

DREI-FARBEN SPEKTROMETRISCHE TEMPERATURBESTIMMUNG MIT EINER CMOS-HOCHGESCHWINDIGKEITSKAMERA AM EINZYLINDER-FORSCHUNGSMOTOR

TREE COLOUR SPECTROMETRIC TEMPERATURE MEASUREMENT BY A CMOS HIGH SPEED CAMERA USING A ONE CYLINDER RESEARCH ENGINE

Dipl.-Ing. Maxim Epp¹; Dr.-Ing. Mathias Niendorf²; Prof.-Dr. habil. Egon Hassel³; Prof.-Dr.-Ing. Horst Harndorf²

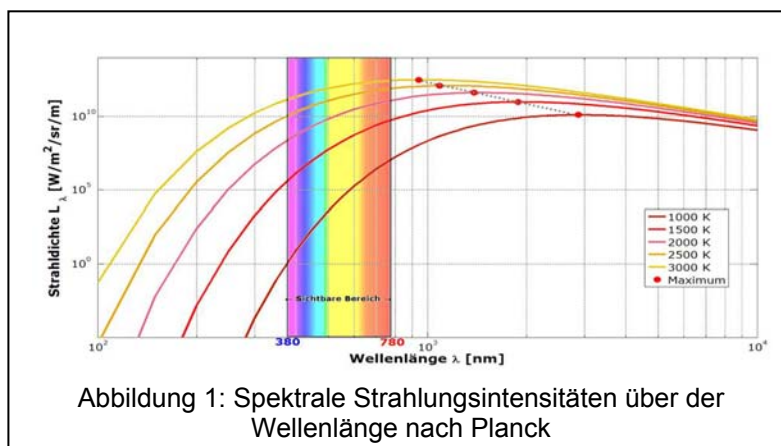
¹ MAN Diesel&Turbo SE Augsburg; ² Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren; ³ Universität Rostock, Lehrstuhl Technische Thermodynamik;

Einleitung

Die kurbelwinkeldiskrete Bestimmung der Verbrennungstemperatur ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung der Verbrennung und für ein besseres Verständnis der untersuchten innenmotorischen Prozesse. Die Informationen über Temperaturverteilung im Brennraum können weiterhin zur Validierung der Motorsimulation und der Simulationsverfahren über den direkten Vergleich mit bildhaften Messdaten eingesetzt werden.

Die spektrometrische Temperaturmessung ist ein gängiges Messverfahren und hat sich für Untersuchungen an rußenden Flammen bewährt. Hottel und Broughton waren die Pioniere bei der Verwendung dieses Messverfahrens und haben bereits 1932 diese Methode zur Bestimmung der Temperatur von leuchtenden Gasflammen in Öfen eingesetzt [1]. Diese Methode wurde in den letzten Jahren zur Flammentemperaturmessung bei Verbrennungsmotoren insbesondere bei Dieselmotoren angewendet und erweitert [2].

Bei der dieselmotorischen Verbrennung treten gleichzeitig thermische Gasstrahlung, Chemilumineszenz und Festkörperstrahlung auf. Im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich übertrifft intensitätsmäßig die Festkörperstrahlung der Rußpartikel deutlich alle anderen Strahlungsphänomene [3]. Die freigesetzte Strahlung von Rußpartikeln enthält ein kontinuierliches Spektrum mit unterschiedlichsten Wellenlängen und entspricht dabei dem realen Temperaturstrahler.



Der dabei emittierte Wellenlängenbereich und die Höhe der Strahlungsenergie sind von der Temperatur des Körpers abhängig. Durch Messung der Intensitäten kann mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes eine der Strahlung zugrunde liegende Rußtemperatur bestimmt werden (Abbildung 1).

Das Prinzip dieser Messmethodik beruht auf der Messung der Strahlungsintensität der

Rußpartikel für mindestens zwei Wellenlängen. Temperaturen können durch Verhältnissbildung von jeweils zwei spektralen Intensitätsverläufen unter Berücksichtigung nachfolgend beschriebener Gesetzmäßigkeiten und Annahmen berechnet werden.

Theoretische Grundlagen

Die optische Spektrometrie umfasst die berührungsfreien Messverfahren zur Bestimmung der Temperatur einer Strahlungsquelle, die auf der Abhängigkeit zwischen Temperatur und Strahlungsemission basiert.

Bei der Annahme, dass die Strahlungsquelle ein schwarzer Körper ist, ist die Temperaturbestimmung eine einfache Aufgabe. Die Flammentemperatur wird dabei mit Hilfe der gemessenen Wellenlänge der emittierten Strahlung ermittelt. Dazu muss die Messung der Strahlungsintensität bei mindestens zwei diskreten Wellenlängen erfolgen. Ein schwarzer Strahler emittiert eine Strahlung von seiner Oberfläche mit einem kontinuierlichen Spektrum, obwohl die Intensität in dem gesamten Spektrum variiert.

Die Lichtintensität bei jeder Wellenlänge im gesamten Spektrum hängt nur von der Temperatur ab und steigt mit der Temperatur an (Abbildung 1). Diese Beziehungen sind quantitativ in Plancks Gesetz der schwarzen Strahlung ausgebildet. [4].

Für die spektrale Strahldichte des schwarzen Körpers gilt nach dem Planckschen Strahlungsgesetz folgende Beziehung:

$$L_{\lambda,s}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right)} - 1} \quad [2.1],$$

wo λ die Wellenlänge der Strahlung und $L_{\lambda,s}(T)$ die Strahlungsenergie an der angegebenen Wellenlänge λ ist. T ist die absolute Temperatur in K und C_1 und C_2 sind die ersten und zweiten Planckschen Strahlungskonstanten.

Die erste und die zweite Plancksche Strahlungskonstante setzen sich aus der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c=299792458 \text{ m/s}$, der Planck- Konstante $h=6,6260755 \times 10^{-34} \text{ Js}$ und der Boltzmann- Konstante $k= 1,380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ folgendermaßen zusammen: $C_1=hc^2=0,59552 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$, $C_2=hc/k= 1,438769 \times 10^{-2} \text{ mK}$.

Gleichung [2.1] gilt nur für einen idealisierten schwarzen Körper. Da der Ruß aber kein idealer schwarzer Strahler ist, muss die Strahlungsintensität eines realen Strahlers unter Berücksichtigung des Emissionskoeffizienten berechnet werden.

Der Emissionskoeffizient ε liefert den Zusammenhang zwischen der Strahlungsintensität eines schwarzen Strahlers und der eines realen Strahlers, wobei beim schwarzen Strahler $\varepsilon=1$ und beim realen Strahler immer $\varepsilon < 1$ ist.

$$L_{\lambda,r}(T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{\lambda,s}(T) \quad [2.2]$$

Es kann auch geschrieben werden:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L_{\lambda,r}(T)}{L_{\lambda,s}(T)} \quad [2.3].$$

Die spektrometrische Methode der Temperaturmessung basiert auf der Gleichung [2.2], wenn die Strahlungsenergie $L_{\lambda,s}(T)$, wie bereits erwähnt wurde, gleichzeitig mit mindestens zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 gemessen wird:

$$L_{\lambda,1}(T) = \frac{c_1}{\lambda_1^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda_1 \cdot T}\right)} - 1} \cdot \varepsilon(\lambda_1) \quad [2.4] \text{ und}$$

$$L_{\lambda,2}(T) = \frac{c_1}{\lambda_2^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda_2 \cdot T}\right)} - 1} \cdot \varepsilon(\lambda_2) \quad [2.5],$$

so das Verhältnis der beiden Strahlungsenergie Gleichungen [2.4] und [2.5] ist wie folgt:

$$\frac{L_{\lambda,1}(T)}{L_{\lambda,2}(T)} = \frac{\frac{c_1}{\lambda_1^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda_1 \cdot T}\right)} - 1} \cdot \varepsilon(\lambda_1)}{\frac{c_1}{\lambda_2^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda_2 \cdot T}\right)} - 1} \cdot \varepsilon(\lambda_2)} \quad [2.6].$$

Abgeleitet von Gleichung [2.6] kann so die Temperatur bestimmt werden:

$$T = \frac{c_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{L_{\lambda,1}(T)}{L_{\lambda,2}(T)} - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad [2.7].$$

Bei der Anwendung der Zwei- Farben Methode werden meistens für die Betrachtung des Rußes als realer Strahler auf empirische Ansätze für die Bestimmung des Verhältnisses der Emissionskoeffizienten zurückgegriffen. Die meisten Gleichungen basieren auf der empirische Korrelation nach Hottel und Broughton [1].

Die Temperaturbestimmung mit einer Farb- CMOS- Kamera

Eine Farbkamera erlaubt die Aufnahmen der Strahlungsintensität bei verschiedenen Wellenlängen, was grundsätzlich eine spektrometrische Analyse der Aufnahmen zur Temperaturbestimmung ermöglicht.

Das spektrale Verhalten der Kamera wird durch die auf dem Chip enthaltene Bayer-Matrix bestimmt [5].

Das folgende spektrale Diagramm (Abbildung 2) zeigt die Empfindlichkeit des Chips, der bei der Untersuchung verwendeten Hochgeschwindigkeitskamera (Phantom V7.2).

Die Farbkamera Phantom V7.2 ist mit einem 800x600 Pixel SR-CMOS Sensor, 24 Bit Farbe mit eine Lichtempfindlichkeit 600 ISO/ASA Farbe ausgestattet.

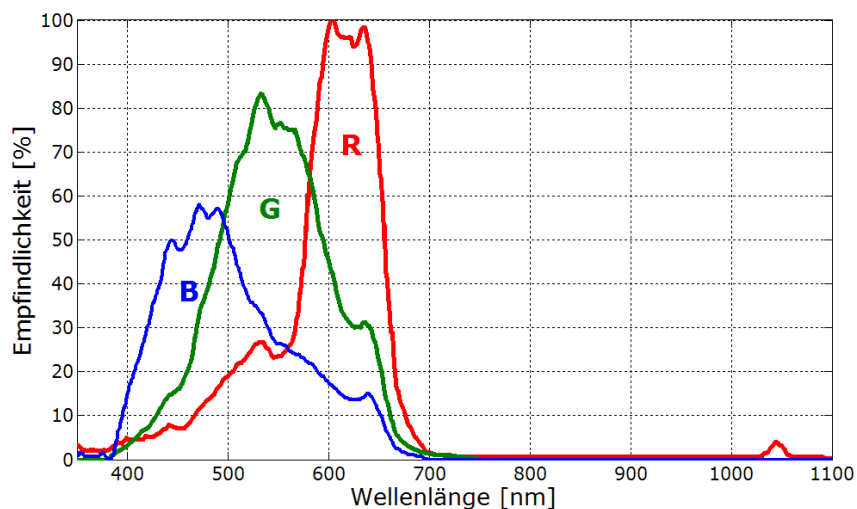


Abbildung 2: Lichtempfindlichkeitskurve [<http://www.visionresearch.com>]

Der Lichtempfindlichkeitskurve des Sensors ist zu entnehmen, dass der CMOS- Chip 3 spektrale Bereiche: Rot, Grün und Blau mit drei primären Farbfiltern erfasst, die eine bekannte, allerdings sehr breitbandige Selektivität aufweisen. Über diese Filter wird die spektrale Energie in Bereich von 350 bis 1100nm erfasst.

Mit diesen Voraussetzungen wurde auf der Basis der Zwei- Farben Methode ein Algorithmus für RGB- Aufnahmen entwickelt. Dieser soll im Folgenden vorgestellt werden:

Der strahlungsempfindliche CMOS-Sensor wandelt die einfallende Strahlungsenergie in Signalladungen entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit $S_i(\lambda)$ um.

Die Kamerareaktion $R_i(T)$ sieht dabei, laut einem linearen Reaktionsmodell folgt aus [6]:

$$R_i(T) = e \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda + n_i \quad [3.1],$$

wo $L(\lambda, T)$ die Strahlungsdichte bei einer Wellenlänge λ , e die Belichtungsdauer und n_i eine normalverteilte Zufallsvariable ist, die das Messrauschen und die Reaktionsvariabilität für den Sensor beschreibt. λ_{\min} und λ_{\max} sind die Wellenlängengrenzen des CMOS-Chips. Der Index i stellt die Wellenlänge für jeden primären Farbfilter des Sensor (rot, grün und blau) dar, so dass $i = r, g, b$ entspricht. Für den roten, grünen und blauen Sensor wird dann die Gleichung 2.1 in drei folgenden Gleichungen abgeleitet:

$$R_r(T) = e \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_r(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda + n_r \quad [3.2],$$

$$R_g(T) = e \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_g(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda + n_g \quad [3.3],$$

$$R_b(T) = e \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_b(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda + n_b \quad [3.4].$$

Da keine direkte Aufnahme der Strahlungsdichte möglich ist, was für Temperaturbestimmung nach Gleichung [2.7] erforderlich ist, wird das Verhältnis von Strahlungsdichte bei zwei diskreten Wellenlängen λ_1 und λ_2 durch das Verhältnis der Kamerareaktionen mit einem Korrekturfaktor A ausgedrückt:

$$\frac{L_{\lambda_1}(T)}{L_{\lambda_2}(T)} = A \frac{R_{\lambda_1}(T)}{R_{\lambda_2}(T)} \quad [3.5]$$

A ist dabei der Korrekturfaktor, der von der spektralen Empfindlichkeit $S(\lambda)$ der CMOS- Kamera und dem Messrauschen des Sensors abhängig ist [7]. Dann ergibt sich aus Gleichung [2.7] und Gleichung [3.5] die folgende Beziehung:

$$T = \frac{c_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{R_{\lambda_1}(T)}{R_{\lambda_2}(T)} + \ln A - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad [3.6]$$

So ist die Gleichung [3.6] die grundlegende Gleichung für die Zwei-Farben-Methode für die Verwendung mit einer Farb-Kamera. Um den Wert des Korrekturfaktors A und des Emissionsgrades ε zu erhalten, werden unterschiedliche Methoden und Annahmen vorgeschlagen.

Einige Methoden basieren dabei auf der Kalibrierung mit Hilfe einer Temperaturquelle, von der Temperatur und Emissionskoeffizient bekannt sind wie z.B. eine Wolframlampe. Die in der vorliegenden Arbeit zum Ansatz kommende Methode beruht auf der Korrelation zwischen der spektralen Lichtintensität der Strahlquelle und der Lichtempfindlichkeit der Pixel des Kamerasensors [8]. Wenn Störungseffekte (Messrauschen) unbeachtet bleiben, sieht die Kamerareaktion R in Gleichung [2.2] folgendermaßen aus [9]:

$$R_i(T) = e \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda, \quad [3.7]$$

und das Verhältnis von zwei Wellenlängen (1, 2) zeigt die folgende Beziehung:

$$\frac{R_1(T)}{R_2(T)} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda 1}(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda 2}(\lambda) \cdot L(\lambda, T) d\lambda} \quad [3.8]$$

Da die Funktion für die drei Empfindlichkeitskurven unbekannt ist, werden die Daten in Intervallen von 350 bis 1100 nm aus den Lichtempfindlichkeitskurven des Chips mit einem Schritt von 1 nm integriert.

$$\frac{R_1(T)}{R_2(T)} = \frac{\sum_{350}^{1100} S_{\lambda 1}(\lambda) \cdot L(\lambda, T)}{\sum_{350}^{1100} S_{\lambda 2}(\lambda) \cdot L(\lambda, T)} \quad [3.9]$$

Laut Studie von Flower (1983) [10] kann davon ausgegangen werden, dass der spektrale Emissionsgrad von Rußpartikelgrößen von 0,005 bis 1µm umgekehrt proportional zur Wellenlänge ist, so dass das Verhältnis für zwei Wellenlängen folgendermaßen aussieht.

$$\frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad [3.10]$$

Mit diesen Annahmen gilt die Gleichung 3.6 auch für schwarzen Körper:

$$T_s = \frac{c_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{\sum_{350}^{1100} S_1(\lambda) \cdot L(\lambda, T_s)}{\sum_{350}^{1100} S_2(\lambda) \cdot L(\lambda, T_s)} + \ln A - 6 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad [3.11],$$

wobei T_s die Temperatur des schwarzen Körpers ist.

So kann bei der Umstellung von Gleichung 3.11 der Korrekturfaktor A berechnet werden.

$$A_{12} = \frac{\sum_{350}^{1100} S_2(\lambda) \cdot L(\lambda, T_s)}{\sum_{350}^{1100} S_1(\lambda) \cdot L(\lambda, T_s)} \cdot e^{\frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + 6 T_s \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)}{T_s}} \quad [3.12]$$

Mit den berechneten Korrekturfaktoren wird anschließend die reale Temperatur bestimmt.

$$T = \frac{c_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{R_{\lambda, 1}(T)}{R_{\lambda, 2}(T)} + \ln A_{12} - 6 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad [3.13]$$

Diese Methode wurde auf die Drei-Farben Kombinationen erweitert, in der es eine Kombination der Farben Blau-Rot, Grün-Rot und Blau-Grün gibt:

$$T = \frac{z \cdot c_2}{\left(\frac{\lambda_b \cdot \lambda_r}{\lambda_b - \lambda_r} \right) \cdot \left(\ln \frac{R_{\lambda,b}(T)}{R_{\lambda,r}(T)} + \ln A_{br} - 6 \ln \frac{\lambda_r}{\lambda_b} \right) + \left(\frac{\lambda_g \cdot \lambda_r}{\lambda_g - \lambda_r} \right) \cdot \left(\ln \frac{R_{\lambda,g}(T)}{R_{\lambda,r}(T)} + \ln A_{gr} - 6 \ln \frac{\lambda_r}{\lambda_g} \right) + \left(\frac{\lambda_b \cdot \lambda_g}{\lambda_b - \lambda_g} \right) \cdot \left(\ln \frac{R_{\lambda,b}(T)}{R_{\lambda,g}(T)} + \ln A_{bg} - 6 \ln \frac{\lambda_g}{\lambda_b} \right)}$$

[3.14]

Mit dieser Methode konnte eine bessere Genauigkeit erzielt werden.

Zu erwähnen ist, dass es sich um eine line-of-sight Methode handelt, bei der die Messwerterfassung entlang des optisch durchdrungenen Weges erfolgt.

Referenzmessung

Um die Richtigkeit der Methode zu prüfen, erfolgte eine Referenzmessung an einem Körper mit bekannter Temperatur. Im vorliegenden Fall wurde einer Wolframplatte verwendet.

Für die Messung wurden parallel zur Farbkamera, Aufnahmen mit einer IR- Kamera (Infrarotkamera) durchgeführt und mit Messwerten eines Thermoelementes am Messobjekt verglichen. So wurde die IR- Kamera kalibriert und der Emissionskoeffizienten für die IR- Aufnahmen ermittelt. Das Wolframplättchen wurden elektrisch temperiert und gleichzeitig Aufnahmen mit IR- und CMOS- Kamera gemacht. Für den Versuch wurden dabei Temperaturen von 1200 und 1600 K eingestellt. Die mit der Farbkamera erzeugten Aufnahmen wurden mit dem vorgestellten Verfahren ausgewertet und gegenübergestellt. Weiterhin wurden Temperaturprofile L1 und L2 ausgelesen und miteinander verglichen (s. Abbildung 3).

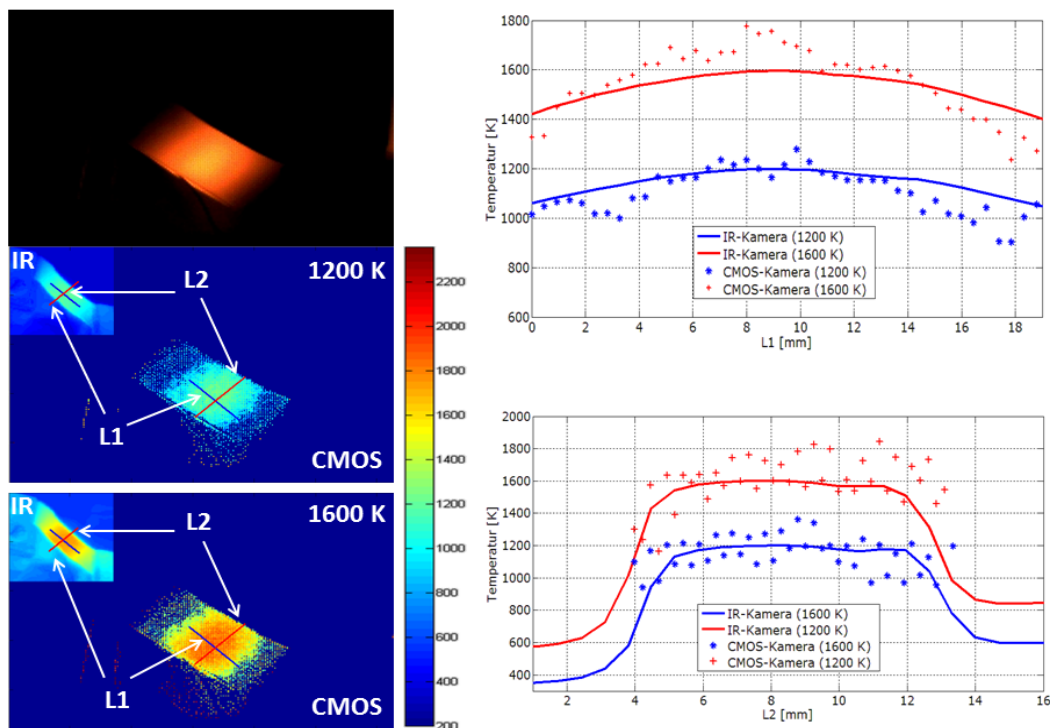


Abbildung 3: Gegenüberstellung der IR- Aufnahmen und ausgewerteten Aufnahmen von Farbkamera (links); Temperaturprofile L1 und L2 (rechts)

Wie aus den Abbildungen und Temperaturprofilen zu entnehmen ist, ist eine gute Übereinstimmung der ermittelten Temperaturwerte von RGB- Aufnahmen und IR-Aufnahmen zu erkennen.

Ergebnisse

Die Messungen wurden am schweröltaugliche Einzylinderforschungsmotor der Uni Rostock („Technische Thermodynamik“ und „Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren“) durchgeführt. Die Aufnahmetechnik Farb- Kamera von Typ Phantom v7.2 erlaubt eine Aufnahmefrequenz von 34 kHz bei der Auflösung 640x400, was einer 0,21 °KW Auflösung bei einer Motordrehzahl bei 1000 min⁻¹ entspricht. Zur motorsynchronen Triggerung der Kamera wurde eine Funktion im Steuergerät implementiert, dessen Triggersignal auf der Basis der Kurbelwinkelstellung vorgewählt wurde. Die Integration der Visualisierungstechnik zur Aufnahme der innenmotorischen Vorgänge in den Prüfstands Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt.

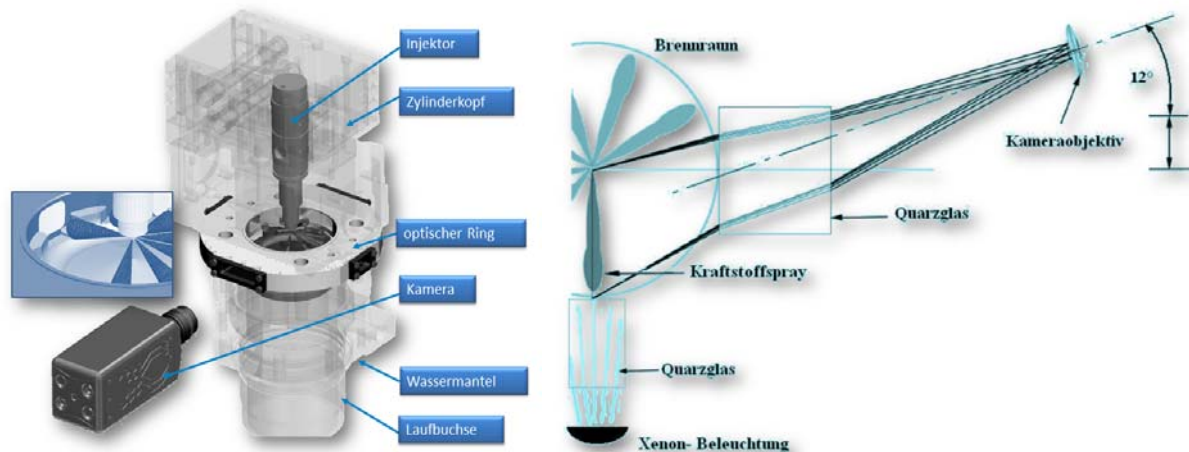


Abbildung 4: Messaufbau und Strahlengang zur Visualisierung des Einspritzvorganges und der Flammenausbreitung

Für die bessere Sicht in den Brennraum wurde eine spezielle asymmetrische Düse mit nur 7 Bohrungen gefertigt. Somit wurde ein kraftstofffreies Segment von 120° im Brennraum geschaffen. Die Hochgeschwindigkeitskamera wurde mit einem Winkel von 12° und dezentral zur Brennraummitte platziert, um eine gesamte Spraykeule durch das Quarzglas abbilden zu können. Die Beleuchtung wurde durch den kleineren seitlichen optischen Zugang realisiert, was einem Winkel von 90° zu der Beleuchtungsebene entsprach. In Abbildung 4 ist gezeigt, wie der Strahlengang im Brennraum und in der Zoomoptik verläuft.

So wurden mit dieser Kameraposition und dem kraftstofffreien Bereich im Brennraum die direkten Aufnahmen von einem Kraftstoffspray ermöglicht.

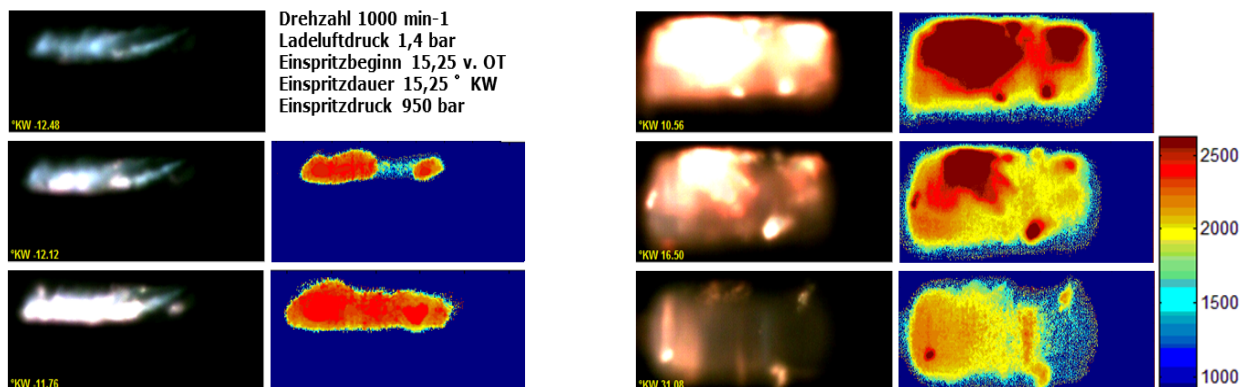


Abbildung 5: Aufnahmen der Verbrennung mit einer CMOS-Kamera (links) und daraus gewonnenen Flamen- Temperaturfeldern (rechts) (in 6 Zeitschritten)

Durch die vorgestellte spektrometrische Auswertemethodik zur Temperaturbestimmung konnten bei experimentellen Untersuchungen der Verbrennung am Einzylinderforschungsmotor nicht nur

die visuellen Informationen, wie z.B. Zündzeitpunkt und -Ort, Flammenausbreitung und Brenndauer, sondern auch Informationen über die Temperaturverteilung im Brennraum (Flammentemperatur) gewonnen werden.

Die folgenden Bilder stellen die Ergebnisse der digitalen Bildverarbeitung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beispielhaft vor (Abbildung 6).

Mit Hilfe der Auswertung konnten auch die kurbelwinkeldiskreten Temperaturverläufe als wichtiger Parameter zur Charakterisierung der Verbrennung berechnet werden.

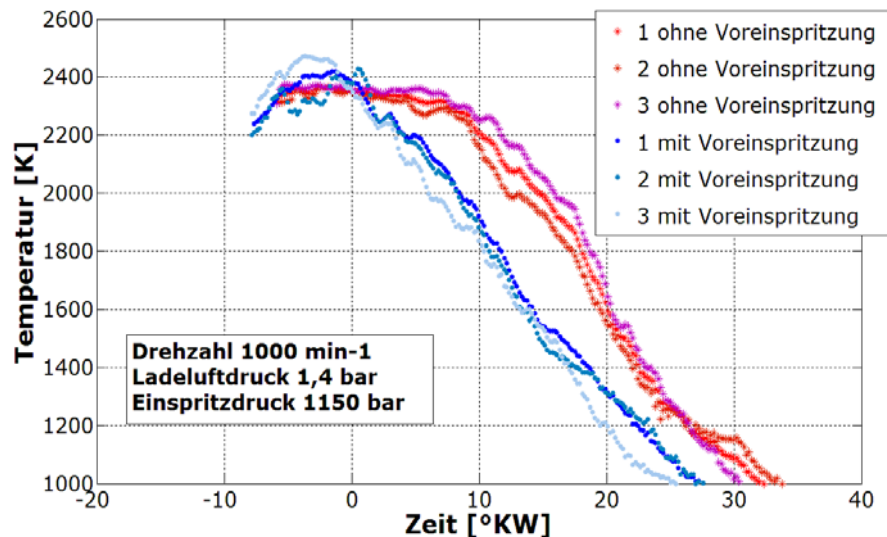


Abbildung 6: Flammentemperaturverläufen

In Abbildung sind die kurbelwinkelabhängigen Verläufe der Flammentemperatur mit Voreinspritzung im Vergleich zur konventionellen dieselmotorischen Verbrennung dargestellt.

Zusammenfassung

Durch den Einsatz der auf dem Zwei-Farben-Prinzip basierenden Bildverarbeitung, unter Verwendung von RGB-Aufnahmen, sind gleichzeitige die Erfassung der Sprayausbreitung, die Verfolgung der Verbrennung und die Messung der Flammentemperatur gelungen.

Hierdurch können genaue Erkenntnisse über die Verbrennungsvorgänge anhand einfach aufgebauter optischer Systeme gewonnen werden, um über die innenmotorischen Vorgänge nötige Detailinformation zu erhalten.

Literatur:

- [1] H.C. Hottel and F.P. Broughton, "Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames," *Industrial and Engineering Chemistry (Analytical Edition)*, Vol. 4, No. 2, 1932, pp 166-175
- [2] Y. Matsui, T. Kamimoto, and S. Matsuoka, "Study on the Application of the Two-color Method to the Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in Diesel Engines", *SAE*, 1980, paper 800970
- [3] „Thermal image analysis using calibrated video imaging“; Dissertation Dong Li (CCD_Kamera)
- [4] M. Planck, "Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum" der Deutsche Physikalischen Gesellschaft, 1900, p. 202-237
- [5] Patent US 3,971,065
- [6] Digital color cameras-1-Response models Poorvi L. Vora, Joyce
- [7] L.W. Macdonald and M.R. Luo, "Colour Imaging- Vision and Technology" *John Wiley & Sons Ltd*, England, 1999
- [8] „Thermal image analysis using calibrated video imaging“ Dissertation Dong Li (CCD_kamera)
- [9] L.W. Macdonald and M.R. Luo, "Colour Imaging – Vision and Technology" *John Wiley & Sons Ltd*, England, 1999
- [10] Optical Measurements of Soot Formation in Premixed Flames W. L. Flower