

# UV-Endoskop mit diffraktiver Aberrationskorrektur für die Motorenentwicklung

R. Reichle\*, C. Pruss\*, W. Osten\*, H.J. Tiziani\*, F. Zimmermann\*\*, C. Schulz\*\*\*

\*Institut für Technische Optik (ITO), Universität Stuttgart

\*\*Physikalisch-Chemisches Institut (PCI), Universität Heidelberg

\*\*\*Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG), Universität Duisburg-Essen

<mailto:reichle@ito.uni-stuttgart.de>

Zur zeit- und orts aufgelösten Erfassung von Kraftstoffkonzentration, Temperatur und Äquivalenzverhältnis im Direkteinspritzmotor wird ein minimalinvasives hybrides Weitwinkel-Endoskopsystem vorgestellt. Es ermöglicht gleichzeitig die chromatisch korrigierte Abbildung mehrerer Tracer-Fluoreszenzbanden aus einer durch Anregung definierten Messebene.

## 1 Motivation, Spezifikationen

Bei dem optischen Messverfahren der Laser-induzierten Fluoreszenz (LIF) im Verbrennungsmotor werden dem Kraftstoff Tracersubstanzen in bekannter Konzentration beigelegt. Diese werden nach Injektion des Gemischs in den Verbrennungsraum optisch angeregt. Aus der Analyse des resultierenden Fluoreszenzlichts kann je nach Tracerkombination auf verbrennungsrelevante Größen wie Kraftstoffkonzentration, Äquivalenzverhältnis oder auch Temperatur geschlossen werden. Für eine Anwendung dieses berührungslos arbeitenden Verfahrens an seriennahen Motoren sind minimalinvasive optische Systeme notwendig. Für die Punktmessung nahe des Zündfunken wurde ein Zündkerzensensor vorgestellt [1], im Folgenden wird ein minimalinvasives 2D-Abbildungssystem beschrieben.

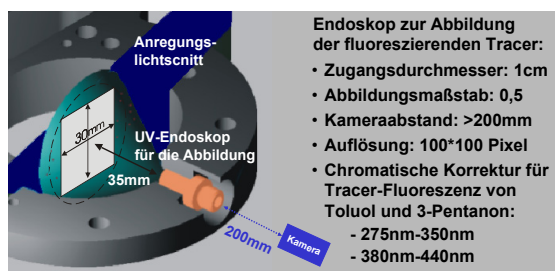


Abb. 1 Messanordnung für 2D-UV-LIF-Messungen im Verbrennungsmotor; Spezifikationen für das Endoskop

## 2 Auslegung und optisches Design

Um einerseits die anspruchsvollen optischen Anforderungen eines minimalinvasiven Weitwinkel-systems mit großem Bildabstand bei kleinem Abbildungsmaßstab zu erfüllen, andererseits aber auch dem Wunsch nach einem kleinen und leichten Endoskopeinsatz am Motor gerecht zu werden, wurde das System mehrstufig ausgelegt. Das direkt mit dem Motor verbundene Objektiv enthält lediglich 2 Quarzlinzen und entwirft ein chromatisch unkorrigiertes Zwischenbild. Dieses wird an-

schließend über eine Feldlinse und ein feststehendes multifunktionelles hybrides Relay (D=50mm) auf die sensitive Fläche einer ebenfalls feststehenden Kamera abgebildet (s. Abb. 2). Die chromatische Korrektur der Gesamtabbildung (Abb. 4) erfolgt ausschließlich durch die starke negative Dispersion einer diffraktiven Linse (DOE) im Relay. Unerwünschte Beugungsordnungen können durch Anpassung der Fertigungsparameter an den begrenzten Spektralbereich der Anwendung minimiert werden, zusätzlich wird ihr störender Einfluss auf das Bild im vorliegenden Design durch die Positionierung des DOE im Relay reduziert.

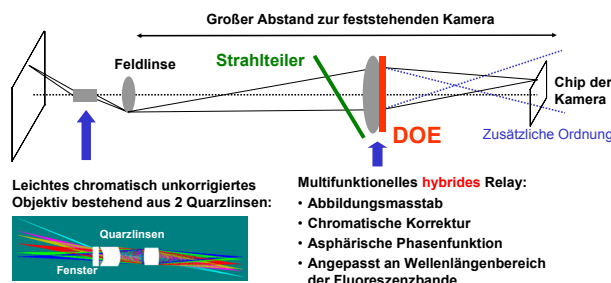


Abb. 2 Optisches Schema mit 2 funktionellen Einheiten

Für die Abbildung mehrerer unterschiedlicher Fluoreszenzbanden wird ein Strahlteiler vor Relays positioniert, die somit für jeden Spektralbereich getrennt optimiert werden können.

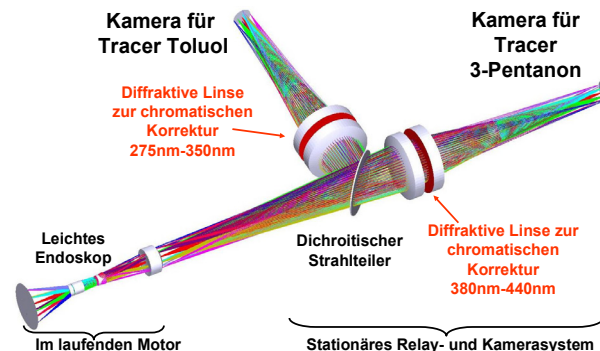


Abb. 3 Aufbau für die simultane Messung von 2 unterschiedlichen Fluoreszenzbanden

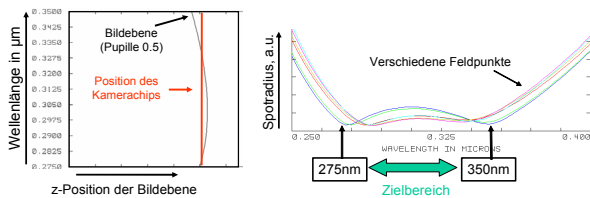


Abb. 4 Chromatische Korrektur in der Simulation

### 3 Realisierung

Nach Toleranzierung unter Berücksichtigung zusätzlicher Beugungsordnungen und der Motorbewegung wurde das Endoskop aus speziellem Edelstahl bei der Firma Sill Optics inklusive der beschichteten Linsen angefertigt. Die Herstellung der diffraktiven Elemente mit asphärischen Phasenfunktionen zur Aberrationskorrektur erfolgte am ITO.



Abb. 5 Fotoaufnahmen des UV-Endoskopeinsatzes und eines multifunktionalen hybriden Relays

### 4 Experimentelle Ergebnisse

Zur Aufnahme von Testbildern bei verschiedenen Einzelwellenlängen wurde eine durchstimmbare Lichtquelle mit einer Ulbrichtkugel für eine definierte Beleuchtung kombiniert. Die polychromatische Abbildungsleistung für eine gegebene Spektralverteilung kann anschließend durch eine gewichtete Überlagerung der Einzelbilder beurteilt werden.

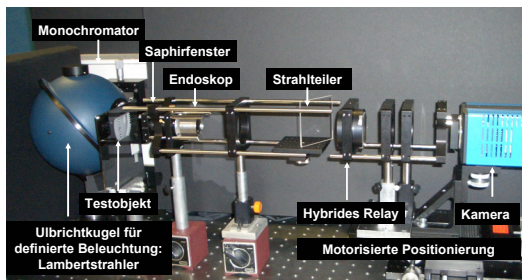


Abb. 6 Testaufbau für die Charakterisierung

Bereits an den Einzelbildern wird die chromatische Korrektur mit Umkehr des z-Bildabstandes mit der Wellenlänge deutlich (s. Abb. 7). Polychromatisch erhält man bei einheitlichen spektralen Gewichten über den Korrekturbereich eine square wave response von >0,8 bei der Zielauflösung innerhalb eines Objektdurchmessers von 30mm. Dies gilt auch bei Verschiebungen von +0,5mm in x,y,z (Motorbewegung) zwischen Relay und Endoskop.

Im polychromatischen experimentellen Vergleich mit einem kommerziellen UV-Endoskop erzielte das hybride Endoskopsystem die 10-fache Lichtstärke bei einer höheren Auflösung.

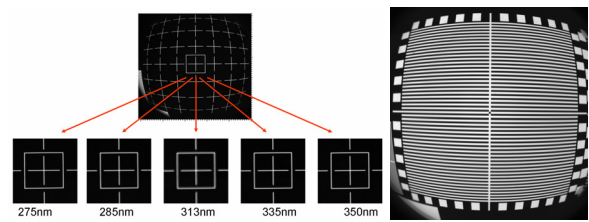


Abb. 7 Einzelbilder zur Demonstration der chromatischen Variation der Bildposition; polychromatisches Bild (380nm-440nm) eines Testobjektes mit 30mm\*30mm

Zur Demonstration einer 2D-Sauerstoffmessung wurde ein Strömungsexperiment mit 2 Kameras und 2 Tracern mit spezifischem Verhalten durchgeführt (s. Abb. 8, 9).

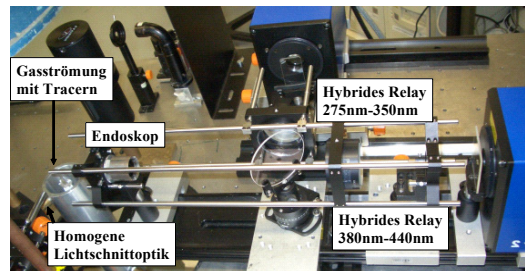
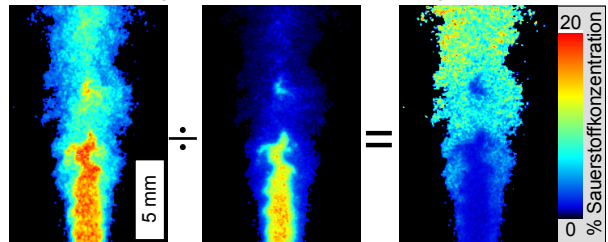


Abb. 8 Testaufbau für 2-Tracer-2-Kamera-Experiment

Stickstoffströmung mit Tracern mischt sich mit umgebender Raumluft



Stickstoffströmung mit Tracern in umgebendem Stickstoff-Hüllstrom

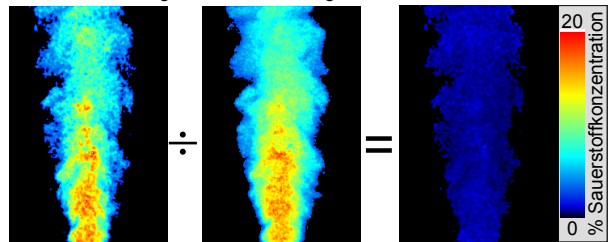


Abb. 9 Fluoreszenz der Tracer 3-Pentanon (links) und Toluol (Mitte) bei Anregung mit 266nm; Auswertung zur 2D-Bestimmung der O<sub>2</sub>-Konzentration (rechts)

### 5 Danksagung

Für die Förderung des Projektes danken wir der Landesstiftung Baden-Württemberg.

### Referenzen

[1] R. Reichle, C. Pruss, W. Osten, H. J. Tiziani, F. Zimmermann, and C. Schulz: "Fiber optic spark plug sensor for UV-LIF measurements close to the ignition spark" in Proceedings of SPIE vol. 5856, 158-168 (2005)