

Experimente zur Anwendung laserinduzierter Brechungsindexgitter (TGS) für Temperaturmessungen in Verbrennungsströmungen

F. Bake, B. Lehmann
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
 Institut für Antriebstechnik (AT)
 Abt. Turbulenzforschung
 Müller-Breslau-Str. 8
 10623 Berlin

März 2003

1 Einleitung

Zur Untersuchung von Instabilitäten in Verbrennungsströmungen sind unter anderem lokale und momentane Messungen von Temperaturfluktuationen von großem Interesse.

Derzeit angewendete Messmethoden wie z.B. *Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS)* erlauben zwar zeitaufgelöste Messungen, sind aber technisch relativ aufwendig, da sie auf resonanten Molekülanregungen basieren. Messtechniken mit Thermoelementen können dagegen nur zeitliche Mittelwerte erfassen. Außerdem kann eine nicht unwesentliche Beeinflussung der Verbrennungsströmung durch den invasiven Charakter des Thermoelements verursacht werden.

Im Rahmen des Teilprojekts 5 „Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den Entropiewellen und der Geräuschemission von Brennkammern“ der DFG-Forschergruppe 486 „Combustion Noise“ soll hierzu die *Transient Grating Spectroscopy (TGS)* als ein einfacheres nichtresonantes Temperaturmessverfahren erprobt werden. Dieses Verfahren ermöglicht die Erfassung von lokalen und momentanen Temperaturwerten in Gasen.

Ein Ziel dieses Projektes sind Korrelationsmessungen zwischen Temperaturschwankungen und Geschwindigkeits- bzw. Druckfluktuationen in Brennkammerströmungen bei atmosphärischem Druck.

In diesem Bericht werden die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Signalstärke bzw. das Signalrauschverhältnis bei der TGS-Technik untersucht, um die Anwendungsmöglichkeit dieser Messtechnik in den uns interessierenden Verbrennungsströmungen abzuschätzen.

Das diesem TGS-Verfahren zugrunde liegende physikalische Prinzip wird u.a. in Eichler et al. [1986] beschrieben. Erfolgreiche Testmessungen in Verbrennungsströmungen wurden u.a. von Brown and Roberts [1999] und Stanpanoni-Panariello et al. [1998] durchgeführt.

2 Physikalisches Prinzip

Das physikalische Prinzip der *Transient Grating Spectroscopy (TGS)* ist in der Abbildung 1 schematisch dargestellt. Durch zwei gekreuzte kohärente Puls laserstrahlen mit einer Pulsdauer von etwa 5 ns wird ein Brechungsindexgitter in das Strömungsmedium induziert. Dieses durch elektrostriktive Prozesse erzeugte Gitter hat eine Lebensdauer von bis zu einigen hundert ns (siehe auch Brown and Roberts [1999]).

In dieser Zeit breitet sich das Gitter mit der lokalen Schallgeschwindigkeit in alle Richtungen aus. Gegensinnig laufende Gitterausbreitung führt durch additive Überlagerung der Brechwirkung zur Ausbildung eines instationären Brechungsindexgitters. Der Gitterkontrast wird mit

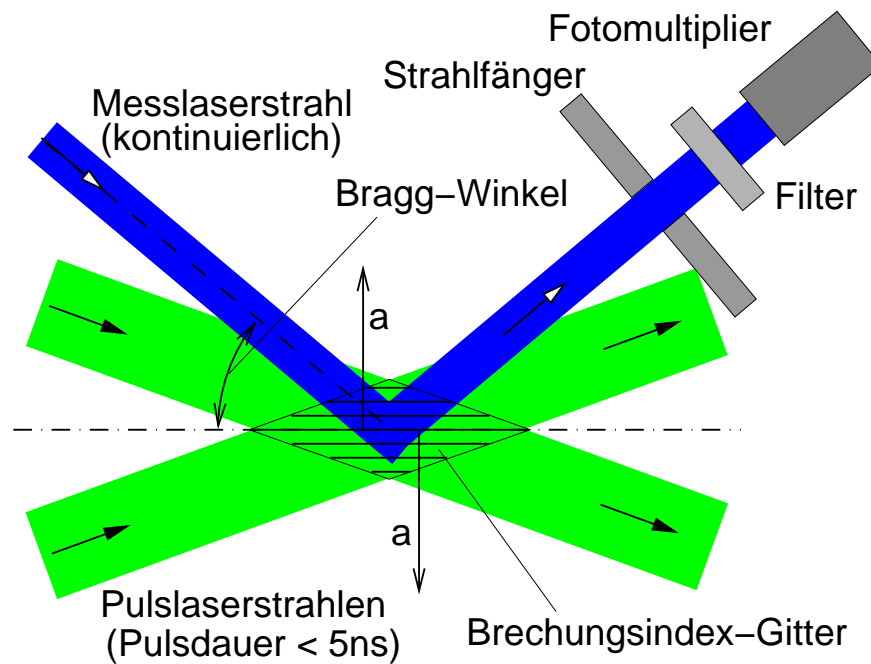


Abbildung 1: Prinzipskizze der *Transient Grating Spectroscopy* (TGS).

einer Periode moduliert, die der halben Laufzeit für die ursprüngliche Gitterkonstante s entspricht. Die Modulationsfrequenz f_M bestimmt sich daher aus der lokalen Schallgeschwindigkeit a und dem Gitterabstand s :

$$f_M = 2 \frac{a}{s}. \quad (1)$$

Die Detektion dieser Modulationsfrequenz erfolgt durch einen kontinuierlichen Messlaserstrahl, der unter Bragg-Winkel-Bedingungen relativ zum Gitter ausgerichtet wird. Die Bragg-Reflektion des Messstrahls pulsiert mit der Modulationsfrequenz f_M des Gitterkontrastes. Die Intensitätsschwankungen des Messstrahls werden mit einem Fotomultiplier bei zu erwartenden Frequenzen von bis zu 200 MHz erfasst. Die lokale und momentane Temperatur ergibt sich aus der Beziehung für die Schallgeschwindigkeit (für ein thermisch ideales Gas):

$$a^2 = \kappa RT, \quad (2)$$

wobei T die absolute Temperatur, R die Gaskonstante und κ der Isentropenexponent ist.

3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Zur Erzeugung der Puls laserstrahlen wurde ein Nd:YAG Laser der Firma Spectra-Physics (DCR-11) mit einer maximalen Pulsenergie von 135mJ/Puls bei einer Wellenlänge von 532 nm verwendet. In Abbildung 2 ist eine Draufsicht auf die Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Der Puls laserstrahl wurde durch eine Strahlteilerplatte in zwei Strahlen zu jeweils 50% aufgeteilt, die über justierbare Spiegel parallel auf eine Sammellinse ausgerichtet wurden. Es wurden Linsen mit Brennweiten von 400, 700 oder 900 mm verwendet. Der kontinuierliche Mess laserstrahl aus einem Argon-Ionen-Laser mit einer Wellenlänge von 488 nm wurde über Spiegel unter Bragg-Winkel-Bedingungen auf das Interferenzgitter der beiden Puls laserstrahlen ausgerichtet. Zur Justierung der Empfangsoptik wurde ein zweiter so genannter „falscher“ Signalstrahl aus dem Argon-Ionen-Laser verwendet. Dieser wurde symmetrisch zu dem Messstrahl so ausgerichtet,

dass er mit diesem ein Interferenzgitter mit dem Gitterabstand der Puls laserstrahlen erzeugte. Ist diese Bedingung, auch „phase matching“ genannt, erfüllt, so verläuft der „falsche“ Signalstrahl kollinear zum bragg-reflektierten Signalstrahl. Ein Strahlfänger und die Empfangsoptik, bestehend aus Fotomultiplier der Firma DANTEC und 488nm-Wellenlängenfilter wurden darauf ausgerichtet.

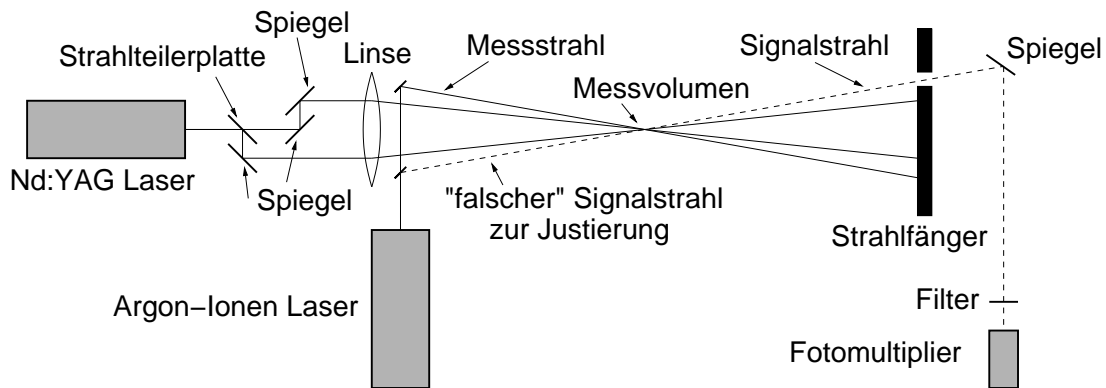


Abbildung 2: Skizze des Versuchsaufbaus für die *Transient Grating Spectroscopy (TGS)* (Draufsicht).

Die Datenaufnahme erfolgte primär über ein Digitaloszilloskop. Dieses wurde durch ein Signal von einer Fotodiode auf den Laserpuls getriggert. Von dort wurden die Zeitsignale über eine GPIB-Schnittstelle von einem Rechner (PC) ausgelesen und durch FFT- oder Wavelet-Analysen weiter ausgewertet.

4 Messergebnisse

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit des TGS-Verfahrens in Verbrennungsströmungen wurden die Abhängigkeiten der Signalstärke von verschiedenen Parametern vermessen. Dazu wurden der Systemdruck, die Pulsenergie und die Messstrahlleistung einzeln variiert. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wurden diese Messungen jeweils in Luft und bei Raumtemperatur durchgeführt.

4.1 Abhängigkeit vom Druck

Für die Messungen bei verschiedenen Drücken wurde ein durch 10mm-dicke Glasscheiben optisch zugänglicher Druckbehälter verwendet. In diesem konnte durch Pressluft ein Überdruck von bis zu 3,5 bar erzeugt werden.

In Abbildung 3 ist ein momentaner Signalzug bei Raumtemperatur und 3,5 bar Überdruck dargestellt.

Abbildung 4 zeigt den Vergleich von typischen Signalzügen des TGS-Verfahrens bei verschiedenen Drücken. Alle sonstigen Parameter, insbesondere die Pulsenergie (ca. 15 mJ/Puls pro Strahl), wurden hierbei konstant gehalten. Diese Signale wurden jeweils über 2000 Pulse bzw. Schüsse gemittelt. Die Signalamplituden wurden auf das Maximum bei 3,5 bar normiert. Es ist deutlich die Zunahme der maximalen Signalamplitude mit ansteigendem Druck zu erkennen. Die Abnahme der Amplituden mit der Zeit t beruht auf dem zeitlichen Abklingen des Brechungsindexgitterkontrasts.

Nach Brown and Roberts [1999] nimmt die Signalstärke quadratisch mit der Dichte bzw. mit dem Druck des Strömungsmediums zu. Dieses Verhalten wird auch in Abbildung 5 deutlich. Hier ist die maximale Modulationstiefe als Signalstärke über den Überdruck in dem Druckbehälter aufgetragen. Die Signalstärke ist auf ihren Wert bei 3,5 bar normiert.

4.4

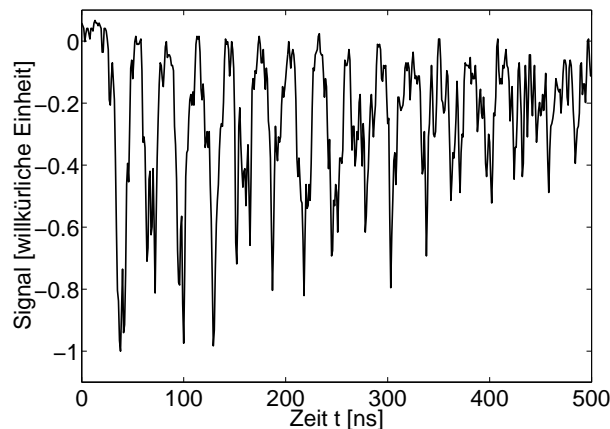


Abbildung 3: Beispiel eines momentanen Signalzuges bei Raumtemperatur und 3,5 bar Überdruck.

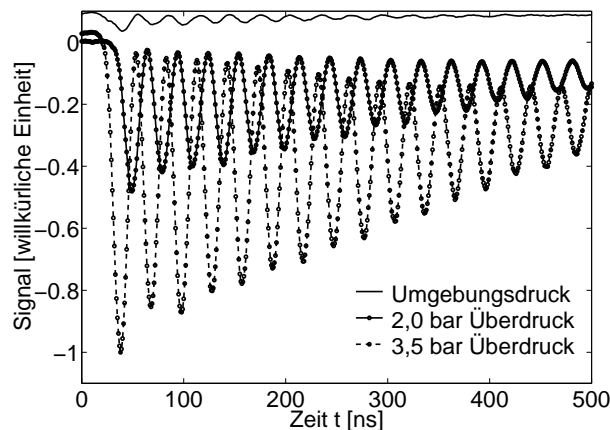


Abbildung 4: Vergleich der Signalstärke bei verschiedenen Drücken.

4.2 Abhängigkeit von der Pulsenergie

Im Hinblick auf den Einsatz der TGS-Technik bei Umgebungsdruck in Verbrennungsströmungen wurde der Zusammenhang zwischen der Signalstärke und der Energie der Puls laserstrahlen untersucht. Dazu wurde die Pulsenergie pro Strahl zwischen 7 mJ und 47 mJ variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Es wird hier ebenfalls ein etwa quadratischer Anstieg der Signalstärke mit der Pulsenergie deutlich.

4.3 Abhängigkeit von der Leistung des Messstrahls

Als weiterer Parameter wurde der Einfluss der Messstrahlleistung auf die Signalstärke bzw. die maximale Modulationstiefe ermittelt. Hierfür wurde die Leistung des Messstrahles zwischen 39 mW und 152 mW verändert. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Signalstärke und der Messstrahlleistung.

4.4 Temperaturaufösung und Messgenauigkeit

Zur Einschätzung der Genauigkeit des TGS-Verfahrens wurden Messungen bei Raumtemperatur durchgeführt und statistisch ausgewertet. Die Frequenzanalyse wurde mit Hilfe von Wavelet-

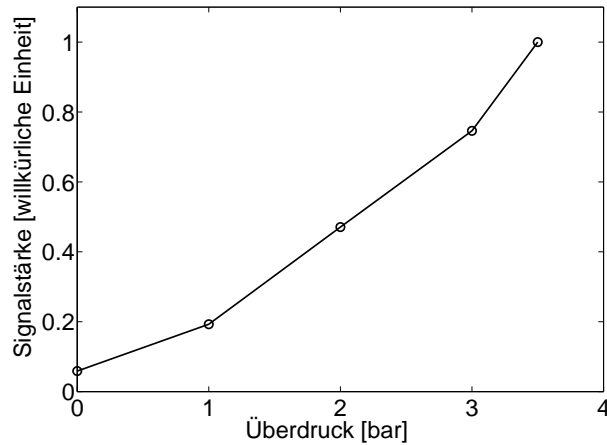


Abbildung 5: Abhängigkeit der Signalstärke vom Druck.

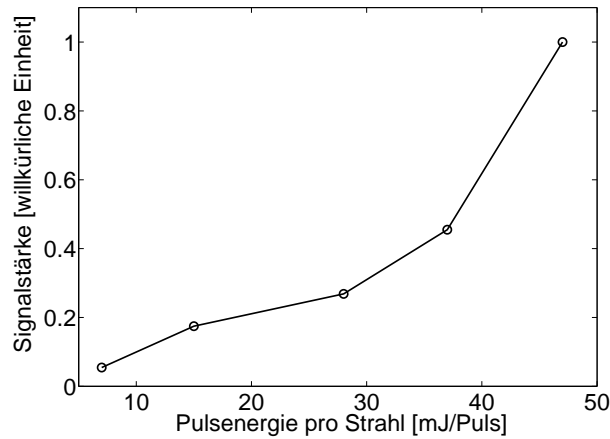


Abbildung 6: Abhängigkeit der Signalstärke von der Pulsenergie.

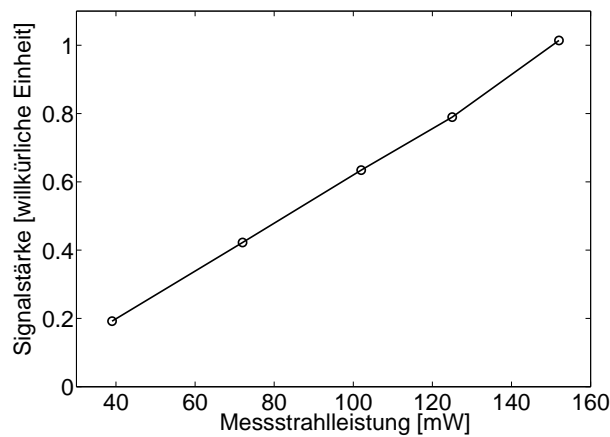


Abbildung 7: Abhängigkeit der Signalstärke von der Messstrahlleistung.

Funktionen durchgeführt (siehe auch Torrence and Compo [1998])¹. Die Verwendung dieser Wavelet-Analyse ermöglicht bei kurzen und in der Länge variablen Signalbursts eine höhere Frequenzauflösung des Signals im Vergleich zu herkömmlichen Fast-Fourier-Transformations-Algorithmen (FFT). Da die Zeitsignale nur eine Dauer von ca. 500 ns besitzen ist dement-

¹Die Wavelet Software wurde zur Verfügung gestellt von C. Torrence and G. Compo, und ist erhältlich unter der ULR: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>.

4.6

sprechend hier durch eine FFT-Analyse nur eine Frequenzauflösung von etwa 2 MHz möglich. Wavelet-Transformationen erlauben dagegen hierbei eine Frequenzauflösung von bis zu 5 kHz und genauer.

Testmessungen bei Raumtemperatur zeigten eine Abnahme des statistischen Fehlers mit zunehmendem Druck. In Abbildung 8 ist hierzu ein Histogramm über 2000 Temperaturmessungen bei 3,5 bar Überdruck (im Druckbehälter) dargestellt. Die Standardabweichung beträgt in diesem Fall 1,53 % bezogen auf den Mittelwert.

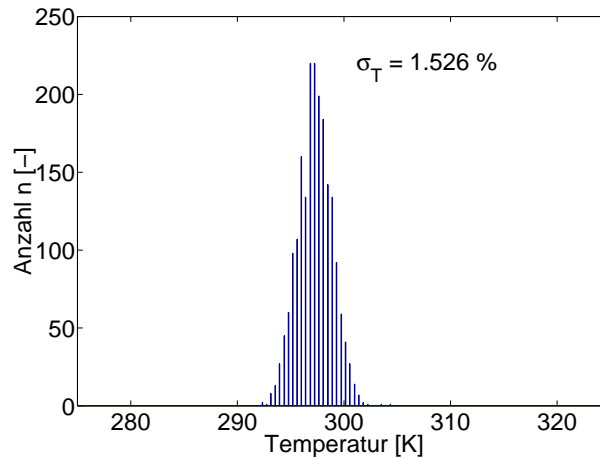


Abbildung 8: Histogramm der Temperaturmessung bei Raumtemperatur und 3,5 bar Überdruck.

Des Weiteren wurden Probemessungen an der Flamme einer Wachskerze vorgenommen. Ein Problem bestand hierbei durch das Flackern der Flamme. Dadurch wurden mit dem Messvolumen sehr unterschiedliche Temperaturbereiche der Kerzenflamme erfasst. Dieses Verhalten wird in der Abbildung 9, einem Histogramm über 1500 Einzelmessungen, verdeutlicht. Die Temperaturmesswerte verteilen sich hier auf verschiedene Teilbereiche. Der Hauptanteil der Werte liegt bei etwa 620 K, während eine weitere Häufung bei etwa 500 K zu finden ist. Allerdings sind auch Messwerte zwischen 700 und 850 K und kleiner 400 K zu erkennen. Diese starken Temperaturschwankungen beruhen offenbar auf unvollständiger Zumischung von Umgebungsluft.

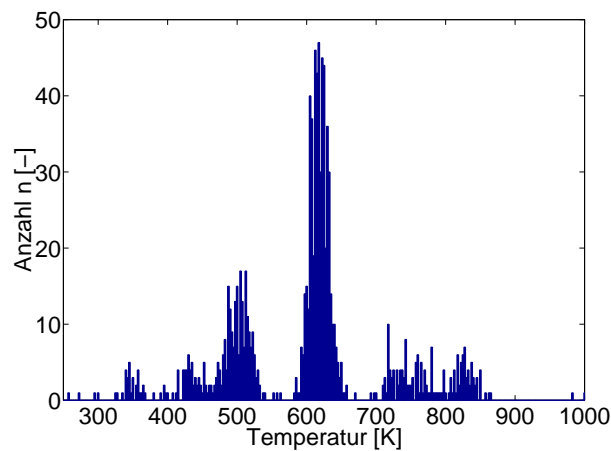


Abbildung 9: Histogramm der Temperaturmessung in einer Kerzenflamme bei Umgebungsdruck

5 Diskussion und Ausblick

In den vorgestellten Untersuchungen wurde eine Versuchseinrichtung unter Verwendung der *Transient Grating Spectroscopy* installiert und erfolgreich getestet.

Die Versuchsreihen zeigen eine etwa quadratische Zunahme der TGS-Signalstärke sowohl mit der Pulslaserenergie als auch mit dem herrschenden Druck im Strömungsmedium. Die Messstrahlleistung steht, wie zu erwarten, in einem linearen Zusammenhang mit der Signalstärke.

Diese Ergebnisse verdeutlichen eine vorteilhafte Verwendbarkeit dieser Messtechnik bei Verbrennungsprozessen unter angehobenen Systemdruck wie z.B. bei Hochdruckverbrennungen.

Statistische Untersuchungen von Temperaturmessreihen bei Raumtemperatur und 3,5 bar Überdruck ergeben eine Standardabweichung der gemessenen Temperatur von 1,53 %. Bei Messungen unter Umgebungsdruck war der statistische Fehler aufgrund des schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses größer (ca. 3 %). Diese statistische Genauigkeit erscheint ausreichend für viele Anwendungsziele in Verbrennungsströmungen, in denen leicht Temperaturschwankungen mit rms-Werten von 500 K und mehr auftreten. Verbesserungen der Signalanalyse lassen eine weitere Steigerung der Auflösung erwarten.

In den diskutierten Ergebnissen sind nicht die Einflüsse der Gaszusammensetzung berücksichtigt. Besonders bei Verbrennungsströmungen unterliegt diese naturgemäß starken Veränderungen. Diese wirken sich auf die lokale Schallgeschwindigkeit über die Gaskonstante und den Polytropenexponenten κ aus. Ergebnisse von Brown and Roberts [1999] zeigen jedoch, dass ihr Einfluss auf das Temperaturergebnis um ca. eine Größenordnung kleiner ist als die Temperaturschwankungen.

Die quadratische Abhängigkeit der Signalstärke von der Dichte wirkte sich negativ für Messungen bei höheren Temperaturen z.B. in Flammen aus. Hier herrscht bei gleichem Druck eine entsprechend geringere Dichte, die das Signal-Rausch-Verhältnis stark reduziert. Dieses kann, wie gezeigt, durch erhöhte Pulslaserenergie kompensiert werden, in diesem Fall war allerdings die Pulslaserenergie gerätespezifisch auf 47 mJ pro Pulsstrahl limitiert. Ein leistungsstärkerer Pulslaser würde hier eine deutliche Verbesserung bewirken. Eine obere Grenze bilden allerdings optische Zugänge wie z.B. Glasfenster im Versuchsaufbau. Zu hohe Pulsenergien können bei starker Fokussierung der Laserstrahlen zur Zerstörung dieser Glasfenster führen.

Eine weitere Steigerung der Signalstärke bzw. des Signal-Rausch-Verhältnisses würde die Verwendung eines geseedeten Nd:YAG Lasers bewirken. Nach Yuanyuan [2001] ist dadurch eine Verstärkung der Signalamplitude um den Faktor fünf möglich.

Bei Untersuchungen von Stanpanoni-Panariello et al. [1998] führte die Verwendung der infraroten Wellenlänge des Pulslasers (1064 nm) zu einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis. Dem stehen jedoch die Schwierigkeiten beim justiertechnischen Umgang mit dem nicht sichtbaren Laserlicht gegenüber, so dass diese Möglichkeit eher kritisch betrachtet wird.

Im Ergebnis bietet die *Transient Grating Spectroscopy* eine verhältnismäßig unkomplizierte Möglichkeit zur lokalen und momentanen Temperaturbestimmung in Strömungsmedien. Nach den gewonnenen Erkenntnissen ist dieses Messverfahren mit der nötigen Pulslaserleistung und gegebenenfalls unter der Verwendung von geseedeten Nd:YAG-Lasern in Verbrennungsströmungen einsetzbar.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Joachim Eichler vom Optischen Institut der Technischen Universität Berlin für die leihweise Überlassung eines Nd:YAG-Impulslasers sowie für eine fruchtbare Fachdiskussion zum bearbeiteten Thema.

Literatur

- M.S. Brown and W.L. Roberts. Single-point thermometry in high-pressure, sooting, premixed combustion environments. *Journal of Propulsion and Power*, 15(1):119–127, 1999.
- H.J. Eichler, P. Günter, and D.W. Pohl. *Laser-Induced Dynamic Gratings*. Springer Verlag, 1986.
- A. Stampanoni-Panariello, B. Hemmerling, and W. Hubschmid. Temperature measurements in gases using laser-induced electrostrictive gratings. *Applied Physics B*, 67:125–130, 1998.
- C. Torrence and G.P. Compo. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1):61–78, January 1998.
- Li Yuanyuan. *Applications of Transient Grating Spectroscopy to Temperature and Transport Properties Measurements in High-Pressure Environments*. PhD thesis, North Carolina State University, 2001.