

## ENTWICKLUNG EINES CASSEGRAIN-TELESKOPS ZUR ORTS- UND ZEITAUFGELÖSTEN FLAMMENCHEMILUMINESZENZMESSUNG

### DEVELOPMENT OF A CASSEGRAIN-TELESCOPE FOR SPATIALLY AND TIME RESOLVED CHEMILUMINESCENCE MEASUREMENT IN FLAMES

**M. Utschick, A. Aboueldahab, T. Sattelmayer**

Technische Universität München, Lehrstuhl für Thermodynamik, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Cassegrain-Optik, Chemilumineszenz, Ray Tracing

Cassegrain optic, Chemiluminescence, Ray tracing

#### Zusammenfassung

Am Lehrstuhl für Thermodynamik wurde ein Cassegrain-Teleskop (CT) entwickelt, um orts- und zeitaufgelöste Chemilumineszenzmessung von Verbrennungsradikalen in Flammen ohne Laser zu ermöglichen. Durch die Spiegeloptik des CTs werden chromatische Aberrationen vermieden und sphärische Aberrationen minimiert, wodurch ein kleines optisches Probenvolumen ermöglicht wird. Ziel ist es, die ohne Laseranwendung nicht gänzlich vermeidbare Tiefenintegration entlang der optischen Achse zu minimieren. Damit verspricht das CT eine kostengünstige Alternative zur Methode der Laser Induced Fluorescence (LIF) darzustellen, um aus den Emissionen von Verbrennungsradikalen ( $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$ ) lokal charakteristische Größen wie Luftzahl oder Wärmefreisetzungsrates zu bestimmen.

#### Einleitung

Ein Cassegrain-Teleskop (CT) ist ein Spiegelteleskop, das im 17ten Jahrhundert von Laurent Cassegrain für den astronomischen Einsatz entworfen wurde. Durch die Verwendung von je einem konkaven und konvexen Spiegel (Hohl- oder Hauptspiegel und Fangspiegel) können optische Abbildungsfehler minimiert werden. Der als Objektiv des CT dienende Hohlspiegel erzeugt dabei ein virtuelles Bild auf dem konvexen Fangspiegel, der von diesem virtuellen Bild ein vergrößertes Bild hinter der Durchbohrung des Hohlspiegels erzeugt (Abbildung 1). Bei einem optimal ausgeführten Cassegrain-Teleskop ist der Hauptspiegel parabolisch und der Fangspiegel hyperbolisch gekrümmt, wodurch für kleine Brennweiten eine komplett aberrationsfreie Abbildung möglich ist (Riekher, 1957). Bei kleineren Teleskopen werden anstelle der aufwändig zu fertigenden parabolischen Spiegel sphärische Spiegel verwendet. Diese nähern die Parabolspiegel, insbesondere bei geringen Krümmungswinkeln, ausreichend genau an (Hecht, 2009). Die entstehende sphärische Aberration des Hohlspiegels kann dabei durch die entgegengesetzt verlaufende sphärische Aberration des Fangspiegels kompensiert werden (Riekher, 1957).

Akamatsu et al. (1999) verwendeten ein CT erstmals in der Verbrennungsforschung zur orts- und zeitaufgelösten Detektion von Chemilumineszenzemission von Laborflammen. Durch den

Vergleich einer doppelt konvexen Linse mit einem CT wurde gezeigt, dass die sphärischen und chromatischen Aberrationen der abbildenden Optik maßgeblich die Güte der Ortsauflösung bestimmen. Eine perfekte Ortsauflösung entspräche einer Punktmessung der Lichtemission in der Flamme, was mit linienintegrierenden Optiken (Linsen, CT, usw.) nicht möglich ist. Trotzdem besitzt ein CT einige Vorteile gegenüber Linsensystemen. Durch den Verzicht auf Linsen im optischen Pfad wird Lichtbrechung und damit chromatische Aberration vermieden. Durch geschickte Auswahl sphärischer Spiegel kann ein scharfer Fokuspunkt der Optik erzeugt und sphärische Aberration minimiert werden. Dies führt dazu, dass ein CT in der direkten Umgebung des Fokuspunktes eine vielfach höhere Lichtstärke erzielt als anderswo. Dieses Volumen wird als optisches Probenvolumen bezeichnet. In der Verbrennungsforschung benutzte CTs erreichen Probenvolumen von  $0,8 \times 0,1$  bis  $1,6 \times 0,2$  mm (Axiale Ausdehnung  $\times$  Durchmesser) (Kojima et al., 2003, 2005; Akamatsu et al., 1999; Hardalupas, 2004, 2010). Das eingefangene Licht wurde bei diesen Arbeiten im Bildpunkt des CT in einen Lichtleiter mit Durchmesser  $0,1$  bzw.  $0,2$  mm eingekoppelt. Um Signale an mehreren Messpunkten gleichzeitig zu erhalten, platzierten Kojima et al. (2003) drei Lichtleiter radial versetzt im Bildpunkt des CT.

Beim Untersuchen von Chemilumineszenz von Verbrennungsvorgängen interessiert i.d.R. die Emission bestimmter Wellenlängen. Aus diesen gemessenen Intensitäten können Rückschlüsse auf die lokal vorliegende Luftzahl (Hardalupas, 2010), Wärmefreisetzungsrate (Hardalupas, 2004, 2010), Flammenfrequenz (Hardalupas, 2010) und die Position und Ausdehnung der Reaktionszone (Akamatsu et al., 1999; Kojima et al., 2003; Hardalupas, 2010) gezogen werden. Aus diesem Grund wird das vom CT eingefangene Licht spektral aufgeteilt, bandpassgefiltert und anschließend separat detektiert. Kojima et al. (2003, 2005); Akamatsu et al. (1999); Hardalupas (2004, 2010) verwendeten dafür Strahlteiler, dichroitische Spiegel, schmalbandige Interferenzfilter und Photomultiplier (PMTs).

Im Folgenden wird auf die Auslegung und den Aufbau des hier vorgestellten CTs eingegangen. Anschließend wird die Größe des Probenvolumens sowie die Güte der Fokussierung der Optik durch Abgleichen von analytischen Berechnungen mit Kameraaufnahmen verifiziert. Gemessene Chemilumineszenzemissionen eines Propangasbrenners demonstrieren exemplarisch die Anwendbarkeit des CTs auf Flammen. Zum Schluss wird die spektrale Empfindlichkeit des Aufbaus mit einer Lichtquelle mit bekannter, wellenlängenabhängiger Bestrahlungsstärke ermittelt.

## **Aufbau und Auslegung**

Die beiden Spiegel des CT sind in einem Aluminiumgehäuse aufgehängt. Das Gehäuse besteht aus einem Rohr (Außendurchmesser  $200$  mm), zwei Spiegelaufhängungen und einer Montagevorrichtung (Abbildung 1). Die Fertigungstoleranz aller für die optischen Eigenschaften wichtigen Abmessungen beträgt  $100 \mu\text{m}$ . Der Hauptspiegel wird durch einen Gewinding befestigt. Um Ein- und Auskoppelverluste zu vermeiden und die Lichtstärke zu verbessern, wird auf einen Lichtleiter verzichtet. Stattdessen wird eine Lochblende (Durchmesser  $0,1$  mm) und eine plankonvexe Linse (PCX, Durchmesser  $6$  mm, Brennweite  $5,3$  mm) als Kollimator zum Parallelisieren des CT-Bildes verwendet. Lochblende und PCX befinden sich in C-Mount-Gewindetuben, die mit drei radialen Rändelschrauben in der Aufhängung des Hauptspiegels eingeklemmt werden. Diese Konstruktion ermöglicht die Justierung der Blendenposition. Nach einer Querschnittserweiterung auf den Innendurchmesser der Strahlteilerwürfel (Qioptiq), in denen zwei Strahlteiler drehbar befestigt sind, kann das Spektrometer, bestehend aus zwei Strahlteilerwürfeln, drei Interferenzfiltern und drei PMTs) mit zwei radialen Schrauben befestigt

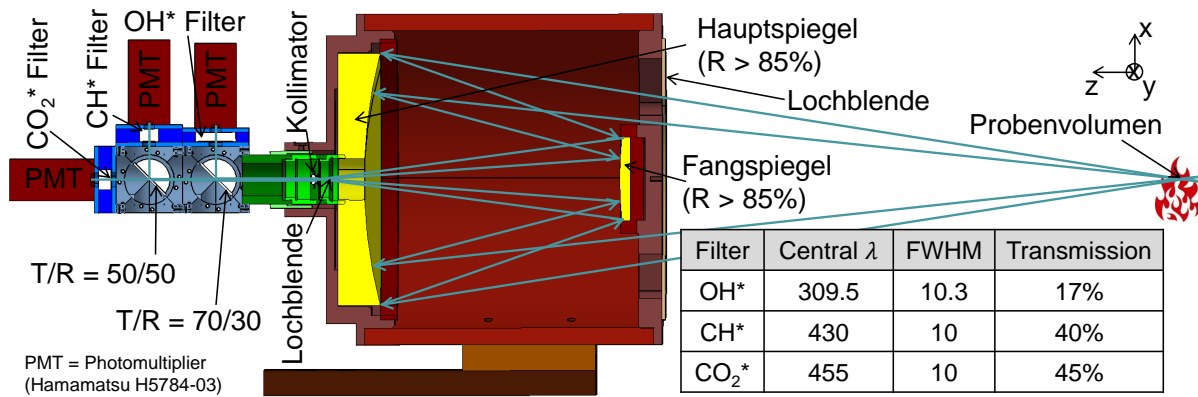


Abb. 1: Cassegrain-Teleskop mit angeschlossenem Spektrometer

werden. Die erste Strahlteilerplatte reflektiert 30 % des einfallenden Lichts, die zweite Strahlteilerplatte 50 %. Die Interferenzfilter (und im Folgenden auch die Signale der PMTs) sind nach den bei den jeweiligen Zentralwellenlängen Chemilumineszenz emittierenden Verbrennungsradi-kalen benannt und in Abbildung 1 klassifiziert. Konservativ abgeschätzt erreichen für das OH\*-Signal 3,0 %, für das CH\*-Signal 9,3 % und für das CO<sub>2</sub>\*-Signal 10,5 % des einfallenden Lichtes die PMTs. Alle Photomultiplier sind vom Typ H5784-03 (Hamamatsu). Der Reflexionsgrad der Aluminium-bedampften Spiegel ist laut Hersteller > 85 %. Um Streulichteinflüsse zu reduzieren, ist eine dem Strahlengang nachempfundene Lochblende (Durchmesser 100 mm) an der Vorderseite des CT angebracht.

Für die Qualität des optischen Probenvolumens sind die Abstände der optischen Komponenten sowie die Krümmungsradien der Spiegel entscheidend. Mit OSLO, einer Optimierungsoftware für optische Systeme, wurden zuerst geeignete Krümmungsradien und anschließend die Abstände der Komponenten zueinander dahingehend optimiert, dass die sphärischen Aberrationen und der Durchmesser des axialen Fokuspunktes ein Minimum annehmen. Diese Auslegung führt zu den Abständen zwischen Haupt- und Fangspiegel von 153,7 mm und zwischen Fangspiegel und Blende von 174,8 mm. Die Krümmungsradien ergeben sich zu 304,8 mm (Hauptspiegel) und 257,4 mm (Fangspiegel). Der Durchmesser des Hauptspiegels beträgt 152,4 mm und der des Fangspiegels 50,8 mm.

Um die Größe des Probenvolumens analytisch zu ermitteln, wurde die Methode des "Ray Tracing" angewandt. Dabei wird ausgewertet, ob Strahlen aus dem Vorfeld des CT durch die Blende treffen. Die Anzahl der Treffer pro Punkt sind proportional zur Lichtstärke in diesem Punkt. Akamatsu et al. (1999) definierten das Verhältnis von Treffern zur Anzahl emittierter Strahlen in einem Punkt als "Light collection rate" (LCR). Um das Probenvolumen abgrenzen zu können, verwendeten sie das  $e^{-2}$ -fache Maximum der LCR (innerhalb des Probenvolumens). In Abbildung 2 sind anstatt der LCR die mit der maximalen Trefferanzahl eines Punktes (96 Treffer) normierten Treffer aufgetragen. Die im linken Bild dargestellten Linien (magenta) markieren die Grenzen des lichtsensitiven Volumens und entstammen einer dreidimensionalen Rechnung (1.000 Strahlen pro Punkt), alles andere wurde zweidimensional (1.799 Strahlen pro Punkt,  $\Delta z = 0,1$  mm,  $\Delta y = 0,01$  mm) gerechnet. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurde für die 3D-Rechnung der umgekehrte Lichtweg gewählt, also Strahlen von der Lochblende emittiert. Wird das linke Bild an der y-Achse gespiegelt und um die z-Achse rotiert, entsteht eine dreidimensionale Darstellung des lichtsensitiven Volumens, also zwei Hohlkegel, die ihre Spitzen an der Position des Probenvolumens ( $z = 0$ ) haben. 2D- und 3D-Ergebnisse

stimmen in der Hohlkegelgeometrie gut überein, weshalb die 2D-Ergebnisse für die weitere Auswertung verwendet werden können. Für kleine Werte von  $y$  ist der Unterschied ohnehin zu vernachlässigen. Aus dem rechten Bild von Abbildung 2 ist die axiale und radiale Ausdehnung

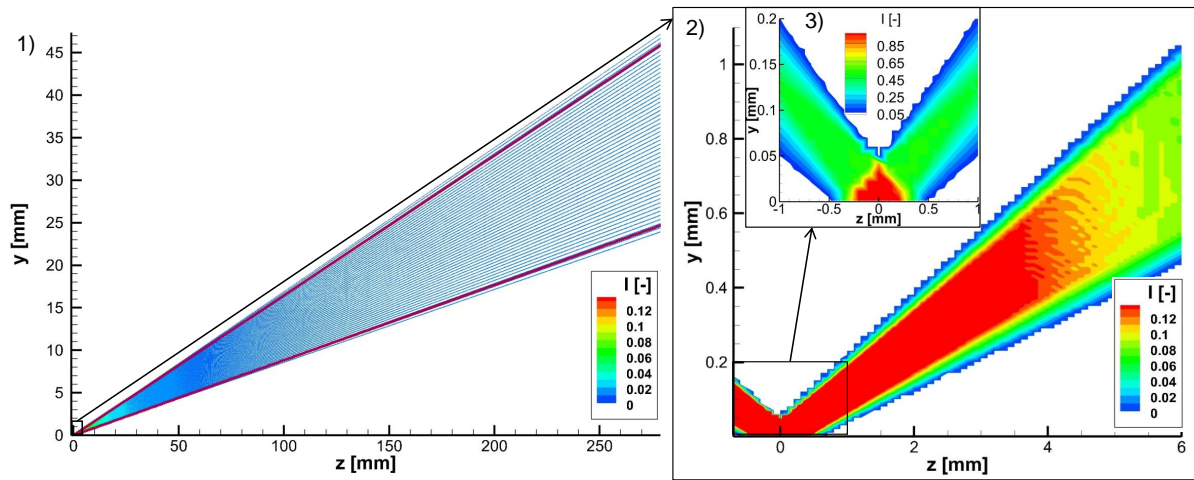


Abb. 2: Ray Tracing-Ergebnis für das Vorfeld des CT vom Teleskop bis zum Fokuspunkt ( $z = 0$ )

des Probenvolumens abzulesen (ca.  $1,12 \times 0,1$  mm), wenn nur die Abschnitte beachtet werden, bei denen für  $y = 0$  mm, also auf der optischen Achse, noch Treffer auftreten (siehe Bildausschnitt 3). In diesen Bereichen ist die Lichtstärke mindestens um den Faktor 2 größer als in der Umgebung. Nach strenger Anwendung des  $e^{-2}$ -Kriteriums erstreckt sich das Probenvolumen zwischen  $-4 < z < 4$  mm. In Abbildung 3 (links) ist die Grenze des Probenvolumens durch die

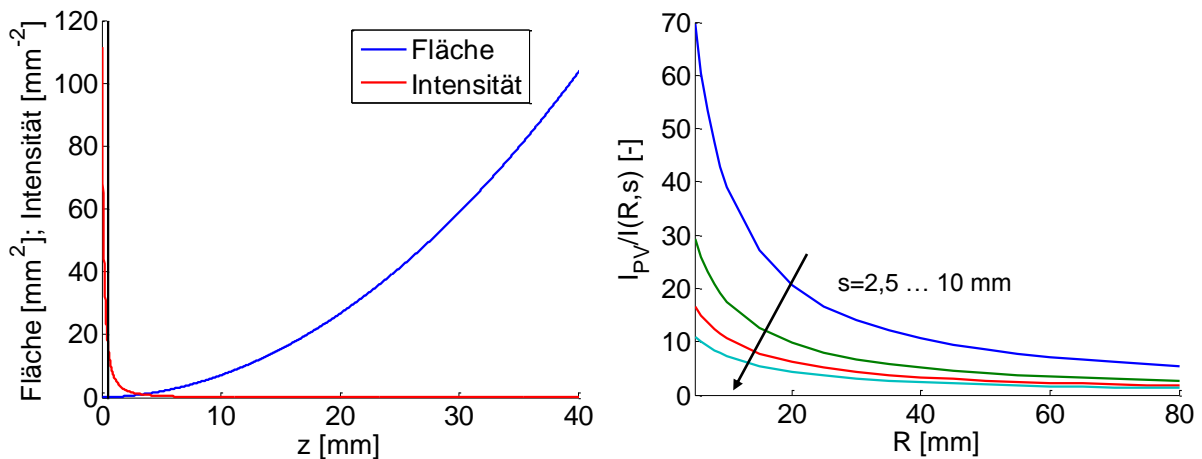


Abb. 3: Links: Belichtete Fläche und Intensität über dem Abstand vom Probenvolumen; Rechts: Intensitätsverhältnis vom Probenvolumen zur Umgebung

schwarze Linie markiert. Außerdem sind die Größen lichtensitive Fläche und Lichtintensität über dem Abstand zum Zentrum des Probenvolumens aufgetragen, wobei die Intensität der Kehrwert der Fläche ist. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da alle in der Lochblende auftretenden Strahlengänge durch das Probenvolumen verlaufen. Diese Darstellung verdeutlicht den Charakter des CT: Die Lichtstärke im Probenvolumen ist um ein Vielfaches höher als anderswo, wohingegen das gesamte lichtensitive Volumen sehr viel größer als das Probenvolumen

ist. Aus diesem Grund wurde eine Modellvorstellung entwickelt, welche die Anwendbarkeit des CTs zur Chemilumineszenzmessung in Flammen quantifizieren soll. Dieses Modell beruht auf der nicht physikalischen Annahme, dass das Probenvolumen und eine Kugelschale um das Probenvolumen mit Radius  $R$  und Schalendicke  $s$  Licht mit gleicher Intensität emittiert. Das Signal-Rausch-Verhältnis kann durch das Verhältnis der Lichtintensität im Probenvolumen und in den lichtsensitiven Bereichen der Kugelschale ( $\hat{=}$  Schnittmenge von Kugelschale und Hohlkegel),  $I_{PV}/I(R, s)$ , angegeben werden. Abbildung 3 (rechts) zeigt dieses Verhältnis für die Kugelschalendicken  $s$  (2, 5, 5, 7, 5 und 10 mm) über dem Kugelradius  $R$ , wobei für die Ermittlung der Intensitätsverteilung die zweidimensionalen Ray Tracing-Ergebnisse verwendet wurden. Die Hypothese, dass nur für kleine Kugelradien und Schalendicken (entspricht "kleinen" Flammenradien und dünnen Reaktionszonen) eine tolerierbare Signalqualität vorliegt, wird durch das Modell bestätigt. Für eine 10 mm dicke Schale ist beispielsweise  $I_{PV}/I(R, s) = 2$  für den Radius  $R = 50$  mm. Weil bei turbulenten Flammen die Position der Reaktionszone stark fluktuieren kann und von vielen Parametern abhängt, ist für genauere Aussagen eine experimentelle Analyse erforderlich.

### Verifizierung der optischen Eigenschaften

Die mit OSLO optimierten und durch Ray Tracing quantifizierten optischen Eigenschaften des CTs wurden durch Experimente verifiziert. Abbildung 4 vergleicht Kameraaufnahmen (oben)

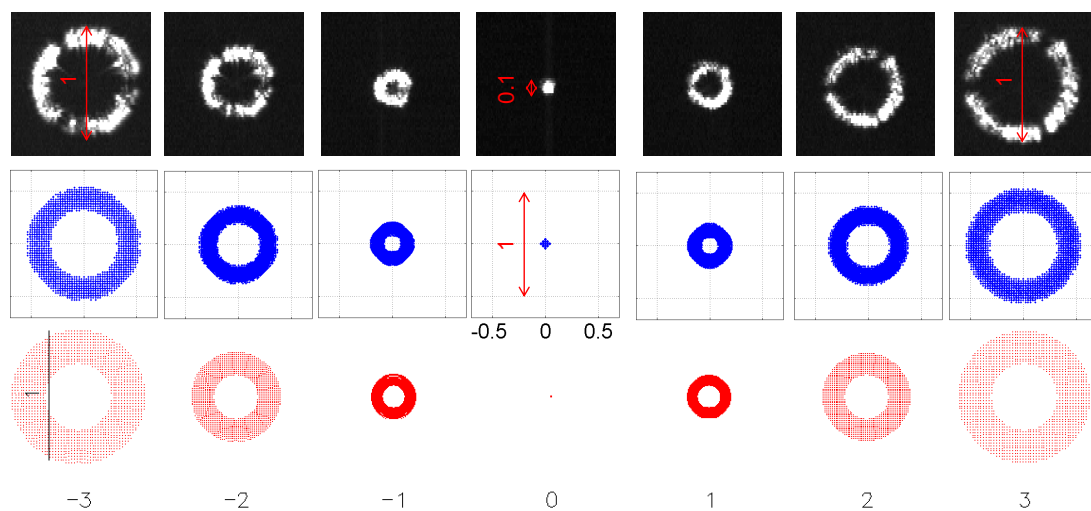


Abb. 4: Vergleich von berechnetem und gemessenem Strahlengang in der Umgebung des Probenvolumens ( $z = [-3...3]$ ); Oben: Kameraaufnahmen; Mitte: 3D-Ray-Tracing; Unten: Spotdiagramme; Alle Werte sind in der Einheit mm angegeben.

vom Licht einer Laserdiode mit dreidimensionalen Ray Tracing-Ergebnissen (Mitte) und Spotdiagrammen (OSLO, unten). Die Kamera (PCO Flashcam, 756 x 580 Pixel, 11  $\mu\text{m}$  Pixelgröße) befindet sich bis zu 3 mm von der axialen Position des Zentrums des Probenvolumens entfernt. Die Laserdiode ist hinter der Lochblende platziert und leuchtet im umgekehrten Lichtweg durch das CT. Kameraaufnahmen und Ray Tracing-Ergebnisse zeigen sehr gute Übereinstimmung, während die Spotdiagramme aus OSLO den äußeren Durchmesser exakt treffen, aber den inneren Radius unterschätzen ("zu breite Ringe"). Dies resultiert daraus, dass in der OSLO-Auslegung die Ausblendwirkung der Spiegelaufhängung des Fangspiegels nicht berücksichtigt

wird. Außerdem unterschätzt OSLO den Durchmesser des Probenvolumens, weil nur von einem Punkt im Zentrum der Lochblende Strahlengänge verfolgt werden. Die Kameraaufnahmen zeigen, dass das reale Abbildungsverhalten des CTs den Auslegungsrechnungen entspricht.

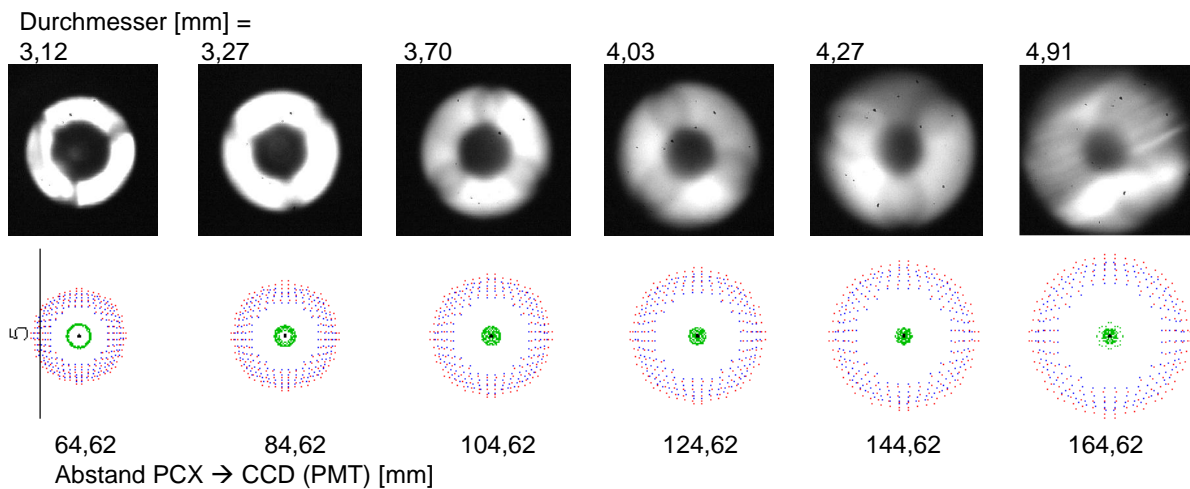


Abb. 5: Vergleich von berechneter und gemessener Blendenfokussierung (Oben: Kameraaufnahmen; Unten: Spotdiagramme (OSLO))

Für eine optimale Lichtausbeute muss die PCX-Linse durch die Lochblende tretendes Licht zu einem möglichst parallelen Lichtstrahl mit einem Durchmesser  $< 5$  mm (entspricht der lichtsensitiven Fläche der PMTs) kollimieren. Abbildung 5 vergleicht Kameraaufnahmen (PCO Flashcam, oben) mit Spotdiagrammen (OSLO, unten) in Abständen zwischen PCX und CCD zwischen ca. 65 und 165 mm. Weil die PCX-Linse chromatische Aberrationen aufweist, sind im Diagramm drei Wellenlängen dargestellt, die den Zentralwellenlängen der drei verwendeten Interferenzfilter im Spektrometer entsprechen (grün: 310 nm, blau: 430 nm, rot: 455 nm). Der maximale Abstand zwischen PCX und PMT beträgt für den hier beschriebenen Aufbau ca. 145 mm, d.h. bei genauer Justierung der Strahlteiler erreichen alle durch die Lochblende tretenden Lichtstrahlen die PMTs.

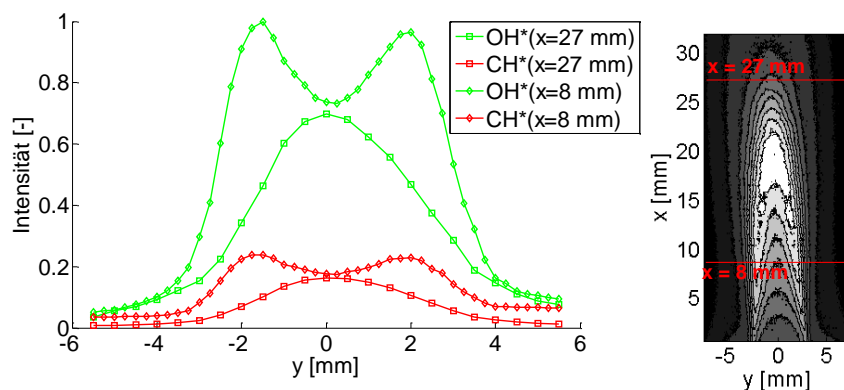


Abb. 6: Links: Intensitätsverlauf von gemittelten OH\*- und CH\*-PMT-Signalen 8 mm (Rauten) und 27 mm (Quadrate) über dem Brenneraustritt; Rechts: Intensität der Flamme (Weißlichtaufnahme, PCO Flashcam)

Nachdem die optischen Eigenschaften des CTs ermittelt sind, gibt ein Test an der turbulenten

Propan-Luft-Diffusionsflamme einer Lötlampe Aufschlüsse über die Ortsauflösung des CTs. Abbildung 6 zeigt radiale Intensitätsprofile entlang der  $y$ -Achse bei  $z = 0$  mm in  $x_1 = 8$  bzw.  $x_2 = 27$  mm Höhe über dem Brenneraustritt. Die Messlinie bei  $x_2$  schneidet die Flamme an der Flammenspitze, während das Probenvolumen des CT auf der Traverse bei  $x_1$  zweimal die Reaktionszone enthalten sollte. Die mit dem CT aufgezeichneten Verläufe der  $\text{OH}^*$ - und  $\text{CH}^*$ -PMTs bestätigen diesen Sachverhalt. Aufgrund geringer Hintergrundstrahlung durch  $\text{CO}_2^*$  ist das Signal des  $\text{CO}_2^*$ -PMT sehr schwach und deshalb nicht dargestellt. Die mit 20 kHz aufgezeichneten Signale der PMTs wurden an jedem Messpunkt über zwei Sekunden gemittelt. Wird angenommen, dass bei  $(x = 8, y = 0)$  mm keine Flamme im Probenvolumen vorliegt, beträgt das Signal-Rausch-Verhältnis  $\frac{1}{0,75} = 1,33$ . Es ist demnach möglich, die Reaktionszone zu lokalisieren. Wegen des niedrigen Signal-Rausch-Verhältnisses kann allerdings nur von einer Pseudopunktmessung gesprochen werden. Für genauere Aussagen zur räumlichen Auflösung des CTs in turbulenten Flammen ist am Lehrstuhl für Thermodynamik eine Testreihe an mehreren Versuchsständen geplant.

### Spektrale Empfindlichkeit

Bei der späteren Anwendung des CTs wird zur Bestimmung der lokalen Luftzahl das Verhältnis der Intensität des  $\text{OH}^*$ - und  $\text{CH}^*$ -Signals wichtig sein. Dafür muss die spektrale Empfindlichkeit von CT und Spektrometer für alle drei PMTs bekannt sein. Diese kann mittels einer Lichtquelle mit bekannter spektraler Bestrahlungsstärke  $P(\lambda)$  bestimmt werden, welche im Fokus des CTs platziert wird. Dadurch lässt sich die bei der Wellenlänge  $\lambda$  gemessene Intensität  $i(\lambda)$  mit dem wellenlängenabhängigen Gewichtungsfaktor  $C(\lambda)$  auf die Empfindlichkeit des CT bei einer Referenzwellenlänge  $\lambda_{\text{ref}}$  beziehen:

$$I(\lambda) = C(\lambda)i(\lambda) \quad (1)$$

Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus der Bestrahlungsstärke der Lichtquelle durch eine Kalibriermessung:

$$C(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P(\lambda_{\text{ref}})} \frac{i(\lambda_{\text{ref}})}{i(\lambda)} \quad (2)$$

Als Referenzwellenlänge dient eine Zentralwellenlänge der Interferenzfilter, beispielsweise  $\lambda_{\text{ref}} = 430$  nm.

### Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurde die Konzeption eines CTs zur räumlich und zeitlich aufgelösten Messung von Chemilumineszenz in Flammen beschrieben, sowie die optischen Eigenschaften des CTs quantifiziert. Dabei wurde nur das räumliche Auflösungsvermögen diskutiert. In der weiteren Entwicklung wird das Zeitsignal der PMTs und die aus den Signalen abzuleitenden Größen, wie z.B. lokale Luftzahl und Flammenfrequenz, untersucht werden.

### Literatur

F. Akamatsu, T. Wakabayashi, T. Shohji, M. Katsuki, Y. Mizutani, Y. Ikeda, N. Kawahara, und T. Nakajima. "The Development of a Light-collecting Probe with High Spatial Resolution Applicable to Randomly Fluctuating Combustion Fields". Meas. Sci. Technol., 10:1240–1246, 1999.

M. Hardalupas, Y. und Orain. "Local Measurements of the Time-Dependent Heat Release Rate and Equivalence Ratio Using Chemiluminescent Emission From a Flame". *Combustion and Flame*, 139:188–207, 2004. doi: 10.1016/j.combustflame.2004.08.003.

M. und Panoutsos C. S. und Taylor A. M. K. P. Hardalupas, Y. und Orain. "Spatial Resolution of a Chemiluminescence Sensor for Local Heat-Release Rate and Equivalence Ratio Measurements in a Model Gas Turbine Combustor". *Exp. Fluids*, 49:883–909, 2010. doi: 10.1007/s00348-010-0915-z.

E. Hecht. "Optik". Oldenbourg, 2009.

J. Kojima, Y. Ikeda, und T. Nakajima. "Multi-Point Time-Series Observation of Optical Emissions for Flame-Front Motion analysis". *Meas. Sci. Technol.*, 14:1714–1724, 2003. doi: S0957-0233(03)61877-1.

J. Kojima, Y. Ikeda, und T. Nakajima. "Basic Aspects of OH(A), CH(A), and C<sub>2</sub>(d) Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar MethaneAir Premixed Flames". *Combustion and Flame*, 140:34–45, 2005. doi: 10.1016/j.combustflame.2004.10.002.

R. Riekher. "Fernrohre und ihre Meister". VEB, 1957.