [Forkey1996, Boguszko2005] angewandt werden. Das Durchstimmen der Frequenz einer schmalbandigen Laserlichtquelle entlang des Transmissionsprofils des Absorptionsfilters ermöglicht die Gewinnung von Intensitätsspektren für jeden Bildpunkt in der Messebene. Aus diesen Spektren können dann Informationen über Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet werden.

Die FRS Messtechnik wurde sowohl in nichtreaktiven Strömungen [Miles1990, Forkey1996, Boguszko2005] als auch in Flammenanwendungen [Elliott2001, Kearney2005, Zetterberg2008] erfolgreich angewandt. Um die Vielseitigkeit und Stärken des FSM-FRS Systems zu demonstrieren, wurden für diesen Beitrag Anwendungsbeispiele aus beiden Bereichen ausgewählt: Zum einen wurde das wandnahe Temperaturfeld an einer effusionsgekühlten Brennkammerschindel mit hoher räumlicher Auflösung mittels FSM-FRS visualisiert. Zum anderen wurde die Strömung eines Glockeneinlaufs im Hinblick auf Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit charakterisiert. Dabei erfolgte im Fall des Glockeneinlaufs die Bilddatenerfassung endoskopisch unter Verwendung einer optischen Sonde und eines Bildleiters.

## Theorie

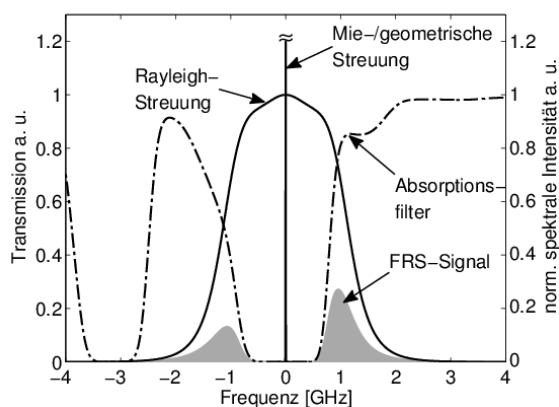


Abb. 1: Prinzip der FRS: Das schmalbandige, vongroßen Partikeln (Mie) oder Oberflächen (geometrisch) gestreute Licht werden absorbiert, während die Rayleigh-Streuung den Filter Anteilig passiert [Doll2012].

einerseits, jedoch ebenso einen nicht unerheblichen Anteil des im Rayleigh-Regime gestreuten Lichts andererseits. Die verbliebenen spektralen Anteile der Rayleigh-Streuung sind das eigentliche FRS-Signal, welches dann von einem empfindlichen Detektor akkumuliert wird.

Abb. 1 zeigt die spektrale Antwort eines mit schmalbandigem Laserlicht beleuchteten Volumenelements. Licht, welches von Partikeln im Mie-Regime oder von Oberflächen geometrisch gestreut wird hat dieselbe spektrale Bandbreite der Beleuchtungsquelle. Die Rayleigh-Streuung hingegen ist aufgrund verschiedener Mechanismen, welche der Molekularbewegung zuzuschreiben sind, auf einige Gigahertz verbreitert [Miles2001]. Wird nun der Absorptionsfilter vor dem Detektor platziert, wird die spektrale Antwort des Volumenelements mit der Transmissionskennlinie des Filters überlagert. Alle Anteile innerhalb des Blockbereichs werden durch den Filter absorbiert. Dies beinhaltet die Anteile des Streulichts, welche Mie- und geometrischer Streuung zuzuordnen sind

In Abb. 2 ist das Prinzip der Frequenz-Scan-Methode schematisch dargestellt. Die Frequenz des Lasers wird n-Mal entlang des Transmissionsprofils des Absorptionsfilters verschoben. Die spektrale Verteilung der Rayleigh-Streuung bleibt im Fall eines stationären, bzw. im zeitlichen Mittel konstanten Prozesses für jeden Frequenzschritt erhalten. Das FRS-Signal hingegen, welches sich aus den Filter passierenden spektralen Komponenten zusammensetzt, verändert sich. Wenn nun jedem Frequenzschritt die Aufnahme eines Bildes zugeordnet

wird, resultiert dies in Intensitätsspektren für jedes Pixelelement der Kamera. Aus diesen Spektren können nun Informationen über die Strömungsfeldparameter Druck, Temperatur und Geschwindigkeit sowohl einzeln, als auch simultan gewonnen werden [Forkey1996, Boguszko2005].

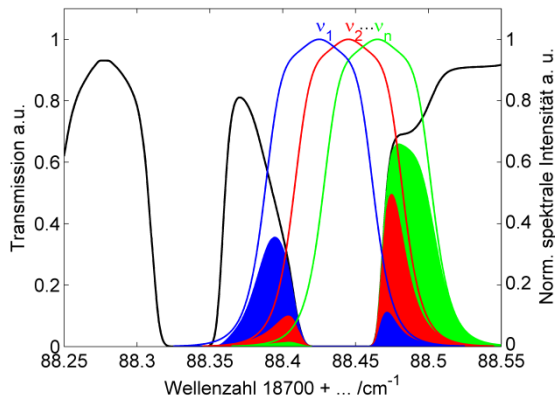


Abb. 2: Frequenz-Scan-Methode: Der Laser wird n-Mal entlang des Transmissionsprofils in der Frequenz verstimmt.

Temperatur  $T$  und die aus der Strömungsgeschwindigkeit folgende Dopplerverschiebung des an den Luftmolekülen gestreuten Lichts  $\Delta\nu$  charakterisiert. Wie in Abb. 3 (rechts) zu sehen, kann jedem Parametersatz  $p, T, \Delta\nu$  eindeutig ein Intensitätsspektrum zugeordnet werden. Ein interessanter Aspekt dieses Anwendungsbeispiels ist bei einer Wellenzahl von  $18788.434 \text{ cm}^{-1}$  zu beobachten. Bei dieser Wellenzahl besteht keine Empfindlichkeit der Messtechnik gegenüber Druck, Temperatur oder Strömungsgeschwindigkeit.

In Abb. 3 wurden Intensitätsspektren in Bezug auf die beiden Anwendungsfälle der Temperaturmessung in der Hochdruckbrennkammer bei 5 bar (links) und die Strömungsfeldcharakterisierung im Glockeneinlauf (links) simuliert. Die Variation der Strömungsfeldparameter entspricht dabei in etwa den Bedingungen während der Experimente. Für die Temperaturvariation (links) fällt auf, dass für bestimmte Wellenzahlen der Zusammenhang zwischen normierter Intensität und Temperatur nicht eindeutig ist. Des Weiteren nimmt die Empfindlichkeit auf Temperaturänderungen zu hohen Werten über 1500 K ab. Der Zustand der isentropen Rohrströmung ist durch den Druck  $p$ , die

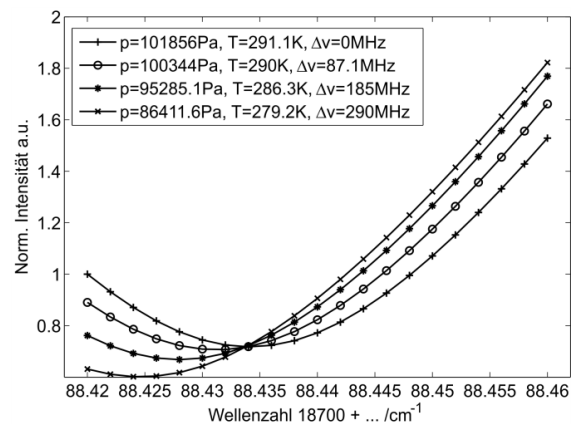
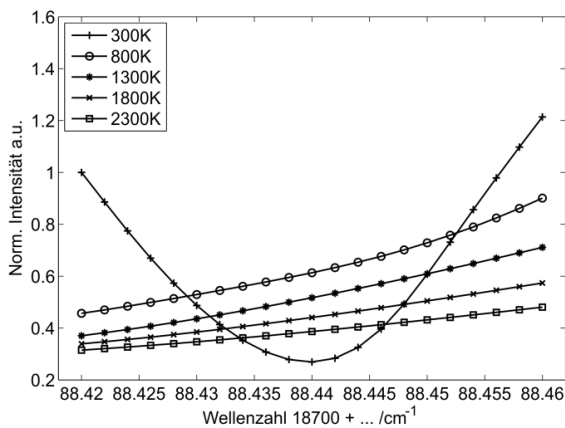


Abb. 3: (links) Simulierte FSM-FRS Intensitätsspektren für Luft bei 5 bar bei Variation der Temperatur  $T = 300 (+), 800 (o), 1300 (*), 1800 (x), 2300 (\square)$  K. (rechts) Simulierte Intensitätsspektren für eine isentrope Rohrströmung bei Variation des Massenstroms  $\dot{m} = 0 (+), 0,51 (o), 1,04 (*), 1,51 (x)$  kg/s.

## Messsystem

In Abb. 4 ist der prinzipielle Aufbau des FSM-FRS-Systems in den beiden Konfigurationen des Empfangssystems mit Objektiv oder Bildleiter schematisch dargestellt. Das System basiert auf einem Coherent Verdi V5 dauerstrich Festkörperlaser. Der Laser emittiert Licht bei  $532 \text{ nm}$  mit einer Bandbreite von unter  $5 \text{ MHz}$  und einer Ausgangsleistung von bis zu  $6 \text{ W}$ . Der Laser bietet drei Möglichkeiten seine Ausgangsfrequenz in einem Bereich von ca.  $60 \text{ GHz}$  zu beeinflussen. Zum einen ein in die Kavität des Lasers eingesetztes heizbares Etalon für große Frequenzänderungen, zum anderen zwei piezoelektrische Elemente, um die Frequenz über die Resonatorlänge anzupassen. Ein kleiner Teil des Laserlichts wird mittels

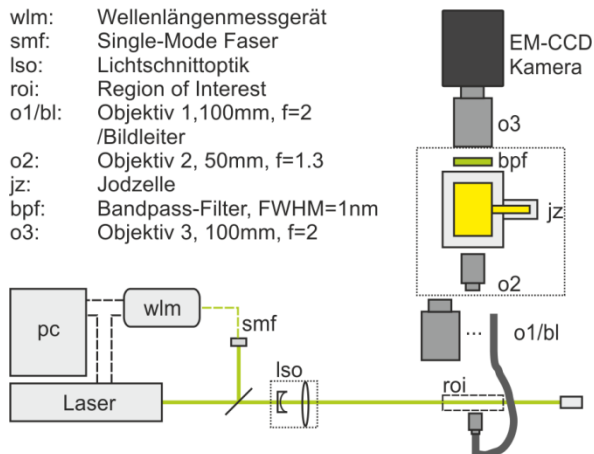


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau des FSM-FRS-Systems

einer Single-Mode-Faser in die Wellenlängen Überwachungs- und Kontrolleinheit eingekoppelt. Diese besteht aus einem WSU10 Wavelengthmeter der Firma High Finesse, das mittels eines eingebauten PID-Reglers die Ausgangsfrequenz des Lasers über das erste Piezoelement mit einer relativen Abweichung kleiner 2 MHz stabilisiert. Die Langzeitstabilität der Ausgangsfrequenz wird über eine zweite Regelschleife gewährleistet, dessen Kontrollspannung das zweite Piezoelement steuert. Die Bilddatenerfassung beruht auf einer back illuminated Hamamatsu C9100-13 EM-CCD Kamera. Der Detektor hat eine maximale Auflösung von 512 x 512 Pixelelementen bei einer Pixelgröße von  $16 \times 16 \mu\text{m}^2$ , die Quanteneffizienz ist größer als 90 % für grünes Licht. Zusätzlich besitzt die Kamera einen Verstärkungsmechanismus mit einer einstellbaren Signalverstärkung von bis zu 1200. Die Kamera mit Objektiv ist mit einem Gehäuse verbunden, welches einen Bandpass-Filter der Firma Barr (FWHM 1 nm) und die Absorptionszelle enthält. Molekulares Jod besitzt zahlreiche Transitionen im Bereich von 532 nm und wurde aus diesem Grund als Filtermedium ausgewählt. Der Filter besteht aus einem evakuierten, mit kristallinem Jod gefüllten Glaszylinder mit 50 mm Durchmesser und Länge. Der Zylinder wird in einen heizbaren Kupferblock mit thermischer Isolierung eingebaut. Wird die Zelle nun geheizt, verdampft das kristalline Jod, bis eine bestimmte Temperatur, die sogenannte Sättigungstemperatur erreicht wird. Dadurch wird eine homogene Absorption über den gesamten Querschnitt der Zelle gewährleistet und eventuelle Sprünge in der Transmission aufgrund von spontaner Verdampfung werden vermieden [Röhle2001]. Die Steuerung des Messsystems ist in National Instruments LabView-Routinen eingebettet.

### Temperaturfeldmessung in einer Hochdruckbrennkammer

Im Rahmen der Untersuchung verschiedener Konzepte zur effizienten Brennkammerwandkühlung wurde die FSM-FRS Messtechnik zum Einsatz gebracht. Ziel der Messungen war es, die Temperaturverteilung der Interaktion zwischen Flamme und Kühlluftfilm in direkter Nähe zur effusionsgekühlten Brennkammerwand mit hoher räumlicher Auflösung zu visuali-

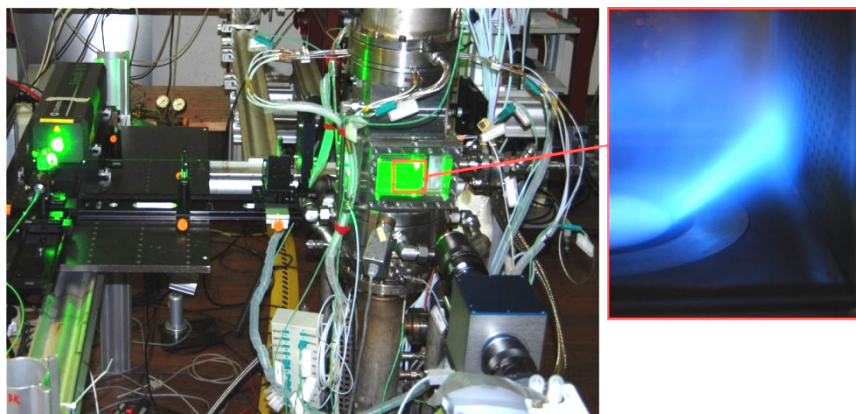


Abb. 5: (links) FSM-FRS Aufbau am EDS (rechts) Fotografie der Flamme mit effusionsgekühlter Brennkammerwand

sieren. Die Messungen wurden am Hochdruck-Brennkammerprüfstand Ein-Düsen-Sektor (EDS) [Meier2011] des DLR in Köln durchgeführt. Der Prüfstand besitzt einen Querschnitt



von  $102 \times 102 \text{ mm}^2$  und kann mit Drücken von bis zu 20 bar beaufschlagt werden. Die maximale Vorheiztemperatur für Verbrennungs- und Kühlluft beträgt 850 K. Die Brennkammer ist von drei Seiten optisch zugänglich und kann in drei Raumrichtungen traversiert werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde der Prüfstand mit Erdgas betrieben, der Brennstoffmassenstrom betrug  $4,5 \text{ g/s}$  bei einem Luftmassenstrom von  $72,5 \text{ g/s}$  (AFR  $\sim 17$ ). Die Luft wurde auf eine Temperatur von 450 K vorgeheizt, der Druck in der Brennkammer betrug 5 bar.

Abb. 5, links zeigt den optischen Aufbau am EDS. Das Laserlicht wurde um 90° umgelenkt und zu einem ca. 11 mm hohen und in der Messebene etwa 0,4 mm starken Lichtband aufgeweitet. Der Lichtschnitt wurde normal zur effusionsgekühlten Wand (Abb. 5, rechts) auf die mittlere Reihe der Kühlluftbohrungen ausgerichtet. Um die austretenden Kühlluftstrahlen detailliert auflösen zu können, war das Bildfeld auf  $16 \times 16 \text{ mm}^2$  limitiert, was zwei Luftstrahlen beinhaltet. Der untere Kühlluftstrahl befand sich 11 mm oberhalb der Brennerkopfplatte. Durch zweimaliges vertikales traversieren des Prüfstand in 10 mm Schritten konnten insgesamt 6 Kühlluftstrahlen visualisiert werden. Die verwendete Detektoroptik (Zeiss MacroPlanar  $f = 100 \text{ mm}$ ,  $F = 2$ ) ermöglichte bei einem Abstand von 340 mm eine räumliche Auflösung von  $0,0625 \text{ mm/Pixel}$ . Abb. 6 zeigt die ersten 5 mm der Temperaturverteilung nahe der effusionsgekühlten Brennkammerwand. Das Ergebnisbild wurde aus den drei vertikalen Brennkammerpositionen zusammengesetzt. Die Kerntemperaturen der aus der Wand austretenden Kühlluftstrahlen sind in sehr guter Übereinstimmung mit der Vorheiztemperatur von 450 K. Innerhalb der ersten 2 mm von der Wand formen die eindringenden Luftstrahlen einen Kühlfilm, der von der untersten bis zur obersten Lochposition stromab erhalten bleibt. Diese Struktur des Kühlluftfilms wurde durch korrespondierende Laser Induced Fluorescence (LIF)-Messungen bestätigt [Lange2012]. Da das FRS-Signal von der Gaszusammensetzung abhängig ist, wird die höchste Messgenauigkeit im Bereich bis 2 mm von der Wand erwartet, da dort die Strömung im Wesentlichen aus Luft besteht. Mit zunehmender Entfernung von der Wand vermischt sich die Kühlluft mit den Produkten aus der Verbrennung, was Aussagen über die Gaszusammensetzung erschwert. Im Vergleich zu den Temperaturmessungen aus [Lange2012] folgt in diesen Bereichen eine um etwa 150 K höhere Temperatur aus der FRS-Auswertung. Die Temperaturen der Kühlluftstrahlen hingegen stimmen mit Thermoelementmessungen der vorgeheizten Luft im

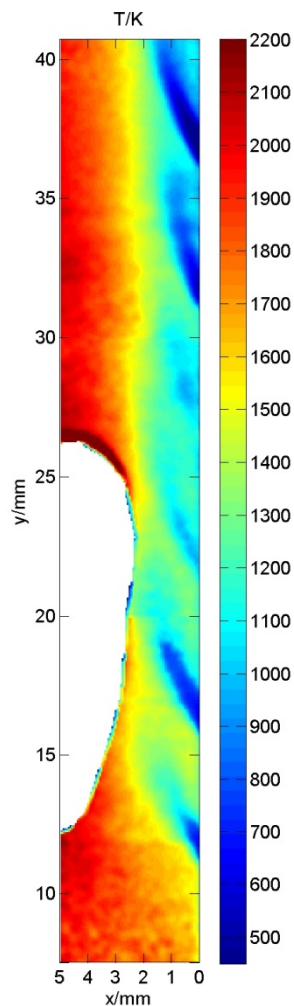


Abb. 6: Wandnahe Temperaturverteilung bei 5 bar und 450 K Kühllufttemperatur.

Rahmen von  $\pm 25 \text{ K}$  überein. Sowohl direkt an der stark reflektierenden Wand, als auch nahe der hellen Flammenzone (weißer Bereich in Abb. 6) konnten die Daten verwertet werden.

### Strömungsfeldcharakterisierung im Glockeneinlauf

Im Zuge der Qualifizierung der FSM-FRS für einen sondenbasierten Einsatz unter Prüfstandsbedingungen wurde die Messtechnik zur Strömungsfeldcharakterisierung eines Glockeneinlaufs verwandt. Die Messungen wurden an einem Rohrkanal im Einlauf-Diagnostik-Labor (EDL) des DLR in Köln durchgeführt.

In Abb. 7 ist der Prüfstand mit dem optischen Aufbau zu sehen. Luft wird aus der Umgebung in den Rohrkanal gesaugt, die Messebene wird durch einen Fensterspalt in der Außenwand mittels eines Lichtschnitts über den gesamten Querschnitt (Durchmesser 107,5 mm) ausgeleuchtet. 340 mm stromab der Messebene befindet sich das Endoskop, welches über einen Bildleiter mit dem Kamerasystem verbunden ist. Die Anlage ist in der Lage Massenströme von bis zu 1,7 kg/s zu realisieren. In der Messebene werden statischer Druck und Temperatur mittels Sonden gemessen, der Luftmassenstrom wird über eine genormte Messblende ermittelt.

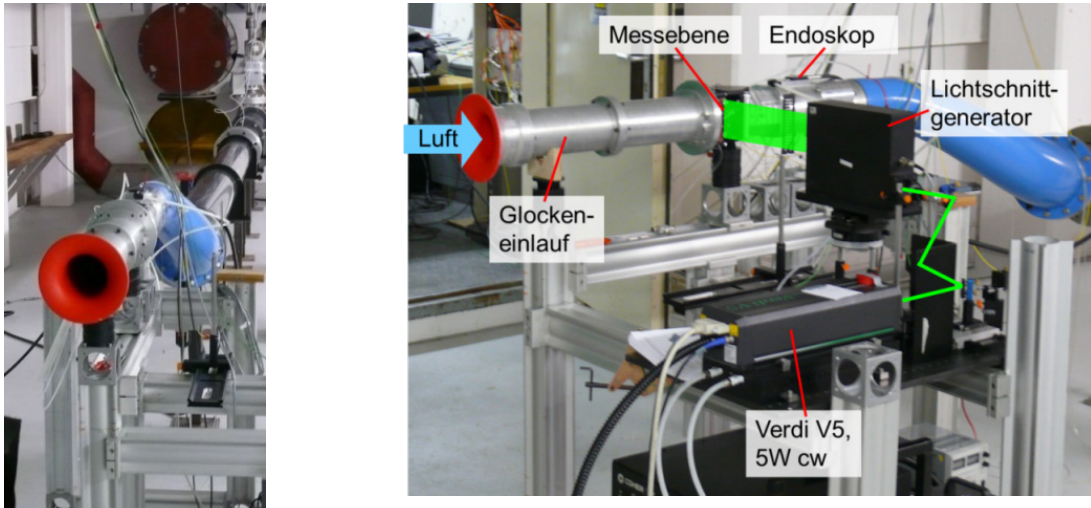


Abb. 7: (links) Rohrkanal EDL (rechts) Optischer Aufbau

In Abb. 8 sind die Strömungsfeldparameter in der Messebene unter Annahme isentroper Strömungsbedingungen (a, c, e) im Vergleich mit einer Multiparameterauswertung von Temperatur, Druck und Strömungsgeschwindigkeit (b, d, f) zu sehen. Für die isentrope Auswertung der Messdaten wurde die sich aus der Hauptströmungskomponente ergebende Dopperverschiebung als freier Parameter gewählt, Druck und Temperatur ergaben sich aus den Isentropenbeziehungen.

Die Ergebnisse der isentropen Auswertung (Abb. 8 a, c, e) spiegeln den Charakter einer turbulenten Rohrströmung sehr gut wieder. Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit sind bis zu einer radialen Position von etwa 48 mm nahezu konstant. Aufgrund des Grenzschichtinflusses Nahe der Wand fällt die Strömungsgeschwindigkeit stark ab, während Druck und Temperatur ansteigen. Der mittels Messblende gemessene Massenstrom von 1 kg/s stimmt mit der FRS-Auswertung (0,997 kg/s) im Rahmen von unter 0,5 % überein.

Die Ergebnisse der Multiparameterauswertung (Abb. 8 b, d, f) zeigen insbesondere bei Druck und Temperatur einige Probleme. Die Druckverteilung (Abb. 8 b) weist Strukturen auf, die durch die Strömungsphysik nicht erklärbar sind und auf Artefakte in den Messdaten hindeuten. Die mittlere Temperatur in Abb. 8 d ist im Vergleich mit der isentropen Auswertung um einige Kelvin niedriger. Zusätzlich weist die Temperaturverteilung ein erhöhtes Rauschen auf. Die Geschwindigkeitsverteilungen der isentropen und der Multiparameterauswertung hingegen zeigen eine gute Übereinstimmung. Der aus der Multiparameterauswertung errechnete Massenstrom weicht mit 1,04 kg/s um ca. 4 % vom Messblendenwert ab.

Die Abweichungen der Multiparameter- zur isentropen Auswertung in Druck- und Temperaturverteilung lassen sich zum einen auf eine ungenügende Qualität der Messdaten, zum anderen jedoch auf systembedingte Probleme zurückführen. Die hohe Zahl der Gleichzeitig zu ermittelnden Parameter (3 Strömungsfeld- und 2 Kalibrierungsparameter) erschwert die Bestimmung einer physikalisch sinnvollen Lösung. Eine Erweiterung des Scanbereichs des Lasers könnte Abhilfe schaffen. Des Weiteren weist das verwendete Rayleigh-Streulichtmodell kleinere Abweichungen auf, die bei den geringen Druck- und Tempera-

turänderungen jedoch große Auswirkungen haben können. Trotz der genannten Probleme wurde der Massenstrom für die isentrope Auswertung in sehr guter und für die Multiparameterauswertung in guter Übereinstimmung gefunden.

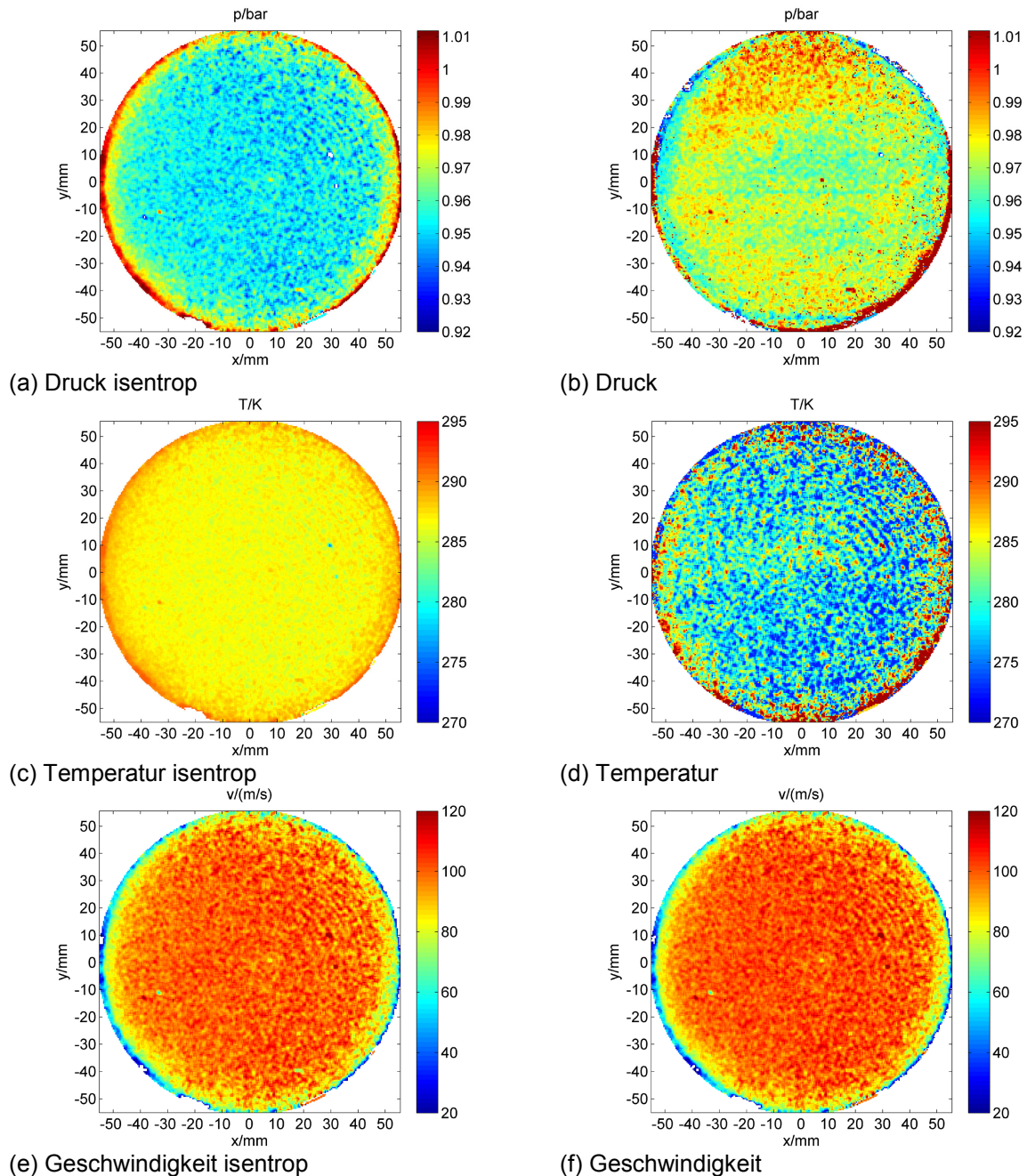


Abb. 8: Strömungsfeldparameter in der Messebene unter Annahme einer isentropen Strömung (a, c, e) im Vergleich mit einer Multiparameterauswertung (b, d, f)

### Fazit

Ein auf der Methode des Frequenz-scannens basierendes FRS System wurde zur wandnahen Temperaturfeldvisualisierung in einem Hochdruckbrennkammerprüfstand zum Einsatz gebracht. Trotz des starken Wandreflexes und des Eigenleuchtens der Flamme konnten verwertbare Daten generiert werden. Das resultierende Temperaturfeld steht in guter Übereinstimmung mit korrespondierenden LIF-Messungen [Lange2012].

Des Weiteren wurde die FSM-FRS zur Strömungsfeldcharakterisierung in einem Glockeneinlauf unter Verwendung eines sondenbasierten Empfangssystems verwandt. Während unter Annahme isentroper Strömungsbedingungen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und Vergleichsmassenstrom besteht, zeigt die Multiparameterauswertung mit der Strömungsphysik nicht erklärbare Abweichungen in Druck- und Temperaturfeld. In diesem Zusammenhang liegt insbesondere in der Modellierung der Rayleigh-Streulichtspektren ein noch nicht ausgeschöpftes Verbesserungspotential und ist Gegenstand weiterer Forschungsbemühungen

## Literatur

Boguszko, M. & Elliott, G. (2005), 'On the use of filtered Rayleigh scattering for measurements in compressible flows and thermal fields', *Experiments in Fluids* 38(1), 33-49.

Doll, U.; Fischer, M.; Stockhausen, G. & Willert, C. E. (2012), 'Frequency scanning filtered Rayleigh scattering in combustion experiments', 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 09-12 July

Elliott, G. S.; Glumac, N. & Carter, C. D. (2001), 'Molecular filtered Rayleigh scattering applied to combustion', *Measurement Science and Technology* 12(4), 452.

Forkey, J.; Finkelstein, N.; Lempert, W. & Miles, R. (1996), 'Demonstration and characterization of filtered Rayleigh scattering for planar velocity measurements: Aerodynamic measurement technology', *AIAA journal* 34(3), 442-448.

Kearney, S. P.; Schefer, R. W.; Beresh, S. J. & Grasser, T. W. (2005), 'Temperature imaging in non-premixed flames by joint filtered Rayleigh and Raman scattering', *Appl. Opt.* 44(9), 1548--1558.

Lange, L., Heinze, J., Schroll, M., Willert, C. & Behrendt, T. (2012) 'Combination of Planar Laser Optical Measurement Techniques for the Investigation of Pre-mixed Lean Combustion', 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 09-12 July

Meier, U., Heinze, J., Freitag, S., Hassa, C. (2011) 'Spray and Flame Structure of a Generic Injector at Aeroengine Conditions' Proceedings of ASME Turbo Expo, June 6-10, Vancouver, Canada GT2011-45282

Miles, R. B., Lempert W. R. (1990) Two-dimensional measurement of density, velocity, and temperature in turbulent high-speed air flows by UV Rayleigh scattering. *Applied Physics B: Lasers and Optics* 51: 1-7.

Miles, R. B.; Lempert, W. R. & Forkey, J. N. (2001), 'Laser Rayleigh scattering', *Measurement Science and Technology* 12(5), R33.

Röhle, I. & Willert, C. (2001) 'Extension of Doppler global velocimetry to periodic flows', *Measurement Science and Technology* 12(4), 420.

Tenti, G.; Boley, C. & Desai, R. (1974), 'On the Kinetic Model Description of Rayleigh-Brillouin Scattering from Molecular Gases', *Canadian Journal of Physics* 52(4), 285--290.

Willert, C.; Stockhausen, G.; Klinner, J.; Lempereur, C.; Barricau, P.; Loiret, P. & Raynal, J. C. (2007), 'Performance and accuracy investigations of two Doppler global velocimetry systems applied in parallel', *Measurement Science and Technology* 18(8), 2504.

Zetterberg, J.; Li, Z.; Afzelius, M. & Aldén, M. (2008), 'Two-Dimensional Temperature Measurements in Flames Using Filtered Rayleigh Scattering at 254 nm', *Appl. Spectrosc.* 62(7), 778--783.