

Laseroptische Messungen an Erdgasflammen bei variabler Wärmeabfuhr

Dipl.-Ing. R. Stocker, Dipl.-Ing. J. Harlfinger, Dr.-Ing. J. Karl, Prof. Dr.-Ing. D. Hein, Garching

1 Einleitung

In der Flammenforschung wird der numerischen Beschreibung der Verbrennungsvorgänge und der Bildung von Schadstoffen, z.B. von Stickstoffoxiden, zur Zeit besondere Beachtung geschenkt. Um mathematisch-physikalische Modelle für die Verbrennung entwickeln zu können, sind detaillierte Informationen aus Versuchen mit vorgebbaren Randbedingungen eine unverzichtbare Voraussetzung. Solche örtlich und zeitlich aufgelösten Meßinformationen lassen sich nur mit Hilfe laseroptischer Verfahren gewinnen.

Ziel dieser Arbeiten war der Aufbau einer Versuchsanlage, die es erlaubt, der Flamme durch gestufte Wandtemperaturen des Brennraumes abschnittsweise unterschiedlich stark Wärme zu entziehen und durch geeignete Öffnungen die Flamme in ihrer gesamten Länge laseroptisch zu analysieren. Daher ist auch ein laseroptisches Meßsystem zu konzipieren, das sowohl eine Messung der Temperaturverteilung als auch die selektive Bestimmung der Verteilung von NO, OH, CH und O₂ in Erdgasflammen erlaubt.

2 Versuchsbrennkammer

Eine örtlich unterschiedliche Wärmeabgabe aus der Flamme läßt sich durch eine abschnittsweise Kühlung der Brennkammerwand realisieren. Um auch hohe Wandtemperaturen einstellen zu können, kommt als Kühlmedium nur Luft in Frage.

Es sollen Flammen von Strahl- und Drallbrennern untersucht werden.

2.1 Brenner und Feuerraum

Die Versuchsanlage ist für eine Brennerleistung von 200 kW ausgelegt; als Brennstoff dient Erdgas ($H_u = 36 \text{ MJ} / \text{m}_N^3$). Nach [1] beträgt die maximal zu erwartende Flammenlänge 2,5 m (Strahlbrenner) und der maximale Durchmesser 0,4 m (Drallbrenner). Durch die stehende Anordnung der Brennkammer bleibt die Flamme rotationssymmetrisch ohne Ablenkung durch Auftrieb.

Wandberührung der Flamme wird so auch bei den gewählten schlanken Abmessungen des Feuerraumes (Höhe 4,0 m, \varnothing 0,7 m) vermieden.

Die Feuerraumwand besteht aus 8 doppelwandigen Ringsegmenten aus hitzebeständigem Stahl von jeweils 0,5 m Höhe, die von Kühlluft durchströmt werden. Die Kühlelemente sind in einem tragenden, gasdichten Außenmantel eingehängt. Eine Zwischenisolierung verhindert Wärmeverluste nach außen.

Für die Inbetriebnahme und die ersten Messungen wurde ein

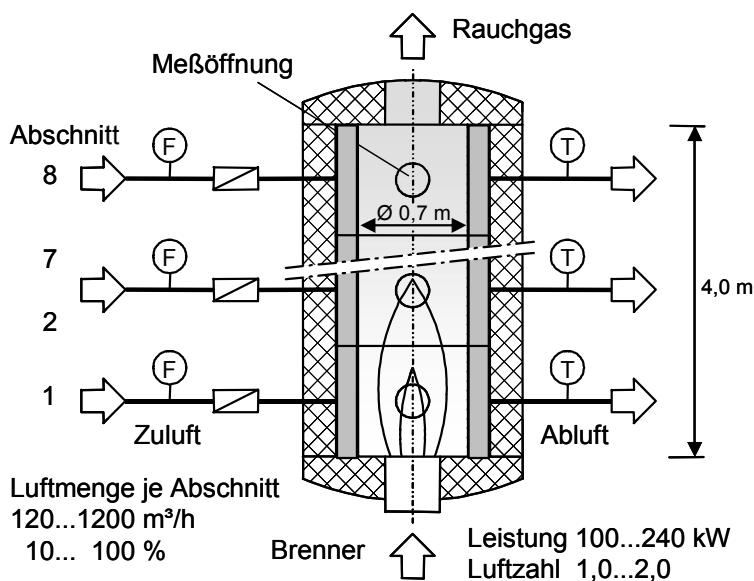


Abb. 1: Brennkammer mit Luftkühlung

Drallbrenner mit gestufter Luftzufuhr verwendet. Die Flammenlänge beträgt ca. 1,0 m bei einem Durchmesser von ca. 0,3 m. Für künftige Messungen ist ein Stufenbrenner ohne Dralleinrichtung vorgesehen. Bei deutlich gesteigerter Flammenlänge (ca. 1,7 m) ist mit verstärkter Wärmeabstrahlung an die Feuerraumwand zu rechnen.

2.2 Luftkühlung

Die Kühlluft strömt durch 20 mm breite Spalte, die den Feuerraum ringförmig umschließen. Um trotz Erwärmung der Kühlluft eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb eines Feuerraumwandabschnittes zu erzielen, sind jeweils zwei gegenüberliegende Zu- bzw. Abströmöffnungen vorhanden (s. Abb. 4). Die in einem Abschnitt abgegebene Wärmemenge berechnet sich zu:

$$\Phi = \dot{V}_{\text{Zuluft}} \cdot \overline{c p}_{\text{Luft}} \left| \frac{T_{\text{Abluft}}}{T_{\text{Zuluft}}} \right| \cdot (T_{\text{Abluft}} - T_{\text{Zuluft}})$$

Der Durchsatz der verwendeten Volumenstromregler beträgt max. 1200 m³/h (100 %) je Abschnitt. Um lokale Überhitzung der Feuerraumwand (>900°C) zu vermeiden, ist ein Mindestdurchsatz von 10 % erforderlich. Der Höchstwert bei gleicher Durchströmung aller Kühlelemente ist durch die Förderleistung des Kühlluftgebläses auf 70 % begrenzt.

Abb. 2 enthält die bei minimaler und maximaler Luftmenge gemessene Kühlleistung sowie die dazugehörigen Feuerraumtemperaturen entlang der Brennkammer-Mittelachse. Die Messungen wurden mit einer Drallflamme bei 200 kW Leistung und Luftzahl 1,05 durchgeführt.

Zur Erfassung der Temperaturverteilung an der Feuerraumwand dient eine Netzmessung mit Thermoelementen vom Typ K. Abb. 3 zeigt die Abwicklung eines 90°-Bogens im Bereich der Flamme. Die ungekühlten Meßöffnungen weisen deutlich erhöhte Temperaturen auf.

2.3 Sondenmessung

In mittlerer Höhe eines jeden Abschnittes befinden sich vier um jeweils 90° versetzte Meßöffnungen (s. Abb. 4); damit ergeben sich acht Meßebenen in jeweils 0,5 m Abstand. Die Mündung des Brenners liegt im Normalfall auf Höhe des Feuerraumbodens; stufenlose Höhenverstellung um ±0,25 m ist möglich. Dadurch ist mit radial verschiebbaren Sonden jeder Punkt der Flamme erreichbar.

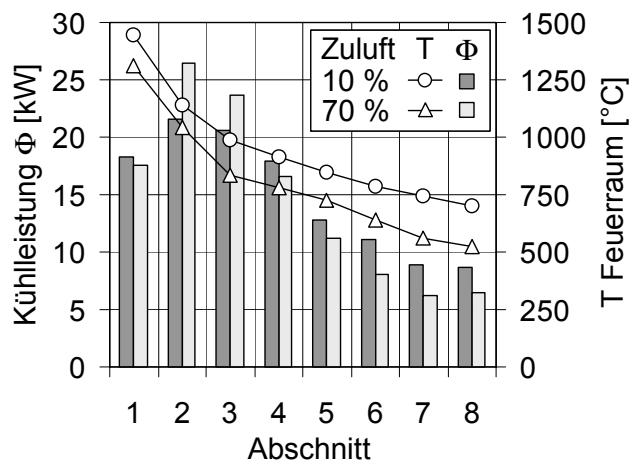


Abb. 2: Kühlleistung und Feuerraumtemperatur

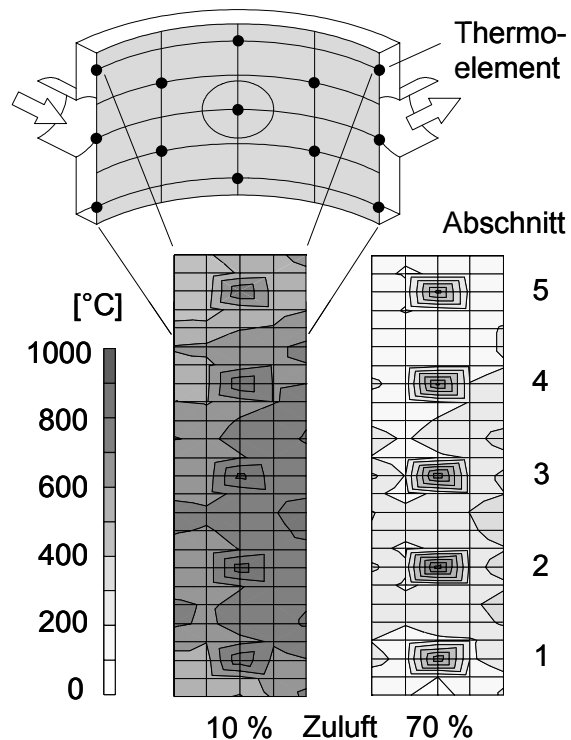


Abb. 3: Temperaturverteilung Feuerraumwand

Zur Messung der Feuerraumtemperatur dienen Thermoelemente des Typs B (PtRh30/PtRh6); der Meßbereich beträgt 400... 1820 °C. Die Thermoperle ist ungeschirmt und direkt der Flamme ausgesetzt. Günstig bei dieser Art der Temperaturmessung ist die geringe Trägheit und die kleine Störzone gegenüber Absaugmessungen. Zur Berücksichtigung des Strahlungswärmeaustausches mit der gekühlten Brennkammerwand ist eine Korrekturrechnung notwendig /2/.

Zum Absaugen von Rauchgas aus dem Feuerraum wird eine verschiebbare Gasentnahmesonde aus nichtrostendem Stahl verwendet. Eine Wasserkühlung schützt vor Überhitzung und verhindert Nachreaktionen von brennbaren Anteilen mit Restsauerstoff. Der Taupunkt des Rauchgases liegt bei 50...60 °C. Zur Vermeidung von Kondensatbildung wird das Kühlwasser auf ca. 80 °C vorgewärmt; die Menge ist so eingestellt, daß Verdampfung im Kühlmantel der Sonde sicher vermieden wird.

Das gereinigte und getrocknete Meßgas wird einem Emissionsmeßschrank zugeführt. Folgende Anteile werden gemessen: O₂, CO₂, CO und NO. Die Messung von NO₂ und C_xH_y ist in Vorbereitung.

3 Laseroptische Messungen

Zur Bestimmung der Temperatur- und Speziesverteilung in der Erdgasflamme der Versuchsanlage werden neben den oben beschriebenen Sondenmessungen auch laseroptische Meßmethoden angewendet, z. B. Rayleigh- und Raman-Spektroskopie sowie Laser-induzierte Fluoreszenz (LIF). Diese Verfahren ermöglichen eine berührungsfreie, also störungsfreie Bestimmung der Meßgrößen direkt am untersuchten Meßort in der Flamme.

Mit Hilfe der LIF-Technik können Ausgangsstoffe, Zwischenprodukte und Endprodukte der Verbrennung, wie Atome, Moleküle oder Radikale selektiv detektiert werden. Dies geschieht mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung (/3/, /4/ und /5/).

3.1 Versuchsaufbau

Abb. 4 zeigt den experimentellen Aufbau zur Bestimmung von Speziesverteilungen in einer Erdgasflamme mittels Laser-induzierter Fluoreszenz. Die Moleküle oder molekularen Radikale in der Flamme werden mit einem durchstimmbaren gepulsten Lasersystem (Infinity-XPO Laser, Firma Coherent) angeregt. Die Laser-Einheit besteht im wesentlichen aus einem DPSS Laser (Diode Pumped Solid State Laser, 1064 nm), einem Verstärker (zwei Nd:YAG Stäbe, 1064 nm, 500 mJ/Puls), einem SHG Kristall (Second Harmonic Generator, Frequenzverdoppelung zu 532 nm) und einem THG Kristall (Third Harmonic Generator, 355 nm). In Abhängigkeit von der Winkelstellung des OPO-Kristalls (Optical Parametric Oscillator, Typ II) läßt sich die Wellenlänge des Lasers in einem Bereich von 710 nm bis 420 nm durchstimmen (max. Pulsenergie ca. 15 bis 25 mJ/Puls). Die anschließende SHG-Einheit ermöglicht eine Durchstimbarkeit des Systems im UV-Bereich von 325 nm bis 210 nm (max. Pulsenergie ca. 3 bis 5 mJ/Puls). Die Linienbreite des Lasers beträgt ca. 8 cm⁻¹ bei 250 nm und der Durchmesser des Laserstrahls etwa 3,5 mm. Um das Rayleigh-Streulicht in Detektionsrichtung zu minimieren wird die Polarisationsrichtung des Laserstrahls mit einem Polrotator (MgF₂) in die Horizontale gedreht.

Mit einem UV-Objektiv (Brennweite 35 mm, Blendenzahl 4,0) werden die Signale aus der Flamme auf den Spalt eines Spektrographen (250 mm, f/4,0) abgebildet. Das spektral zerlegte Licht trifft anschließend auf den Chip einer intensivierten CCD Kamera (ICCD). Dieser Versuchsaufbau ermöglicht eine eindimensionale örtliche Messung in der Versuchsbrennkammer. Bei einem Abstand der Hauptebene des Objektivs zum Laserstrahl von 800 mm kann die Erdgasflamme auf einer Länge von 300 mm entlang des Laserstrahls abgebildet werden. Die gleichzeitige spektrale Auflösung der Photonen-Emissionen erlaubt die Trennung von Rayleigh-Streulicht, Raman-Streulicht und/oder Fluoreszenz-Signalen verschiedener Spezies.

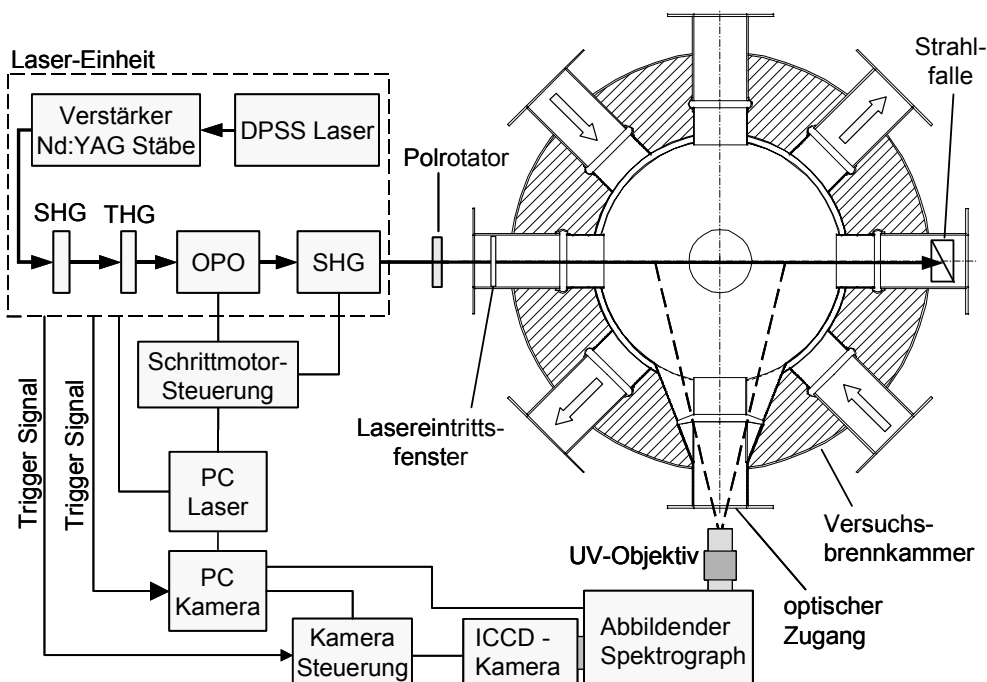


Abb. 4: Experimenteller Aufbau für spektral aufgelöste laseroptische Messungen in der Versuchsbrennkammer

3.2 Vorversuche an Laborflammen

Für den Einsatz des durchstimmbaren OPO (Typ II) Lasersystems in der oben beschriebenen Versuchsbrennkammer wurden Messungen an verschiedenen Laborflammen durchgeführt und das System optimiert.

Aufgrund der Linienbreite von ca. 8 cm^{-1} im Abstimmbereich des OPO-Lasers ist es nicht immer möglich, Moleküle oder molekulare Radikale selektiv anzuregen, d.h. bei einer bestimmten Wellenlänge des Lasers werden mehrere Spezies gleichzeitig angeregt. Die Vorversuche an den Laborflammen zeigen, bei welchen Laserwellenlängen eine selektive Anregung der verbrennungsrelevanten Spezies möglich ist. Bei gleichzeitiger Anregung verschiedener Moleküle oder Radikale wurde untersucht, ob die spektrale Zerlegung der Emissionen eine Trennung der Fluoreszenz-Signale ermöglicht.

Parallel wurde in den Vorversuchen ermittelt, inwieweit die Pulsenergien von ca. 15 bis 25 mJ/Puls im sichtbaren Bereich und ca. 3 bis 5 mJ/Puls im UV-Abstimbereich des OPO-Lasers für einen Nachweis von O_2 , OH, NO und CH ausreichen.

Untersucht wurden eine Wasserstoff/Sauerstoff-Flamme eines Schweißbrenners, eine Methan/Luft-Flamme eines Bunsenbrenners und eine Acetylen/Sauerstoff-Flamme eines Schweißbrenners in den Anregungswellenlängen-Bereichen 640 nm bis 430 nm und 320 nm bis 215 nm. In Abb. 5 ist ein Absorptions-Emissions-Spektrum (AES) einer Acetylen/Sauerstoff Flamme eines Schweißbrenners dargestellt. Bei diesem Versuch wurden die Spezies simultan mit der fundamentalen Wellenlänge des OPO-Lasers und der frequenzverdoppelten Wellenlänge angeregt. Die Ordinate zeigt die jeweilige Anregungswellenlänge des OPO-Lasers, von 500 nm bis 432 nm in 0,04 nm-Schritten gescannt, und die frequenzverdoppelte Wellenlänge, dementsprechend 250 nm bis 216 nm, in 0,02 nm-Schritten. Auf der Abszisse sind die Emissionen aus der Flamme (hier Rayleigh-Streulicht und Laser-induzierte Fluoreszenz unterschiedlicher Spezies) im Wellenlängenbereich von 180 nm bis 570 nm aufgetragen. Dunkle Gebiete entsprechen hohen Signalintensitäten.

Im linken Bereich von Abb. 5 sind im Emissionswellenlängenbereich von ca. 200 nm bis 330 nm Bereiche mit hohen Signalintensitäten zu erkennen (gekennzeichnet mit I, II und III).

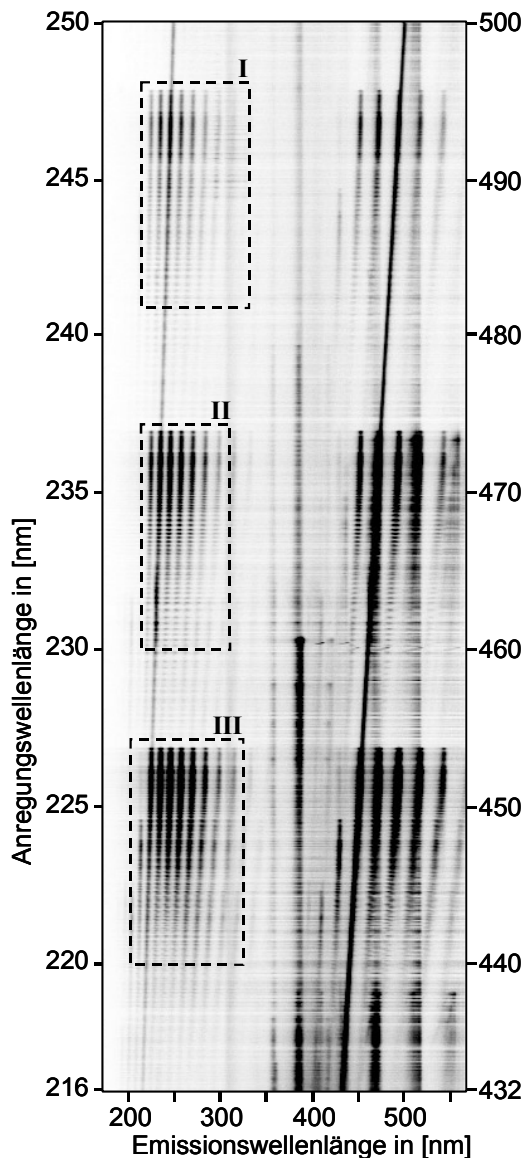


Abb. 5: Absorptions-Emissions-Spektrum einer C_2H_2/O_2 -Flamme

trationen oftmals schwierig oder nicht möglich. Die Auswirkungen auf den Verbrennungsverlauf und die Schadstoffbildung bei gezielter Änderung der Randbedingung (Wärmeabgabe aus der Flamme) können jedoch anhand von Vergleichsmessungen aufgezeigt werden.

Bei einem Versuchsaufbau wie in Abb. 4 dargestellt, sind die Emissionen aus der Brennkammer spektral und 1-dimensional räumlich aufgelöst. Für eine 2-dimensionale Erfassung der Emissionen werden Messungen in unterschiedlichen Ebenen durchgeführt. Abb. 6 a) zeigt eine spektral und räumlich (1D) aufgelöste Aufnahme einer C_2H_2/O_2 -Flamme eines Schweißbrenners (Anregungswellenlänge: 452,4 nm und 226,2 nm). Der Laserstrahl durchdringt die Flamme senkrecht zur Strömungsrichtung in einem Abstand von ca. 80 mm vom Brennermund (Flammenhöhe ca. 200 mm). An der Abszisse sind die Emissionen der Flamme ortsaufgelöst aufgetragen. Die spektrale Auflösung (Ordinate) erlaubt die Trennung unterschiedlicher Signale. So lassen sich die NO-LIF Signale im Emissionswellenlängen-Bereich von 230 nm bis ca. 320 nm von den kohlenstoffhaltigen Radikalen (ab ca. 350 nm, in der Flammenmitte) trennen.

Es handelt sich hier um Laser-induzierte Fluoreszenz von NO-Molekülen folgender Übergänge: A-X (0,2) (Bereich I), A-X (0,1) (Bereich II) und A-X (0,0), (1,1) und (2,2) (Bereich III). In der Acetylen/Sauerstoff-Flamme wird NO gebildet, da Stickstoff aus der Umgebungsluft in die Flamme diffundiert. Die Fluoreszenz-Signale der NO-Radikale überlagern sich im Bereich I mit LIF der OH-Radikale und O_2 -Moleküle; eine selektive Anregung ist in bestimmten Bereichen möglich /7/. NO-LIF in den Bereichen II und III ist aufgrund der höheren Signalintensitäten und der Möglichkeit einer spektralen Trennung der Emissionen (Rayleigh-Streulicht und LIF) für eine Detektion der NO-Radikale in der Versuchsbrennkammer besser geeignet.

Ab einer Emissionswellenlänge von ca. 350 nm (Abb. 5, rechte Seite) tritt fast im gesamten Anregungswellenlängen-Bereich Laser-induzierte Fluoreszenz verschiedener kohlenstoffhaltiger Radikale, wie z. B. CH oder C_2 auf. Diese überlagern sich mit NO-LIF Signalen 2.Ordnung (Eigenheit des Spektrographen) und der Rayleigh-Streuung. Bei welchen Anregungswellenlängen eine Trennung und selektive Detektierung der Signale möglich ist, sollen weitere Untersuchungen zeigen.

Die Detektierbarkeit der OH-Radikale in den A-X (0,0), (1,0), (2,0) und (3,0) Übergängen im Anregungswellenlängen-Bereich von 325 nm bis 240 nm wurde bereits in /6/ gezeigt. Der Nachweis von heißem O_2 in den Schumann-Runge-Bändern ist in /7/ beschrieben.

3.3 Auswertung

Aufgrund von Rotations- und Vibrationsenergie-transfer sowie Quenching ist eine Umrechnung der Fluoreszenz-Intensitäten in Teilchenkonzentrationen oftmals schwierig oder nicht möglich.

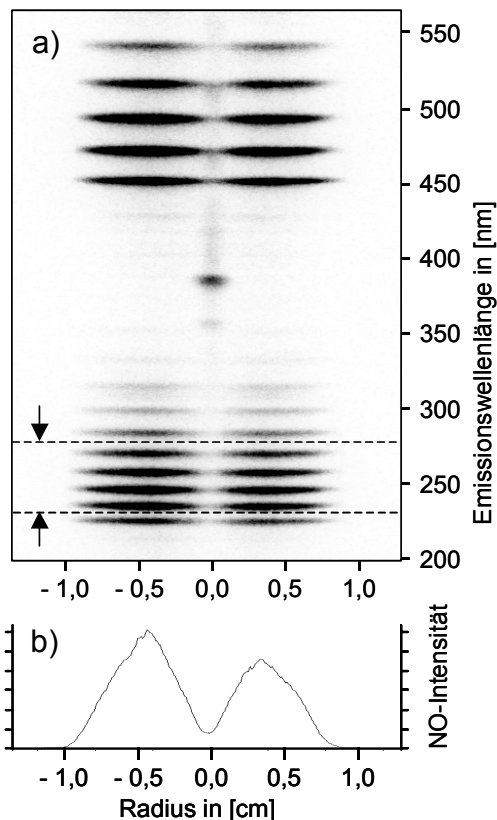


Abb. 6: a) Spektral und räumlich (1D) aufgelöste Aufnahme einer C_2H_2/O_2 -Flamme, Anregung bei 452,4 nm und 226,2 nm. b) Horizontales Intensitätsprofil der NO-Fluoreszenz im Bereich 275 nm bis 230 nm.

Vor der Auswertung und einem Vergleich der Aufnahmen müssen Fehler korrigiert werden, wie z.B. die örtlich unterschiedliche Empfindlichkeit des CCD-Chips, die unterschiedliche thermische Besetzungsdichte der angeregten Energiezustände bei unterschiedlichen Temperaturen und die Absorption des Laserstrahls von H_2O -Molekülen.

In Abb. 6 b) ist ein horizontales Intensitätsprofil der NO-Fluoreszenzen ermittelt aus Abb. 6 a) dargestellt (gemittelt im Emissionswellenlängenbereich von 275 nm bis 230 nm). Anhand solcher Intensitätsprofile werden Änderungen der NO-Verteilung bei unterschiedlicher Wärmeabgabe in der Verbrennungsversuchskammer aufgezeigt.

4 Ausblick

Die Versuchsbrennkammer erlaubt eine gute Beobachtung der Flamme bei definierten thermischen Randbedingungen. Nach zufriedenstellenden Laborversuchen soll im nächsten Schritt die Eignung der laseroptischen Verfahren für Messungen im technischen Maßstab geprüft werden. Begleitende Sondenmessungen dienen zum Vergleich und zur Kontrolle der Ergebnisse.

Ziel der Untersuchungen ist es, festzustellen wie stark sich die veränderliche Wärmeabgabe aus der Flamme auf den Verbrennungsverlauf und die Schadstoffbildung auswirkt. Die Ergebnisse können eine wertvolle Unterstützung für die Bildung bzw. Evaluierung von physikalisch-mathematischen Modellen, bei der thermischen Auslegung und der Gestaltung von Feuerräumen sein.

Literatur

- /1/ Günther R.: Verbrennung und Feuerungen. Springer Verlag, Berlin 1974.
- /2/ Schulz W.: Experimentelle Untersuchung der Bildung von Stickstoffoxiden bei der Kohlenstaubverbrennung. Dissertation Ruhr-Universität, Bochum 1985.
- /3/ Eckbreth A. C.: Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species. Gordon and Breach Science Publishers SA, 1996.
- /4/ Kohse-Höinghaus K.: Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems. Prog. Energy Combust. Sci. 20, 1994.
- /5/ Rothe W., Andresen P.: Application of tunable excimer lasers to combustion diagnostics: a review. Applied Optics Vol. 36 No. 18, 1997.
- /6/ Stocker R., Karl J., Hein D.: OH LIF in atmospheric pressure flames excited by a tunable OPO (Type II) laser system. Proceedings of PSFVIP-3, USA 2001.
- /7/ Stocker R., Karl J., Hein D.: Fluorescence spectroscopic measurements in methane/air and hydrogen/oxygen atmospheric pressure flames in the excitation wavelength range of 303 nm to 240 nm. 10th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon 2000.