

DISSERTATION

Temperaturmessung im Verbrennungsraum eines Dieselmotors mittels RGB-Kamera

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von

o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Horst Ebel

E1372, Institut für Angewandte und Technische Physik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät Elektrotechnik

von

Dipl.-Ing. Dieter Schmidradler

Matrikelnummer 8826156

1150 Wien, Märzstraße 5/10

geboren am 22. August 1970 in St. Pölten

Wien, im Jänner 1999

*meiner Mutter
und meinen beiden Brüdern Harald und Peter*

Grüße an Papa

Vorwort

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als Forschungs- und späterer Universitätsassistent in enger Zusammenarbeit mit der Firma AVL-List GmbH am Institut für Flexible Automation entstanden.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Gerfried Zeichen, der nicht nur mich, sondern auch meine Arbeiten abseits der Kernthemen seines Institutes über Jahre unterstützt und gefördert hat.

Herrn o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Horst Ebel möchte ich für die ausgezeichnete fachliche Betreuung und die moralische Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit danken.

Die hier dargestellten Arbeiten konnten im vorliegenden Umfang nur durch die hervorragende materielle und fachliche Unterstützung der Firma AVL durchgeführt werden. Besonderen Dank möchte ich Herrn Ing. Herbert Wagner und Herrn Dipl.-Ing. Peter Werlberger für die immer freundschaftliche Zusammenarbeit aussprechen. Herrn Ing. Peter Jager danke ich für die Betreuung der Messungen am Motorenprüfstand an der Technischen Universität Graz.

Die enge Zusammenarbeit von AVL mit dem Institut für Flexible Automation wurde durch das besondere Engagement von Herrn Dipl.-Ing.Dr.techn. Herbert Hufnagl initiiert und während seiner Tätigkeit am Institut geleitet. Seine positive Einstellung und Begeisterungsfähigkeit haben eine solide Basis für das Gelingen des Projektes und die gute Zusammenarbeit im Team geschaffen.

Meinem Kollegen und Freund Dipl.-Ing. Walter van Dyck möchte ich für die fruchtbaren Diskussionen, die sehr konstruktive Zusammenarbeit und seine unnachahmliche Geduld während der gesamten Systementwicklung danken. Herr Johann Oberleitner hat durch sein hervorragendes Know-How im Bereich Software Engineering einen wichtigen Beitrag zur Realisierung des Meßsystems geleistet. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing.Dr.techn. Karl Fürst, der an der Entwicklung der Bediensoftware arbeitete. Meinen ehemaligen Diplomanden Dipl.-Ing. Johannes Hohl und Jürgen Pretschuh möchte ich für ihre Beiträge zum Gesamtsystem herzlich danken.

Als Leiter der Arbeitsgruppe Montageautomatisierung möchte ich mich bei meinen weiteren Kollegen Dipl.-Ing. Thomas Berndorfer, Dipl.-Ing. Alexander Brenner, Ing. Günter Bernhard Steininger, Dipl.-Ing. Zsolt Tamási, Oswald Wallner und Dipl.-Ing. Wolfgang Wenzl für die von Herzlichkeit geprägte Zusammenarbeit bedanken.

Besonders danken möchte ich meinem Freund Christoph Horner, mit dem ich seit Beginn meines Studiums durch Dick und Dünn gegangen bin, ihm verdanke ich viele wunderbare Erinnerungen an meine Studienzeit.

Mein abschließender Dank gilt meiner Freundin und Lebensgefährtin Carmen, Du bist die Sonne in meinem Leben.

KURZFASSUNG

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein optisches Meßsystem zur orts aufgelösten Temperaturmessung an hochdynamischen Verbrennungsprozessen in Dieselmotoren dargestellt.

Die wesentlichen Neuerungen des entwickelten Verfahrens liegen in der Verwendung einer handelsüblichen Farbkamera, einer prädiktiven Synchronisationstechnik, sowie einem neuartigen, ausschließlich modellbasierten Kalibrierverfahren. Mit dem vorgeschlagenen Meßsystem wurde erstmals eine orts aufgelöste Temperaturbestimmung an der volumetrisch strahlenden Dieselflamme realisiert.

Zur Erfassung der Basisdaten kommt eine sehr kostengünstige, industrietaugliche Digitalkamera zum Einsatz. Die Farbkamera arbeitet mit einem ungekühlten RGB-Sensor und liefert lediglich 24bit Bilddaten am Ausgang, sodaß zufolge der mit nur 255 Intensitätswerten beschränkten Auflösung eine einzelne Messung nur für ein enges Temperaturintervall möglich ist.

Im Vergleich zu bisherigen Aufnahmetechniken wurde durch getriggerten Kamerabetrieb mit der vorliegenden Lösung eine verbesserte stroboskopische Prozeßbeobachtung mit einer Aufnahme rate von mehreren Bildern je Sekunde erreicht, dies auch bei Motordrehzahlen von 10.000 Umdrehungen pro Minute und einer Winkelgenauigkeit von bis zu $0,1^\circ$ Kurbelwinkel. Mit einer minimalen Belichtungsdauer von $1/16.000\text{s}$ können bei ausreichenden Lichtverhältnissen auch Verbrennungsvorgänge mit einer sehr guten Zeitschärfe aufgezeichnet werden. Ein Vergleich mit anderen Bildsensoren zeigt, daß die Belichtungsdauer allein kein Maß dafür ist, ob Verbrennungsvorgänge unter Meßbedingungen beobachtet werden können. Der Auslesemechanismus heutiger Kameras ist typischerweise so konzipiert, daß ein Übersprechen von der lichtempfindlichen Zone in den Auslesekanal stattfindet, sodaß zur Beobachtung selbstleuchtender Vorgänge ein zusätzlicher mechanischer Shutter erforderlich ist, mit dem allerdings Verschußzeiten im Mikrosekundenbereich nicht realisierbar sind; diese Limitation gilt gleichermaßen für Video- und Infrarotkameras. Die vorgeschlagene Kamera ist mit ihrem Interline-Transfermechanismus eine von wenigen Kameras, die zur geschutterten Aufnahme eines Verbrennungsprozesses ohne mechanischen Verschuß geeignet ist.

Das verwirklichte Kalibrierverfahren stellt eine der maßgeblichsten Neuerungen für die optische Temperaturmessung dar. Zur Strahlungsthermometrie wurden, abhängig von der jeweiligen Meßaufgabe, zahlreiche Verfahren entwickelt. Zentrale Aufgabe der Kalibrierung der Sensordaten ist eine Zuordnung zwischen Strahlungsleistung und Meßdaten sowie die quantitativ richtige Beschreibung des örtlichen Emissionsvermögens; erst bei Kenntnis dieser Bestimmungsgrößen ist eine korrekte Temperaturbestimmung möglich. Die übliche Vorgangswiese besteht darin, die Korrektur der Eingangsdaten über die Messung an einem Referenzstrahler vorzunehmen. Im Gegensatz dazu wurde mit dem vorgeschlagenen Konzept vollständig auf eine Kalibrierung durch den Anwender verzichtet, die erforderlichen

Eingangsdaten können allein auf Basis der aufgenommenen Flammenbilder abgeleitet werden. Wie die Ergebnisse später zeigen werden, ergeben sich hier nicht zugunsten einer besseren Bedienbarkeit reduzierte Genauigkeitsansprüche. Ganz im Gegenteil entfallen alle Unschärfen, die sich aus einer Messung an einem Referenzstrahler ergeben; die Reproduzierbarkeit konnte im Vergleich zu Kalibriermessungen unter Verwendung eines Referenzstrahlers nicht nur erreicht, sondern sogar deutlich verbessert werden. Mit vermessener Kamera und Optik liegt die Wiederholgenauigkeit bei gleichbleibendem Motorbetrieb nach entsprechender Reduktion der Bilddaten und Mittelung der Aufnahmewiederholungen (diese Maßnahme ergibt sich aufgrund zyklischer Schwankungen des beobachteten Phänomens für Vergleiche zwingend) im Bereich von ca. $\pm 20\text{K}$. Bei wiederholten Kalibriermessungen (durchgeführt im Rahmen der prototypischen Implementierung) wird demgegenüber mit $\pm 50\text{K}$ die Reproduzierbarkeit wesentlich beeinträchtigt. Weitere Vorteile der realisierten Kalibrierung¹ liegen in einer wesentlichen Reduktion der Systemkosten, in einer gut überschaubaren Bedienung und in einer Minimierung der Arbeitsschritte am Prüfstand.

Im Vergleich zu IR-Meßtechnik muß bei Monochrom- und Farbkameras sichergestellt werden, daß für Temperaturmeßaufgaben das auf das Meßobjekt gerichtete Fremdlicht relativ zu der vom Körper emittierten Temperaturstrahlung vernachlässigt werden kann; diese Grundbedingung ist genau bei der Beobachtung von Diffusionsflammen im Motorinneren hervorragend erfüllt: es wird kein Fremdlicht in den Verbrennungsraum eingekoppelt, zudem ist die Oberfläche des Verbrennungsraumes im allgemeinen einer starken Berührung unterworfen, sodaß Reflexionen vernachlässigt werden können.

Für die Modellbildung standen bereits vor Beginn dieser Arbeit einige Ansätze zur Verfügung, Meßgerätetechnik zur kurbelwinkelbezogenen, allerdings nicht orts aufgelösten Temperaturerfassung wurde bereits vor mehreren Jahren entwickelt und verkauft. Das neue Meßsystem basiert auf der Auswertung digitaler Farbbilder, während bisher auf Basis von schmalbandigen optischen Filtern gemessen wurde. Durch die gleichzeitige Ortsauflösung und die mit drei Farbwerten vorliegende Überbestimmtheit in der Sensorik kann festgestellt werden, inwieweit bisherige Interpretationen und empirisch gefundene Zusammenhänge im Verbrennungsraum tatsächlich vorliegen bzw. neu zu überdenken sind. Durch die Synthetisierung von Eingangsdaten werden Meßtechnik und Auswertalgorithmus kritisch bewertet. Am Modell einer inhomogenen Flamme wird gezeigt, welchen quantitativen Einfluß inhomogene Temperatur- und Rußdichteverteilungen entlang des optischen Weges auf die Ergebnisgröße haben. Es wird dabei nachgewiesen, daß eine Rußschicht am optischen Zugang die Temperaturmessung wesentlich beeinträchtigen kann. Als Gegenmaßnahme wird ein Bildrestaurationsverfahren dargestellt, das ebenso wie die realisierte Kalibrierung, ausschließlich auf Basis der Flammenbilder parametrisiert werden kann.

Durch eine bildbezogene Bereitstellung diskreter Temperaturwerte und der Flammengröße in tabellarischer Form können unterschiedliche Messungen in Diagrammform dargestellt

¹ Als Kalibrierung wird das Feststellen eines reproduzierbaren Zusammenhanges zwischen Meßgröße und Ergebnisgröße bezeichnet.

werden. Der Informationsgehalt so abgeleiteter Verläufe liegt damit im Vergleich zu bisherigen Messungen immer noch wesentlich höher, da durch die Bereitstellung mehrerer Temperaturwerte Aussagen über die Abhängigkeit von auftretenden Temperaturdifferenzen und Diffusionsvorgängen möglich werden.

Es wird aufgrund von Untersuchungen am Modell und anhand durchgeführter Messungen gezeigt, daß auch bei verbesserter Sensorik unter Beibehaltung des Beobachtungsprinzips kaum eine Steigerung der Meßgenauigkeit erreichbar ist, da kalte Rußzonen zwischen Strahlungsquelle und Fenster einen nicht kompensierbaren Meßfehler verursachen können.

Von den zahlreichen Messungen unter Laborbedingungen und am Prüfstand, die über den Zeitraum von mehr als einem Jahr zur Verifikation und Verfeinerung der Meßdatenauswertung durchgeführt wurden, kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine ausführliche Darstellung gegeben werden. Anhand weniger Fallbeispiele werden typische Ergebnisse und Limitationen des Systems diskutiert.

Die gemessenen Ergebnistemperaturen im Brennraum liegen zwischen 1.600K und 2.600K. Die niedrigsten Temperaturen wurden dort gemessen, wo auf Basis bestehender Meßsysteme eine Temperaturmessung unmöglich ist. Bei einer Belichtungsdauer von 1/2.000s und maximaler Verstärkung konnten Flammenzonen bei 90° Kurbelwinkel aufgenommen und ausgewertet werden. Dabei wurden Kerntemperaturen der Flamme im Bereich von 1.600-2.000K und in transparenten Randzonen Temperaturen mit bis zu 2.400K festgestellt.

Eine Prüfung der gemessenen Höchsttemperaturen kann über stöchiometrische Berechnungen gemeinsam mit Betriebs- und Geometriedaten des zugrundeliegenden Prüfstandmotors durchgeführt werden. Derartige Untersuchungen sind geplant, eine theoretische Behandlung der dieselmotorischen Verbrennung sprengt allerdings den Rahmen der zugrundeliegenden Aufgabenstellung und wird hier nicht dargestellt.

ABSTRACT

This thesis discusses a vision system for local temperature measurement on highly dynamic combustion processes inside the diesel engine.

The most important innovations concern the use of a commercial camera device, a predictive synchronization technique, and a new, exclusively model-based calibration procedure. Finally the task of spatially resolved temperature measurement at the volumetric radiating diesel-flame was unsolved prior to this work.

The sensing element is a low-cost digital camera device for rugged applications. The colour camera has a RGB-sensor element which is operated at environmental temperature; pixel data is provided at a 24bit digital output, only 255 intensity values are responsible for a limited temperature range at a specific camera setup.

Compared to pre-existing image-acquisition techniques, the triggered operating mode for the camera device could improve the stroboscopic process observation significantly. Several images per second can be taken from the process, even at high engine-speeds (10,000RPM) and minimum crank angle related tolerances (0.1deg). With a minimum shutter speed as low as 1/16,000s, well illuminating combustion processes can be recorded in an adequate time-interval. A comparison with other image sensors shows, that electronic shutter capabilities are not sufficient to verify the usability of camera devices for the observation of combustion processes. Today's cameras typically have limitations concerning the sensors readout mechanism. Thereby a crosstalk from the sensing elements to the readout channel can not be avoided completely. As a consequence, an additional, mechanical shutter would be necessary which does not provide shutter-speeds at the required dynamic range of microseconds; this limitation concerns video-cameras as well as infrared devices. The proposed camera device has an interline-transfer sensor and is therefore one of only a few devices which may be used to observe combustion processes without an external shutter.

One of the major achievements of this work concerns a novel calibration technique for optical temperature measurement. Several calibration procedures have been introduced, each of them with its specific advantages for individual needs. The goal of any calibration step is to derive a well defined relation for emitted radiation intensity and measured value and to describe the radiator's emissivity quantitatively; only after having this input data available, temperature measurement can be done correctly. Usually, calibration is performed by using pre-calibrated reference light sources. Unlike this concept, the proposed calibration concept does not require any calibration procedure with a reference radiator from the user's point of view. All calibration values can be derived directly from the recorded combustion images. The achieved results will show, that the improved local control does not lead to reduced accuracy for evaluation; quite different, uncertainties concerning the calibration procedure at the reference radiator are dropped, the repeating accuracy could even be increased compared to repeated calibration steps at the testbed. For pre-calibrated camera and optics, the repeating accuracy at the same operating conditions for the testbed engine has been shown to be as low as $\pm 20\text{K}$ for

discrete, filtered result temperature (the measured temperature values must be reduced to avoid the influence of cyclic fluctuations). Compared to repeated calibration procedures at the testbed with a repeating accuracy not better than $\pm 50\text{K}$, the advantage of the new approach comes out clearly. Aside this fact, the overall system costs could be reduced significantly, the operational comfort could be improved and the operating steps at the testbed are reduced to a minimum.

Compared to infrared measurement techniques, environmental light sources must be avoided to use visual imaging sensors for temperature measurement. This operating condition is perfectly met for observing combustion processes: no external light source is guided into the combustion chamber and the soot at the chambers surface makes light reflections negligible.

For setting up the model, several concepts and studies were available; measurement systems for crank angle related – but not spatially resolved – temperature measurement have been developed several years ago. Compared to pre-existing techniques, the proposed measurement is based on digital colour images while up to now only narrow band filters were applied. Having spatially resolved image data and three colour values available from measurement, existing interpretations and empirical assumptions for the diesel combustion can be discussed critically. A synthesis of input data shows limitations for the applied measurement principle and the proposed algorithm. The model of an inhomogeneous flame shows adverse affects according to inhomogeneous temperature distributions and soot density along the optical penetration depth. It will turn out, that soot at the access window may dramatically affect the measured result temperatures. To reduce the effects of soot at the access window, an image-processing algorithm was developed, which is – like the calibration procedure – initialized by the recorded flame images.

Image related discrete result temperatures and flame size allow the derivation of diagrams to interpret and compare various measurements. The information content of these curves is still higher compared to existing measurement techniques, because the expressiveness of these values also covers temperature-gaps and diffusion processes.

It will be proved on the basis of model and measurements, that advanced image sensors will not lead to significantly better results while the functional principle remains the same; cold zones of absorbent soot may lead to errors that cannot be compensated.

Numerous measurements under laboratory conditions and at the testbed-engine have been made to evaluate flame and measurement and to refine the model. A detailed presentation would exceed the scope of this thesis. Instead, only a few case studies, typical results and limitations of the proposed measurement system will be discussed.

Typical result temperatures at a testbed-engine covered the range 1,600K up to 2,600K. The lowest result temperatures were measured at conditions, where previous measurement systems failed to operate. At 1/2,000s shutter speed and maximum camera gain, flames were detected at 90 degree crank angle. Thereby, the flames core temperatures covered 1,600K to 2,000K while temperatures at 2,400K were detected for transparent fringes.

The highest result temperatures may be verified by applying stoichiometric calculations based on operating and geometry parameters for the testbed engine. These studies are planned, a

thermodynamic approach to the diesel combustion would exceed the given task of visual based temperature measurement and will not be discussed within this thesis.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	ii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	viii
Formelzeichen	xii
1. Einleitung	1-1
1.1 Problemstellung	1-4
1.2 Ziele	1-5
1.3 Rahmenbedingungen	1-6
2. Grundlagen	2-1
2.1 Temperatur	2-1
2.2 Strahlungsphysikalische Größen	2-3
2.3 Spektrale Eigenschaften von Temperaturstrahlern	2-4
2.4 Aufgabenrelevante Grundlagen zur optischen Temperaturmessung	2-5
2.5 Quantitative Analyse am Modell des Schwarzen Strahlers	2-6
2.6 Gasstrahlung	2-10
2.6.1 Absorptionskoeffizient und optische Dicke von Gasen	2-10
2.6.2 Emissionsverhalten von Gasen	2-11
2.7 Modell der rußenden Dieselflamme	2-14
3. Temperaturmessung und Bildaufnahmetechnik	3-1
in der Motorenforschung	
3.1 Kontaktthermometrie	3-1
3.2 Strahlungsthermometrie	3-2
3.2.1 Modell der Dieselflamme und Kalibrierung	3-2
3.2.2 Ortsaufgelöste Temperaturmessung	3-2
3.2.3 Infrarot-Thermographie	3-3
3.3 Aufnahmetechnik	3-4
3.4 Neuheit des vorgeschlagenen Meßsystems	3-5
3.4.1 Systemtechnik	3-5
3.4.2 Prozeßsynchronisation	3-5
3.4.3 Meßtechnik	3-5
3.4.4 Modellbildung	3-6

4. Systemtechnik	4-1
4.1 Gesamtsystem	4-2
4.2 Optischer Zugang	4-4
4.2.1 Adaptierung des Zylinderkopfes	4-4
4.2.2 Endoskop und Objektiv	4-4
4.2.3 Kantenfilter	4-5
4.3 Farb-Digitalkamera Pulnix TMC-9700	4-7
4.3.1 Bildsensor	4-8
4.3.2 Integrierte A/D-Wandlung	4-10
4.3.3 Triggerbarkeit	4-11
4.3.4 Weitere Kamerafunktionen	4-11
4.4 Bildübertragung und Echtzeithardware	4-12
4.4.1 Digitale Bildübertragung in Video-Echtzeit	4-12
4.4.2 Echtzeithardware und Triggertechnik	4-13
4.5 Softwarekonzept und Datenstrukturen	4-14
4.5.1 User-Interface	4-14
4.5.2 Datenstrukturen	4-17
5. Modellbildung	5-1
5.1 Grundkonzept von Messung und Auswertung	5-1
5.2 Gegenüberstellung von Meßgröße und Modell	5-3
5.3 Auswertung auf Basis eines relativen Farbwertes	5-5
5.4 Auswertung auf Basis eines Relativ- und eines Absolutwertes	5-5
5.5 Modellbildung für die Kalibrierung des Meßsystems	5-7
5.5.1 Erstmalige Kalibrierung der Meßkette	5-7
5.5.2 Kalibrierung von Bildern der dieselmotorischen Flamme	5-8
6. Kalibrierung der Meßkette und Meßdatenauswertung	6-1
6.1 Reale Eigenschaften von Optik und Sensor	6-1
6.2 Berechnung linearer Basisbilder	6-5
6.3 Kalibrierung der Meßkette	6-6
6.3.1 Wolframbandlampe	6-7
6.3.2 Durchführung der Kalibriermessung	6-8
6.4 Übergabe der Kalibrierdaten	6-9
6.5 Auswertung	6-9
7. Berücksichtigung kalter Rußschichten	7-1

7.1 Maßnahmen an der Aufnahmetechnik	7-2
7.2 Bildrestauration	7-2
7.3 Fallbeispiele	7-4
8. Serientaugliche Implementierung	8-1
8.1 Strukturelle Verbesserungen	8-1
8.2 Beschleunigung der Meßdatenauswertung	8-4
8.2.1 Optimierung des Auswerteverfahrens	8-4
8.2.2 Optimierung des Median-Filters	8-4
8.3 Visualisierung von Auswertergebnissen	8-8
8.4 Datenreduktion und numerische Darstellung der Meßergebnisse	8-9
9. Fehlerbetrachtungen	9-1
9.1 Der Übergang vom realen System zur formalen Beschreibung	9-1
9.2 Unschärfen im Modell der Systemkomponenten	9-4
9.2.1 Falsche spektrale Transmissivität für Kamera und Optik	9-4
9.2.2 Chromatische Aberation und Single-Chip-Bildsensor	9-7
9.2.3 Nichtlineares Integrationsverhalten der Kamera	9-7
9.2.4 Rauschen und Quantisierung	9-7
9.3 Frequenzabhängigkeit des Emissionsvermögens	9-8
9.4 Kritische Bewertung des Verfahrens anhand eines Mehrschichtmodells	9-9
9.4.1 Grundlegende Vorgangsweise	9-11
9.4.2 Modellierung von Basisbildern zur Verifikation des Auswerteverfahrens	9-12
9.4.3 Auswirkung eines Hintergrundstrahlers	9-13
9.4.4 Zweizonenmodell für die Flamme	9-14
9.4.5 Rußkonzentration zwischen Flamme und Brennraumfenster	9-15
9.4.6 Bewertung einer Rußablagerung am Brennraumfenster	9-15
9.4 Formulierung der berechneten „mittleren Temperatur“	9-16
9.5 Schlußfolgerungen	9-17
10. Messungen	10-1
10.1 Meßaufbau	10-2
10.2 Kalibrierung des Bildmaterials	10-3
10.3 Kameraeinstellung und Optik	10-5
10.4 Vergleichsmessungen bei gleichbleibender Optik	10-8
10.5 Messungen bei unterschiedlicher Blickrichtung	10-13

10.6 Schlußfolgerungen	10-16
11. Kombination mit weiteren Verfahren	11-1
11.1 Synchronisierte Wiedergabe	11-1
11.2 Berechnung repräsentativer Bilder	11-1
11.3 Überlagerung von Bildsequenzen	11-2
Ergebnisse und Perspektiven	I
Literaturverzeichnis	IV
Bildquellennachweis	VIII
Anhang A: Kalibrierdaten von Kamera und Optik	A-1
Anhang B: Motorenprüfstand	B-1
Anhang C: Synthetisierte Bilder	C-1
Anhang D: Erfaßtes und ausgewertetes Bildmaterial	D-1
Curriculum Vitae	

Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
A	Fläche	m^2
c_0	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, $2,99792458 \cdot 10^8$	m/s
c_1	$=2 \cdot h \cdot c_0^2 = 1,1910439 \cdot 10^{-16}$	$\text{W} \cdot \text{m}^2$
c_2	$=h \cdot c_0 / k_B = 1,438768660 \cdot 10^{-2}$	$\text{m} \cdot \text{K}$
E	Bestrahlungsstärke	W/m^2
E_n	normierte Bestrahlungsstärke	1E
h	Planck-Konstante, $6,6260755 \cdot 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$
k	Rußkonzentration (empirisch)	1E
k_B	Boltzmann-Konstante, $1,380658 \cdot 10^{-23}$	J/K
k_G	spektraler Absorptionskoeffizient	$1/\text{m}$
k_{ks}	Scharparameter (empirisch)	m
k_{opt}	optischer Korrekturfaktor	m^2/W
L	Strahldichte	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
L_λ	spektrale Strahldichte	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{sr})$
n	optischer Dämpfungskoeffizient (empirisch)	1E
p	Druck	Pa
p_G	Partialdruck des absorbierenden Mediums	Pa
s	Schichtdicke	m
T	Thermodynamische Temperatur	K
t	Zeit	s
t_{bel}	Belichtungsdauer	s

Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
α	Absorptionsgrad	1E
ε	Emissionsvermögen	1E
κ	optische Dicke	1E
λ	Wellenlänge	m
φ	Kurbelwinkel	rad
ρ	Reflexionsgrad	1E
τ	Transmissionsgrad	1E
Φ	Strahlungsfluß	W

Indizes

Zeichen	Bedeutung
<i>0</i>	Start
<i>B</i>	Blau
<i>basis</i>	Basis
<i>bel</i>	Belichtung
<i>dunkel</i>	Schwarzpegel
<i>flamme</i>	dieselmotorische Flamme
<i>G</i>	Gas, Grün
<i>cal</i>	Kalibrierung
<i>kolben</i>	Lampenkolben
<i>lin</i>	linear
<i>lokal</i>	lokale Umgebung
<i>max</i>	Maximum
<i>mess</i>	gemessen
<i>min</i>	Minimum
<i>n</i>	normiert, Normalrichtung
<i>opt</i>	optisch
<i>prozeß</i>	zyklisches Phänomen
<i>R</i>	Rot
<i>ref</i>	Referenz
<i>repetition</i>	Repetition (Aufnahmewiederholung)

<i>S</i>	Schwarzer Strahler
<i>sat</i>	gesättigt
<i>schwankung</i>	Schwankungsbreite
<i>th</i>	theoretisch
<i>trig</i>	Trigger
<i>tv</i>	Temperatur (Thermovision)
<i>value</i>	Aufnahmewert (Winkel bzw. Zeitverzögerung)
<i>wolfram</i>	Messung am Kalibrierstrahler (Wolframbandlampe)
λ	spektral

1. Einleitung

Ein herausragendes Element unserer modernen Gesellschaft ist das zunehmende Bedürfnis nach Mobilität. Mit stetigem Anwachsen des Individualverkehrs steigt bei wachsender Umweltverschmutzung auch die Notwendigkeit, weltweit regulative Maßnahmen für Schadstoffemission und Ressourcenverbrauch im Bereich der automobilen Fortbewegung zu ergreifen. Diese Restriktionen müssen sich naturgemäß am jeweiligen Stand der Technik orientieren. Mit der vorliegenden Arbeit wird eine neuartige System- und Meßtechnik dargestellt, die einen raschen, unmittelbaren Einblick in innermotorische Vorgänge ermöglicht und so die Weiterentwicklung in der Motorentechnik unterstützt.

Die Optimierung von Verbrennungskraftmaschinen in Richtung geringerer Umweltbelastung, verbesserter Laufeigenschaften und zur Minimierung des Verbrauchs setzt bei gleichzeitig verkürzten Innovationszyklen zunehmendes Detailwissen über die im Motor ablaufenden Ausgleichsvorgänge, über chemische Reaktionen und geometrische Verhältnisse bei der Flammenbildung voraus; neue elektronische Motormanagementsysteme erlauben eine problemlose Anpassung der Betriebscharakteristik eines Motors an unterschiedliche Bedürfnisse. Anhand rein theoretischer Untersuchungen ist es nach heutigem Wissensstand nicht möglich, die innermotorischen Vorgänge einer Verbrennungskraftmaschine in detaillierter Form vorherzusagen. Die Entwicklung neuer Motoren und neuer Motorkonzepte setzt vielmehr den Einsatz sowohl von formalen als auch meßtechnischen Methoden voraus, um schließlich ein günstiges Betriebsverhalten zu erreichen.

Bis vor wenigen Jahren standen für die Darstellung innermotorischer Vorgänge fast ausschließlich Meßmethoden zur Verfügung, die über eindimensionale, globale Aussagen eine Prozeßbeschreibung ermöglichten; Gemischbildung, Flammenbildung, –ausbreitung etc. konnten lediglich über vereinfachte Modelle beschrieben werden. Erst in letzter Zeit werden zunehmend auch bildgebende Meßverfahren in der Motorenforschung eingesetzt, sodaß zahlreiche Mängel in der Auslegung von Motoren neuerdings unmittelbar beobachtet werden können und daß Simulationsverfahren über den direkten Vergleich mit bildhaften Meßdaten verifiziert bzw. verfeinert werden können.

Mit der Beobachtbarkeit innermotorischer Vorgänge stehen dem Entwickler neben den üblichen Indizierdaten nun auch umfangreiche Bildfolgen für verschiedene Betriebszustände von Prüfstandsmotoren zur Verfügung, die im Gegensatz von Indiziermessung zunächst einen rein qualifizierenden Charakter haben. Erst durch den Anwender selbst – oder durch den Einsatz digitaler Bildverarbeitungsmethoden – können quantitative Aussagen aus dem Bildmaterial abgeleitet werden.

Im Rahmen zweier mit AVL-List definierter Diplomarbeiten [Drnek, Schmid] wurde am Institut für Flexible Automation eine Vorleistung für die Entwicklung eines neuartigen, digitalen Videosystems für die Motorenforschung erbracht. Nach positiver Bewertung durch den Kooperationspartner wurde ein vom FFF unterstütztes Projekt zur serienreifen

Entwicklung des digitalen Videosystems, später als „Engine VideoScope“ bezeichnet, initiiert.

Die geforderte Funktionalität des Videosystems orientierte sich zunächst am Funktionsumfang eines in Analogtechnik aufgebauten Geräts namens Video Engine [AVL-VE], dessen kommerzieller Erfolg aufgrund hoher Fertigungstiefe, des bereits heranbrechenden „digitalen Zeitalters“, und einigen, aufgrund der analogen Bauweise prinzipiellen, Schwachstellen in der Bedienbarkeit eher dürftig war. Um das neu zu entwickelnde System über einen längeren Zeitraum erfolgreich vermarkten zu können, mußten neben der Erfüllung technischer Rahmenbedingungen also weitere äußere Einflußgrößen berücksichtigt werden. Das zu entwickelnde Gerät sollte vom Fortschreiten der Technik (Hardware, Kameratechnik und Betriebssysteme) nicht „ausgebremst“ werden, sondern mit ihm wachsen. Die Gesamtkonzeption sollte, wo immer möglich, auf preiswerten Standardkomponenten beruhen. Unter den genannten Voraussetzungen wurde als Hardwareplattform ein PC-basiertes System, als Betriebssystem Windows NT™ gewählt. Seit Entwicklungsbeginn haben sich Rechenleistung und Speicherkapazität von High-End-PCs vervielfacht, es mußte an keiner Schraube am Systemkonzept gedreht werden, um diese neuen Ressourcen und Leistungsreserven voll nutzen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Konzept und Realisierung des Engine VideoScope nur soweit diskutiert werden, als es für das Verständnis der übrigen Kapitel erforderlich ist.

Der eigentliche Kern der Ausführungen behandelt Konzeption, Implementierung und kritische Bewertung eines konkreten Teilproblems der Entwicklung, nämlich der Temperaturmessung an der dieselmotorischen Flamme. Dieses in der Branche vieldiskutierte Thema stellt bis heute ein nur unzureichend gelöstes Problem dar. Während bestehende Realisierungen zumeist auf einer Mittelung örtlicher und zeitlicher Meßdaten beruhen, die über schmalbandige optische Filter erfaßt werden, soll im Engine VideoScope für jeden Bildpunkt eines erfaßten Flammenbildes eine zugehörige lokale Temperatur berechnet werden. Dies ist umso schwieriger, als Farbkameras per se nicht für eine Spektralanalyse konzipiert sind, da sie auf breitbandigen Farbfiltern beruhen.

Es wird sich zeigen, daß eine praxistaugliche Realisierung weitaus mehr als die Kenntnis physikalischer Zusammenhänge erfordert. Die Ergebnisse einer in Kooperation mit AVL ausgeführten Dissertation [Neusch] zeigen vorbildlich, wie vorhandene Möglichkeiten und Limitationen von Bedienpersonal, Systemtechnik und Modell gänzlich außer acht gelassen werden, um zu einer raschen, letztendlich aber unbrauchbaren Lösung zu gelangen.

In diesem Kapitel werden noch Problemstellung, Ziele und Rahmenbedingungen für die vorliegende Arbeit formuliert.

Ein anschließendes Kapitel behandelt aufgabenrelevante physikalische Grundlagen und zeigt am Modell des Schwarzen Strahlers wichtige Wechselbeziehungen zwischen Meßgröße und Ergebnisgröße unter Vorwegnahme des Sensorverhaltens quantitativ auf.

Zur berührungslosen Temperaturmessung hat sich in den letzten Jahren vor allem die Infrarotmeßtechnik etabliert. Für die Temperaturmessung im Brennraum wurden

verschiedene, vom vorliegenden Systemkonzept abweichende Lösungsansätze entwickelt. Im Rahmen eines eigenen Kapitels wird dieser Stand der Technik erörtert.

Es wird sich zeigen, daß die Systemtechnik neben der Meßdatenauswertung ein zentrales Problem für die vorliegende Aufgabenstellung darstellt. Gesamtkonzept, Aufnahmetechnik und Komponenten der Meßkette werden in einem eigenen Kapitel dargestellt.

Auf Basis der in den vorhergehenden Kapitel festgehaltenen Erkenntnisse wird die Modellbildung beschrieben. Nach einer kurzen Darstellung prinzipieller Lösungsmöglichkeiten für Temperaturstrahler unter definierten Einschränkungen werden zwei Verfahren ausführlich behandelt. Das erste Verfahren, die Zweifarb-Relativmethode wird zur Kalibrierung des Meßsystems an einem Referenzstrahler benötigt. Für die Berechnung der Temperaturverteilung an der Dieselflamme kommt eine kombinierte Absolut-/Relativmessung zum Einsatz, die eine Berechnung einer zunächst unbekanntem Bestimmungsgröße für die Ergebnistemperatur ermöglicht.

Nach der Beschreibung der Modellbildung, für die einige vereinfachende Annahmen getroffen wurden, behandeln zwei weitere Kapitel reale Eigenschaften des Meßsystems; zunächst wird Sensorverhalten ausführlich dargestellt, ein anschließendes Kapitel behandelt das Problem von Rußablagerungen am optischen Zugang.

Mit einer gut reproduzierbaren Zuordnung von Meßwert und Ergebnistemperatur ist die Aufgabe nur teilweise gelöst. Nach prototypischer Implementierung mußten die Zeiteffizienz der Berechnung gesteigert und die Bedienschritte bei gleichzeitigem Wachsen des Funktionsumfangs vereinfacht werden. Ein Kapitel ist der serientauglichen Implementierung des Meß- und Auswerteverfahrens gewidmet.

Ein zentrales Problem der Temperaturmessung liegt in der Tatsache, daß aufgrund der vorgeschlagenen Meßtechnik ein lokal homogenes Verhalten zugrundegelegt werden muß. Allein aus der Darstellung von Systemtechnik und Modellbildung kann keineswegs darauf geschlossen werden, daß damit eine sinnvolle Temperaturzuordnung überhaupt möglich ist. Da für eine quantitative Abschätzung der resultierenden Meßfehler keine Basisdaten zur Verfügung standen, wurden am Modell einer inhomogenen Temperatur- und Rußdichteverteilung unter der Annahme verschiedener Parameter Eingangsdaten synthetisiert und die Erkenntnisse zusammengestellt. Diese und weitere Fehlerbetrachtungen sind in einem eigenen Kapitel zusammengefaßt.

Ein weiteres Kapitel behandelt die Darstellung und Interpretation ausgewählter Messungen, wobei aus drucktechnischen Gründen weitestgehend die Darstellung von reduzierten Ergebnisgrößen in Form von Diagrammen gewählt wurde.

Die Aufgabe der bildbasierten Flammentemperaturmessung ist nur ein Bruchteil der Funktionalität des Gesamtsystems. Ein Kapitel behandelt weitere Grundfunktionen des Systems, die sich für die Darstellung und Auswertung von Temperaturbildern eignen.

Die Ausführungen werden zeigen, daß eine eindeutige Zuordnung zwischen Meß- und Ergebnisgröße auf komplexes Bild- und Datenmaterial führt, das in der Auswertung zwar auf gut reproduzierbare Ergebnisse führt, eine beweisbar richtige Messung aber keineswegs

vorliegt. Eine wesentliche Teilaufgabe der Temperaturmessung liegt auf Seite des Anwenders, der erst aufgrund einiger Erfahrung und in Kenntnis des Auswerteverfahrens sinnvolle Schlüsse aus dem erfaßten und ausgewerteten Bildmaterial ziehen kann. Die Arbeit schließt mit den erzielten Ergebnissen und behandelt Perspektiven für das entwickelte Meßsystem.

1.1 Problemstellung

Die prinzipielle Möglichkeit, Verbrennungstemperaturen von Dieselflammern mit optischen Methoden feststellen zu können, beruht auf der Tatsache, daß die Dieselflamme ein qualitativ bekanntes, kontinuierliches Strahlungsverhalten aufweist. Ein bisher bis zur Marktreife entwickeltes Verfahren [Gstrein, AVL-FT] basiert auf der spektralen Analyse und einer Meßwertmittelung nach Flammendicke, Ort und Verbrennungszyklen - vereinfacht gesagt: einem Winkelwert wird nach erfolgter Aufnahme einer Meßreihe und anschließender Auswertung nur ein einziger Temperaturwert zugeordnet.

Die bisher erfolgreich angewendete Vorgangsweise ist speziell in Hinblick auf die letztgenannten Punkte für eine Temperaturberechnung im Engine VideoScope nicht direkt anwendbar. Die Bilderfassung wird mit einer RGB-Kamera durchgeführt. Farbkameras, wie die im vorgeschlagenen System eingesetzte, messen die Farbanteile Rot, Grün und Blau mit drei primären Farbfiltern, die eine bekannte, allerdings sehr breitbandige Selektivität aufweisen. Außerdem liegen die Meßwerte für die drei Farbwerte in einer Auflösung von nur 8bit (je 256 Stufen) vor, denen je nach Aufnahmebedingungen noch quantitativ nicht vernachlässigbares Rauschen überlagert ist. Schließlich besteht die Anforderung, einem Aufnahmebild der Verbrennung eindeutig ein Temperaturbild zuzuordnen. Dies ist umso kritischer, als nun auch nicht mehr das Modell einer Flamme konstanter Schichtdicke vorausgesetzt werden kann, und aus einem ebenen Abbild einer Flamme auch keine zuverlässige Aussage über lokale Flammendicke und Rußkonzentration möglich ist.

Es wird sich zeigen, daß die Aufgabe, Temperaturbilder aus aufgenommenem Bildmaterial zu berechnen, nur durch die Einbeziehung von Kamera und Optik als bildbestimmende Elemente brauchbar gelöst werden kann, dies in jedem einzelnen Teilbereich der Problemlösung, von der Modellbildung bis hin zur fertigen Implementierung.

1.2 Ziele

Der Inhalt der Arbeit wird zeigen, daß aufgrund meßtechnischer Rahmenbedingungen nicht davon ausgegangen werden kann, auf Basis eines ebenen Abbilds der Flamme eine vollständige bzw. überhaupt sinnvolle Beschreibung der örtlichen Flammentemperatur ableiten zu können. Umso wichtiger ist es, vor Beginn der Modellbildung zunächst alle fraglichen Voraussetzungen zu betrachten und Meilensteine für eine Realisierung zu definieren.

- **Meilenstein 1:** die vorhandene Meßtechnik erfüllt zumindest dieselben Genauigkeitsansprüche wie bestehende, bewährte Systeme
- **Meilenstein 2:** die Temperaturbestimmung funktioniert für einen Strahler mit bekannten Eigenschaften
- **Meilenstein 3:** das auf bisherigen Erkenntnissen basierende Modell erlaubt eine „hinreichend“ widerspruchsfreie Berechnung von Flammentemperaturen
- **Meilenstein 4:** die Meßdatenauswertung wird durch die Berührung des optischen Zugangs nicht maßgeblich beeinträchtigt
- **Meilenstein 5:** die Messungen sind reproduzierbar
- **Meilenstein 6:** serientaugliche Einbindung des Meß- und Auswerteverfahrens in die bestehende Anwendungsumgebung

In chronologischer Reihenfolge wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt, die selbstredend nicht dem strukturellen Aufbau dieser Arbeit entsprechen, sie sind zudem nur teilweise Inhalt dieser Arbeit.

- Analyse von bestehenden Meßverfahren und Arbeiten zum Thema
- Quantitativer Vergleich der Eigenschaften bisheriger Meßsysteme mit den Eigenschaften der verwendeten Sensorik
- Stark-Schwachstellen Analyse bestehender Lösungsansätze
- Prüfung der meßtechnischen Rahmenbedingungen
- Detaillierte Prüfung der Kameraeigenschaften
- Modellbildung und prototypische Implementierung
- Kalibrierung der Kamera
- Verifikation der Modellbildung unter Verwendung eines Temperaturstrahlers mit bekannten Strahlungseigenschaften
- Verifikation des Modells der rußenden Flamme durch Messung an einer Kerze
- Messungen am Prüfstand
- Diskussion der Ergebnisse mit Experten
- Serientaugliche Implementierung

1.3 Rahmenbedingungen

Für die Entwicklung und zur Verifikation der Temperaturmessung stand bereits in der Konzeptphase das komplette, serienreife Meßsystem zur Verfügung. Die für die Modellbildung relevanten Rahmenbedingungen können damit von Beginn an sehr klar formuliert werden:

- Einem Bildpunkt des Flammenbildes wird genau eine Temperatur zugeordnet. Die mit dem Sensor gemessene Gesamtstrahlung setzt sich allerdings aus Komponenten unterschiedlicher Schichten⁺ mit im allgemeinen nicht gleichbleibender Temperatur zusammen. Eine Berücksichtigung dieser Tatsache ist aufgrund des angewandten Meßprinzips unmöglich, es ist also zu prüfen, ob die Temperaturmessung prinzipiell überhaupt sinnvolle Ergebnisse liefern kann und wie das Meßergebnis zu interpretieren ist.
- Die eingesetzte digitale RGB-Farbkamera weist quantitativ bekannte, allerdings sehr breitbandige primäre Farbfilter auf. Dementsprechend ist eine Berechnung der Flammentemperatur auf Basis einer diskreten Frequenz völlig unzureichend. Vielmehr müssen die gemessenen Farbwerte im gesamten Empfindlichkeitsbereich spektral bewertet werden.
- Aufgrund der Meßmethode ist vor einer Auswertung keine Aussage über örtliche Rußdichte und Flammendicke der auszuwertenden Flamme möglich. Für eine lokale Temperaturbestimmung ist andererseits die globale Zuordnung "mittlerer" Werte absolut unsinnig. Wenn das Problem der lokalen Temperaturbestimmung sauber gelöst werden soll, dann muß das zu definierende Auswerteverfahren selbst den jeweils richtigen Wert für das lokale Emissionsvermögen finden.
- Das Quarzfenster des optischen Zugangs verrußt bei Versuchsaufbauten binnen weniger Sekunden nach Beginn der Messungen soweit, daß die Strahlungsintensitäten der Flamme beeinträchtigt werden. Die zu findende Lösung muß dementsprechend robust gegenüber Verrußung des optischen Zugangs sein.
- Der optische Zugang, bestehend aus Objektiv, Endoskop und Quarzfenster, weist im nahen IR- und UV-Bereich eine maßgebliche Frequenzabhängigkeit auf. Für die Bewertung der gemessenen Farbwerte ist eine Berücksichtigung dieser Filtereigenschaften unumgänglich.
- Für die Berechnung von Temperaturbildern muß eine praxistaugliche Kalibrierung definiert werden, über deren Ergebnisdaten eine Berechnung von Flammentemperaturbildern eindeutig durchführbar ist. Auf weitere die Berechnung betreffende Eingabemöglichkeiten durch den Nutzer sollte im Sinne einer glaubwürdigen Messung zur Gänze verzichtet werden.

⁺ Im Rahmen dieser Arbeit verwenden wir den Begriff Schicht, um damit einen Raumbereich zu beschreiben, für den homogenes Verhalten angenommen wird

2. Grundlagen

Wir befassen uns in diesem Kapitel zunächst mit dem Temperaturbegriff und zeigen dabei, welche Aspekte bei einer kamerabasierten Temperaturmessung an einem Volumenstrahler, im besonderen an einer Flamme, zu beachten sind.

Daran anschließend wird begründet, warum mit der vorliegenden Meßtechnik eine Modellbildung auf Basis richtungsunabhängiger strahlungsphysikalischer Größen zulässig ist.

Danach werden ausgehend vom Modell des Schwarzen Strahlers aufgabenrelevante Grundlagen über spektrale Eigenschaften von Temperaturstrahlern und der zugrundeliegenden Meßtechnik gegeben.

Schließlich werden wir das Phänomen Gasstrahlung unter dem Aspekt von Absorption, Emission und optischer Meßtechnik zunächst allgemein und abschließend für den Fall der dieselmotorischen Flamme erläutern.

2.1 Temperatur

Bereits im Jahr 1704 stellte G. Amontons fest, daß der Druck eines Gases, dessen Volumen konstant gehalten wird, von der Temperatur abhängt. Er schlug vor, die Temperatur proportional dem Druck des Gases anzusetzen („Gasthermometer“) und führte damit die Temperaturmessung auf eine Druckmessung zurück.

Im Rahmen der kinetischen Gastheorie wurden thermodynamische Eigenschaften von Gasen aus der Bewegung der Gasmoleküle unter Anwendung der Gesetze der Mechanik abgeleitet [Ebel]; Temperatur ist also bei makroskopischer Betrachtung eine statistische Größe zur Beschreibung der inneren Energie von Materie im Rahmen eines Kontinuummodells.

Grundsätzlich kann jede physikalische Größe, die sich mit der Temperatur ändert, zur Temperaturmessung herangezogen werden. Für die verschiedensten Meßaufgaben, Meßobjekte und Temperaturbereiche wurden unterschiedliche Meßverfahren entwickelt.

Für die Bestimmung der Oberflächentemperatur an festen oder flüssigen Körpern hat sich aufgrund der rasanten Entwicklung der letzten Jahre besonders die Infrarot-Spektroskopie zunehmend durchgesetzt. Der besondere Vorteil dieser Meßmethode liegt in der einfachen Handhabung, in der Tatsache, daß das Meßobjekt durch die Messung nicht beeinflusst wird und schließlich auch darin, daß das Meßprinzip selbst trägheitslos ist.

Erheblich problematischer ist die Aufgabe, auf optischer Basis Temperaturverteilungen in gasförmigen Medien zu bestimmen. Hierbei ist nämlich zu beachten, daß die von einem Sensor detektierte Strahlung keinem festen Ort zugeordnet werden kann. Vielmehr ist die gemessene Strahlung vereinfacht gesagt als „Summenstrahlung“ des betrachteten Mediums zu verstehen.

Betrachtet man als Beispiel für einen derartigen Volumenstrahler eine rußende Kerzenflamme, so läßt zumindest der Rand einer leuchtenden Flamme den Bildhintergrund durchschimmern, der subjektive Gesamteindruck bei der Betrachtung einer Flamme kann nicht ausschließlich auf die Strahlungseigenschaften der „Flammenoberfläche“ zurückzuführen sein; allgemein liefern auch das „Innere“ der Flamme und der beleuchtete Bildhintergrund einen Beitrag zur Gesamtstrahlung.

Es stellt sich nun die Frage, welche Temperatur auf Basis der Auswertung dieses Bildes überhaupt berechnet wird bzw. berechnet werden kann. Geht man von einer räumlichen Temperaturverteilung aus, die qualitativ der obigen Darstellung entspricht, und abgesehen von sehr dünn-schichtigen Randzonen auch optisch dicht ist, so kann man davon ausgehen, daß die gemessene Strahlung in erster Linie auf die der Kamera zugewandten obersten Schichten der betrachteten Flamme zurückzuführen ist und daß die gemessene Temperatur einer „mittleren“ Temperatur in diesem Bereich entsprechen muß. In optisch dünnen Bereichen der Flamme werden im allgemeinen auch Reflexionseigenschaften des Flammenhintergrundes, also der Oberfläche des Verbrennungsraumes, einen Anteil an der gemessenen Gesamtstrahlung liefern.

Neben dem thermodynamischen Temperaturbegriff haben sich im Bereich der Spektroskopie weitere Temperaturbegriffe zur vereinfachten Darstellung praktischer Meßaufgaben etabliert [Lawton]. Dabei werden die wahren Temperaturen eines Strahlers in eine empirische Temperaturskala umgerechnet, sodaß zwischen den Strahlungseigenschaften des betrachteten Temperaturstrahlers und denen eines Schwarzen Strahlers ein vereinfachter Zusammenhang besteht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in jedem Fall von der wahren Temperatur eines Strahlers ausgegangen, jede Abweichung einer Messung von der thermodynamischen Temperatur ist als Meßfehler zu verstehen.

2.2 Strahlungsphysikalische Größen

Für die quantitative Analyse des Phänomens Temperaturstrahlung wurden verschiedene Arten strahlungsphysikalischer Größen eingeführt:

- **Gerichtete spektrale Größen**, die sowohl Richtungs- als auch Frequenzabhängigkeit von Strahlungsenergie beschreiben
- **Hemisphärische spektrale Größen**, die die Frequenzabhängigkeit der Strahlung über den Halbraum repräsentieren
- **Gerichtete Gesamtgrößen**, bei denen Richtungsabhängigkeit der zusammengefaßten Strahlungsenergie beschrieben wird
- **Hemisphärische Gesamtgrößen**, die die Strahlung über den Halbraum unter Zusammenfassung aller Frequenzen beschreiben.

Rein formal können die Gesamtgrößen jederzeit aus den fundamentalen, gerichteten spektralen Größen abgeleitet werden. Praktisch ist die Aufgabe, die fundamentalen Größen für beliebige Materialien und Oberflächenstrukturen zu bestimmen, ein wichtiges, jedoch nicht vollständig bewältigbares Arbeitsgebiet der theoretischen und experimentellen Analyse; oftmals beschränkt man sich bei der Messung auf die Ermittlung abgeleiteter strahlungsphysikalischer Größen.

Grundlegende Literatur, wie etwa [Baehr] behandelt Nomenklatur und Wechselbeziehungen strahlungsphysikalischer Größen, sodaß in dieser Arbeit von einer ausführlichen Darstellung abgesehen werden kann.

Für die Messung am Kalibrierstrahler kann davon ausgegangen werden, daß eine Richtungsabhängigkeit der spektralen Größen außer Acht gelassen werden kann, sodaß durchwegs von hemisphärischen Größen ausgegangen werden kann. Dies gilt auch für die betrachtete Diffusionsflamme, da die thermische Strahlung im Flammenvolumen von Rußpartikeln ausgeht und von diesen auch ohne ausgezeichnete Richtungsabhängigkeit absorbiert wird.

Bezeichnungen, Indizes und physikalische Dimension der verwendeten Größen und Konstanten sind am Beginn der Arbeit zusammengefaßt, auf eine Erklärung und Zusammenstellung im Text wurde zugunsten einer kompakteren Formulierung verzichtet.

2.3 Spektrale Eigenschaften von Temperaturstrahlern [Hering]

Die in dieser Arbeit dargestellten Zusammenhänge gelten ausschließlich für Strahlung, die thermisch angeregt ist. Sie wird von jedem Körper endlicher Temperatur emittiert und hängt neben der Temperatur auch von seinen Materialeigenschaften ab.

Jeder Körper emittiert aufgrund seiner endlichen Temperatur elektromagnetische Strahlung. Eine theoretische Beschreibung der spektralen Temperaturstrahlung des Schwarzen Strahlers gelang M. [Planck] im Jahre 1900:

$$L_{\lambda_s}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.1)$$

Als Schwarzer Strahler wird dabei ein idealisiertes Modell angesetzt, ein Körper, der die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert, dessen Reflexionsvermögen also verschwindet. Ein tatsächlicher Temperaturstrahler weist demgegenüber ein endliches, im allgemeinen von Wellenlänge und Temperatur abhängiges Reflexionsvermögen auf. Von einer auf den betrachteten Körper auftreffenden Gesamtstrahlung werden Teile absorbiert, reflektiert bzw. transmittiert, es gilt

$$\rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) + \alpha(\lambda, T) = 1, \quad (2.2)$$

wobei ρ den Reflexionsgrad, τ den Transmissionsgrad und α den Absorptionsgrad darstellt.

Grundlegende thermodynamische Betrachtungen führen auf das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz, das besagt, daß der Emissionsgrad ε dem Absorptionsgrad α gleich ist:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad (2.3)$$

Die spektrale Strahldichte eines beliebigen Temperaturstrahlers lautet bei allgemeinem Emissionsvermögen

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{\lambda_s}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.4)$$

Als Modell eines grauen Strahlers bezeichnet man einen Temperaturstrahler mit frequenz- und temperaturunabhängigem Emissionsvermögen, für den also gilt:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \varepsilon = \text{const} \quad (2.5)$$

Temperaturstrahler, für die das Emissionsvermögen frequenzabhängig angesetzt werden muß, werden als Selektivstrahler bezeichnet.

Die Gesamtstrahlung eines allgemeinen Temperaturstrahlers ergibt sich durch Integration von (2.4):

$$L(T) = c_1 \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \cdot d\lambda \quad (2.6)$$

2.4 Aufgabenrelevante Grundlagen zur optischen Temperaturmessung

Im vorhergehenden Kapitel wurde das Emissionsverhalten eines Temperaturstrahlers dargestellt. Für eine kamerabasierte Temperaturmessung müssen im allgemeinen folgende Rahmenbedingungen beachtet werden:

- Die Aufnahme erstreckt sich über einen endlichen Beobachtungszeitraum
- Die Messung erfolgt aus einer definierten Beobachtungsrichtung
- Die Messung erfolgt nur innerhalb eines begrenzten Wellenlängenbereichs
- Die spektralen Empfindlichkeiten aller Komponenten des optischen Zugangs müssen berücksichtigt werden
- Auf Basis vorliegender Abbildungsverhältnisse und Kameraeinstellungen muß ein optischer Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Dieser Korrekturfaktor kann außerdem dazu verwendet werden, die Bestrahlung in eine dimensionslose Größe überzuführen.

Für einen zeitabhängigen Prozeß wird folgende normierte Bestrahlung gemessen⁺:

$$E_n = \frac{k_{opt} \cdot c_1}{t_{bel}} \cdot \int_{t=t_0}^{t_0+t_{bel}} \int_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda, T(t)) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (2.7)$$

Man erkennt, daß eine Messung nur dann sinnvolle Resultate liefern kann, wenn während der Messung zeitinvariante Temperaturverteilungen vorliegen. Für alle weiteren Überlegungen gehen wir davon aus, daß diese Bedingung erfüllt ist; (2.7) vereinfacht sich in diesem Fall zu

$$E_n = k_{opt} \cdot c_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.8)$$

Unter der Voraussetzung $c_2 \gg \lambda \cdot T$ für $\lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}$ ist eine approximative Berechnung der Gesamtstrahlung auf Basis des Strahlungsgesetzes nach Wien ausreichend. (2.8) vereinfacht sich in diesem Fall zu

$$E_n = k_{opt} \cdot c_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.9)$$

⁺ k_{opt} schließt jeweils alle Korrekturfaktoren mit ein, die den gesamten Ausdruck in eine dimensionslose Größe definierter Skalierung überführt und ist für (2.7) und (2.8) sowie im Rahmen einer späteren Betrachtung jeweils unterschiedlich festgelegt. Auf die Einführung unterschiedlicher Bezeichner wurde im Sinne einer übersichtlicheren Darstellung verzichtet.

2.5 Quantitative Analyse am Modell des Schwarzen Strahlers

Ausgangspunkt für die folgenden Betrachtungen ist das Modell des Schwarzen Strahlers. Aufgrund bisheriger Ausführungen ist klar, daß ein beliebiger Temperaturstrahler in keinem Spektralbereich und in keine Richtung des Raumes mehr Strahlung emittieren kann als der Schwarze Strahler.

Spätere Ausführungen werden zeigen, daß das betrachtete Meßobjekt, die Dieselflamme, auch Zonen enthält, deren Emissionsvermögen innerhalb des sichtbaren Spektralbereiches näherungsweise dem des Schwarzen Strahlers entspricht.

Thermodynamische Betrachtungen und bisherige Messungen lassen für die dieselmotorische Verbrennung auf typische Verbrennungstemperaturen im Bereich von etwa 2.000K bis 2.500K schließen. Aufgrund der hier diskutierten, orts aufgelösten Temperaturanalyse sind dementsprechend auch Temperaturzonen außerhalb dieses Intervalls zu erwarten. Aufgrund der praktischen Messungen mit dem vorliegenden System wurde der Meßbereich mit [1.800K, 3.000K] festgelegt; von diesem Temperaturbereich wird auch im Rahmen dieser Analyse ausgegangen.

Diagramm 2.1 zeigt die spektrale Strahldichte des Schwarzen Strahlers. Auf eine Angabe der Ordinatenwerte wurde verzichtet. Man erkennt, daß selbst bei sehr hohen Temperaturen der Hauptteil der emittierten Strahlungsenergie dem Infrarotbereich zuzuordnen ist.

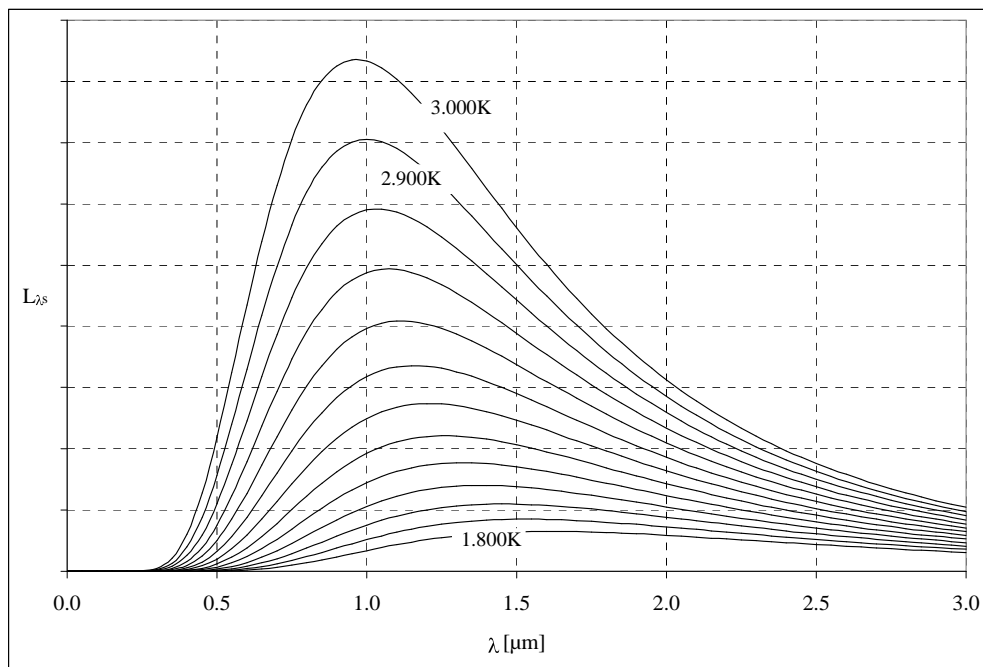


Diagramm 2.1: Spektrale Strahldichte des Schwarzen Strahlers

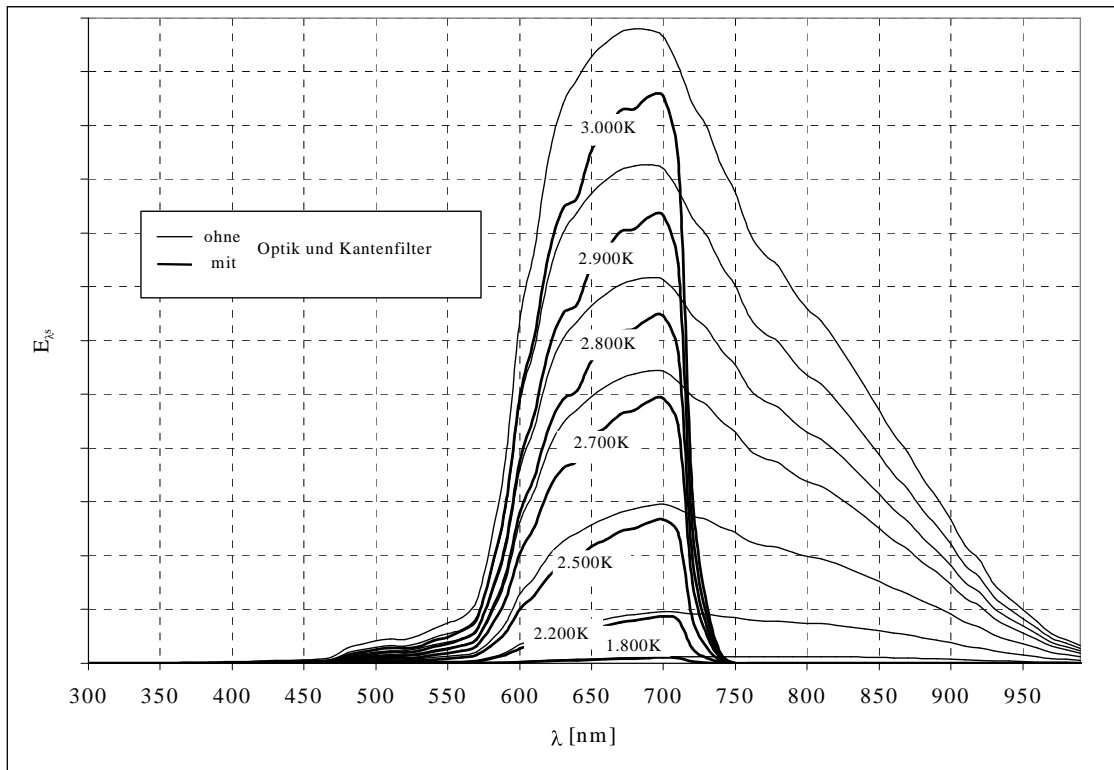


Diagramm 2.2: Rot-basierte spektrale Bewertung des Schwarzen Strahlers

Diagramm 2.2 zeigt die spektrale Bewertung einer Schwarzen Strahlungsquelle auf Basis des roten Primärfilters und der übrigen Komponenten des optischen Zugangs. Neben dem für die Messung relevanten Fall unter Einbeziehung der Optik ist auch die ausschließliche Bewertung auf Basis des Rot-Filters dargestellt.

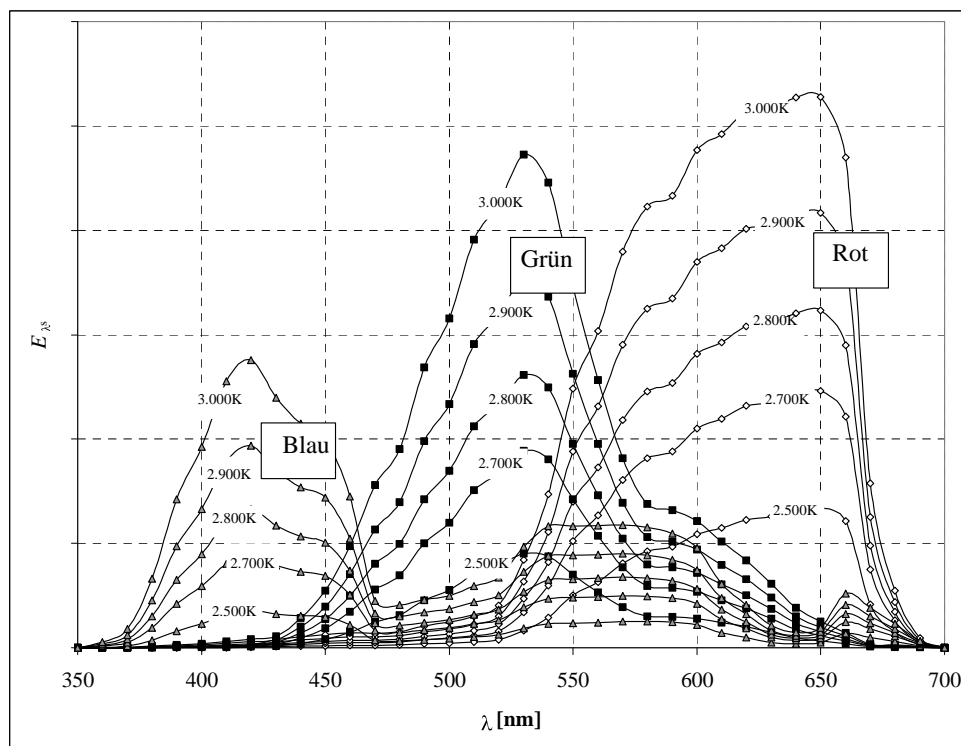


Diagramm 2.3: spektrale Imission für die drei Farbkanäle

Aus Diagramm 2.3 geht die spektrale Bestrahlung für alle Primärfilter und unterschiedliche Temperaturen hervor. Während die Meßergebnisse für Rot- und Grünanteil aus einem gut definierten Spektralbereich herrühren, weist der Blauanteil aufgrund der sehr niedrigen Strahldichte im unteren Wellenlängenbereich und einer Nebenempfindlichkeit im Grünbereich zwei ausgeprägte, meßrelevante Maxima in der spektralen Bestrahlung auf.

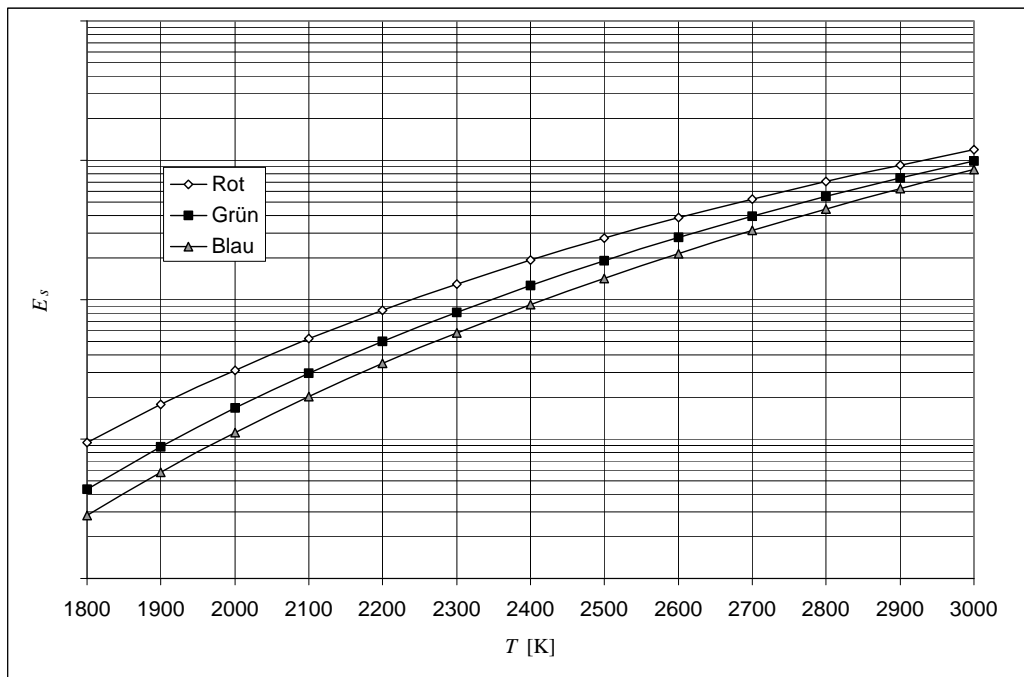


Diagramm 2.4: Temperaturabhängigkeit der gemessenen Farbwerte

Diagramm 2.4 zeigt deutlich, daß die gemessene Strahlungsintensität stark von der Temperatur des Strahlers abhängt (im Meßbereich Faktor 300 für den Blaukanal). Außerdem ist aus Diagramm 2.4 zu ersehen, daß erst im oberen Temperaturbereich alle Farbwerte vergleichbar hoch sind. Diese Feststellung ist gleichbedeutend mit der Aussage, daß sich die Relation zwischen den gemessenen Farbwerten verschiebt. Diagramm 2.5 zeigt diese für die weiteren Betrachtungen wichtige Erkenntnis⁺.

⁺ Die hier dargestellten Diagramme wurden ausschließlich auf Basis der nominalen Filterkurven von Kamera und Optik berechnet. Eine Berücksichtigung des kamerainternen Weißabgleiches führt in späteren Darstellungen auf kleinere Relativwerte.

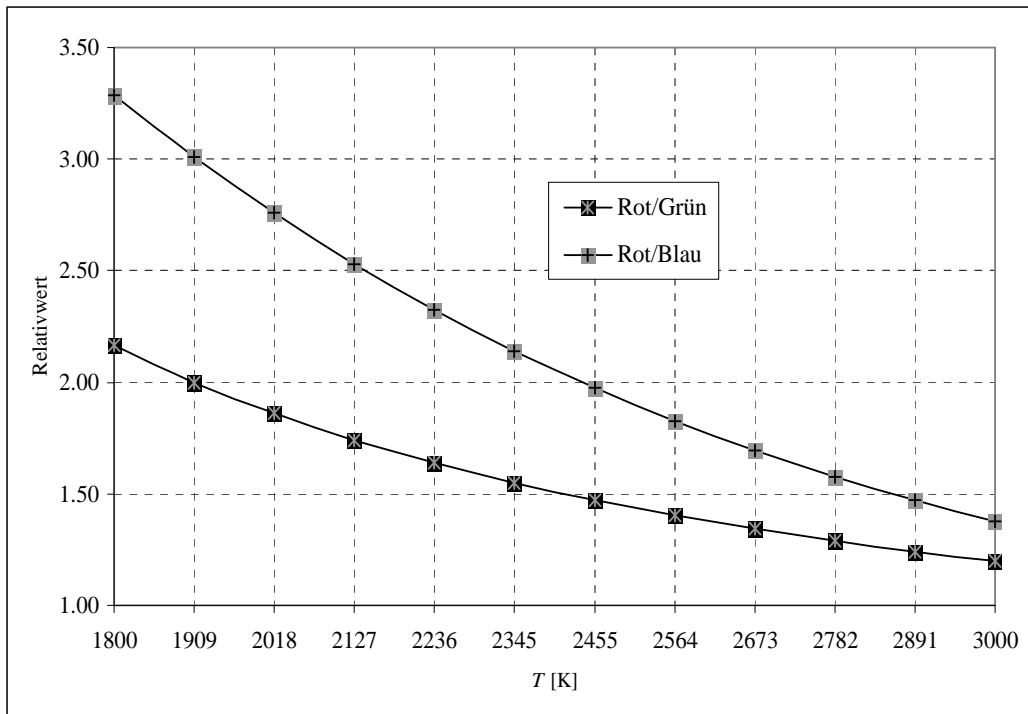


Diagramm 2.5: Temperaturabhängigkeit der relativen Farbwerte

Für einen allgemeinen Temperaturstrahler, dessen Emissionsvermögen im sichtbaren Spektrum und im betrachteten Temperaturbereich näherungsweise konstant ist, können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- am Rotkanal wird im vorliegenden Temperaturbereich die höchste Strahlungsintensität gemessen
- relative Farbwerte verschieben sich mit zunehmender Temperatur des Strahlers in Richtung kurzwelliger Spektralbereiche
- die Strahlungsintensität aller Farbbereiche ist stark temperaturabhängig

2.6 Gasstrahlung

Bisher wurde auf eine konkrete Angabe des Emissionsvermögens eines Temperaturstrahlers nicht näher eingegangen. An dieser Stelle werden Absorption und anschließend die Eigenstrahlung von Gasen allgemein dargestellt.

2.6.1 Absorptionskoeffizient und optische Dicke von Gasen [Baehr]

Geht man davon aus, daß sich zwischen einer Strahlungsquelle und Beobachter ein optisch trübes Gasmisch endlicher Dicke befindet, so verringert sich die beobachtete Gesamtstrahlung, sofern vorausgesetzt werden kann, daß die vom Medium herrührende Strahlung vernachlässigbar ist. Die Reduktion der Gesamtstrahlung rührt allgemein von der Absorption durch das Medium und der Streuung an Gasmolekülen her. Wird weiters angenommen, daß die Streuung an Gasmolekülen (Rayleigh-Streuung) vernachlässigt werden kann, so kann die Abnahme der Strahldichte nach Beer-Lambert in differentieller Form angesetzt werden:

$$dL_\lambda = -k_G(\lambda, T, p, p_G) \cdot L_\lambda \cdot ds \quad (2.10)$$

Darin beschreibt p_G die Konzentration der absorbierenden Gaskomponente, während p den Gesamtdruck repräsentiert. Man beachte, daß die dargestellte Temperatur dem Medium, nicht aber der Strahlungsquelle zuzuordnen ist.

Definiert man eine **optische Dicke**

$$\kappa_G = \int_0^s k_G(\lambda, T, p, p_G) \cdot ds, \quad (2.11)$$

so ergibt sich für das betrachtete Gas die transmittierte Strahlung:

$$L_\lambda(s) = L_\lambda(s=0) \cdot e^{-\kappa_G} \quad (2.12)$$

Man erkennt, daß ein Gas mit niedriger optischer Dicke einen Großteil der Strahlung transmittiert, man spricht in diesem Fall von einem **optisch dünnen Gas**. Umgekehrt spricht man von einem **optisch dichten Gas**, sofern die transmittierte Strahlung verschwindend klein wird.

Können für das betrachtete Volumen gleichbleibende Zustandsgrößen T , p und p_G angesetzt werden, so spricht man von einem **homogenen Gas**.

In diesem Fall vereinfacht sich (2.11) zu

$$\kappa_G = k_G \cdot s \quad (2.13)$$

und die Abnahme der spektralen Strahldichte kann durch das Gesetz von P. Bouguer (1729) beschrieben werden:

$$L_\lambda(s) = L_\lambda(s=0) \cdot e^{-k_G \cdot s} \quad (2.14)$$

2.6.2 Emissionsverhalten von Gasen

Zuvor wurden wichtige Grundbegriffe zur Beschreibung von Absorptionsverhältnissen in Gasen formuliert. Es wurde dargestellt, daß zufolge der Absorption in einem trüben Medium nur ein Bruchteil der eintretenden Strahlung transmittiert wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll demgegenüber ein Medium behandelt werden, dessen Strahlung aus dem Gasvolumen selbst herrührt. Es muß geprüft werden, unter welchen einschränkenden Rahmenbedingungen eine örtliche Temperatur des Gases sinnvoll berechnet werden kann.

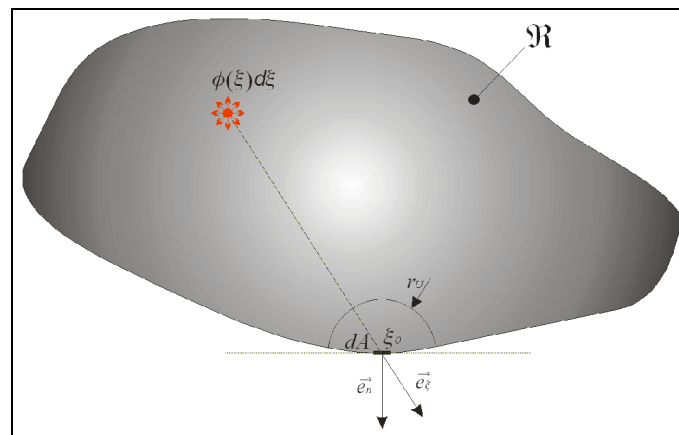


Bild 2.1: Inhomogene Flamme allgemeiner Geometrie

Betrachtet man ein beliebiges, den Flammenbereich \mathfrak{R} begrenzendes Oberflächenelement dA und dessen bezogenen Normalvektor \vec{e}_n im Raumpunkt ξ_0 (Bild 2.1), so wird die dort emittierte Strahlung aus der Summenstrahlung der gesamten Flamme gebildet:

Es sei $\phi(\xi) \cdot d\xi$ der aus dem Volumenelement $d\xi$ hervorgehende Strahlungsfluß im Inneren eines isotrop angenommenen Gases. Weiters sei der Richtungsvektor $\vec{e}_\xi(\xi) = \frac{\xi - \xi_0}{\|\xi - \xi_0\|}$ definiert.

Der aus dem Oberflächenelement tretende differentielle Strahlungsfluß zufolge der im Aufpunkt ξ vorliegenden Strahlung ergibt sich zu

$$d^3\Phi(\xi_0) = \phi(\xi) \cdot \frac{dA}{4 \cdot \pi \cdot (\xi - \xi_0)^2} \cdot (\vec{e}_\xi \cdot \vec{e}_n) \cdot e^{-\kappa_G(\xi, \xi_0)} \cdot d\xi \quad (2.15)$$

Eine Integration von (2.15) führt auf die insgesamt durch das Flächenelement tretende Gesamtstrahlung⁺:

$$\frac{L_\lambda(\xi_0)}{dA} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{\mathfrak{R}} \frac{\phi(\xi) \cdot (\vec{e}_\xi \cdot \vec{e}_n)}{(\xi - \xi_0)^2} \cdot e^{-\kappa_G(\xi, \xi_0)} d\xi \quad (2.16)$$

⁺ wir setzen dazu o.b.d.A. voraus, daß sich jenseits der Tangentialebene im Oberflächenelement dA kein Flammenbereich befindet

Unter der Annahme einer homogenen Flamme ist es möglich, auch für beliebige Flammgeometrien eine quantitative Aussage über das lokale Emissionsverhalten abzuleiten. Der Ausgangspunkt der Betrachtungen für die vorliegende Arbeit liegt allerdings darin, die Ortsabhängigkeit der Flammentemperatur auf Basis der gemessenen Strahlung darzustellen. Man erkennt aus (2.15) wichtige Grundvoraussetzungen, die für eine Berechnung der lokalen Flammentemperatur vorliegen müssen:

- Außerhalb einer (relativ zu Zonen unterschiedlicher Temperatur) kleinen Umgebung muß die optische Dicke $\kappa_G(\xi, \xi_0)$ des Mediums groß sein. Nur dann kann die Ergebnistemperatur sinnvoll einem Ort im erfaßten Bild zugeordnet werden.
- Temperatur und Rußdichte definieren die lokale, im betrachteten Medium richtungsunabhängige, volumetrische Strahldichte $\phi(\xi)$. Innerhalb jenes Raumbereiches, aus der die am Oberflächenelement herrührende Gesamtstrahlung resultiert, darf die Temperatur nur geringen Schwankungen unterworfen sein.
- Zwischen Flamme und Beobachtungsfenster darf sich keine absorbierende Spezieskonzentration maßgeblicher optischer Dicke befinden.

Bild 2.2 veranschaulicht diese grundlegenden Einschränkungen am Beispiel mehrerer Beobachtungsrichtungen:

Die zweite Bedingung ist gleichbedeutend mit der Aussage, daß auch $\kappa_G(\xi, \xi_0)$ im meßwertbestimmenden Raumbereich eine ausschließlich vom Abstand abhängige Größe $\kappa_G(\|\xi - \xi_0\|)$ darstellt. Der relevante Umgebungsbereich ist unter den angeführten Voraussetzungen also durch eine Halbkugel mit dem Radius r_U darstellbar (Bild 2.1). Die Halbkugeln mit Radius $r_{U1,2,3}$ definieren genau einen Schwarzen Strahler: die imitierte Strahlung wird zur Gänze innerhalb des Bereiches absorbiert und dementsprechend an seiner Oberfläche wieder abgestrahlt.

Messungen zeigen, daß ein Großteil der aufgenommenen Flamme optisch nicht dicht ist. In diesem Fall ist die Halbkugel als abgeschnitten zu betrachten (r_{U0} in Bild 2.2, dargestellt nur für *Fenster 1*). Tatsächlich ist für diesen Bereich sowohl eine Ortsabhängigkeit der Temperatur als auch eine Richtungsabhängigkeit der optischen Dichte anzusetzen, sodaß erstens der relevante Umgebungsbereich nicht durch einen Kugelausschnitt beschrieben und zweitens die Ergebnistemperatur keinem festen Ort zugeordnet werden kann. Wird der die Messung beeinflussende Umgebungsbereich mit r_{U0} beschrieben, so ist klar, daß die gemessene Strahlung je nach Wahl des Sichtfensters aus Zonen unterschiedlicher Temperatur herrührt; das Meßergebnis ist folglich von der Position des Sichtfensters abhängig. Liegt dagegen für einen definierten Bildpunkt ein wesentlich kleinerer Radius ($r_{U1,2,3}$) der gemessenen Strahlung zugrunde, so ist die Bestrahlung des Beobachtungsfensters ausgehend von einem gleichbleibenden Oberflächenelement der Flamme unabhängig von der Beobachtungsrichtung, sofern keine absorbierende Gaskomponente zwischen Flamme und Beobachtungsfenster vorliegt, wie etwa angedeutet in Bild 2.2. Die Messung bei *Fenster 3* ist unbeeinträchtigt, während bei *Fenster 1* teilweise und bei *Fenster 2* über den gesamten Flammenbereich eine Beeinträchtigung vorliegt.

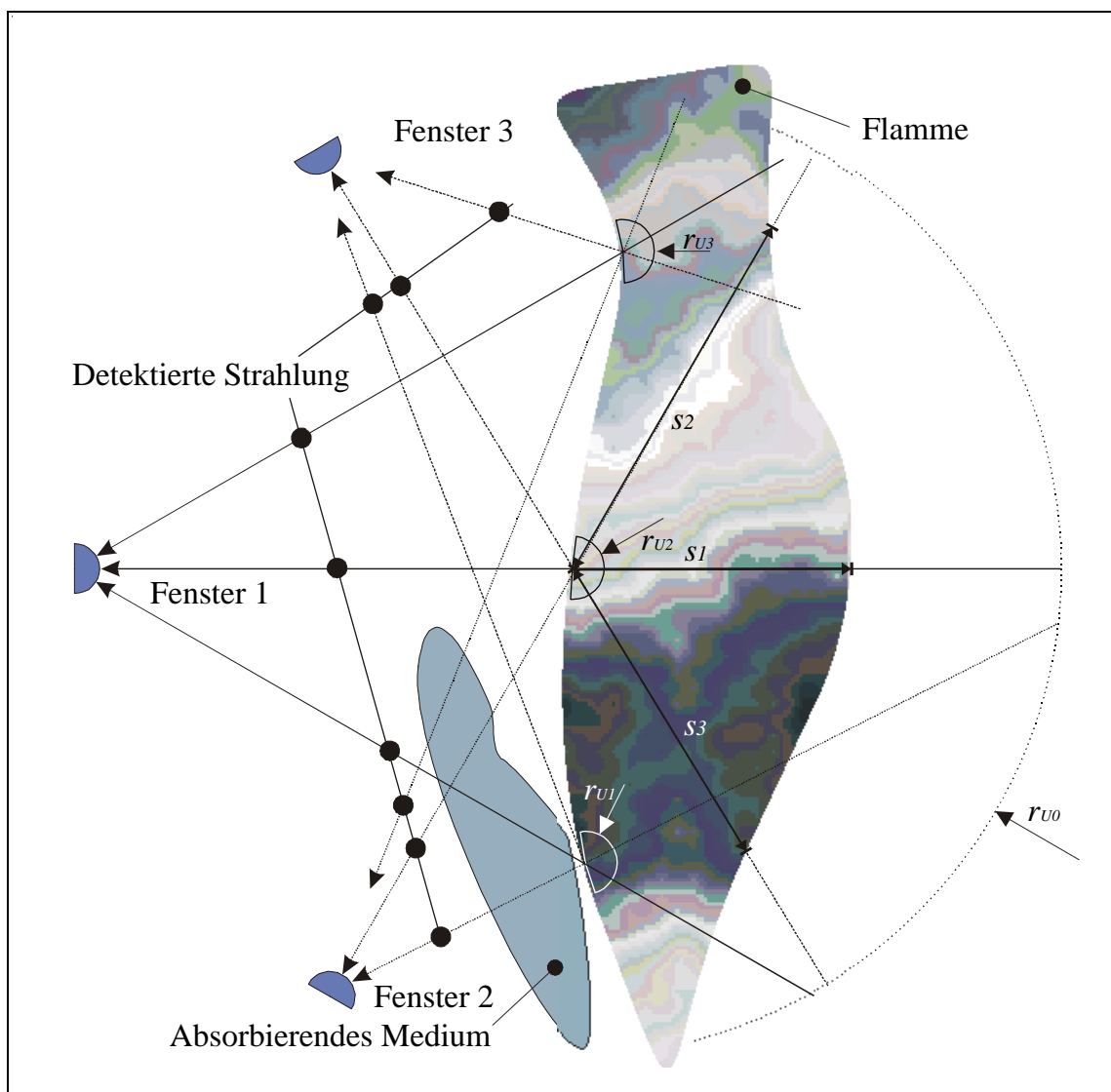


Bild 2.2: Einflußgrößen der lokalen Bestrahlung zufolge unterschiedlicher Beobachtungsrichtung

Nehmen wir nun an, daß der meßwertbestimmende Umgebungsbereich in der Größenordnung r_{U0} liegt und gehen wir weiters davon aus, daß sowohl Temperatur als auch Rußkonzentration im gesamten Flammenbereich gleich hoch sind; eine absorbierende Gaskomponente bleibt von den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen. In diesem Fall ergibt sich eine Richtungsabhängigkeit der geometrischen Dicke der Flamme: Während bei *Fenster 1* in Bildmitte die geometrische Dicke s_1 vorliegt, liegen die geometrischen Dicken bei abweichender Blickrichtung im gleichbleibenden Oberflächenpunkt der Flamme mit s_2 und s_3 wesentlich höher. Man beachte, daß die Gesamtstrahlung unter Vorgabe von Beobachtungsrichtung und Bildpunkt ausschließlich von einer Geraden herrührt, da es innerhalb der Flamme zu keiner signifikanten Streuung kommt. Die detektierte Strahlungsintensität liegt umso höher, je größer die Schichtdicke s ist und wird erst dann unabhängig von der geometrischen Dicke s sein, wenn die lokale geometrische Dicke im

Bereich von r_{U0} oder darüber liegt – und damit im relevanten Spektralbereich dem Strahlungsverhalten eines Schwarzen Körpers entspricht.

Unter den getroffenen Voraussetzungen läßt sich ausgehend vom Gesetz von Brouguer (2.14) der Emissionsfaktor ε_λ bestimmen:

$$L_\lambda(s=0) - L_\lambda(s) = L_\lambda(s=0) \cdot (1 - e^{-k_G \cdot s}) \quad (2.17)$$

Das Emissionsvermögen eines Gases gleichmäßiger Dichte und Temperatur lautet zufolge (2.3) also

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T, p, p_G) = 1 - e^{-k_G(\lambda, T, p, p_G) \cdot s} \quad (2.18)$$

Man erkennt aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit des Emissionsvermögens die wichtige Aussage, daß nicht nur die Bestrahlung in ihrer Intensität, sondern allgemein auch in ihrem Spektrum von der geometrischen Dicke abhängt. Wir haben zuvor allerdings angesetzt, daß im gesamten Beobachtungsbereich eine homogene Temperaturverteilung vorliegt; in eine optische Temperaturmessung muß folglich sowohl die spektrale Zusammensetzung der detektierten Strahlung als auch die lokale Dicke der Flamme eingehen.

2.7 Modell der rußenden Dieselflamme

[Ångström] hat für Flammen, die durch die Verbrennung von Rußteilchen zustandekommen, die Gültigkeit des Beer - Lambertschen Gesetzes nachgewiesen. Die dieselmotorische Verbrennung wird nach Zündverzugsphase und thermischer Entflammung tatsächlich von der Verbrennung von Rußteilchen dominiert. Die Verbrennung selbst ist aufgrund der Zunahme von Verbrennungsendprodukten erheblichen Diffusionsvorgängen unterworfen. In Zonen mit Druckmangel wird Kohlenstoff in Form von Ruß freigesetzt, der in der Nachbrennphase großteils wieder abgebaut wird. Es wird vorausgesetzt, daß sich die Rußteilchen selbst mit dem umgebenden Verbrennungsgas im Temperaturgleichgewicht befinden.

Der Verbrennung von Rußteilchen sind in geringem Ausmaß weitere Verbrennungskomponenten überlagert: Chemielumineszenz zufolge der Verbrennung weiterer Verbrennungsgaskomponenten und selektive Temperaturstrahlung von Wasserstoff und Kohlendioxid, letztgenannte vor allem im Infrarotbereich. Bisherige Ergebnisse [Gaydon, Werl] legen den Schluß nahe, daß eine Beeinflussung der im sichtbaren Bereich auftretenden Gesamtstrahlung vernachlässigbar ist.

Aufgrund bisheriger Erkenntnisse wird angenommen, daß die optische Dicke folgendermaßen angesetzt werden kann [Becker]:

$$\kappa_G(\lambda, T, p, p_G) = k \cdot \lambda^{-n} \quad (2.19)$$

Der enthaltene Faktor k ist eine von der Rußkonzentration abhängige Größe. Der vorkommende Exponent n variiert dabei größenordnungsmäßig im Intervall $[0,9, 1,2]$. Für eine Temperatúrauswertung wird nach [Gstrein] die Annahme $n:=1$ für zulässig befunden, da eine Variation im angegebenen Schwankungsbereich die berechnete Temperatur nur geringfügig beeinflusst⁺.

Damit ergibt sich das spektrale Emissionsvermögen nach (2.18) zu

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - e^{-\frac{k \cdot s}{\lambda}} \quad (2.20)$$

Das Emissionsvermögen muß somit als eine von Rußkonzentration und Schichtdicke abhängige Größe angesetzt werden.

Aus dem angegebenen Emissionsvermögen (2.20) sollen zwei spezielle Fälle diskutiert werden; für den Fall $k \cdot s \gg \lambda$ ist das Emissionsvermögen im vermessenen Spektralbereich dem eines Schwarzen Strahlers gleich, die Flamme ist optisch dicht. Damit wird klar, daß eine gemessene Strahlung auf die dem Bildsensor zugewandte Flammenfront zurückzuführen ist. Über das örtliche Abklingen des Einflusses innerer Flammenschichten kann keine genaue Aussage getroffen werden, sicher ist jedoch, daß die Strahlung der hinteren Flammenfront, also die dem Sensor abgewandte Oberfläche der Flamme, keinen Einfluß auf das Meßergebnis hat. Gilt andererseits $k \cdot s \ll \lambda$, so ist die Flamme im betrachteten Bereich optisch dünn, ein Teil der gemessenen Strahlungsenergie kann dementsprechend auch auf reale Reflexionseigenschaften des nicht ideal verrußten Verbrennungsraumes zurückzuführen sein. Für die spätere Modellbildung ist besonders interessant, daß die beiden (auch praktisch auftretenden) Extremfälle für eine Temperaturmessung auf Basis relativer Farbwerte Einhüllende aller möglichen Relativwerte darstellen.

Schlußfolgerung aus der Arbeit von Gstrein und gleichzeitig Ansatz für die in dieser Arbeit dargestellte Temperaturmessung ist (2.9) unter Berücksichtigung von (2.20):

$$E_n = k_{opt} \cdot c_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(1 - e^{-\frac{k \cdot s}{\lambda}} \right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.21)$$

⁺ Im Rahmen der Arbeit durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, daß eine Unschärfe des Koeffizienten n im angegebenen Schwankungsbereich auf eine globale Verschiebung der Ergebnistemperatur in der Größenordnung von 50K führt. Aufgrund der Überbestimmtheit in der Sensorik kann anhand durchgeführter Messungen weiters gezeigt werden, daß dieser empirisch gefundene Zusammenhang zwar Grundtendenzen richtig beschreibt, daß aber durch Variation dieses Parameters deckungsgleiche Ergebnistemperaturen über den Ort auf Basis aller Farbwerte nicht gefunden werden können.

3. Temperaturmessung und Bildaufnahmetechnik in der Motorenforschung

In [Lawton] werden verschiedene Konzepte zur Erfassung transienter Temperaturphänomene ausführlich dargestellt, wobei zur Messung an gasförmigen Medien ausschließlich Computertomographie sowie nicht orts aufgelöste Verfahren vorgeschlagen werden. Im Bereich der kamerabasierten Temperaturmessung wird lediglich auf die zunehmende Leistungsfähigkeit derartiger Systemkomponenten hingewiesen.

Im Rahmen der folgenden Diskussion wird gezeigt, welche Möglichkeiten und Einschränkungen mit bestehender Meßtechnik verbunden sind; neben der Kernaufgabe der Temperaturmessung im Verbrennungsraum wird insbesondere die der Meßdatenauswertung vorausgehende Kalibrierung und die prozeßsynchrone Erfassung von Farbbildern im Verbrennungsraum behandelt.

Die Temperaturmessung unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Hauptgebieten, der **Kontaktthermometrie** und der **Strahlungsthermometrie**¹.

3.1 Kontaktthermometrie

Für die Kontaktthermometrie ist eine Einbringung des Sensors an die Oberfläche bzw. in das Innere eines Mediums zwingend. Bei der Betrachtung (quasi)statischer Meßaufgaben kann damit eine hohe Meßgenauigkeit erreicht werden. Überdies ist es möglich, Temperaturmessung durch geeignete Miniaturisierung selbst an hochintegrierten Bauelementen durchzuführen (z.B. Temperaturmessung in Prozessoren). Die Kontaktthermometrie in der Anwendung auf Flammen ist wegen der Beeinflussung der Flammgeometrie durch den Sensor wenig sinnvoll, dies selbst bei der Beschränkung auf zeitinvariante Temperaturverteilungen [Salz]. Da schließlich keines der derzeit eingesetzten Sensorkonzepte hinreichend trägheitslos funktioniert [Lawton], ist eine Temperaturmessung an der Flamme mittels taktile Meßtechnik bereits alleine deshalb nicht möglich. Taktile Meßverfahren werden in der Motorenforschung allenfalls zur Messung in Ansaugleitungen und Abgaskanälen eingesetzt [Pisching]. Eine ausführliche Darstellung taktile Sensorkonzepte ist in [Tränkler] nachzulesen.

¹ Eine weitere, etwas exotische anmutende Lösung stellt die in [Pisching] skizzierte akustische Temperaturmessung dar, bei der die Gastemperatur aus der Laufzeit von Ultraschallimpulsen berechnet wird; dieses Konzept wurde erfolgreich für die Messung von Abgastemperaturen unmittelbar nach dem Auslaßventil eingesetzt, ist für die Analyse von Flammentemperaturen im Brennraum aber nicht geeignet, da hier im vermessenen Medium massive Rußdichte- und Temperaturgradienten vorliegen.

3.2 Strahlungsthermometrie

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden bereits zahlreiche optische Verfahren zur berührungs- und trägheitslosen Temperaturmessung im Verbrennungsraum entwickelt. Wir verweisen an dieser Stelle auf die speziell für die dieselmotorische Verbrennung entwickelten Verfahren und diskutieren anschließend das Problem der orts aufgelösten Temperaturmessung im Brennraum eines Motors.

3.2.1 Modell der Dieselflamme und Kalibrierung

[Werl] zeigte, daß bei der dieselmotorischen Verbrennung im gesamten sichtbaren Bereich selektive Absorption und Band-Emission vernachlässigt werden können. Im Rahmen seiner Arbeit wurde die Temperaturmessung auf Basis des Schwarzen Strahlers bei zehn Frequenzen im sichtbaren Bereich durchgeführt. Der entwickelte Versuchsaufbau erlaubte die Berechnung einer gemittelten Schwarzen Temperatur bei gegebenem Kurbelwinkel.

Das Emissionsvermögen der rußenden Dieselflamme, wie es auch in der vorliegenden Arbeit angesetzt wird (2.20), geht vermutlich auf [Becker] zurück. Zahlreiche Untersuchungen [Pepper1, Pepper2, Schack, Liebert, Senft, Naeser, Rößler, Stull, Mie] bestätigen diese Annahme. [Gstrein] weist zwar auf gewisse Unschärfen in der Parametrisierung hin, stellt aber den Ansatz selbst nicht in Frage. Durch den Einsatz multispektraler Meßmethoden könnten grundsätzlich die Abweichungen der Messungen von diesem Ansatz aufgezeigt werden. In [Pitter], [Pitter2] und [Hötger] wird ein Temperaturmeßsystem dargestellt, mit dem im sichtbaren Bereich an bis zu 384 Wellenlängen gemessen werden. Anstatt Widersprüche und Verfeinerungen im Ansatz abzuleiten, werden die auf Basis dieser Wellenlängen berechneten Temperaturwerte in gemittelter Form als Ergebnistemperatur interpretiert. In [AVL-FT] wird ein Flammentemperatur-Meßgerät dargestellt, das auf Basis der Zweifarbmethode arbeitet. Das Emissionsvermögen wird bei dieser Messung durch die Angabe einer mittleren Schichtdicke im Beobachtungsbereich festgelegt. Ähnliche Verfahren wurden auf Basis von fünf schmalbandigen optischen Filtern entwickelt, wobei allen Methoden die Erfassung und Auswertung eindimensionaler, über mehrere Zyklen gemittelter Strahlungsintensitäten bei unterschiedlichen Wellenlängen gemein ist.

Durch die Bereitstellung eines Hintergrundstrahlers in Form eines Lasers wurde für einige dieser Verfahren auch die optische Dicke der Dieselflamme ermittelt, nachzulesen etwa in [Lawton] oder [Pitter2]. Dabei zeigte sich, daß für ausgewählte Phasen der Verbrennung selbst bei nicht orts aufgelöster Messung optisch dichte Zonen (vgl. Kapitel 2.6) vorliegen. Diese Tatsache wurde auch im Rahmen eigener Untersuchungen bestätigt. Sie ist Grundlage für den zulässigen Wegfall einer Kalibrierung am Prüfstand, wie Sie in dieser Arbeit vorgeschlagen wird.

3.2.2 Orts aufgelöste Temperaturmessung

Die bekanntesten orts aufgelösten Temperaturmeßverfahren basieren auf Infrarottechnik. Derzeitige Systeme eignen sich allerdings nicht für die Erfassung hochdynamischer thermischer Phänomene. Wir diskutieren zunächst vorhandene Lösungen zur orts aufgelösten

Temperaturmessung im Brennraum und zeigen anschließend die Limitationen der heute verfügbaren Infrarotmeßtechnik.

Zur orts aufgelösten Temperaturmessung wird von [Lawton] ein computertomographisches Verfahren vorgeschlagen. Dabei wird der Zylinderkopf eines Motors mit optischen Fasern ausgestattet, um ein ebenes Gitter im Brennraum zu erhalten. Die Ortsauflösung wird aufgrund der Abmessungen der Faseroptik mit nur 32 Punkten angegeben, die Rekonstruktion eines ebenen Schnittes erfolgt über Interpolationsverfahren [Zimmer]. Die besonderen Vorteile dieses Verfahrens liegen in einer echten räumlichen Zuordnung von gemessener Temperatur und Speziesdichte und der quasi zeitkontinuierlichen Erfassung der Flammenausbreitung. Mit der vorgeschlagenen Meßtechnik ist allerdings eine Anordnung der Fasern im Kolbenbereich nicht möglich; ein weiterer Nachteil liegt im enormen Adaptierungsaufwand für diese Meßmethodik.

Eine weitere Möglichkeit zur orts aufgelösten Messung von Flammentemperaturen ist die Auswertung von Hochgeschwindigkeitsfarbfilmern, die gemeinsam mit Kalibrierbildern von einem Referenzstrahler zur Farbkorrektur für die Auswertung photographisch entwickelt werden. Ein derartiges System soll angeblich existieren und ist von den bisher diskutierten Verfahren in der Grundidee dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Systemkonzept am ähnlichsten. Über dieses Verfahren konnten aus Gründen der Geheimhaltung leider keine weiterreichenden Informationen eingeholt werden. Die zugrundeliegende Hochgeschwindigkeitsfilmtechnik läßt allerdings auf mehrere Schwächen gegenüber dem Engine VideoScope schließen.

3.2.3 Infrarot-Thermographie

Zur Messung an Temperaturstrahlern hat sich in den letzten Jahren vor allem die Infrarotspektroskopie durchgesetzt. Es wurde bereits dargestellt, daß bei den Temperaturen im Brennraum der Hauptteil der Strahlung im Infraroten emittiert wird. Allerdings bieten selbst Kameras der letzten Generation keine geeigneten Aufnahmetechniken. Neben Flächenarrays, die etwa einer gewöhnlichen Videokamera entsprechen, werden auch Einelement-Sensorsysteme eingesetzt, die ein ebenes Abbild einer Szene durch horizontale und vertikale Ablenkeinheiten generieren. Derartige Komponenten sind für die orts aufgelöste Erfassung hochdynamischer Vorgänge unbrauchbar [VarioScan]. Eine Erfassung von Verbrennungsprozessen in Brennraum erfordert Verschußzeiten von 1/10.000s und darunter. Elektronische Shuttermöglichkeiten sind damit zwingend erforderlich, stehen aber mit herkömmlichen IR-Sensoren nicht zur Verfügung (vgl. [Mitsu], [Pulnix]). Um eine dem vorliegenden System ebenbürtige Aufnahmezeit zu erreichen, wäre außerdem eine leistungsfähige Triggerfunktion notwendig, die aber ebenfalls Sonderlösungen erfordert. Selbst mit der Verfügbarkeit einer geeigneten Infrarotkamera wäre das Problem der Temperaturmessung an der Dieselflamme noch nicht gelöst. Die Strahlungseigenschaften der rußenden Dieselflamme wurden insbesondere im sichtbaren Spektralbereich ausführlich behandelt. Genau für den sichtbaren Spektralbereich wurde festgestellt, daß die rußende Flamme ein kontinuierliches Emissionsverhalten aufweist.

3.3 Aufnahmetechnik

Nach Realisierung eines optischen Zugangs in den Brennraum eines Motors [Taucar] wurden erstmals Hochgeschwindigkeitsfilmkameras zur Aufnahme von Verbrennungsvorgängen im Brennraum realisiert. Wenige Zyklen des Prozesses wurden bei fester Aufnahmezeit erfaßt, erst der entwickelte Film gab Aufschluß darüber, ob die Lichtausbeute während der Aufnahme ausreichte. Eine logische Erweiterung der Hochgeschwindigkeitsfilmsysteme stellen die heute verfügbaren digitalen High-Speed-Kamerasysteme dar. Die Limitationen dieser Aufnahmekonzepte werden speziell für die Motorenforschung an späterer Stelle diskutiert. Mit dem Gerät Video Engine 513 [AVL-VE] stand erstmals ein Aufnahmesystem bereit, mit dem Farbbilder im Brennraum durch Vorgabe von Winkel oder Zeitbedingungen erfaßt werden konnten. Dieses System arbeitete mit einer freilaufenden Farbkamera nach Videonorm, einem digitalen Bildspeicher und einem Videorecorder. Zufällig erfüllte Triggerbedingungen steuerten den Bildspeicher, dessen Standbild auf Videoband festgehalten wurde. Als Folge mußte das aufgenommene Bildmaterial händisch umsortiert werden, die Verzögerungszeiten zwischen zwei Aufnahmen lagen teilweise im Minutenbereich. Erst mit Verfügbarkeit triggerbarer Industriekameras konnte die mit dem Engine VideoScope vorliegende Aufnahmezeit unter Vorgabe von Winkel und Zeitbedingungen erreicht werden. Selbst heute ist die Zahl triggerbarer Farbkameras stark limitiert, Triggermechanismen sind teilweise nur sehr unzureichend realisiert (vgl. [Sony], [Pulnix]). Die eingesetzte Pulnix Farbkamera weist neben der angesprochenen Triggerfähigkeit einzigartige Merkmale auf, die im nächsten Kapitel ausführlich dargestellt werden.

3.4 Neuheit des vorgeschlagenen Meßsystems

Die technische Neuheit des im Rahmen der vorliegenden Arbeit dargestellten Meßsystems kann grob in vier Bereiche unterteilt werden:

- Systemtechnik
- Prozeßsynchronisation
- Meßtechnik
- Modellbildung

3.4.1 Systemtechnik

Das im Rahmen dieser Arbeit dargestellte Meßsystem Engine VideoScope 513D ist das erste und bisher einzige bildbasierte Meßsystem, das speziell für die Motorenforschung konzipiert wurde. Folglich ist es nicht möglich, den Neuheitsgrad des Gesamtsystems im Vergleich mit alternativen Systemen zu bewerten. Es ist absehbar, daß die nachstehend angeführten Leistungsmerkmale des realisierten Meßsystems im Lastenheft kommender bildbasierter Meßsysteme für die Motorenforschung enthalten sein werden:

- Digitale Bildübertragung ab Kamera
- Zentrale Konfiguration aller peripheren Komponenten (Blitz, Synchronisation, Kamera)
- Live-Prozeßbeobachtung, Aufnahme und strukturierte Archivierung
- Integriertes Bild- und Datenmanagement
- Integrierte Bildbearbeitung
- Vollwertiges Analyse- und Präsentationstool

3.4.2 Prozeßsynchronisation

Das Triggertiming der vorgeschlagenen Farbkamera ist ausgelegt auf eine Prozeßdynamik, bei denen Zeitunschärfen im Millisekundenbereich unproblematisch sind. Um die Kamera auch mit innermotorischen Prozessen unter Vorgabe einer ausreichenden Zeit- und Winkelgenauigkeit zu synchronisieren, wurde erstmals eine auf paralleler Hardware aufbauende prädiktive Synchronisationstechnik unter Berücksichtigung des internen Signaltimings der Kamera eingesetzt.

3.4.3 Meßtechnik

Für die Messung von Flammentemperaturen wurde erstmals eine handelsübliche Farbkamera eingesetzt. Durch die digitale Bildübertragung bleiben Meßfehler auf den Bildsensor und die dem A/D-Wandler vorgelagerte Analogschaltung beschränkt.

Die mit 768x484 Bildpunkten im Vergleich zu Hochgeschwindigkeitsfilmsystemen sehr hohe Auflösung erlaubt unter Berücksichtigung der mitgelieferten Optik und typischer Distanzen

im Brennraum von weniger als 10cm eine Detailauflösung, mit der selbst Kraftstofftröpfchen in der Größenordnung von 0.5mm deutlich sichtbar abgebildet werden können.

Neben weiteren Vorzügen einer stroboskopischen Prozeßbeobachtung gegenüber Hochgeschwindigkeitsfilmsystemen, die im folgenden Kapitel dargestellt werden, weist die verwendete Systemtechnik weitere Vorteile, insbesondere für den Einsatz als Meßgerät, auf:

- Nach einmaliger Prüfung der Kameraeigenschaften sind Messungen mit dem vorgeschlagenen System sehr gut reproduzierbar. Hochgeschwindigkeitsfilme müssen nach der Messung erst entwickelt werden, sodaß sowohl die Qualität des verwendeten Films als auch die Ausarbeitung des Meßergebnis beeinträchtigen können.
- Mit dem vorgeschlagenen Grundkonzept ist die Flamme direkt am Bildschirm beobachtbar, eine optimale Kameraeinstellung kann folglich ohne weitere Schwierigkeiten gefunden werden. Bei der Hochgeschwindigkeitsfilmtechnik kann die Qualität der Aufnahme erst nach Entwicklung des Filmmaterials geprüft werden.
- Temperaturberechnungen können durch die sofortige Verfügbarkeit aller Basisdaten direkt am Prüfstand durchgeführt werden, eine Möglichkeit, die bei photographischen Verfahren grundsätzlich nicht gegeben ist.

3.4.4 Modellbildung

Für die optische Temperaturmessung kann, erstmalig im Bereich der Motorenforschung, auf Kalibriermessungen am Prüfstand vollständig verzichtet werden. Zur Ermittlung eines reproduzierbaren Zusammenhanges zwischen emittierter Strahlung und gemessener Farbe wurde stattdessen ein rein modellbasiertes Kalibrierverfahren entwickelt.

Für die Auswertung des Bildmaterials wurde ein neuartiger Auswertealgorithmus entworfen, mit dem erstmals eine Temperaturberechnung ohne die Angabe weiterer Korrekturfaktoren möglich ist. Das Auswerteverfahren findet zu jedem Bildpunkt ohne Nutzereingriff das örtliche Emissionsvermögen, das aus der lokalen optischen Dicke der Flamme hervorgeht.

Zur Kompensation von Rußablagerungen am Beobachtungsfenster konnte ein Bildrestaurationsverfahren entwickelt werden, das ausschließlich auf Basis des aufgenommenen Bildmaterials parametrisiert werden kann.

4. Systemtechnik

Das Engine VideoScope ist ein volldigitales, triggerbares Videosystem für die Erforschung und Entwicklung von Verbrennungskraftmaschinen. Im Gegensatz zu High-Speed-Systemen arbeitet das vorliegende System nach dem Prinzip der stroboskopischen Prozeßbeobachtung; dabei wird vorausgesetzt, daß der beobachtete Prozeß zyklisch abläuft. Bild 4.1 zeigt anschaulich den Unterschied zwischen High-Speed Aufnahmetechnik und stroboskopischer Bilderfassung: Die Aufnahmen einer stroboskopischen Prozeßbeobachtung werden allgemein von unterschiedlichen (nicht zwingend aufeinanderfolgenden) Prozeßzyklen erfaßt, wogegen bei einer High-Speed-Aufnahme ein einzelner Prozeßzyklus aufgelöst wird.

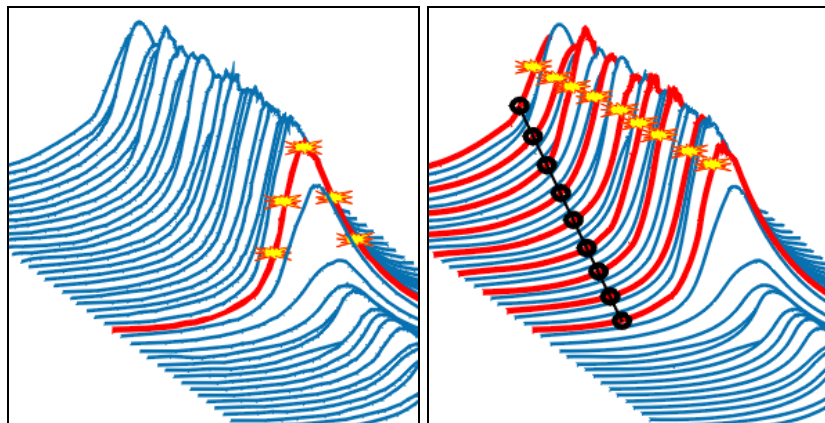


Bild 4.1: High Speed Aufnahmetechnik (links) und stroboskopische Prozeßbeobachtung (rechts)

Aufgrund derzeitiger technischer Rahmenbedingungen hat dieses Prinzip für die vorliegende Aufgabenstellung einige wesentliche Vorzüge gegenüber bildgebenden Hochgeschwindigkeitssystemen, sie können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Zyklische Phänomene können bei hoher Detailauflösung zeitlich praktisch beliebig genau aufgelöst werden, während bei High-Speed-Aufnahmen stets ein Kompromiß zwischen Aufnahmezeit, Ortsauflösung und Lichtempfindlichkeit erforderlich ist.
- Für die Motorenforschung interessiert vor allem die Determiniertheit des Prozesses, die Aufnahme eines Zyklusses, den eine High-Speed-Aufnahme allgemein liefert, gibt darüber wenig Aufschluß. Demgegenüber liegt ein Aspekt der stroboskopischen Prozeßbeobachtung in der Idee, bei gleichem Aufnahmewinkel eine beliebige Anzahl von Bildern zu erfassen, um so in einer nachgelagerten Bildauswertung Aussagen über zyklische Fluktuationen treffen zu können.
- Im Gegensatz zu High-Speed-Systemen können bei stroboskopischer Beobachtung kostengünstige Massenspeicher für das direkte Ablegen der Bilddaten eingesetzt werden.

4.1 Gesamtsystem

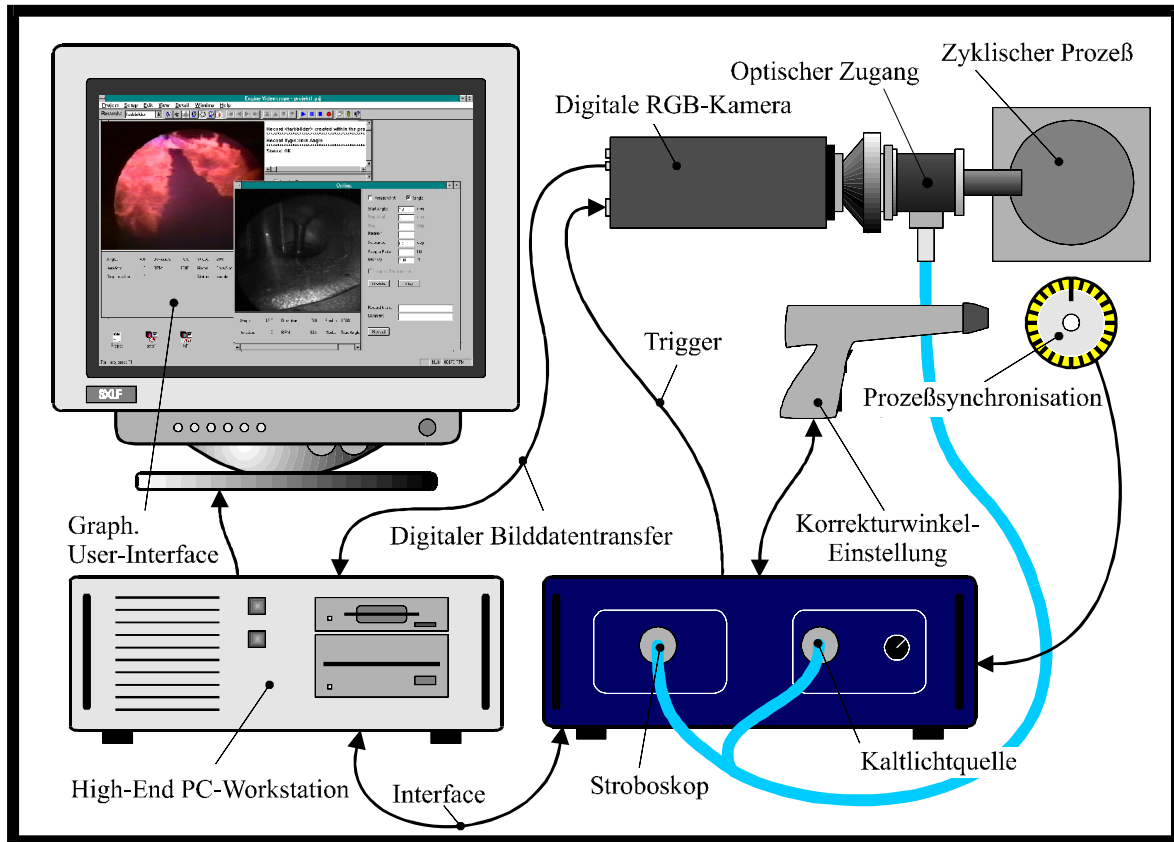


Bild 4.2: Systemüberblick Engine VideoScope 513D

Das Engine Videoscope basiert auf einer PC-Workstation, als Betriebssystem wurde Windows NT™ gewählt. Der PC ist neben einem Digital-Frame-Grabber auch mit einer Echtzeithardware ausgestattet, die speziell für das System entwickelt wurde. Die in Form einer ISA-Einsteckkarte realisierte Schaltung ist über ein Interface-Kabel mit der Light-Unit verbunden. Diese Komponente stellt neben einer Kaltlichtquelle und einem leistungsfähigen Stroboskop auch alle prozeßseitigen Anschlüsse (Synchronisationssignale, Spannungsversorgung und Trigger für Kamera, Stroboskop, etc.) bereit. Lediglich der Datentransfer Kamera – PC erfolgt über direkte Signalwege. Bild 4.2 zeigt den schematischen Aufbau des Gesamtsystems, die für die vorliegende Aufgabenstellung relevanten Systemkomponenten werden anschließend beschrieben.



Bild 4.3: Engine VideoScope 513D

Erst die jüngsten Entwicklungen im PC-Bereich (Prozessoren, Bussysteme, sowie die mittlerweile enormen Speicherkapazitäten von Haupt- und Massenspeicher) ermöglichten eine wirtschaftliche und praxistaugliche Realisierung eines volldigitalen Bildmanagements.

Auf der Softwareebene im PC-Sektor ist die Entwicklung moderner 32bit-Betriebssysteme hervorzuheben. Aufgrund gesammelter Erfahrungswerte und der rasch zunehmenden Verbreitung wurde die Engine VideoScope-Bedienssoftware für Windows NT™ entwickelt. Dieses Betriebssystem bietet neben guter Systemstabilität geeignete Methoden zur Verwaltung großer Datenmengen; Windows NT™ verfügt über eine allgemein bekannte Benutzeroberfläche, die eine kurze Einlernphase in das User-Interface ermöglicht; schließlich bieten zahllose Drittanbieter Software für dieses Betriebssystem an, mit denen die Daten aus dem VideoScope direkt übernommen und weiterverarbeitet werden können.

Eine herausragende Eigenschaft der Bediensoftware besteht in der Tatsache, daß die volle Funktionalität des Systems auf nur eine Applikation abgebildet wurde, das heißt, daß sowohl die Konfiguration mit anschließender Prozeßbeobachtung und Datenerfassung als auch die nachgelagerte Analyse, Verarbeitung und Präsentation der Meßdaten von einem einzigen Programm aus ausführbar sind. Die realisierte VideoScope-Software eröffnet dem Benutzer bei einfachster Handhabung vielfältige Möglichkeiten durch eine gemeinsame Bild- und Datenverwaltung und durch die automatische Protokollierung aller wesentlichen Arbeitsschritte. In die Software integrierte Bildbearbeitungsoperationen ergänzen die leistungsfähigen Beobachtungs-, Aufnahme- und Wiedergabemöglichkeiten und erlauben damit bei der Analyse und Interpretation des erfaßten Bildmaterials eine problemorientierte Arbeitsweise.

4.2 Optischer Zugang

Der optische Zugang in den Verbrennungsraum stellt gewissermaßen das erste Glied der Meßkette dar. Da die optischen Eigenschaften dieser Teile der Meßkette neben den primären Farbfiltern der eingesetzten Kamera meßwertbestimmende Größen darstellen, sind sie für eine Meßdatenauswertung in jedem Fall zu berücksichtigen.

4.2.1 Adaptierung des Zylinderkopfes

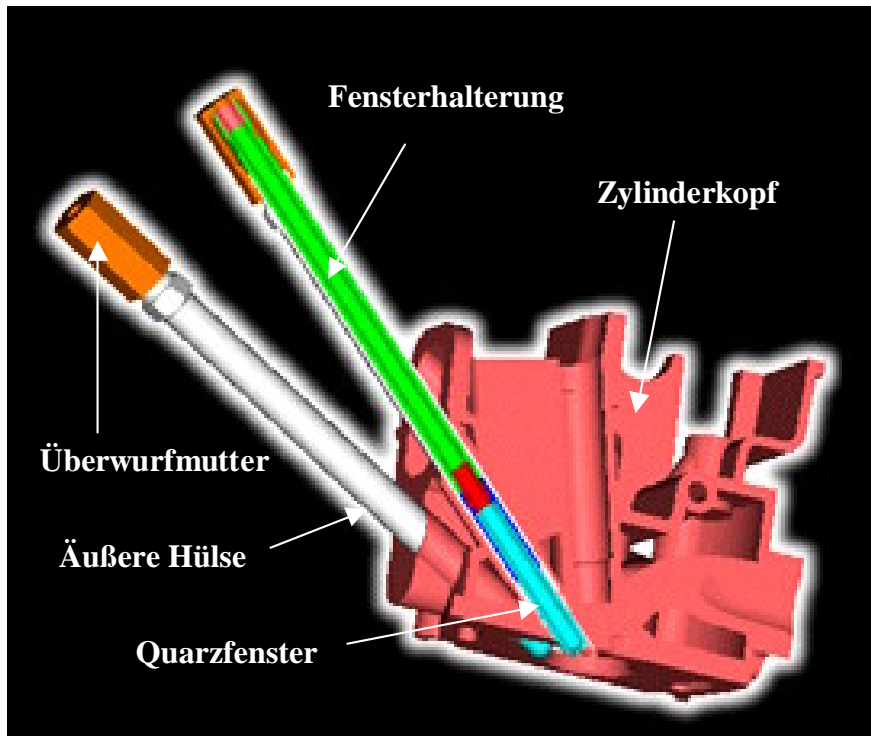


Bild 4.4: Adaptierung des Zylinderkopfes

Zur Beobachtung von Phänomenen im Inneren des Verbrennungsraumes muß ein robustes, sprich druck- und temperaturfestes Sichtfenster [Taucar] eingebracht werden, der Versuchsmotor muß adaptiert werden. Bei kleinvolumigen Motoren verzichtet man in der Regel zugunsten des optischen Zugangs auf eines der Auslaßventile, da diese während der Verbrennung ohnedies geschlossen sind und die Flammenbildung praktisch nicht beeinträchtigt wird. Das Sichtfenster ist aus Quarzglas gefertigt und weist damit eine vernachlässigbare Selektivität auf. Andererseits ist jedoch zu beachten, daß das Sichtfenster während der Messung erheblicher, ortsabhängiger Verrußung unterworfen ist. Bild 4.4 zeigt den Aufbau eines endoskopischen Zugangs. Das Quarzfenster ist mit einer Metallhülse verklebt und wird vor dem Einbau mit einer Fensterhalterung verschraubt. Die äußere Hülse ist fest mit dem Zylinderkopf des Motors verbunden, die Fensterhalterung wird unter Verwendung einer Überwurfmutter mechanisch an der äußeren Hülse fixiert.

4.2.2 Endoskop und Objektiv

Für die Strahlführung werden bei der Brennraumbesichtigung gekühlte Endoskope (Storz/AVL) eingesetzt (Bild 4.5, oben). Bild 4.6 zeigt die realisierten Beobachtungsbereiche

für 4mm Endoskope. Die spektralen Transmissivitäten der Endoskope wurden vermessen und bei der Meßdatenauswertung berücksichtigt. Weitere Kenndaten und Einsatzmöglichkeiten von Endoskopen werden in [Reling] dargestellt.



Bild 4.5: Gekühltes Endoskop (o) und Endoskop mit integriertem Lichtleiter (u)

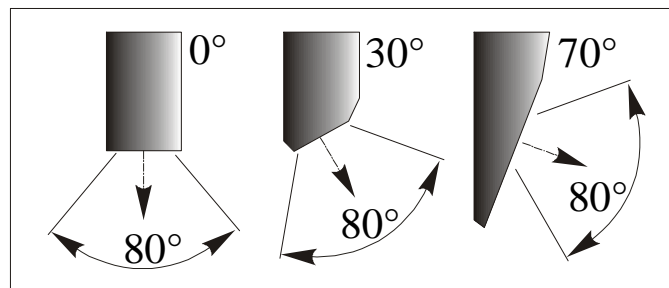


Bild 4.6: Beobachtungsbereich verfügbarer Varianten

Die verwendeten Cosmicar-Objektive werden, wie auch die Endoskope, spektral vermessen und bei der Auswertung berücksichtigt.

4.2.3 Kantenfilter

Die nominalen Empfindlichkeitskurven der primären Farbfilter der verwendeten Kamera weisen im IR-Bereich eine maßgebliche Nebenempfindlichkeit auf (vgl. Diagramme 2.3 und 4.2). Quantitative Betrachtungen zeigen außerdem, daß insbesondere im langwelligen Spektralbereich Unschärfen im Modell einen hohen Einfluß auf die Meßdatenauswertung haben. Schließlich wurden die Komponenten des optischen Zugangs nur im sichtbaren Spektralbereich vermessen, eine genaue Aussage über das Transmissionsverhalten von Optik und Kamera ist folglich weder im IR- noch im UV-Bereich möglich. Unter Verwendung des ebenfalls vermessenen IR/UV-Filters werden die genannten Probleme umgangen. Bild 4.7 zeigt den Einbau des Kantenfilters in die Kamera. Die mechanische Verbindung zwischen Kamera und Endoskop wird über eine Schnellkupplung hergestellt (Bild 4.8).

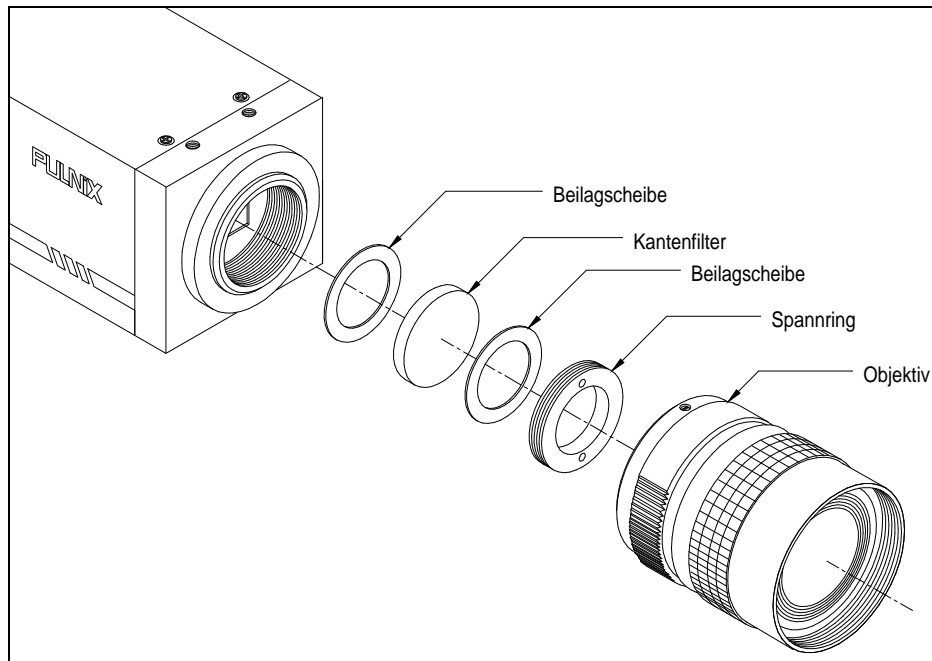


Bild 4.7: Einbau des IR/UV-Kantenfilters

In Diagramm 4.1 sind IR/UV-Filter und alle übrigen Komponenten des optischen Zugangs zu einem der Rechnung zugrundeliegenden Sekundärfilter zusammengefaßt.

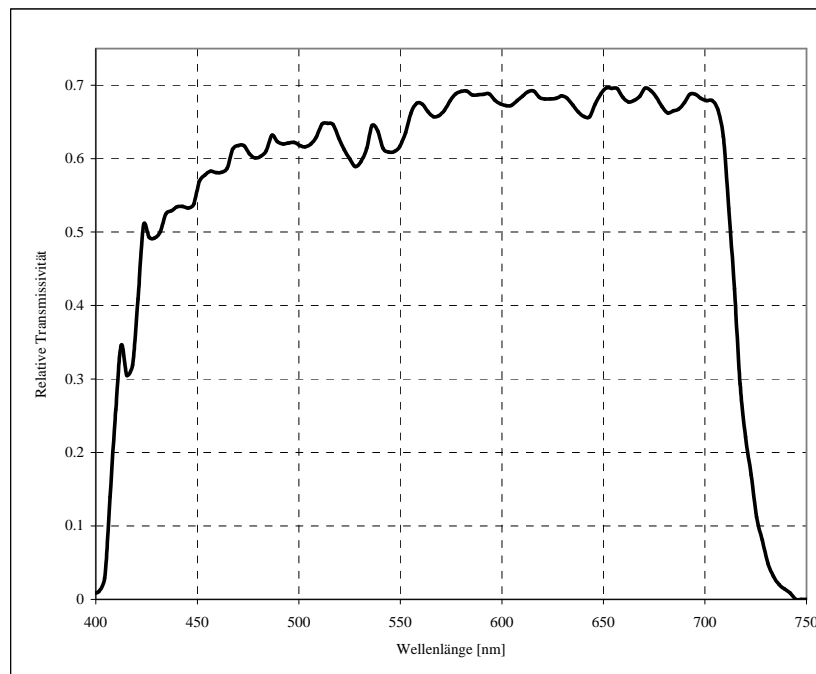


Diagramm 4.1: Spektrale Transmissivität der Optik (Beispiel)

4.3 Farb-Digitalkamera Pulnix TMC-9700

Im Bereich der Bilderfassung kommt eine neue Generation von digitalen Farbvideokameras zum Einsatz. In der Summe ihrer Eigenschaften setzt die im VideoScope eingesetzte Pulnix TMC 9700 (Bild 4.8) selbst heute, fast zwei Jahre nach ihrer Markteinführung, noch Maßstäbe.



Bild 4.8: Farbkamera Pulnix TMC 9700 (betriebsbereit)

Von besonderer Bedeutung für das Engine VideoScope sind folgende Leistungsdaten:

- 3G/RB Progressive Scan, Interline-Transfer Sensor
- integrierter 10bit A/D Wandler
- digitaler Bildspeicher (3x8bit)
- Signalprozessor zur Bildverbesserung
- Fast-Reset-Mode für getriggerte Bilderfassung
- programmierbare Analog- und Digitalverstärkung
- abschaltbare Gammakorrektur
- automatischer, manueller und programmierbarer Weißabgleich
- 24bit Digitalausgang
- RS-232-Schnittstelle zur Konfiguration via PC

Allein diese Eckdaten, die einem in der Konzeptionsphase des Systems noch vorläufigen Datenblatt entnommen wurden, veranlaßten uns, diese zu Entwicklungsbeginn nicht erhältliche Kamera einzusetzen. Da dem Sensorsystem eine zentrale Rolle für die Flammentemperaturmessung beizumessen ist, werden die Kameraeigenschaften, insbesondere der Bildsensor, an dieser Stelle ausführlich erläutert.

4.3.1 Bildsensor

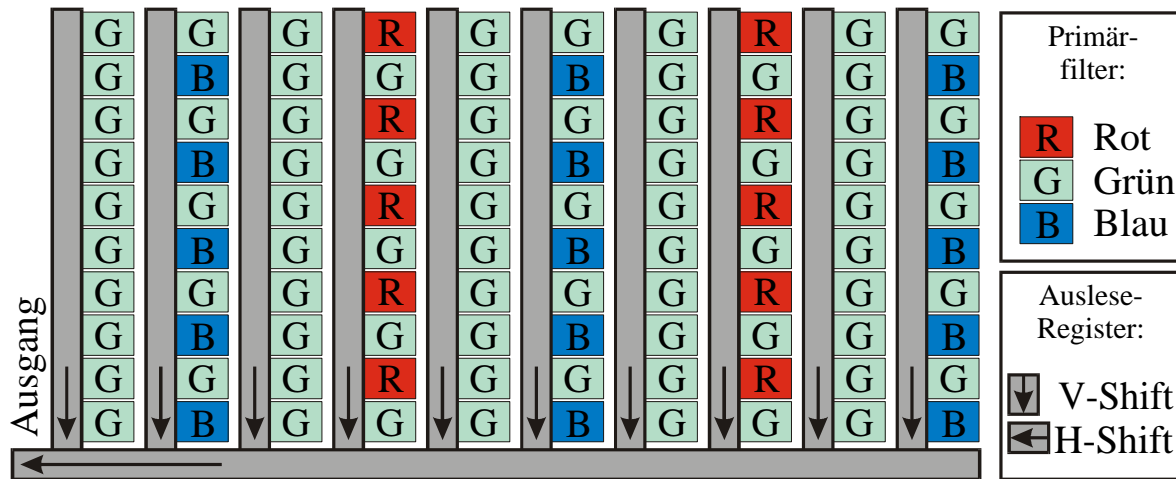


Bild 4.9: 3G/Staggered RB Kodak KAI-0371PCM Sensorstruktur

Im Gegensatz zu konventionellen Sensortypen, die zugunsten einer besseren Lichtempfindlichkeit auf Basis sekundärer Farbfilter arbeiten, liefert der Kodak-Sensor der TMC-9700 echte RGB-Daten. Die drei Farbfilter selbst sind gemäß Bild 4.9 nach dem Prinzip „3G / staggered RB“ aufgebracht; dies ist ein Zugeständnis an die subjektive Bildwahrnehmung, zumal das menschliche Auge im Grünbereich die höchste Empfindlichkeit aufweist und Signalrauschen in diesem Spektralbereich am störendsten empfunden wird. Für Meßzwecke ergibt sich damit für die beiden übrigen Farbkanäle, Rot und Blau, ein höheres Rauschen, als dies bei Bereitstellung derselben Sensorfläche für alle Farbanteile der Fall wäre. Dies ist ein Aspekt, der für die Implementierung der Temperatúrauswertung später auch Berücksichtigung findet. In Diagramm 4.2 sind nominale Empfindlichkeiten der Primärfilter dargestellt. Die deutlichen Nebenempfindlichkeiten im IR-Bereich erfordern den Einsatz eines Kantenfilters, der bereits zuvor beschrieben wurde.

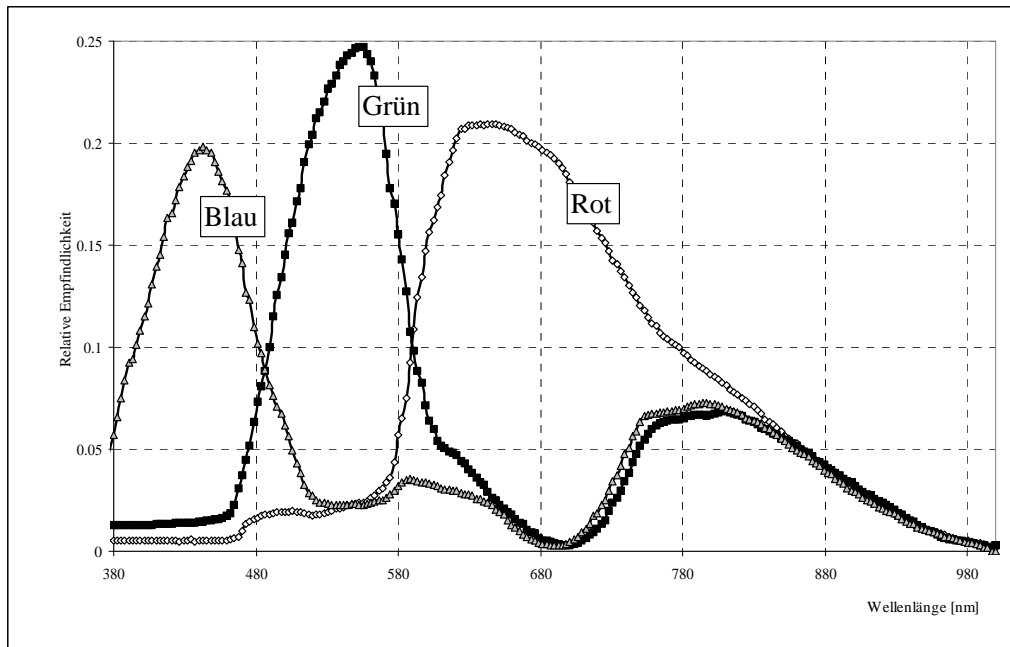


Diagramm 4.2: nominale Empfindlichkeit KAI-0371PCM

Aus der Prinzipskizze des des Sensors (Bild 4.9) ist auch das Prinzip des „Interline Transfers“ ersichtlich, bei dem die Auslesekanäle zwischen den Sensorelementen liegen. Dieser Auslesemechanismus ist für die Brauchbarkeit der Kamera zur Beobachtung selbstleuchtender Vorgänge von enormer Bedeutung; bei herkömmlichen Sensortypen sind die V-Shift-Register in Form eines Hidden-Layers direkt unter den Sensorelementen ausgeführt. Bei geschutterter Bildaufnahme werden die akkumulierten Ladungsträger nach Ablauf der Integrationsdauer durch einen Steuerimpuls in diesen Auslesekanal verschoben. Aus technologischen Gründen weist der Hidden-Layer eine Abdunkelung etwa in der Größenordnung 1/100 bis 1/1.000 auf. In üblichen Anwendungsfällen wird während der Integrationsdauer des Sensors bei geschutterter Bilderfassung die Szene durch Ansteuerung eines Blitzes zeitlich begrenzt aufgehellt, das Restlicht während des Auslesens spielt in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Betrachten wir nun einen selbstleuchtenden Vorgang, bei dem über den Zeitrahmen Messung – Auslesen gleichbleibende Lichtverhältnisse bestehen. Gehen wir von einer Belichtungsdauer mit 1/16.000s, einer Abdunkelung des Hidden-Layers von 1/1.000 und einer Auslesedauer von 1/30s aus, so ergibt sich für Bildpunkte am oberen Ende des Sensors etwa eine 500-fache Integrationsdauer im Hidden-Layer gegenüber der eigentlichen Belichtung. Setzen wir eine über den Auslesekanal homogene Ausleuchtung voraus, so wird letztlich am Ausgang der 1,5-fache Meßwert ausgegeben, bei Beobachtung einer orts- und zeitabhängigen Flamme wird bei Verwendung eines derartigen Sensors das Ergebnisbild verschmiert und ist damit unbrauchbar. Demgegenüber kann dieser Effekt mit dem verwendeten Interline-Transfermechanismus praktisch ausgeschlossen werden, allerdings geht auch hier wiederum die Qualität des Auslesemechanismus auf Kosten der Sensorfläche, die Lichtempfindlichkeit ist also gegenüber dem Hidden-Layer-Ausleseverfahren wiederum etwas verschlechtert.

Ein weiterer herausragender Punkt des Ausleseverfahrens liegt im „Progressive Scan“-Prinzip. Dies bedeutet, daß jeder Bildpunkt zum selben Zeitpunkt ausgelesen wird. Demgegenüber arbeiten Sensoren nach Videonorm nach dem „Interlacing“-Verfahren. In

diesem Zeilensprungverfahren wird im Zeitmultiplex jeweils nur ein Halbbild ausgelesen, das daraus resultierende Vollbild beinhaltet dementsprechend zwei Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten; für die Beobachtung dynamischer Vorgänge müßte bei Verwendung eines derartigen Sensors ein Halbbild verworfen werden.

Letztlich bleibt zu diskutieren, warum für die vorliegende Aufgabenstellung keine 3-Chip Kamera, also mit individuellen CCD-Chips für Rot, Grün und Blau verwendet wird. Die Messung am Motor erfolgt in der Regel durch ein mit der Kamera mechanisch gekoppeltes Endoskop. Wir ersehen daraus, daß Motor, Endoskop und Kamera ein schwingungsfähiges System bilden. Gehen wir nun umgekehrt von einer 3 Chip Kamera aus, so erkennen wir, daß das für die Strahlteilung erforderliche Spiegelsystem für die vorliegende Anwendung sehr kritisch wäre. Der wesentliche Vorteil der gewählten Single-Chip Lösung liegt also in deren Robustheit.

4.3.2 Integrierte A/D-Wandlung

Machine-Vision Systeme arbeiten auch heute noch fast ausschließlich mit Analogkameras, deren Bilddaten werden erst im Zielsystem unter Verwendung einer Frame-Grabber-Karte digitalisiert. Selbst die vorliegende Digitalkamera stellt die bereits in digitaler Form vorliegende Bildinformation an einem analogen Videoausgang bereit. Der Hersteller gibt an, daß bei neuen Systemen immer noch in über 90% der Anwendungsfälle der Analogausgang eingesetzt wird. Diese Tatsache erscheint auf ersten Blick absurd, aufgrund eigener Erfahrung während der Entwicklungstätigkeit sollen einige Aspekte die Gründe für diesen Status aufzeigen.

Für Kameras nach Videonorm existieren zahllose Frame-Grabber-Karten, die eine problemlose Integration in Vision-Systeme ermöglichen. Die Zusammenstellung erfordert dementsprechend minimalen technischen und finanziellen Aufwand.

Demgegenüber wurden von verschiedenen Kameraherstellern mangels vorhandener Standards verschiedenste digitale Schnittstellen realisiert. Während einige Kameras vom Hersteller komplett mit Interface-Karte geliefert werden (z.B. [PCO-Sens]), begnügen sich andere Hersteller damit, Signaltimings zu dokumentieren und es den Frame-Grabber-Herstellern zu überlassen, mit diesen Daten geeignete Boards zu entwickeln. Zu diesen Herstellern zählte offenbar auch die Firma Pulnix. Passend zur Kamera bot nur ein Frame-Grabber-Hersteller (Imaging Technologies, ITI) ein „vermutlich passendes“ Board an. Tatsächlich stellte sich heraus, daß weder die digitale Bildübertragung mit den auf Kameraseite bereitstehenden TTL-Signalen überhaupt möglich ist, noch eine phasenrichtige Abtastung im Frame-Grabber-Board stattfindet. Als Teil der Arbeiten mußte eine robuste Übertragungsstrecke zwischen Kamera und Frame-Grabber entwickelt werden, nach Aussagen von Pulnix und ITI dürfte zum Zeitpunkt der Fertigstellung damit weltweit erstmalig eine brauchbare digitale Verbindung zwischen der TMC-9700 und PC geschaffen worden sein, eine Tätigkeit, die im Rahmen einer „üblichen“ Systementwicklung einen unzumutbaren Aufwand darstellen würde.

Die so erreichten Vorteile eines volldigitalen Bildmanagements kommen neben überragender Akzeptanz durch den Kunden erst jetzt, also mit dem Einsatz des Engine VideoScope für Meßaufgaben, voll zum Tragen. Die Bilder werden nach erfolgter Digitalisierung in der

Kamera ohne Qualitätsverlust zum Zielsystem übertragen, Unschärfen in der Aufnahme bleiben zur Gänze auf den Bildsensor und auf die dem in der Kamera befindlichen A/D-Wandler vorgelagerte Analogschaltung beschränkt.

Eine generelle Überlegenheit digitaler Kameras mit eingebautem Bildspeicher liegt in der Tatsache, daß bei getriggelter Aufnahme die Bilder in der Kamera „eingefroren“ und zu einem beliebigen Zeitpunkt ausgelesen werden können, bei Analogkameras ist für diesen Fall eine weitere Synchronisation zwischen Kamera und Frame-Grabber-Board erforderlich, ein nicht triviales Problem, zumal fast alle Analog-Frame-Grabber mit PLLs auf das Kameratiming einschwingen und folglich ein Bild nach asynchroner Kameratriggerung nicht ohne weitere Maßnahmen erfassen können.

4.3.3 Triggerbarkeit

Nach Auftreten eines Triggerereignisses, etwa bei Erreichen eines bestimmten Winkelwertes, sollte unverzüglich die Kamera mit der Bilderfassung beginnen. Daß dies bei der TMC-9700 nicht der Fall ist, zeigt Bild 4.10.

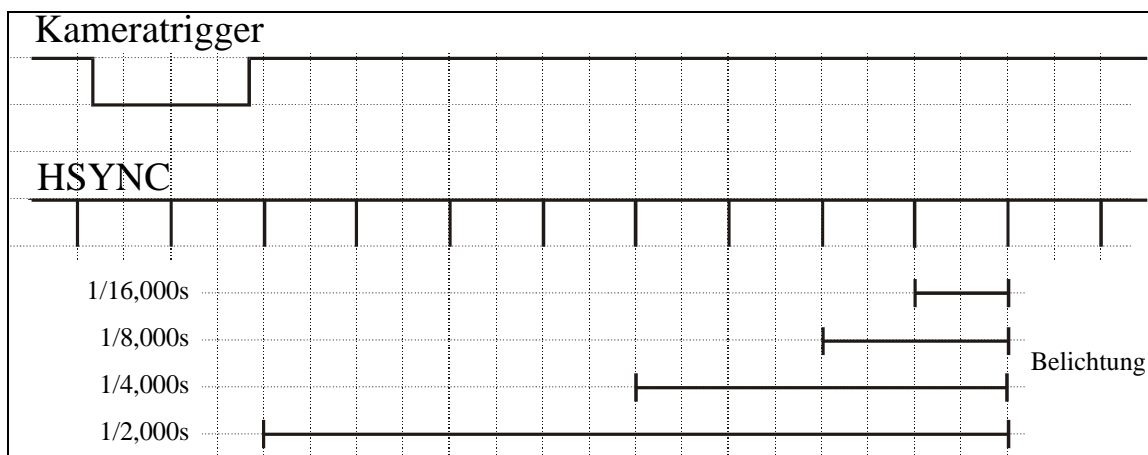


Bild 4.10: Triggertiming der Pulnix TMC-9700

Der Triggerimpuls wird erst mit fallendem HSYNC (Zeilenimpuls, $64\mu\text{s}$) übernommen. Daran anschließend verstreicht eine durch die Belichtungsdauer vorgegebene Zeitspanne, bis die Bildaufnahme startet; die Zeitverzögerung zwischen Triggerung und Messung beinhaltet einen zufälligen und einen determinierten Anteil. Die Kamera ist also auf ersten Blick für die vorliegende Problemstellung nicht brauchbar triggerbar. In Ermangelung weiterer Alternativen *mußte* das Problem dennoch gelöst werden. Die Entwicklung eines auf paralleler Hardware aufbauenden Triggerkonzeptes stellte eine der größten Herausforderungen der Systementwicklung dar, das Synchronisationsprinzip wird später in diesem Kapitel kurz beschrieben.

4.3.4 Weitere Kamerafunktionen

Ein integrierter Signalprozessor stellt einfache Operationen zur Bildmanipulation bereit, unter anderem die Umrechnung der Meßdaten über voreingestellte und definierbare Matrizen. Für eine Temperatureauswertung dürfen die Meßdaten keiner Umrechnung im Signalprozessor

zugeführt werden⁺ (s.a. [Kubinger]). Die Kamera bietet die Möglichkeit, wahlweise mit ein- oder ausgeschalteter Gamma-Korrektur zu arbeiten. Bei eingeschalteter Gamma-Korrektur wird bei der Aufnahme die nichtlineare Darstellungscharakteristik des Bildschirms ausgeglichen, um eine möglichst naturgetreue Darstellung zu erwirken. Für Meßzwecke ist ein linearer Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität und Meßwert wünschenswert, die Gamma-Korrektur ist in diesem Fall abzuschalten.

Die relativen Farbempfindlichkeiten können durch einen Weißabgleich angepaßt werden. Dies kann entweder automatisch (durch Kalibrierung an einer Referenzfläche), manuell (durch Vorgabe von Korrekturfaktoren) oder durch Programmierung erfolgen. Würde diese Möglichkeit im User-Interface bereitgestellt, so wäre für die Temperaturbildberechnung bei jeder Inbetriebnahme des Systems eine Neukalibrierung erforderlich. Diese Einstellmöglichkeit wurde dem Endkunden gezielt vorenthalten, sodaß nach einmaliger Kamerakalibrierung reproduzierbare Kameraeinstellungen vorliegen. Sämtliche Kamerafunktionen werden vom Benutzer im User-Interface des Engine VideoScope eingestellt, die Konfiguration erfolgt über eine serielle Verbindung zwischen Kamera und PC.

4.4 Bildübertragung und Echtzeithardware

4.4.1 Digitale Bilddatenübertragung in Video-Echtzeit

Die im Engine VideoScope eingesetzte Pulnix TMC 9700 stellt nach NTSC Videonorm 30 Bilder je Sekunde an mehreren Ausgängen bereit. Auch getriggert aufgenommene Bilder, die im Bildspeicher der Kamera eingefroren werden, werden nach Videonorm am Ausgang bereitgestellt. Dementsprechend müssen die digitalen Bilder bei paralleler Führung jedes Bits mit einer Rate von ca. 13MHz übertragen werden. Wie bereits an früherer Stelle angedeutet, haben erste Tests gezeigt, daß eine Bildübertragung zum Frame-Grabber auf Basis von TTL-Signalen selbst bei kürzesten Übertragungstrecken unbrauchbar ist. Für einen robusten Datentransfer wurden zur differentiellen Signalführung zwei Konverterboxen (Bild 4.11) bei Kamera und Frame-Grabber realisiert, zusätzlich ist für den Abtastzeitpunkt eine Phasenverschiebung des von der Kamera vorgegebenen Taktes vorgesehen, eine Maßnahme, die grundsätzlich als Einstellmöglichkeit beim Digital-Frame-Grabber vorhanden sein sollte.

⁺ Tatsächlich ist einem Bildpunkt nur ein Sensorelement, Rot, Grün, *oder* Blau nach Bild 4.9 zugeordnet. Das Farbtripel am Digitalausgang wird vom Signalprozessor aus den umgebenden Meßwerten interpoliert. Eine Abschaltung dieser Berechnung ist nicht möglich, der Algorithmus ist zudem nicht dokumentiert. Die erzielten Meßergebnisse deuten allerdings darauf hin, daß durch die stattfindende Berechnung keine gravierende Verfälschung der Sensordaten vorliegt.

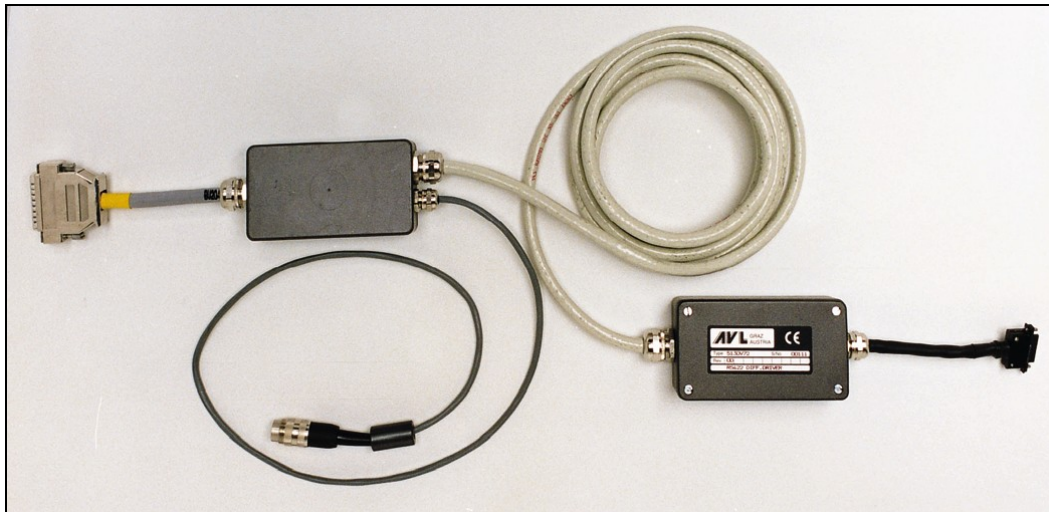


Bild 4.11: Differentielle Übertragungsstrecke

4.4.2 Echtzeithardware und Triggertechnik

Für eine prozeßsynchroner Bilderfassung mußte aufgrund der hohen Prozeßdynamik eine leistungsfähige Echtzeithardware (Bild 4.12) entwickelt werden. Zum geforderten Leistungsumfang zählte neben der Bereitstellung von Triggersignalen für Kamera und Stroboskop für winkelbezogene und zeitrichtige Synchronisation auch die Anbindung einer Stroboskopspitze zur Korrekturwinkleinstellung, eine Messung der aktuellen Motordrehzahl und eine Intensitätssteuerung des Blitzes.

Die Anforderungen an die Echtzeithardware sollen anhand eines Fallbeispiels diskutiert werden:

Bei 6.000U/min soll ein Bild bei einem definierten Kurbelwinkel φ_0 aufgenommen werden, dies mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ$ Kurbelwinkel. Zeitlich gesehen entspricht das Überstreichen eines Winkelintervalls von $0,1^\circ$ ca. $2,7\mu\text{s}$. Der Belichtungszeitpunkt der Kamera ist aufgrund des internen Triggertimings im Zeitrahmen eines HSYNCs ($64\mu\text{s}$) undefiniert, bei einer Belichtungsdauer von $1/16.000\text{s}$ liegt der Triggerzeitpunkt zwischen 8. und 9. HSYNC (vgl. Diagramm 4.10). Dementsprechend muß die Kamera bereits vor dem gewünschten Aufnahmewinkel getriggert werden, im vorliegenden Fall also bei ca. $\varphi_{\text{trig}} = \varphi_0 - 20^\circ$. Wird die Kamera zu diesem Zeitpunkt getriggert, so steht damit keineswegs fest, daß der Belichtungszeitpunkt im gültigen Winkelintervall beginnt. Es muß folglich zu Beginn der Belichtung entschieden werden, ob die Bilderfassung durchgeführt oder verworfen werden soll. Bei Validierung muß der gegebenenfalls zugeschaltete Blitz sofort getriggert werden. Da während der Messung auch Drehzahlschwankungen auftreten können, muß der Triggerwinkel φ_{trig} nach einer Fehltriggerung dynamisch korrigiert werden. Außerdem ist in der Schaltungsauslegung zu berücksichtigen, daß die maximale Kamera-Triggerrate aufgrund des Sensor-Auslesetimings mit 30Hz limitiert ist, bei 6.000U/min kann folglich nur 1 Triggerversuch je 4 Motorumdrehungen durchgeführt werden.

Die Hardware beruht auf einem XC4010 FPGA-Baustein [Xilinx]. Damit ist es möglich, mehrere Prozesse parallel in Hardware zu programmieren. Die Echtzeithardware ist in Form

einer 16bit ISA-Einsteckkarte mit je 16 digitalen Ein- und Ausgängen realisiert, und ist somit flexibel einsetz- und erweiterbar.

Eine ausführliche Dokumentation von Hardware und Schaltungsrealisierung findet sich in [Drnek2], ein auf die Beobachtung einmaliger Vorgänge ausgelegtes Triggerkonzept wurde unter Verwendung derselben Echtzeithardware am Institut im Rahmen einer Diplomarbeit erarbeitet [Hohl]; ein auf Basis der Echtzeithardware realisiertes flexibel einsetzbares Machine-Vision-System mit konfigurierbaren Synchronisations- und Steuerungsfunktionen wurde in [Schmid2] vorgestellt.

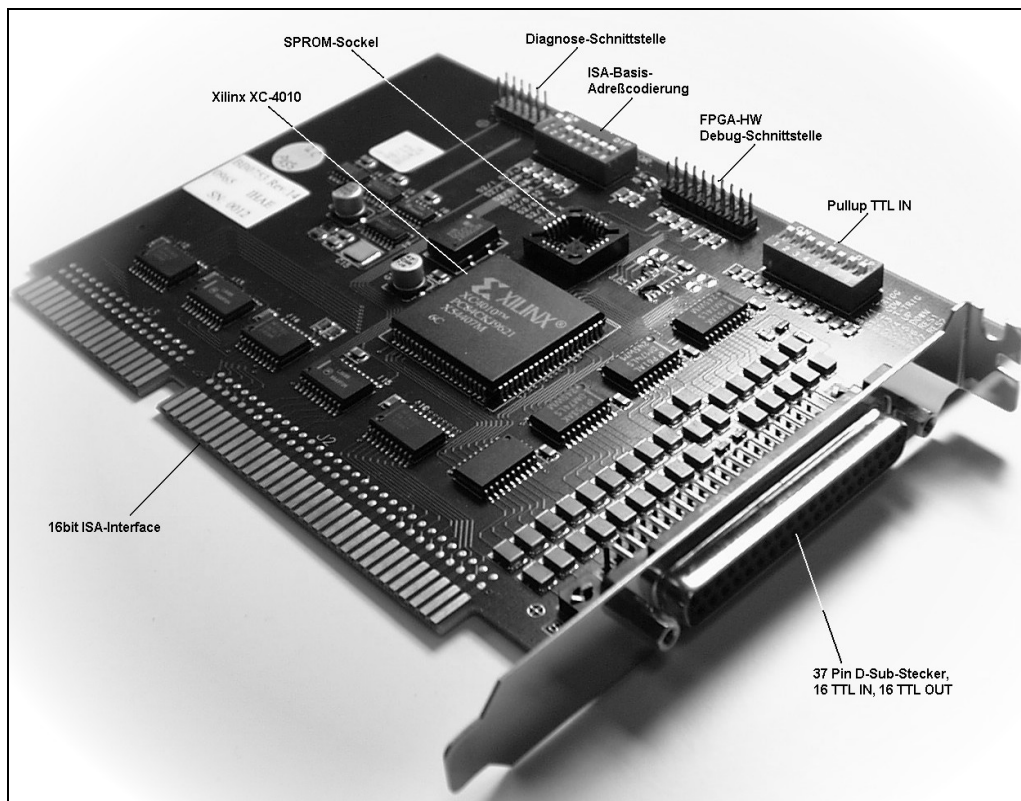


Bild 4.12: Echtzeithardware

4.5 Softwarekonzept und Datenstrukturen

Eine ausführliche Darstellung des User-Interfaces ist [AVL-EVS] zu entnehmen, die besonderen Merkmale der vorliegenden, anwendungsorientierten Softwarearchitektur ist in [Schmid3] nachzulesen. In dieser Arbeit wird lediglich ein kurzer Abriss über grundlegende Konzepte gegeben.

4.5.1 User-Interface

Im Engine VideoScope-Software werden sehr umfangreiche Datenmengen verwaltet. Um dem Nutzer einen geordneten Zugang zu diesem Datenmaterial zu bieten, wurde die Software so ausgelegt, daß unterschiedliche Informationen und Funktionen auf mehrere Child Windows abgebildet werden (Bild 4.13). Im Gegensatz zu einem Online-Fenster und einem

Projekttextfenster, die am Arbeitsplatz nur einmalig vorhanden sind, gibt es beliebig viele Recordfenster.

Den Umfang der zu einem Zeitpunkt zugänglichen Information wird durch den Anwender bestimmt, indem er zusammengehörige Daten zu einem Projekt zusammenfaßt. Innerhalb eines derartigen Projektes können im bereits erwähnten Online Fenster (Bild 4.14) Systemeinstellungen vorgenommen werden (Einstellung der Optik, Korrekturwinkel, Kamerakonfiguration etc.). Darüberhinaus werden in diesem Fenster alle Methoden zur Prozeßbeobachtung sowie zur Erstellung von sogenannten Records bereitgestellt.

Ein im Online-Fenster erzeugter Record (im User-Interface repräsentiert durch ein Record-Fenster, Bild 4.15) enthält neben einer aufgenommenen Sequenz von Bildern auch Daten (Momentandrehzahl bei der Aufnahme eines Bildes, Abweichung der Aufnahme vom Sollwert etc.) sowie ein automatisch erstelltes, editierbares Protokoll.

Sowohl im Online Fenster als auch in jedem Recordfenster stehen Buttons für die Wiedergabe und die manuelle Weiterschaltung zur Verfügung. In jedem Recordfenster stehen Auswahlmöglichkeiten bereit, die es erlauben, Ausschnitte innerhalb eines Bildes auszuwählen und einen Teil des Aufnahmebereichs zu markieren. Damit kann der Visualisierungsbereich für die Animation der Bildfolge eingegrenzt, und der Gültigkeitsbereich für Bildnachbearbeitungsoperationen festgelegt werden.

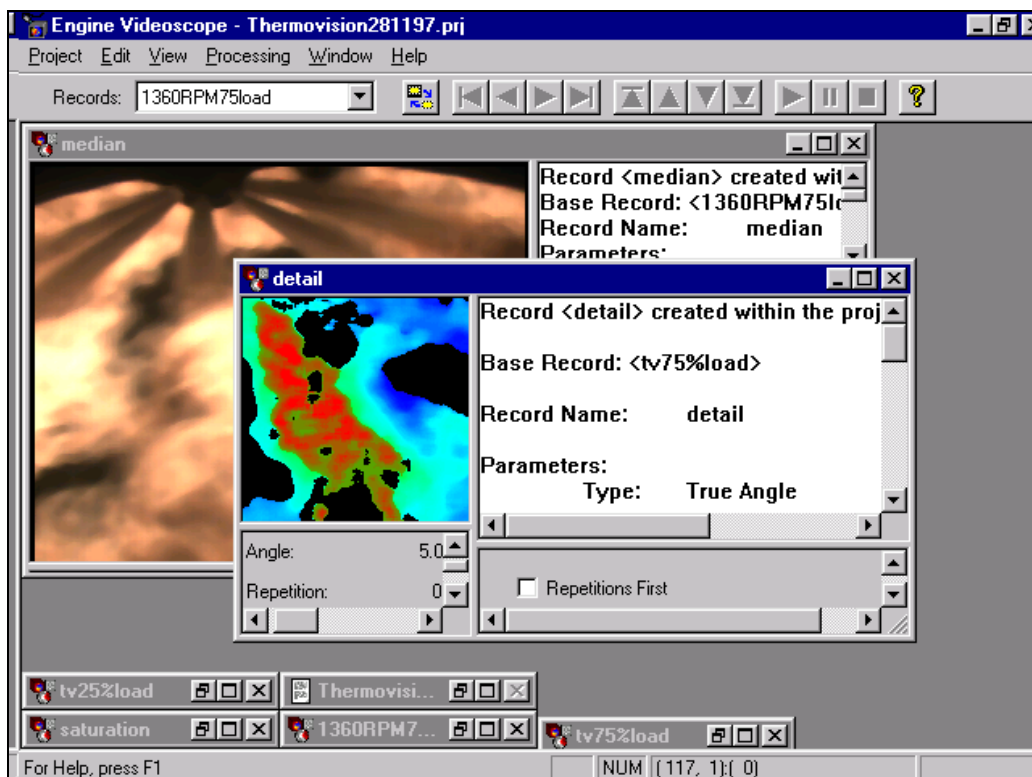


Bild 4.13: Engine-VideoScope User-Interface

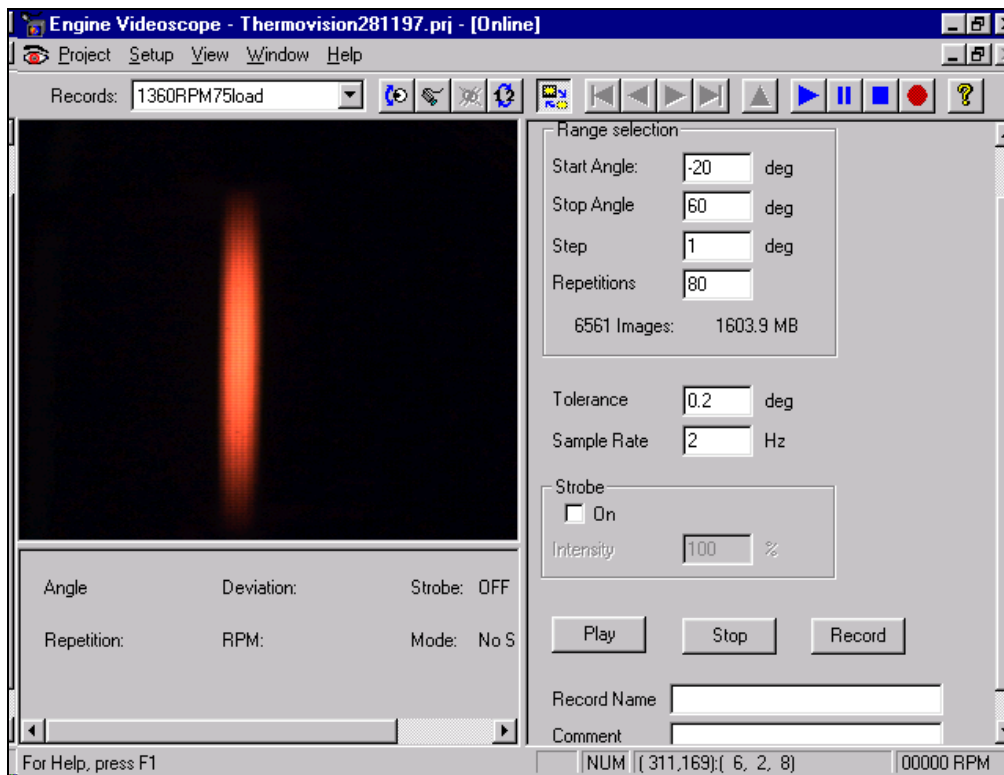


Bild 4.14: Engine-VideoScope Online-Fenster

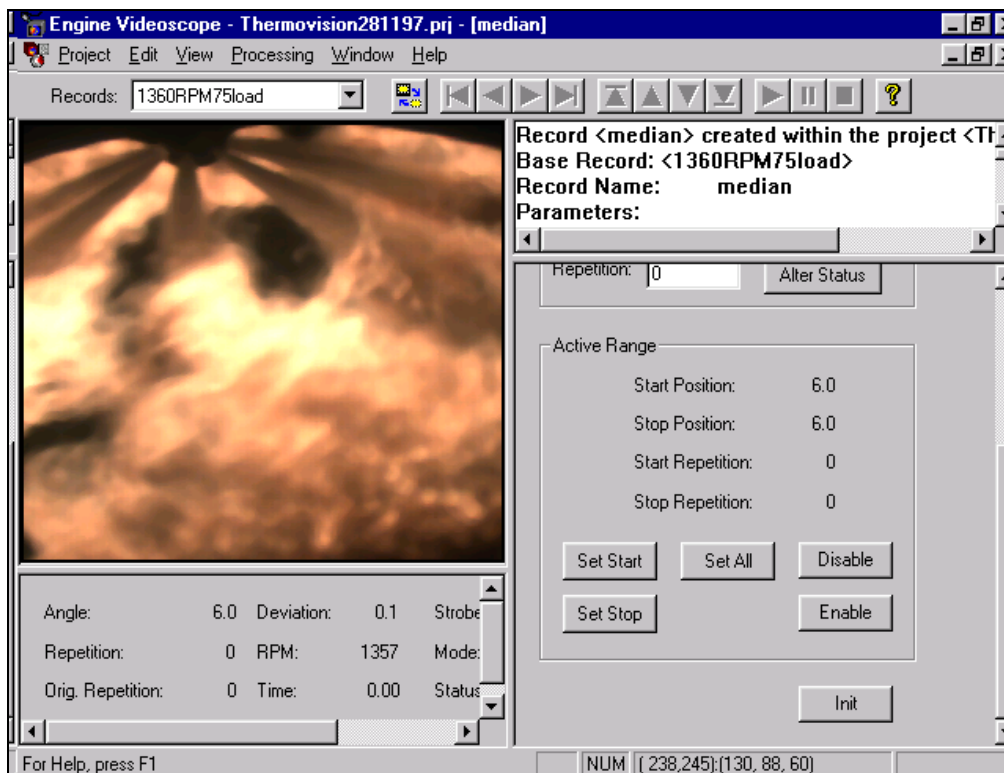


Bild 4.15: Engine-VideoScope Record-Fenster

4.5.2 Datenstrukturen

Bild 4.16 zeigt den grundlegenden Aufbau eines EVS-Projektes. Neben Konfigurationsdaten (Kamera, Optik, Beleuchtung und Prüfstand) und projektspezifischen Daten werden in einem Textprotokoll automatisch alle relevanten Bedienschritte dokumentiert und archiviert. Aufnahme- und nachbearbeitete Bildsequenzen sind linear organisiert, das heißt, ein einzelner Record wird aus einer alphabetisch geordneten Liste durch seinen Namen ausgewählt, zwischen aufgenommenen und bearbeiteten Records wird nicht unterschieden.

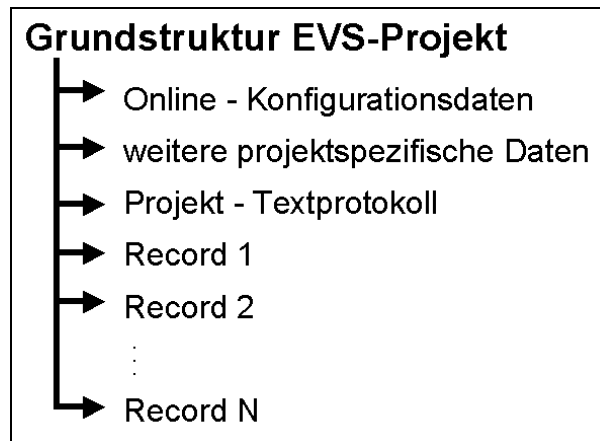


Bild 4.16: EVS-Projekt

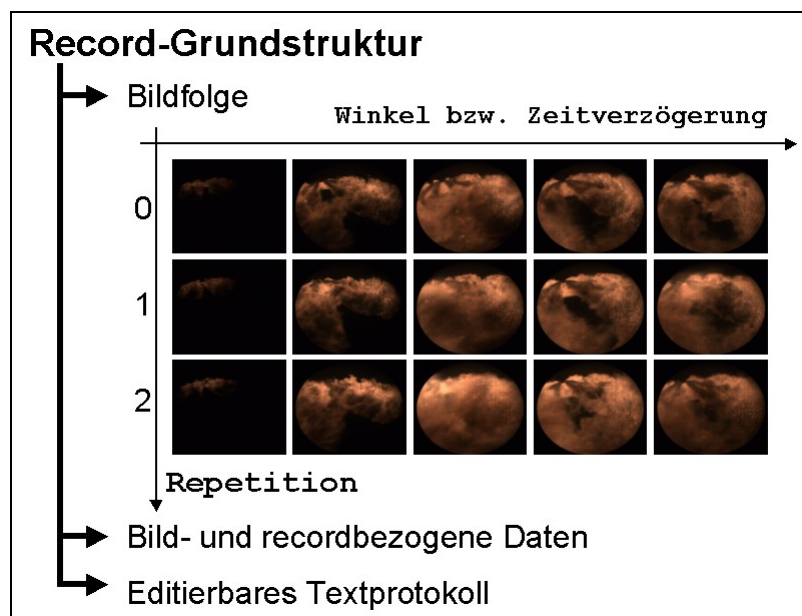


Bild 4.17: Record-Grundstruktur

Die Organisation von Bildfolgen und zugehörigen Daten ist anschaulich in Bild 4.17 dargestellt. In horizontaler Richtung wird die Anzahl der Bilder durch einen Startwert (Anfangswinkel oder Zeitverzögerungsstartwert), durch einen Stopwert (Endwinkel oder Zeitverzögerungsstopwert) und eine Schrittweite (Winkel- oder Zeitverzögerungsschrittweite) festgelegt. In vertikaler Richtung sind die Aufnahmewiederholungen, die sogenannten Repetitionen angeordnet. Eine derartige, matrixförmige Struktur erlaubt neben der

Darstellung eines ablaufenden Prozesses insbesondere eine direkte Bewertung zyklischer Schwankungen. Neben diesen Bildern enthält jeder Record bildbezogene Zusatzinformationen sowie ein benutzereditierbares Textprotokoll und weitere recordbezogene Daten.

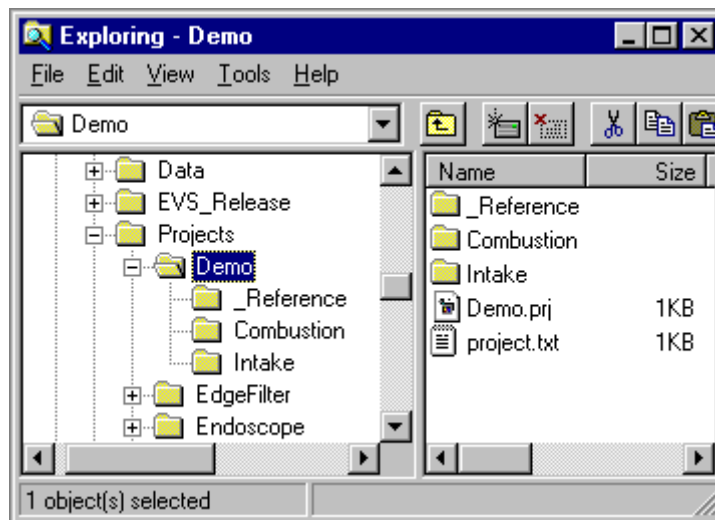


Bild 4.18: Projektstruktur auf Dateiebene

Auf Dateiebene wird ein Projekt jeweils einem eigenen Unterverzeichnis zugeordnet. Im Beispiel (Bild 4.18) ist das Projekt mit der Bezeichnung "Demo" im Ordner "Projects" enthalten. Neben zwei Records "Combustion" und "Intake" ist ein weiteres Unterverzeichnis namens "_Reference" angelegt; dieses Unterverzeichnis kann Referenzbilder für die reproduzierbare Einstellung des optischen Zugangs und für die Bildnachbearbeitung beinhalten. Projektspezifische Informationen sind in einem .prj-File gespeichert, das projektbezogene Textprotokoll unter dem Namen "Project.txt".

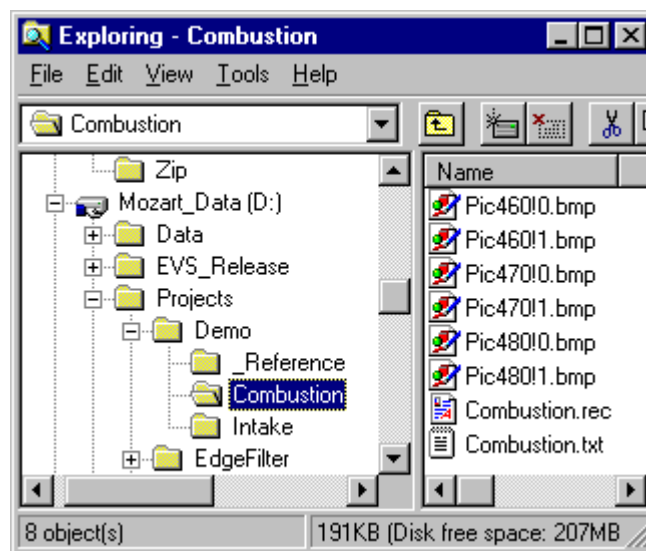


Bild 4.19: Recordstruktur auf Dateiebene

Das Unterverzeichnis „Combustion“ (Bild 4.19) enthält alle Bilder und Zusatzinformationen, die zum gleichnamigen Record gehören. Im File „Combustion.rec“ sind recordspezifische Daten gespeichert, das Textfile „Combustion.txt“ ist das recordbezogene Textprotokoll. Im selben Verzeichnis befindet sich schließlich auch das Bildmaterial in Form von Bitmap-

Bildern, deren Anzahl und Größe bei der Aufnahme festgelegt wurde. Die Namen werden folgendermaßen vergeben: Nach der gleichbleibenden Bezeichnung „Pic“ folgt die Winkelangabe in Vielfachen von $0,1^\circ$ bzw. bei zeitverzögerter Aufnahme die Verzögerung in Vielfachen von $1\mu\text{s}$. Die zweite Zahl, die von der ersten durch ein Rufzeichen getrennt ist, repräsentiert die Repetitionsnummer.

5. Modellbildung

In den bisherigen Kapiteln wurden technische und physikalische Grundlagen beschrieben. Es wurde gezeigt, daß zwischen den Eigenschaften eines Oberflächenstrahlers und denen eines Volumenstrahlers wesentliche Unterschiede bestehen, die bei einer Meßdatenauswertung in jedem Fall berücksichtigt werden müssen. Weiters wurde festgestellt, daß die Meßwerterfassung nach Digitalisierung der Meßdaten in der Farbkamera abgeschlossen ist.

Wir werden in diesem Kapitel darstellen, welche Eingangsdaten mit Modell und Messung bereitstehen und welche Informationen für eine Temperaturmessung benötigt werden.

Es wird sich zeigen, daß bei der Messung an einem Oberflächenstrahler mit bekanntem Emissionsvermögen eine Temperatur ausschließlich auf Basis eines relativen Farbwertes abgeleitet werden kann.

Selbst für die Temperaturmessung an der Diffusionsflamme steht, unter der Voraussetzung lokaler Homogenität, mit zwei Farbwerten die erforderliche Information für eine eindeutige Temperaturberechnung zur Verfügung, wobei die optischen Korrekturfaktoren zunächst als bekannt angenommen werden.

Nach Darstellung der vorgeschlagenen Temperaturmeßverfahren wird die Modellbildung für die Kalibrierung der Messkette diskutiert.

5.1 Grundkonzept von Messung und Auswertung

Tabelle 5.1 zeigt die Grundstruktur für Meßdatenerfassung und –auswertung; jeder Teil des Verfahrens kann sowohl unter dem Aspekt eines realen Systems als auch unter dem eines Modells betrachtet werden. Die Darstellung beinhaltet sowohl die erstmalige Kalibrierung des Meßsystems an einem Referenzstrahler (Wolframbandlampe) als auch die Messung an der dieselmotorischen Flamme.

Während Teilprobleme der Zuordnung eines geeigneten Modells keine bedeutenden Schwierigkeiten bereiten, sind andere Teile des realen Systems meßtechnisch nicht vollständig erfaßbar, sodaß nur anhand vorliegender Auswertergebnisse eine Verfeinerung des Modells abgeleitet werden kann, bzw. daß nicht kompensierbare Meßfehler aufgezeigt werden können.

Die Aufgabe einer erstmaligen Kalibrierung der Meßkette liegt darin, für eine vermessene Strahlungsquelle festzustellen, ob unter Laborbedingungen eine hinreichend genaue Zuordnung zwischen Spezifikation der Strahlungsquelle nach Datenblatt und berechneter Ergebnistemperatur vorliegt. Während der Arbeiten wurde durch die Überbestimmtheit der Meßdaten festgestellt, daß eine Annahme der primären Farbfilter nach Datenblatt auf widersprüchliche Temperaturwerte führt. Da eine exakte Vermessung der Primärfilter nicht durchgeführt werden konnte, waren ausführliche Untersuchungen bezüglich der Querempfindlichkeiten zwischen Änderung der Filterkurven und Ergebnistemperatur erforderlich. Es hat sich allerdings nach dieser recht langwierigen Prozedur herausgestellt, daß

alle bisher vermessenen Kameras durch die so gefundenen Kennlinien mit hinreichender Genauigkeit beschreibbar sind. Im Zuge der erstmaligen Kalibriermessung am Referenzstrahler werden darüberhinaus ausschließlich optische Korrekturfaktoren ermittelt, die den kamerainternen Weißabgleich beschreiben; eine Zuordnung von Strahlungsintensität und Meßwert wird für die Messung am Wolframband nicht benötigt.

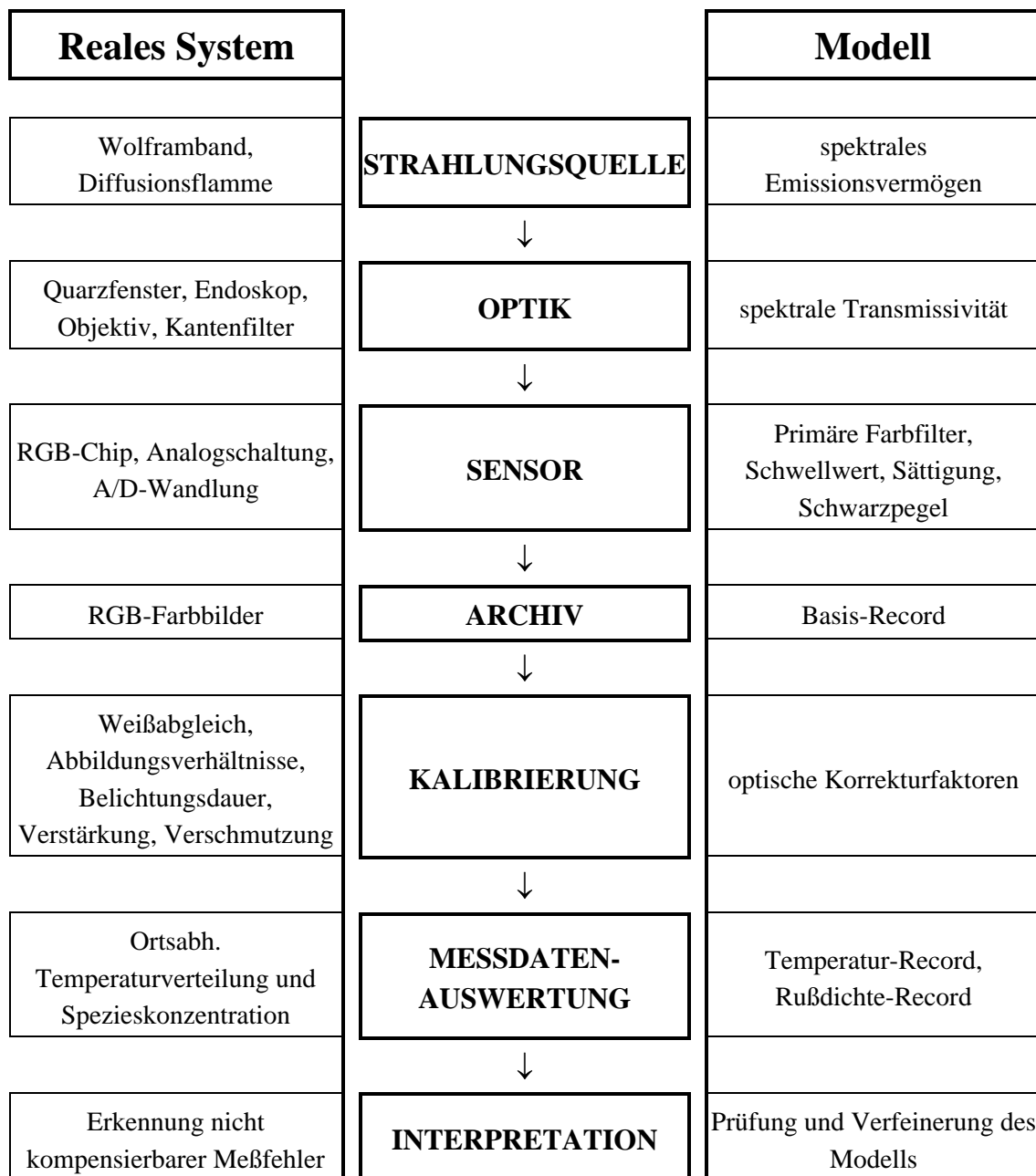


Tabelle 5.1: Grobkonzept von Messung und Meßdatenauswertung

Geht man von der rußenden Dieselflamme aus, so haben wir bereits festgestellt, daß sich aus der Meßtechnik zwingend ein grob vereinfachtes beschreibendes Modell ergibt. Da reale Temperaturverteilungen und räumliche Rußdichteverteilung an der dieselmotorischen Flamme mit heutiger Meßtechnik nicht vollständig erfaßbar sind, wird in einem späteren Kapitel das reale System „Diffusionsflamme“ durch ein Mehrschichtmodell unter

Einbeziehung verschiedener, jeweils bekannter Störgrößen ersetzt, um damit Meßfehler an der Flamme erkennen zu können.

Im Rahmen dieses Kapitels werden wir ausschließlich beschreiben, wie über eine Modellbildung eine Zuordnungsvorschrift zwischen Meßgröße und Ergebnisgrößen hergestellt werden kann. Die Einbeziehung realer Eigenschaften von Strahlungsquelle und Meßkette erfolgt in späteren Kapiteln.

5.2 Gegenüberstellung von Meßgröße und Modell

Vom System werden Szenen, die einen allgemeinen Temperaturstrahler zeigen, in digitaler Form als Farbbilder gespeichert. Unter (2.8) wurde ein ausschließlich Temperatur- und wellenlängenabhängiges Emissionsvermögen angesetzt. Diese Annahme ist genau dann gültig, wenn der Messung ein Oberflächenstrahler mit ortsunabhängiger Emissivität zugrunde liegt. Definiert man hingegen ein von einem weiteren Parameter abhängiges Emissionsvermögen, so kann der allgemeine Fall einer beliebigen Anordnung von Temperaturstrahlern in der Szene beschrieben werden. Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnen wir diesen Parameter mit k_{ks} .

Es sei $\mathbf{K}_{ks,th}$ die Menge aller gültigen Parameter k_{ks} [k_{ksmin}, k_{ksmax}] und \mathbf{T} der für eine Messung relevante Temperaturbereich [T_{min}, T_{max}].

Die Elemente eines beliebigen Farbtripels $\underline{P}_{mess}=(R_{mess}, G_{mess}, B_{mess})$ liegen aufgrund der verwendeten Hardware als ganze Zahlen im Wertebereich [0,...,255] vor. Nach Subtraktion eines Dunkelbildes⁺, dessen Farbtripel wir an einem definierten Bildpunkt mit $\underline{P}_{dunkel}=(R_{dunkel}, G_{dunkel}, B_{dunkel})$ bezeichnen, liegen die der Meßdatenauswertung zugrundeliegenden Farbwerte, die wir in diesem Rahmen als $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$ bezeichnen, vor:

$$\begin{aligned} R_{mess} &= R_{dunkel} + R_{lin} \\ G_{mess} &= G_{dunkel} + G_{lin} \\ B_{mess} &= B_{dunkel} + B_{lin} \end{aligned} \tag{5.1a-c}$$

Schließlich werden neben diesen diskreten Werten dem Zahlentripel $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$ für die folgenden Betrachtungen kontinuierliche, aber ebenfalls normierte Größen (R_{th}, G_{th}, B_{th}) zugeordnet, die im Gegensatz zu den linearen Meßwerten von der Modellbildung abgeleitet werden.

⁺ Aufnahme bei verschwindendem Umgebungslicht

Wir ordnen den einzelnen Farbkanälen spektral bewertete, normierte lokale Bestrahlungen zu:

$$\begin{aligned}
 R_{th}(T, k_{ks}) &= k_{opt} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda, T, k_{ks}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda \\
 G_{th}(T, k_{ks}) &= \frac{k_{opt}}{k_{grün}} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda, T, k_{ks}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_G(\lambda) \cdot d\lambda \\
 B_{th}(T, k_{ks}) &= \frac{k_{opt}}{k_{blau}} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda, T, k_{ks}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_B(\lambda) \cdot d\lambda
 \end{aligned} \tag{5.2a-c}$$

Ein optischer Korrekturfaktor für die Rotkomponente wird willkürlich einem gemeinsamen Korrekturfaktor k_{opt} gleichgesetzt, während die übrigen Korrekturfaktoren für Grün und Blau weiter aufgeschlüsselt werden. $k_{grün}$ und k_{blau} sind ausschließlich vom eingestellten Weißabgleich an der Kamera abhängig, während k_{opt} von mehreren Einflußgrößen bestimmt wird:

- Geometrische Abbildungsverhältnisse
- Blendenstellung
- Belichtungsdauer
- Kameraverstärkung
- Verschmutzung des optischen Zugangs

Für weitere Betrachtungen definieren wir neben (5.2) auch folgende Relativwerte⁺:

$$rg_{th}(T, k_{ks}) = \frac{R_{th}(T, k_{ks})}{G_{th}(T, k_{ks})} \tag{5.3a}$$

$$rb_{th}(T, k_{ks}) = \frac{R_{th}(T, k_{ks})}{B_{th}(T, k_{ks})} \tag{5.3b}$$

Ausgehend von (5.2) und (5.3) kommen abhängig von der Art der Strahlungsquelle verschiedene Auswerteverfahren in Frage, nämlich auf Basis

- eines Farbkanales
- eines relativen Farbwertes
- zweier Relativwerte
- eines Relativ- und eines Absolutwertes
- zweier Relativwerte und eines Absolutwertes

Die beiden erstgenannten Verfahren sind nur dann anwendbar, wenn das Emissionsvermögen ausschließlich wellenlängen- und temperaturabhängig ist. Im allgemeinen steigt dann die Strahlungsintensität mit der Temperatur, während sich ein Farbverhältnis mit der längerwelligen Komponente im Zähler mit zunehmender Temperatur verringert. Die

⁺ Zwei Sätze von relativen Farbwerten definieren auch das dritte Verhältnis eindeutig

genannten Bedingungen sind typisch bei homogenen Oberflächenstrahlern in definierter Lage relativ zum Sensor gegeben.

Wir diskutieren an dieser Stelle die Temperatúrauswertung auf Basis eines relativen Farbwertes, der für die Kalibrierung und zur Bestimmung von Schwarzen Temperaturen an der Dieselflamme eingesetzt wird. Zur Berechnung von wahren Temperaturen der Dieselflamme wird im Rahmen dieser Arbeit eine Auswertung auf Basis eines Relativ- und eines Absolutwertes vorgeschlagen. Wir werden zunächst davon ausgehen, daß die optischen Korrekturfaktoren k_{opt} , $k_{grün}$ und k_{blau} aufgrund vorgelagerter Kalibrierschritte bekannt sind. Das Kapitel schließt mit der Darstellung der Modellbildung zur Ermittlung dieser Korrekturfaktoren.

5.3 Auswertung auf Basis eines relativen Farbwertes

Setzt man voraus, daß in (5.3) der Parameter $k_{ks}=k_{ks0}$ gegeben bzw. der relative Farbwert ausschließlich von der Temperatur abhängig ist, so ist eine Temperaturbestimmung auf Basis von nur einem Farbverhältnis möglich. Aus (5.3a) erhält man mit (5.2) die Ergebnistemperatur T durch Lösen einer der beiden Gleichungen

$$rg_{th}(T, k_{ks0}) - \frac{R_{lin}}{G_{lin}} = 0 \tag{5.4a}$$

$$rb_{th}(T, k_{ks0}) - \frac{R_{lin}}{B_{lin}} = 0 \tag{5.4b}$$

5.4 Auswertung auf Basis eines Relativ- und eines Absolutwertes

Dabei wird das Wertepaar (k_{ks0}, T_0) auf Basis einer gemessenen Intensität und eines Farbverhältnisses ermittelt. Da dieses Verfahren ausschließlich für die Temperaturbestimmung an der rußenden Dieselflamme verwendet wird, setzen wir das Emissionsvermögen in (5.2) nach (2.20) an.

$$R_{th}(T, k_{ks}) = k_{opt} \cdot c_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(1 - e^{-\frac{k_{ks}}{\lambda}} \right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda \tag{5.5}$$

$$rg_{th}(T, k_{ks}) = \frac{R_{th}(T, k_{ks})}{G_{th}(T, k_{ks})} = k_{grün} \cdot \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(1 - e^{-\frac{k_{ks}}{\lambda}} \right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(1 - e^{-\frac{k_{ks}}{\lambda}} \right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_G(\lambda) \cdot d\lambda} \tag{5.6}$$

Dabei wurde der bereits eingeführte Parameter k_{ks} dem in (2.21) verwendeten Produkt $k \cdot s$ zugeordnet.

Bereits an früherer Stelle wurde dargestellt, daß das Emissionsvermögen im betrachteten Spektralbereich $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ nur dann merkbar frequenzabhängig ist, wenn die Bedingung $k_{ks} \approx \lambda$

für $\lambda_{min} < \lambda < \lambda_{max}$ nicht grob verletzt ist. Im Übergangsbereich wird der Satz von Relativwerten nach k_{ks} so aufgelöst, daß in der Mitte des Temperaturbereiches eine äquidistante Auflösung der resultierenden Kurvenschar vorliegt (Diagramm 5.1). Man erkennt, daß auf Basis eines gemessenen Relativwertes der in Frage kommende Temperaturbereich bereits eingegrenzt ist.

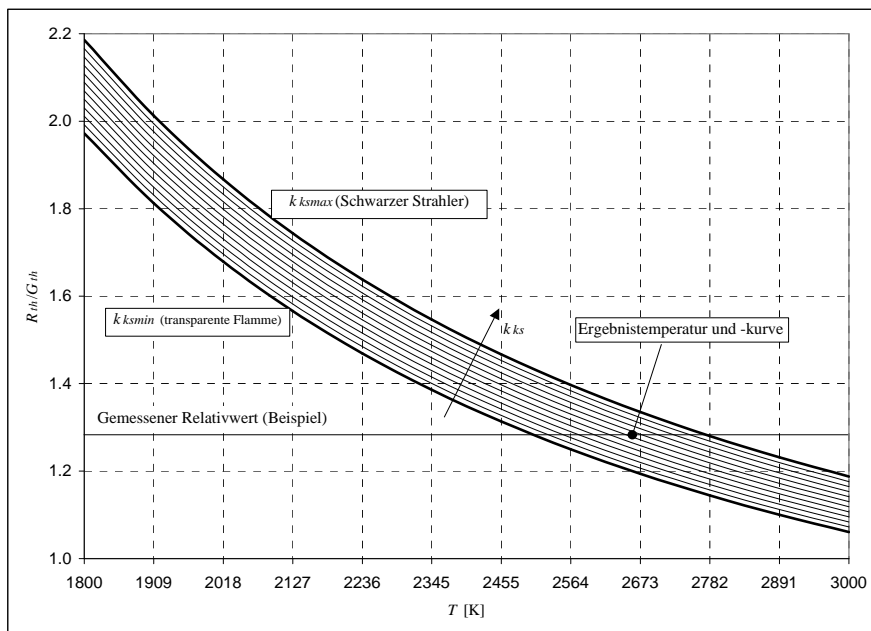


Diagramm 5.1: Relative Farbwerte mit Scharparameter k_{ks}

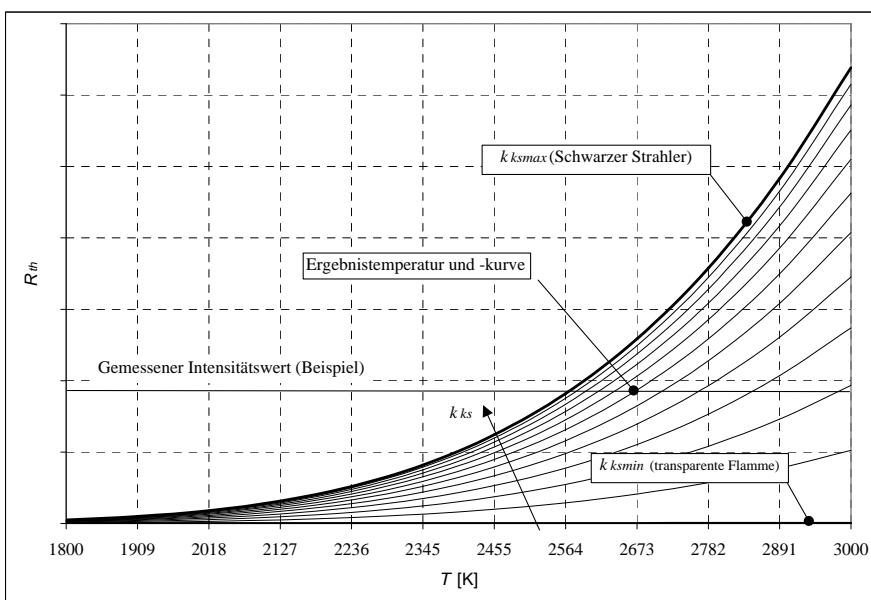


Diagramm 5.2: Strahlungsintensität mit Scharparameter k_{ks}

Analog zu der Schar der Relativwerte gemäß Diagramm 5.1 erhalten wir eine Kurvenschar für die Helligkeit des Rotanteils, dargestellt in Diagramm 5.2. Die Zuordnung der Ergebnistemperatur erfolgt bei Kenntnis der beiden Kurvenscharen, indem jener Kurvenparameter k_{ks0} gefunden wird (vgl. Beispiel in Diagramm 5.1 und 5.2), für den

Intensität und Relativwert auf dieselbe Ergebnistemperatur führt. Sind die optischen Korrekturfaktoren k_{opt} und $k_{grün}$ bekannt, so kann die Temperaturberechnung durch Lösung des folgenden Gleichungssystems erfolgen:

$$\left[R_{th}(T, k_{ks}) \cong R_{lin} \right] \cap \left[rg_{th}(T, k_{ks}) \cong \frac{R_{lin}}{G_{lin}} \right] \quad (5.7)$$

5.5 Modellbildung für die Kalibrierung des Meßsystems

Die Aufgabe, die optischen Korrekturfaktoren k_{opt} , $k_{grün}$ und k_{blau} zu finden, wurde aufgrund gesammelter Erfahrungswerte in zwei zeitlich und in der Methodik völlig entkoppelte Kalibrierschritte zerlegt.

Die erste Teilaufgabe besteht darin, unter Bedacht auf höchstmögliche Genauigkeit an einem Referenzstrahler den Weißabgleich der Kamera festzustellen, sowie das spektrale Verhalten von Kamera und Optik zu prüfen und gegebenenfalls im Modell zu verfeinern; diese Kalibrierung geschieht einmalig vor Auslieferung des Meßsystems.

Der zweite Kalibrierschritt liegt in der Bestimmung des optischen Korrekturfaktors k_{opt} und muß für jede Messung am Prüfstand erneut durchgeführt werden. Im Gegensatz zur erstmaligen Kalibrierung des Meßsystems konnte dazu ein rein modellbasiertes Verfahren realisiert werden, welches den zunächst unbekanntem Korrekturfaktor allein von den aufgenommenen Bilddaten ableiten kann.

5.5.1 Erstmalige Kalibrierung der Meßkette

Das Ziel der einmaligen Kalibrierung liegt darin,

- die optischen Korrekturfaktoren so zu finden, daß in einem Kalibrierpunkt ($T_{cal}, k_{ks,cal}$)⁺ die Bedingung

$$\begin{aligned} & \left[R_{lin}(T_{cal}, k_{ks,cal}) = R_{th}(T_{cal}, k_{ks,cal}) \right] \cap \\ & \left[G_{lin}(T_{cal}, k_{ks,cal}) = G_{th}(T_{cal}, k_{ks,cal}) \right] \cap \\ & \left[B_{lin}(T_{cal}, k_{ks,cal}) = B_{th}(T_{cal}, k_{ks,cal}) \right] \end{aligned} \quad (5.8)$$

erfüllt ist und daß

- für einen Referenzstrahler mit genau definierten Strahlungseigenschaften verifiziert wird, daß die spektralen Transmissivitäten des Modells mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden:

⁺ obwohl hier der allgemeine Fall mit zwei Bestimmungsgrößen T_{cal} und k_{ks} dargestellt ist, kann für die später dargestellte Kalibrierung am Wolframband davon ausgegangen werden, daß T_{cal} ausschließlicher Bestimmungsparameter ist.

$$\begin{aligned}
 [R_{lin} &\cong R_{th}(T, k_{ks}) \forall ((T \in \mathbf{T}) \cap (k_{ks} \in \mathbf{K}_{ks}))] \cap \\
 [G_{lin} &\cong G_{th}(T, k_{ks}) \forall ((T \in \mathbf{T}) \cap (k_{ks} \in \mathbf{K}_{ks}))] \cap \\
 [B_{lin} &\cong B_{th}(T, k_{ks}) \forall ((T \in \mathbf{T}) \cap (k_{ks} \in \mathbf{K}_{ks}))]
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Zur Kalibriermessung kommt die Berechnung auf Basis eines relativen Farbwertes (5.4) zum Einsatz. Dabei sind lediglich die Korrekturfaktoren $k_{grün}$ und k_{blau} von Bedeutung, während sich k_{opt} in Zähler und Nenner wegekürzt. Das Modell von Kamera, Optik und Strahler kann nur dann für eine Temperaturmessung taugen, wenn für jedes an der Strahlungsquelle gemessene Farbtripel $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$ bei Lösung beider Gleichungen ungefähr dieselben Ergebnistemperaturen festgestellt werden. Maßgebliche Unterschiede deuten auf eine unzureichende Beschreibung der Transmissivitäten von Optik und primären Farbfiltern hin.

Als Referenzstrahler wird eine vermessene Wolframbandlampe verwendet. Im Vergleich zur später behandelten Diffusionsflamme ist das Emissionsvermögen durch Wellenlänge und Temperatur eindeutig beschrieben. Durch Vorgabe einer Kalibriertemperatur in einem Referenzpunkt (x_{cal}, y_{cal}) des Kalibrierbildes können auf Basis der gemessenen Farbwerte die Korrekturfaktoren $k_{grün}$ und k_{blau} eindeutig bestimmt werden:

$$k_{grün} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon_{wolfram}(\lambda, T_{cal}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon_{wolfram}(\lambda, T_{cal}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_G(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot \frac{G_{lin}(x_{cal}, y_{cal})}{R_{lin}(x_{cal}, y_{cal})} \tag{5.10a}$$

$$k_{blau} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon_{wolfram}(\lambda, T_{cal}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon_{wolfram}(\lambda, T_{cal}) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_B(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot \frac{B_{lin}(x_{cal}, y_{cal})}{R_{lin}(x_{cal}, y_{cal})} \tag{5.10b}$$

Für eine Temperatureauswertung nach (5.7) ist lediglich die Angabe des optischen Korrekturfaktors $k_{grün}$ erforderlich. Die zusätzliche Bestimmung von k_{blau} dient lediglich zur Verifikation der spektralen Eigenschaften der Meßkette im Zuge der Kalibriermessung.

5.5.2 Kalibrierung von Bildern der dieselmotorischen Flamme

Zur Ermittlung optischer Korrekturfaktoren wird üblicherweise vor oder nach erfolgter Messung am Prüfstand unter Beibehaltung von Kameraeinstellung und Optik eine Kalibriermessung an einem Referenzstrahler vorgenommen. Diese Maßnahme wurde für das vorliegende System zwar ebenfalls vorgeschlagen, hat sich aber für die vorliegende Meßaufgabe nicht bewährt.

Wesentlich eleganter und praxistauglicher ist die implementierte Kalibriermaßnahme, die den erforderlichen Korrekturfaktor aus dem aufgenommenen Bildmaterial selbst ableitet:

Aus Diagramm 5.2 ist ersichtlich, daß der Schwarze Strahler, festgelegt durch k_{ksmax} , die möglichen Intensitätswerte bei einer bekannten Ergebnistemperatur einschränkt. Treten oberhalb der Einhüllenden Intensitätswerte auf, so kann man daraus schließen, daß der

optische Korrekturfaktor offenbar falsch ist. Aufgrund der im Bild enthaltenen Relativwerte ist es zulässig, die Schwarze Temperatur für einen Bildpunkt anzusetzen. Werden die dort gemessenen Intensitätswerte über der berechneten Schwarzen Temperatur aufgetragen (grauer Bereich in Diagramm 5.3), so können nur die höchsten über einem Temperaturwert aufgetragenen Intensitäten einem Schwarzen Strahler zugeordnet werden. Das Verfahren ist soweit optimiert, daß einzelne Pixelfehler die Zuordnung des Korrekturfaktors k_{opt} nicht beeinflussen. Natürlich muß vorausgesetzt werden, daß im zugrundeliegenden Bildmaterial tatsächlich optisch dichte Flammenbereiche vorliegen. Nach [Lawton], [Pitter2] und anhand eigener Messungen wurde festgestellt, daß diese Grundbedingung in ausreichender Näherung erfüllt ist.

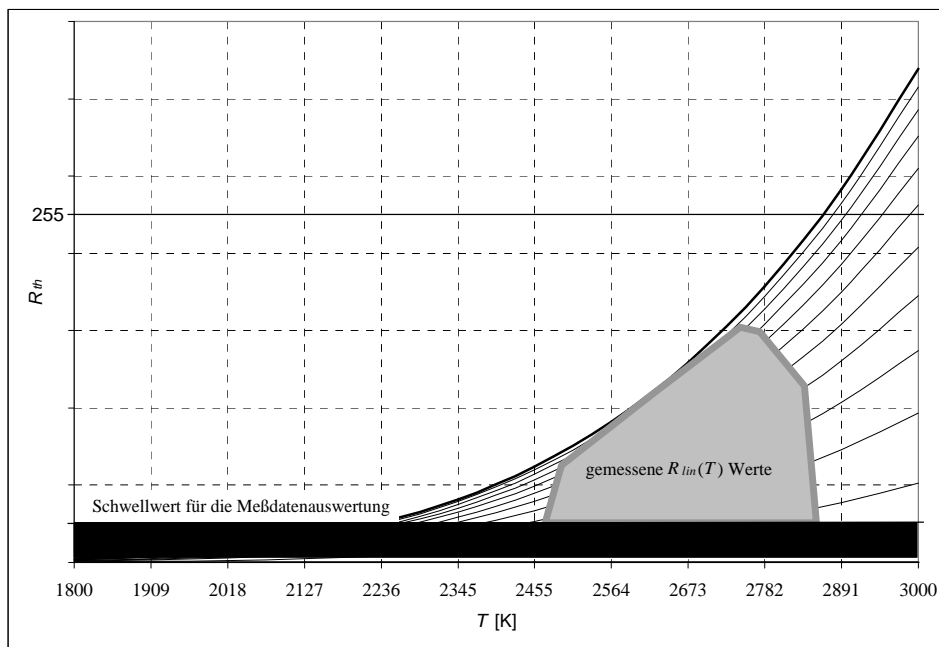


Diagramm 5.3: Automatische Berechnung des optischen Korrekturfaktors k_{opt}

6. Kalibrierung der Meßkette und Meßdatenauswertung

Im vorigen Kapitel wurde die Modellbildung sowohl für die erstmalige Kalibrierung des Meßsystems als auch für die Meßdatenauswertung von Messungen am Kalibrierstrahler und an der Dieselflamme dargestellt. Auf Basis der vorgeschlagenen Verfahren wird nun berücksichtigt, daß für die erstmalige Kalibrierung ein hohes Maß an Wiederholgenauigkeit erreicht werden muß, und daß Aufnahmekonzept, Datenstrukturen und reale Eigenschaften von Meßkette und Referenzstrahler zu berücksichtigen sind.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird gezeigt, welchen grundlegenden Einflußgrößen eine Messung mit der vorgeschlagenen Systemtechnik unterliegt. Es wird dargestellt, daß eine lineare Mittelung von Dunkelbildern zur Bestimmung des ortsabhängigen Schwarzpegels sinnvoll ist.

Anschließend wird die implementierte Vorverarbeitung der Basisbilder zur Unterdrückung von Signalstörungen beschrieben. Das Verfahren wird sowohl für die erstmalige Kalibrierung der Meßkette als auch für jede weitere Meßdatenauswertung verwendet.

Die praktische Durchführung der erstmaligen Kalibriermessung und die Bereitstellung der Ergebnisdaten für eine spätere Messung wird anschließend dargestellt.

Schließlich wird zusammengefaßt, in welcher Form die Kalibrierung einer Aufnahmesequenz und die anschließende Meßdatenauswertung realisiert wurde.

6.1 Reale Eigenschaften von Optik und Sensor

Im Rahmen der Modellbildung wurde von idealisierten Annahmen für Kamera und Optik ausgegangen. Für eine erfolgreiche Realisierung sind Funktionsweise und Limitationen im Meßaufbau grundlegend zu prüfen. An dieser Stelle sollen deshalb vorhandene bzw. mögliche Fehlerquellen beschrieben werden.

Für eine Verwendung der Kamera zur Farbmessung müssen mehrere Maßnahmen ergriffen werden. Das vom Sensor ausgelesene Bild darf im Signalprozessor der Kamera keiner Berechnung zugeführt werden, da nur so die von der Kamera übertragenen Farbwerte durch die im Datenblatt angegebenen Filterkurven richtig bewertet werden können. Außerdem muß die Gamma-Korrektur abgeschaltet werden, damit die Sensordaten proportional der lokal gemessenen, spektral bewerteten Gesamtstrahlung im Bild eingetragen werden. Die Korrektur der Bildhelligkeit darf ausschließlich über die Belichtungsdauer und einen Kamera-Verstärkungsfaktor *Gain* vorgenommen werden. Ein weiterer Verstärkungsparameter *Max-Gain* [Pulnix] beeinträchtigt die Farbwiedergabe, sodaß dieser Parameter unter Meßbedingungen nicht verwendet werden darf.

Für die Berechnung linearer Basisbilder und eine nachgelagerte Auswertung sind folgende Unschärfen zu beachten:

- Quantisierung: jede Farbe eines Bildpunktes liegt nach erfolgter Messung in quantisierter Form (8bit) vor.
- Übersteuerung: zu helle Bildbereiche führen im Sensor zur Übersteuerung. Gesättigte Bereiche sind von einer Auswertung auszuschließen
- Bitfehler zufolge Digitalisierung bzw. Bildübertragung
- Schwarzpegel: selbst bei geschlossener Blende werden nichtverschwindende Meßwerte $\underline{P}_{dunkel}=(R_{dunkel},G_{dunkel},B_{dunkel})$ gemessen
- Rauschen: Ein aufgenommenes Bild beinhaltet neben Schwarzpegel und Nutzsignal auch Meßrauschen; über den Rauschanteil eines einzelnen Bildes können nur statistische Aussagen getroffen werden.
- Linearität: aufgrund realer Sensoreigenschaften kann selbst im ungesättigten Bereich und bei abgeschalteter Gammakorrektur ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität und Meßwert bestehen
- Reale Durchlässigkeit der primären Farbfilter: im Datenblatt sind lediglich typische Filterkennlinien dargestellt. Eine konkrete Kamera wird in der Regel zumindest leicht von den nominalen Verläufen abweichende Filterkennlinien aufweisen.

Für eine Untersuchung von Schwarzpegel und Meßrauschen wurde bei wechselnden Betriebsbedingungen folgende Messung durchgeführt:

Bei geschlossener Blende wurde ein Record $Record_{dunkel}$ mit $m=Repetitions$ (Anzahl der Repetitionen) und $n=Values$ (Anzahl der Winkelwerte⁺) Dunkelbildern $I_{dunkel,i,j}$ mit $0 \leq i < m$ und $0 \leq j < n$ aufgenommen*. Als Aufnahmeoption wurde *Repetitions First* gewählt, das heißt, die Aufnahme erfolgte in der Reihenfolge der vertikalen Anordnung (vgl. Bild 4.17). Eine Auswertung wurde anschließend jeweils durch Zusammenfassung der Repetitionen durchgeführt. Durch diese Maßnahme bestand die Möglichkeit, Aussagen über die Wiederholbarkeit der Ermittlung eines repräsentativen Dunkelbildes treffen zu können, indem die errechneten Dunkelbilder miteinander verglichen wurden; weiters konnte das zeitliche Verhalten der Kamera etwa nach ihrer Inbetriebnahme geprüft werden.

⁺ Die zugeordneten Winkelwerte sind für die folgenden Messungen bedeutungslos und werden lediglich zur Strukturierung des Bildmaterials verwendet.

* Typisch $m=20, n=10$

Zur Evaluierung der Kameraeigenschaften wurden folgende Basisdaten errechnet:

- Gemittelte Dunkelbilder $I_{\text{dunkel,mittel}}$

$$R_{\text{dunkel,mittel},j}(x, y) = \text{int}\left(\frac{\sum_{i=0}^{i<m} R_{\text{dunkel},i,j}}{m}\right)$$

$$G_{\text{dunkel,mittel},j}(x, y) = \text{int}\left(\frac{\sum_{i=0}^{i<m} G_{\text{dunkel},i,j}}{m}\right) \quad (6.1a-c)$$

$$B_{\text{dunkel,mittel},j}(x, y) = \text{int}\left(\frac{\sum_{i=0}^{i<m} B_{\text{dunkel},i,j}}{m}\right)$$

- Schwankungsbreitenbild $I_{\text{schwankung}}$

$$R_{\text{schwankung},j}(x, y) = \max(\{R_{\text{dunkel},i,j}(x, y), 0 \leq i < n\}) - \min(\{R_{\text{dunkel},i,j}(x, y), 0 \leq i < n\})$$

$$G_{\text{schwankung},j}(x, y) = \max(\{G_{\text{dunkel},i,j}(x, y), 0 \leq i < n\}) - \min(\{G_{\text{dunkel},i,j}(x, y), 0 \leq i < n\})$$

$$B_{\text{schwankung},j}(x, y) = \max(\{B_{\text{dunkel},i,j}(x, y), 0 \leq i < n\}) - \min(\{B_{\text{dunkel},i,j}(x, y), 0 \leq i < n\}) \quad (6.2a-c)$$

- Anzahl der vom Mittelwertbild abweichenden Farbwerte
- Maximale Abweichung vom linearen Mittelwert

Untersuchungen an mehreren Kameras haben wertvolle Erkenntnisse über die Reproduzierbarkeit von Messungen gebracht:

- Rauschen und Schwarzpegel sind massiv ortsabhängig, dies sowohl global (Fertigungsqualität des Sensors) als auch lokal (Anordnung der Primärfilter)
- Im Bereich des Bildrandes treten Bildstörungen auf, ein ca. 10 Pixel breiter Rahmen muß von einer Messung ausgespart bleiben.
- Das Meßrauschen hängt von den Parametern Triggerrate, Betriebstemperatur und Kameraverstärkung ab. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Aufnahmezeit einen wesentlich größeren Einfluß auf das Meßrauschen hat als die Betriebstemperatur (zumindest im Temperaturintervall 20°C bis 35°C).
- Der Schwarzpegel hängt nur schwach von Betriebszustand und Umgebungsbedingungen ab.
- Da für den Grünanteil 75% der Sensorfläche bereitsteht (vgl. Bild 4.9), ist der Grünanteil verglichen mit den beiden anderen Kanälen praktisch rauschfrei.

Für die folgenden Betrachtungen gehen wir von definierten Meßbedingungen aus:

- Umgebungstemperatur 20°C bis 35°C
- Kamera betriebswarm (mind. 10 Minuten nach Inbetriebnahme)
- Parameter *Max-Gain* abgeschaltet (=0)
- Gleichbleibende Betriebsart (Kamera-Einstellungen, Trigger-Modus)
- Aufnahme von n Dunkelbildern $I_{dunkel,i}$, mit $1 \leq i \leq n$ auf deren Basis durch lineare Mittelung der einzelnen Pixelwerte ein repräsentatives Dunkelbild $I_{dunkel,ref}$ berechnet wird

Auf dieser Basis wurde das auftretende Meßrauschen abgeschätzt, indem die einzelnen Bildpunkte der aufgenommenen Dunkelbilder I_{dunkel} mit dem berechneten Dunkelbild $I_{dunkel,ref}$ verglichen wurden. Tabelle 6.1 zeigt Abweichungshäufigkeit und maximale Abweichungen individueller Dunkelbilder vom arithmetisch gemittelten Dunkelbild.

Farbe	Abweichungshäufigkeit	Max. Fehler
Rot	<50%	±1
Grün	<1%	-0/+1
Blau	<50%	±1

Tabelle 6.1: Quantitative Ergebnisse für eingeschränkte Betriebsbedingungen

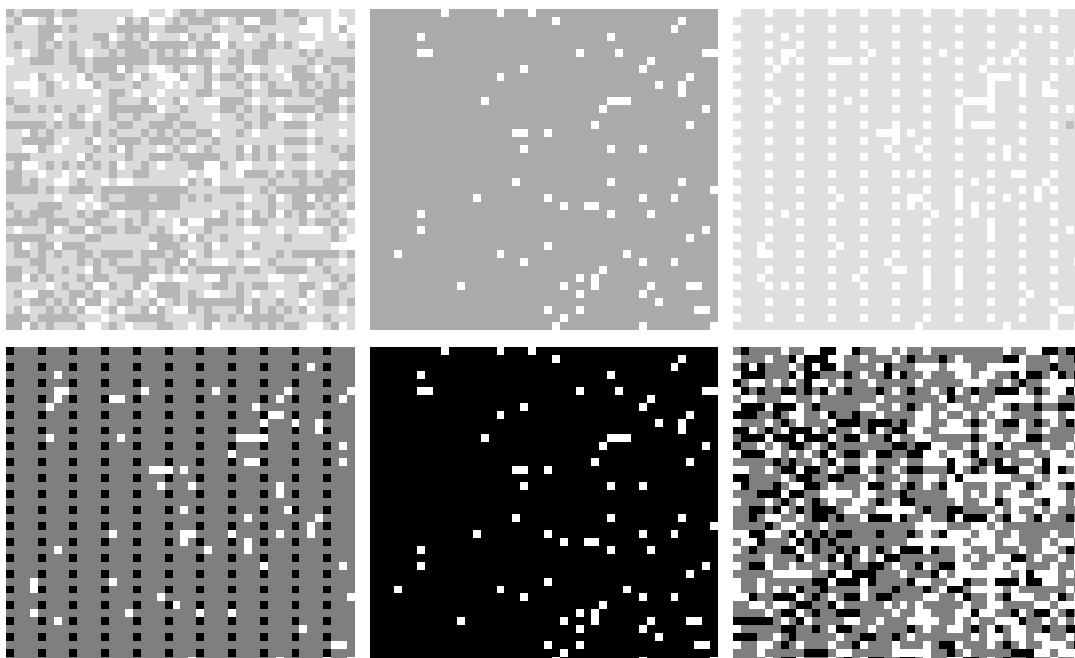


Bild 6.1: Rot- (l), Grün- (m) und Blaukanal (r) der gemittelten Dunkelbilder (o) und Schwankungsbreitenbilder (u)

Bild 6.1 zeigt typische Mittelwert- und Schwankungsbreitenbilder für jeden Farbkanal. Vor allem aus dem Blauanteil sind die Auswirkungen der lokalen Sensorstruktur erkennbar. Die

Spreizung der Bilder erfolgte bildweise, die dargestellte Helligkeit entspricht folglich nicht direkt den Grauwerten.

6.2 Berechnung linearer Basisbilder

Im Verbrennungsmotor selbst besteht die Möglichkeit, die einem gemittelten Dunkelbild zugrundeliegenden Bilder laufend an einem Winkelwert aufzunehmen, wo keine Verbrennung stattfindet. Bei der später beschriebenen Kalibrierung an der Wolframbandlampe erfolgt die Aufnahme der Kalibrierbilder und die Erfassung der Dunkelbilder in zwei Arbeitsschritten. Die Eingangsdaten stehen allerdings in beiden Fällen mit einem repräsentativen Dunkelbild $I_{dunkel,mittel}$ nach (6.1) und einem Aufnahmebild I_{mess} zur Verfügung.

Um lokale Bildstörungen und starkes Rauschen im Ergebnisbild zu vermeiden, wurde ein speziell an die Sensorstruktur angepaßtes Auswahlverfahren für die Meßdaten realisiert.

- Um die Bildpunkte (x,y) eines Bildes I_{mess} wird ein quadratisches Fenster der Größe $size=5$ gelegt, sodaß $\{x_{ref}, y_{ref}, x-2 \leq x_{ref} \leq x+2, y-2 \leq y_{ref} \leq y+2\}$ den Bereich definiert
- Die Farbwerte der Kalibrierbilder werden im definierten Fenster ausgelesen, der lokale Dunkelwert wird subtrahiert, das Ergebnis in ein Array eingetragen:

$$\begin{aligned} R_{lin,i,j}[size \cdot y_{lokal} + x_{lokal}] &= R_{mess,i,j}(x_{ref}, y_{ref}) - R_{dunkel,mittel}(x_{ref}, y_{ref}), \\ G_{lin,i,j}[size \cdot y_{lokal} + x_{lokal}] &= G_{mess,i,j}(x_{ref}, y_{ref}) - G_{dunkel,mittel}(x_{ref}, y_{ref}), \\ B_{lin,i,j}[size \cdot y_{lokal} + x_{lokal}] &= B_{mess,i,j}(x_{ref}, y_{ref}) - B_{dunkel,mittel}(x_{ref}, y_{ref}), \end{aligned} \quad (6.3a-c)$$

dabei ist der Offset (x_{lokal}, y_{lokal}) definiert durch

$$x_{lokal} = x - x_{ref} + \frac{size - 1}{2}, \quad y_{lokal} = y - y_{ref} + \frac{size - 1}{2} \quad (6.4a-b)$$

- Die so erhaltenen Arrays werden anschließend in aufsteigender Reihenfolge sortiert, sodaß gilt $R_{lin}[i] \leq R_{lin}[i+1]$, $G_{lin}[i] \leq G_{lin}[i+1]$ und $B_{lin}[i] \leq B_{lin}[i+1]$ für $0 \leq i < size^2$.
- Definiert man nun $\underline{p}_{ref} = (R_{ref}, G_{ref}, B_{ref})$ mit

$$R_{ref} = R_{lin} \left[\frac{n \cdot size^2}{2} \right], \quad G_{ref} = G_{lin} \left[\frac{n \cdot size^2}{2} \right], \quad B_{ref} = B_{lin} \left[\frac{n \cdot size^2}{2} \right], \quad (6.5a-c)$$

so wurden offenbar die repräsentativsten Farbwerte im Fensterbereich gefunden, das Verfahren entspricht bisher einer Median-Filterung. Es wird nun geprüft, ob diese Referenzfarbe auch tatsächlich gemessen wurde, bzw. welcher Bildpunkt dieser Referenzfarbe am ehesten entspricht. Dazu wird der definierte Fensterbereich nach dem

passendsten Bildpunkt $\underline{P}_{sel,lin}=(R_{sel,lin},G_{sel,lin},B_{sel,lin})$ nach folgendem Auswahlkriterium nochmals durchsucht⁺:

$$\begin{aligned} dev = 2 \cdot \text{abs} & \left[G_{mess,i,j}(x+x_{lokal}, y+y_{lokal}) - G_{dunkel}(x_{ref}+x_{lokal}, y_{ref}+y_{lokal}) - G_{ref} \right] + \\ \text{abs} & \left[R_{mess,i,j}(x_{ref}+x_{lokal}, y_{ref}+y_{lokal}) - R_{dunkel}(x_{ref}+x_{lokal}, y_{ref}+y_{lokal}) - R_{ref} \right] + \\ \text{abs} & \left[B_{mess,i}(x_{ref}+x_{lokal}, y_{ref}+y_{lokal}) - B_{dunkel}(x_{ref}+x_{lokal}, y_{ref}+y_{lokal}) - B_{ref} \right] \rightarrow \min \end{aligned} \quad (6.6)$$

Während jeder Bildpunkt eines linearen Basisbildes für jede Auswertung an der Diffusionsflamme genau nach dem oben angeführten Auswahlverfahren errechnet wird, wurde der Algorithmus für die Kalibrierung auf nur einen Referenzpunkt, dem Kalibrierpunkt des Wolframbandes, dafür auf eine Sequenz von Kalibrierbildern (20 Repetitionen) bezogen, um optimalen Genauigkeitsansprüchen zu genügen.

Der Wertebereich der Meßwerte R_{mess} , G_{mess} und B_{mess} ist jeweils mit 8bit aufgelöst, jede einzelne Farbkomponente liegt diskret als dimensionslose Größe im Intervall $[0,1,\dots,255]$ vor. Der Wert 255 deutet auf eine Übersteuerung des Sensors hin, die Menge aller Bildpunkte, für die gilt $\{(R_{mess}(x,y)=255) \cup (G_{mess}(x,y)=255) \cup (B_{mess}(x,y)=255)\}$, ist von der Kalibrierung bzw. später von einer Temperaturberechnung auszuschließen. Für die Bedingung einer im ungesättigten Bereich linearen Integration der einfallenden Lichtmenge muß die Gamma-Korrektur der Kamera abgeschaltet werden.

Von einer Auswertung auszuschließen sind neben übersteuerten Bildpunkten auch jene, die einen zu geringen Nutzsignalpegel $\underline{P}_{lin}=(R_{lin},G_{lin},B_{lin})$ aufweisen, wenn also die Bedingung $\{(R_{lin} \geq R_{lin,min}) \cap (G_{lin} \geq G_{lin,min}) \cap (B_{lin} \geq B_{lin,min})\}$ verletzt ist. Bestimmende Größen für die Festlegung der Schwellwerte sind das Maß der Unbestimmtheit von \underline{P}_{dunkel} und die Tatsache, daß $\underline{P}_{mess}(x,y)$ in quantisierter Form vorliegt.

6.3 Kalibrierung der Meßkette

Bild 6.2 zeigt den zur Kalibrierung des Meßsystems verwendeten Kalibrieraufbau. Unter Verwendung eines Referenzstrahlers wird bei einer Kalibriertemperatur T_{cal} der kamerainterne Weißabgleich bestimmt. Anschließend wird bei anderen Temperaturen geprüft, ob das die Optik beschreibende Modell auch für andere Temperaturen korrekte Ergebnisdaten liefert.

⁺ Man beachte, daß der Grünanteil im Vergleich zu Rot- und Blauanteil stärker bewertet wird; diese Maßnahme wurde ergriffen, weil der Grünkanal mit dem verwendeten 3G/RB-Sensor die zuverlässigsten Meßergebnisse liefert.



Bild 6.2: Kalibriertisch

6.3.1 Wolframbandlampe

Zur Kalibrierung des kamerainternen Weißabgleiches wird eine Wolframbandlampe verwendet. Dieses Meßnormal weist ein nach der Arbeit von [de Vos] bekanntes Emissionsverhalten auf (Diagramm 6.1). Das spektrale Emissionsvermögen wurde zwischen 2,000K und 2,600K in 300K Schritten aufgelöst, bei einer Temperaturzuordnung wird auf Basis der nächstgelegenen Kurven linear interpoliert.

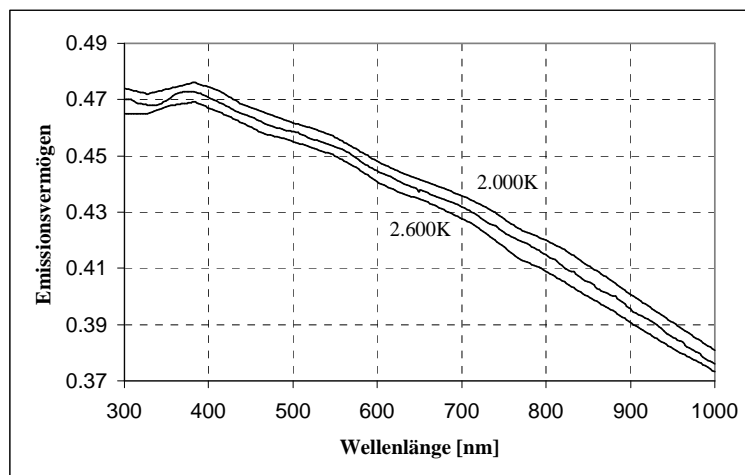


Diagramm 6.1: Emissionsvermögen von Wolfram nach de Vos

Die Wolframbandlampe ist auf Schwarze Temperaturen bei einer Schwerpunktwellenlänge von $\lambda_S=650\text{nm}$ kalibriert. Für die im Engine-VideoScope verwendete Sensorik ist diese Angabe nicht direkt brauchbar, da die Schwarze Temperatur nicht der tatsächlichen Temperatur des Wolframbandes entspricht; diese muß aus den Herstellerangaben rückgerechnet werden.

Ein Schwarzer Strahler weist die durch (2.1) angegebene spektrale Strahldichte auf. Für die nach Datenblatt angegebenen Schwarzen Temperaturen ergeben sich damit spektrale

Strahldichten, L_{e,λ_s,T_s} . Auf Basis dieser Werte werden bei Kalibrierung an der Bandlampe aus dem bekannten Emissionsverhalten spektrale Strahldichten für weitere Frequenzen ermittelt:

$$L_{e\lambda,wolfram} = \varepsilon_{wolfram}(\lambda, T_{wolfram}) \cdot L_{e\lambda,S} \quad (6.7)$$

Die unbekannte Größe $T_{wolfram}$ sollte nun auf Basis der Herstellerangaben rückgerechnet werden können, da für einen Schwarzen Strahler folgender Zusammenhang gelten muß:

$$\varepsilon_{wolfram}(\lambda_s, T_{wolfram}) \cdot \frac{1}{e^{\frac{c2}{\lambda_s \cdot T_{wolfram}}} - 1} = \frac{1}{e^{\frac{c2}{\lambda_s \cdot T_s}} - 1} \quad (6.8)$$

Tatsächlich würde bei diesem Ansatz der Transmissivitätsgrad τ_{kolben} des Lampenkolbens unberücksichtigt bleiben. Auf Anfrage beim Hersteller wurden die echten Temperaturwerte unter Berücksichtigung auch dieser Einflußgröße ($\tau_{kolben} \cong 0,95$) umgehend mitgeteilt.

Mit den wahren Temperaturen des Kalibriernormals werden auf Basis der Kalibrierbilder nun nach (5.10) die beiden Korrekturfaktoren $k_{grün}$ und k_{blau} errechnet.

6.3.2 Durchführung der Kalibriermessung

Die Kalibriermessung wird folgendermaßen durchgeführt:

- Montage der betriebswarmen Kamera mit Kantenfilter, Endoskop und Objektiv; Kolben der Wolframbandlampe fluchtet mit Blickrichtung des verwendeten Endoskops
- Einstellung der Wolframbandlampe auf Kalibriertemperatur, stationäres Verhalten wird abgewartet
- Brennweite wird auf Wolframband scharfgestellt
- Die Einstellung der Blende erfolgt so, daß neben der Kerbmarke am Wolframband Rotwerte im Bereich zwischen 220 und 250 gemessen werden
- Aufnahme von $n=20$ Kalibrierbildern $I_{wolfram,i}$, $1 \leq i \leq n$, Aufnahmerate 0,2Hz⁺
- Abschalten der Wolframbandlampe, Schließen der Blende
- Aufnahme von $n=20$ Dunkelbildern $I_{wolfram,i}$, $1 \leq i \leq m$, Aufnahmerate 0,2Hz

Bild 6.3 zeigt eine Aufnahme der Wolframbandlampe. Eine Kerbmarke (rechts) definiert den Kalibrierpunkt; an dieser Referenzposition liegt bei eingestelltem Referenzstrom und stationärem Betrieb nach Herstellerangabe eine auf $\pm 3^\circ\text{K}$ genaue Temperatur vor.

Die Farbtafeln D1 und D2 im Anhang zeigen Kalibriermessung und Ergebnistemperaturen in den vom Hersteller spezifizierten Kalibrierpunkten.

⁺ Zahlreiche Messungen an mehreren Kameras haben gezeigt, daß exakt bei 0.2Hz Aufnahmerate die Aufnahmebilder minimales Rauschen aufweisen. Sowohl kleinere als auch höhere Triggerraten führen auf bis zu 300% höheres Signalrauschen. Vermutlich ist im getriggerten Betrieb der Kamera ein Abtransport akkumulierter Ladungen erforderlich, dessen Timing bei 0.2Hz zu sehr günstigen Aufnahmebedingungen führt. Für Messungen am Prüfstand ist diese Feststellung bedeutungslos, da in diesem Anwendungsfall ein abweichender Triggermechanismus eingesetzt wird, bei dem sich die Triggerrate aus anderen Einflußgrößen (Drehzahl, Aufnahmerate, Toleranzbereich, Zufall) ergibt.

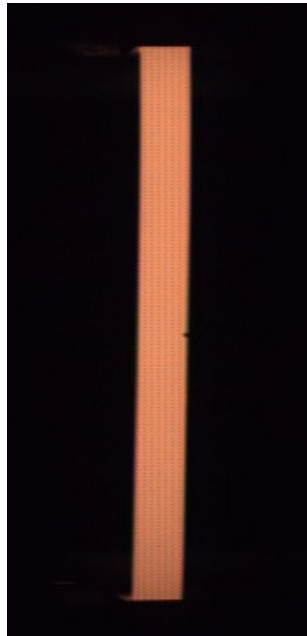


Bild 6.3: Wolframband

6.4 Übergabe der Kalibrierdaten

Im Rahmen der Modellbildung wurde festgestellt, daß lediglich der Korrekturwert $k_{grün}$ für einen späteren Einsatz des Meßsystems am Prüfstand erforderlich ist. Diese Feststellung gilt nur unter der Voraussetzung, daß die übrigen Bestimmungsgrößen, sprich die spektralen Empfindlichkeiten von Kamera und Optik bei jedem Meßsystem übereinstimmen. Grundsätzlich bestünde die Möglichkeit, neben dem Wertepaar den vollen Satz der vermessenen Komponenten bereitzustellen. Damit ist jedoch klar, daß bei jeder Temperatursauswertung ein grundsätzlich unnötiger Rechenaufwand vorliegt, da in diesem Fall für jede Meßdatenauswertung der Satz von Relativwerten neu berechnet werden muß.

Im Prinzip kann die gesamte Berechnung der Kurvenverläufe bereits unmittelbar nach der Kalibriermessung durchgeführt werden. In den Diagrammen 5.1 und 5.2 ist ein derartiger, vollständiger Satz von Relativ- und Intensitätswerten gezeigt. Neben diesen Kurven werden weitere Informationen über die Kalibriermessung (vgl. Kalibrierprotokoll in Anhang A) bereitgestellt.

6.5 Auswertung

Die aufgenommenen Bilddaten werden auf Basis der bereitgestellten Kalibrierdaten (vgl. Diagramm 5.1 und 5.2) ausgewertet. Dazu wird jedes Basisbild nach dem angegebenen Verfahren (Berechnung linearer Basisbilder) vorverarbeitet. Anschließend werden die so vorgefilterten Eingangsdaten je nach vorliegender Meßaufgabe (Kalibrierstrahler oder Dieselflamme) gemäß einem der im Rahmen der Modellbildung dargestellten Verfahren ausgewertet.

Für die Verifikation des Modells wurde das Meßnormal, also die Wolframbandlampe, bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen. Anschließend wurden diese Aufnahmen ausgewertet, und zwar so, daß eine Hälfte des Wolframbandes durch die Auswertung auf Basis des Relativwertes R/G, die andere Hälfte durch die R/B-basierte Auswertung im Ergebnisbild dargestellt wurde. Die Übereinstimmung der beiden Ergebnisse stellen zusammen mit der Deckungsgleichheit der berechneten Temperaturen in allen vom Hersteller angegebenen Kalibriertemperaturen ein Maß für die Güte des beschreibenden Modells dar.

Ähnliches gilt für die Flammenauswertung, auch bei dieser Meßaufgabe können die Ergebnistemperaturen etwa auf Basis Rot, Rot/Grün und Rot, Rot/Blau direkt miteinander verglichen werden. Abweichende Aussagen führen auf mehrere Interpretationsmöglichkeiten und lassen zum Teil kompensierbare Meßfehler erkennen, zum Teil werden grundlegende Limitationen der vorgeschlagenen Systemtechnik gefunden. Im Rahmen einer serientauglichen Implementierung wurde ausschließlich Rot- und Grünkanal für die Auswertung verwendet, da der Blaukanal unter allen Aufnahmebedingungen und Betriebszuständen die niedrigsten Intensitäten aufweist.

7. Berücksichtigung kalter Rußschichten

Im Zuge von Fehlerbetrachtungen wird später gezeigt, daß die Temperaturmessung zufolge Rußablagerung am Brennraumfenster einen maßgeblichen Einfluß auf die Meßdatenauswertung hat.

Anhand einiger Meßergebnisse wird nachgewiesen, daß auch kalte Rußschichten zwischen Fenster und Flamme auftreten können und so ebenfalls die Messung beeinträchtigen. Wir werden nach Entwicklung eines Bildrestaurationsverfahrens zur Rückrechnung der Absorption zufolge Rußablagerungen anhand der Messung an einem zweiten Fenster feststellen, daß Meßfehler zufolge einer absorbierenden Gasschicht auftreten. Quantitativ betrachtet liegt dieser Meßfehler bei entsprechender Beeinträchtigung des optischen Zugangs teilweise höher als die Schwankungsbreite unterschiedlicher Temperaturzonen in einer Dieselflamme.

Vor allem für die Entwicklung neuer Systeme sollte in erster Linie versucht werden, die Rußablagerung am Fenster zu vermeiden.

Erst wenn festgestellt wird, daß die Berußung des Fensters nicht vollständig unterbunden werden kann, ist zu überlegen, welche weiteren Maßnahmen zur Verringerung der Störung bzw. zur Korrektur von Aufnahme- oder Meßdaten während der Prozeßbeobachtung sinnvoll eingesetzt werden können.

Die praxistaugliche Realisierung eines Kalibriervorganges, der zur Erfassung des örtlichen Berußungszustandes eines Fensters dient, wird aus bisheriger Sicht scheitern:

- Die Rußbildung ist orts- und zeitabhängig.
- Aufgrund von Vibrationen am Motor treten kaum rückrechenbare Relativbewegungen zwischen Fenster und Optik auf.
- Der schadlose Transport von Kamera, Optik und Fenster zu einem Kalibriertisch ist schwierig.

Zunächst wurde festgestellt, daß die Rußablagerung am Fenster eine nicht nur orts- sondern auch zeitabhängige Beeinträchtigung darstellt. Nach erfolgter Bilderfassung muß der Versuchsmotor heruntergefahren werden, ehe der Ausbau des Fensters durchgeführt werden kann. Zwischen Messung und Kalibrierung wird also selbst bei der Aufnahme von nur einem Bild bis zur Kalibriermessung eine Änderung des Berußungszustandes erfolgen.

Während der Messung treten Vibrationen auf, die ständige translatorische Verschiebungen des Bildausschnittes zur Folge haben können.

Der Ausbau von Kamera, Optik und Fenster würde zur anschließenden Kalibriermessung bei der geforderten pixelrichtigen Zuordnung der Kalibrierdaten eine starre Verbindung erfordern. Selbst wenn es gelingt, durch geeignete Maßnahmen eine relative Verdrehung der Komponenten zu erreichen, führt ein minimales mechanisches Spiel zwischen Endoskop und Schnellverschluß an der Kameraoptik zu nur schwer reproduzierbaren translatorischen Verschiebungen.

7.1 Maßnahmen an der Aufnahmetechnik

Um Rußablagerungen entgegenzuwirken, wird derzeit an einer weiteren Verbesserung des Meßsystems gearbeitet, mit der mit Beginn der Feuerung das System direkt freigeschaltet werden kann. Eine modifizierte Kamera mit verbessertem Triggermechanismus wird zusammen mit Verbesserungen im Softwarebereich Aufnahmezeiten bis 15Hz ermöglichen. Damit sollte es möglich sein, selbst bei ungünstigen Verhältnissen im Brennraum einige Bilder mit sauberem optischen Zugang aufzunehmen. Es wird auch überlegt, ob eine Beheizung des Quarzfensters zielführend sein könnte, da sich bei einer Fenstertemperatur ab ca. 600°C kein Ruß an der Oberfläche abgelagert. Dies ist bei heutigen Messungen nur bei günstiger Fensteranordnung und hoher Motorlast der Fall.

7.2 Bildrestauration

Es wurde dargestellt, daß eine Korrektur der Bilddaten durch die Definition eines zusätzlichen Kalibrierschrittes, bei dem die örtliche Berußung des Fensters gemessen wird, an der praktischen Durchführung scheitert.

Mit Hilfe des nun dargestellten Verfahrens wird neben dem während der Aufnahme erstellten Dunkelbild ein weiteres Bild, I_{hell} , erstellt:

- Jedem Bildpunkt $P_{hell}(x,y)$ wird der jeweils hellste in der Aufnahmezeit vorkommende Rotwert zugeordnet:

$$R_{hell}(x,y)=R_{max}(x,y)= \max \{R_{lin,i,j}(x,y), (0 \leq i < Repetitions) \cap (0 \leq j < Values)\} \quad (7.1)$$

- Der Bildpunkt (x,y) weist in sauberen Zonen des Fensters den Intensitätswert $P_{korr}(x,y)=R_{max}(I_{hell})$ auf.
- Relativ zu diesem Wert abgedunkelte Bereiche entsprechen der spektral bewerteten Dämpfung des Rotkanals zufolge der Rußablagerung am Quarzfenster.

Wir setzen die spektrale Absorption analog zum Absorptionsvermögen des Gases (2.20) mit

$$\alpha(\lambda) = e^{-\frac{k_{ks, fenster}}{\lambda}} \quad (7.2)$$

an [Becker], und definieren den gesuchten, restaurierten Farbwert mit $\underline{P}_{rest}=(R_{rest}(x,y), G_{rest}(x,y), B_{rest}(x,y))$. Die Aufnahmezeit besteht aus einem Schwarzpegel und einem linearen Meßwert:

$$\begin{aligned} R_{mess}(x,y) &= R_{dunkel}(x,y) + R_{lin}(x,y) \\ G_{mess}(x,y) &= G_{dunkel}(x,y) + G_{lin}(x,y) \\ B_{mess}(x,y) &= B_{dunkel}(x,y) + B_{lin}(x,y) \end{aligned} \quad (7.3a-c)$$

Den linearen Meßwert für den Rotanteil erhält man aufgrund der angesetzten Störgröße (7.2) mit

$$R_{lin}(x, y) = k_{opt} \cdot c_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} e^{-\frac{k_{ks, fenster}}{\lambda}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{ks, neu}}{\lambda}}\right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T_{neu}}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (7.4)$$

Dabei sind T_{neu} und $k_{ks, neu}$ zwei unbestimmte Größen. Es läßt sich zeigen, daß eine Übereinstimmung von $k_{ks, neu}$ und k_{ks} mit hinreichender Genauigkeit erfüllt ist (vgl. Farbtafel C7):

$$k_{ks, neu} := k_{ks} \quad (7.5)$$

Wir erhalten mit dem Modell der homogenen Flamme nach

$$R_{lin}(x, y) = k_{opt} \cdot c_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(1 - e^{-\frac{k_{ks}}{\lambda}}\right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (7.6)$$

die Identität

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} e^{-\frac{k_{ks, fenster}}{\lambda}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{ks}}{\lambda}}\right) \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T_{neu}}} \cdot d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left(1 - e^{-\frac{k_{ks}}{\lambda}}\right) \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot d\lambda \quad (7.7)$$

T_{neu} ist die gesuchte, korrigierte Temperatur der Dieselflamme, während T aus der eßdatenauswertung nach dem Modell der homogenen Flamme hervorgeht.

Aus dem vorverarbeiteten Referenzbild erhalten wir über ein Zweischichtmodell (Kapitel 9.4) für das berußte Fenster eine nichtlineare Zuordnungsvorschrift zu den im Modell angesetzten Schichtdicken $k_{ks, fenster}[i_{fenster}] = k_{ks}[i_{fenster}]$:

$$i_{fenster}(x, y) = f\left(\frac{R(x, y)}{R_{max}}, T_{neu}(x, y), k_{ks}(x, y)\right) \quad (7.8)$$

Messungen belegen, daß die hellsten Zonen bei gleichzeitiger Zusammenfassung zahlreicher Basisbilder nahezu idente Temperaturwerte aufweisen, eine vereinfachte Annahme unter Vernachlässigung der Temperatur als Bestimmungsgröße ist zulässig.

Ein Farbtripel $(R_{lin}(x, y), G_{lin}(x, y), B_{lin}(x, y))$ erlaubt bei vorgelagerter Kalibrierung des Aufnahmerecords die Berechnung von Rußdichte $k_{ks}(x, y)$ und $T(x, y)$. Mit diesen Eingangsdaten werden die Ergebniswerte des korrigierten Basisbildes folgendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned} R_{rest}(x, y) &= R_{dunkel}(x, y) + k_{corr} \cdot R(T_{neu}, k_{ks}) \cdot k_{opt} \\ G_{rest}(x, y) &= G_{dunkel}(x, y) + k_{corr} \cdot G(T_{neu}, k_{ks}) \cdot \frac{k_{opt}}{k_{grün}} \\ B_{rest}(x, y) &= B_{dunkel}(x, y) + k_{corr} \cdot B(T_{neu}, k_{ks}) \cdot \frac{k_{opt}}{k_{blau}} \end{aligned} \quad (7.9)$$

Bei dieser Zuordnungsvorschrift wird dem linearen Meßwert ein Korrekturfaktor k_{corr} zugeordnet, da zufolge der nach oben korrigierten Temperaturwerte mit $k_{corr}=1$ typisch Sättigung in den abgeleiteten Farbwerten auftritt.

Man erkennt anhand der bisherigen Ausführungen, daß sowohl Ergebnistemperatur als auch Rußdichte zur Berechnung eines korrigierten Basisbildes verwendet werden. Es stellt sich

somit die Frage, warum der Umweg über die Berechnung eines Basisbildes für die Temperaturmessung erforderlich ist.

Unter den getroffenen Annahmen bleiben einige Unschärfen nach wie vor aufrecht. Werden Teilbereiche des optischen Zugangs kaum von Flammen erreicht, so treten im erzeugten Referenzbild dunklere Bereiche auf, welche nicht von einer Rußschicht im optischen Zugang herrühren aber dennoch in eine Neubewertung der Ergebnistemperatur voll eingehen. Weiters wurde erwähnt, daß die Berußung oftmals eine zeitabhängige Größe darstellt, sodaß dem Anwender möglichst vollständiges Bildmaterial für eine korrekte Bewertung der Ergebnisdaten bereitstehen sollte. Schließlich kann zufolge stark gesättigter Bereiche in den Aufnahmebildern das Verfahren zu falschen Ergebnissen führen, da der maximale Rotwert R_{max} in jedem Fall mit 255 begrenzt ist.

7.3 Fallbeispiele

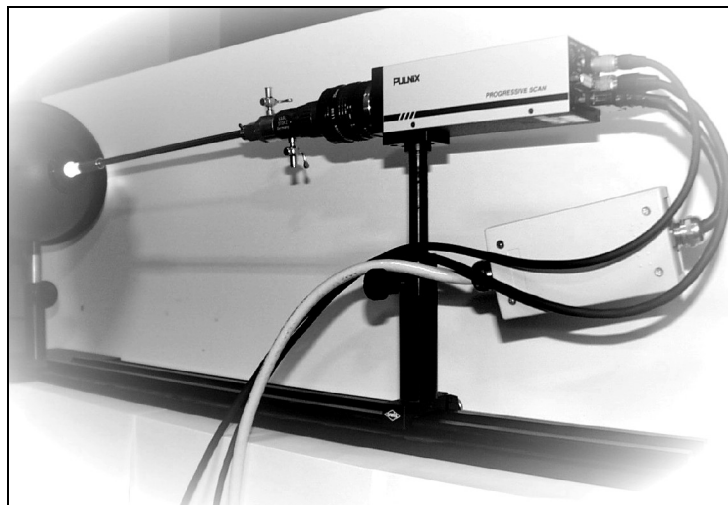


Bild 7.1: Meßaufbau zur Feststellung der Berußung am Quarzfenster

Farbbild D14 zeigt ein berußtes Quarzfenster nach Aufnahme unter extrem ungünstigen Bedingungen. Verwendet man eine derartige Aufnahme als Referenzbild zur Berechnung der lokalen Abdunkelung, so müßten das Emissionsvermögen der zur Aufnahme verwendeten Lichtquelle bekannt sein (vgl. (7.6)). Man erkennt im Vergleich zur von uns verwendeten Flammenstrahlung (Farbbild D15), daß die Hintergrundstrahlung ein gänzlich anderes spektrales Emissionsverhalten aufweist. Aus Farbbild D15 erkennt man weitere Vor- und Nachteile von Kalibriermessung und Bilderzeugung. Erfolgt eine Messung am Kalibriertisch unter Verwendung einer Ulbricht-Kugel (Bild 7.1), so weist das Kalibrierbild selbst bei höchster Sorgfalt eine nennenswerte Verschiebung der Koordinaten des Fensters relativ zum Sensor auf, die vor Auswertung der Daten ohne weiteren Nutzereingriff praktisch nicht rückgerechnet werden kann. Demgegenüber zeigt eine Betrachtung des auf Basis der Aufnahmedaten erstellten Referenzbildes, daß in ausgewählten Bereichen, die nur sehr dünne Flammenbereiche beinhalten, ohne weitere Maßnahmen eine falsche Zuordnung der Rußkonzentration am Fenster vorliegen wird. Es besteht dazu die Möglichkeit, durch händische Nachbearbeitung des Bildes diesen Fehler zu korrigieren. Die gezeigte Berußung

des Brennraumfensters beeinträchtigte die Messung soweit, daß nur ein Bruchteil der Gesamtfläche einer Berechnung zugeführt werden konnte.

Zur Prüfung der Robustheit des Korrekturverfahrens wurden über die Spezifikation hinausgehende Verarbeitungsparameter festgelegt, um ein nach Farbbild D15 beeinträchtigtes Bild zu restaurieren (Farbbild D16): die Schwellwerte für die Meßdatenauswertung (normalerweise festgelegt mit $R_{lin,min}=G_{lin,min}=25$) wurden auf 5 herabgesetzt. Die Ergebnisbilder von Temperaturberechnung und Schichtdicke für Originalaufnahme und restauriertem Bild gegenübergestellt (Farbbild D17 und D18). Die zunehmende Abdunkelung durch Ruß am Fenster führt im unkorrigierten Aufnahmebild zu einer deutlichen Verringerung der Ergebnistemperatur. Wird dagegen dem Auswerteverfahren das restaurierte Bild zugeführt, so ist diese Tendenz nicht gegeben. Man stellt in Übereinstimmung mit Messungen bei kaum beeinträchtigtem Fenster (vgl. Farbbild D4b) fest, daß in transparenten Zonen höhere Temperaturen als in hell strahlenden Bereichen festgestellt werden. Da das Referenzbild (vgl. Farbbild D15) im Bereich der Düse nicht korrigiert wurde, werden an dieser Stelle zu hohe Ergebnistemperaturen berechnet. Die punktuell hohen Temperaturabweichungen in Farbbild D17 sind Quantisierungsfehler, die bei Berechnung nach Spezifikation nicht in diesem Ausmaß auftreten.

In Kapitel 10 werden neben einer ausführlicheren Darstellung durchgeführter Messungen auch Ergebnisse bei unterschiedlicher Blickrichtung (vgl. Kapitel 2.6.2) dargestellt. Es wird dabei gezeigt, in welcher Größenordnung Meßfehler zufolge Rußablagerung am Brennraumfenster und aufgrund kalter Rußzonen zwischen Beobachtungsfenster und Flamme zu erwarten sind.

8. Serientaugliche Implementierung

Nach prototypischer Implementierung der Flammentemperaturberechnung wurden die Messungen stets mitbetreut, Probleme mit unzulässigen Kameraeinstellungen und schwer verständlichen Bedienschritten konnten damit ausgeschlossen werden. Der Auswertalgorithmus sollte im Rahmen der Entwicklung möglichst einfach verständlich unter ständiger Verfügbarkeit später „versteckter“ Informationen implementiert werden, um fragliche Meßergebnisse direkt prüfen zu können, die Auswertedauer spielte eine untergeordnete Rolle.

Im Zuge der Modellbildung wurde dargelegt, wie auf formaler Basis ein definierter Zusammenhang zwischen Meßgröße und Ergebnisgröße hergestellt werden kann. Daran anschließend wurde im Kapitel Kalibrierung und Meßdatenauswertung unter Berücksichtigung festgestellter Eigenschaften von Kamera, Kalibrierstrahler und Optik dargestellt, welche Aspekte für einen realen Ablauf Kalibrierung des Meßsystems – Messung am Motor – Meßdatenauswertung zu beachten sind.

In diesem Kapitel wenden wir uns der Einbindung des Auswertverfahrens in existierende Anwendungsumgebung des Engine-VideoScope zu. Neben der benutzerfreundlichen, widerspruchsfreien Gestaltung von Messung und Auswertung liegt das weitere Optimierungspotential in der Beschleunigung der Meßdatenauswertung. Schließlich werden Visualisierung der Auswertergebnisse und die Bereitstellung quantifizierter Ergebnisdaten diskutiert.

8.1 Strukturelle Verbesserungen

Die Kamerakalibrierung erfolgt beim prototypischen System in mehreren Schritten. Für jede Kalibriermessung wird ein eigener Record angelegt; nach Messung und Kalibrierung liegen demzufolge vier Aufnahmerecords vor:

- **Record**_{flamme}, der die auszuwertenden Flammenbilder enthält
- **Record**_{prozeß,dunkel}, der die unter Prozeßbedingungen erfaßten Dunkelbilder beinhaltet
- **Record**_{cal,dunkel}, der unter Kalibrierbedingungen erfaßte Dunkelbilder enthält
- **Record**_{cal,wolfram}, der die Bilder der Wolframbandlampe enthält

Die Stromstärke am Kalibrierstrahler wurde so eingestellt, daß die Helligkeit der Strahlungsquelle optimal an die bei der Messung vorliegenden Kameraeinstellungen angepaßt war. Durch Interpolation der wahren Temperatur T_{cal} über die Stromstärke in den angegebenen Kalibriertemperaturen wurden die gemessenen Farbwerte zugeordnet.

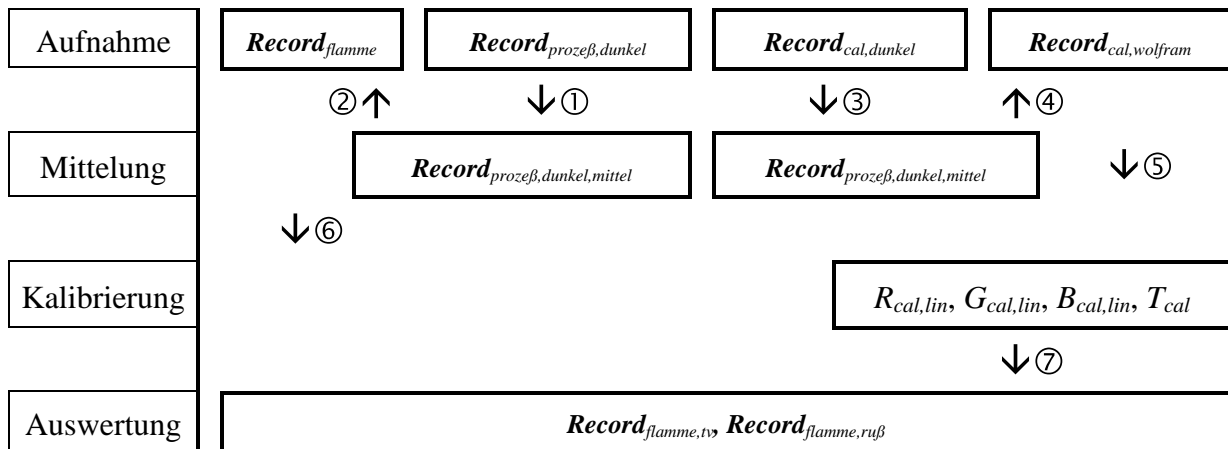


Tabelle 8.1: Messung und Auswertung bei prototypischer Implementierung

Die Auswertung erfolgt in mehreren Schritten:

- Berechnung zweier abgeleiteter Records nach (6.1) $Record_{proze\beta,dunkel,mittel}$ und $Record_{cal,dunkel,mittel}$, die je ein resultierendes Dunkelbild $I_{proze\beta,dunkel,mittel}$ und $I_{cal,dunkel,mittel}$ beinhalten (Schritte 1 und 3 in Tabelle 8.1).
- $I_{proze\beta,dunkel,mittel}$ wird unter dem Namen "_Dark" in das Unterverzeichnis von $Record_{flamme}$ kopiert, $I_{cal,dunkel,mittel}$ unter gleichem Namen in das Unterverzeichnis von $Record_{cal,wolfram}$ (Schritte 2 und 4)
- Nun erfolgt unter Angabe der Referenzposition die Auswahl der Bezugsfarbe $P_{cal,lin}$ nach (6.3) bis (6.6) (Schritt 5)
- Die so gewählten Farbwerte $R_{cal,lin}$, $G_{cal,lin}$ und $B_{cal,lin}$ stellen neben der angebbaren Kalibriertemperatur T_{cal} die Eingangsparameter für die letzte Meßdatenauswertung (Schritte 6 und 7) dar.

Diese Vorgangsweise mag auf ersten Blick etwas umständlich erscheinen, bietet aber im Rahmen der Entwicklung in mehrerer Hinsicht optimale Flexibilität:

- Oftmalige Wiederholung der Kalibrierschritte ermöglichen eine Bewertung der Reproduzierbarkeit des Kalibriervorganges durch Anwendung auf dasselbe Bildmaterial
- Durch eine zeitliche Entkoppelung von Messung und Auswertung steht jederzeit der volle Satz an Kalibrierdaten zur Verfügung
- Die Auswahl der Kalibrierwerte $R_{cal,lin}$, $G_{cal,lin}$ und $B_{cal,lin}$ setzt noch keine Kenntnis über die Filterkurven voraus, sie behalten also auch nach Änderungen im Modell des optischen Zugangs ihre Aussagekraft; eine einmalige Ermittlung ist also hinreichend.

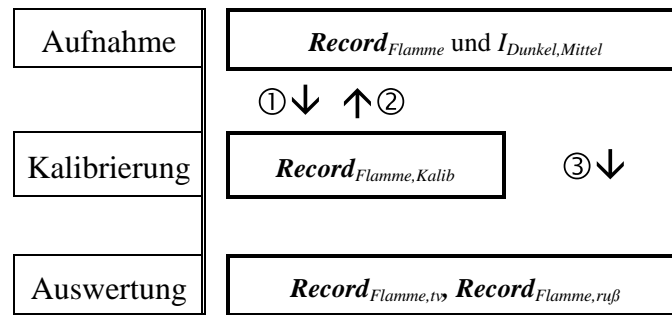


Tabelle 8.2: Messung und Auswertung bei verkaufsfertiger Lösung

Für eine verkaufsfertige Implementierung wurde auf Basis der gesammelten Erfahrungswerte folgende Vorgangsweise gewählt:

- Der aus der herstellerseitigen Kalibrierung hervorgehende Datensatz wird unter dem Namen *tvcalib.cal* im selben Unterverzeichnis bereitgestellt, in dem auch das ausführbare Programm liegt.
- Bei aktivierter Option *Prepare Thermovision* wird nach starten der Aufnahme geprüft, ob die Kameraeinstellungen im gültigen Bereich liegen und ob das Blitzgerät abgeschaltet ist.
- Durch Angabe eines Winkelwertes wird ein Winkelwert φ_{dunkel} spezifiziert, an dem der Verbrennungsraum vollständig dunkel ist.
- Die Bilder vom Verbrennungsvorgang werden nun wie üblich komplett aufgenommen.
- Nach Aufnahme der Flammenbilder werden bei gleichbleibenden Kameraeinstellungen beim vorgegebenen Winkel φ_{dunkel} 20 Dunkelbilder erfaßt und nach (6.1) gemittelt. Das Ergebnisbild wird als Teil der Aufnahmesequenz unter dem Namen *_Dark.bmp* gespeichert.
- Ehe eine Temperaturberechnung möglich ist, muß die Aufnahmesequenz kalibriert werden (Schritt 1 in Tabelle 8.2). Dazu wird das Verarbeitungsverfahren *Calibrate Thermovision* aufgerufen, welches nach dem in Kapitel 5 dargestellten Verfahren den unbekanntem optischen Korrekturfaktor k_{opt} findet; der Aufnahmerekord ist damit fertig kalibriert (Schritt 2) und kann anschließend ausgewertet werden (Schritt 3).
- Ein Temperatur-Record kann durch Aufruf des Verarbeitungsverfahrens *Thermovision for Diesel Flame* (Temperaturbilder $I_{flamme,tv,i,j}$) errechnet werden, ein Schichtdicken-Record (Schichtdickebilder $I_{flamme,ruß,i,j}$) durch Aufruf des Verfahrens *Derive Soot-Concentration*.
- Zur verbesserten Lesbarkeit von Temperaturunterschieden kann nach erfolgter Auswertung die Farbzuordnung auf einen wählbaren Temperaturbereich eingeschränkt werden; dazu wird das Verfahren *Change Color Mapping* aufgerufen.

Eine ausführliche Darstellung von Messung und Meßdatenauswertung ist in [AVL-TV] nachzulesen und setzt Grundkenntnisse im Umgang mit dem System voraus, welche in [AVL-EVS] vermittelt werden.

8.2 Beschleunigung der Meßdatenauswertung

Für die zeitoptimierte Auswertung der Meßdaten stand zunächst das Auswerteverfahren im Vordergrund. Das Optimierungspotential wurde dabei soweit ausgeschöpft, daß schließlich das Auswerteverfahren selbst eine untergeordnete Rolle spielte, während das Auswahlverfahren der lokalen Meßdaten, insbesondere die dafür erforderliche Medianfilterung den Gesamtaufwand dominierte. Der klassische Algorithmus zur Medianfilterung wurde deshalb durch ein neuartiges, im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickeltes, Verfahren ersetzt.

8.2.1 Optimierung des Auswerteverfahrens

Für eine prototypische Implementierung der Flammentemperatur wurde bei gegebenem Farbtripel $\underline{P}_{lin}=(R_{lin},G_{lin},B_{lin})$ nach (5.7) eine globale lineare Suche nach einem Fehlerminimum angesetzt, die Temperatur wurde entsprechend der Darstellungsmöglichkeit in einem Monochrombild mit 255 Temperaturstufen vorgenommen. Für eine Geschwindigkeitssteigerung wurden folgende Maßnahmen ergriffen:

- Frühzeitiges Erkennen von Farbwerten, die zu keiner gültigen Lösung führen können.
- Anstatt des vollen Satzes errechneter Relativwerte wird ein auf wenige Stützstellen reduzierter Datensatz unter der Verwendung von Interpolationsverfahren verwendet.
- Verwendung des zuletzt gefundenen Temperaturwertes als Anfangsbedingung für die aktuelle Suche.
- Definition einer endlichen Abbruchbedingung für das Suchverfahren.

Die Berechnungsdauer konnte bei praktisch gleichbleibendem Auswertergebnis gegenüber der prototypischen Implementierung mehr als verzehnfacht werden, wobei die oben genannten Optimierungsschritte die Auswertung selbst um etwa den Faktor 200 beschleunigt wurden. In der prototypischen Implementierung war die Berechnungsdauer hauptsächlich durch das Auswerteverfahren vorgegeben, während beim serientauglichen Verfahren die Medianfilterung, die ein wesentlich geringeres Optimierungspotential bot, den Hauptteil der gesamten Auswertung beansprucht. Für die genannte Medianfilterung, einem Standardverfahren der digitalen Bildverarbeitung, wurde ein für die Problemstellung optimiertes Verfahren entwickelt, das nun diskutiert werden soll.

8.2.2 Optimierung des Median-Filters

Der Medianfilter ist einer der leistungsfähigsten aber ein gleichzeitig sehr rechenaufwendiger nichtlinearer lokaler Operator zur Bildverbesserung. Im Engine VideoScope wird dieser Filtertyp nicht nur für eine Bildverbesserung sondern auch für die Auswahl repräsentativer Farbwerte für die Flammentemperaturberechnung eingesetzt. Das entwickelte Verfahren wurde sowohl für Flammenbilder, wie sie im Meßsystem vorliegen, als auch mit der worst-case-Annahme eines mit weißem Rauschen beaufschlagten Bildes mit dem herkömmlichen Algorithmus getestet und ist ab einer Operatorfenstergröße von 5x5 Bildpunkten in jedem Fall überlegen.

Die Grundidee liegt darin, daß der normalerweise verwendete Sortieralgorithmus, bei dem die Helligkeitswerte des aktuellen Operatorfensters nach ihrer Größe gereiht werden, nur für eine einmalige Initialisierung verwendet wird und daß die weitere Berechnung auf Basis verketteter Listen ausgeführt wird.

Klassischer Algorithmus

Die Basis bisheriger Implementierungen ist folgende Vorgangsweise:

- Die Intensitätswerte $P(x,y)$ im aktuellen Fensterbereich der Größe $size \cdot size$ werden auf ein Feld $window[n]$ mit $0 \leq n < filtersize = size \cdot size$ kopiert
- Die Elemente werden sortiert, sodaß gilt $window[n] \leq window[n+1]$
- In das Ergebnisbild wird der Wert $a[(filtersize-1)/2]$ eingetragen

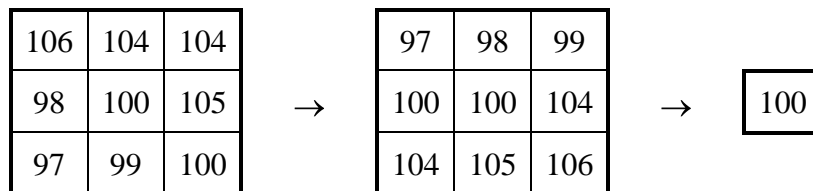


Tabelle 8.3: Klassischer Sortieralgorithmus für Median-Filterung

<i>CurrentPos=100</i>		<i>Element=1</i>	
<i>i</i>	<i>count[i]</i>	<i>next[i]</i>	<i>prev[i]</i>
:	0	x	x
96	0	x	x
97	1	98	106
98	1	99	97
99	1	100	98
100	2	104	99
101	0	x	x
102	0	x	x
103	0	x	x
104	2	105	100
105	1	106	104
106	1	97	105
:	0	x	x

Tabelle 8.4: Initialisierte Listen aus Tabelle 8.3

Neuer Lösungsansatz

Tabelle 8.4 veranschaulicht die Initialisierung des nachfolgend beschriebenen Verfahrens am Beispiel von Tabelle 8.3. Wesentliche Vorteile des hier dargestellten Verfahrens gegenüber einem weiteren vorgeschlagenen Konzept [Waltz] bestehen darin, daß der Algorithmus eine echte Median-Filterung durchführt, unabhängig von der Größe des Operatorfensters formuliert werden kann und daß der Speicherbedarf gering und unabhängig von der Fenstergröße ist.

- Am Zeilenanfang wird einmalig ein sortiertes Feld *window*[] nach klassischem Ansatz berechnet; mit diesen Anfangsdaten werden drei Arrays *count*[256], *next*[256] und *prev*[256] initialisiert.
- In *count*[*Intensity*] wird eingetragen, wie oft ein Bildpunkt mit dem Intensitätswert *Intensity* im betrachteten Fensterbereich vorliegt.
- In *next*[*Intensity*] wird bei nichtverschwindendem *count*[*Intensity*] der jeweils nächstgrößere im Fensterbereich vorhandene Intensitätswert eingetragen
- Analog dazu wird in *prev*[*Intensity*] der jeweils nächstkleinere im Fensterbereich vorhandene Intensitätswert eingetragen
- Darüberhinaus wird ein Zeiger *CurrentPos* und eine Elementnummer *Element* initialisiert, der die aktuelle Position des Median-Wertes im Array *count*[] beschreibt.
- Anschließend wird *window*[] abermals mit den Werten des Fensters für eine örtliche Zuordnung initialisiert, ein Wert *Offset* beschreibt zyklisch die Gruppe der zunächst zu ersetzenden Elemente von *window*[], er wird ebenfalls initialisiert.
- Die Abarbeitung der gesamten Zeile beginnt nun durch Eintragen des aktuellen Median-Wertes *CurrentPos* im Ergebnisbild.
- Im folgenden Schritt wird geprüft, ob ein neu in das Fenster einzutragender Intensitätswert *Intensity* ober- oder unterhalb von *CurrentPos* eingetragen wird und ob der im *window*[] Array damit überschriebene Wert in gleicher Relation zur aktuellen *CurrentPos* steht. Wenn diese Bedingung verletzt ist, muß *Element* um eine Position verschoben werden oder gegebenenfalls *Element* auf *count*[*prev*[*CurrentPos*]] und *CurrentPos* auf *prev*[*CurrentPos*] bzw. *Element* auf 0 und *CurrentPos* auf *next*[*CurrentPos*] gesetzt werden
- Beim Übergang von *count*[*old*] von 1 auf 0 wird *prev*[*old*] auf *next*[*old*] und *next*[*old*] auf *prev*[*old*] gesetzt, dieses „Streichen aus der Liste“ ist demzufolge unproblematisch.
- Andererseits haben aber neu einzutragende Intensitätswerte *new*, die zuvor keinen Eintrag im Array *count*[] aufwiesen, zur Folge, daß das nächste *prev*[*ClosestAbove*] und das vorhergehende *next*[*ClosestBelow*] an den neu eingetragenen Wert angepaßt werden müssen, wobei weder *ClosestAbove* noch *ClosestBelow* vorliegen, sie müssen also erst gesucht werden.

Das letztgenannte Problem läßt auf ersten Blick eine schlechte Effizienz bei Bildern mit dominant hohen Ortsfrequenzen erwarten, für die der Algorithmus jedoch gar nicht konzipiert wurde. Es stellte sich allerdings heraus, daß der neue Ansatz ab einer Filtergröße von 5x5 Bildpunkten praktisch fast unabhängig von der Qualität des Basisbildes dem klassischen Verfahren überlegen ist. Folgende Gegenüberstellung verdeutlicht dies auf Basis zweier Bilder; der für die Temperaturmessung typische Fall wurde dick umrandet.

Filtergröße	Weißes Rauschen			Flammenbild		
	klassisch	neu	Faktor	klassisch	neu	Faktor
3x3	6	9	0,67	4	5	0.80
5x5	35	11	3,18	23	8	2.88
7x7	120	19	6,32	84	17	4.94
9x9	323	32	10,01	223	30	7.43

Tabelle 8.5: Gegenüberstellung klassischer, neuer Algorithmus

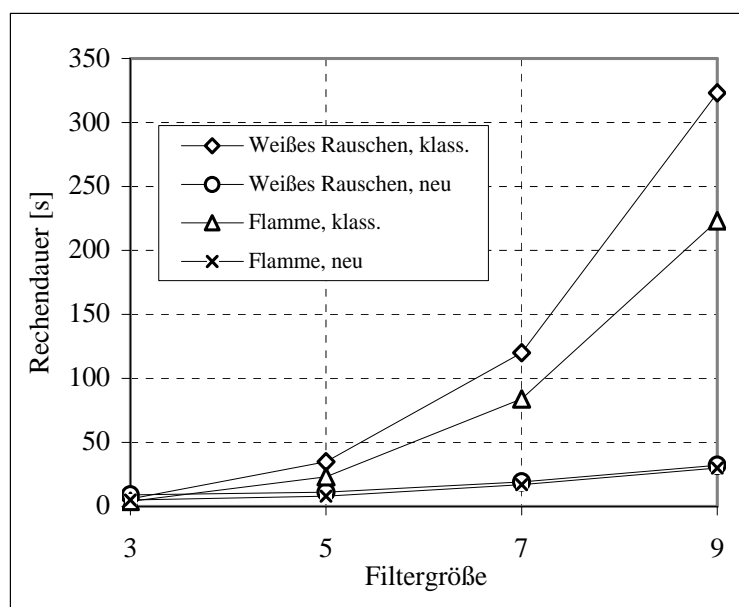


Diagramm 8.1: Gegenüberstellung klassischer, neuer Algorithmus

8.3 Visualisierung von Auswertergebnissen

Aus der bisherigen Ausführung wird deutlich, daß einem gemessenen Flammenbild $I_{\text{flamme},i,j}$ im Zuge der Flammentemperaturberechnung zunächst Monochrombilder $I_{\text{flamme,temp},i,j}$ und $I_{\text{flamme,ruß},i,j}$ zugeordnet werden, deren Bildpunkte $P(x,y)$ die Ergebnistemperatur und lokale Rußkonzentration repräsentieren. Das menschliche Auge vermag in einem Bild nur etwa 20 Grauwerte zu unterscheiden. Eine Verbesserung des Auflösungsvermögens läßt sich durch den Einsatz von Falschfarben erreichen; dabei wird jedem einzelnen Helligkeitswert *Intensity* ein Farbwert $LUT[Intensity]$ zugeordnet. Eine Farbzuoordnung sollte so gestaltet werden, daß unterschiedliche Temperaturzonen eindeutig zuordbar sind, also in unmittelbarer Nachbarschaft kontinuierliche Farbabstufungen vorliegen, sich jedoch von anderen Bereichen eindeutig unterscheiden lassen. Gleichermäßen soll das subjektive Empfinden „kalt“, „heiß“ unterstützt werden. Anbieter von Infrarot-Systemen verwenden verschiedene Look-Up-Tabellen (LUTs), um diese Kriterien zu erfüllen. Aufgrund eigener Recherchen wurde festgestellt, daß speziell bei Temperaturbilddarstellungen die Anbieter vielfach nur zwei bis drei Hauptfarben verwenden, mit dem Resultat, daß der Betrachter gradierte Übergänge immer noch sehr unzureichend erkennt. Für die Darstellung von Temperatur- und Rußdichtebildern wurde eine Farbzuoordnungstabelle nach Diagramm 8.2 realisiert.

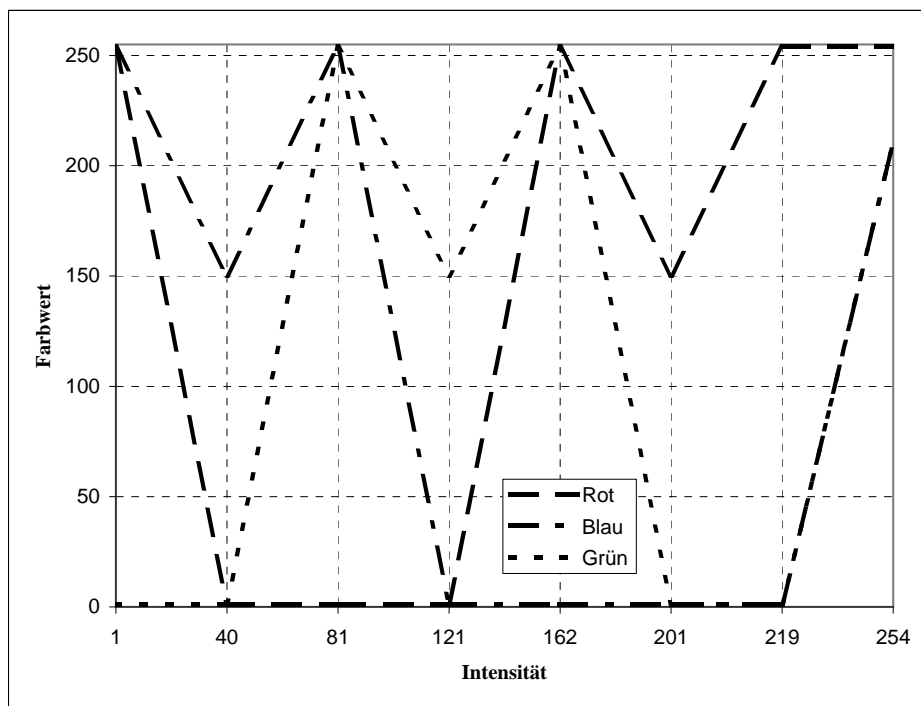


Diagramm 8.2: Farbzuoordnungstabelle

Mit der so definierten Farbzuoordnungstabelle wird dem Benutzer erst ein grober Überblick über lokale Temperaturen vermittelt. Eine exakte Zuordnung einer dem Intensitätswert zugeordneten Daten geschieht über ein Data Mapping (dargestellt für Temperaturbilder in Tabelle 8.6); bewegt der Nutzer den Mauszeiger über die ausgewertete Flamme, so wird in

der Statusleiste automatisch die zur aktuellen Position gehörige Information dargestellt (Temperaturwert, Rußkonzentration, Helligkeit, etc.). Die ausgewerteten Bilder im Anhang zeigen, daß trotz eines mit [1.800K, 3.000K] sehr weit aufgelösten Temperaturbereiches in den meisten Anwendungsfällen im Bild auftretende Temperaturunterschiede recht deutlich abgelesen werden können. Treten nur geringe Temperaturunterschiede auf oder sollen die Ergebnistemperaturen als Grauwerte dargestellt werden, so besteht die Möglichkeit, im Rahmen einer Nachbearbeitung durch weiteres Spreizen der Farbzuoordnungstabelle die Sichtbarkeit zu verbessern (vgl. Farbbilder C10 und C11).

<i>Range</i>	<i>Description</i>	<i>Unit</i>	<i>MinMapIntensity</i>	<i>MaxMapIntensity</i>	<i>Bedeutung</i>
0	Linear	-	0	0	Hintergrund (schwarz)
1	T	K	1	239	Ergebnistemperatur
2	k·s	·1E-9	240	252	Schichtdicke
3	Red Intensity	-	253	254	Iso-Rot-Intensität im Basisbild
4	Linear	-	255	255	Gesättigter Bereich, Beschriftung

Tabelle 8.6: Data-Mapping für Temperaturbilder

8.4 Datenreduktion und numerische Darstellung der Meßergebnisse

Bisher wurde lediglich die bildhafte Darstellung der Meßergebnisse diskutiert. Für eine weitere Interpretation der Meßergebnisse, etwa zur Darstellung der Meßergebnisse in einem Diagramm, ist eine sinnvolle Reduktion der Meßdaten erforderlich.

Interessant für eine weitere Auswertung sind folgende Informationen:

- Eindeutige Zuordnung Daten – Temperaturbild, definiert durch die Parameter *Value* und *Repetition*
- Größe der Flamme im Temperaturbild
- geeignet reduzierte Temperaturwerte

Die Größe der Flamme (*Flammengröße*) wird im Ergebnisprotokoll in Bildpunkten angegeben. Dabei gilt: $Flammengröße = Flammengröße_{mess} + Flammengröße_{sat}$, wobei zwischen ausgewerteten Meßpunkten und gesättigten (weiß maskierten) Bereichen unterschieden wird.

Zur Reduktion der örtlichen Temperaturwerte kommen verschiedene Verfahren in Frage. Im einfachsten Fall erfolgt eine lineare Mittelung der berechneten Ergebnistemperaturen für jedes Temperaturbild:

$$T_{\text{Durchschnitt, Wert, Repetition}} = \frac{\sum T_{\text{mess}}(x, y)}{Flammengröße_{\text{mess}}} \quad (8.1)$$

Der wesentliche Nachteil dieser globalen Temperaturentwertung liegt in der Tatsache, daß eine Aussage über die Temperaturverteilung vollständig verloren geht. Man könnte erwägen, zusätzlich zur gemittelten Temperatur auch die Standardabweichung zu berechnen.

Man kann zur Bestimmung einer einzigen Ergebnistemperatur von einer durch die bisherige Meßtechnik vorgegebene Methode der integralen Bewertung ausgehen. Dazu werden nicht die berechneten Ergebnistemperaturen, sondern die der Messung zugeführten Intensitäten einer Meßdatenauswertung zugeführt:

$$T_{Integral,Wert,Repetition} = T \left(\frac{\sum R_{lin}(x, y)}{Flammengröße_{mess}}, \frac{\sum G_{lin}(x, y)}{Flammengröße_{mess}} \right) \quad (8.2)$$

Im Gegensatz zur im Rahmen der Arbeit bisher diskutierten Meßdatenauswertung geht bei dieser Berechnung die lokale Bildhelligkeit in die Berechnung der Ergebnistemperatur ein, steht damit in krassem Widerspruch zum übrigen Auswerteverfahren, und wird deshalb nicht weiter verfolgt.

Zur Darstellung der Temperaturverteilung wurde folgendes Zuordnungsverfahren implementiert:

1. Bestimmung von $Flammengröße_{mess}$
2. Bestimmung der Temperaturverteilung: $AnzahlBildpunkte[T]$ gibt die Häufigkeit jeder Ergebnistemperatur in Bildpunkten an
3. Über einen Parameter $AnzahlDiskreterErgebnistemperaturen$ werden gemessene Temperaturen so reduziert, daß jedem Temperaturintervall dieselbe Anzahl von Bildpunkten zugeordnet wird:

$$\sum_{T=T_{min}}^{T \leq T_i} AnzahlBildpunkte[T] \cong \frac{(2 \cdot i + 1) \cdot Flammengröße_{mess}}{2 \cdot AnzahlDiskreterErgebnistemperaturen} \quad (8.3)$$

Durch diese Darstellung werden alle statistisch relevanten Temperaturzonen – und damit auch Diffusionsvorgänge – im Ergebnisprotokoll weiterhin beschrieben. Diagramm 8.3 zeigt die Ermittlung quantisierter Ergebnistemperaturen an einem Beispiel mit sieben diskreten Ergebnistemperaturen. Die quantifizierten Ergebnisdaten werden für jedes berechnete Temperaturbild im Ergebnisprotokoll eingetragen und können mit einem Tabellenkalkulationsprogramm leicht in Diagrammform dargestellt werden. Zusätzlich hat der Anwender die Möglichkeit, alle festgestellten Ergebnistemperaturen auch im Ergebnisbild zu quantifizieren, wobei die in Diagramm 8.3 strichliert dargestellte Treppenfunktion der Zuordnungsvorschrift entspricht.

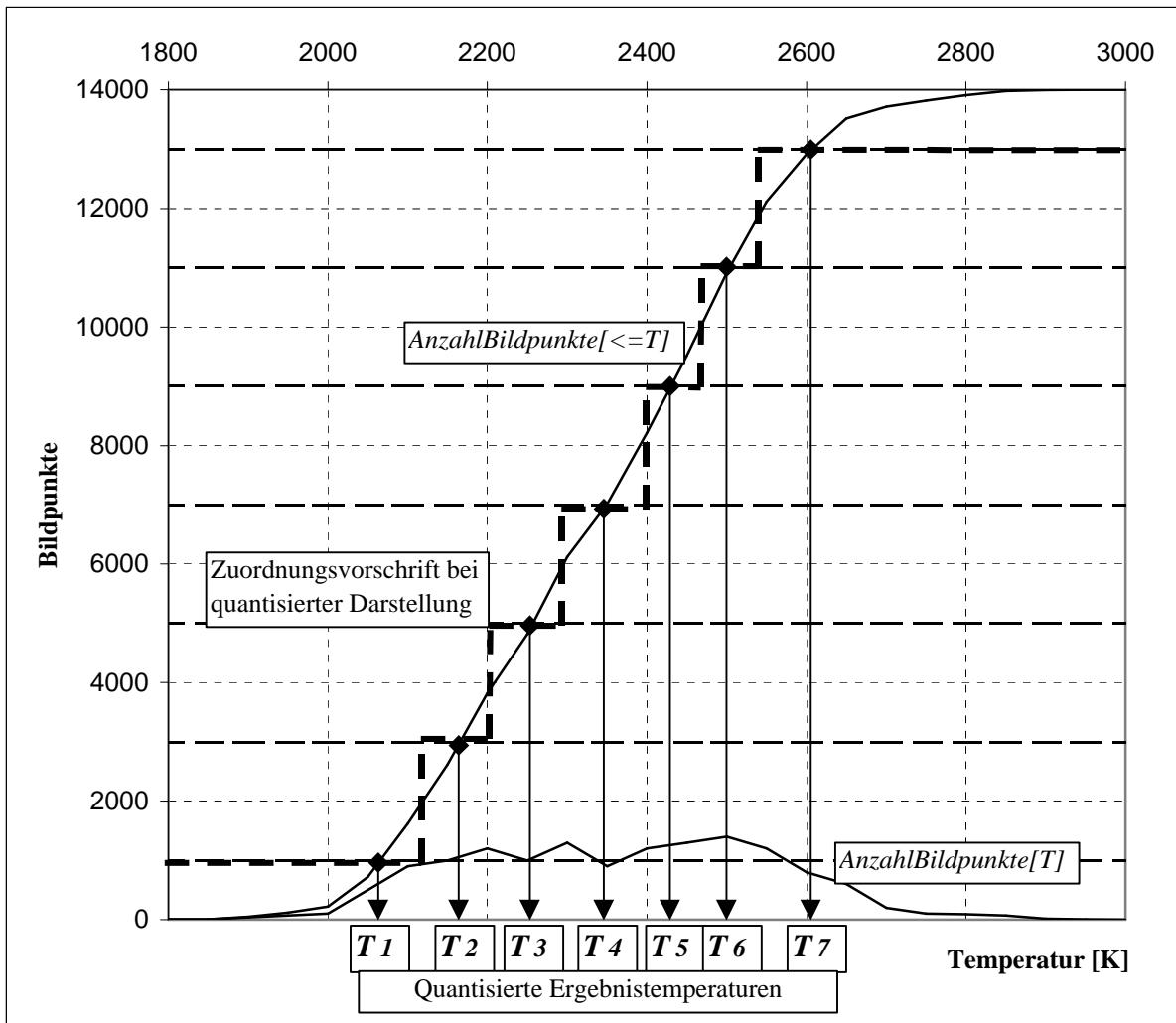


Diagramm 8.3: Bestimmung quantisierter Ergebnistemperaturen

9. Fehlerbetrachtungen

Im Rahmen der Modellbildung wurde eine mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen dem beobachteten Prozeß und den erfaßten Meßgrößen entwickelt. Mögliche Fehler in Meßtechnik und Auswertung wurden an verschiedenen Stellen zwar kurz angedeutet, eine quantitative Bewertung verschiedener Einflußgrößen blieb aber bisher unbehandelt.

Für Modellbildung und Implementierung wurde eine eindeutig nachvollziehbare Ableitung von den Meßdaten zum Temperaturwert beschrieben. Selbst unter der Voraussetzung idealer Eigenschaften eines beliebigen Meßsystems können allein auf Grund nicht vollständig erfaßbarer Eigenschaften der Meßgröße lediglich Aussagen über Zuordnungswahrscheinlichkeiten zwischen Meßgröße und Ergebnisgröße getroffen werden. Das Auswerteverfahren mit definierter Zuordnung zwischen Meßdaten und Ergebnisgröße vermittelt eine Eindeutigkeit, die real nicht existieren kann. In diesem Kapitel werden Fehlerbetrachtungen deshalb nicht ausschließlich mit mathematischen Methoden beschrieben, vielmehr sollen graphische (Diagramme, Skizzen, synthetisierte Bilder) und begriffliche Darstellungen mathematische und damit formal exakte Methoden ergänzen.

Die später verwendeten Diagramme erlauben es, Tendenzen und Fehler abzuschätzen, wie es anhand eines rein mathematischen Ansatzes, sofern überhaupt, nur mit untragbarem Aufwand möglich wäre, da die gesamte Auswertung von mathematisch nicht geschlossenen darstellbaren Filterkurven abhängig ist. Man beachte, daß selbst die Integration des Planckschen Strahlungsgesetzes (2.1) aus der Menge der elementaren Funktionen herausführt und damit mathematisch exakt nur als unendliche Reihe dargestellt werden kann.

9.1 Der Übergang vom realen System zur formalen Beschreibung

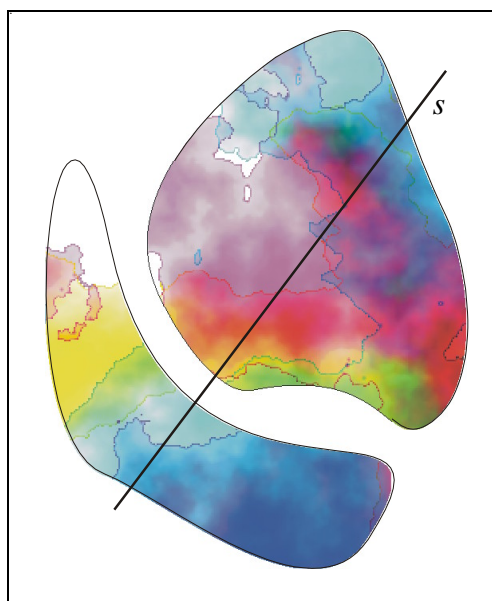


Bild 9.1: Ebener Schnitt durch eine Flamme

Wir interpretieren Bild 9.1 als Speziesdichte oder Temperatur einer leuchtenden Flamme und gehen dazu von der Vorstellung aus, daß die dort dargestellte Größe der realen Verteilung in der Flamme entspricht.

Stellen wir uns nun weiters vor, daß wir über einen ebenen Schnitt durch die Flamme, angedeutet durch die Linie s in Bild 9.1, ein neues ebenes Abbild, allerdings für eine abweichende Schnittebene vor uns haben. Wir erkennen für diesen Fall, daß die beiden Bilder nur genau entlang einer einzigen Linie, und zwar an der Schnittgeraden s der beiden betrachteten Ebenen, einander entsprechen. Ein dreidimensionales Abbild der Flamme könnte man dann erhalten, wenn man im gesamten Raumbereich der Flamme eine ausreichende Anzahl von geeignet gewählten Schnitten nach Bild 9.1 legt.

Wir erkennen, daß ein ebener Schnitt durch eine Flamme allgemein auf Zonen unterschiedlicher Temperatur und Rußdichte führt, und daß diese ebene Verteilung von der Wahl der willkürlich gewählten Schnittebene abhängt.

Gehen wir nun umgekehrt von einem ebenen Flammenbild aus, das wir unter Verwendung des Engine VideoScope erfaßt haben, und überlegen wir, wie dieses Bild zustande gekommen ist. Zunächst wird klar, daß auch dieses ebene Abbild von der Beobachtungsrichtung abhängt. Außerdem erkennt man leicht, daß das Ergebnisbild *keinen* ebenen Schnitt durch die Flamme darstellt.

Wird mit einer Kamera allgemein ein undurchsichtiges Objekt abgebildet, so kann der Bildinhalt aus den Eigenschaften aller Oberflächen und dem Umgebungslicht beschrieben werden. Betrachtet man umgekehrt einen transparenten Körper, so resultiert das Ergebnisbild allgemein aus Reflexionen an der Oberfläche des transparenten Körpers, aus den spektralen Absorptionseigenschaften ebenso wie aus dem Bildhintergrund, der zufolge Geometrie, Beugungs- und Dispersionseigenschaften des transparenten Körpers verändert abgebildet wird.

Wir haben bereits festgestellt, daß der subjektive Gesamteindruck bei der Betrachtung einer Flamme nicht ausschließlich auf die Strahlungseigenschaften der „Flammenoberfläche“ zurückzuführen sein kann. Vielmehr liefert auch das „Innere“ der Flamme, bei einer optisch nicht dichten Flamme im allgemeinen auch der Hintergrund, einen Beitrag zur Gesamtstrahlung.

Es stellt sich nun die Frage, welche Temperatur auf Basis der Auswertung dieses Bildes überhaupt berechnet wird bzw. berechnet werden kann. Geht man von einer räumlichen Temperaturverteilung aus, die qualitativ der obigen Darstellung entspricht, und abgesehen von sehr dünn-schichtigen Randzonen auch optisch dicht ist, so kann man davon ausgehen, daß die gemessene Strahlung in erster Linie auf die der Kamera zugewandten obersten Schichten der betrachteten Flamme zurückzuführen ist, und daß die gemessene Schicht einer „mittleren“ Temperatur in diesem Bereich entsprechen muß. Diese Behauptung wird auf formaler Basis später noch untermauert und es wird dabei gezeigt, was konkret unter einer „mittleren“ Temperatur zu verstehen ist. In optisch dünnen Bereichen der Flamme werden nach bisher gesagtem auch Reflexionseigenschaften des Flammenhintergrundes, also der Oberfläche des Verbrennungsraumes, einen Anteil an der gemessenen Gesamtstrahlung

liefern. Eine Methode, eine Vorstellung über die quantitative Auswirkung der nicht idealen Absorptionseigenschaften zu erhalten besteht darin, Flammenbilder unmittelbar nach Reinigung des Motorinneren zu erfassen und anschließend die Meßergebnisse mit Aufnahmen bei stark verrußtem Verbrennungsraum zu vergleichen⁺.

Der optische Zugang selbst erfolgt durch ein kleines Sichtfenster in den Motorraum, über das von außen kein die Messung störendes Licht eingekoppelt wird. Der gesamte, verrußte Verbrennungsraum entspricht demzufolge auch sehr gut dem Modell eines Schwarzen Strahlers. Die Bildinformation wird nach einem Quarzfenster über ein Endoskop und ein Objektiv auf den CCD-Bildsensor der messenden Kamera abgebildet. Von diesem Bildsensor wird das gemessene Bild ausgelesen und noch in der Kamera digitalisiert. Aufgrund der anschließenden digitalen Übertragung kann davon ausgegangen werden, daß der Messung nachgelagert keine weiteren Fehler eingekoppelt werden, die Meßkette ist also durch die Komponenten Quarzfenster, Endoskop, Objektiv und Kamera vollständig beschrieben. Der gesamte optische Zugang kann als ein transparenter Körper betrachtet werden, der wie zuvor beschrieben sehr wohl einen Einfluß auf die gemessene Strahlung hat und dessen Eigenschaften dementsprechend in die Meßdatenauswertung einfließen müssen. Eine Vermessung der spektralen Transmissivität wurde für sämtliche Komponenten des optischen Zugangs durchgeführt, dies allerdings nur einmalig und unter Laborbedingungen. Zufolge Verschmutzung der Optik verändert sich naturgemäß die spektrale Durchlässigkeit. Nimmt man an, daß Endoskop und Objektiv stets sauber sind, so bleibt letztlich das Quarzfenster, welches direkt in den Brennraum eingeführt wird und dort verrußen kann. Dabei ist zu beachten, daß der Verrußungszustand über den Ort nicht kontinuierlich ist, sondern daß Rußablagerungen während der Messung und örtlich begrenzt immer wieder ausgeschlagen werden. Dies kann zur Folge haben, daß die chromatische Aberration in diesen Bereichen eine nicht vernachlässigbare Fehlerquelle darstellt. In Bereichen kontinuierlicher Übergänge der gemessenen Farbwerte spielt dieser Abbildungsfehler von Endoskopen und Objektiv eine untergeordnete Rolle. Eine Vignettierung tritt dann auf, wenn die Blende am Objektiv nicht vollständig geöffnet ist. In diesem Fall fallen die gemessenen Strahlungsintensitäten am Bildrand gegenüber Bildmitte ab und verursachen Fehler in der Meßdatenauswertung. Unter vorgeschriebenen Meßbedingungen (vollständig geöffnete Blende, Empfindlichkeitsanpassung der Kamera ausschließlich über Belichtungsdauer und Kameraverstärkung) wird ein derartiger Meßfehler nicht festgestellt. Weitere Abbildungsfehler, die eine geometrische Verzerrung der Szene zur Folge haben, spielen hinsichtlich der vorliegenden Problemstellung keine Rolle und werden deshalb auch nicht behandelt.

Letztlich bleibt noch die Kamera als Ende der Meßkette zu diskutieren, deren Eigenschaften an anderer Stelle bereits erläutert wurden. Für eine quantitative Fehlerabschätzung sind drei wesentliche Einflußgrößen zu berücksichtigen, nämlich der Streubereich der realen spektralen

⁺ Dazu muß sichergestellt werden, daß die Flamme unverzüglich nach Beginn der Feuerung erfaßt wird. Ein zyklusgenauer Aufnahmestart wird mit der kommenden Gerätegeneration bereitgestellt (ab Engine VideoScope 1.6).

Transmissivitätsgrade der primären Farbfilter, das auftretende Meßrauschen sowie die Quantifizierung. Die Aufgabe, spektrale Filtereigenschaften einer Kamera zu vermessen ist meßtechnisch sehr aufwendig und konnte deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden⁺. Eine Abschätzung der Auswirkung vom Datenblatt abweichender realer Transmissivitäten kann deshalb nur durch die willkürliche Annahme eines Streubereiches für die vorgegebenen Filterkurven und durch eine anschließende Bestimmung der daraus resultierenden Meßfehler bewertet werden. Demgegenüber stellt eine quantitative Abschätzung der Meßfehler zufolge Meßrauschen und Quantifizierung kein Problem dar.

9.2 Unschärfen im Modell der Systemkomponenten

9.2.1 Falsche Annahmen der spektralen Transmissivität von Kamera und Optik

Werden vom realen Meßaufbau abweichende Filterkennlinien verwendet, so wird allgemein die gemessene Strahlung des Kerasensors falsch interpretiert. Relevant ist dabei der Summenfehler von Sekundärfilter F_s und jeweiligem primärem Farbfilter F_R , F_G und F_B .

An dieser Stelle werden Auswirkungen von Fehlannahmen folgendermaßen untersucht:

- Die Transmissionsgrade τ_R , τ_G und τ_B , werden nach Kamera-Datenblatt angenommen
- Am Modell eines idealisierten Rechteckfilters, dessen Empfindlichkeitsbereich sich über das Intervall $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ erstreckt, werden die resultierenden Veränderungen der Relativ- und Intensitätswerte nach (5.5) und (5.6) für gleichbleibendes $k_{ks}=k_{ks,max}$ untersucht.

⁺ Die realen Filterkennlinien der verwendeten Kamera wurden anhand von Messungen an der Wolframbandlampe bei mehreren Kalibriertemperaturen durch eine Korrektur der nominalen Filterkurven angenähert.

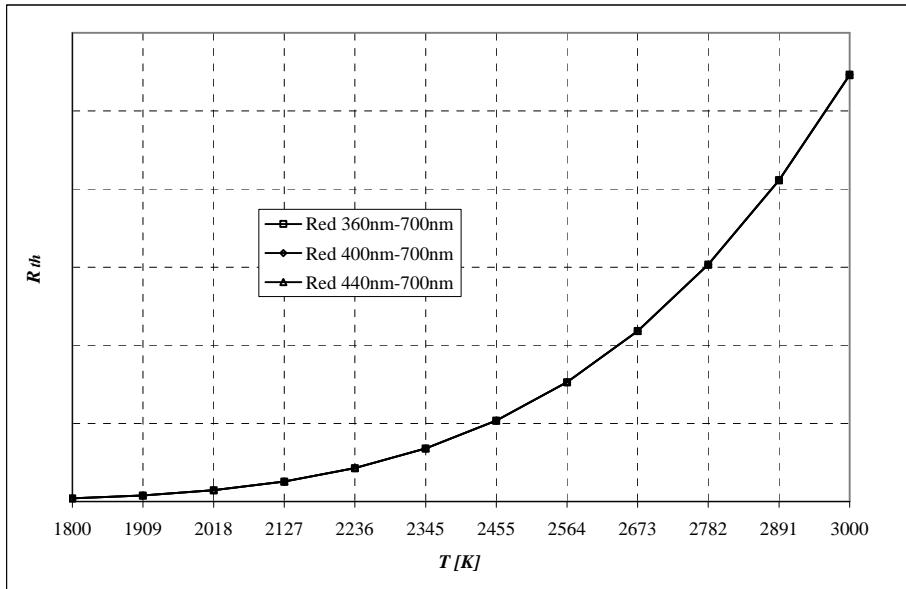


Diagramm 9.1: Intensität des Rot-Kanals bei Variation von λ_{\min}

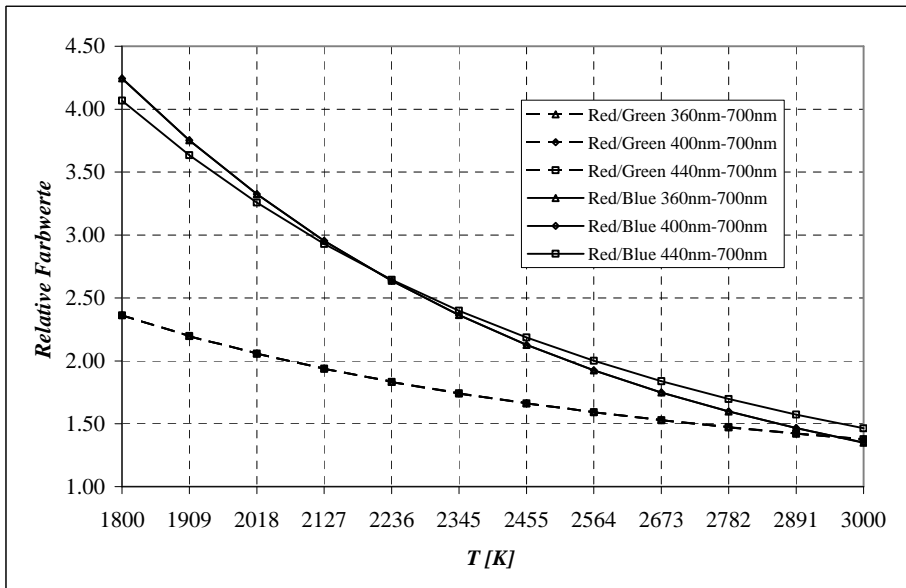


Diagramm 9.2: Relative Farbwerte bei Variation von λ_{\min}

Die Diagramme 9.1 und 9.2 zeigen, daß sich bei Variation des Durchlaßbereichs im kurzwelligeren Spektralbereich nur der relative Farbwert Rot/Blau merkbar ändert, die für die serientaugliche Implementierung gewählten Basisdaten (Rot-Intensität und relativer Farbwert Rot/Grün) bleiben praktisch unbeeinträchtigt.

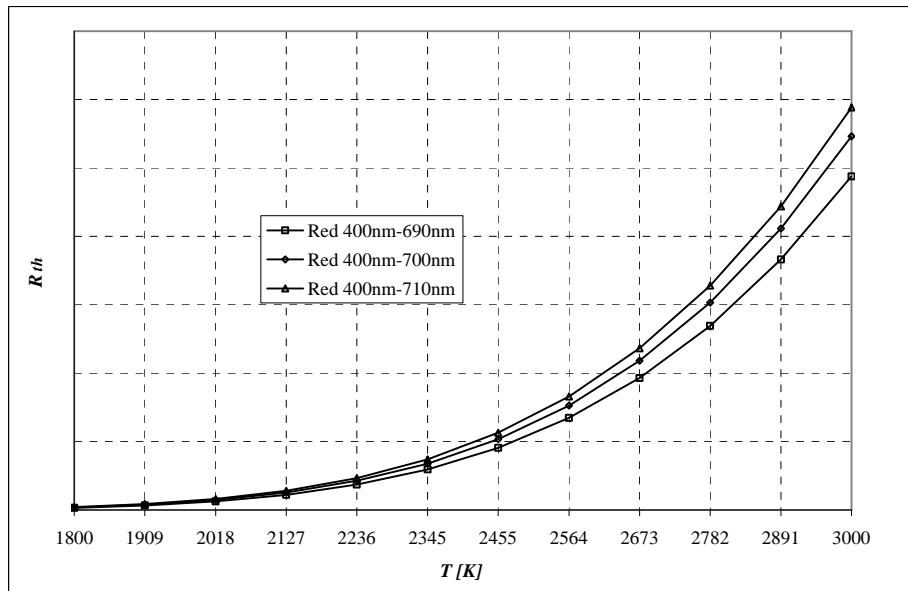


Diagramm 9.3: Intensität des Rot-Kanals bei Variation von λ_{max}

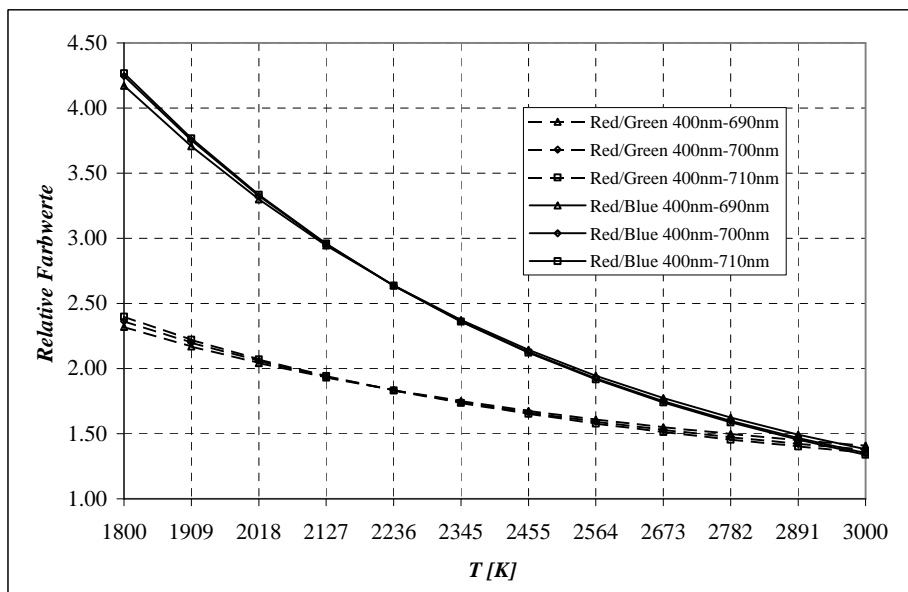


Diagramm 9.4: Relative Farbwerte bei Variation von λ_{max}

Im Gegensatz zu Unschärfen im oberen Frequenzbereich treten bei Fehlern im langwelligen Spektralbereich bei allen Meßwerten deutlich erkennbare Zuordnungsfehler auf. Dies ist darauf zurückzuführen, daß im betrachteten Temperaturbereich der Hauptteil der Strahlung diesen Frequenzen zuzuordnen ist und daß alle Primärfilter im angesetzten Übergangsbereich eine merkliche Restempfindlichkeit aufweisen.

Wir stellen fest, daß im betrachteten Temperaturintervall die genaue Kenntnis der Filtereigenschaften im langwelligen Bereich erforderlich ist. Man beachte, daß die Parameterschar der Diagramme 9.3 und 9.4 aus einem Streubereich $\Delta\lambda_{max}$ von nur 20nm für die obere Durchlässigkeitsgrenze hervorgeht, während der Streubereich für die Diagramme Diagramme 9.1 und 9.2 $\Delta\lambda_{min}=80\text{nm}$ betrug.

Messungen an der Wolframbandlampe bestätigten, daß unter Verwendung unterschiedlicher Chargen von unvermessenen Kantenfiltern nach gleicher Spezifikation bei gleichbleibenden Kalibrierdaten untragbare Temperaturfehler von bis zu $\pm 150\text{K}$ auftreten. Demgegenüber wurden unter Verwendung unterschiedlicher Endoskope lediglich Abweichungen in der Größenordnung von ca. $\pm 30\text{K}$ festgestellt, sodaß bei gleichbleibendem Kantenfilter von einer mehrmaligen Kalibrierung für unterschiedliche Endoskope abgesehen werden konnte.

9.2.2 Chromatische Aberration und Single-Chip-Bildsensor

Messungen haben gezeigt, daß die chromatische Aberration im Vergleich zur Tatsache, daß mit der vorliegenden Kamera die Farbmessung an nicht deckungsgleichen Bildpunkten erfolgt (siehe Sensorstruktur, Bild 4.9), eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. Messung am Wolframband, Farbtafel D2). Harte Übergänge am Wolframband führen ebenso wie Abbildungsgrenzen durch den endoskopischen Zugang zu fehlerhaften Ergebnistemperaturen. Die Abbildung von Flammen führt allgemein auf niedrige Ortsfrequenzen, lokale Rußablagerungen am Quarzfenster führen typisch auf Meßfehler, die hauptsächlich auf selektive Absorption (vgl. Kapitel 7) zurückzuführen sind, während Abbildungsfehler eine untergeordnete Rolle spielen (während der Messung wird auf die Flamme, nicht aber auf das Quarzfenster scharfgestellt, vgl. Farbtafel D14).

9.2.3 Nichtlineares Integrationsverhalten der Kamera

Selbst bei abgeschalteter Gamma-Korrektur besteht bei jeder Kamera in der Regel ein nicht exakt linearer Zusammenhang zwischen eintreffender Strahlung und Meßwert. Messungen bei unterschiedlicher Blende haben jedoch bestätigt, daß die verwendete Kamera im gesamten ungesättigten Bereich keine signifikanten Linearitätsfehler aufweist.

9.2.4 Rauschen und Quantisierung

Die Aussagekraft eines einzelnen Pixels für die Messung ist begrenzt durch die 8bit-Quantisierung sowie durch das ihm überlagerte Meßrauschen. Da durch ein bereits beschriebenes Auswahlverfahren nicht auf Basis von Punktoperationen gearbeitet wird, kann das Rauschen bei realistischen Aufnahmebedingungen praktisch vernachlässigt werden. Setzen wir für eine grobe Abschätzung entstehender Berechnungsfehler zufolge Rauschen und Quantisierung dennoch eine Unschärfe im Bereich ± 1 an. Nehmen wir weiters an, daß für die Berechnung ein Nutzsignal von $P_{lin,min}=(20,20,20)$ vorgeschrieben wird. Aus früheren Darstellungen ersehen wir, daß der Meßfehler bei hohen Temperaturen, geringem Nutzsignal und optisch dichter Flamme (vgl. Diagramme 5.1 und 5.2) am größten ist. Sei $R=R(x_0,y_0)=28$ und $G=G(x_0,y_0)=20$, somit ist $R/G=1,4$ und die zugehörige Temperatur $T_0=2.560^\circ\text{K}$. Setzen wir nun $R\pm 1$ und $G\pm 0$ (der Grünanteil ist praktisch rauschfrei) an, so erhalten wir als Unschärfe für den Relativwert das Intervall $[1,35\dots 1,45]$ und eine Schwankungsbreite der Temperatur von ca. $\pm 70\text{K}$. Diese Schwankungsbreite kann in den Ergebnisbildern tatsächlich

festgestellt werden⁺, sofern nicht das sensoroptimierte Auswahlverfahren für die Meßdaten verwendet wird.

9.3 Frequenzabhängigkeit des Emissionsvermögens

Das angesetzte Modell der rußenden Dieselflamme beinhaltet neben der generellen Annahme einer punktwise homogenen Schichtdicke, Rußkonzentration und Temperatur auch einen empirisch gefundenen Parameter zur Beschreibung des Emissionsvermögens.

Es wurde bereits festgestellt, daß das Meßsystem mit der Bereitstellung von drei Farbwerten überbestimmt ist. Damit ist es möglich, einander Temperaturbilder, die auf Basis unterschiedlicher Eingangsdaten berechnet werden, gegenüberzustellen, um so zu prüfen, ob ein Koeffizient n in (2.19) gefunden werden kann, für den die zwei Relativwerte Rot/Grün und Rot/Blau auf deckungsgleiche Ergebnistemperaturen führen. Farbtafel D20 zeigt eine Zusammenstellung von Temperaturbildern an einem Beispiel: für $n \in \{0,8, 1,0, 1,2\}$ ist klar ersichtlich, daß eine Bewertung auf Basis des Relativwertes Rot/Grün in jedem Fall auf höhere Ergebnistemperaturen führt als eine Meßdatenauswertung nach Rot/Blau. Aus Tabelle 9.1 sind die gefundenen, quantisierten Ergebnistemperaturen zu entnehmen. Es ist ersichtlich, daß die Schwankungsbreite der Temperaturwerte bei jenen Bildern, die auf Basis Rot/Blau errechnet wurden, wesentlich niedriger ist als bei den unter Verwendung von Rot/Blau berechneten. Man erkennt andererseits aus dem Bildmaterial, daß Temperaturverläufe in guter Übereinstimmung wiedergegeben werden, sodaß die mit $n=1$ getroffene Annahme sinnvoll erscheint. Sowohl große ($n > 1.4$) als auch kleine Werte ($n < 0.7$) führen auf divergierende Aussagen für die örtliche Zuordnung von Temperaturbereichen.

	T_1 [K]	T_2 [K]	T_3 [K]	T_4 [K]	T_5 [K]	T_6 [K]	T_7 [K]	ΔT [K]
R/G; $n=0,8$	2.299	2.334	2.354	2.374	2.394	2.415	2.470	171
R/G; $n=1,0$	2.284	2.314	2.334	2.354	2.374	2.400	2.440	156
R/G; $n=1,2$	2.268	2.299	2.319	2.339	2.359	2.379	2.415	147
R/B; $n=0,8$	2.248	2.273	2.289	2.299	2.314	2.334	2.354	106
R/B; $n=1,0$	2.233	2.258	2.273	2.289	2.304	2.319	2.339	106
R/B; $n=1,2$	2.223	2.243	2.258	2.273	2.289	2.309	2.329	106

Tabelle 9.1: Quantisierte Ergebnistemperaturen zu Farbtafel D20

Mit den vorhandenen Limitationen der vorgeschlagenen Meßtechnik ist es kaum möglich, eine genauere Aussage über das „wahre“ Emissionsvermögen der dieselmotorischen Flamme

⁺ Dies allerdings nur unter extrem schlechten Aufnahmebedingungen; man beachte, daß optisch dichte Bereiche hoher Temperatur nur dann eine niedrige Gesamtintensität aufweisen, wenn die Empfindlichkeit der Kamera zu niedrig eingestellt ist und folglich ein Großteil der Flamme keiner Meßdatenauswertung zugeführt werden kann.

abzuleiten, für derartige Untersuchungen wäre eine exakte Kenntnis der zugrundeliegenden Filterkurven der primären Farbfilter am RGB-Sensor unabdingbar.

Es könnte allerdings nachgewiesen werden, daß mit dem nach (2.20) gewählten, relativ einfachen Ansatz, eine in Bezug auf örtliche Temperaturverteilungen brauchbare Meßdatenauswertung erwartet werden kann.

9.4 Kritische Bewertung des Verfahrens anhand eines Mehrschichtmodells

Das Auswerteverfahren basiert auf der Annahme, daß die am Farbsensor der Kamera eintreffende Strahlung von einer lokal homogenen Flamme herrührt (Bild 9.2). Das Verfahren kann nach einer Kalibrierung des Bildmaterials auf Basis der gemessenen Farbwerte Rot und Grün das zur Berechnung der Ergebnistemperatur erforderliche Produkt von Rußkonzentration und Schichtdicke ohne Benutzereingabe und für jeden einzelnen Bildpunkt ermitteln. Allerdings besteht keine Möglichkeit, aus den Meßdaten auf den tatsächlichen Temperaturverlauf und die Rußkonzentration entlang der optischen Eindringtiefe sowie auf die geometrische Schichtdicke zu schließen.

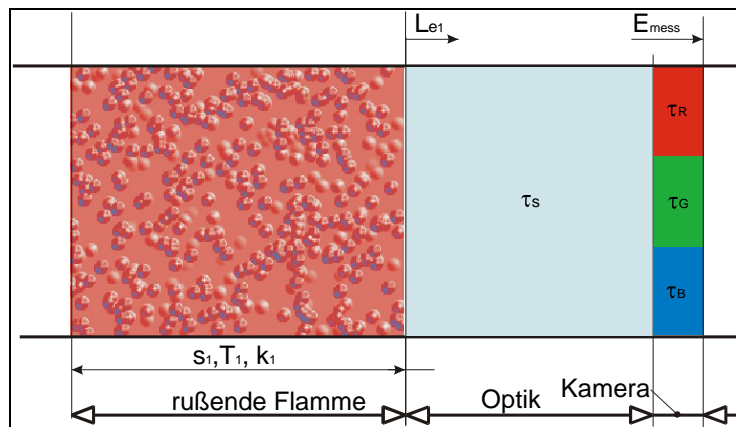


Bild 9.2: Modell der homogenen Flamme

Zur Betrachtung verschiedener Meßfehler definieren wir nun ein verallgemeinertes Schichtmodell nach Bild 9.3.

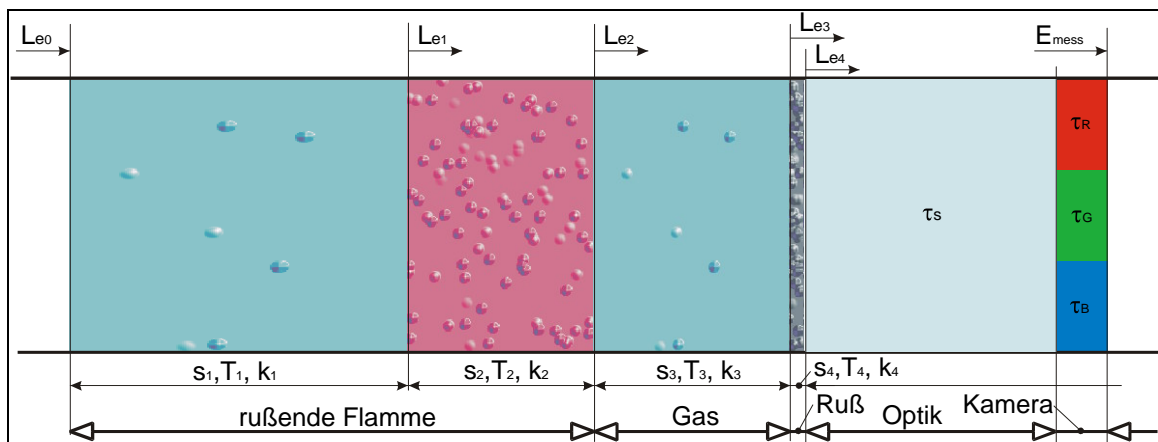


Bild 9.3: Mehrzonenmodell zur kritischen Bewertung des Meßverfahrens

Wir gehen dabei vom allgemeinen Fall einer Hintergrundstrahlung $L_{e\lambda,0}$ und insgesamt $m=4$ Schichten aus und können die am Bildsensor einlangende Strahlung folgendermaßen iterativ berechnen:

$$L_{e\lambda,i} = L_{e\lambda,i-1} \cdot e^{-\frac{k_i \cdot s_i}{\lambda}} + \left(1 - e^{-\frac{k_i \cdot s_i}{\lambda}}\right) \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T_i}} - 1} \cdot d\lambda, \quad 1 \leq i \leq m \quad (9.1)$$

$$E_{mess,R} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L_{e\lambda,m} \cdot \tau_s \cdot \tau_R \cdot d\lambda,$$

$$E_{mess,G} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L_{e\lambda,m} \cdot \tau_s \cdot \tau_G \cdot d\lambda, \quad (9.2a-c)$$

$$E_{mess,B} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L_{e\lambda,m} \cdot \tau_s \cdot \tau_B \cdot d\lambda$$

Wir erhalten synthetisierte Basisdaten durch die Wahl eines geeigneten Korrekturfaktors k_{opt} unter Berücksichtigung der im Zuge der Kamerakalibrierung (5.10) gefundenen Parameter $k_{grün}$ und k_{blau} .

$$R_{synth} = k_{opt} \cdot E_{mess,R}$$

$$G_{synth} = \frac{k_{opt}}{k_{grün}} \cdot E_{mess,G} \quad (9.3a-c)$$

$$R_{synth} = \frac{k_{opt}}{k_{blau}} \cdot E_{mess,B}$$

Die linearen Meßwerte im synthetisierten Basisbild ergeben sich durch Abbildung des erhaltenen Farbtripels auf die mit 8bit quantisierten Farbwerte $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$, wobei Eingangswerte mit $\{(R_{synth} \geq 255) \cup (G_{synth} \geq 255) \cup (B_{synth} \geq 255)\}$ als gesättigt markiert werden $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin}) = (255, 255, 255)$. Das später der Meßdatenauswertung zugeführte Bildmaterial erfordert die Bereitstellung eines weiteren Dunkelbildes, das mit verschwindenden Farbwerten festgelegt wird: $(R_{dunkel}, G_{dunkel}, B_{dunkel}) = (0, 0, 0)$, sodaß $(R_{lin}, G_{lin}, B_{lin})$ direkt den Pixelwerten des synthetisierten Basisbildes entspricht.

Im Rahmen der folgenden Diskussion werden folgende Aspekte auf Basis des Mehrschichtmodells diskutiert:

- Auswirkung eines Hintergrundstrahlers
- Einfluß einer inhomogenen Temperaturverteilung
- Kritische Bewertung von Rußablagerungen an der Oberfläche des Quarzfensters
- Fehler zufolge einer inhomogenen Rußkonzentration und Temperaturverteilung
- Formulierung der sog. „mittleren Temperatur“ der Flamme

9.4.1 Grundlegende Vorgangsweise

Auf Basis orts- und zeitabhängiger Hintergrundstrahlung, Spezieskonzentration und Flammentemperatur können unter Berücksichtigung vermessener Eigenschaften von Kamera und Optik Basisdaten für den implementierten Algorithmus erzeugt werden.

Im vorliegenden Fall hat sich die Vorgangsweise bewährt, die errechneten Basisdaten direkt in Form von Bildern zu erzeugen, da genau damit ein geschlossener Kreislauf zur Bewertung des gesamten Auswerteverfahrens vorliegt. Durch Kombination tatsächlich gemessener Bilder und die Überlagerung von Störfunktionen können mit dem gezeigten Verfahren auch halbsynthetische Bilder erzeugt werden. Eine derartige Vorgangsweise führt zwar zunächst auf sehr interessantes Bildmaterial, eine quantitative Bewertung der Ergebnisbeeinflussung ist hier allerdings nur sehr schwer durchführbar, und liefert auch keine weiterreichenden Informationen, sodaß wir uns im Rahmen dieses Kapitels ausschließlich mit synthetisierten Basisdaten befassen werden. Eine modellbasierte Korrektur von echten Flammenbildern wurde in Kapitel 7 zur Kompensation selektiver Absorption am optischen Zugang dargestellt und stellt die Sinnhaftigkeit einer kombinierten Behandlung von Meßdaten und Modell unter Beweis.

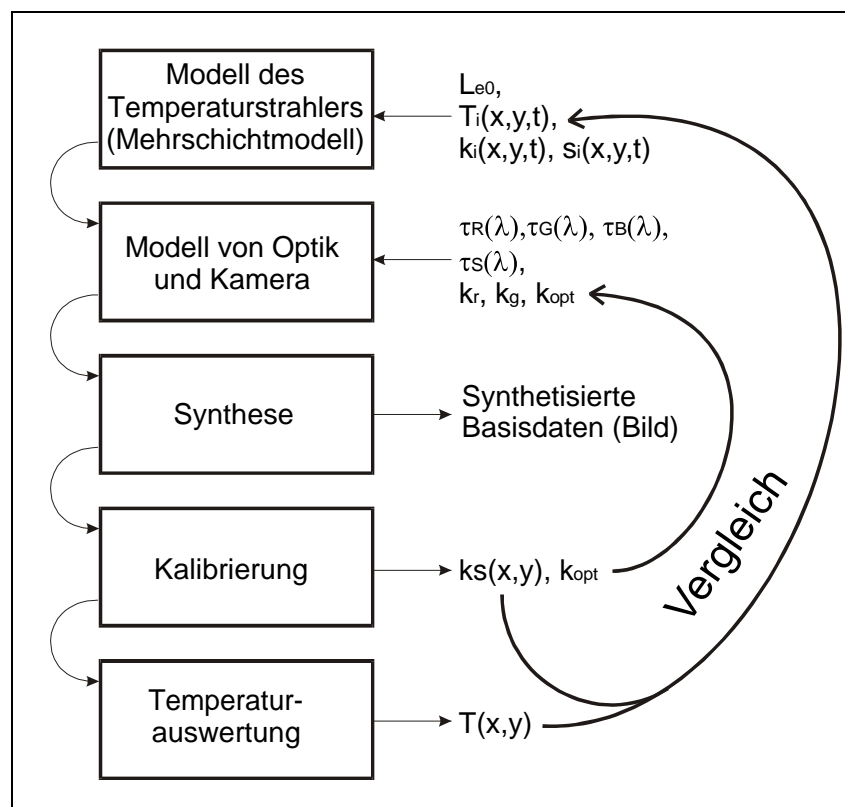


Bild 9.4: Bildsynthese nach dem Mehrschichtmodell zur Bewertung verschiedener Einflußgrößen

Wir haben im Rahmen der Modellbildung festgestellt, daß das Produkt von Rußkonzentration und Schichtdicke zwischen dem Extremfall einer optisch dichten und einer transparenten Flamme einem Übergangsbereich zugeordnet werden kann, der über den Spektralbereich der

Messung definiert wird. Wir werden für die anschließenden Betrachtungen die Eingangsdaten für den Schwankungsbereich der optischen Schichtdicke genau jene Eingangsdaten verwenden, die im Verlauf der Kalibrierung des verwendeten Meßsystems als Übergangsbereich festgelegt wurden. Die der Parametrisierung zugrundeliegenden Größen sind Anhang A zu entnehmen.

9.4.2 Modellierung von Basisbildern zur Verifikation des Auswerteverfahrens

Für die folgende Betrachtung gehen wir von einer lokal homogenen Flamme aus. In diesem Fall definieren wir folgende Eingangsdaten:

$$s_I=1, k_I=k_{ks}(i), 0 < i < 12$$

$$T_I(x,y)=T(x,y)$$

$$L_{e0}=0$$

$$s_i=0 \quad \forall i > 1$$

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der sich ergebenden Strahlung kann eine Synthetisierung von Basisbildern jeweils nur in einem kleinen Intervall des Meßbereiches erzeugt werden. Verzichtet man auf eine eindeutige Zuordnung des optischen Korrekturfaktors, indem die Intensität für jede Temperatur jeweils auf Basis des Schwarzen Strahlers bei derselben Temperatur normiert wird, so kann unter den getroffenen Annahmen eine Farbtabelle errechnet werden, die die mit dem System gemessenen Farbwerte in Abhängigkeit von der Temperatur anschaulich darstellt (Anhang C, Farbtabelle C1).

Definieren wir nun einen Temperaturbereich mit $2.000\text{K} \leq T(x,y) \leq 2.500\text{K}$ und legen wir den optischen Korrekturfaktor so fest, daß in diesem Temperaturbereich keine Sättigung erreicht wird, so ergibt sich das in Farbtabelle C2 dargestellte Basisbild. Man erkennt, daß eine geschlossene Erzeugung und Auswertung eines Basisbildes für den gesamten Meßbereich nicht zielführend ist. Farbtabelle C3 zeigt eine Zusammenstellung synthetisierter und ausgewerteter Bilder. Bei einer Schrittweite von 50K wurde nach jeweils 100K der optische Korrekturfaktor neu festgelegt und eine entsprechende Kalibrierung durchgeführt.

Die unter idealen Voraussetzungen berechneten Schichtdicken und Temperaturwerte lassen folgende prinzipielle Limitationen des Meßsystems erkennen:

- Selbst unter idealisierten Annahmen eines korrekten Modells ergeben sich aus der Quantisierung Abweichungen in der Größenordnung von ca. $\pm 30\text{K}$.
- Während einer Messung kann nur ein begrenzter Temperaturbereich aufgelöst werden. Soll ein ganzer Verbrennungszyklus ohne Sättigung aufgenommen werden, so können Verbrennungsvorgänge vor und nach Auftreten der maximalen Flammenhelligkeit teilweise nicht erfaßt werden.
- Im oberen Temperaturbereich (ab ca. 2.800K) wertet der Algorithmus nur dichte Flammenbereiche aus. Dies ist kein Fehler sondern liegt im Funktionsprinzip des Auswerteverfahrens.

Die Wahl der Schwellwerte für die Meßdatenauswertung konnte bestätigt werden. Unter der vorausgesetzten Einschränkung $(R_{lin} \geq 25) \cap (G_{lin} \geq 25)$ ist bei niedriger Intensität keine Tendenz in Richtung grober Meßfehler zu bemerken. Es treten ganz im Gegenteil auch bei hohen Intensitätswerten Zuordnungsfehler in etwa gleichem Maße wie in dunklen Bereichen auf; Ursache dafür ist die Tatsache, daß der Scharparameter k_{ks} im optisch dichten Bereich auf enger zusammenliegende Intensitätswerte führt als dies im transparenteren Bereich der Fall ist (vgl. Diagramm 5.3).

9.4.3 Auswirkung eines Hintergrundstrahlers

Wir definieren zunächst einen virtuellen Schwarzen Strahler und setzen bei fester Flammentemperatur unterschiedliche Schichtdicken $s_i \cdot k_i$ an. Übrige Schichten bleiben für diese Betrachtung unberücksichtigt.

Diese formale Untersuchung entspricht der meßtechnischen Erfassung des Transmissionsgrades eines strahlenden Mediums, wie sie in [Lawton] und [Pitter2] beschrieben wurde (Extinktionsmessung). Der angesetzte Hintergrundstrahler kann aber ebenso als Reflexion vorhandener Strahlung an der Brennraumboberfläche verstanden werden.

Sei T_f die feste Temperatur der Flamme und $T_S \in [T_f - 300\text{K}, T_f + 300\text{K}]$ die Temperatur des Hintergrundstrahlers; die Schichtdicke $k_i \cdot s_i$ wird in mehreren Schritten so angenommen, daß die Beeinflussung durch den Hintergrundstrahler vorliegt. Dies ist genau dann der Fall, wenn $k_i \cdot s_i$ im Übergangsbereich nach Kapitel 5.4 angenommen wird. Die Ergebnistemperatur ist damit eine Funktion in zwei Unbekannten T_S und $k_i \cdot s_i$ und kann so als synthetisiertes Bild dargestellt werden:

$$s_1 = 1, k_1 = k_{ks}(i(y)), 0 \leq i(y) < 12$$

$$T_f(x, y) = T_f = \text{const}$$

$$L_{e0} = L_{eS}(T_S(x))$$

$$s_i = 0 \quad \forall i > 1$$

Die Farbtafeln C4 und C5 im Anhang zeigen synthetisierte Basisbilder, sowie zugehörige Kalibrier- und Ergebnisbilder für die Flammentemperatur $T_f = 2.000\text{K}$. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Ergebnistemperatur mit dem Anstieg der Temperatur T_S des Hintergrundstrahlers nicht zwangsläufig zunimmt. Da die Strahlungsquelle selbst nach demselben Modell angesetzt wird wie ein Schwarzer Strahler (das lokale Gesamt-Emissionsvermögen der Flamme ergibt sich ausschließlich aus der Absorption im Medium), kann die festgestellte Monotonieumkehr ausschließlich durch Quantisierungsfehler begründet werden. Dieser Zuordnungsfehler tritt bei Farbtafel C5 am stärksten bei $k_i \cdot s_i = 352\text{E-}9$ auf und führt auf Auswertergebnisse aus Tabelle 9.2.

T_S [K]	1.700	1.750	1.800	1.850	1.900	1.950	2.000	2.050	2.100	2.150	2.200	2.250	2300
T_{mess} [K]	1.956	1.926	1.936	1.926	1.956	1.971	1.997	1.987	1.997	2.047	2.082	2.123	2.153
$(k \cdot s)_{mess} \cdot 10^9$	799	986	1.205	1.205	1.475	1.839	2.424	2.424	2.424	2.424	2.424	2.424	2.424

Tabelle 9.2: Auswertergebnisse (Farbtafel C5) bei fester Flammentemperatur $T_1=2.000\text{K}$, fester optischer Dicke $k_1 \cdot s_1=352\text{E-}9$ unter Annahme eines Schwarzen Hintergrundstrahlers der Temperatur T_S .

Man erkennt weiters, daß bei gleicher Temperatur von Flamme und Schwarzem Hintergrundstrahler (im sog. Inversionspunkt) die Gesamtstrahlung jeweils unverändert bleibt. Diese Tatsache ist Grundlage für die [Zimmer] bekannte Einwegmethode, bei der ein kalibrierter Schwarzer Hintergrundstrahler zur Temperaturmessung verwendet wird.

Schließlich zeigt eine quantitative Betrachtung, daß ein Hintergrundstrahler höherer Temperatur bei gleicher Temperaturdifferenz mit dem Medium die gemessene Ergebnistemperatur stärker beeinflusst, als ein Hintergrundstrahler niedrigerer Temperatur.

Der angesetzte Schwarze Hintergrundstrahler kann ebenso als optisch dichte Flammenzone gleicher Temperatur verstanden werden. Wir verallgemeinern im nächsten Schritt das bisherige Modell der homogenen Flamme auf ein Zweizonenmodell.

9.4.4 Zweizonenmodell für die Flamme

Es sei *Schicht 1* mit fester Schichtdicke und Temperatur angenommen. Definieren wir nun für die darüberliegende *Schicht 2* eine über die Parameter $k_2 \cdot s_2$ und T_2 ortsabhängige Temperaturverteilung, so kann für alle Schichtdicken im Übergangsbereich je ein Basisbild erzeugt werden. Die Parameter für die Bildsynthese definieren wir mit

$$s_1=1, k_1=k_{ks}(i=\text{const})$$

$$T_1=\text{const}$$

$$s_2=1, k_2=k_{ks}(i(y)), 0 \leq i < 12$$

$$T_2(x)=(T_1-300\text{K}, \dots, T_1+300\text{K})$$

$$s_i=0 \quad \forall i > 2$$

Die Farbtafel C6 zeigt Basisbilder und Auswertergebnisse für $T_1=2.300\text{K}$ unter Annahmen für die Schichtdicken $i \in \{1, 4, 11\}$.

Man erkennt, daß mit wachsender optischer Dicke der verdeckten *Schicht 1* eine zunehmende Beeinflussung der berechneten Schichtdicke festgestellt wird. Aufgrund der bekannten Temperaturen, im besonderen im Inversionspunkt, wird zufolge der fehlerbehafteten Kalibrierung eine globale Verschiebung der Ergebnistemperatur um bis zu 50K festgestellt. Der qualitative Verlauf der Ergebnistemperaturen bleibt allerdings bei allen Annahmen weitestgehend erhalten.

9.4.5 Rußkonzentration zwischen Flamme und Brennraumfenster

Wir haben zuvor Ergebnistemperaturen auf Basis des Zweizonenmodells einer Flamme dargestellt. Die angenommene Schwankungsbreite der Temperatur um eine Referenztemperatur erscheint auf Basis vorliegender Meßergebnisse sehr realistisch für tatsächliche Temperaturverteilungen im Inneren einer Flamme. Nun interessiert uns die Beeinflussung der Messung durch eine endliche Rußkonzentration zwischen Brennraumfenster und Flamme. Wir ordnen zur qualitativen Unterscheidung mit der vorigen Analyse Temperatur- und Absorptionseigenschaften nach Bild 9.3 *Schicht 3* zu. Die Parameter des Modells werden damit wie folgt festgelegt:

$$s_1=1, k_1=k_{k_s}(11)$$

$$T_1(x)=(2.200\text{K}, \dots, 2.400\text{K})$$

$$s_3=1, k_3=k_{k_s}(i(y)), 0 \leq i(y) < 12$$

$$T_3=1.000\text{K}$$

$$s_2=s_4=0$$

Aus Farbtafel C7 zeigt sich, daß im Falle von Absorptionseigenschaften des nicht entzündeten Gases, die in der Größenordnung der im Flammeninneren vorherrschenden Speziesdichte entsprechen, gravierende Meßfehler auftreten. Eine derartige Beeinflussung kann mit dem vorliegenden Meßsystem nicht erkannt und somit auch nicht rückgerechnet werden und zeigt damit eine prinzipielle Schwäche im Meßverfahren auf.

Für eine kritische Beurteilung der Messung ist zu beachten, daß sich Flammenzonen mit zunehmendem Kurbelwinkel vom Beobachtungsfenster wegbewegen und daß die globale Rußkonzentration mit fortschreitender Verbrennung sinkt.

Eine grundsätzliche Möglichkeit, den Meßfehler mit dem vorhandenen Meßsystem quantitativ zu erfassen, besteht darin, die Verbrennung aus mehreren Beobachtungsrichtungen zu erfassen. Eine praktische Auswertung erfordert hier allerdings eine sehr sorgfältige Prüfung weiterer Rahmenbedingungen, da sich mit einem veränderten optischen Zugang nicht ausschließlich die Entfernung und Rußkonzentration zwischen Brennraumfenster und Flamme, sondern generell auch der Beobachtungsbereich ändert.

9.4.6 Bewertung einer Rußablagerung am Brennraumfenster

Die zuvor angenommenen Parameter können direkt auch auf Rußablagerungen am Brennraumfenster bezogen werden, sodaß auf eine neuerliche Parametrisierung verzichtet werden kann. Wir ordnen dazu den zuvor dem Volumen zugeschriebenen Ruß direkt dem verschmutzten Fenster zu.

Bereits in einleitenden Kapiteln wurde dargestellt, daß es im allgemeinen nicht möglich ist, von einer Aufnahme des verschmutzten Quarzfensters zuverlässig auf die örtliche Rußablagerung während der Erfassung eines individuellen Bildes zu schließen.

Ist die optische Dicke der lokalen Rußablagerung am Brennraumfenster bekannt, so ist grundsätzlich eine Fehlerkorrektur möglich, ein Verfahren zur Korrektur dieses Meßfehlers wurde in Kapitel 7 dargestellt.

9.5 Formulierung der berechneten „mittleren Temperatur“

Im Zuge der bisherigen Ausführungen wurde mehrmals der Begriff „mittlere Temperatur“ verwendet, um damit die auf Basis des zugrundeliegenden Modells berechnete Ergebnistemperatur zu beschreiben. Über das Mehrschichtmodell kann gemeinsam mit der vorliegenden Modellbildung ein klarer Zusammenhang zwischen Temperatur- und Rußdichteverteilungen im Brennraum und der ausgewerteten, „mittleren Temperatur“ hergestellt werden.

Wir gehen dazu davon aus, daß es unter Verwendung eines übergeordneten Referenzsystems möglich ist, eine korrekte räumliche Zuordnung von Temperatur und Rußkonzentration im gesamten Brennraum durchzuführen. Wir können für diesen Fall einem gegebenen Bildpunkt die Flamme in m Zonen mit jeweils homogener Temperatur- und Rußdichteverteilung zuordnen. Über die Formeln (9.1) bis (9.3) werden für eine so definierte Flamme die Farbwerte ($R_{lin}, G_{lin}, B_{lin}$) gefunden, die unter dem hier vorliegenden Aspekt nicht aus einem Modell, sondern aus einer Messung mit der Farbkamera hervorgehen. Mit dem vorgeschlagenen Auswerteverfahren ergibt sich die „mittlere Temperatur“ nach (5.7).

Das Kernproblem liegt aber in der Tatsache, daß diese wahren Verteilungen im Brennraum nicht bekannt sind, und daß es ein übergeordnetes Referenzsystem auf meßtechnischer Basis auch in absehbarer Zeit nicht geben wird.

Aufgrund der Untersuchungen am Mehrschichtmodell können zur Beschreibung der „mittleren Temperatur“ folgende Aussagen getroffen werden:

- Höhere Temperaturen innerer Schichten werden bei gleicher Rußkonzentration stärker bewertet als niedrigere Temperaturen.
- Absorbierende kalte Schichten zwischen Flamme und Sichtfenster verringern die gemessene Temperatur.
- Die Ergebnistemperatur wird umso stärker von entfernteren Schichten definiert, je transparenter darüberliegende (dem Fenster zugewandte) Schichten relativ zu den dahinterliegenden Schichten sind.
- Unterschiedliche Schichtdicken bei homogener Temperaturverteilung führen auf keine Verschiebung der Ergebnistemperatur

9.6 Schlußfolgerungen

Am Mehrschichtmodell wurden im Rahmen dieser Arbeit nur Teilaspekte näher beleuchtet. Im Verlauf der Analyse sind zwei wesentliche Parameter erkannt worden, die unabhängig von der Qualität des Sensors und des Auswerteverfahrens die Aussagekraft der Messung relativieren. Eine Schicht unbekannter optischer Dicke zwischen Brennraumfenster und Flamme kann die durchgeführte Messung ebenso verfälschen, wie eine Berußung des Quarzfensters am optischen Zugang. Während das geschulte Auge Meßfehler zufolge Rußablagerungen am Fenster durch die gleichzeitige Betrachtung von Aufnahme- und Temperaturbildern leicht erkennt, können Meßfehler zufolge zeit- und ortsabhängiger Rußbildung nur sehr schwer festgestellt werden.

In Kapitel 7 wurde ein Bildrestaurationsverfahren dargestellt, welches eine Korrektur der Basisbilder bei Rußablagerungen am Quarzfenster ermöglicht. Es wird durch den Vergleich von Messungen bei verschmutztem und sauberem Fenster in Kapitel 10 nachgewiesen, daß das entwickelte Verfahren auf plausible Auswerteergebnisse führt.

10. Messungen

An einem Motorprüfstand an der Technischen Universität Graz wurden über den Zeitraum von mehr als einem Jahr Messungen zur Überprüfung der Praxistauglichkeit und Reproduzierbarkeit von Messungen durchgeführt; die Kenndaten des Motors sind in Tabelle 10.1 dargestellt.

Typ:	FM-538 (LEF/MACK)
Bohrung, Hub:	123.8mm, 165.1mm
Hubraum:	2.000cm ³
Kompressionsverhältnis:	18:1
Zylinderkopf:	4 Ventile
Drallzahl:	1,8
Kraftstoff-Einspritzsystem:	Bosch Common Rail
Strahlbild:	8 x 0,185 x 140° x 0°

Tabelle 10.1: Kenndaten des Prüfstandsmotors

Folgende Untersuchungen wurden vorgenommen:

- Verwendung unterschiedlicher Endoskope und Objektive
- Betrieb der Kamera mit variabler Kameraverstärkung, Belichtungsdauer, sowie unterschiedlichen Toleranzvorgaben und Aufnahmezeiten
- Messungen bei unterschiedlicher Beobachtungsrichtung
- Messungen mit mehreren Kameras
- Wiederholte Kalibrierung von Kamera und Optik
- Messungen am Motor bei unterschiedlichen Belastungszuständen und Drehzahlen
- Messungen bei Brennweite
- Gezielte Beeinträchtigung der Lichtverhältnisse

Wir werden in diesem Kapitel an wenigen Fallbeispielen vor allem Aspekte der Meßtechnik näher beleuchten, eine Darstellung der Applikationsseite wird in [Schmid4] gegeben.

Im Anhang ist ein Auszug des sehr umfangreichen Bildmaterials dargestellt. Für eine quantitative Analyse, die an dieser Stelle an wenigen Beispielen durchgeführt wird, gehen wir von den aus dem Bildmaterial abgeleiteten, reduzierten Ergebnistemperaturen aus. Im Bedarfsfall wird jeweils auf die dargestellten Bilder im Anhang verwiesen.

10.1 Messaufbau

Bild 10.1 zeigt ein vereinfachtes Schema des Meßaufbaus (vgl. Anhang B). Das Engine VideoScope wird unabhängig von Motorsteuerung und weiteren Meßsystemen betrieben, zur Prozeßsynchronisation sind lediglich die Signale eines mit $0,1^\circ$ aufgelösten Winkelaufnehmers erforderlich. Der AVL Forschungsmotor FM-538, an dem die nachfolgend dargestellten Messungen durchgeführt wurden, ist mit zwei optischen Zugängen ausgestattet, die sowohl für die Zuführung von Fremdlicht (Dauerlicht zur Justierung und Kameraeinstellung, Stroboskop zur Beobachtung nichtleuchtender Vorgänge) als auch zur Prozeßbeobachtung geeignet sind. Echtzeithardware, Light Unit und Kamera werden über die Engine VideoScope Software konfiguriert, die dargestellten Verbindungen entsprechen einem funktionellen Zusammenhang, nicht aber der in Bild 4.2 dargestellten, realen Signalführung.

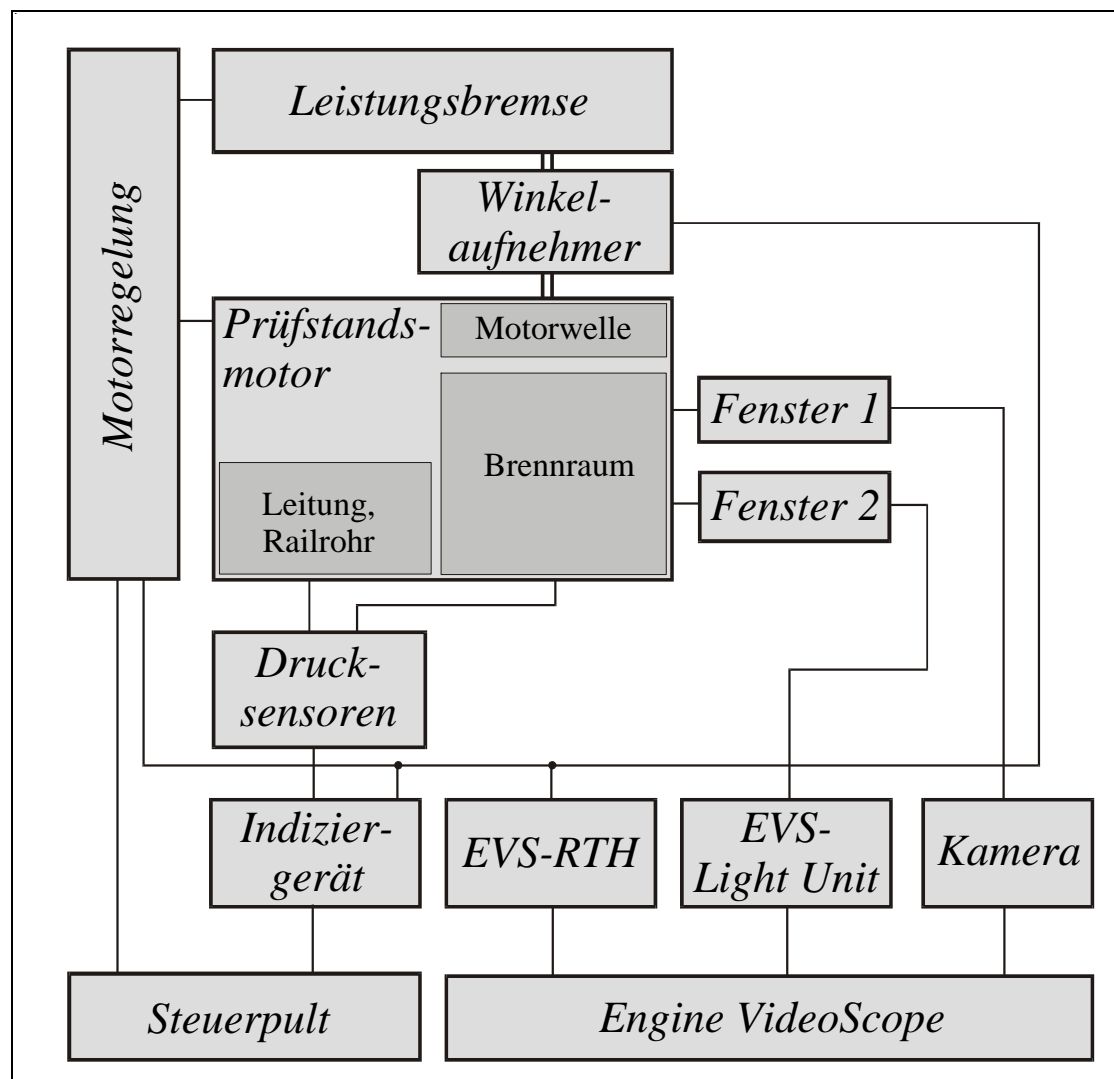


Bild 10.1: Schema des Meßaufbaus

10.2 Kalibrierung des Bildmaterials

In Kapitel 5 wurde dargestellt, daß für die automatische Kalibrierung im Bildmaterial optisch dichte, im betrachteten Spektralbereich „schwarz“ strahlende Zonen vorausgesetzt werden. Wir betrachten dazu mehrere Aufnahmewiederholungen und prüfen damit die Wiederholbarkeit des Kalibriervorgangs. Die Analyse unterschiedlicher Aufnahmesequenzen lieferte qualitativ und in der Größenordnung übereinstimmende Aussagen mit der in der Folge dargestellten Messung.

Diagramm 10.1 zeigt den Verlauf des vom System vorgeschlagenen Korrekturfaktors k_{opt} über den Aufnahmewinkel. Man erkennt, daß bei KW 20 ein ausgeprägtes Maximum vorliegt. Der Einspritzvorgang ist mit diesem Winkel abgeschlossen.

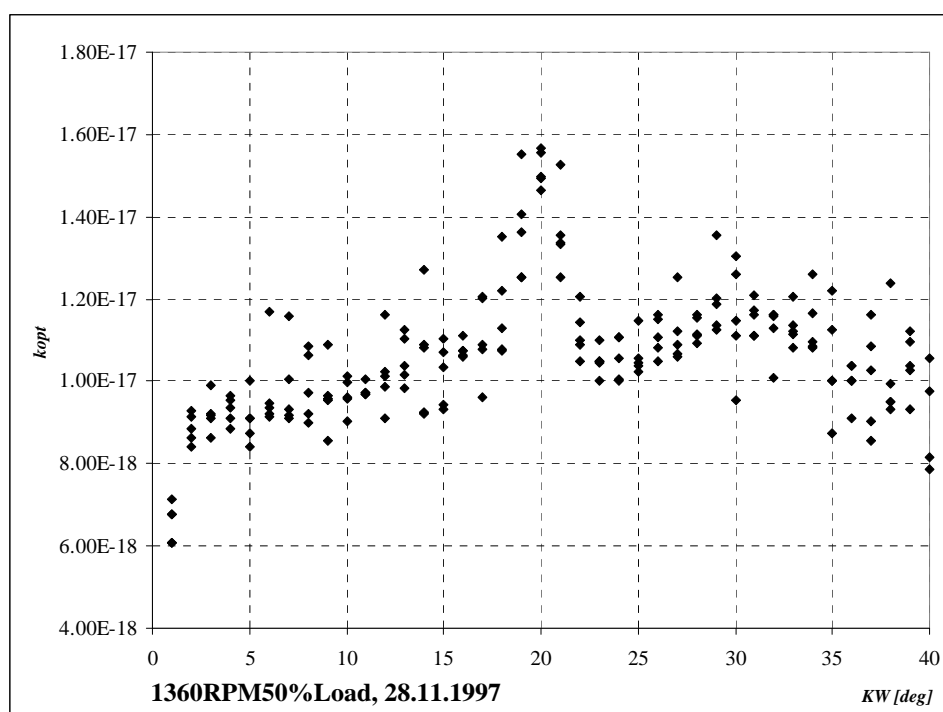


Diagramm 10.1: berechneter Korrekturfaktor über Kurbelwinkel (5 Repetitionen)

Prüfen wir nun die Temperaturschwankungen zufolge eines schlecht gewählten Korrekturfaktors. Definiert man für den Kalibrierwert eine Schwankungsbreite mit $\pm 0,2 \cdot 10^{-17}$, so erhält man die in Diagramm 10.2 dargestellte Schwankungsbreite für die ermittelten Ergebnistemperaturen über den Kurbelwinkel (KW) mit durchschnittlich 50K. Man erkennt weiters, daß zwar die Ergebnistemperaturen verschoben werden, daß aber der grundsätzliche Verlauf in allen Kurven übereinstimmt. Die gute Übereinstimmung der Ergebnistemperaturen zu Beginn der Verbrennung für $k_{opt}=1,37e-17$ und $1,77E-17$ ist darauf zurückzuführen, daß dort der höhere Korrekturfaktor keine maßgebliche Verschiebung in Richtung transparenterer Flammenbereiche bewirkt (vgl. Diagramm 5.2 für niedrige Intensitäten)

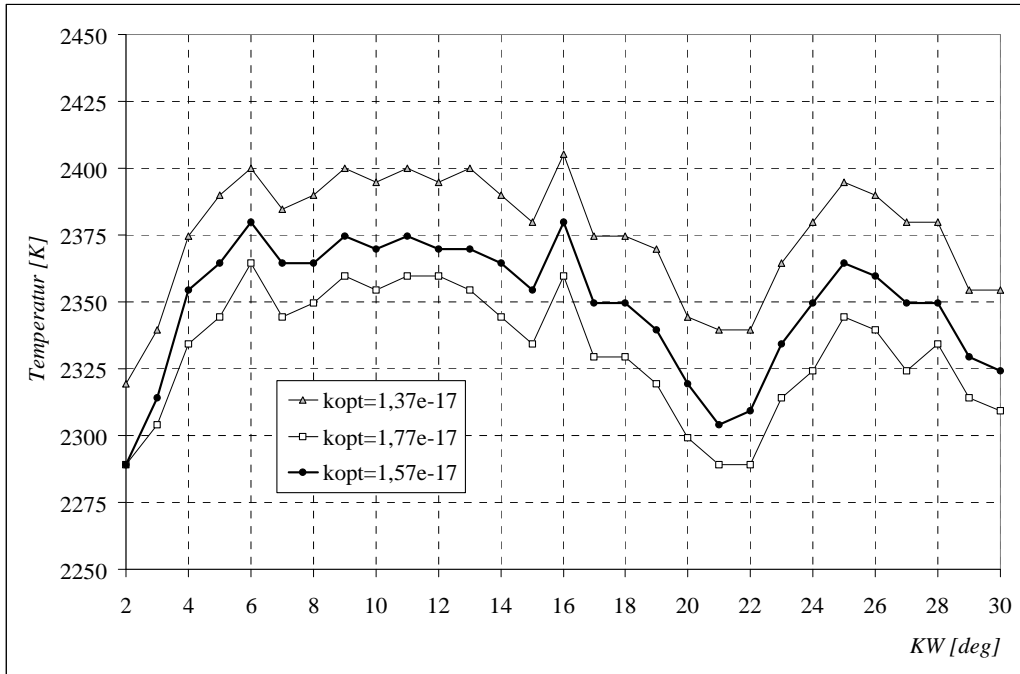


Diagramm 10.2: Ergebnistemperaturen bei unterschiedlichen optischen Korrekturfaktoren

Das Maximum des Korrekturfaktors liegt typisch mit Ende des Einspritzvorganges vor. Dies ist auch plausibel, zumal genau zu diesem Zeitpunkt eine hohe Rußkonzentration im Brennraum vorliegt, die im Verlauf der anschließenden Verbrennung wieder abgebaut wird. Unklar ist allerdings, ob damit auch eine optisch dichte Flamme mit nahezu Schwarzen Strahlungseigenschaften vorliegt. Diagramm 10.3 zeigt den errechneten Korrekturfaktor bei gleichbleibender Optik und Kameraeinstellung für 25, 50 und 75% Motorlast für eine einzelne Repetition. Man erkennt, daß auch bei sehr unterschiedlichen Betriebszuständen ungefähr dieselben Korrekturfaktoren detektiert werden.

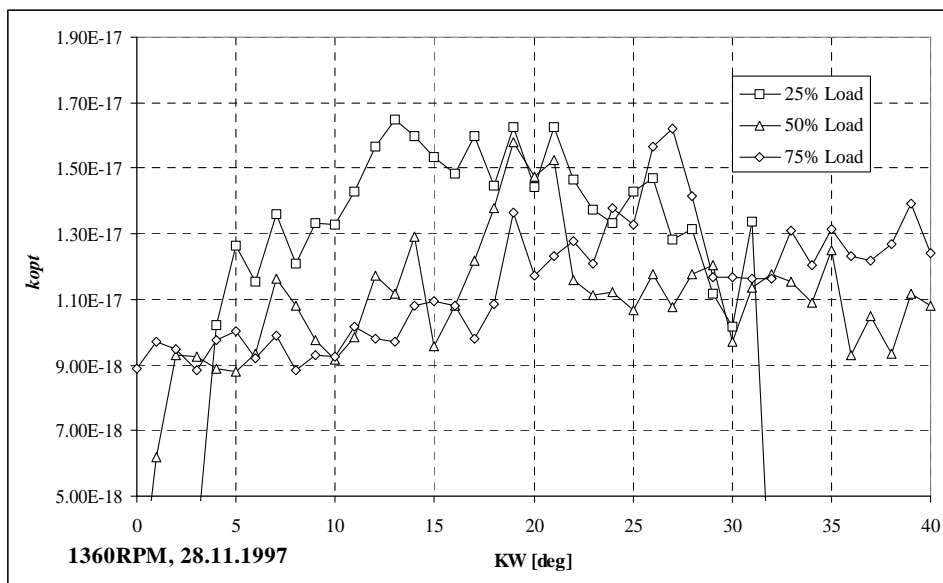


Diagramm 10.3: berechneter Korrekturfaktor bei unterschiedlicher Motorlast

10.3 Kameraeinstellung und Optik

Messungen wurden mit verschiedenen Endoskopen durchgeführt. Für einen Vergleich werden an dieser Stelle die Aufnahmesequenzen 1360RPM50%LoadLarge4000 (1/4.000s Belichtungsdauer, spektral vermessenes Endoskop, \varnothing 6mm, 50mm Objektiv) und 1360RPM50%LoadSmall (1/16000s, unvermessenes Endoskop, \varnothing 4mm, 25mm Objektiv) verglichen. Aus (2.7) geht hervor, daß eine Messung nur dann sinnvoll ist, wenn die Integrationsdauer so niedrig gewählt wird, daß sich weder Temperaturverteilung noch Rußkonzentration in diesem Zeitrahmen stark ändern. Gleichbleibende Auswertergebnisse bei den genannten Messungen belegen, daß die Integrationsdauer für die vorliegende Messung eine untergeordnete Rolle spielt. Weiters soll durch den vorliegenden Vergleich geprüft werden, ob die Verwendung des Kantenfilters den Einsatz unvermessener Endoskope grundsätzlich erlaubt. Das für die zweite Messung verwendete 4mm Endoskop weist, auch mit freiem Auge erkennbar, eine vom 6mm Endoskop abweichende spektrale Transmissivität auf.

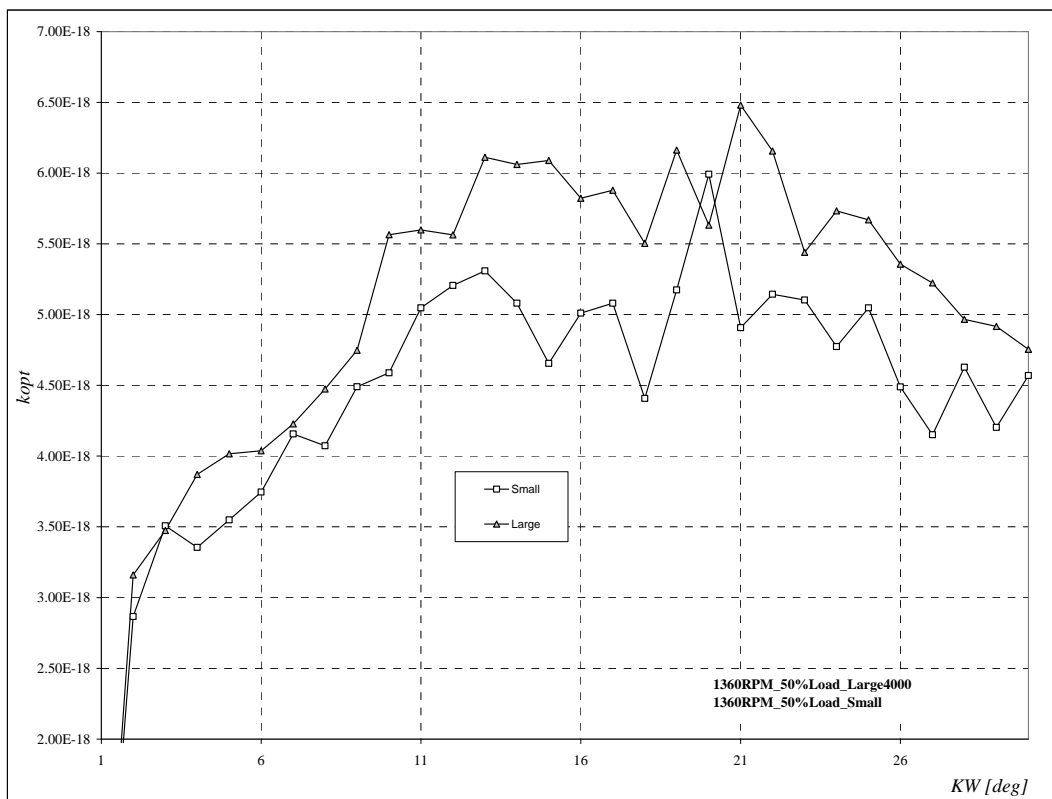


Diagramm 10.4: Vergleich des optischen Korrekturfaktors bei unterschiedlichem Endoskop

Diagramm 10.4 zeigt die vom System vorgeschlagenen Korrekturfaktoren über den Kurbelwinkel. Das Abbildungsverhältnis der beiden Optiken unterscheidet sich exakt um den Faktor 1:2, auf einen einzelnen Bildpunkt sollte bei einer Messung mit dem 4mm Endoskop die vierfache Gesamtstrahlung treffen. Bei einem Verhältnis der Integrationszeiten mit 1:4

sind die in Diagramm 10.3 dargestellten Korrekturfaktoren also direkt vergleichbar. Daß für das 4mm Endoskop generell niedrigere Korrekturfaktoren berechnet werden, läßt darauf schließen, daß die Transmissivität dieses Endoskops insgesamt niedriger ist. Für die Qualität der Kalibrierung ist dieser frequenzneutrale Faktor selbstverständlich ohne weitere Bedeutung. Man erkennt bei Mittelung über mehrere Repetitionen (nicht dargestellt), daß der Verlauf der Ergebnistemperaturen zufolge der unterschiedlichen Integrationdauer leicht verschoben ist. Die Ursache dafür liegt in der Tatsache, daß bei gleicher Kurbelwinkelvorgabe und längerer Belichtungsdauer früher mit der Bilderfassung begonnen wird. Werden die automatisch detektierten Korrekturfaktoren nach Diagramm 10.4 mit $k_{opt}=5.99E-18$ (Small) bzw $6.48E-18$ (Large) angenommen, so resultiert der in Diagramm 10.5 dargestellte Temperaturverlauf.

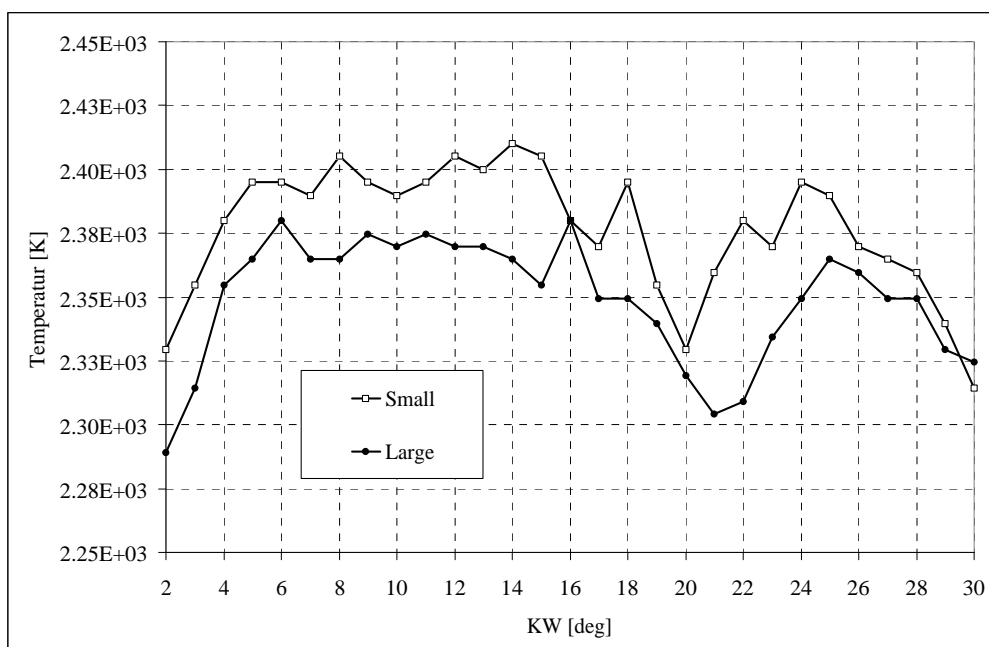


Diagramm 10.5: Ergebnistemperaturen bei Messung mit unterschiedlichen Endoskopen

Auch der Verlauf der Ergebnistemperaturen zeigt die bereits angeführte Verschiebung bezüglich des Kurbelwinkels. Die Ergebnistemperaturen unterscheiden sich um ca. 40K, ein Fehler, der für Vergleichsmessungen mit unterschiedlicher Optik jedenfalls zu beachten ist.

Folgende Gegenüberstellung zeigt drastisch einen unzulässigen Vergleich zweier Aufnahmen mit abweichender Gesamthelligkeit. Für eine Meßdatenauswertung werden nur jene Farbwerte herangezogen, deren Intensitätswerte oberhalb eines definierten Schwellwertes liegen. Im Ergebnisprotokoll werden die Temperaturen eingetragen, welche genau auf Basis dieser nicht maskierten Bildpunkte ermittelt werden. Zu dunkle Aufnahmen führen dazu, daß lediglich die intensitätsstärksten Bereiche ausgewertet werden. Vergleicht man dunkle Aufnahmen mit Aufnahmen guter Dynamik, so treten erhebliche Unterschiede in den quantisierten Ergebnistemperaturen auf. Diagramm 10.6 zeigt die unterschiedlichen Meßergebnisse für übereinstimmende Optik bei 1:4 in der Belichtungsdauer. Neben mittleren Ergebnistemperaturen (T_4) sind hier auch die höchsten im Ergebnisprotokoll eingetragenen Temperaturen (T_7) dargestellt. Die auftretenden Spitzentemperaturen nach KW 21 sind für einen Vergleich mit T_7 irrelevant, da hier nur wenige Bildpunkte ausgewertet wurden.

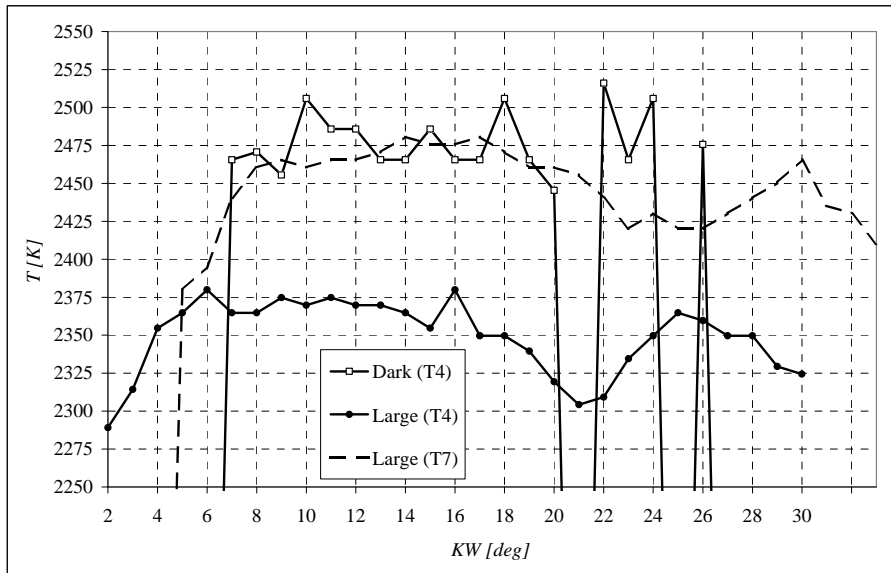


Diagramm 10.6: Vergleich von Ergebnistemperaturen bei optimaler und niedriger Bildhelligkeit

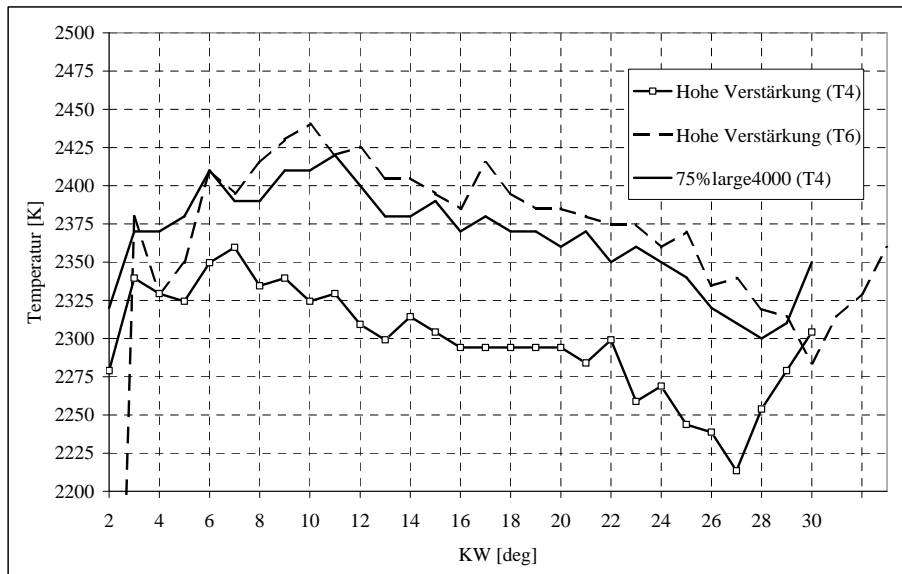


Diagramm 10.7: Ergebnistemperaturen bei optimaler Bildhelligkeit und Übersteuerung

Der umgekehrte Extremfall, stark gesättigtes Bildmaterial, wird anhand einer weiteren Messung erläutert. Bildbereiche, die zumindest einen übersteuerten Farbkanal aufweisen, können für eine Meßdatenauswertung nicht herangezogen werden. Anhand der folgenden Aufnahmesequenz sollte außerdem geprüft werden, inwiefern sich eine hohe Kameraverstärkung auf das Ergebnis auswirkt. Diagramm 10.7 zeigt, ähnlich dem zuvor genannten Fall, daß sich die Ergebnistemperatur aufgrund der veränderten Bildhelligkeit verschiebt. Zufolge der relativen Anhebung dunkler Bildbereiche werden nun Zonen niedriger Temperatur mitbewertet. Durch die Wahl der Temperaturreihe T_6 erhält man hier etwa dieselben Ergebnistemperaturen. In diesem Bild kann ein weiteres Phänomen beobachtet werden; es wurde bereits bemerkt, daß aufgrund unterschiedlicher Belichtungszeiten eine Verschiebung der Temperaturverläufe auftritt. Aus Diagramm 10.7 ist aber weiters zu

erkennen, daß die mittlere Ergebnistemperatur bei KW 27 ansteigt, während höhere Temperaturen erst zeitversetzt ihr Monotonieverhalten umkehren. Dieses Phänomen ist nicht auf einen Meßfehler zurückzuführen, sondern kann bei zahlreichen Messungen beobachtet werden. Offenbar bewirken hohe Temperaturdifferenzen im Brennraum einen Ausgleichsvorgang, der kurzfristig verhindert, daß sich maßgebliche Zonen steigender Temperatur ausbilden.

10.4 Vergleichsmessungen bei gleichbleibender Optik

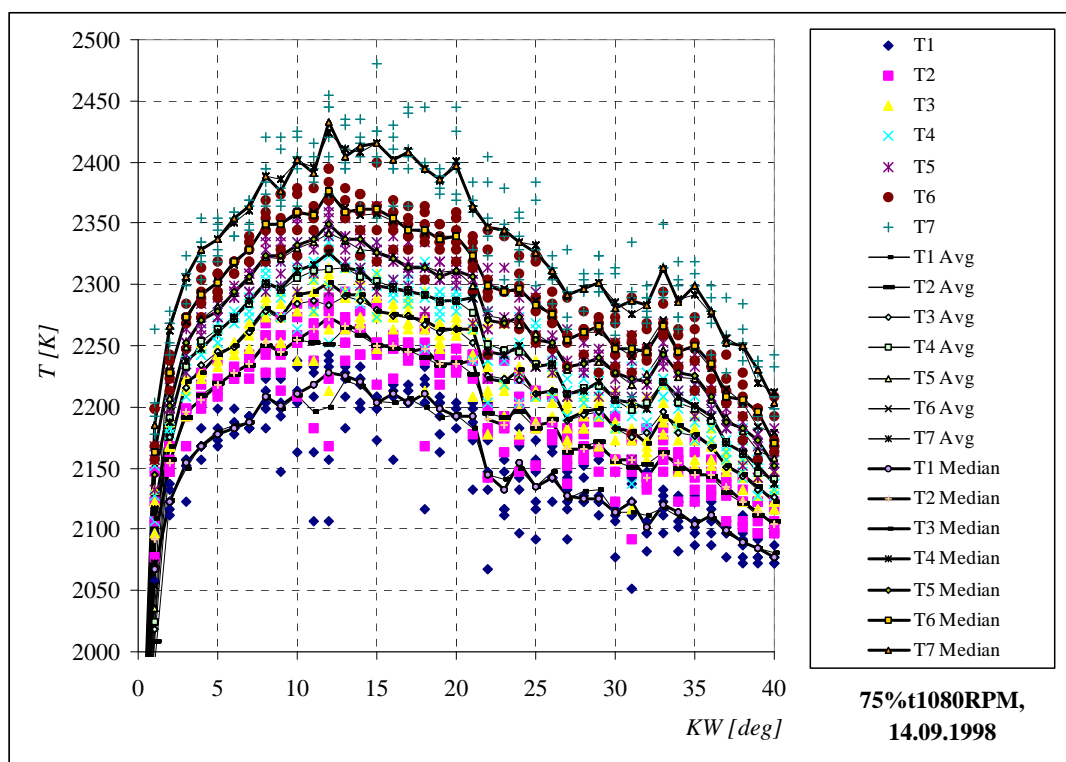


Diagramm 10.8: Lineare Mittelwertbildung und Median-Filterung von Aufnahmewiederholungen

Die später dargestellten Messungen wurden zumeist mit 5 Repetitionen durchgeführt. Für Vergleichsmessungen ist es sinnvoll, unvermeidbare Zyklusschwankungen durch eine geeignete Zusammenfassung der Meßergebnisse über die Aufnahmewiederholungen für die Darstellung zu reduzieren (vgl. Diagramm 10.8). Die folgenden Diagramme zeigen jeweils die nach dem Median-Verfahren berechneten Auswertergebnisse.

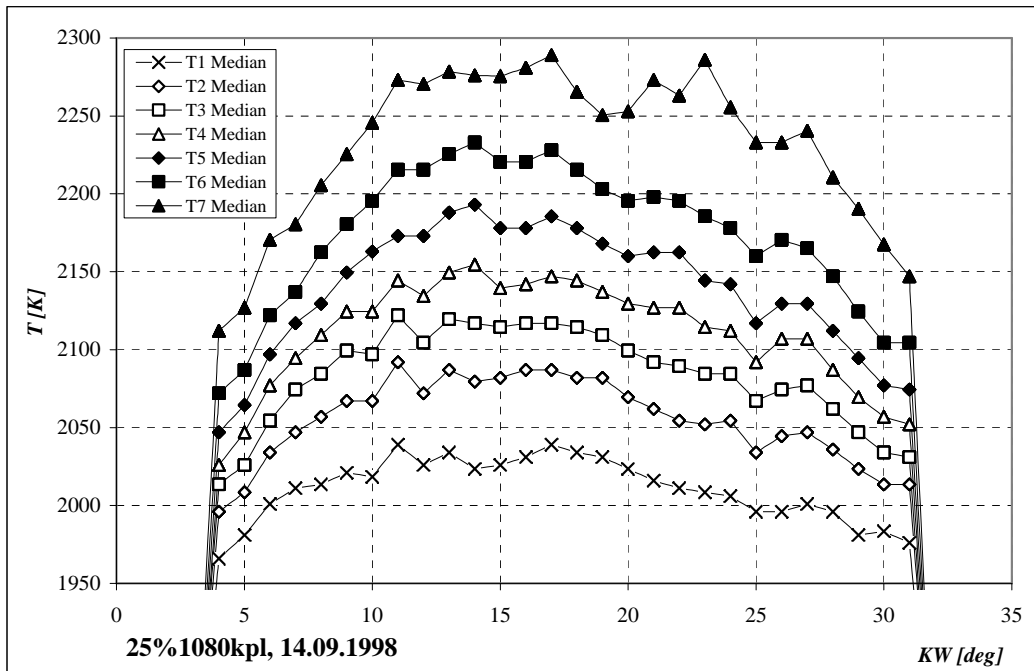


Diagramm 10.9: Ergebnistemperaturen bei 25% Last, 1080RPM, optimale Empfindlichkeit ohne Sättigung

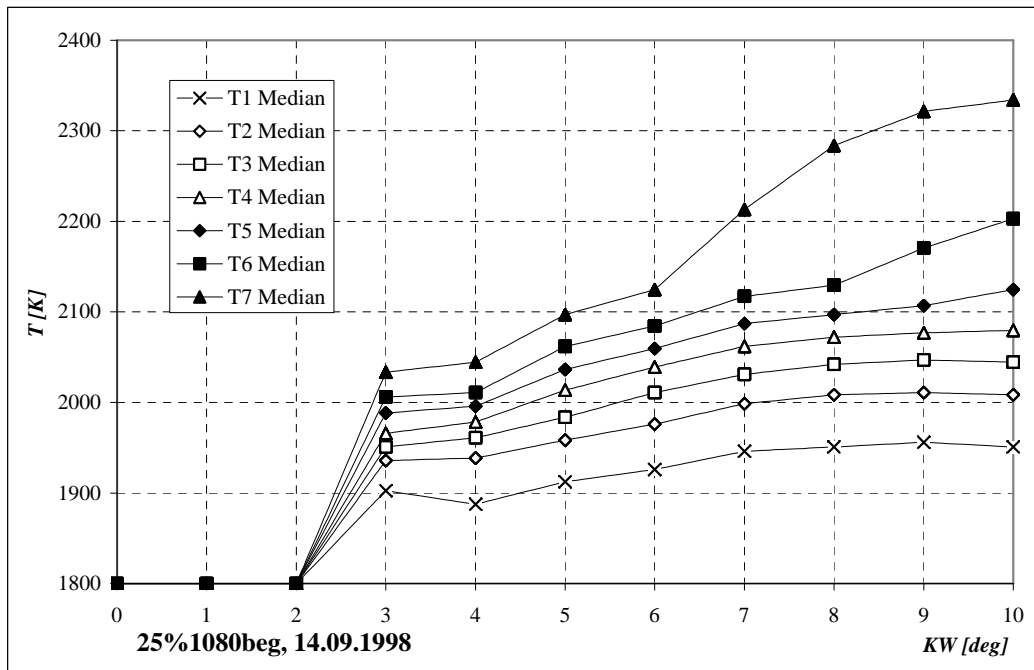


Diagramm 10.10: Ergebnistemperaturen bei 25%Last, 1080RPM, optimale Empfindlichkeit zur Beobachtung des Brennbeginns

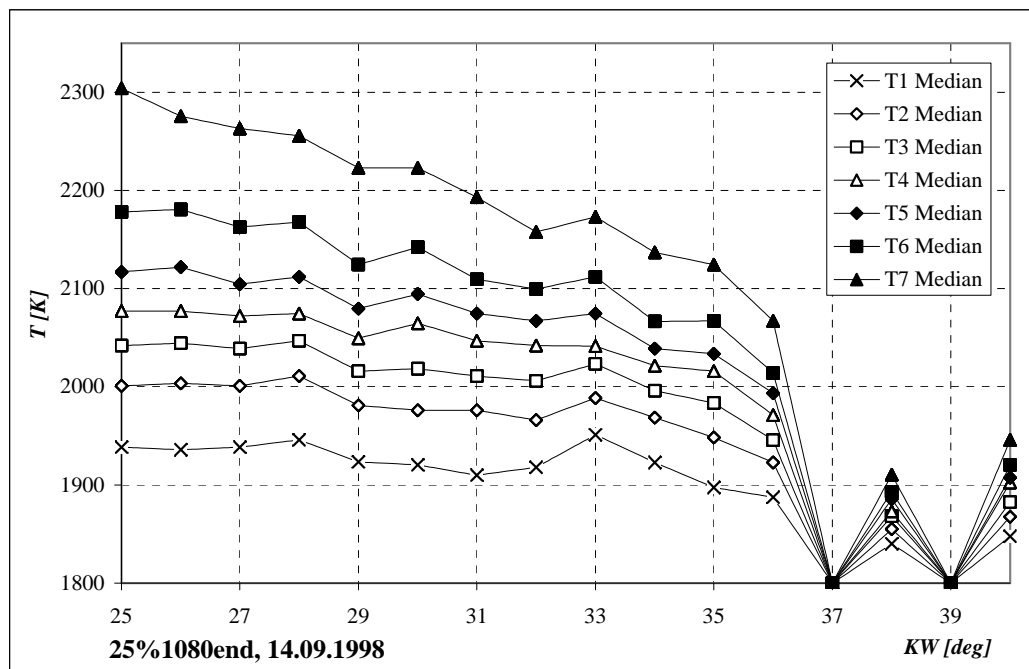


Diagramm 10.11: Ergebnistemperaturen bei 25%Last, 1080RPM, optimale Empfindlichkeit zur Prozeßbeobachtung bei Brennende

Die Diagramme 10.9 bis 10.11 zeigen die berechneten Ergebnistemperaturen bei verschiedenen Kameraeinstellungen im gleichen Betriebspunkt. Man erkennt, daß die gefundenen Temperaturwerte zu keinem deckungsgleichen Verlauf für die Übergangsbereiche (5 bis 10deg und 25 bis 30deg) führen. Dies ist einfach dadurch erklärbar, daß die zugrundeliegenden Basisbilder für die Auswertung der vollständigen Verbrennung bei Einspritzbeginn und bei Brennende nur in ausgewählten, hellen Bereichen durchgeführt wurde, während bei höherer Gesamtempfindlichkeit der Meßdatenauswertung auch dunkel strahlende Bereiche berücksichtigt werden. Außerdem wurde die Meßdatenauswertung für alle Messungen ausschließlich auf Basis des automatisch berechneten Korrekturfaktors durchgeführt. Wird keine weitere Maßnahme ergriffen, so sind Ergebnistemperaturen von Records, die entweder nur zu Beginn oder gegen Ende der Verbrennung aufgezeichnet wurden, höher als bei einer korrekten Zuordnung des optischen Korrekturfaktors (vgl. Diagramme 10.1 und 10.2).

Für die genauere Bestimmung eines Korrekturfaktors hat sich bei derartigen Vergleichsmessungen folgende Vorgangsweise bewährt:

- Automatische Berechnung der Korrekturfaktoren $k_{opt,gesamt}$ (Korrekturfaktor bei Messung über die gesamte Verbrennung) und $k_{opt,beg}$ (der zu korrigierende Faktor für die Aufnahmesequenz bei Brennbeginn/Brennende)
- Median-Filterung der vom Algorithmus vorgeschlagenen Korrekturfaktoren (bildweise eingetragen im Ergebnisprotokoll) über die Repetitionen (mindestens 5) im Übergangsbereich
- Auswahl je eines repräsentativen optischen Korrekturfaktors im Übergangsbereich bei ein und demselben Aufnahmewinkel: $k_{opt,gesamt,median,\varphi rep}$, $k_{opt,beg,median,\varphi rep}$

- Der korrigierte Faktor ergibt sich mit

$$k_{opt,beg,corr} = k_{opt,beg,median,prep} \cdot \frac{k_{opt,gesamt}}{k_{opt,gesamt,median,prep}} \tag{10.1}$$

- Manuelle Zuweisung des optischen Korrekturfaktors bei abermaliger Kalibrierung des Basisrecords

Es wird allerdings nochmals darauf hingewiesen, daß diese Maßnahme ausschließlich dazu führt, daß gemeinsam ausgewertete Bildbereiche durch diese Maßnahme ein vergleichbares Temperaturniveau aufweisen werden, eine direkte Zuordbarkeit der quantifizierten Ergebnistemperaturen aber nicht erreicht werden kann.

Die Diagramme 10.12 und 10.13 zeigen Auswertergebnisse bei weiteren Messungen für höhere Motorlast (50% und 75%).

Diagramm 10.14 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Ergebnistemperaturen T_1, T_4 und T_7 für die bisher dargestellten Belastungszustände. Man erkennt, daß mit zunehmender Last auch die berechnete Ergebnistemperatur klar erkennbar zunimmt, lediglich die Höchsttemperaturen für 25% und 50% Last verlaufen zwischen 21deg (Ende der Einspritzphase bei 50% Last) und 27deg ungefähr deckungsgleich.

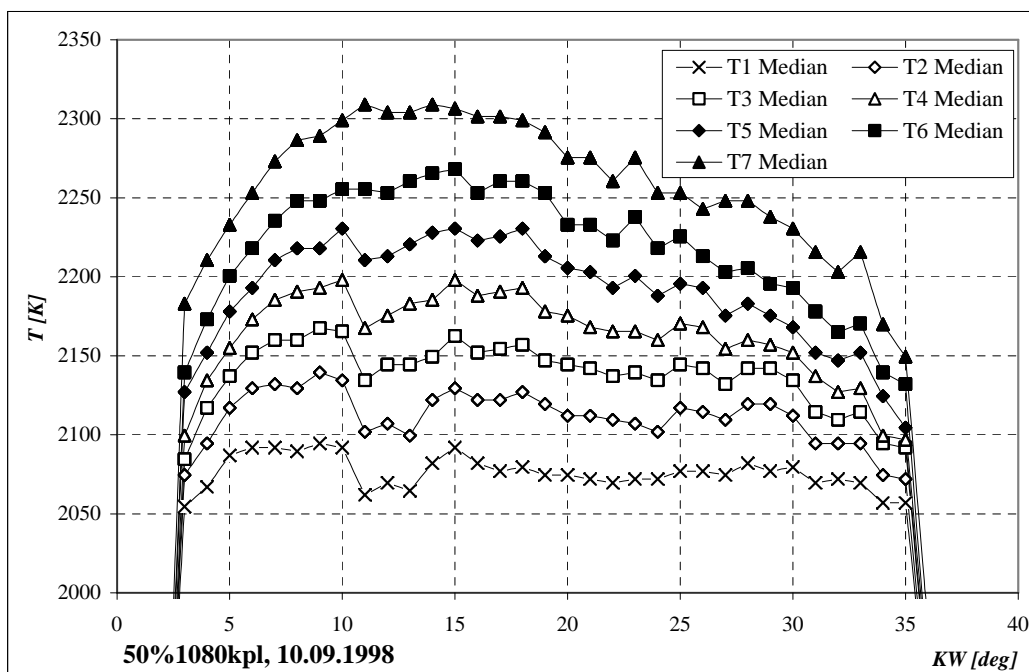


Diagramm 10.12:Ergebnistemperaturen bei 50% Last

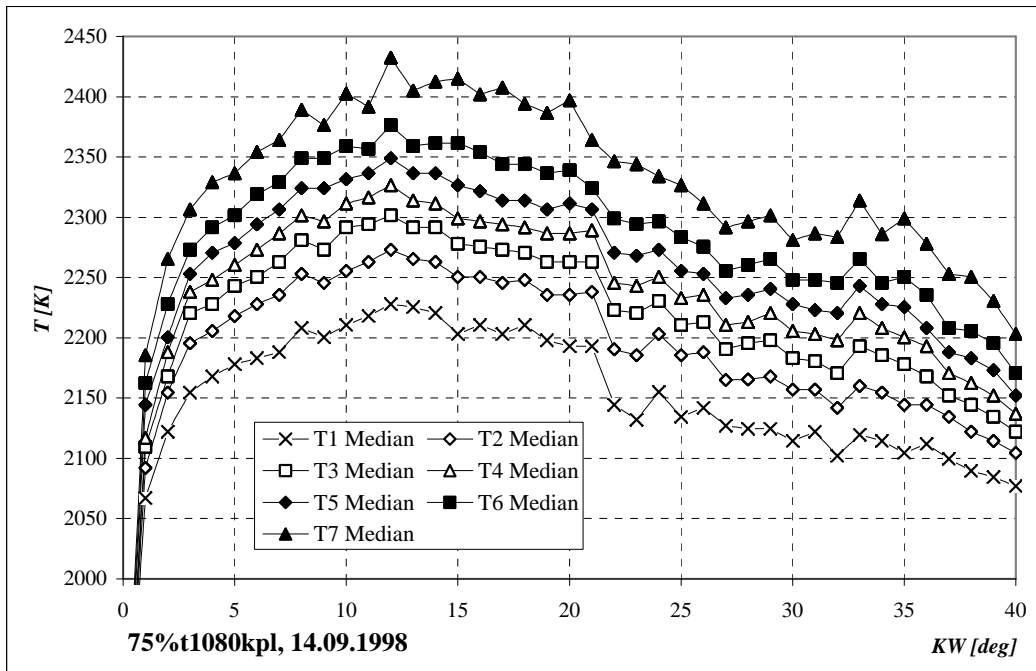


Diagramm 10.13: Ergebnistemperaturen bei 75% Last

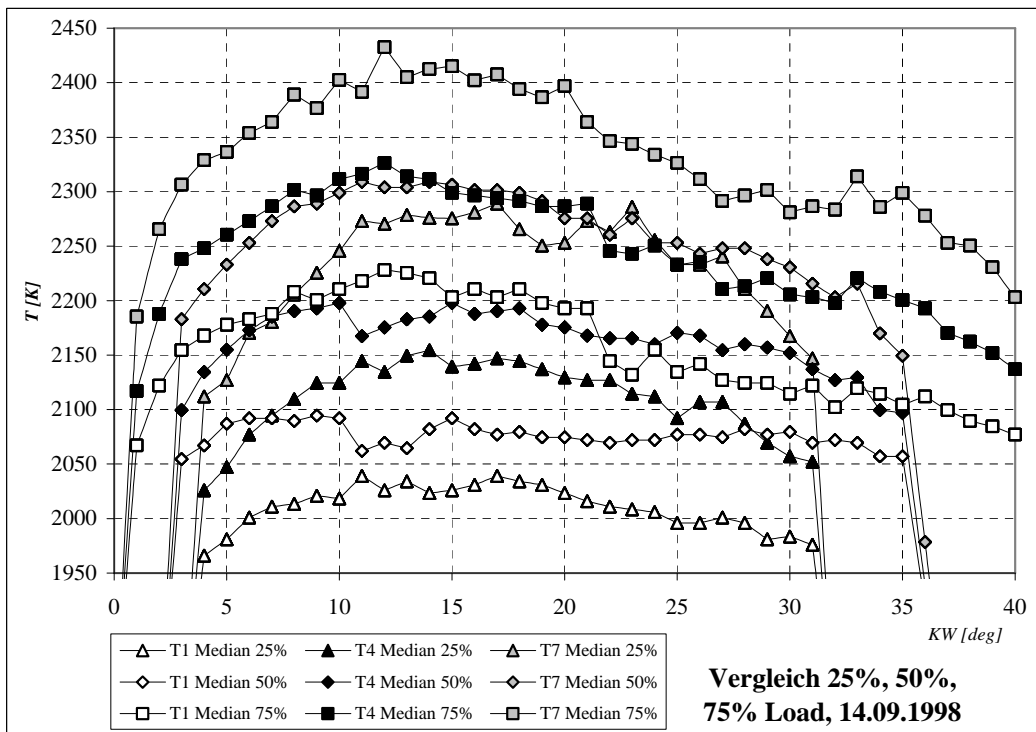


Diagramm 10.14: Gegenüberstellung der Ergebnistemperaturen bei unterschiedlicher Motorlast

10.5 Messungen bei unterschiedlicher Blickrichtung

In Kapitel 2 wurde gezeigt, daß die Temperaturmessung aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen im allgemeinen nicht auf übereinstimmende Ergebnistemperaturen führt. Ursachen dafür sind die vereinfachte Annahme einer lokal homogenen Flamme, die im realen System nicht vorliegt, die Tatsache, daß allgemein an unterschiedlichen Flammenbereichen gemessen wird, sowie das Vorhandensein eines absorbierenden Mediums zwischen Flamme und Sichtfenster. Der Prüfstandsmotor ist nach Bild 10.1 mit zwei optischen Zugängen ausgestattet (*Fenster 1* und *2* in Bild 10.2).

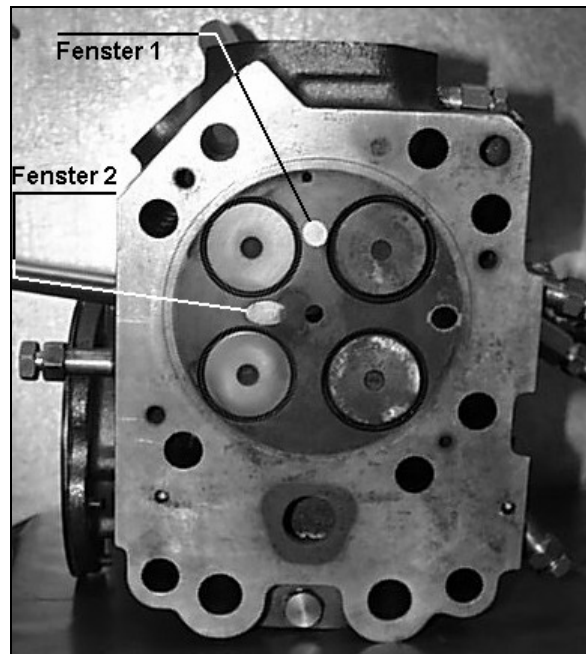


Bild 10.2: Fensteranordnung im Zylinderkopf

Unterschiedliche Ergebnistemperaturen wurden am selben Motorenprüfstand bereits mit dem bisherigen, integralen Temperaturmeßsystem festgestellt, sie konnten aber aufgrund der Einschränkungen der Meßtechnik nicht erklärt werden.

Messungen mit dem Engine VideoScope zeigten demgegenüber bereits in den aufgenommenen Bildsequenzen Einflußgrößen durch die sich zwangsläufig unterschiedliche Ergebnistemperaturen ergeben:

- Während der Kraftstoffeinspritzung ist die beobachtete Szene von *Fenster 2* gesehen von den Flammenkeulen um den eingespritzten Kraftstoff dominiert, während *Fenster 1* hauptsächlich den Flammenbereich abseits der Einspritzdüse zeigt.
- In ausgewählten Phasen der Verbrennung kann beobachtet werden, daß zwischen *Fenster 1* und Flamme absorbierende, kalte Rußschichten vorbeiwandern und so die Temperaturmessung beeinträchtigen. Für *Fenster 2* konnte eine derartiges Phänomen nicht festgestellt werden.

- Im Gegensatz zu *Fenster 1* ist *Fenster 2* praktisch frei von Rußablagerungen, sodaß ohne Korrektur der mit *Fenster 1* aufgenommenen Bildsequenzen (vgl. Kapitel 7), niedrigere Ergebnistemperaturen gemessen werden.

Diagramm 10.13 zeigt die gemessenen Ergebnistemperaturen für *Fenster 1* ohne Korrektur der Aufnahmesequenz, in Diagramm 10.15 sind die Temperaturverläufe der korrigierten Basisbilder dargestellt.

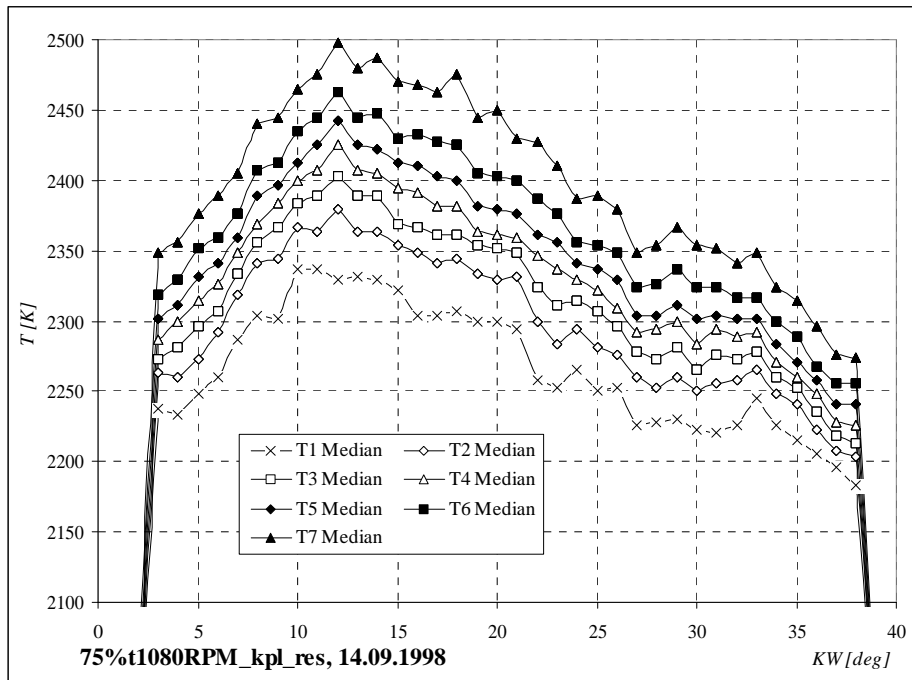


Diagramm 10.15: Diskrete Ergebnistemperaturen nach Anwendung des Korrekturverfahrens nach Kapitel 7

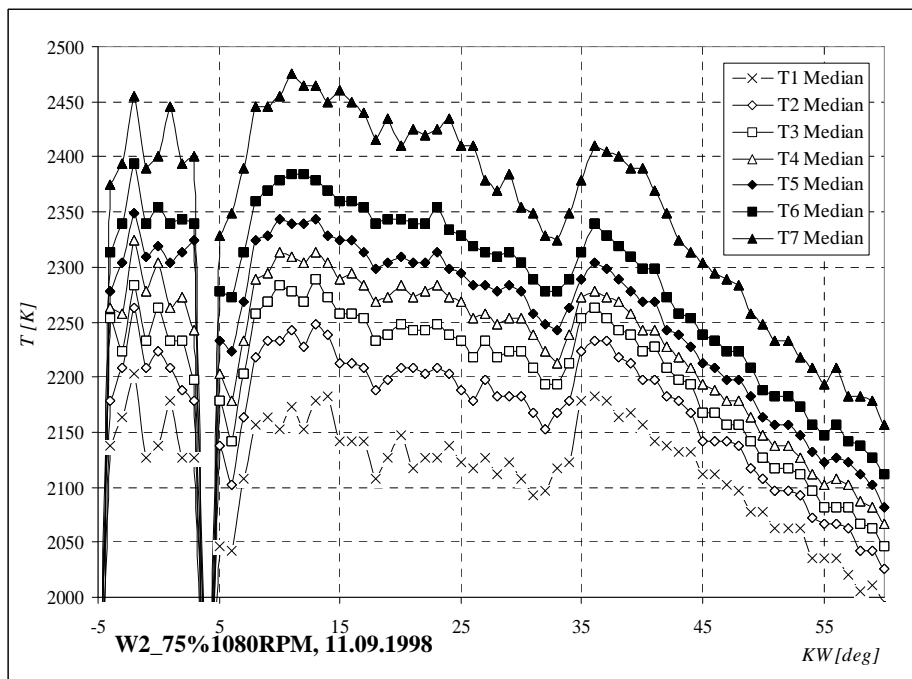


Diagramm 10.16: Messung bei gleichem Motorbetrieb, aber abweichender Beobachtungsrichtung

Diagramm 10.16 zeigt die Ergebnistemperaturen bei gleichem Motorbetrieb wie in Diagrammen 10.13 und 10.15, allerdings bei Messung über *Fenster 2*. Bei dieser Messung werden bereits vor dem eigentlichen Einspritzbeginn hohe Ergebnistemperaturen detektiert. Die Ursache dafür ist eine undichte Düse, die auf eine kleine heiße Flamme führt; dasselbe Phänomen wurde auch über *Fenster 1* festgestellt, die hier dargestellte Aufnahme wurde allerdings mit etwas niedrigerer Gesamthelligkeit aufgenommen, sodaß diese Zonen nicht ausgewertet wurden. Bemerkenswert in Diagramm 10.16 ist auch das ausgeprägte lokale Temperaturmaximum bei KW 35, das bei einer Messung an *Fenster 1* in diesem Ausmaß nicht festgestellt werden kann. Erst eine ausführliche Durchsicht des Bildmaterials hat gezeigt, daß nach Einspritzende (KW 31) eine absorbierende Schicht am Brennraumfenster vorbeizieht. Es wird vermutet, daß dies der Hauptgrund dafür ist, daß eine maßgebliche Temperaturerhöhung aus diesem Grunde nur von *Fenster 2* aus beobachtet werden konnte. Ursache eines nach der Einspritzphase vorliegenden Temperaturanstieges ist der Wegfall der Kühlung des Brennraumes durch den kalten Kraftstoff.

In Diagramm 10.16 sind die Ergebnistemperaturen T_1 , T_4 und T_7 für die drei zuvor beschriebenen Fälle dargestellt. Man erkennt, daß nach Restauration des Bildmaterials die höchsten gemessenen Ergebnistemperaturen während der Einspritzung fast gleich hoch liegen, wie die Höchsttemperaturen bei Messung an *Fenster 2*. Dementgegen werden niedrige Ergebnistemperaturen, die in der Originalaufnahme durch die Berührung am Fenster zu niedrig bewertet wurden, wesentlich stärker angehoben, sodaß die Schwankungsbreite der Temperatur in den Ergebnisbildern des restaurierten Bildmaterials verringert ist. Eine höhere Schwankungsbreite der Ergebnistemperaturen aus *Fenster 2* gesehen kann verifiziert werden, da die Szene vom Übergang des kalten Kraftstoffes zur heißen Flamme abseits der Einspritzstrahlen beobachtet werden kann, während über *Fenster 1* keine direkte Beobachtung des Einspritzstrahles stattfindet.

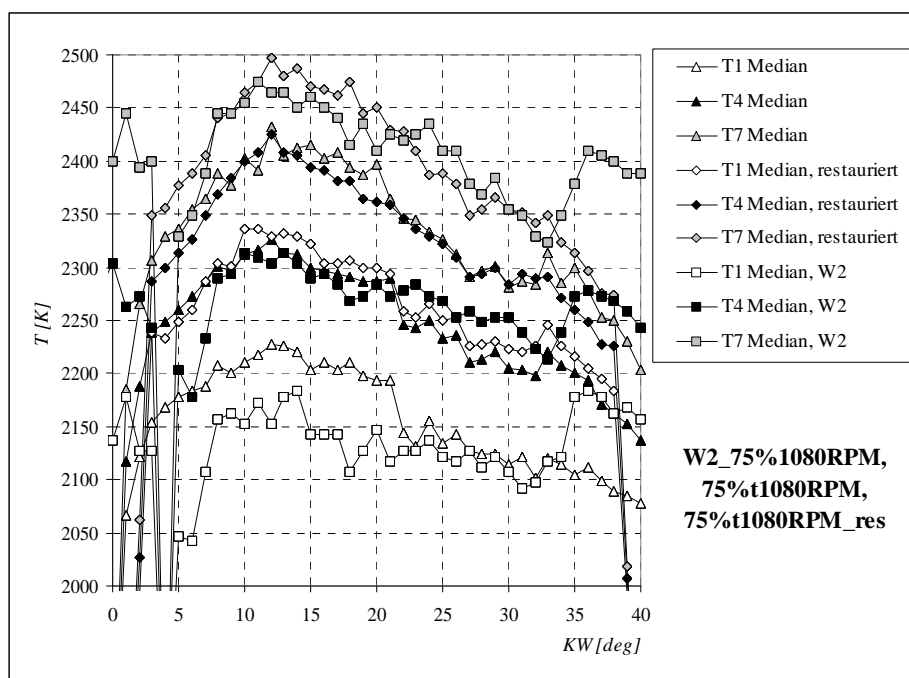


Diagramm 10.17: Gegenüberstellung der Ergebnistemperaturen bei unterschiedlicher Blickrichtung

In Anhang D sind ausgewählte Flammen-, Schichtdicke- und Temperaturbilder dieser Aufnahmesequenzen dargestellt (Farbtafel D19). Man erkennt, daß im Bereich der Einspritzdüse vergleichbare Ergebnistemperaturen gemessen werden, und daß die unterschiedlichen, globalen Ergebnistemperaturen hauptsächlich aus dem unterschiedlichen Beobachtungsbereich, kaum aber aus der abweichenden Beobachtungsrichtung resultieren.

10.6 Schlußfolgerungen

Im Zuge der prototypischen Implementierung wurden verschiedene Kalibriermaßnahmen für die gesamte Meßkette untersucht. Zunächst wurden alle optischen Korrekturfaktoren nach erfolgter Messung am Prüfstand bei gleichbleibender Kameraeinstellung über die Einstellung einer geeigneten Kalibriertemperatur (optimale Bildhelligkeit) am Wolframband erfaßt. Die Wiederholgenauigkeit der Meßdatenauswertung lag nach dieser, konventionellen Vorgangsweise in der Größenordnung von $\pm 50\text{K}$. Ein direkter Vergleich absoluter Ergebnistemperaturen, wie er in diesem Kapitel wiederholt dargestellt wurde, wäre unter dieser Einschränkung kaum möglich. Mit dem vorgeschlagenen modellbasierten Kalibrierverfahren kann bei gleichbleibender Optik ohne weitere Maßnahmen von Wiederholgenauigkeiten im Bereich von $\pm 20\text{K}$ ausgegangen werden. Alle in diesem Kapitel dargestellten Temperaturverläufe wurden ohne manuelle „Nachbesserung“ der automatischen Kalibrierung ermittelt. Für noch höhere Genauigkeitsansprüche besteht die Möglichkeit, über die bildweise berechneten Kalibrierdaten (im Kalibrierprotokoll eingetragen) und eine definierte Zuordnungsvorschrift, vgl. (10.1), einen noch besser reproduzierbaren optischen Korrekturfaktor k_{opt} zu berechnen.

Bei der Interpretation von Temperaturbildern, die bei individuell angepaßten Kameraeinstellungen unterschiedliche Phasen der Verbrennung zeigen, sind die abgeleiteten Ergebnistemperaturen meist nicht direkt miteinander vergleichbar, da sich die ausgewerteten Bereiche im allgemeinen maßgeblich unterscheiden.

Zufolge Berußung des Brennraumfensters verringert sich das globale Temperaturniveau. Weiters werden dabei höhere Schwankungsbreiten (Differenzen zwischen höchsten und niedrigsten Temperaturwerten) innerhalb einer Aufnahme festgestellt als sie tatsächlich vorliegen dürften. Die Anwendung des in Kapitel 7 vorgeschlagenen Korrekturverfahrens führt auf Temperaturniveaus und -verteilungen, die über die Messung an einem zweiten, unbeeinträchtigten Fenster bestätigt werden konnten. Eine grobe Änderung des Monotonieverhaltens der berechneten, diskreten Ergebnistemperaturen zwischen Originalsequenz und restauriertem Basisrecord über den Kurbelwinkel wurde nicht festgestellt.

In ausgewählten Phasen der Verbrennung wird das Vorhandensein eines absorbierenden Mediums zwischen Brennraumfenster und Diffusionsflamme vermutet, da bei abweichendem Beobachtungsfenster und übereinstimmendem Motorbetrieb unterschiedliche Temperaturverläufe gemessen wurden.

Anhand mehrerer Belastungszustände konnte nachgewiesen werden, daß bei gleichbleibender Optik höhere Belastungszustände am Motor durch höhere Ergebnistemperaturen beschrieben

werden. Eine Betrachtung des abgeleiteten Bildmaterials zeigt, daß die Temperatur nicht nur insgesamt ansteigt, sondern daß sich allgemein Zonen hoher Temperatur mit zunehmender Motorlast vergrößern.

Messungen mit mehreren Kameras führen bei vorheriger Kalibrierung durchwegs auf gut reproduzierbare Ergebnisse, derartige Untersuchungen wurden in dieser Arbeit allerdings nicht dargestellt. Ein Vergleich von Messungen unter Verwendung unterschiedlicher Endoskope zeigt, daß selbst bei gleichbleibendem Beobachtungsbereich aufgrund veränderter spektraler Transmissivität Temperaturunterschiede in der Größenordnung von etwa $\pm 30\text{K}$ zu erwarten sind, daß also ein direkter Vergleich von Messungen unter Verwendung unterschiedlicher Endoskope im allgemeinen unzulässig ist. Grobe Fehler treten kaum auf, zumal der verwendete Kantenfilter das spektrale Verhalten des optischen Zugangs klar dominiert. Messungen mit unterschiedlichen Chargen von Kantenfiltern nach gleicher Spezifikation führten allerdings auf grobe Meßfehler in der Höhe von bis zu $\pm 150\text{K}$, sodaß ein Austausch des Filters ohne abermalige Kalibrierung der Meßkette jedenfalls unzulässig ist.

Die Meßergebnisse belegen, daß die Ergebnistemperatur zumindest lokal nicht brauchbar durch die Strahlungsintensität beschrieben werden kann, da Bereiche niedriger Rußdichte zwar eine geringe Strahlungsintensität aufweisen, aber durchaus gleiche oder sogar höhere Temperaturen als übrige Bereiche hoher Energie- und damit Strahldichte aufweisen können.

Bei zu dunklen Aufnahmen sind zwar weite Bereiche der Flamme von einer Auswertung auszuschließen, aber selbst niedrige Signalpegel führen nicht tendentiell auf von optimal aufgenommenem Bildmaterial abweichende Ergebnistemperaturen.

Die wiederholten Messungen haben belegt, daß selbst durch schwierige Umgebungsbedingungen (Hitze, Vibration) die Qualität der Sensordaten nicht beeinträchtigt werden.

Langzeituntersuchungen wurden unter Verwendung einer Kamera für den Zeitraum von einem Jahr durchgeführt, wobei sich nach einmaliger Feststellung der Kalibrierdaten keine merklichen Änderungen in der Meßcharakteristik (insbes. des Weißabgleichs) gezeigt haben. Es kann also davon ausgegangen werden, daß das Meßsystem auch über einen längeren Zeitraum Bilder gleichbleibender Qualität liefert.

11. Kombination mit weiteren Verfahren

Es wurde bereits dargestellt, daß die bildhafte Temperatúrauswertung nur einen Bruchteil der Funktionalität des Gesamtsystems darstellt. Im vorangegangenen Kapitel wurden lediglich die Teilfunktionen Messung und Berechnung von Temperaturbildern behandelt.

In diesem Kapitel werden weitere Funktionen des Systems aufgezeigt, die sich für eine weiterreichende Auswertung und Darstellung von Flammen- und Temperaturbildern bewährt haben. Ausführliche Beschreibungen zu den hier nur grundlegend erklärten Verfahren sind [AVL-EVS] zu entnehmen.

11.1 Synchronisierte Wiedergabe

Eine Hauptaufgabe zur Bewertung des aufgenommenen und ausgewerteten Bildmaterials ist der direkte Vergleich von Bildern bei gleichem Aufnahmewinkel. Dazu werden Bildsequenzen am Bildschirm geöffnet. Nach Anordnung der Recordfenster besteht mit der Option *Synchronized Playback* die Möglichkeit, ausgehend von einem Master-Record eine beliebige Anzahl weiterer Records zu steuern. Es wird genau jener Teilbereich animiert, der die Schnittmenge aller markierten Records darstellt. *Synchronized Playback* erlaubt weiters die manuelle Weiterschaltung aller Records bei angehaltener Animation.

Nach Aufnahme von Verbrennungsbildern und anschließender Meßdatenauswertung steht dem Anwender komplexes Bildmaterial zur Verfügung, dessen Interpretation nur durch eine gemeinsame Betrachtung von Aufnahmedaten und Ergebnisgrößen möglich ist. Die winkelsynchrone Wiedergabe einer beliebigen Anzahl von Bildfolgen ist eines der einzigartigen Leistungsmerkmale der Engine VideoScope Bediensoftware, ein direkter Vergleich kann nicht nur zwischen Aufnahme- und Ergebnisbildern, sondern allgemein auch zwischen unterschiedlichen Messungen angestellt werden.

11.2 Berechnung repräsentativer Bilder

Aufgenommene Flammenbilder unterliegen allgemein starken zyklischen Schwankungen. Für weitere Betrachtungen sind bei der Analyse von Aufnahmewiederholungen (Repetitionen) insbesondere folgende Aspekte interessant:

- Wahrscheinlichkeitsverteilung
- Auswahl repräsentativer Bilder für eine Animation
- Vereinigungs- und Schnittmenge der Flamme über die Aufnahmewiederholungen
- Gemittelttes Bild

Beispiele für die Funktion *Probability Distribution* sind in Anhang D (Farbtafel D7) dargestellt. Zur Darstellung der Wahrscheinlichkeitsverteilung ist es unerheblich, ob der Basisrecord aufgenommenes oder bereits verarbeitetes Bildmaterial beinhaltet. Wird etwa aus

einem Thermovisionsrecord ein Wahrscheinlichkeitsbild abgeleitet, so erhält man Aufschluß darüber, wie häufig Temperaturwerte im Bildmaterial tatsächlich ausgewertet wurden.

Das Ziel für eine Auswahl repräsentativer Bilder nach dem Verfahren *Select Minimum Deviation* liegt darin, solche Flammgeometrien auszuwählen, die sich optimal für eine Animation eignen. Für die Flammentemperaturmessung bedeutsam ist allerdings die Feststellung, daß eine typische Flammgeometrie allein *keinen* Aufschluß darüber gibt, daß auch die Temperaturen repräsentativ sind.

Ähnliches gilt für die Berechnung einer Vereinigungs- bzw. der Schnittmenge der Flamme über das Verfahren *Representative Image*. Dabei wird auf Basis eines Farbkanals der hellste bzw. dunkelste Bildpunkt im Ergebnisbild eingetragen, vgl. Farbtafel D12. Wir haben im Rahmen bisheriger Ausführungen festgestellt, daß dunkle Bereiche nicht zwingend mit niedrigen Temperaturen verbunden sind und hohe Intensitätswerte nicht direkt auf hohe Ergebnistemperaturen schließen lassen.

Ein weiteres Verfahren, *Average Image*, hat sich für die Vorverarbeitung von Aufnahmesequenzen für die Flammentemperaturmessung bewährt (Farbtafel D8). Dabei werden lineare Mittelwertbilder über die Repetitionen berechnet, die bei Vorliegen einer ausreichenden Anzahl von Aufnahmewiederholungen zyklische Fluktuationen unterbinden und generelle Tendenzen von Flammgeometrie, Temperaturverläufen und Schichtdicken zeigen.

Die zugrundeliegende Aufnahme sollte keine Übersteuerung aufweisen; die Kalibrierdaten sind von der Originalsequenz abzuleiten, da gemittelte Bilder generell auf niedrigere optische Korrekturfaktoren führen. Ergebnisbilder gemittelter Aufnahmewiederholungen sind in den Farbtafeln D9 bis D11 dargestellt.

Eine Mittelwertbildung über die Ergebnisdaten ist allgemein weniger aussagekräftig, da eine nichtlineare Zuordnung zwischen Ergebnisgröße und codiertem Meßwert vorliegt (Farbtafel D13).

11.3 Überlagerung von Bildsequenzen

Das Verfahren *Overlay Record* erlaubt die Überlagerung teilweise maskierter Bildsequenzen. Ein typischer Anwendungsfall ist die Erfassung des gesäuberten Brennraumes durch Einkoppelung von Fremdlicht; der Motor wird geschleppt, es findet keine Verbrennung statt.

Spätere Messungen an der Flamme zeigen lediglich die selbstleuchtende Flamme, während der stark berußte Brennraum nicht beobachtet werden kann.

Durch Maskierung dunkler Bereiche können Flammenbilder direkt der beleuchteten Szene überlagert werden, sodaß Flammenbereiche im Brennraum besser interpretiert werden können. Schichtdickenbilder und Temperaturbilder weisen automatisch schwarze Bereiche auf und können so ohne weitere Maßnahmen der beleuchteten Szene überlagert werden.

Farbtafel D4 zeigt eine Sequenz des gesäuberten Brennraumes, in Farbtafel D21 ist die Überlagerung von Bildsequenzen an einem Beispiel dargestellt.

*„We have used the AVL 513D Engine VideoScope extensively
in the development of new injection and combustion systems.
This is a highly valuable tool –
a must for next generation engine development“
(Kaoru Horie, Honda R&D)*

Ergebnisse und Perspektiven

Im Bereich der optischen Flammentemperaturmessung ist mit der Implementierung des dargestellten Verfahrens ein neuartiges Meßgerät für die bildunterstützte Motorenforschung definiert worden. Im Vergleich zu allen bisher entwickelten Systemen hebt sich das dargestellte Gerät hinsichtlich Anwenderfreundlichkeit, Unmittelbarkeit in der Aussage und Reproduzierbarkeit in der Messung weit ab; mit dem vorgeschlagenen Meßsystem wird erstmalig ein individuelles Bild lokal ausgewertet, während bisherige Geräte einen einzigen Ergebniswert bei gleichzeitiger Mittelung über ca. 100 Verbrennungszyklen lieferten.

Die optische Temperaturmessung konnte nahtlos in das bereits zuvor entwickelte Meßsystem Engine VideoScope 513D eingebunden werden. Die Meßdatenauswertung geschieht nach einmaliger, herstellereitiger Kalibrierung der Meßkette allein auf Basis des aufgenommenen Bildmaterials, sodaß keine zusätzlichen Bedienschritte am Prüfstand erforderlich sind. Zahlreiche Messungen haben gezeigt, daß das Meßsystem bei gleichbleibendem Motorbetrieb und übereinstimmender Optik eine im Vergleich zu bisheriger Gerätetechnik überlegene Wiederholgenauigkeit bietet.

Durch die gleichzeitige Verfügbarkeit von Flammen-, Temperatur-, Schichtdickebildern und Bildern des ausgeleuchteten Verbrennungsraumes ist es erstmals möglich, Detailwissen über das lokale Verhalten der dieselmotorischen Flamme auf meßtechnischer Basis abzuleiten.

Während bei bisherigen Messungen das Phänomen „Flammentemperatur“ anhand einer einzigen Ergebnisgröße beschrieben wurde, ist aufgrund der vorgeschlagenen Meßtechnik selbst die Betrachtung eines Temperaturbildes nicht hinreichend, um das örtliche Verhalten der Flamme korrekt zu deuten. Es wurde vielmehr festgestellt, daß transparente Bereiche, die bisher kaum in eine integrale Messung eingingen, gleiche oder sogar höhere Temperaturwerte aufweisen als hell strahlende Zonen.

Messungen aus unterschiedlicher Blickrichtung haben gezeigt, daß kalte Zonen eines absorbierenden Mediums zwischen Flamme und Brennraumfenster auftreten können. Daraus resultierende Meßfehler werden mit bis zu 300K vermutet, sie wurden anhand eines Mehrschichtmodells nachgebildet. Das Phänomen ist Gegenstand derzeitiger Untersuchungen,

da bisher davon ausgegangen wurde, daß Ruß als absorbierende Spezies ausschließlich im Inneren der Flamme in maßgeblicher Dichte vorhanden ist.

Messungen unter normalen Betriebsbedingungen führen allgemein dazu, daß transparente Randzonen der Flamme um Größenordnungen niedrigere Intensität aufweisen als dichtere Zonen, sie bleiben von einer Auswertung ausgeschlossen. Einzelne Messungen wurden bei bestmöglicher Kameraeinstellung gegen Ende des Verbrennungszyklusses durchgeführt, wobei in transparenten Randzonen Temperaturen weit oberhalb der Kerntemperatur gemessen wurden. Dies deutet darauf hin, daß im Gegensatz zu anderen Aufnahme sequenzen die Messung nicht zufolge zu geringer Intensität abreißt, sondern daß hier tatsächliche Bereichsgrenzen der Diffusionsflamme gefunden wurden. Die hohen Ergebnistemperaturen in diesen Zonen sind vermutlich auf dominierende Banden-Emission im Blaubereich zurückzuführen, die nur außerhalb der Diffusionsflamme isoliert werden kann. Die gefundenen hohen Temperaturwerte sind unter dieser Voraussetzung als Meßfehler zu verstehen.

Entgegen der sehr einfachen Handhabung des Meßsystems im Prüffeld ergeben sich für die richtige Interpretation der abgeleiteten Information sehr komplexe Zusammenhänge, die eine ausführliche Beschäftigung mit dem Modell und eine grundlegende Erfahrung mit dem System erfordern; die realisierte, orts aufgelöste Temperaturmessung dient letztendlich dazu, den Experten in seiner Arbeit zu unterstützen, nicht aber, ihn zu ersetzen.

Die Wiederholgenauigkeit der Messung mit dem vorliegenden System liegt bei gleichbleibender Optik und übereinstimmendem Betriebszustand am Motor in einem Bereich von typisch $\pm 20\text{K}$ ($\pm 1\%$ bei 2.000K). Eine Überprüfung der gemessenen Absoluttemperaturen ist allein auf optischer Basis mit der heute verfügbaren Meßtechnik im Brennraum nicht durchführbar. Neben den erfaßten Bilddaten wurden über ein Indiziersystem allerdings auch weitere Prozeßdaten erfaßt. Durch Parametrisierung des Motors wäre gemeinsam mit diesen Eingangsdaten die Ermittlung der auftretenden Höchsttemperaturen unter Anwendung eines thermodynamischen Zweizonenmodells [Pisching] möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Temperaturmessung fast ausschließlich auf Basis der vorgeschlagenen Meßtechnik unter dem Aspekt der Strahlungseigenschaften der dieselmotorischen Flamme dargestellt. Im Zuge der Fehlerbetrachtungen wurden Eingangsdaten synthetisiert, die ohne Kenntnis realer Eigenschaften der Flamme eine Abschätzung von Wechselbeziehungen zwischen Ergebnisgrößen und räumlichen Verteilungen im Brennraum ermöglichen. Es wurde gezeigt, daß unter Verwendung eines Referenzmeßsystems eine weitaus bessere Analyse der erhaltenen Ergebnisgrößen möglich wäre. Da es eine derartige Meßtechnik auch in absehbarer Zeit nicht geben wird, scheint ein Zugang über die Simulation der Verbrennung unter Berücksichtigung von realer Motorgeometrie und Betriebsparametern zielführender zu sein. Künftig wird eine „integrale Motorenforschung“ an Bedeutung gewinnen, bei der einander die Disziplinen Meßtechnik, Simulation und Grundlagenforschung nähergebracht werden, um so das individuell vorhandene Detailwissen bestmöglich nutzen zu können.

Es wurde bereits im Rahmen der Modellbildung angedeutet, daß der Schritt von der Temperaturmessung an einem Temperaturstrahler mit bekanntem Emissionsvermögen zur Flammentemperaturmessung praktisch nur einen geringfügigen Mehraufwand darstellte. Dementsprechend wäre die Anpassung des Meßsystems für weitere breitbandige Temperaturstrahler kein Problem, sofern nur deren Emissionsvermögen bekannt ist und eine ausreichende Strahlungsleistung im sichtbaren Bereich des Spektrums vorliegt [Schmid5]. Dabei ist, in Analogie zur rußenden Flamme, sogar die Berücksichtigung eines Scharparameters für die Meßdatenauswertung möglich.

Die einschränkenden Genauigkeitsansprüche des vorliegenden Systems orientieren sich im wesentlichen an der Unbestimmtheit des zugrundeliegenden Modells des betrachteten Temperaturstrahlers und an der Sensorik. Es konnte für den Fall der dieselmotorischen Verbrennung nachgewiesen werden, daß absorbierende Speziesdichten zwischen Flamme und Sichtfenster die Messung maßgeblich beeinträchtigen können, eine verbesserte Sensorik wird bei gleichbleibendem Gesamtkonzept zu keiner bedeutenden Steigerung der Meßgenauigkeit führen. Für Temperaturstrahler mit sehr gut bekannten Strahlungseigenschaften könnte die vorgeschlagene Methodik durch Verwendung professioneller, gekühlter 12bit Digitalkameras um Größenordnungen höheren Genauigkeitsansprüchen genügen, sofern diese für die Messaufgabe grundsätzlich geeignet sind.

Eine Einschränkung des Meßprinzips stellt die Forderung nach einem breitbandigen Strahler dar, eine Grundbedingung, die etwa bei einem konventionellen Benzinmotor verletzt ist.

Mit der Entwicklung des Meßsystems Engine VideoScope 513D wurde in vielfacher Hinsicht Pionierarbeit geleistet. Seit seiner Markteinführung steht dem Motorenforscher erstmals ein optisches Meßsystem zur Verfügung, das alle Grundfunktionen zur Erfassung, Auswertung, Visualisierung und Dokumentation seiner Arbeit speziell für die Motorenforschung bereitstellt.

Mit der baldigen Verfügbarkeit leistungsfähigerer Kameras, besserer Aufnahmeleistungen von High-Speed Systemen und tomographischen Meßverfahren besteht nach der technischen Realisierung des Basissystems in absehbarer Zeit ein Bedarf an einer offenen Hardware- und Softwarearchitektur, sodaß ein wesentlich breiteres Applikationsfeld bedient werden kann. Ähnliches gilt für die Berücksichtigung zusätzlicher Eingangsdaten im Sinne der angesprochenen „integralen Motorenforschung“, bei der eine Berücksichtigung externer Geometrie- und Betriebsdaten des Prüfstandsmotors sowie Simulationsdaten zur Interpretation und Auswertung angestrebt wird.

Grundkonzepte für eine strukturelle Überarbeitung von Hardware- und Softwarearchitektur wurden bereits erarbeitet [Bern, Schmid3]. Diese Maßnahmen würden den bisher erarbeiteten technologischen Vorsprung im Bereich der bildgestützten Motorenforschung für die nächsten Jahre sicherstellen; eine prototypische Umsetzung der neuen Lösungsansätze wurde vom Kooperationspartner in Auftrag gegeben.

Literaturverzeichnis

- [Ångström] K. Ångström, *Beobachtungen über die Durchstrahlung von Wärme verschiedener Wellenlänge durch trübe Medien*, Annalen der Physik 36, 1889
- [AVL-FT] Anonym, *Flammentemperatur-Meßgerät Typ 512 – Betriebsanleitung*, AVL, 1989
- [AVL-VE] Anonym, *AVL 513 Engine Video System – Gerätehandbuch*, AVL, 1992
- [AVL-EVS] Anonym, *Engine VideoScope 513D – Gerätehandbuch*, AVL, 1998
- [AVL-TV] Anonym, *Spektrale Flammentemperaturmessung nach der Zweifarb-Methode*, AVL, 1998
- [Baehr] H. D. Baehr, K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 2. Auflage, Verlag Springer, 1996
- [Bäss] H. Bässmann, Ph. W. Besslich, *Bildverarbeitung Ad Oculos*, Verlag Springer, 1991
- [Bern] Th. Berndorfer, A. Brenner, D. Schmidradler, Z. Tamási, *Optimizing Costs in Industrial Manufacturing Processes Using an Object Oriented Hardware Concept*, Proc. FAIM-99, 1999
- [Becker] A. Becker, *Über die Strahlung und Temperatur der Hefnerlampe*, Annalen der Physik 28, 1909
- [de Vos] J. C. de Vos, *A new Determination of the Emissivity of Tungsten Ribbon*, Physica 20, 1954
- [Drnek] W. Drnek, *Aufnahme und Visualisierung digitaler Farbbildsequenzen auf Basis eines parallelen Echtzeitsystems*, Diplomarbeit am Institut für Flexible Automation, TU-Wien, 1995
- [Drnek2] W. Drnek, D. Schmidradler, *Engine VideoScope, Erster Projektbericht*, interner Arbeitsbericht, Institut für Flexible Automation, TU-Wien, 1995
- [Ebel] H. Ebel, *Physik – ET*, 4. Auflage, Vorlesungsskriptum, Institut für Angewandte und Technische Physik, TU-Wien, 1998
- [Gaydon] A.G. Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, Chapman and Hall, 1974
- [Gstrein] W. Gstrein, *Ein Beitrag zur spektroskopischen Flammentemperaturmessung bei Dieselmotoren*, Dissertation an der Technischen Universität Graz, 1987
- [Hering] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer, *Physik für Ingenieure*, 3. Auflage, VDI-Verlag 1989
- [Hohl] J. Hohl, *Konzeption und Aufbau eines triggerbaren Videosystems für die industrielle Bildverarbeitung*, Diplomarbeit am Inst. f. Flexible Automation, TU-Wien, 1996

- [Hötger] M. Hötger et al., *Integrale Lichtleit-Meßtechnik zur experimentellen Untersuchung des Verbrennungsablaufs im Dieselmotor – Abschlußbericht*, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Heft 607, 1996
- [Jähne] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung*, 2. Auflage, Springer Verlag, 1991
- [Kubinger] W. Kubinger, M. Vincze, G. Zeichen, *Untersuchungen zur Robustheit von Farbraummodellen bezüglich Szenengeometrie und Schwankungen in der Beleuchtungseinheit*, Mustererkennung 1998: 20. DAGM-Symposium, Springer 1998
- [Lawton] B. Lawton, G. Klingenberg, *Transient Temperature in Engineering and Science*, Oxford University Press, 1996
- [Matsui] Y. Matsui et al., *A Study on the Time and Space Resolved Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a D.I. Diesel Engine by the Two Color Method*, SAE 790491, 1979
- [Mie] G. Mie, *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloider Metalllösungen*, Annalen der Physik, IV. Folge, Band 25, 1908
- [Mitsu] Anonym, *IR-M700/M700E – Product Data Sheet*, Mitsubishi, 1998
- [Naeser] G. Naeser, W. Pepperhoff, *Optische Temperaturmessungen an leuchtenden Flammen*, Mitteilung Nr. 367, Archiv für das Eisenhüttenwesen, Heft 1/2, Jan./Feb. 1951
- [Neusch] H. Neuschmied, *Analyse endoskopisch erfaßter Bilder von Verbrennungsprozessen in Motoren*, Dissertation an der Technischen Universität Graz, 1998
- [PCO] Anonym, *Produktblatt SENSI-CAM*, PCO, 1998
- [Pepper1] W. Pepperhoff, A. Bähr, *Zur Optik leuchtender Flammen*, Mitteilung Nr. 383, Archiv für das Eisenhüttenwesen, Heft 9/10, Sept./Okt. 1952
- [Pepper2] W. Pepperhof, *Über die Dispersion des optischen Absorptionsvermögens von Flammenruß*, Optik 8, Heft 8, 1951
- [Pisching] R. Pischinger et al., *Die Verbrennungskraftmaschine Band 5 Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*, Verlag Springer, 1989
- [Pitter] R. Pittermann, *Entwicklung eines multispektralen Meßverfahrens zur Untersuchung der Verbrennung im direkteinspritzenden Großdieselmotor*, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Heft 535, 1993
- [Pitter2] R. Pittermann, *Untersuchung von Bedingungen der Schadstoffentstehung im Brennraum von Dieselmotoren – Abschlußbericht*, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Heft 606, 1996
- [Planck] M. Planck, *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*, Annalen der Physik 4, 1901
- [Pulnix] Anonym, *Pulnix TMC-9700 – User Manual*, Pulnix 1997

- [Reling] J. Reling, *Industrielle Endoskopie – Systeme, Komponenten, Anwendung*, Die Bibliothek der Technik 153, Verlag Moderne Industrie, 1997
- [Rößler] F. Rößler, H. Behrens, *Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Rußteilchen leuchtender Flammen*, Optik 6, Heft 3, 1950
- [Salz] K. Salzgeber, *Experimente und numerische Untersuchungen zur Rußbildung in Diffusionsflammen*, Dissertation an der TU-Graz, 1997
- [Schmid] D. Schmidradler, *Benutzeroberfläche für das Management digitaler Farbbildsequenzen auf Basis eines parallelen Echtzeitsystems*, Diplomarbeit am Institut für Flexible Automation, TU-Wien, 1995
- [Schmid2] D. Schmidradler, W. van Dyck, K. Fürst, H. Hufnagl, *Fault Analysis and Performance Monitoring in Prototyping Machine Vision Systems*, IEEE Proc., ICIP-97, 1997
- [Schmid3] D. Schmidradler, W. van Dyck, J. Oberleitner, G. Zeichen, *Engine VideoScope Software: A Common User-Interface for Online Inspection, Data Management, and Image Processing*, Machine Vision Systems for Inspection and Metrology VII, Proc. of SPIE Vol 3521, 1998
- [Schmid4] D. Schmidradler, P. Werlberger, *Engine VideoScope Thermovision: Vision Based Temperature Measurement for Diesel Flames*, Automotive Mechatronics Design and Engineering, Proc. ISATA-99, 1999
- [Schmid5] D. Schmidradler, Th. Berndorfer, A. Brenner, W. van Dyck, *A RGB-camera based System for Inspecting Thermal Radiators*, Proc. FAIM-99, 1999
- [Sony] Anonym, *XC-77 User Manual*, Sony, 1996
- [Stull] V. R. Stull, G. N. Plass, *Emissivity of dispersed Carbon Particles*, Journal of the Optical Society of America, Vol. 50, Nr. 2, 1960
- [Taucar] G. Taucar, P. Werlberger, *Ein Fenster zur Beobachtung der Vorgänge im Brennraum von Dieselmotoren*, Mitteilungen des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Heft 29
- [Tränkler] H.R. Tränkler, E. Obermeier, *Sensortechnik – Handbuch für Praxis und Wissenschaft*, Verlag Springer, 1998
- [VarioScan] Anonym, *VARIOSCAN compact – Technische Beschreibung*, InfraTec, 1998
- [Waltz] F. M. Waltz, *SKIPSM: Separated Kernel Image Processing using Finite-State Machines*, Proc. SPIE Conf. on Machine Vision Applications, Architectures, and Systems Integration III, Vol. 2347, 1994
- [Werl] P. Werlberger, *Grundlegende Untersuchungen zur spektroskopischen Temperaturmessung im Brennraum eines direkteinspritzenden Dieselmotors*, Diplomarbeit am Inst. f. Experimentalphysik, TU-Graz, 1979
- [Xilinx] Anonym, *Xilinx Programmable Logic Data Book*, Xilinx, 1998

[Zimmer] G. Zimmermann, V. Aust, G. Klingenberg, *Ermittlung von Temperaturverteilungen mittels Lasertomographie - Sachbericht Dezember 1994 bis Juli 1997*, Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, 1997

Bildquellennachweis

Bild 4.1, 4.3, 4.4, 4.5: Anonym, *AVL 513D Engine VideoScope Example Records Volume II*, Demo-CD-ROM, 513D_E98.PPT, AVL 1997

Bild 4.7: Anonym, *Spektrale Flammentemperaturmessung nach der Zweifarb-Methode*, AVL, 1998

Curriculum Vitae

Name: Dieter Schmidradler

Eltern: Ing. Josef[†] und Franziska Schmidradler

Geburtstag,
Geburtsort: 22. August 1970 in St. Pölten

Familienstand: ledig

Schulbildung: 4 Jahre Volksschule
8 Jahre Realgymnasium – Reifeprüfung

Wehrdienst: Jänner bis Juni 1989

Berufsausbildung: 1989 bis 1995: Elektrotechnikstudium,
Studienzweig „Industrielle Elektronik und Regelungstechnik“
seit 1996: Doktoratstudium an der Technischen Universität Wien

Berufserfahrung: 1985 bis 1995: Mitarbeit im elterlichen Elektrounternehmen
April 1995 bis Jänner 1996: Studienassistent am
Institut für Flexible Automation der TU-Wien
Februar 1996 bis Mai 1997: Forschungsassistent am
Institut für Flexible Automation der TU-Wien
seit Juni 1997: Universitätsassistent am
Institut für Flexible Automation der TU-Wien

ANHANG

Anhang A: Kalibrierdaten von Kamera und Optik

Kalibrierprotokoll	Seite A-2
Tabelle A1: Zuordnung von k_{ks} Werten im Übergangsbereich	Seite A-2
Tabelle A2: Stützstellen der relativen Farbwerte Rot/Grün	Seite A-3
Tabelle A3: Stützstellen der relativen Farbwerte Rot/Blau	Seite A-4
Tabelle A4: Stützstellen der absoluten Rot-Intensität des Modells	Seite A-5

Kalibrierprotokoll

Calibration Date: 09/30/98 15:10:08

Camera Specification:

Type: Pulnix TMC-9700 (Customer: AVL)

Serial Number: 338

Primary Filters, Spectral Response: 1

White Balance: $kg=7.473684e-001$, $kb=1.891958e-001$

Spectral Transmissivities:

Secondary Filter: LOT 13 RUN 1010-3292

Endoscope: Storz/AVL, Type 1; Cosmicar Lens: 25mm

Model:

Radiator Type: Diesel Flame

Analysis Method: two color method

Model: locally homogenous distribution of temperature and soot density

Measurement Range [K]: $1.800000e+003$ to $3.000000e+003$

Resolution [K]: $5.042017e+000$

Threshold Values:

$R_{lin,min}=25$, $G_{lin,min}=25$, $B_{lin,min}=0$

Tungsten Calibration Temperature [K]: $2.191000e+003$

$R_{sel}=252$, $G_{sel}=136$, $B_{sel}=93$

Kalibrierdaten

i	$k_{ks}(i) \cdot 1E9$	i	$k_{ks}(i) \cdot 1E9$
0	0.26	6	799.29
1	110.72	7	986.01
2	227.72	8	1205.37
3	352.71	9	1475.97
4	487.62	10	1839.13
5	635.18	11	2424.48

Tabelle A1: Zuordnung der diskreten k_{ks} -Werte im Übergangsbereich

T [K]→ $k_{ks} \cdot 1E9$ ↓	1.800	1.909	2.018	2.127	2.236	2.345
0	2,1917	2,0201	1,8758	1,7533	1,6482	1,5573
111	2,2125	2,0397	1,8943	1,7708	1,6649	1,5733
228	2,2333	2,0593	1,9128	1,7884	1,6816	1,5893
353	2,2541	2,0788	1,9313	1,8059	1,6983	1,6052
488	2,2749	2,0984	1,9498	1,8235	1,7150	1,6212
635	2,2956	2,1180	1,9683	1,8410	1,7317	1,6371
799	2,3164	2,1375	1,9868	1,8586	1,7484	1,6531
986	2,3372	2,1571	2,0053	1,8761	1,7652	1,6691
1205	2,3580	2,1767	2,0238	1,8937	1,7819	1,6850
1476	2,3789	2,1963	2,0424	1,9113	1,7986	1,7010
1839	2,3998	2,2160	2,0609	1,9289	1,8153	1,7170
2424	2,4209	2,2358	2,0796	1,9465	1,8321	1,7329

T [K]→ $k_{ks} \cdot 1E9$ ↓	2.455	2.564	2.673	2.782	2.891	3.000
0	1,4782	1,4087	1,3474	1,2930	1,2444	1,2007
111	1,4935	1,4234	1,3616	1,3066	1,2576	1,2135
228	1,5088	1,4381	1,3757	1,3203	1,2708	1,2263
353	1,5241	1,4528	1,3899	1,3339	1,2840	1,2391
488	1,5393	1,4675	1,4040	1,3476	1,2972	1,2519
635	1,5546	1,4822	1,4182	1,3613	1,3104	1,2648
799	1,5699	1,4969	1,4323	1,3749	1,3236	1,2776
986	1,5852	1,5116	1,4465	1,3886	1,3368	1,2904
1205	1,6005	1,5262	1,4606	1,4022	1,3500	1,3031
1476	1,6158	1,5409	1,4747	1,4158	1,3632	1,3159
1839	1,6311	1,5556	1,4888	1,4295	1,3764	1,3287
2424	1,6463	1,5702	1,5029	1,4430	1,3895	1,3414

Tabelle A-2a und 2b: Relative Farbwerte Rot/Grün des Modells für das verwendete Meßsystem

$T [K] \rightarrow$ $k_{ks} \cdot 1E9 \downarrow$	1.800	1.909	2.018	2.127	2.236	2.345
0	3,3847	3,0618	2,7716	2,5131	2,2841	2,0821
111	3,4221	3,0998	2,8096	2,5506	2,3208	2,1177
228	3,4589	3,1373	2,8472	2,5878	2,3572	2,1530
353	3,4952	3,1742	2,8842	2,6244	2,3931	2,1879
488	3,5308	3,2105	2,9207	2,6606	2,4286	2,2225
635	3,5657	3,2462	2,9566	2,6962	2,4636	2,2566
799	3,6000	3,2813	2,9918	2,7312	2,4980	2,2902
986	3,6336	3,3156	3,0264	2,7655	2,5318	2,3231
1205	3,6664	3,3492	3,0601	2,7991	2,5648	2,3554
1476	3,6984	3,3818	3,0930	2,8318	2,5970	2,3869
1839	3,7294	3,4135	3,1248	2,8634	2,6281	2,4172
2424	3,7593	3,4439	3,1553	2,8936	2,6577	2,4462

$T [K] \rightarrow$ $k_{ks} \cdot 1E9 \downarrow$	2.455	2.564	2.673	2.782	2.891	3.000
0	1,9041	1,7474	1,6095	1,4878	1,3802	1,2849
111	1,9385	1,7805	1,6411	1,5181	1,4092	1,3126
228	1,9726	1,8133	1,6726	1,5482	1,4381	1,3403
353	2,0064	1,8458	1,7039	1,5782	1,4668	1,3678
488	2,0398	1,8781	1,7349	1,6080	1,4954	1,3952
635	2,0729	1,9100	1,7656	1,6375	1,5237	1,4223
799	2,1055	1,9415	1,7960	1,6667	1,5516	1,4491
986	2,1375	1,9725	1,8258	1,6954	1,5792	1,4756
1205	2,1688	2,0028	1,8550	1,7235	1,6062	1,5016
1476	2,1994	2,0323	1,8835	1,7509	1,6326	1,5269
1839	2,2289	2,0608	1,9110	1,7773	1,6580	1,5513
2424	2,2569	2,0879	1,9371	1,8025	1,6821	1,5744

Tabelle A-3a und 3b: Relative Farbwerte Rot/Blau des Modells für das verwendete Meßsystem

$T [K] \rightarrow$ $k_{ks} \cdot 1E9 \downarrow$	1.800	1.909	2.018	2.127	2.236	2.345
0	3,61E+14	7,20E+14	1,33E+15	2,32E+15	3,84E+15	6,06E+15
111	1,43E+17	2,84E+17	5,26E+17	9,17E+17	1,51E+18	2,39E+18
228	2,70E+17	5,37E+17	9,95E+17	1,73E+18	2,86E+18	4,51E+18
353	3,83E+17	7,62E+17	1,41E+18	2,46E+18	4,06E+18	6,40E+18
488	4,83E+17	9,62E+17	1,78E+18	3,10E+18	5,12E+18	8,07E+18
635	5,72E+17	1,14E+18	2,11E+18	3,67E+18	6,05E+18	9,54E+18
799	6,50E+17	1,29E+18	2,39E+18	4,17E+18	6,87E+18	1,08E+19
986	7,18E+17	1,43E+18	2,65E+18	4,60E+18	7,59E+18	1,20E+19
1205	7,77E+17	1,55E+18	2,86E+18	4,98E+18	8,21E+18	1,29E+19
1476	8,28E+17	1,65E+18	3,05E+18	5,30E+18	8,74E+18	1,38E+19
1839	8,71E+17	1,73E+18	3,20E+18	5,57E+18	9,19E+18	1,45E+19
2424	9,05E+17	1,80E+18	3,33E+18	5,79E+18	9,54E+18	1,50E+19

$T [K] \rightarrow$ $k_{ks} \cdot 1E9 \downarrow$	2.455	2.564	2.673	2.782	2.891	3.000
0	9,19E+15	1,35E+16	1,91E+16	2,64E+16	3,57E+16	4,72E+16
111	3,62E+18	5,30E+18	7,53E+18	1,04E+19	1,41E+19	1,86E+19
228	6,84E+18	1,00E+19	1,42E+19	1,97E+19	2,65E+19	3,51E+19
353	9,69E+18	1,42E+19	2,02E+19	2,79E+19	3,76E+19	4,97E+19
488	1,22E+19	1,79E+19	2,54E+19	3,51E+19	4,74E+19	6,26E+19
635	1,45E+19	2,12E+19	3,00E+19	4,15E+19	5,60E+19	7,40E+19
799	1,64E+19	2,40E+19	3,41E+19	4,71E+19	6,36E+19	8,40E+19
986	1,81E+19	2,65E+19	3,76E+19	5,20E+19	7,02E+19	9,27E+19
1205	1,96E+19	2,87E+19	4,07E+19	5,62E+19	7,58E+19	1,00E+20
1476	2,09E+19	3,05E+19	4,33E+19	5,98E+19	8,07E+19	1,07E+20
1839	2,19E+19	3,21E+19	4,55E+19	6,28E+19	8,47E+19	1,12E+20
2424	2,28E+19	3,33E+19	4,72E+19	6,52E+19	8,79E+19	1,16E+20

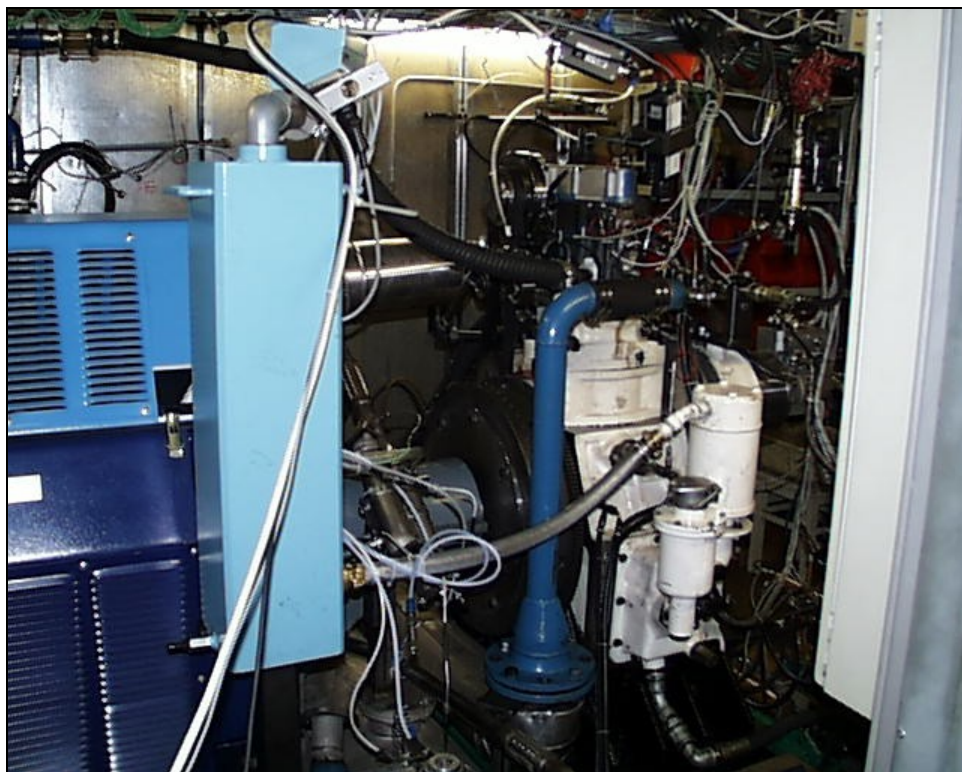
Tabelle A-4a und 4b: Absolute Rotwerte des Modells für das verwendete Meßsystem

Anhang B: Motorenprüfstand

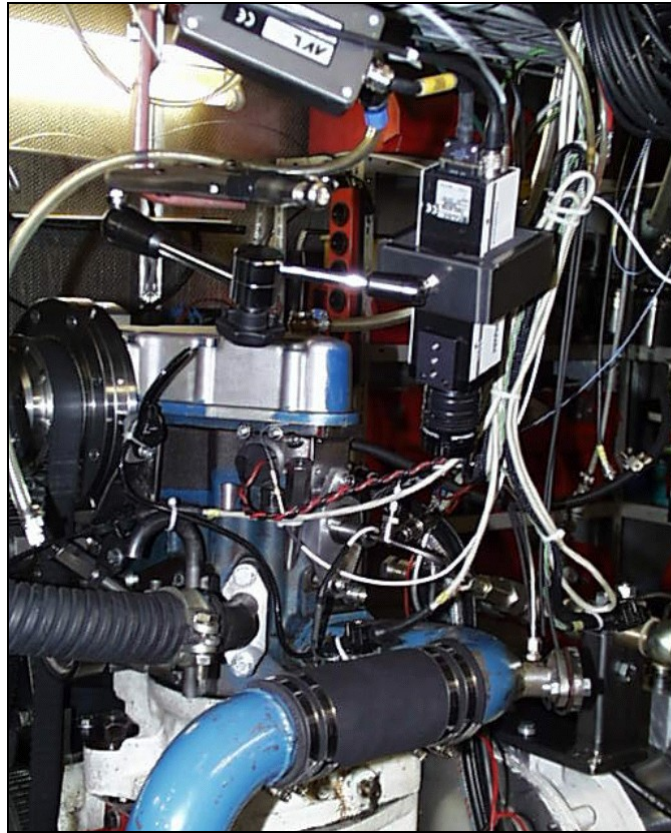
Farbtafel B1: Indiziergerät und Steuerpult	Seite B-2
Farbtafel B2: Leistungsbremse und Prüfstandsmotor	Seite B-2
Farbtafel B3: Arretierung der Kamera	Seite B-3
Farbtafel B4: ausgebauter Zylinderkopf	Seite B-3



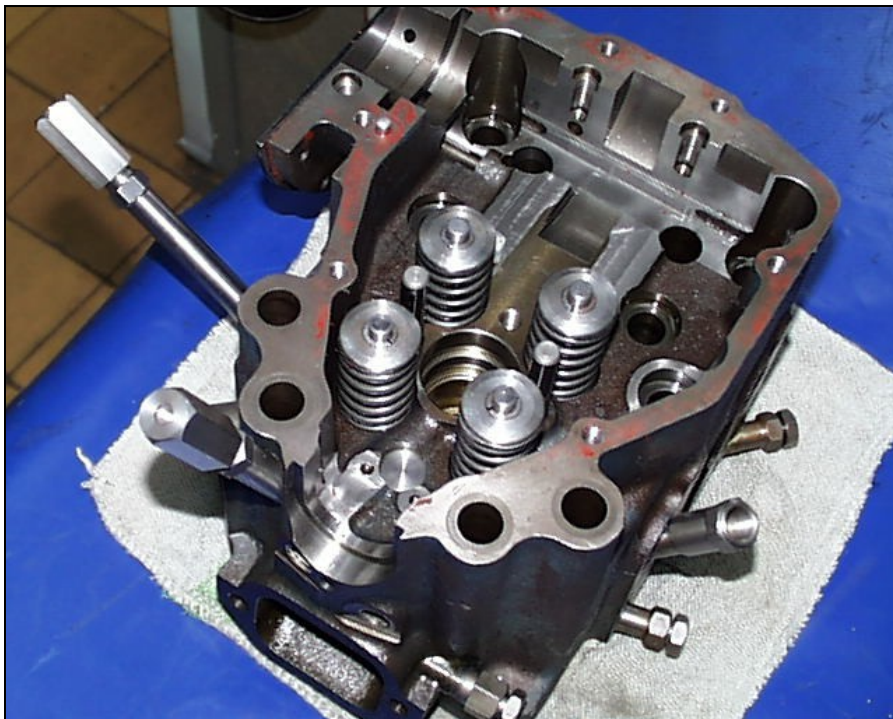
Farbtafel B1: Indiziergerät und Steuerpult am Motorprüfstand



Farbtafel B2: Leistungsbremse (l) und Prüfstandsmotor (r)



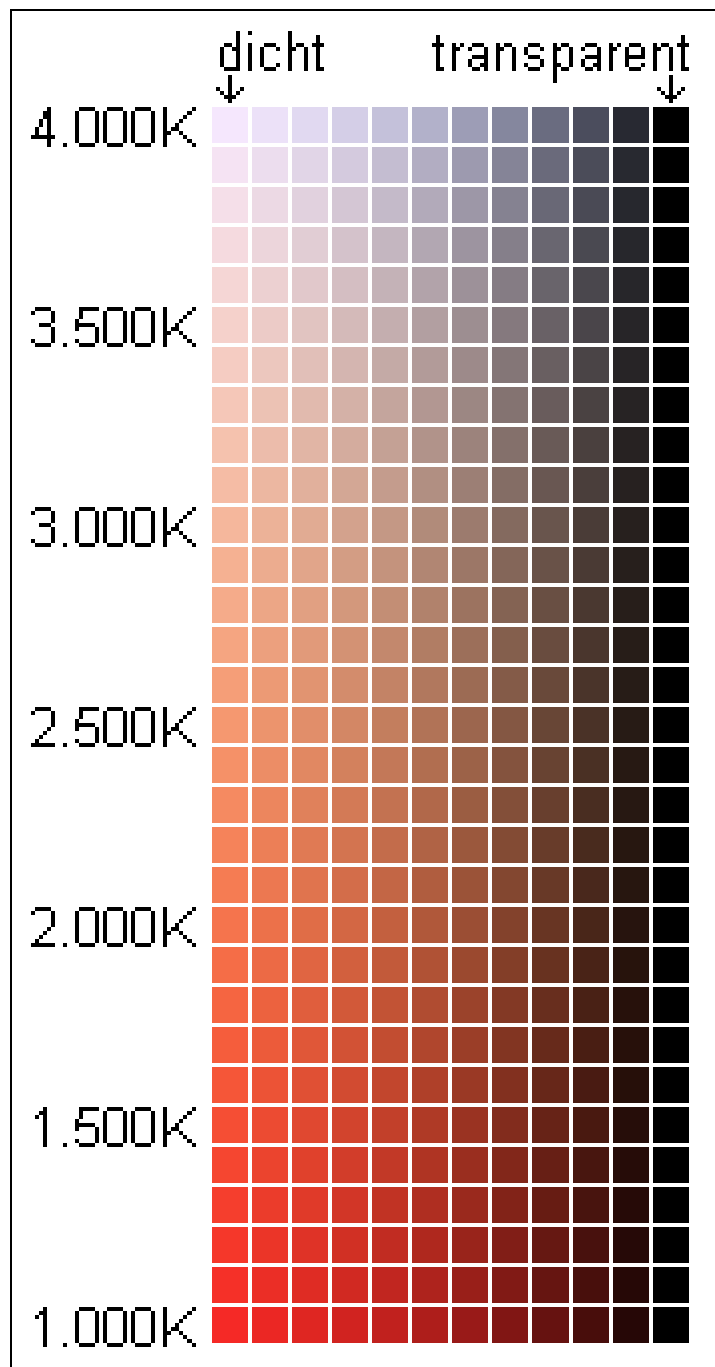
Farbtafel B3: mechanische Fixierung der Kamera zur Entlastung des Endoskops. Am Zylinderkopf im Hintergrund sind die beiden optischen Zugänge zu erkennen.



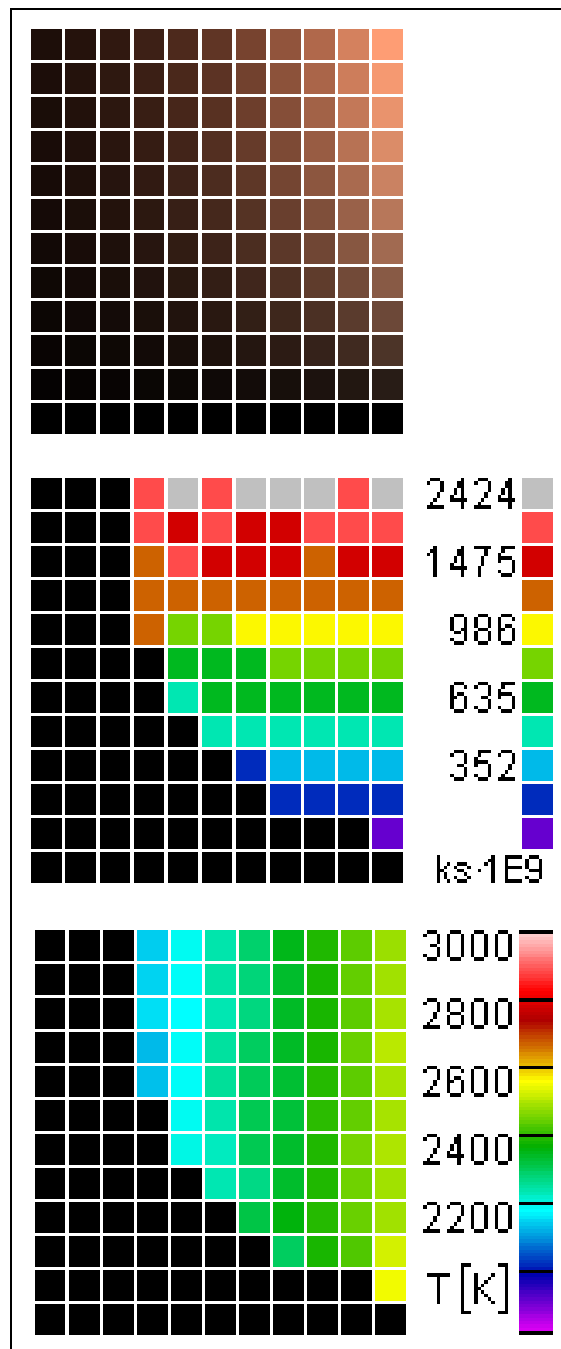
Farbtafel B4: ausgebauter Zylinderkopf mit optischen Zugängen (links), vgl. auch Bild 10.2

Anhang C: Synthetisierte Bilder

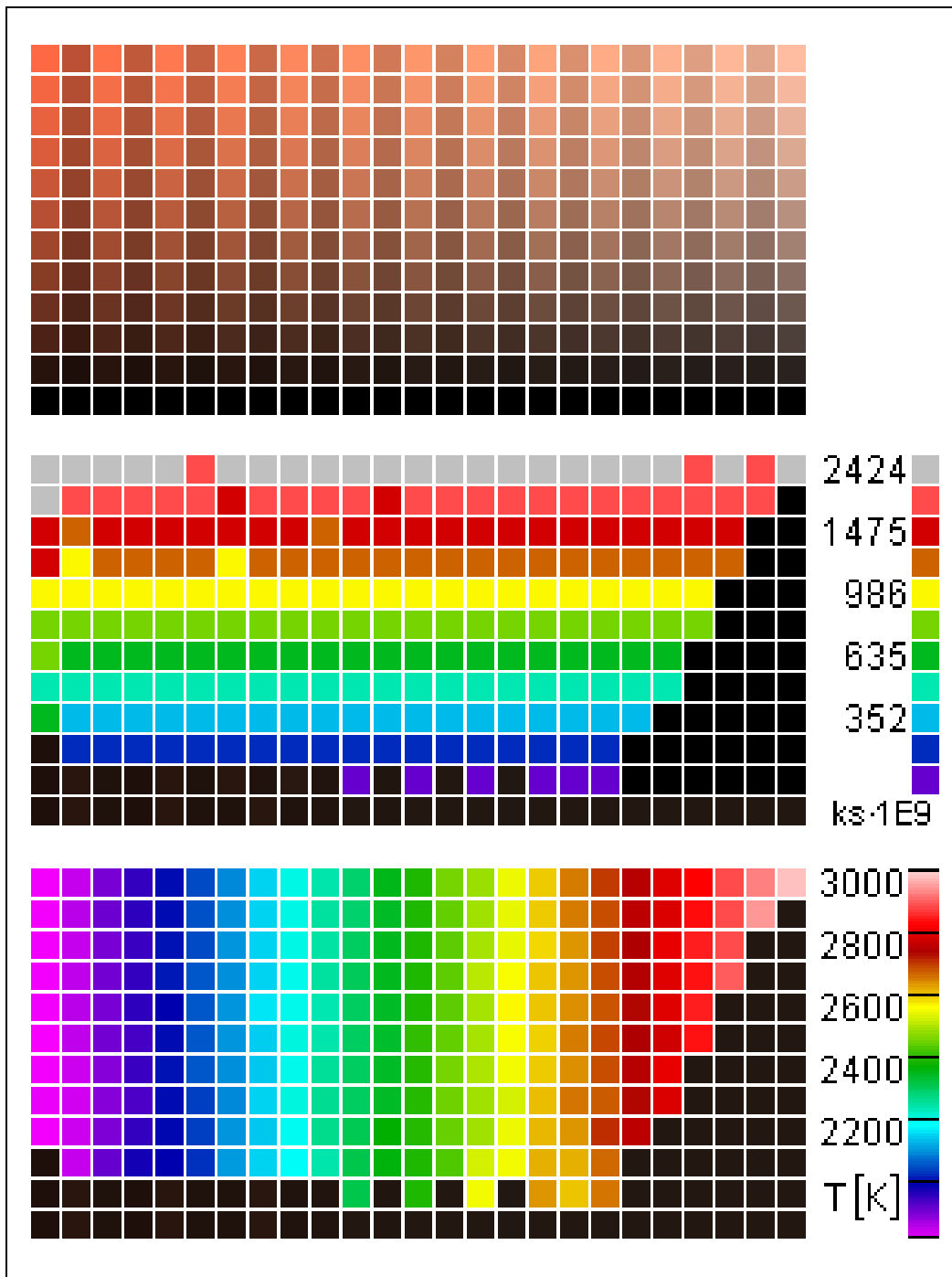
Farbtafel C1: Farbverschiebung zwischen 1.000K und 4.000K	Seite C-2
Farbtafel C2: Basisbild nach dem Modell der homogenen Flamme	Seite C-3
Farbtafel C3: homogene Flamme über den Meßbereich	Seite C-4
Farbtafel C4: Annahme eines Schwarzen Hintergrundstrahlers	Seite C-5
Farbtafel C5: Zerlegung von C4 in zwei Meßintervalle	Seite C-6
Farbtafel C6: Auswirkung von Temperaturunterschieden	Seite C-7
Farbtafel C7: Rußkonzentration zwischen Flamme und Fenster	Seite C-8
Farbtafel C8: ausführliche Darstellung von C7	Seite C-9



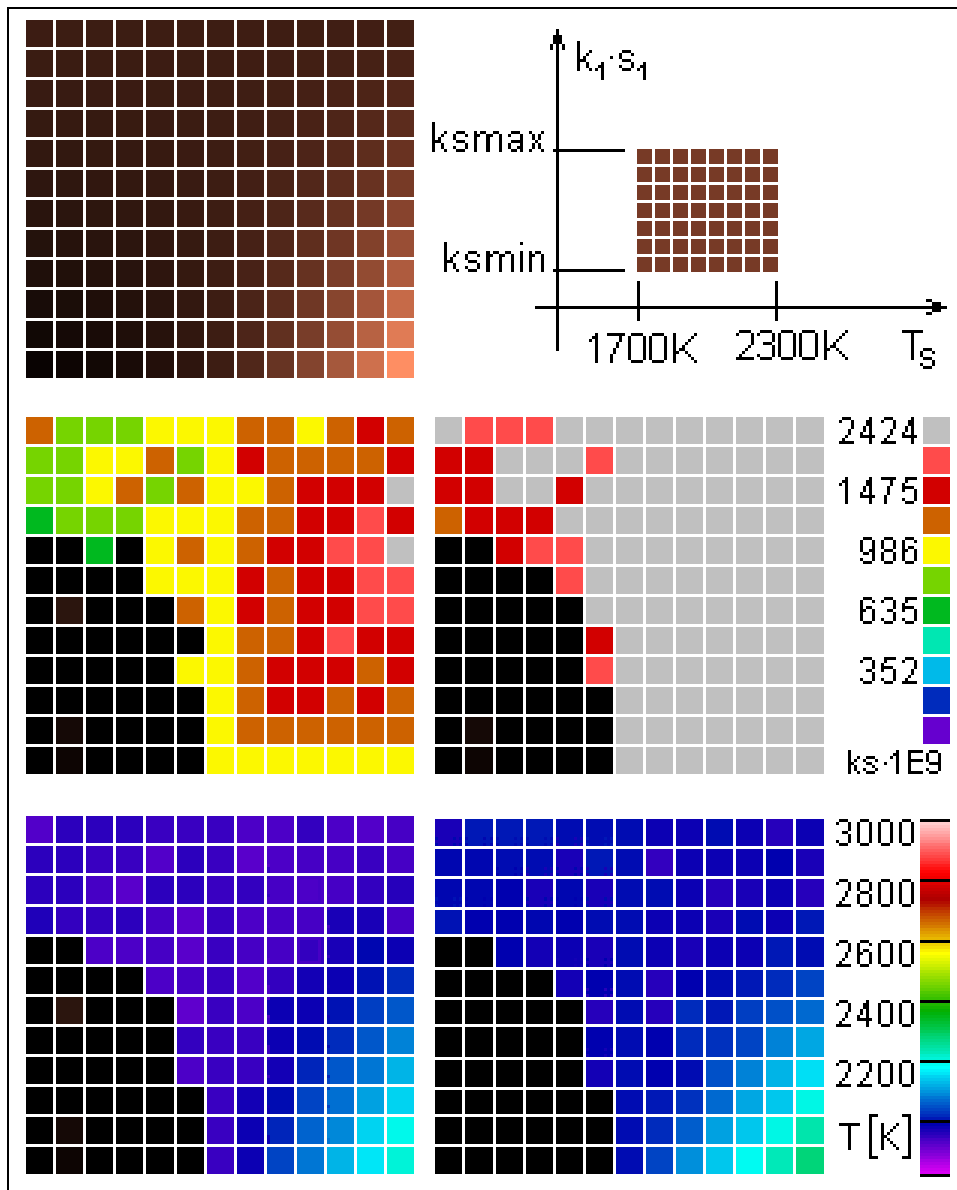
Farbtafel C1: Farbverschiebung im Temperaturbereich 1.000K bis 4.000K unter Berücksichtigung von Kameraeigenschaften und Filter. Die absolute Intensität wurde bei gegebener Temperatur jeweils auf den hellsten Rotwert normiert.



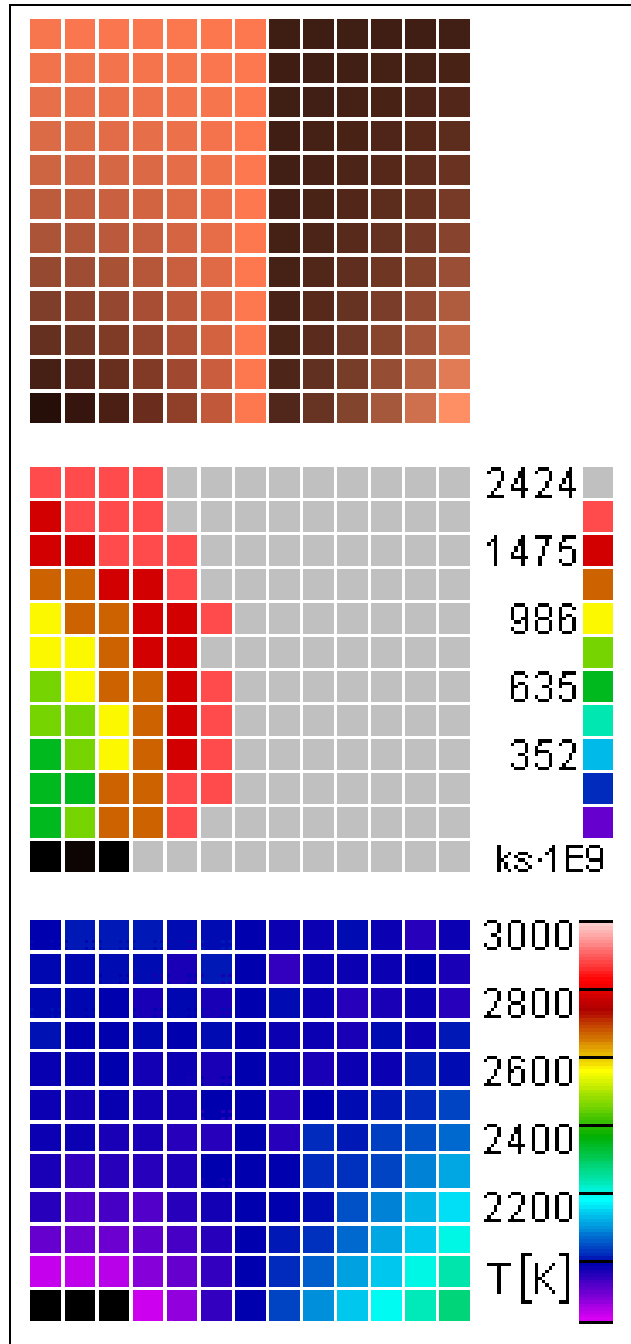
Farbtafel C2: Synthetisiertes Basisbild (oben), abgeleitete Schichtdicke (Mitte) und Temperaturbild (unten) nach dem Modell der homogenen Flamme im Temperaturbereich zwischen 2.000K und 2.500K (horizontal) unter Annahme der Schichtdicken des Modells (vertikal). Im unteren Temperaturbereich ist aufgrund zu niedriger Bildhelligkeit keine Berechnung möglich.



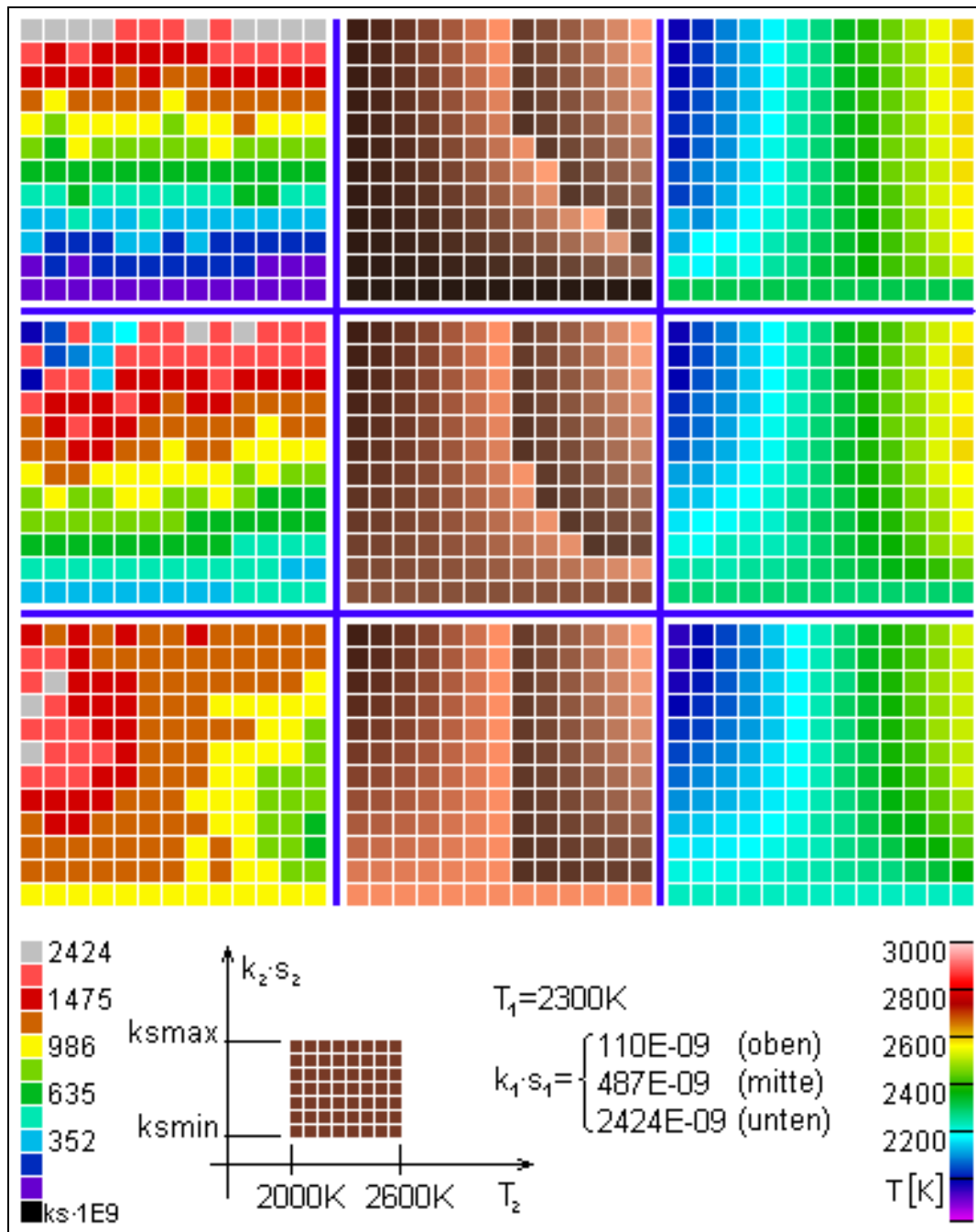
Farbtafel C3: Unter der Annahme einer homogenen Flamme wird ein Basisbild synthetisiert (oben). Dabei werden Temperaturwerte in horizontaler Richtung im Meßbereich in 50K Schritten angeordnet, während in vertikaler Richtung die angesetzte Schichtdicke entsprechend den berechneten ks -Werten im Übergangsbereich aufgelöst wird. Die Korrektur der Bildhelligkeit wurde in 100K Schritten definiert und die entsprechende Kalibrierung für dieses Intervall durchgeführt. Daraus ergibt sich die im Basisbild erkennbare Schwankung im Intensitätsverlauf.



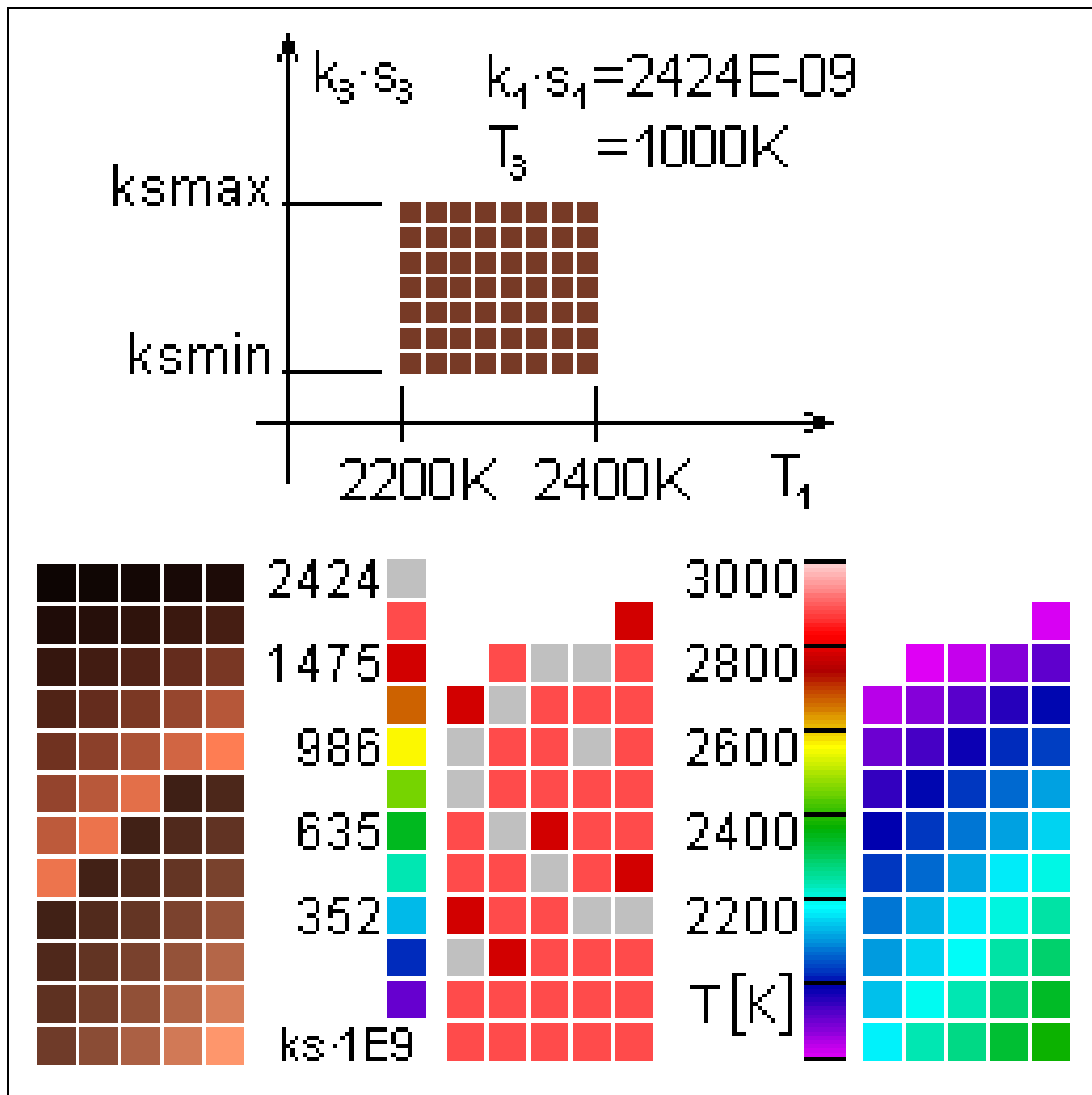
Farbtafel C4: Feste Flammentemperatur (2.000K) und variable Temperatur eines Schwarzen Hintergrundstrahlers (horizontal, Variationsbereich 1.700K bis 2.300K). Die angesetzte Schichtdicke entspricht der vertikalen Anordnung. Die linken Ergebnisbilder wurden auf Basis des detektierten Korrekturfaktors errechnet. Aus dem linken Schichtdickebild erkennt man in Bildmitte (vertikale gelbe Linie) den Inversionspunkt, bei dem Flammentemperatur und Schwarzer Strahler dieselbe Temperatur aufweisen. Da hier Schwarze Strahlungseigenschaften vorliegen müssen, kann der optische Korrekturfaktor gefunden werden, der den rechten Ergebnisbildern zugeordnet wurde. Die Ergebnistemperaturen im rechten Temperaturen liegen etwa 50K höher als im linken, wobei aufgrund der manuellen Zuordnung des optischen Korrekturfaktors die Temperatur im Inversionspunkt mit der angesetzten Temperatur gut übereinstimmt.



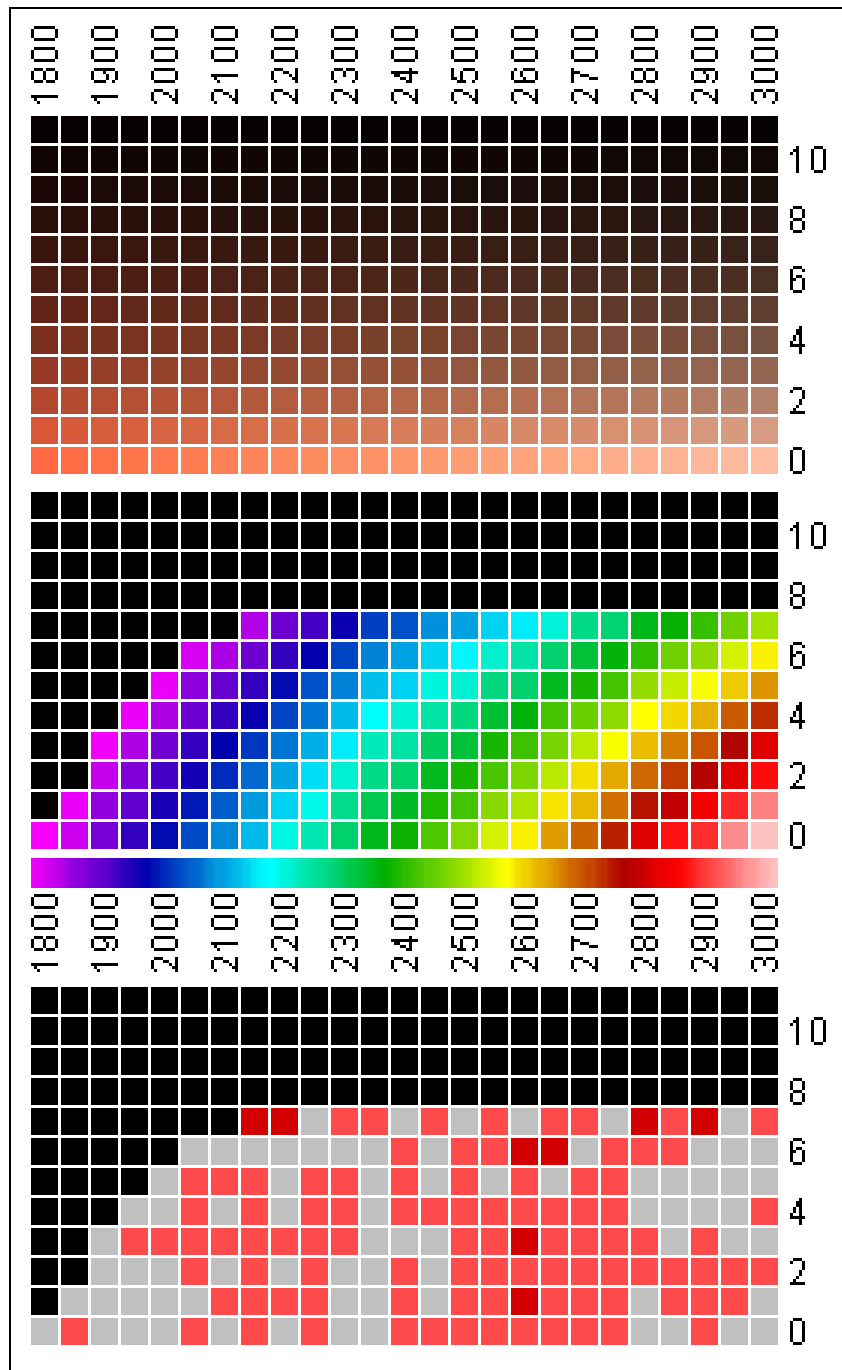
Farbtafel C5: Verbesserte Gesamtempfindlichkeit gegenüber Farbtafel C4 durch Zerlegung in zwei Intervalle mit unterschiedlichen Korrekturfaktoren. Naturgemäß wird mit steigender Transmissivität die berechnete Ergebnistemperatur zunehmend vom Hintergrundstrahler definiert. Im Übergangsbereich liegen z.T. umgekehrte Monotonieverhältnisse vor. Dieses Phänomen ist nur dadurch erklärbar, daß Quantisierungsfehler vorliegen. Die festgestellten Schichtdicken unterscheiden sich in den ausgewerteten Punkten von Farbtafel 4 (rechts) und 5 nur geringfügig, die entsprechenden Ergebnistemperaturen sind nahezu ident.



Farbtafel C6: In zwei Teilschritten wurde am Zweischichtmodell die Auswirkung einer optisch dünnen, mittleren und optisch dichten Temperaturschicht 1 im Hintergrund der Zone 2 angenommen. Die Basisbilder wurden so zusammengeführt, daß nur im Sättigungsbereich des helleren Basisbildes die Elemente der zweiten Synthese eingetragen wurden. Unter den getroffenen Annahmen wurde im transparenten Fall weder die Kalibrierung noch die erkannte Schichtdicke mit maßgeblichen Fehlern beaufschlagt. Für die optisch dichte Zone 1 (unten) erkennt das Kalibrierverfahren dunklere Bereiche als optisch dicht. Trotz dieser Zuordnungsfehler bleiben die Temperaturverläufe gut erhalten, die Ergebnistemperaturen werden im Inversionspunkt (mittlere Spalte in den Bildern) werden hier allerdings um etwa 50K nach unten verschoben



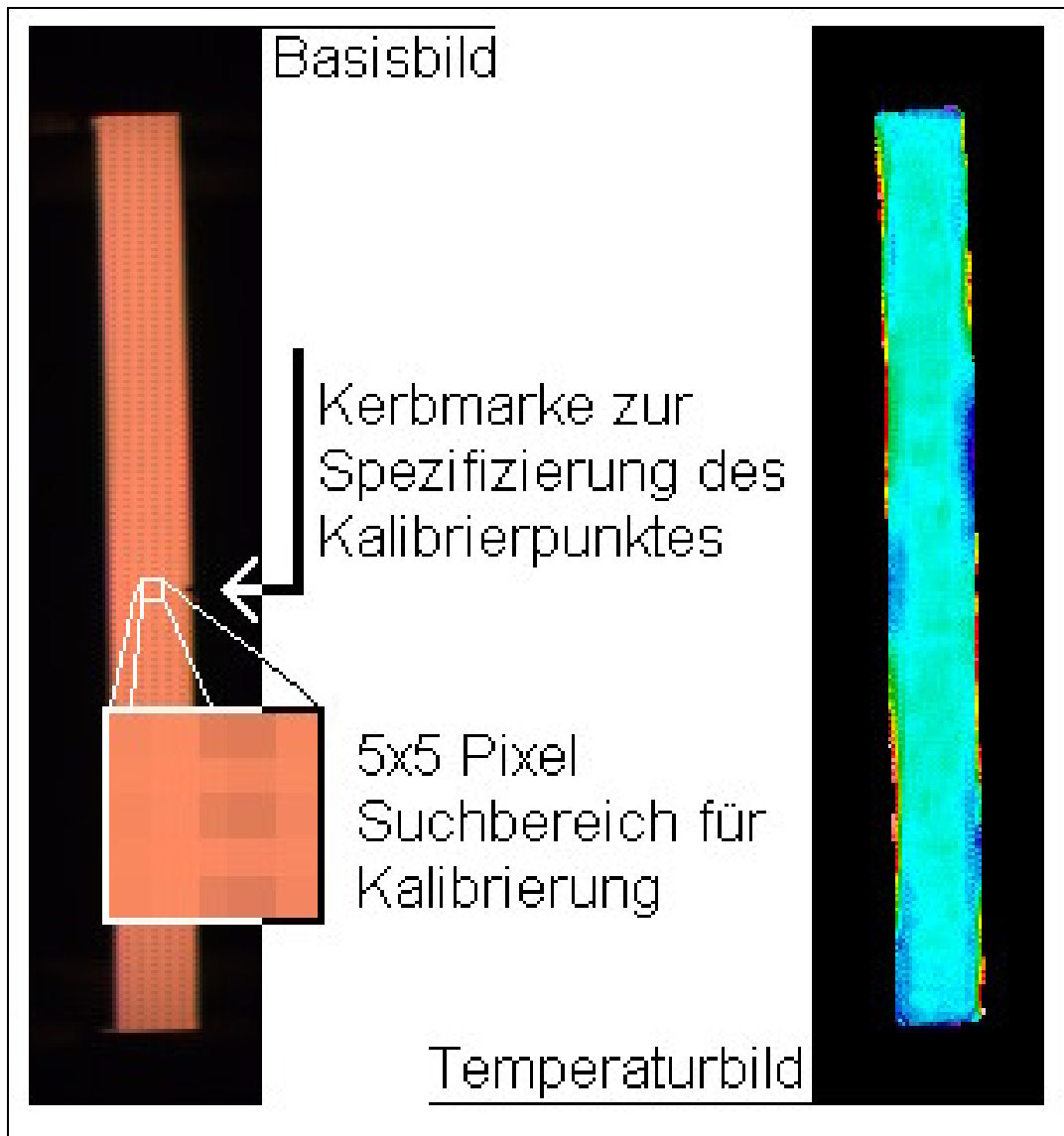
Farbtafel C7: Zwischen einer optisch dicht angenommenen Flamme und dem Brennraumfenster wird eine endliche Rußkonzentration angesetzt. Liegen Absorptionseigenschaften vor, die in der Größenordnung der im Flammeninneren vorherrschenden Speziesdichte entsprechen, so treten schwerwiegende Meßfehler auf. Die optische Dicke bleibt nur deshalb über den gesamten Bereich gleich, weil sich die relativen Farbwerte durch die gleichen Absorptionseigenschaften von Flamme und nicht entzündetem Gas zunehmend verschieben. Eine gleichwertige Interpretation obiger Bilder liegt in der Annahme einer Rußablagerung am Brennraumfenster.



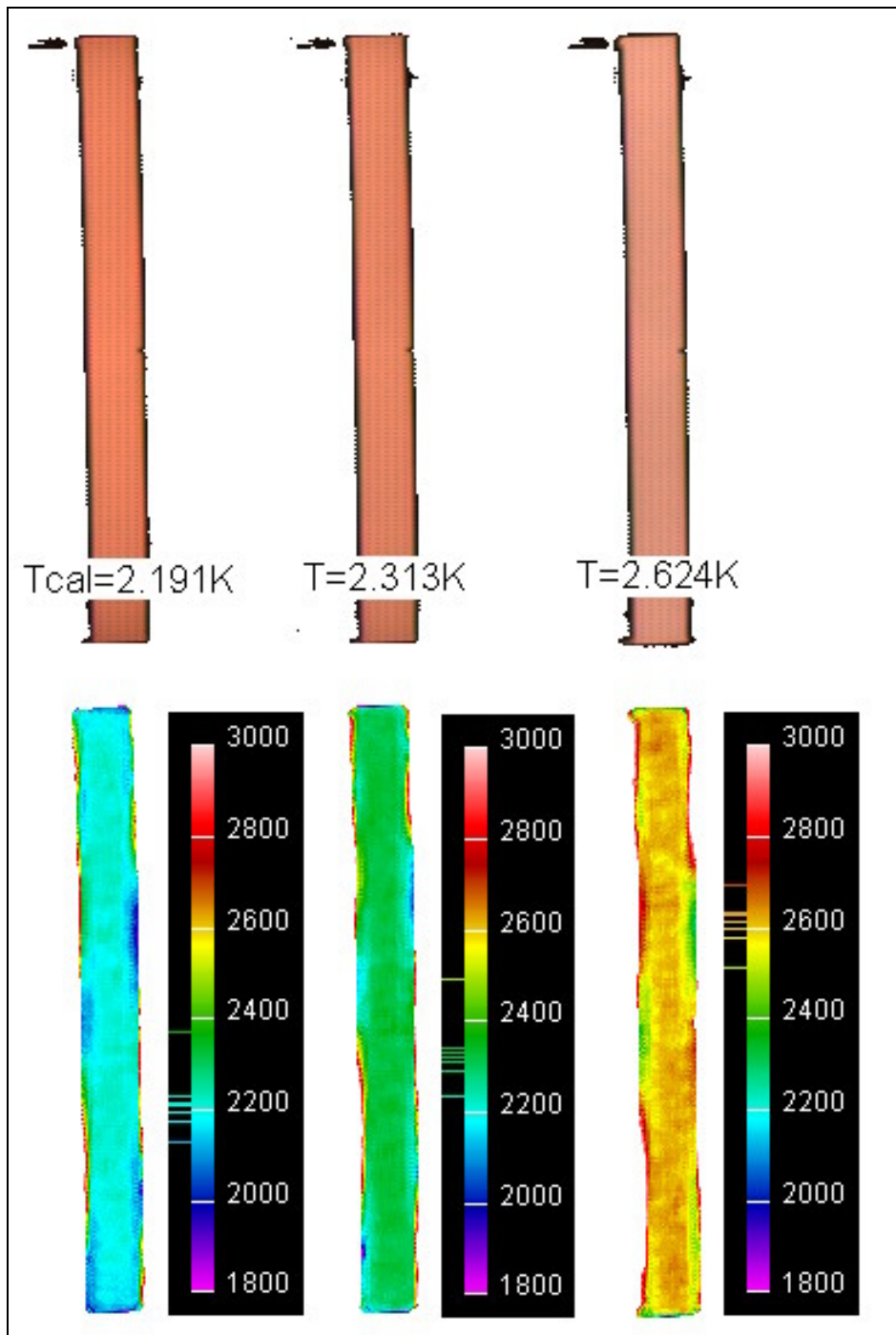
Farbtafel C8: Ausführliche Darstellung des Temperaturfehlers zufolge einer Rußkonzentration im optischen Zugang für die optisch dichte Flamme.

Anhang D: Erfasstes und ausgewertetes Bildmaterial

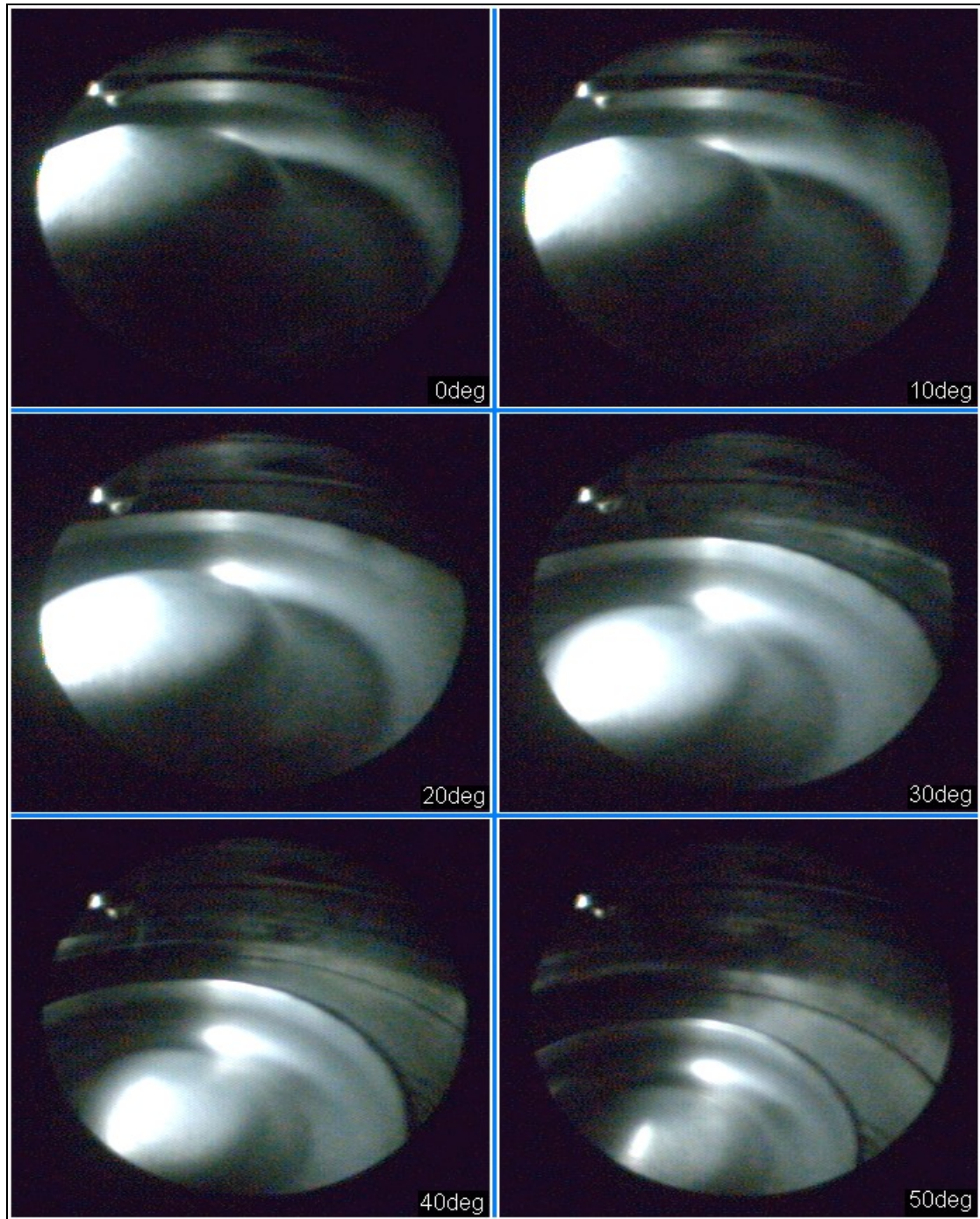
Farbtafel D1: Kalibrierung der Meßkette am Wolframband	Seite D-2
Farbtafel D2: Temperaturmessung am Kalibrierstrahler	Seite D-3
Farbtafel D3: Aufnahmen vom gesäuberten Brennraum	Seite D-4
Farbtafel D4: Basis- und Ergebnisbilder einer Verbrennung	Seite D-5
Farbtafel D5: längere Belichtungsdauer gegenüber D4	Seite D-9
Farbtafel D6: Beobachtung der Verbrennung bei Brennende	Seite D-11
Farbtafel D7: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Flammenausbreitung	Seite D-12
Farbtafel D8: Mittelung von Aufnahmewiederholungen	Seite D-13
Farbtafel D9: von D8 abgeleitete Schichtdickebilder	Seite D-14
Farbtafel D10: von D8 abgeleitete Temperaturbilder	Seite D-15
Farbtafel D11: Spreizung der Farbzuordnungstabelle von D10	Seite D-16
Farbtafel D12: Ermittlung der hellsten Zonen über alle Repetitionen	Seite D-17
Farbtafel D13: lineare Mittelung von Temperaturbildern	Seite D-18
Farbtafel D14: Rußablagerung am Quarzfenster	Seite D-19
Farbtafel D15: Vergleich gemessenes und berechnetes Kalibrierbild	Seite D-20
Farbtafel D16: Gegenüberstellung Originalbild und restauriertes Bild	Seite D-21
Farbtafel D17: Temperaturbilder zu D16	Seite D-22
Farbtafel D18: Schichtdickebilder zu D16	Seite D-23
Farbtafel D19: unterschiedliche Blickrichtung und Bildrestauration	Seite D-24
Farbtafel D20: Unschärfen im Modell der Flamme	Seite D-28
Farbtafel D21: Bildüberlagerung	Seite D-29



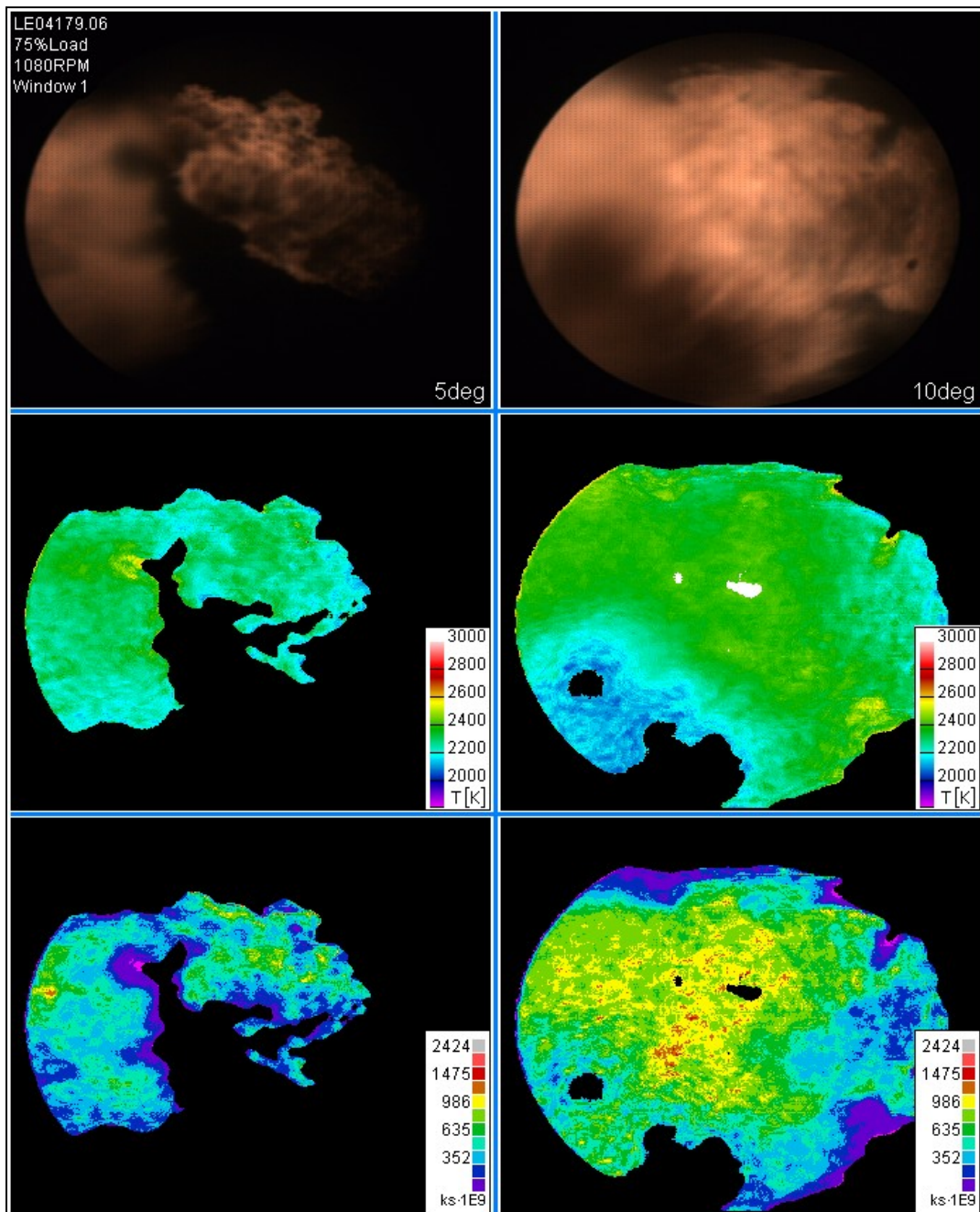
Farbtafel D1: Wolframband zur Kalibrierung von Kamera und Optik. Der Algorithmus sucht in einem 5x5 Fenster ein repräsentatives Farbtupel. Zur Verbesserung der Genauigkeit wurde das Suchverfahren auf 20 Basisbilder erweitert. Die Kamerakalibrierung entspricht grundsätzlich einem Weißabgleich der Kamera. Nachdem bei einer Temperatur, im vorliegenden Fall $T_{\text{wolfram}}=2.191\text{K}$ die Farbwerte zur Anpassung der relativen Farbwerte gefunden wurden, wird an zwei weiteren nach Prüfprotokoll der Lampe spezifizierten Temperaturen geprüft, ob die spektralen Empfindlichkeiten der Meßkette hinreichend genau durch das Modell beschrieben werden.



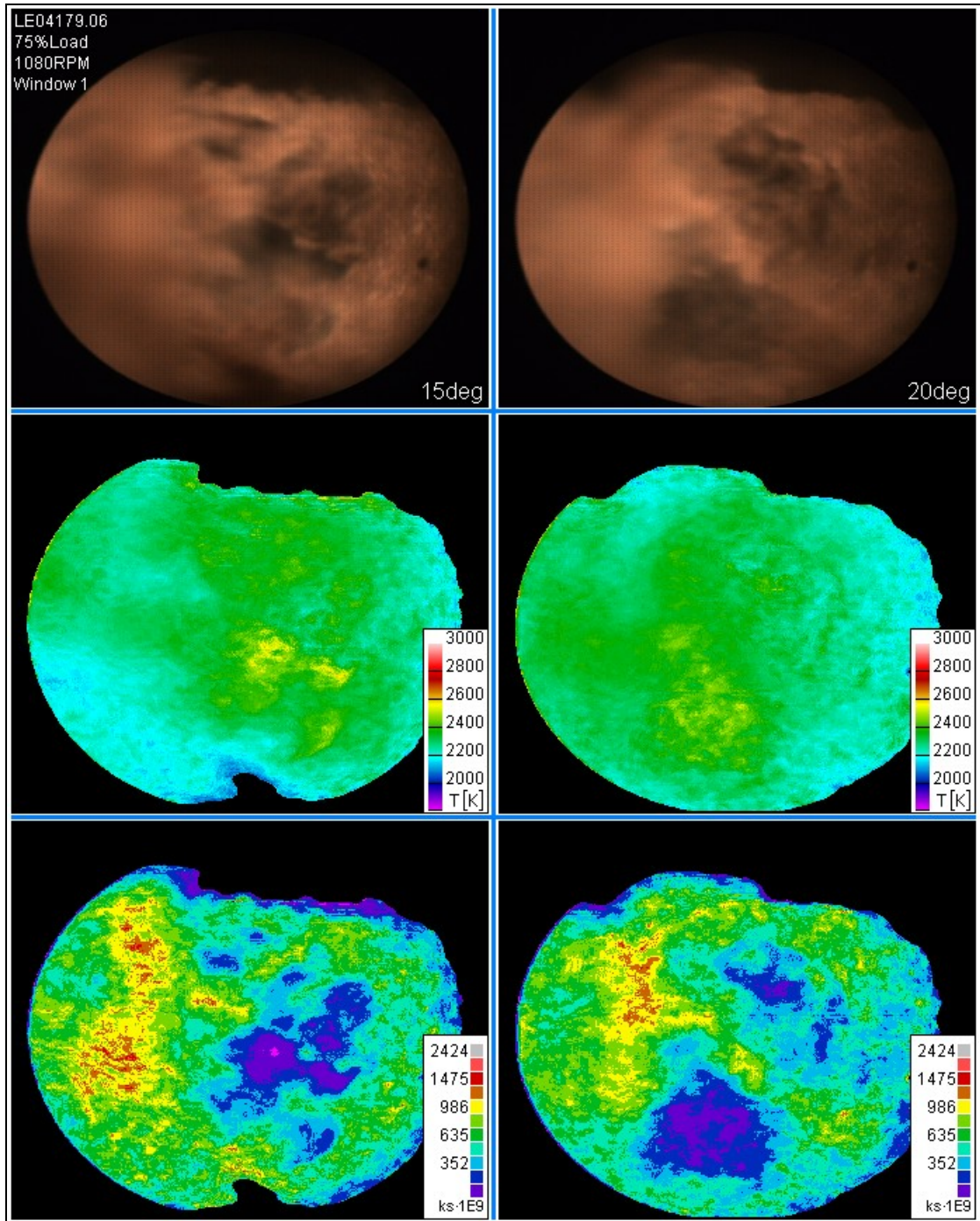
Farbtafel D2: Temperaturmessung an der vermessenen Wolframbandlampe. Die der Auswertung zugeführten Teile der aufgenommenen Bilder sind oben dargestellt. Der Farbsensor liefert am scharf gezeichneten Rand des Wolframbandes nicht zueinandergehörende Farbtripel, wodurch mit der leichten Neigung des Referenzstrahlers zur vertikalen Richtung des Sensors abwechselnd zu niedrige, korrekte und zu hohe Ergebnistemperaturen gemessen werden. Die neben der Temperaturskala jeweils dargestellten Temperaturlinien stellen die quantifizierten Ergebnistemperaturen T_1 bis T_7 dar.



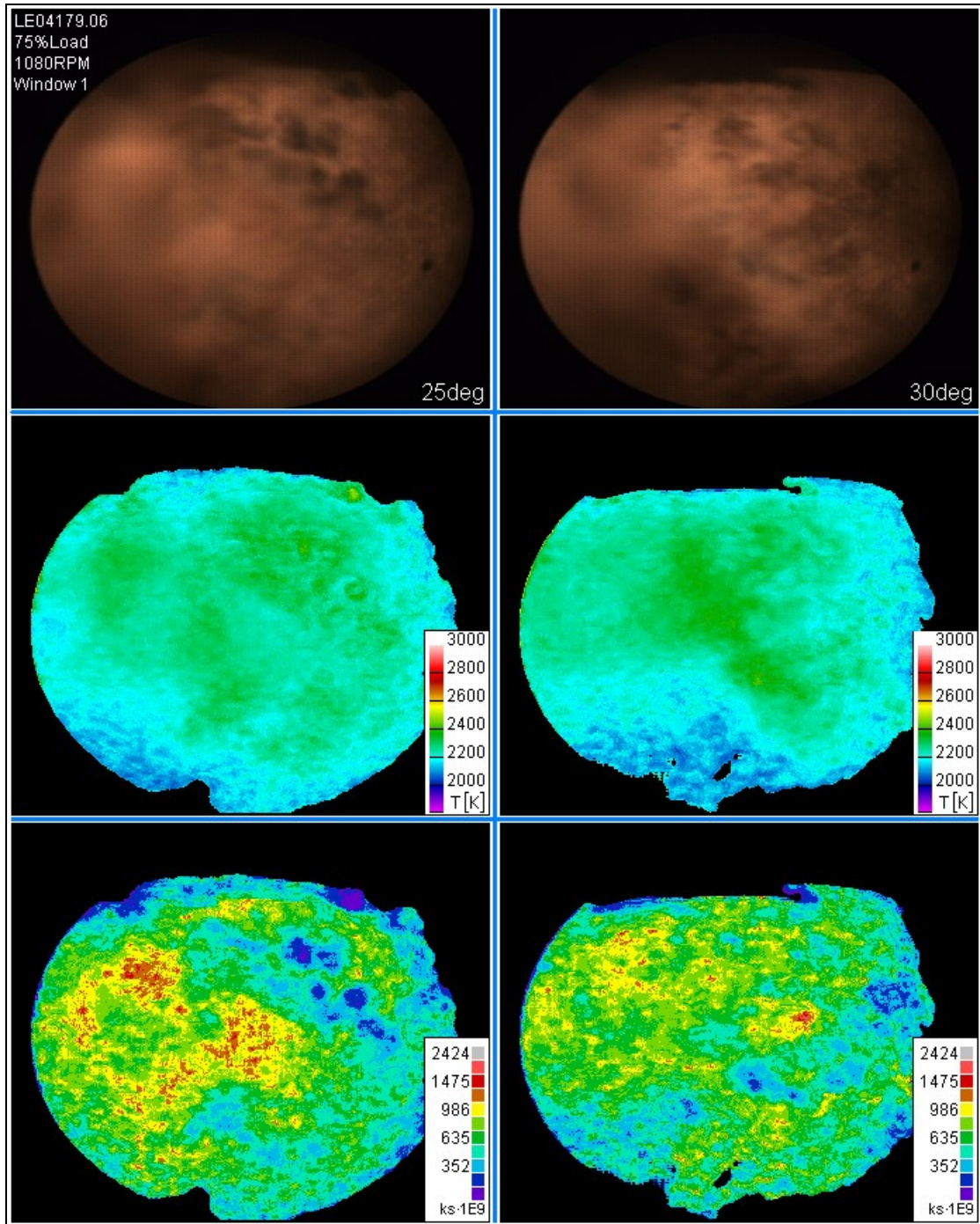
Farbtafel D3: ausgeleuchteter, gesäuberter Verbrennungsraum aus der Perspektive von *Fenster 1* unter Verwendung von 25mm Objektiv und $\varnothing 5\text{mm}/30^\circ$ Endoskop; Fenster und Optik wurden auch für die folgenden Meßreihen verwendet. Am linken oberen Bildrand erkennt man die Einspritzdüse (8-Loch). Die höchsten Temperaturen werden später im Kolbenbereich gemessen.



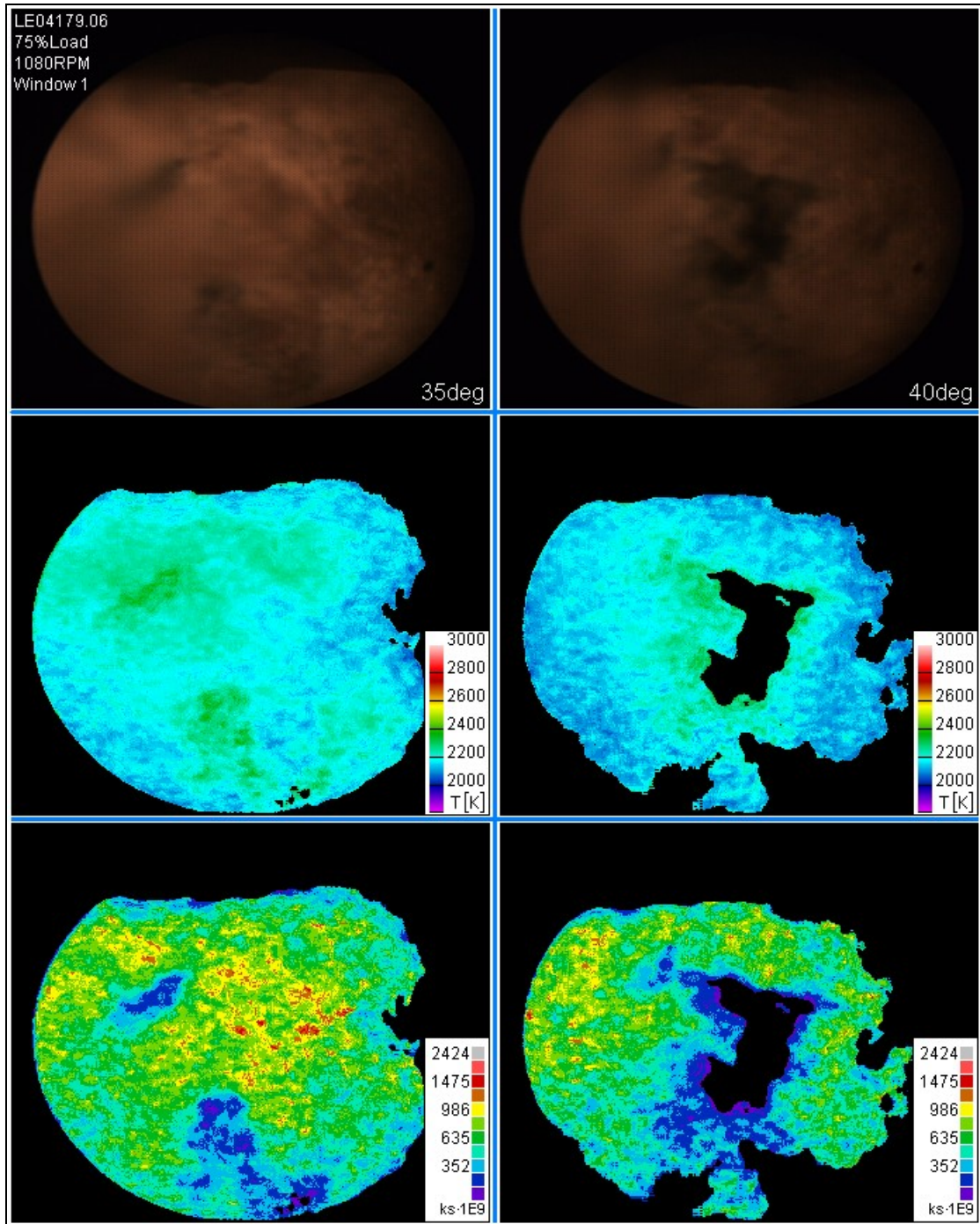
Farbtafel D4a: Basisbilder, Temperaturbild und Schichtdickenbild einer Aufnahme­sequenz bei 1080RPM und 75% Last. Die Einspritzung erfolgt über eine 8-Loch Düse nach dem Common Rail Verfahren. Man erkennt im Aufnahmebild bei 5deg eine Flamme, die sich entlang eines weiter entfernten Einspritzstrahles ausbreitet, während der zweite Strahl zu einem Flammenast in unmittelbarer Nähe zum Brennraumfenster führt. Da die beiden Flammenbereiche etwa übereinstimmende Temperaturen im Ergebnisbild aufweisen, kann davon ausgegangen werden, daß bei dieser Messung eine vernachlässigbare Rußkonzentration zwischen Flamme und Fenster vorliegt. Im Vergleich dazu erkennt man im rechten Basis- und Temperaturbild einen größeren Bereich niedriger Intensität. Die Ursache für diese niedrige Temperatur könne eine kalte Rußschicht zwischen Flamme und Fenster sein. Ein kleiner Bereich des Aufnahmebildes 10deg (im Temperaturbild weiß) ist übersteuert.



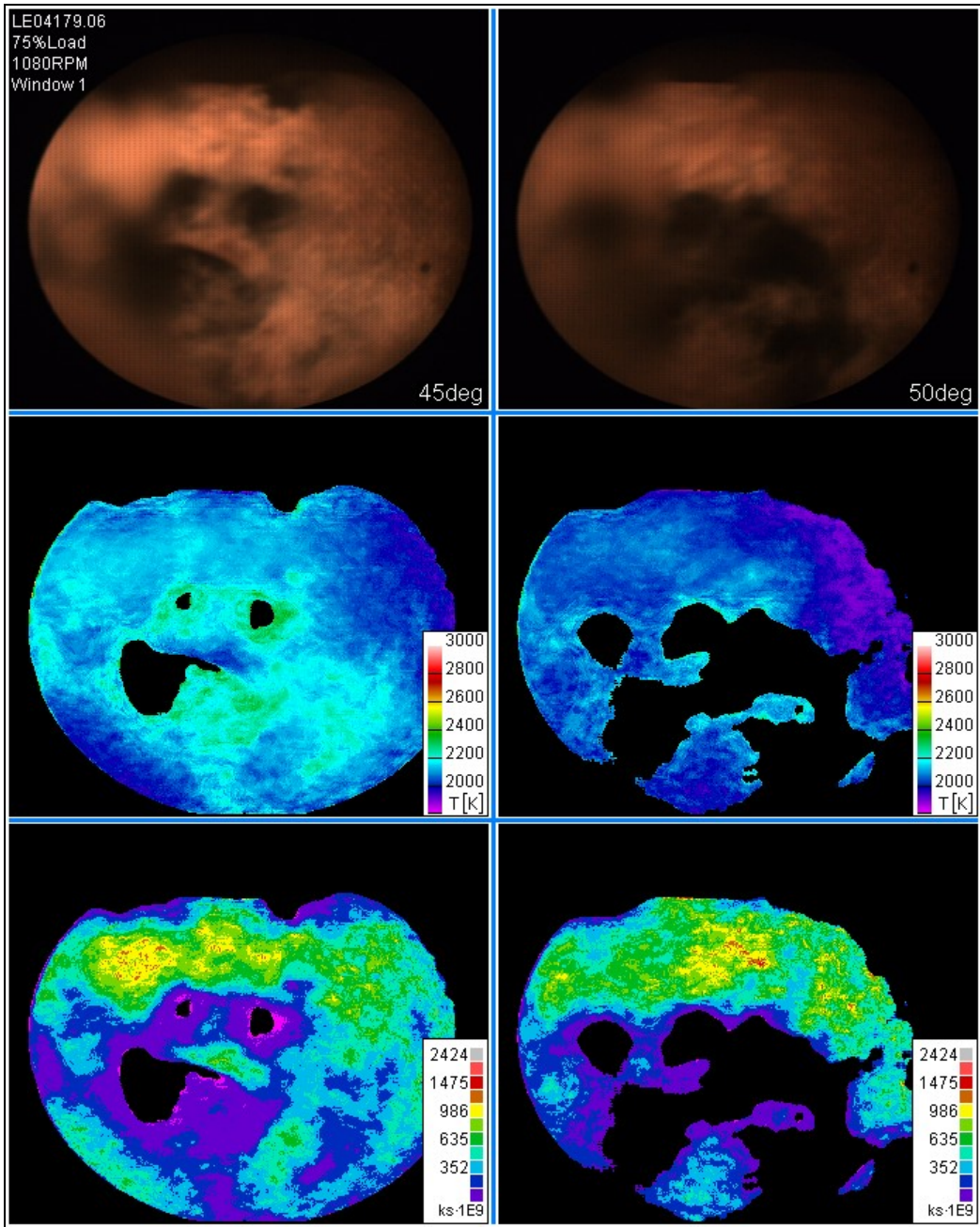
Farbtafel D4b: Fortsetzung von D3a. Während bei 15deg noch eine Zone niedriger Temperatur im linken unteren Bildbereich festgestellt wurde, liegt im rechten Bild eine homogenere Temperaturverteilung vor. Man erkennt durch Vergleich von Basis- und Temperaturbild weiters, daß Zonen hoher Temperaturen nicht zwangsläufig dort detektiert werden, wo die Flamme am hellsten erscheint. Ganz im Gegenteil werden im vorliegenden Fall hohe Temperaturwerte in transparenten Flammenbereichen erkannt. Eine genauere Betrachtung läßt erkennen, daß im Gegensatz zur dicken Flamme die festgestellten hohen Temperaturen von Flammenzonen in unmittelbarer Kolbennähe herrühren.



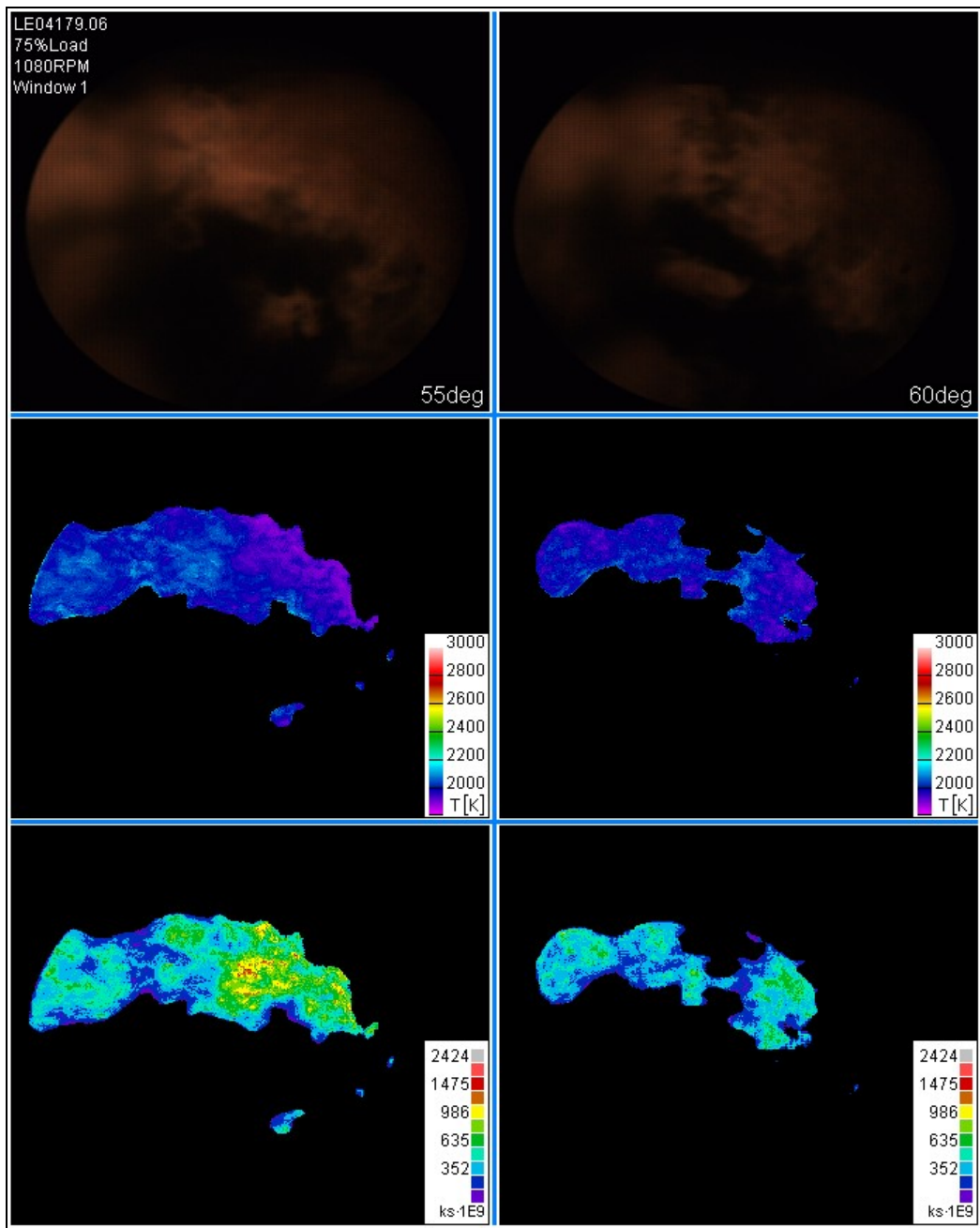
Farbtafel D4c: Die fensternahe Flammenkeule weist gegenüber der weiter entfernten keine signifikanten Temperaturunterschiede auf. Das Ende des Einspritzvorganges ist erst mit 31deg erreicht, die scheinbar kühle Zone könnte damit auch hier (wie bei 10deg) von einer kalten, die Flamme abdeckenden Rußschicht herrühren. Ein Vergleich mit Farbtafel 8 zeigt bei Intensitätsvergleichen im Basisbild mit Zonen höherer Temperatur tatsächlich, daß die Temperaturen hinter der vermuteten Rußschicht mit den unbeeinträchtigten Zonen übereinsimmen könnten.



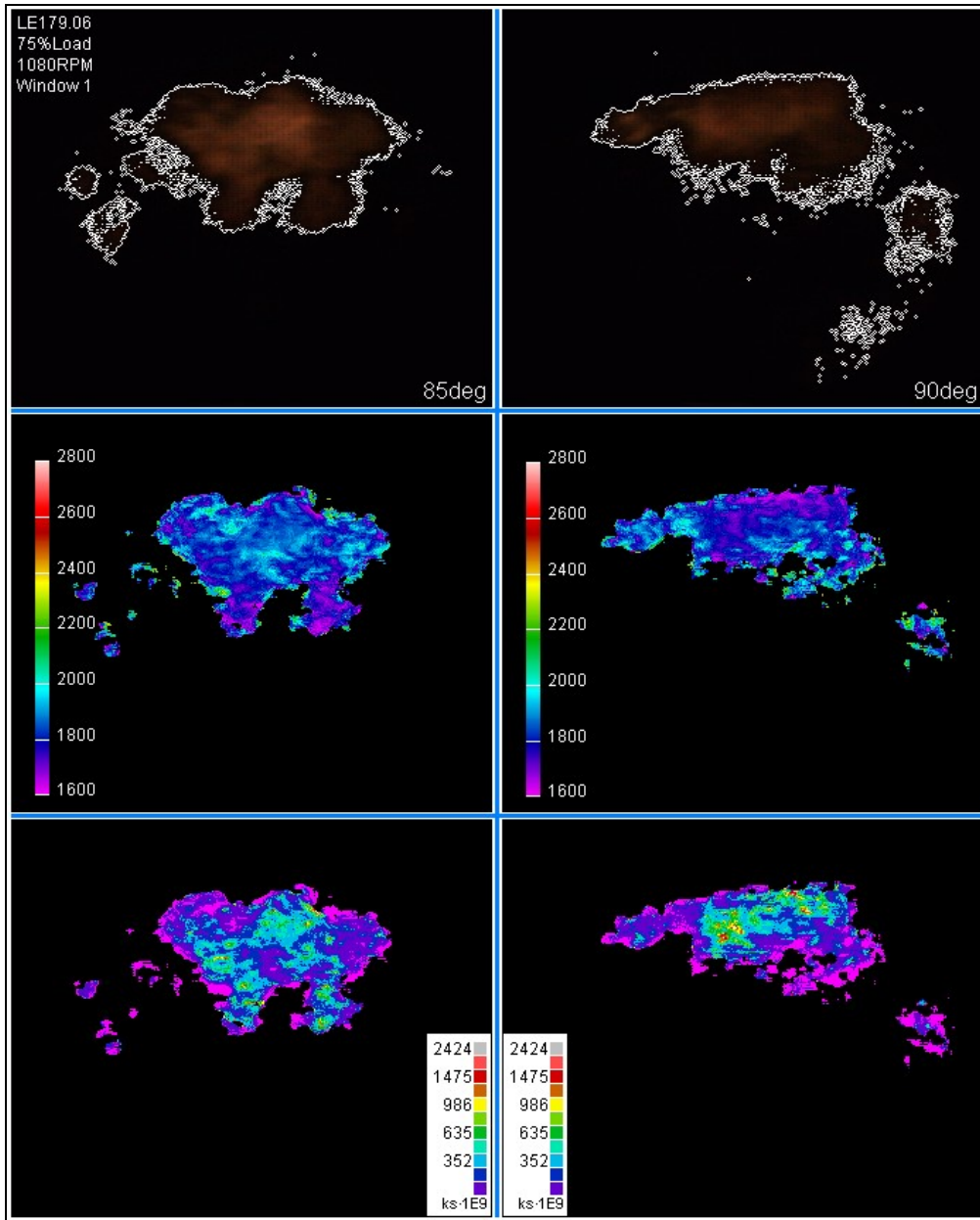
Farbtafel D4d: der Einspritzvorgang ist bereits abgeschlossen, dicke Zonen hoher Temperatur gehen sukzessive zurück. Lediglich in dünnen Schichten werden hohe Ergebnistemperaturen festgestellt, die aber vermutlich aus dem Bereich der Brennraumoberfläche herrühren und gesamtenergetisch gesehen eine untergeordnete Rolle spielen. Aufgrund zu geringer Dicke reißt die Temperaturmessung bei 40deg bei hoher Temperatur ab, eine weiterreichende Messung erfordert etwa ab diesem Bereich eine neuerliche Korrektur der Kameraeinstellung (Belichtungsdauer und/oder Verstärkung).



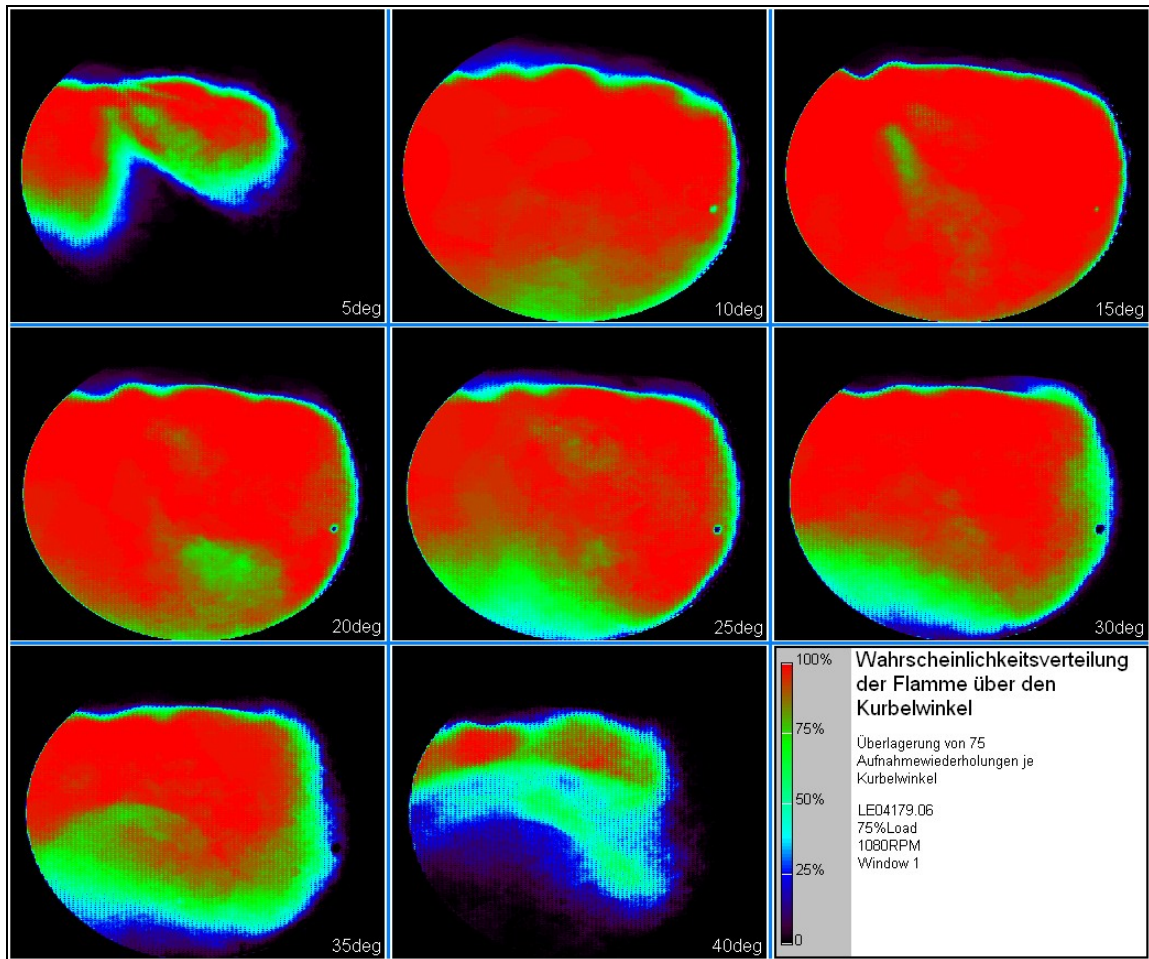
Farbtafel D5a: gegenüber den Farbtafeln D3a-d wurden die Basisbilder mit vierfacher Belichtungsdauer (1/4.000s) bei gleichbleibender Verstärkung erfasst. Die Temperatur der dicker Flammenschichten nimmt deutlich merkbar ab, dünne Flammenschichten im Bereich des Kolbens weisen auch hier höhere Temperaturen auf als im Volumen, können aber nur aufgrund des vorhandenen Temperaturgradienten im Übergangsbereich zwischen dichter und transparenter Flamme erahnt werden.



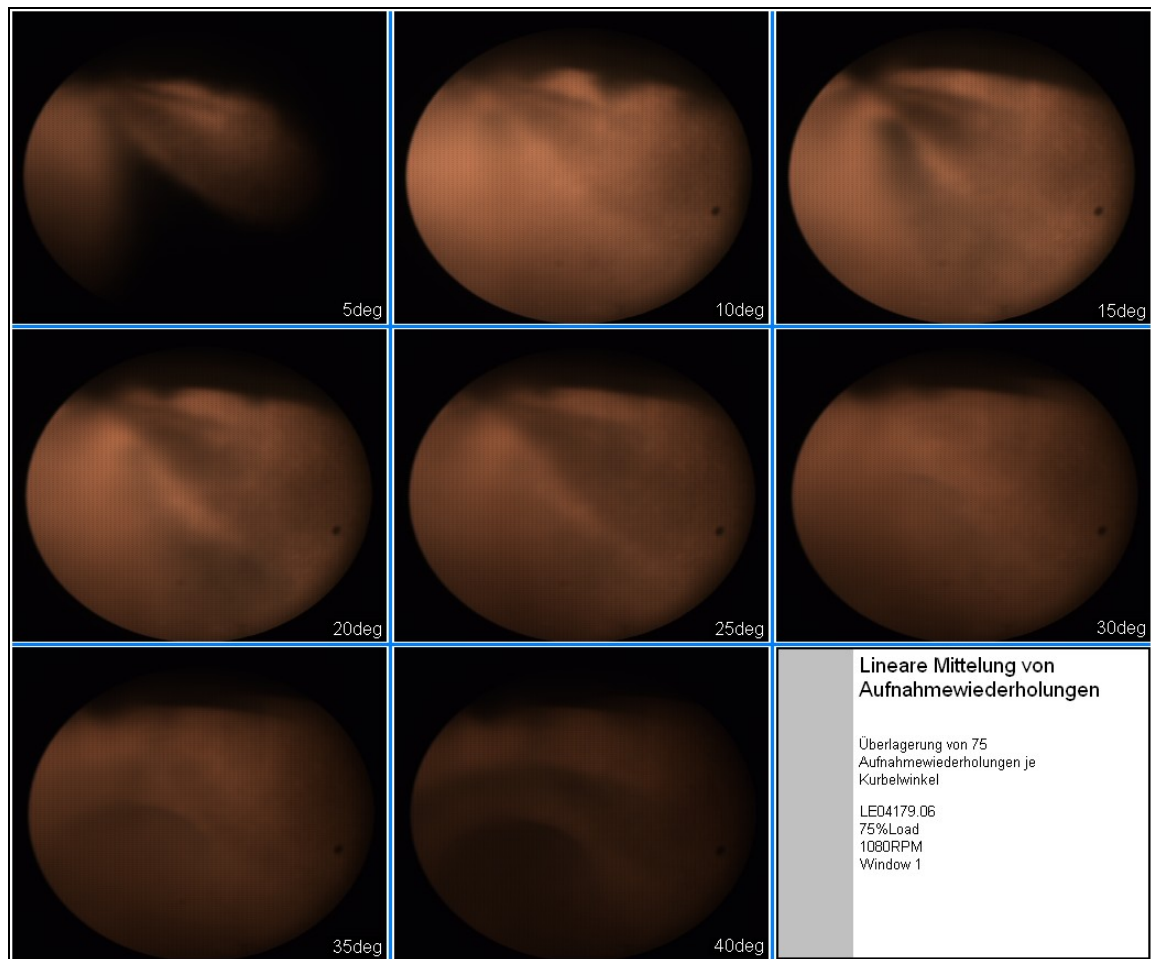
Farbtafel D5b: die Intensität der Temperaturstrahlung nimmt soweit ab, daß selbst bei langer Integrationsdauer nurmehr Teilbereiche der Flamme ausgewertet werden können.



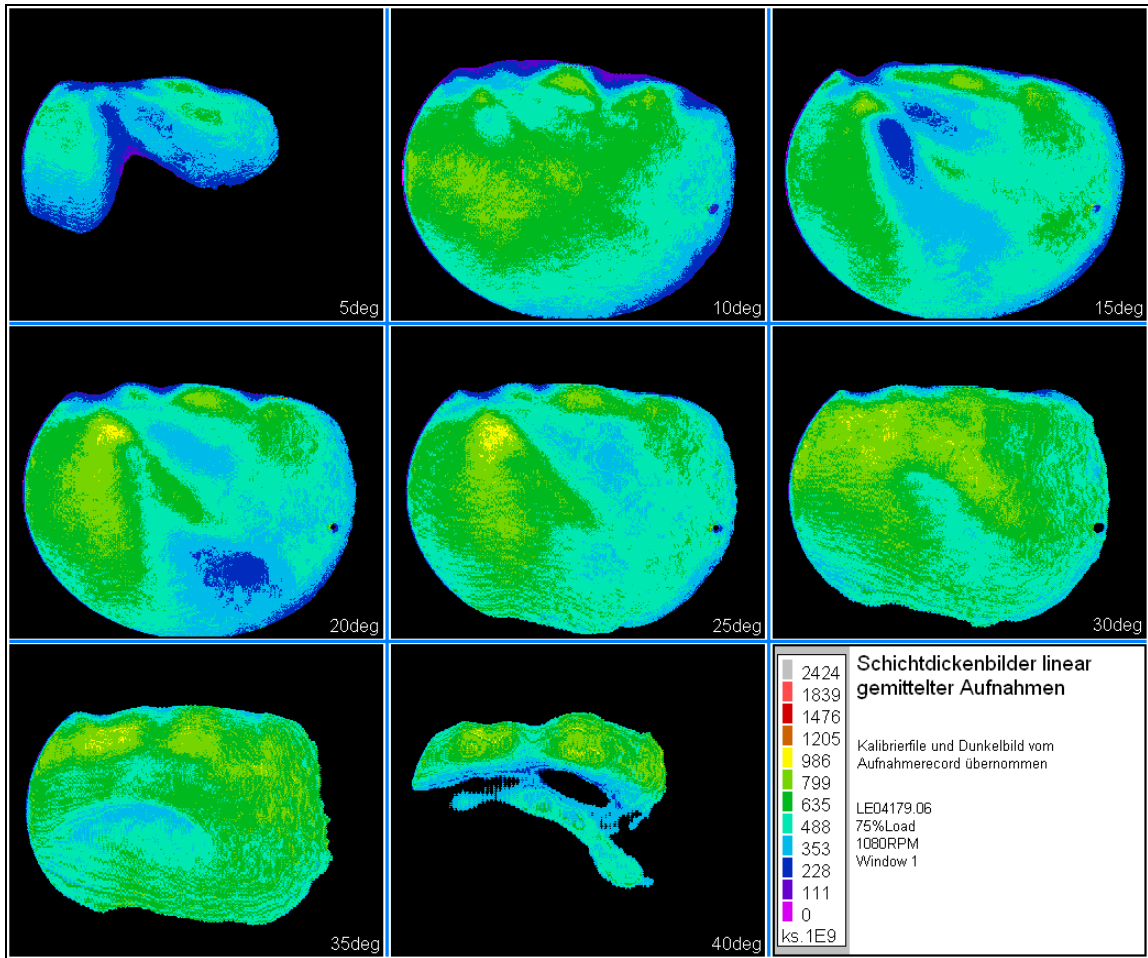
Farbtafel D6: Aufnahme der Flamme (weiß umrandet) unter extremen Bedingungen. Bei höchstmöglicher Belichtungsdauer (1/2.000s), maximaler Kameraverstärkung und günstiger Optik wurden Flammen gegen Ende des Verbrennungszyklusses gemessen. Man beachte die gegenüber den übrigen Messungen veränderte Temperaturskala. Wegen der niedrigen Strahlungsintensität mußte der Schwellwert für die Meßdatenauswertung auf 5 statt 25 für den linearen Rot- und Grünpegel reduziert werden. Die dünnen Randzonen höherer Temperatur (typisch 2.200K) dürften trotz der niedrigen Schwellwerte nicht auf Quantisierungsfehler zurückzuführen sein, da sie an mehreren Stellen in gleicher Weise auftreten. Es ist zu vermuten, daß in diesen Bereichen ein Meßfehler zufolge Bandenstrahlung niedriger Wellenlänge Intensität vorliegt. Unter der Voraussetzung von Schwellwerten nach Spezifikation werden Temperaturen unterhalb von 1.800K nur an wenigen Meßpunkten ausgewertet, sodaß sich die angenommene untere Schranke des Meßbereichs aus der Limitation der gesamten Meßkette ergibt.



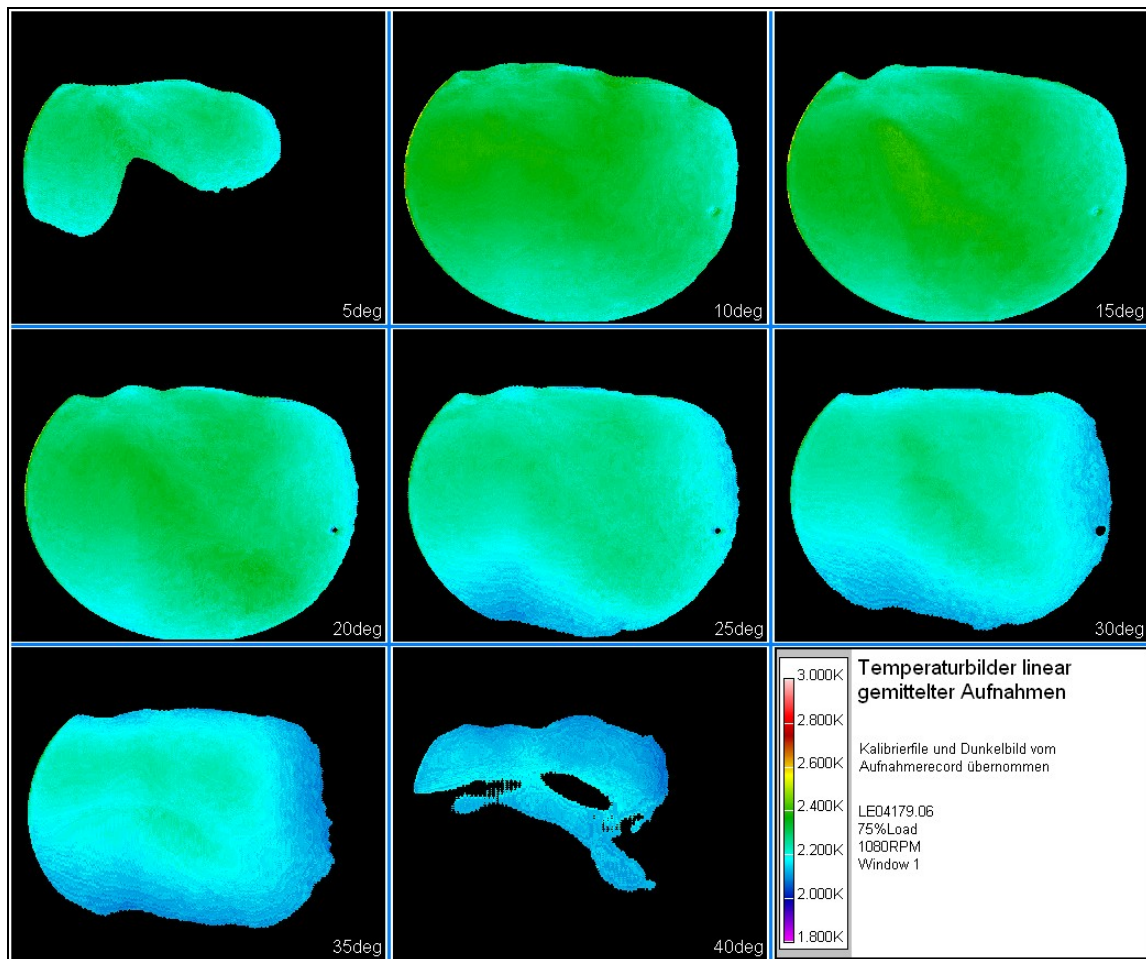
Farbtafel D7: Die Farbtafeln D4a-d zeigen lediglich die erste Aufnahmewiederholung des erfaßten Bildmaterials. Die hier dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung gibt Aufschluß über Zyklus zu Zyklus-Schwankungen. Für die folgenden Betrachtungen legen wir das Ensemble der Basisbilder bei festem Kurbelwinkel zugrunde.



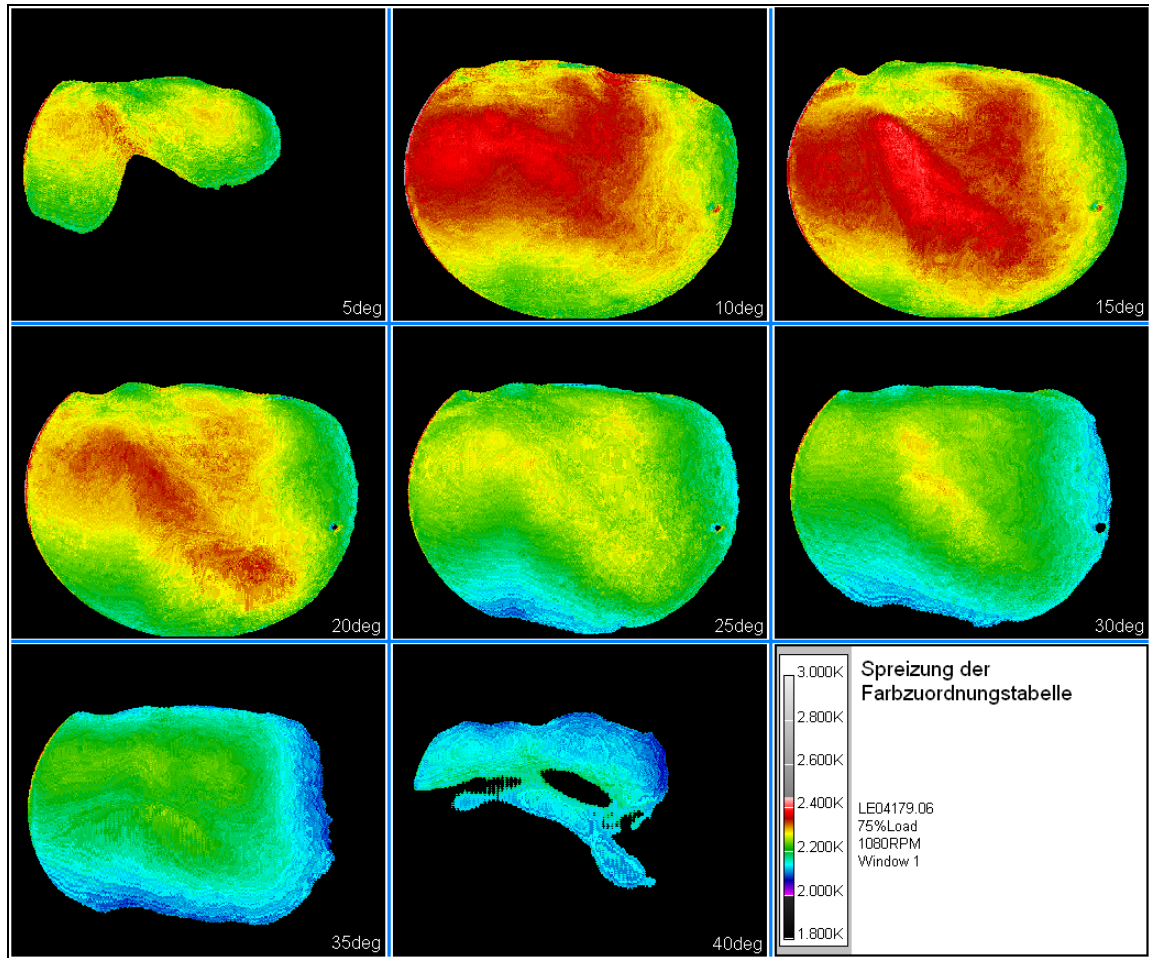
Farbtafel D8: Mittelung aufgenommener Flammenbilder. Die dieselmotorische Verbrennung unterliegt nicht nur in ihrer Ausbreitung, sondern auch in ihrer Struktur deutlichen Schwankungen. Durch die Erfassung einer hinreichenden Anzahl von Aufnahmewiederholungen kann durch lineare Mittelwertbildung Bildmaterial abgeleitet werden, welches globale Tendenzen besser wiedergibt als einzelne Flammenbilder. Neben den deutlich erkennbaren Einspritzstrahlen erkennt man bei KW 35 und KW 40 auch den Kolben (vgl. Farbtafel D3).



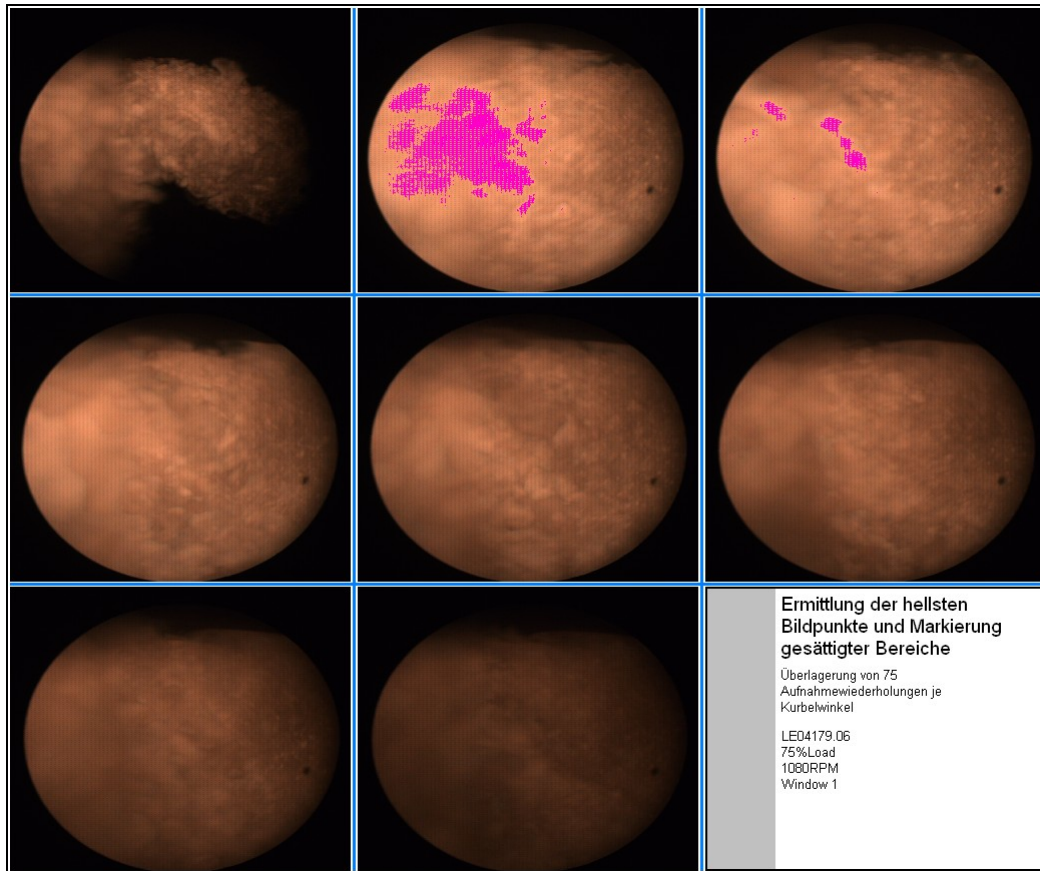
Farbtafel D9: Aus den Mittelwertbildern aus Farbtafel D8 wurden Schichtdickenbilder berechnet. Zur Berechnung dieser Sequenz wurden Kalibrierfile und Dunkelbild vom Aufnahmerekord verwendet. Auch in diesem Bild ist der Verlauf der Einspritzstrahlen deutlich erkennbar. Während sich in der Umgebung des eingespritzten Kraftstoffes sehr dichte Rußschichten entflammen, liegen in direkter Blickrichtung auf die Strahlen nur dünne Flammenschichten vor.



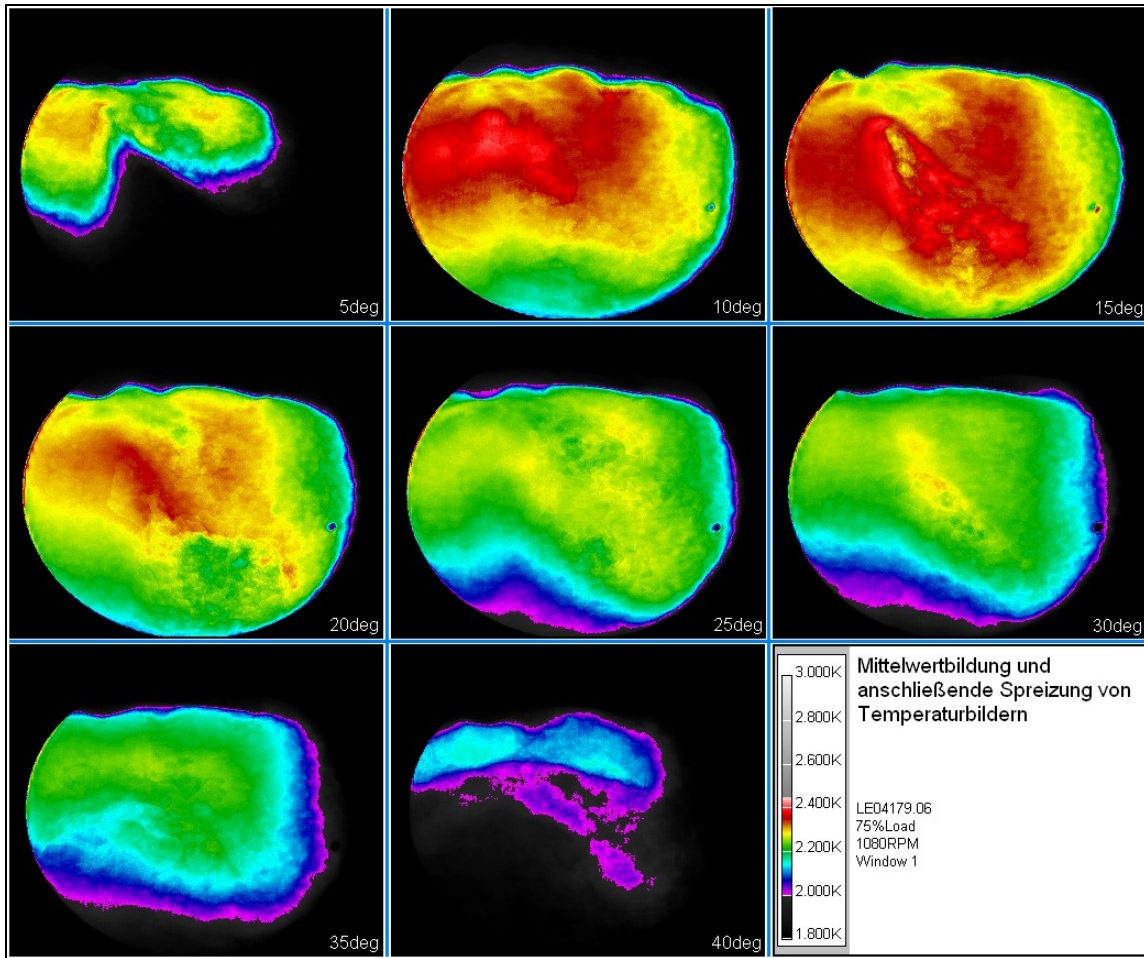
Farbtafel D10: Im Gegensatz zu den in Farbtafel D9 dargestellten Schichtdickebildern ist der globale Verlauf der Temperaturmessung nur schwer erkennbar. Dies läßt vermuten, daß die Entfernung des Flammenbereiches vom Brennraumfenster und dazwischenliegende kalte Rußschichten insgesamt kaum eine Rolle spielen (vgl. Farbtafel D4a).



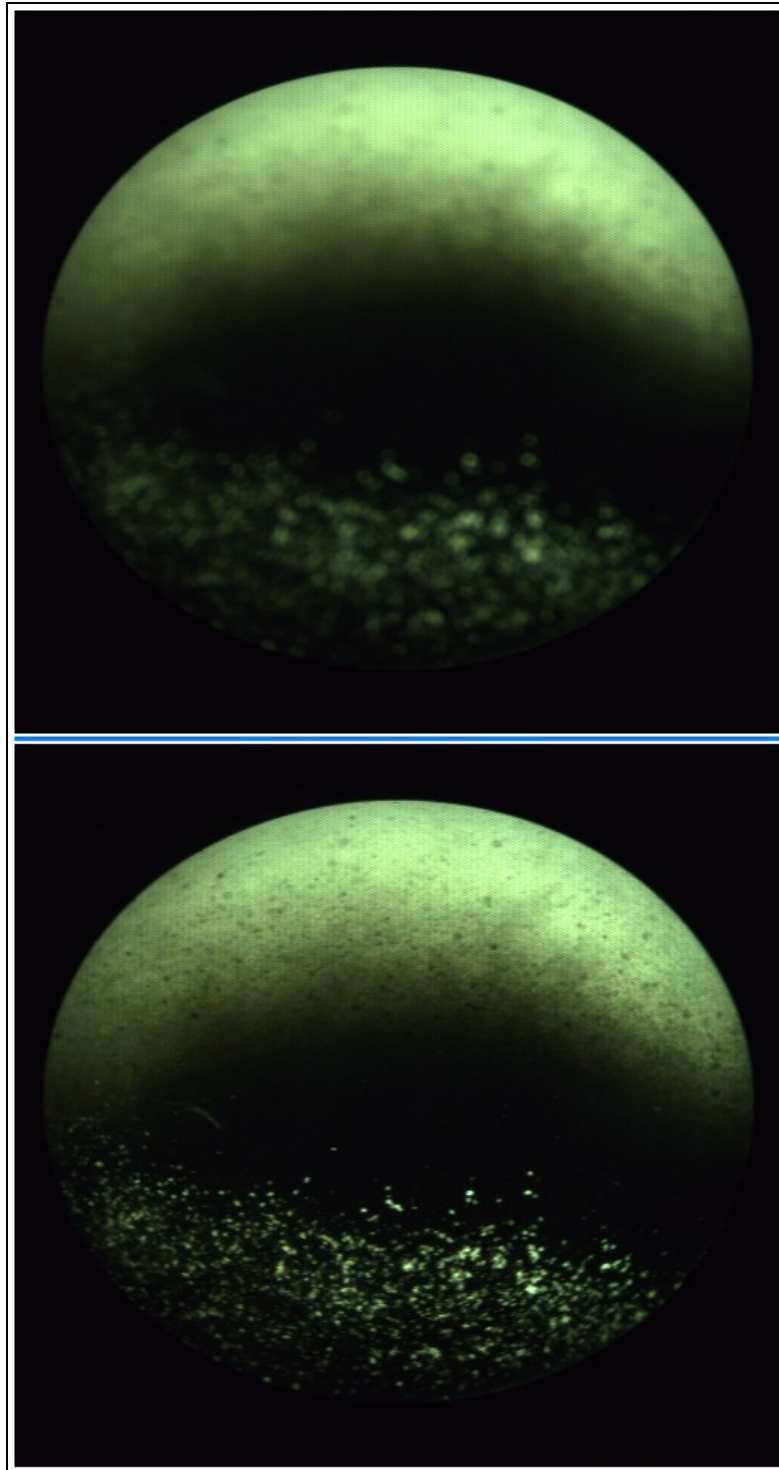
Farbtafel D11: Die Farbuordnungstabelle wurde gegenüber Farbtafel D10 auf den Bereich tatsächlich vorkommender Temperaturwerte reduziert, sodaß nun Temperaturverläufe deutlich besser abgelesen werden können. Ein Vergleich der Temperaturbilder mit den Schichtdickebildern aus Farbtafel D9 zeigt, daß bei KW 10 die hohen Temperaturwerte durchwegs in optisch dichten Flammenbereichen liegen, während bei KW 15 transparentere Bereiche die höchsten Temperaturwerte aufweisen. Eine Betrachtung der weiteren Bilder zeigt, daß generell kein direkter Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Temperatur besteht, sondern daß vielmehr oberflächennahe Temperaturen höher sind als volumetrische. Eine Durchsicht der Basisbilder bei KW 10 zeigt nämlich klar, daß die Zone hoher Temperatur auf Emission in unmittelbarer Nähe des Fensters – und damit der Brennraumoberfläche – zurückzuführen ist. Durch die Abwärtsbewegung des Kolbens verändert sich die Flammenausbreitung und führt letztendlich dazu, daß sich die Flamme vom Fenster wegbewegt.



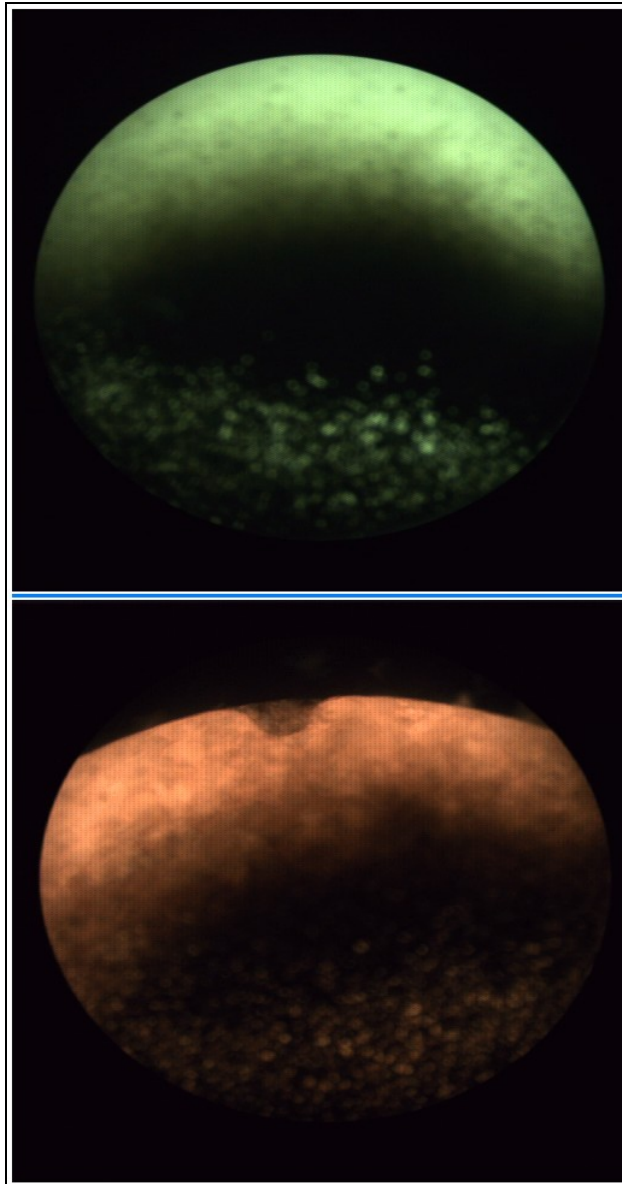
Farbtafel D12: Im Gegensatz zu Farbtafel D8 wurden diese Bilder nicht auf Basis der mittleren sondern auf Basis der hellsten Farbwerte (basierend auf dem Rot-Wert) errechnet. Gesättigte Bereiche kennzeichnen Zonen, in denen der Sensor übersteuert wurde.



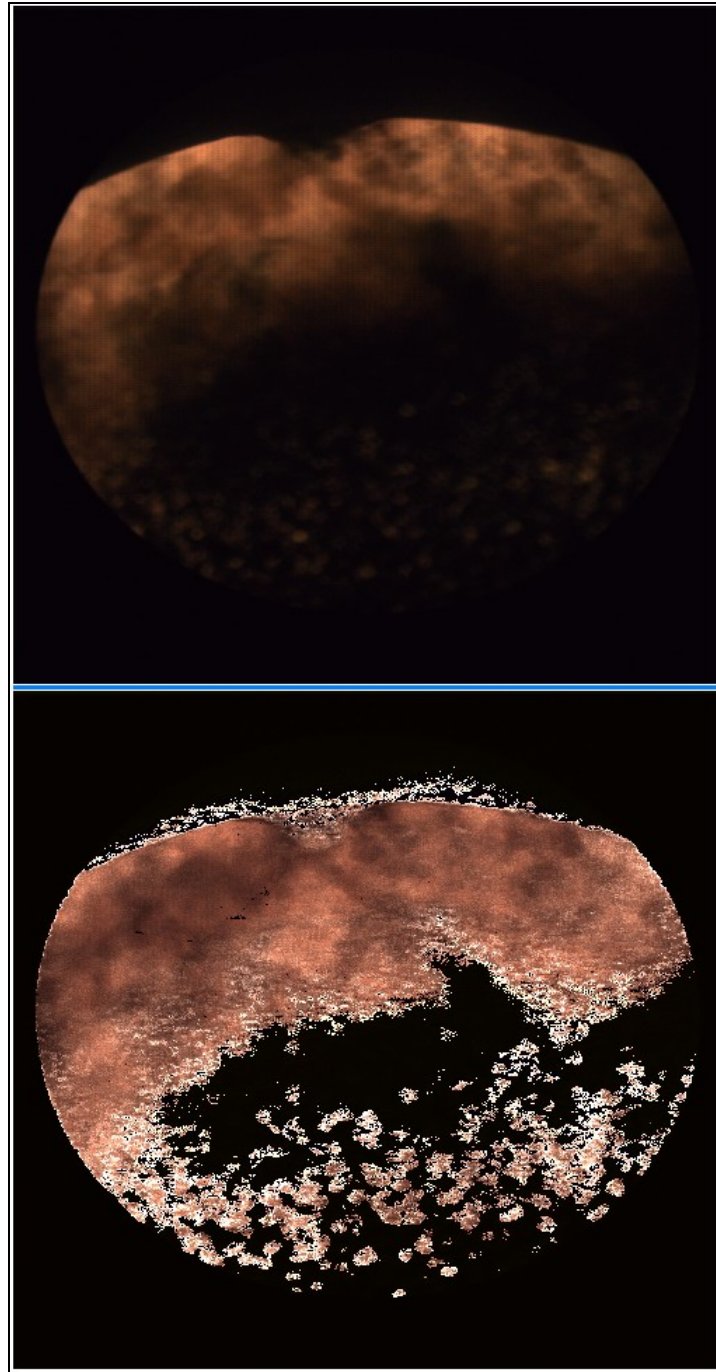
Farbtafel D13: lineare Mittelung von Temperaturbildern. Im Gegensatz zu Farbtafel D11 wurden hier nicht die Basisbilder für die Berechnung, sondern die Temperaturbilder gemittelt. Das Resultat ist allgemein weniger aussagekräftig. In Farbtafel D12 gesättigt dargestellte Zonen werden im Temperaturbild weiß dargestellt (Pixelwert 255), während Meßwerten, die den Schwellwert unterschreiten, der Pixelwert 0 zugeordnet wird. Bei einer nachgelagerten Bildmittelung verursachen diese Zonen Unstetigkeiten im Mittelwertbild (Fehler im roten Bereich bei KW 10 bis KW 20). Bereiche weisen mit abnehmender Flammverweilwahrscheinlichkeit Temperaturen auf, die gegen die Minimaltemperatur (1.800K) streben.



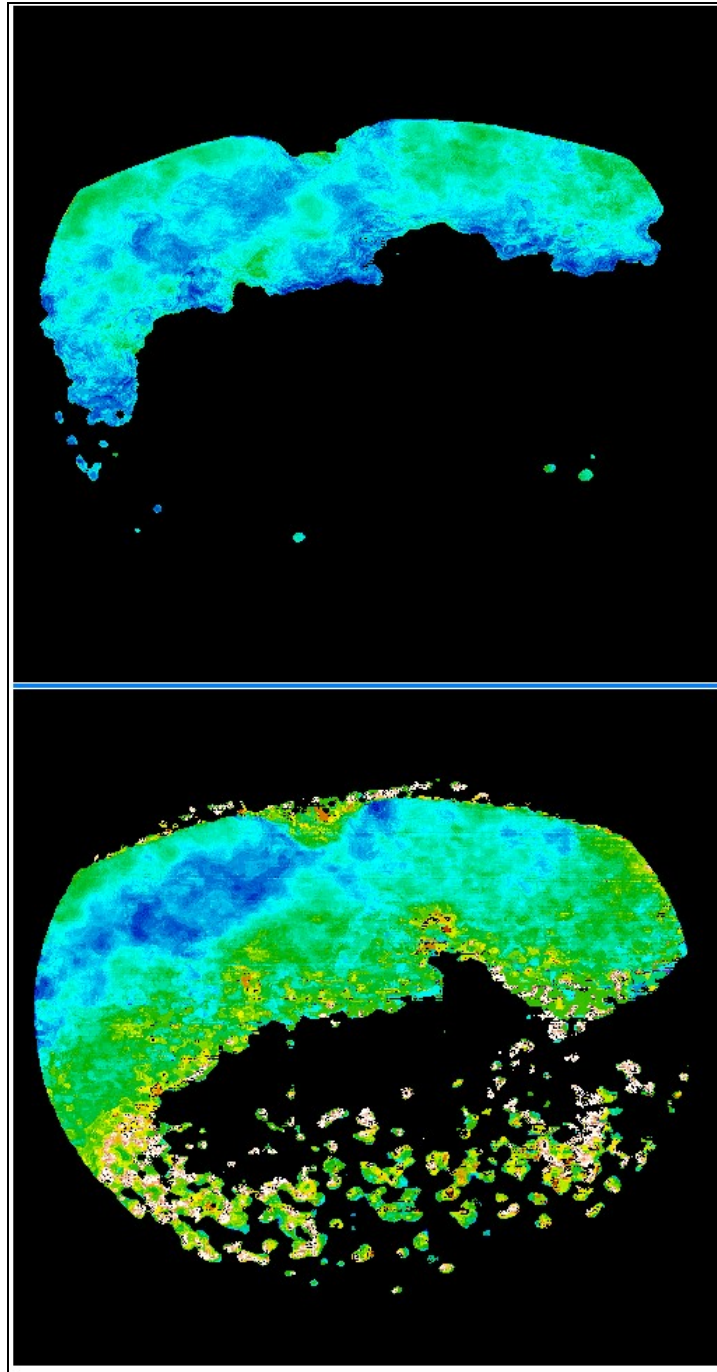
Farbtafel D14: Berußtes Quarzfenster nach der Messung. Nach Ausbau des Quarzfensters wurde die ortsabhängige Rußablagerung unter Verwendung einer Ulbricht-Kugel vermessen. Das obere Bild zeigt die Abbildung des Fensters bei einer der Aufnahme entsprechenden Fokussierung. Im unteren Bild wurde auf das Fenster scharfgestellt.



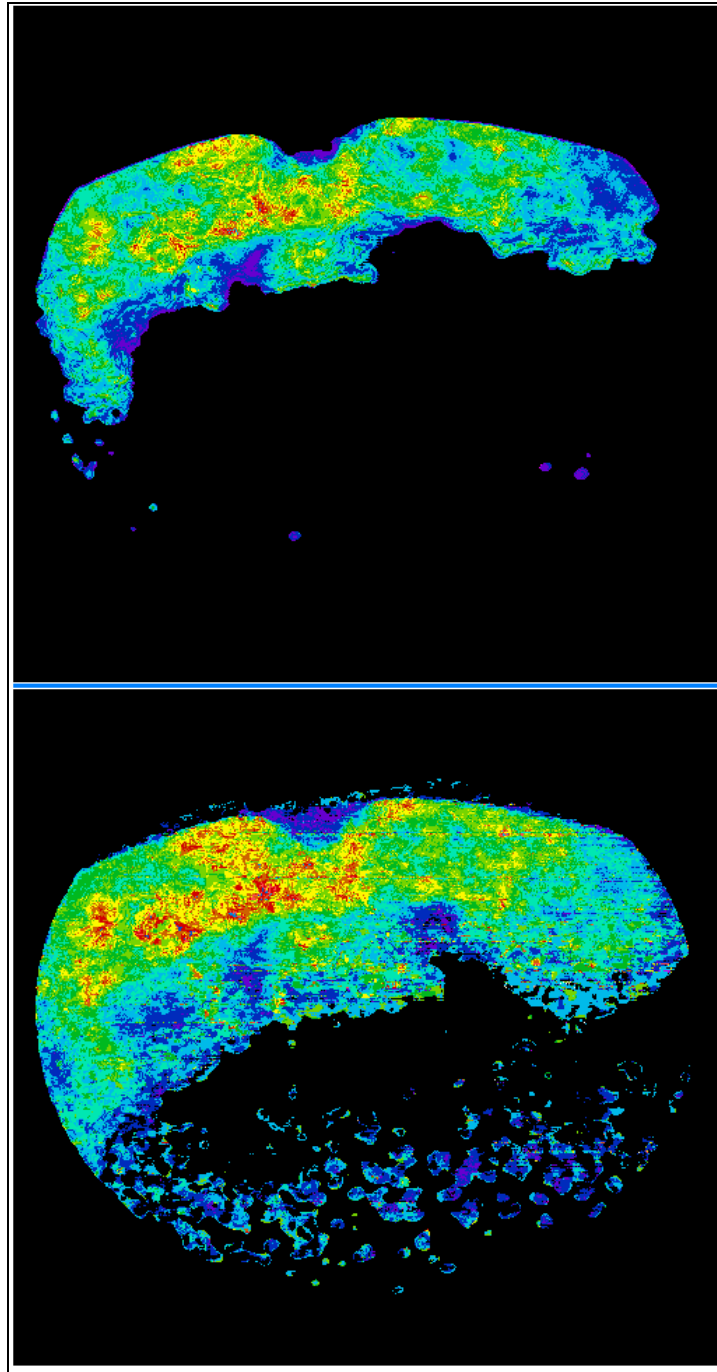
Farbtafel D15: Gegenüberstellung von aufgenommenem und berechnetem Kalibrierbild. Man erkennt, daß das berußte Quarzfenster am Kalibriertisch gegenüber der Messung verdreht wurde. Eine weitere, translatorische Verschiebung tritt aufgrund des Spiels zwischen Endoskop und Schnellverschluß an der Kamera ebenfalls auf, ist in der Abbildung aber nicht dargestellt. Eine Verwendung des gemessenen Kalibrierbildes würde jedenfalls eine pixelgenaue Rückrechnung der Position erfordern und ist damit kaum automatisierbar. Am unteren Bild erkennt man, daß im Bereich der Einspritzdüse nur transparente Flammen aufgetreten sind, sodaß in diesem Bereich bei einer Bildrestaurierung Fehler auftreten werden. Es besteht allerdings die Möglichkeit, für diesen Bereich die Transmissivität des Fensters mit einem Malprogramm nachzubearbeiten, sodaß diesen Zonen manuell die korrekte Transmissivität zugeordnet wird.



Farbtafel D16: Originalbild (oben) und restauriertes Bild. Zur Berechnung dieses Bildes wurde Farbtafel D15 (unten) verwendet. Im Gegensatz zum Originalbild steht in den restaurierten Bilddaten die Bildhelligkeit in keinem direkten Zusammenhang mit dem lokalen Berußungsgrad am Fenster. Neben einer Änderung der Bildhelligkeit erscheint auch die Farbe der Flamme verändert. Die Bildrestauration wurde gezielt mit Parametern weit außerhalb der Spezifikation ausgeführt, um zu prüfen, ob auch bei extrem hoher Berußung das Absorptionsvermögen für das Fenster im Modell richtig beschrieben wird. Die weißen Randzonen ergeben sich aus Quantisierungsfehlern zufolge der im Basisbild (fast) schwarzen Bereiche. Im unteren Bild ist die Nase des Kolbens (schwarzer Bereich in Bildmitte) andeutungsweise zu erkennen.

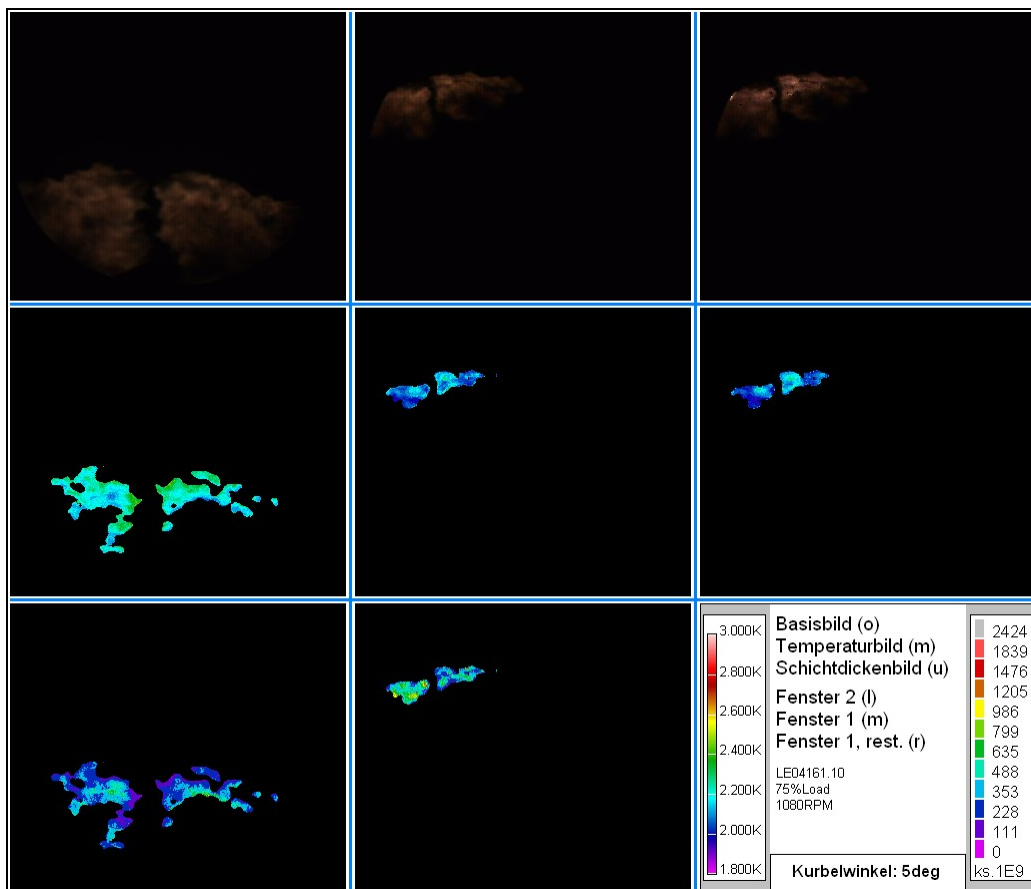


Farbtafel D17: Temperaturbild von Originalaufnahme und restauriertem Bild (Farbtafel D 16). Die zunehmende Abdunkelung durch Ruß am Fenster führt im oberen Bild zu einer deutlichen Verringerung der Ergebnistemperatur. Im unteren Bild ist diese Tendenz nicht gegeben. In Kolbennähe liegen die Ergebnistemperaturen sogar wesentlich höher als im Volumen. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen von Messungen bei sauberem optischen Zugang (vgl. Farbtafel D4b). Da das Referenzbild (vgl. Farbtafel D15) im Bereich der Düse nicht korrigiert wurde, werden an dieser Stelle zu hohe Ergebnistemperaturen berechnet. Die punktuell hohen Temperaturabweichungen sind Quantisierungsfehler, die bei Berechnung nach Spezifikation nicht auftreten.

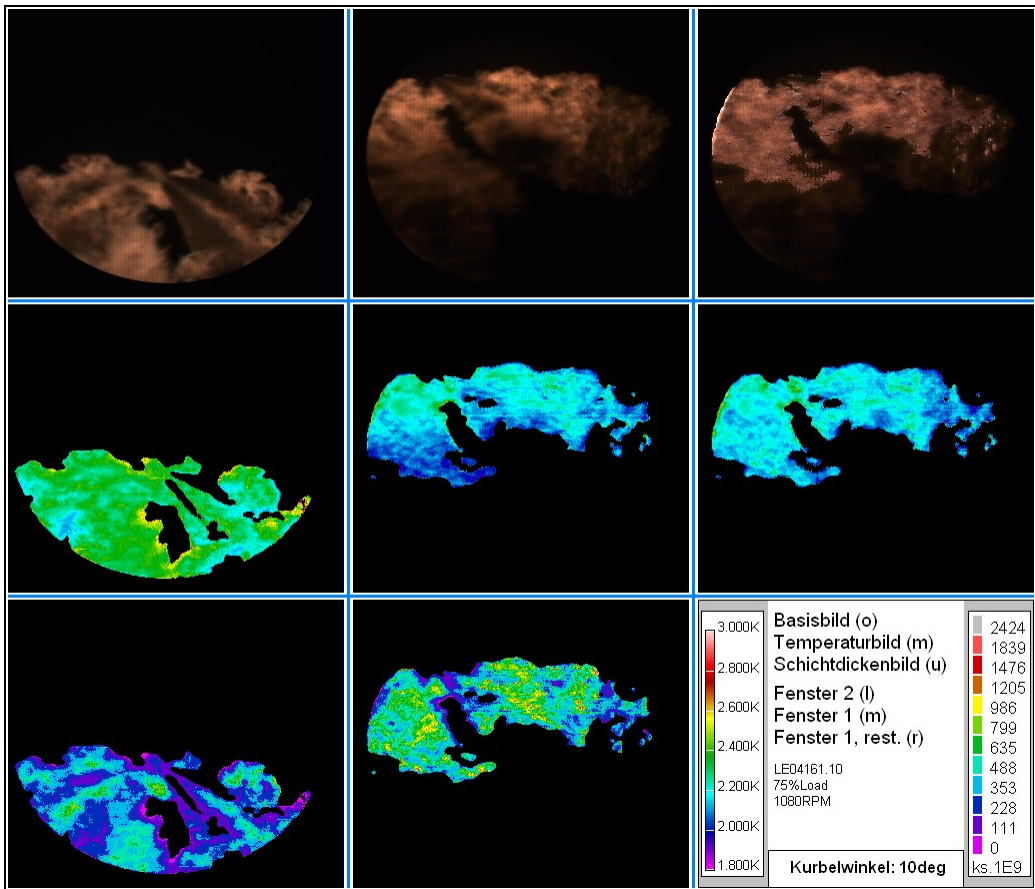


Farbtafel D18: Schichtdickenbilder von Aufnahme- und restauriertem Bild (Farbtafel D16). Die Kalibrierung des restaurierten Bildes erfolgte unabhängig von der des aufgenommenen Bildes. Unschärfen zufolge mehrmaliger nichtlinearer Transformation führen auf leicht abweichende Aussagen für die Schichtdicke.

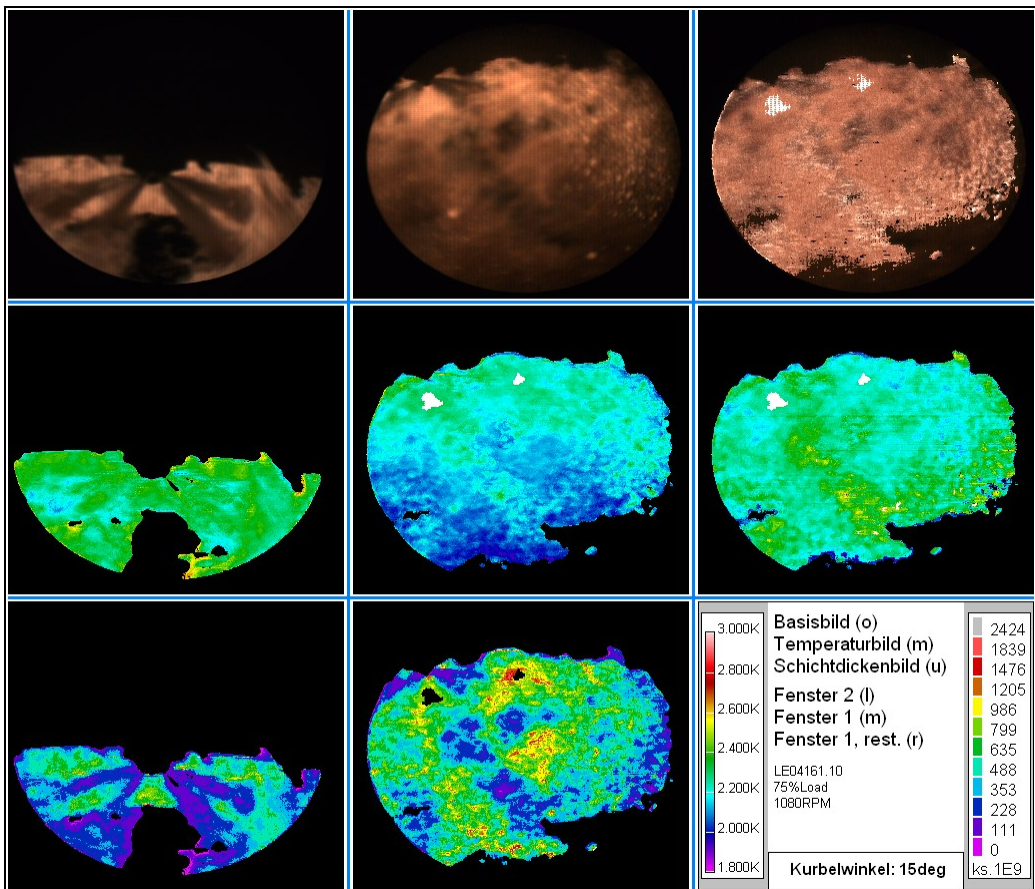
Farbtafeln D19 a-g: Vergleich von zwei Aufnahmesequenzen bei gleichem Motorbetrieb aber unterschiedlicher Fensterposition. In den linken Teilbildern sind Aufnahmen und Auswertergebnisse bei Beobachtung aus *Fenster 2* dargestellt. Die mittlere Spalte zeigt Basisbilder und Meßergebnisse von der Aufnahmesequenz, in der rechten Spalte sind das vom Basisbild abgeleitete, restaurierte Bild und das zugehörige Temperaturbild dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß das gemessene Temperaturniveau durch die Bildrestauration auf gut übereinstimmende Werte mit unbeeinträchtigtem *Fenster 2* führt. Bedenklich erscheint allerdings, daß aus *Fenster 1* niedrige Temperaturzonen die Szene dominieren, während bei *Fenster 2* über weite Bereiche die hohen Ergebnistemperaturen vorliegen (v.a. D19a, b, e, f, g). Dies deutet darauf hin, daß zwischen der eigentlichen Flamme und dem Beobachtungsfenster eine kalte Rußschicht vorhanden ist. Zu Beginn des Einspritzvorganges (D19a, b) ist der gemessene Temperaturunterschied unmittelbar einzusehen, da aus *Fenster 2* die Flammenkeulen rund um den Einspritzstrahl beobachtet werden, während von *Fenster 1* aus hauptsächlich die Reaktionszonen dargestellt sind. Fraglich ist allerdings, warum ab 30deg Kurbelwinkel gravierende Unterschiede in den Ergebnistemperaturen auftreten. Bei einer Animation des Bildmaterials kann festgestellt werden, daß ab 20deg eine vom im linken Bereich beobachteten Einspritzstrahl ausgehende Wolke unmittelbar vor dem Fenster vorbeiwandert und damit die von der Flamme ausgehende Strahlung teilweise absorbiert.



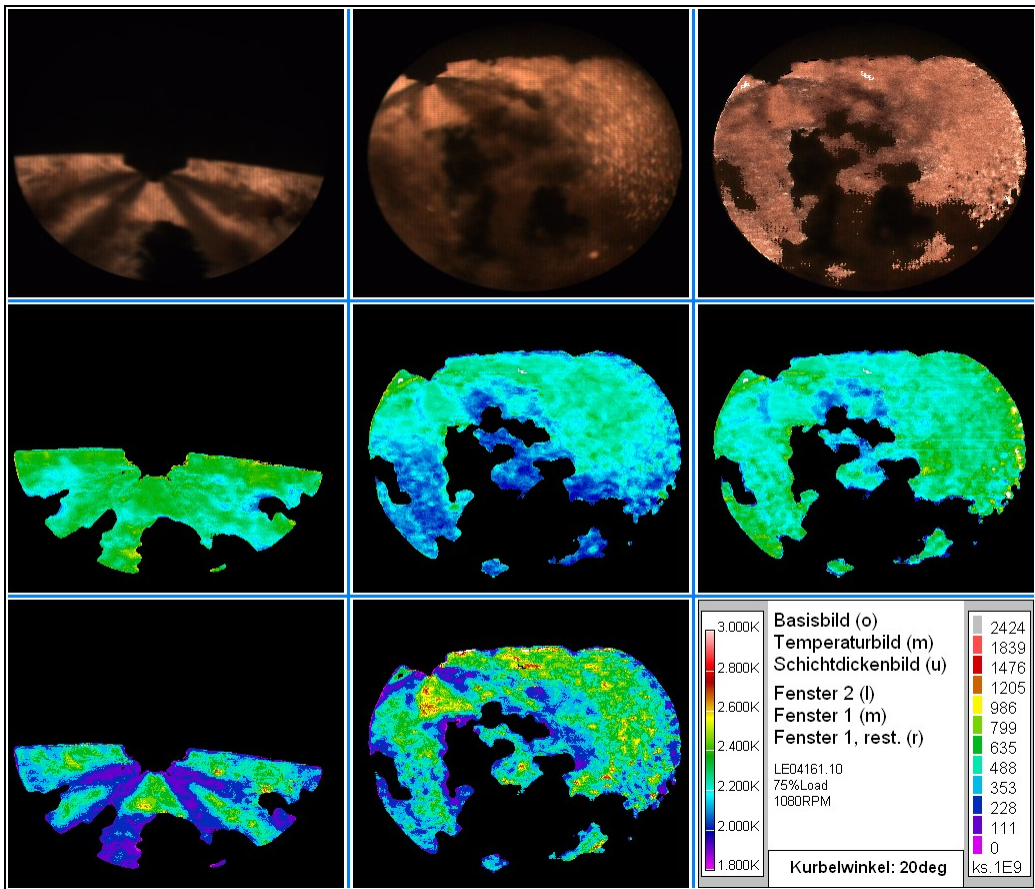
Farbtafel D19a



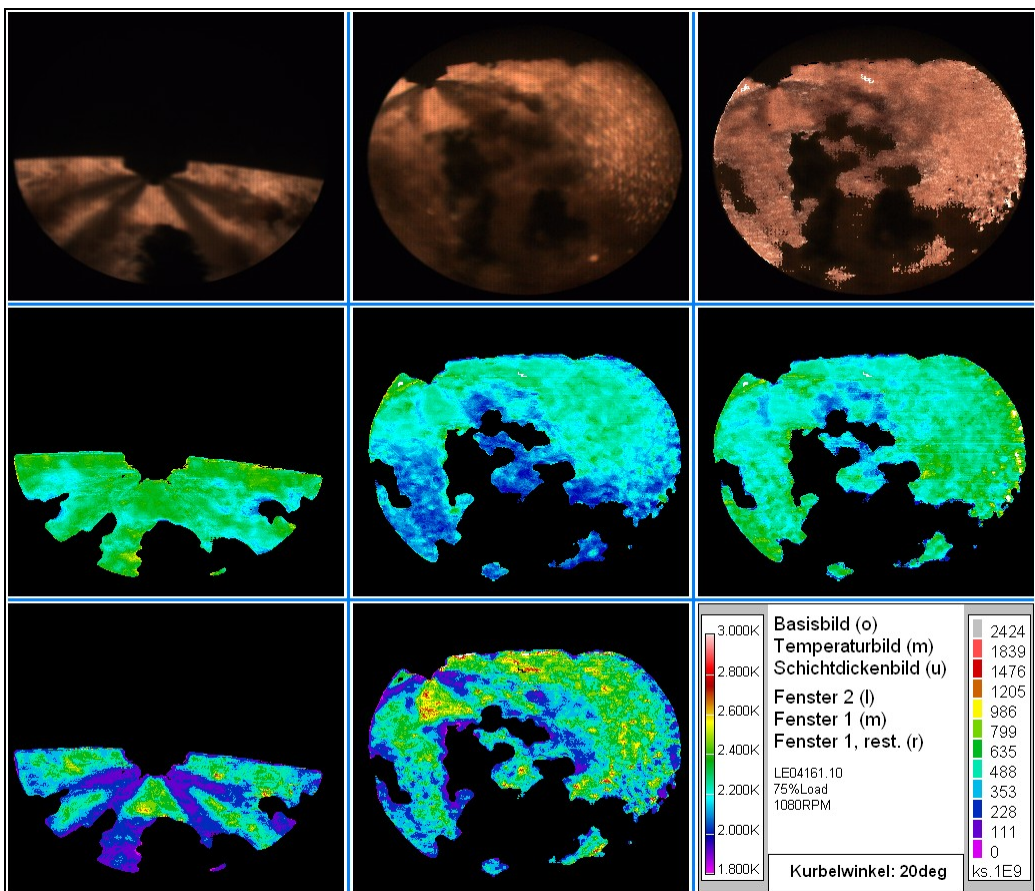
19b



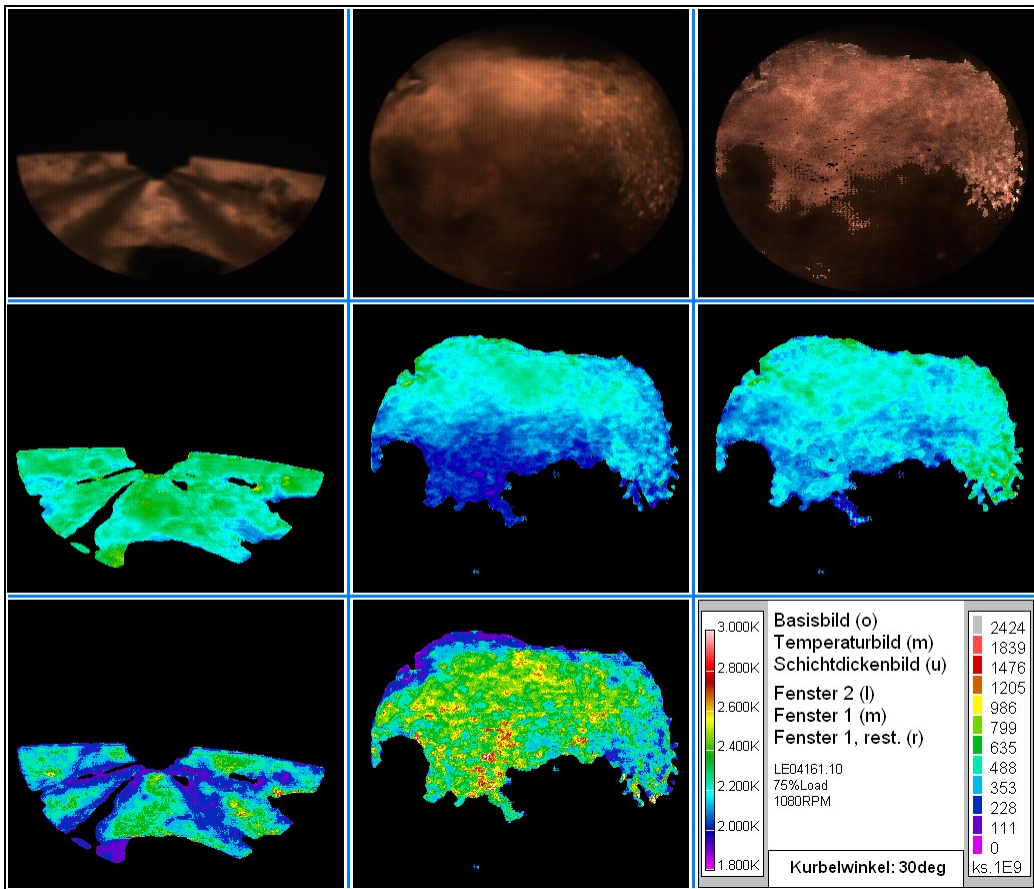
19c



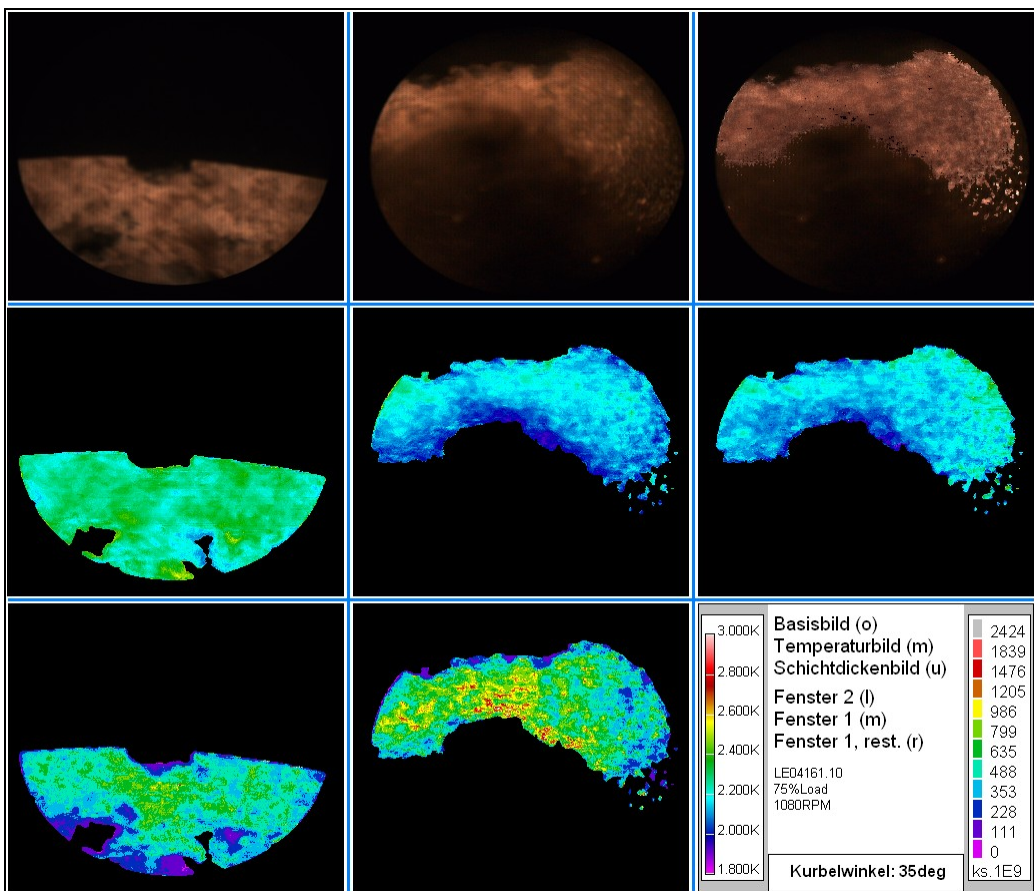
19d



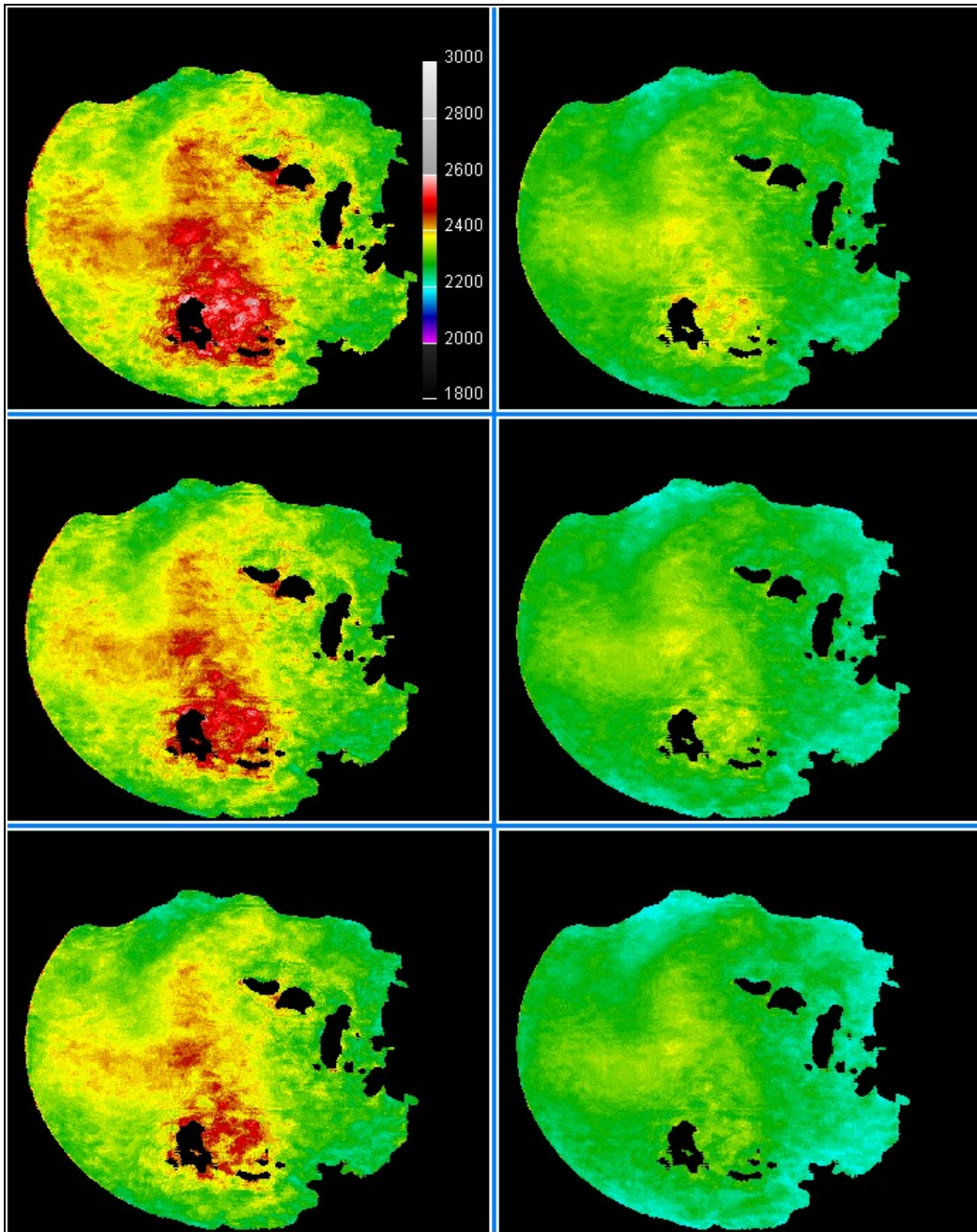
19e



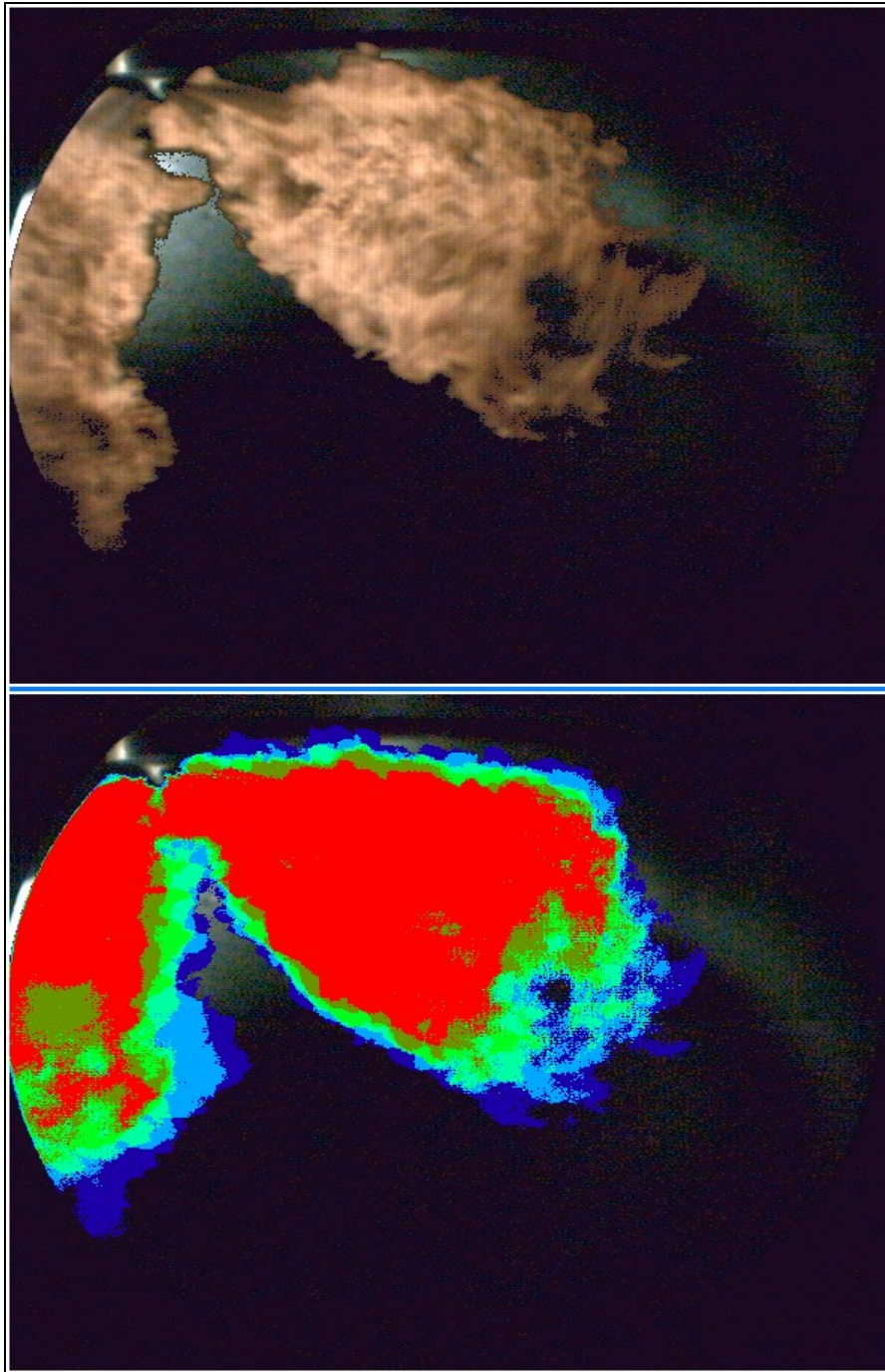
19f



19g



Farbtafel D20: Unschärfen im Modell der dieselmotorischen Flamme. Die Meßdatenauswertung auf Basis Rot, Rot/Grün (links) und Rot, Rot/Blau (rechts) sind einander für verschiedene Annahmen des spektralen Emissionsvermögens (vgl. (2.19), (2.20)) dargestellt: $n=0,8$ (oben), $n=1,0$ (Mitte), $n=1,2$ (unten). Die Auswerteergebnisse auf Basis Rot/Grün sind generell höher als auf Basis Rot/Blau. Deckungsgleiche Temperatureaussagen werden mit dem zugrundeliegenden Modell nicht gefunden, Temperaturverläufe werden aber mit guter Übereinstimmung festgestellt.



Farbtafel D21: Überlagerung von Bildsequenzen. Im dargestellten Beispiel wird dem ausgeleuchteten Verbrennungsraum das Bild einer maskierten Flamme (oben) und eine aus 5 Repetitionen berechnete Wahrscheinlichkeitsverteilung der Flamme (unten) überlagert. Eine derartige Überlagerung kann kaum pixelgenau erfolgen, da während der Messung meist Vibrationen am Motor auftreten und kleine Verschiebungen der Optik zwischen einzelnen Messungen praktisch nicht unterbunden werden können.