

CEC Phosphore II Weiterentwicklung des Wandtemperaturmessverfahrens

Verbundprojekt Siemens Clean Energy Center
Entwicklung von Verbrennungstechnologien für
die klimaschonende Energieerzeugung
Teilprojekt 3B

Oberflächentemperaturmessungen im Clean
Energy Center mit thermographischen
Phosphoren

Schlussbericht, Teile I + II
Version für den Projektträger (deutsch)



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

CEC Phosphore II – Schlussbericht

Fortgeschrittene optische Messtechniken

Oberflächentemperaturmessungen im Clean Energy Center mit thermographischen Phosphoren

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Verbrennungstechnik (VT)

Titelseite:

Foto des mobilen Messsystems mit geöffneter Seitenwand.

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Förderkennzeichen	03ET7073B
Projektlaufzeit	01.01.2017–30.06.2019
Zuwendungsbescheid	17.12.2015
Verbundprojekt	Siemens Clean Energy Center – Entwicklung von Verbrennungstechnologien für die klimaschonende Energieerzeugung
Vorhabengruppe	3. Validierung
Teilprojekt	3.1 Fortgeschrittene optische Messtechniken
Vorhaben	3B Oberflächentemperaturmessungen im Clean Energy Center mit thermographischen Phosphoren
Antragsteller	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Verbrennungstechnik (VT) Pfaffenwaldring 38–40 70569 Stuttgart
Projektleitung	Dr. Patrick Nau Telefon: +49 711 6862 395 E-Mail: Patrick.Nau@dlr.de
Projektmitarbeiter	Dr. Oliver Lammel, Dr. Christoph Arndt (Projektmitarbeiter); Prof. Manfred Aigner (Gasturbinenkompetenz); Dr. Wolfgang Meier (Laserdiagnostik)
Industriepartner	Siemens AG Mellinghofer Straße 55 45473 Mülheim an der Ruhr Ansprechpartner: Dr. Benjamin Witzel
Projektträger	Projektträger Jülich (PtJ) Forschungszentrum Jülich GmbH Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich Ansprechpartner: Hannah Brankers
Art des Berichts	Dieser Bericht enthält alle durchgeführten Arbeiten und wichtige Ergebnisse.

Inhalt

Impressum	3
Inhalt	4
I Aufgabenstellung	5
1 Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf	6
1.1 Aufgabenstellung	6
1.2 Arbeitsziele	7
1.3 Projektrahmenbedingungen	8
II Sachbericht	12
2 Einleitung	13
2.1 Allgemeine Zielsetzung	13
2.2 Wissenschaftliche und technische Ziele	13
2.3 Aufbau des Berichts	14
3 Ergebnisse	15
3.1 Experimentelle Grundlagen und Datenauswertung	15
3.2 Messung von Oberflächentemperaturen am CEC Gasturbinenprüfstand	19
3.3 Entwicklung eines bildgebenden Oberflächentemperaturmessverfahrens	24
4 Zusammenfassung und Ausblick	32
Abbildungen	34
Tabellen	36
Literatur	37

Teil III: Erfolgskontrollbericht in einem separaten Dokument

CEC Phosphore II
Schlussbericht
Teil I

Aufgabenstellung

1 Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf

1.1 Aufgabenstellung

Deutschland hat mit dem Energiekonzept der Bundesregierung im Herbst 2010 eine Energiewende hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung beschlossen. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung soll von heute 17 % auf 50 % bis 2030 und sogar auf 80 % bis 2050 steigen. Hinzu kommt der im Juni 2011 beschlossene Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022. Die Nachfrage nach klimafreundlichen, zuverlässigen, flexiblen und bezahlbaren Stromerzeugungstechnologien wird dadurch steigen. Vor allem moderne konventionelle Kraftwerke werden als neue Brückentechnologie zunehmend in der Verantwortung stehen.

Hiermit verbunden ist eine den natürlichen Ressourcen Wind und Sonne geschuldete fluktuierende Energieumwandlung, die nicht mit dem tatsächlichen Bedarf an Stromerzeugung korreliert. Zur Wahrung der Versorgungssicherheit werden zum Ausgleich Kraftwerke benötigt, die flexibel betrieben werden können. Fossile und erneuerbare Energieträger sind grundsätzlich keine Konkurrenten, sondern bedingen einander. Nur wenn fluktuierende und stete Stromerzeugungseinheiten aufeinander abgestimmt werden und intelligent mit Netz- und Stromspeicheroptionen verknüpft werden, ist eine Energiewende zu schaffen.

Gasturbinenkraftwerke ermöglichen schnelle Lastwechsel und anpassungsfähige Betriebsweisen; sie stellen Energie mit hohen Wirkungsgraden bereit. Neue Technologien ermöglichen eine weitere Erhöhung der Effizienz, sowie eine Verbesserung und Erweiterung der Betriebs- und Brennstoffflexibilität. Die Weiterentwicklung der Verbrennungstechnik ist dabei von entscheidender Bedeutung.

Das Forschungs- und Entwicklungskonzept COORETEC *CO₂-Reduktionstechnologien* des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) konzentrierte sich unter anderem auf die Verminderung von Kohlendioxidemissionen durch Effizienzsteigerung. Um höhere Kraftwerkseffizienzen zu erreichen und damit die CO₂-Emissionen weiter zu reduzieren, müssen Gasturbinen bei immer höheren Temperaturen und Drücken betrieben werden. Die Stickoxidemissionen steigen mit der Verbrennungstemperatur exponentiell an. Eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur um 70 K verursacht, je nach Betriebsbereich, eine Verdoppelung der Emissionen. Deshalb müssen geeignete Technologien entwickelt werden, bei denen durch Vermeidung von Spitzentemperaturen mit Hilfe einer Verbesserung der Luft/Brennstoffmischung die Stickoxidemissionen gesenkt werden können. Die Reaktivität des Luft/Brennstoffgemisches nimmt ebenfalls zu; neue Technologien müssen so ausgelegt werden, dass sie einen flammenrückschlagsfreien Betrieb erlauben.

Moderne Gasturbinenkraftwerke erlauben einen durchgehenden Teillastbetrieb bei etwa 50 %. Gegenüber einer Abschaltung der Gasturbine, insbesondere bedingt durch die Integration im GuD-Betrieb, ist eine weitere Absenkung der unteren Lastgrenze auf 20 % anzustreben. Die Kohlenmonoxidemissionen werden jedoch durch Unterdrückung der Oxidation zu Kohlendioxid bei geringeren Verbrennungstemperaturen, wie sie im Teillastbetrieb vorherrschen, erhöht. Deshalb müssen für einen emissionsarmen Teillastbetrieb Verbrennungstechnologien bereitgestellt werden, mit denen über den gesamten Bereich von 20 % bis 100 % Last die CO Emissionen unter 10 ppm und gleichzeitig die NO_x Emissionen unter 15 ppm gehalten werden können.

Das Verbrennungssystem und der Turbineneintritt werden bei einer hocheffizienten Hochtemperaturgasturbine außerordentlich beansprucht. Ein direkter Einflussfaktor auf die Effizienz einer Gasturbine ist die Menge an Kühlluft, die für die einzelnen Komponenten benötigt wird. Die Kühlluft wird in einer Gasturbine aus dem Verdichter entnommen und steht nicht für die Primärenergieumwandlung als Oxidator zur Verfügung. Zur Reduzierung des Kühlluftanteils ist es notwendig, die Materialien der belasteten Komponenten zu verbessern oder

die Betriebsweise des Brennkammersystems der Gasturbine so zu verändern, dass gegebene Materialgrenzwerte nicht überschritten werden. Dazu ist die Kenntnis der Oberflächentemperaturen während des Betriebs von ausschlaggebender Bedeutung. Wandnahe kältere Zonen in der Brennkammer oder durch Kühlluftindüsung verursachte "kalte" Strahlen (wobei sich "kalt" auf die Feuerungstemperatur bezieht) sind eine Hauptursache für einen Anstieg der CO Emissionen, so dass eine Verminderung des Kühlluftbedarfs auch darauf einen unmittelbaren positiven Einfluss hat.

Die experimentelle Untersuchung von Brennkammersystemen in Hochdruckprüfständen ist ein wesentlicher Schritt im Produktentwicklungsprozess. Siemens investierte deshalb in den Aufbau des *Clean Energy Center* (CEC) in Ludwigsfelde bei Berlin. In dieser Testeinrichtung werden Gasturbinenverbrennungssysteme entwickelt und erprobt. Das DLR Institut für Verbrennungstechnik arbeitete im Rahmen des begleitenden Verbundforschungsvorhabens *Entwicklung von Verbrennungstechnologien für die klimaschonende Energieerzeugung* unter anderem in dem Teilprojekt 3.1 *Fortgeschrittene optische Messtechniken* mit Siemens zusammen.

Hauptaugenmerk des vorliegenden Projekts war die Weiterentwicklung und Erprobung eines Oberflächentemperaturmessverfahrens für die sehr hohen Temperaturen in einer Gasturbine. In diesem Projekt wurde das Oberflächentemperaturmessverfahren in einem Hochdruckprüfstand am CEC eingesetzt. Hierbei wurde im Bereich der Sondenentwicklung mit dem Institut für Verbrennung und Gasdynamik - Reaktive Fluide der Universität Duisburg-Essen zusammengearbeitet. Zusätzlich wurde das Messverfahren im Labormaßstab weiterentwickelt.

1.2 Arbeitsziele

Die angestrebte Reduktion des Kühlluftanteils für die hochbelasteten Komponenten steigert direkt die Effizienz der Gasturbine und hat positive Auswirkungen auf die Emissionswerte im Voll- und Teillastbetrieb. Um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen ist die Messung der Oberflächentemperaturen, etwa an den Brennkammerwänden, während des Betriebs oder des Hochdrucktests entscheidend. Die notwendigen Informationen können mit vorhandenen und/oder konventionellen Messtechniken nicht mit ausreichender zeitlicher oder räumlicher Auflösung, nicht in ihrem zeitlichen Verlauf, bis hin zu gar nicht ermittelt werden. Laserdiagnostische Methoden haben sich im Einsatz in Flammenumgebungen bewährt und können die angesprochenen Probleme lösen.

Im Teilprojekt CEC-2C (Förderkennzeichen 03ET7011M) wurde ein punktförmiges Messverfahren zur präzisen Bestimmung von Oberflächentemperaturen mit Hilfe von thermographischen Phosphoren entwickelt. Im hier durchgeführten Projekt wurde das Messverfahren zum einen am CEC Gasturbinenprüfstand eingesetzt und zum anderen zu einem bildgebenden Messverfahren hin weiterentwickelt. Der zugängliche Temperaturbereich von bis zu 1700 K ab wurde auf die zu erwartenden Temperaturen abgestimmt. Geeignete Phosphormaterialien wurden hierfür bereits ausgewählt und getestet. Parallel zu den Experimenten am DLR in Stuttgart entwickelte das Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) an der Universität Duisburg-Essen in den Teilprojekten CEC-1B und 2B eine faseroptische Sonde, mit welcher sowohl das Laserlicht zur Anregung der Phosphore geleitet wird, als auch die emittierte Phosphoreszenz eingesammelt wird.

Bildgebende Temperaturmessungen mit thermographischen Phosphoren waren bereits bei niedrigen Temperaturen bekannt [2,3,4,5]. Entsprechende Messstrategien wurden für ihre Tauglichkeit bei hohen Temperaturen in Gasturbinenbrennkammern untersucht und eine mögliche Adaption für faseroptische Messungen evaluiert.

Das Vorhaben gliedert sich demnach in zwei Themenkomplexe:

1. Messung von Oberflächentemperaturen am CEC Gasturbinenprüfstand
2. Entwicklung eines bildgebenden Oberflächentemperaturmessverfahrens

In Arbeitspaket 3B.100 wurde für die geplanten Oberflächentemperaturmessungen zunächst ein mobiles Messsystem aufgebaut. Dieses umfasst im Wesentlichen einen mobilen Container, welcher das Lasersystem und die

optischen Komponenten in einem klimatisierten sowie staub- und schallgeschützten Gehäuse beinhaltet. Da während des Betriebs des Prüfstandes aus Sicherheitsgründen ein Betreten des Raumes nur begrenzt möglich ist, war es zudem notwendig, dass das Messsystem vollständig durch Fernzugriff gesteuert werden kann. Mit dem im Projekt CEC-2C entwickelten Messverfahren und der durch das IVG der Universität Duisburg-Essen entwickelten faseroptischen Sonde wurden dann erfolgreich Punktmessungen der Oberflächentemperatur in der Brennkammer des CEC-Gasturbinenprüfstandes durchgeführt.

In Arbeitspaketes 3B.200 wurde ein bildgebendes Verfahren zur Messung von Oberflächentemperaturen entwickelt, welches mit Hilfe der am IVG der Universität Duisburg-Essen konstruierten faseroptischen Sonde am CEC Gasturbinenprüfstand eingesetzt werden kann. Ein bildgebendes Messverfahren ermöglicht einen noch detaillierteren Einblick und liefert wertvolle Informationen für die Optimierung des Hochtemperaturbrennkammersystems. Es wurden erfolgreich Messungen der Temperaturverteilung und des Wärmeflusses von Brennkammerwänden einer atmosphärischer Gasturbinenbrennkammer durchgeführt. Hierfür wurden entsprechende Auswertungs- und Kalibrationsroutinen entwickelt.

1.3 Projektrahmenbedingungen

Die leistungsfähigste und effizienteste Gasturbine der Welt wurde 2008 vom Siemens in Irsching in Betrieb genommen. 2011 erreichte sie im kombinierten Gas- und Dampfzyklus einen Wirkungsgrad von 60,75 %. Die SGT5-8000H stellt derzeit nicht nur den Weltrekord an Kraftwerkseffizienz, sondern ist auch der Technologieführer in der Gasturbinentechnologie.

Die Temperaturbelastung von Brennkammerwänden moderner Gasturbinen reicht bis 1620 – 1670 K; zukünftig werden für Gasturbinen maximierter Effizienz bis zu 1770 K in Betracht gezogen. Um die benötigte Kühlluftmengen und die Wärmeverluste in den Brennkammern zu minimieren und damit die Effizienz des Brennstoffeinsatzes zu steigern, müssen die Oberflächen mit hochtemperaturfesten Materialien ausgekleidet oder beschichtet werden (TBC-Beschichtung) oder aus diesen Stoffen hergestellt werden.

1.3.1 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Neben klassischen Methoden zur punktuellen Messung der Wandtemperaturen dieser Komponenten, etwa mittels Thermoelementen, existieren rein optische Methoden, die kontaktfrei arbeiten und prinzipiell auch Informationen über flächige Temperaturverteilungen liefern. Thermometrie mittels thermographischer Phosphore ist eine gering intrusive Methode im Bereich der berührungslosen Temperaturmessung an Oberflächen. Thermographische Phosphore sind eine Stoffgruppe von keramischen Materialien, die mit seltenen Erden oder Übergangsmetallen dotiert werden. Die Phosphoreszenz dieser Stoffe ist temperaturabhängig; sie werden mit UV Laserpulsen zur Lichtemission angeregt. Die Temperaturinformation erhält man z.B. aus der Abklingzeit oder aus dem Intensitätsverhältnis von zwei Linien[1, 2]. Die höchste Genauigkeit in der Bestimmung der Temperatur erreicht man, indem man die Temperaturabhängigkeit der Abklingzeit τ der Phosphoreszenz nach Anregung durch einen Lichtpuls nutzt.

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur muss der phosphoreszierende Leuchtstoff auf das Substrat aufgetragen werden. Hierfür existieren verschiedene Verfahren. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, eine Suspension aus Leuchtstoff und Binder dünnsschichtig auf das Substrat aufzutragen und auszuheizen. Es sind ebenfalls bereits Phosphore direkt in die TBC-Beschichtung eingebettet worden[3, 4]. Die beschichtete Oberfläche wird dann mit kurzen Laserpulsen im UV-Bereich bestrahlt und damit die Phosphoreszenz angeregt. Die emittierte Phosphoreszenz wird mit hoher zeitlicher Auflösung mit einem Detektor (z.B. einem Photoelektronenvervielfacher) gemessen. Die Abklingzeit τ der Phosphoreszenz hängt sehr empfindlich von der Oberflächentemperatur T ab und kann somit zur Temperaturbestimmung genutzt werden.

Dieses Messverfahren wurde bei DLR-VT und in anderen Instituten erfolgreich in Flammenumgebungen eingesetzt und ist gut zur Messung von Oberflächentemperaturen geeignet. Im Projekt Limousine (EU-Projekt,

Marie Curie Initial Training Networks, FP7-PEOPLE-2007-1-1-ITN) wurden am Institut instationäre Vorgänge des Wandwärmeübergangs untersucht. Zur Messung auch schnell veränderlicher Prozesse und deren Auswirkungen auf die Veränderung der Oberflächentemperaturen wurden thermographische Phosphore eingesetzt. Für den dort notwendigen Temperaturbereich wurden erfolgreich Kalibrationen und Messungen durchgeführt.

Im Teilprojekt CEC-2C (Förderkennzeichen 03ET7011M) wurde das Messfahren für die Anwendung in Gasturbinenbrennkammern für Temperaturen bis 1700 K weiterentwickelt und erfolgreich unter Hochdruckbedingungen eingesetzt. Die Adaption auf eine faseroptische Anregung und Detektion wurde vorbereitet und die Machbarkeit untersucht. Bisherige Anwendungen in Gasturbinen nutzten eine Anregung des Phosphors mit einem Laser im Freistrahl[5, 6] oder geringen Arbeitsabständen und geringeren Temperaturen (<1000 K)[7].

Für bildgebende Wandtemperaturmessungen existieren verschiedene Messmethoden. Wie bei punktförmigen Messungen kann ebenfalls die Temperatur aus dem Abklingverhalten bestimmt werden. Hierfür können beispielsweise schnelle Kamerasysteme eingesetzt werden [1, 8, 9]. Als Alternative kann bei einigen Phosphoren auch das Intensitätsverhältnis zweier Linien herangezogen werden. Hierfür wird das Phosphoreszenzlicht durch geeignete Filter auf zwei Kameras (oder verschiedenen Bereichen einer einzigen Kamera) abgebildet. Für YAG:Dy waren in der Literatur bereits Kalibrationsmessungen bis zu 2070 K bekannt [10]. Tatsächliche zweidimensionale Temperaturmessungen in realen Verbrennungssystemen waren allerdings nur bis zu relativ geringen Temperaturen <1000 K etabliert [8, 11]. Die Genauigkeit dieser Methode ist jedoch geringer, als bei der Temperaturbestimmung aus der Abklingzeit, da das Intensitätsverhältnis weniger sensitiv auf die Temperatur reagiert als die Abklingzeit. Zudem sind der optische Aufbau aufwendiger und der Kalibrationsaufwand höher und damit fehleranfälliger. In Verbrennungsumgebungen muss zudem ein möglicher Einfluss durch Flammemissionen berücksichtigt werden.

1.3.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

In dem Vorhaben sollten im wesentlichen zwei Arbeitsziele erreicht werden: Die Bestimmung von Oberflächentemperaturen mit Phosphor Thermometrie am Gasturbinenprüfstand CEC und die Weiterentwicklung zu einem bildgebenden Messverfahren im Labormaßstab.

Hieraus ergab sich folgende Gliederung für das Vorhaben:

- 3B.100: Oberflächentemperaturmessungen am CEC
- 3B.200: Bildgebende Oberflächentemperaturmessungen
- 3B.300: Projektmanagement, Berichte

Im Arbeitspaket 3B.100 wurde zunächst ein mobiles Messsystem für den Einsatz am CEC aufgebaut. Der klimatisierte, mobile Container schützt dabei den Laser, sowie die Optiken für Fasereinkopplung und Detektion, sowie die Messelektronik vor störenden Umwelteinflüssen wie Temperatur, Staub, Lärm und Luftfeuchtigkeit, wie sie am Prüfstand des CEC vorliegen. Zudem beschleunigt es die Auf- und Abbaueiten am Prüfstand erheblich, so dass die Umrüstzeiten für die geplanten Messungen minimiert werden können.

Ursprünglich waren zwei Messkampagnen am CEC geplant. Durch Verzögerungen bei der Sondenentwicklung und Verfügbarkeit des Prüfstands musste das Projekt kostenneutral um 6 Monate verlängert werden und es konnte nur eine Messkampagne durchgeführt werden. Die erste Messkampagne war primär zum Test des Gesamtmesssystems und zur Identifizierung möglicher Verbesserungen gedacht. Da dies so nicht möglich war wurden zur Vorbereitung zum einen ein Test der Beschichtung am CEC durchgeführt und zum anderen zusätzliche Labortests des mobilen Messsystems in Stuttgart durchgeführt. Hierdurch konnte ein Erfolg der Messkampagne am CEC sichergestellt werden.

Im Arbeitspaket 3B.200 *Entwicklung bildgebender Oberflächentemperaturmessungen* wurde ein Messverfahren für zweidimensionale Wandtemperaturmessungen entwickelt und evaluiert. Als am besten geeignet stellte

sich die Verwendung der Abklingzeitmethode heraus, da diese, im Gegensatz zur Intensitätsverhältnismethode, deutlich weniger Einfluss von Hintergrundstahlung aufweist. Insbesondere am CEC konnte ein starker Einfluss durch Hintergrundstahlung und Flammenemissionen beobachtet werden. Messungen wurden sowohl in einem Hochtemperaturofen als auch in einer atmosphärischer Gasturbinenmodellbrennkammer durchgeführt. Die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera erlaubt eine relativ einfache Adaption an die von der Universität Duisburg-Essen entwickelte Sonde zur Messung der Chemilumineszenz, so dass eine faseroptische Umsetzung des Messverfahrens prinzipiell möglich ist.

Im Vorhaben 3B wurden 3 Meilensteine gesetzt und erreicht:

- 3B.MS1 Aufbau eines mobilen Messsystems
- 3B.MS2 Abschluss der Messkampagnen am CEC
- 3B.MS3 Bewertung des bildgebenden Messverfahrens hinsichtlich Umsetzung für faserbasierte Anwendungen

Der Zeitplan des Vorhabens ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

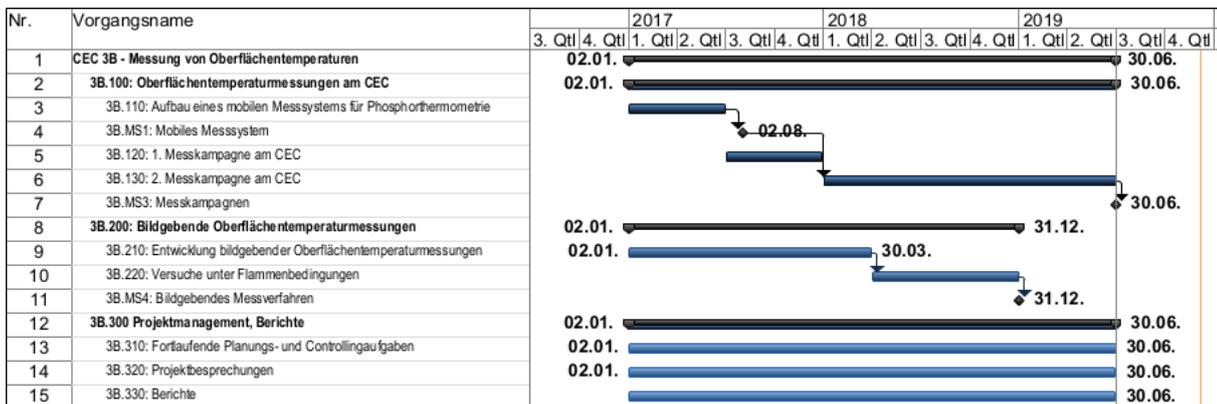


Abbildung 1.1: Zeitplan des durchgeführten Projektes.

Entgegen der ursprünglichen Planung gab es im Arbeitspaket 3B.100 Abweichungen im Zeitplan. Meilenstein 3B.MS1 wurde statt am 30.06.2017 erst am 02.08.2017 erreicht. Da zu diesem Zeitpunkt jedoch schon feststand, dass im 3.QT 2017 keine Messungen am CEC stattfinden werden, hatte dies keinen Einfluss auf den weiteren Projektverlauf. Da die faseroptische Sonde für die Messungen am CEC noch nicht zur Verfügung stand, wurde statt der Messungen mit dem mobilen Messsystem zunächst ein Test der Beschichtung am CEC durchgeführt und das mobile Messsystem unter Laborbedingungen getestet (3B.120). Die Messungen am CEC konnten erst im 1.QT 2019 durchgeführt werden, so dass das Projekt kostenneutral bis zum 30.06.2019 verlängert werden musste. Der Meilenstein 3B.MS3 konnte dadurch ebenfalls erst 6 Monate später als geplant erreicht werden. Entsprechend wurde auch das Arbeitspaket 3B.300 bis zum 30.06.2019 verlängert.

1.3.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Antragsteller DLR Institut für Verbrennungstechnik arbeitete im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens *Oberflächentemperaturmessung im Clean Energy Center mit thermographischen Phosphoren* in den folgenden Punkten eng mit dem Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) der Universität Duisburg-Essen zusammen: Messungen mit Phosphoren am CEC wurden mit der von der Uni Duisburg-Essen entwickelten faseroptischen Sonde durchgeführt. Informationen über Frontoptiken wurden ausgetauscht. Vor den Messungen

am CEC erfolgte ein Test der Optikkomponenten am Hochtemperaturofen in Stuttgart. Für eine faseroptische Umsetzung des 2D-Messverfahrens wurden mögliche Messstrategien diskutiert und benötigte Optiken ausgewählt.

DLR VT arbeitete mit Siemens vor allem bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen am CEC zusammen. Das Beschichtungssystem wurde vor der eigentlichen Messkampagne am CEC getestet und die Haltbarkeit analysiert. Für die Durchführung der Messkampagne erfolgte ein enger Austausch über den Zeitrahmen und die benötigte Infrastruktur am CEC. Die Ergebnisse der Messkampagne wurden Siemens zur Verfügung gestellt.

CEC Phosphore II
Schlussbericht
Teil II
Sachbericht

2 | Einleitung

Durch die Energiewende steigt der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Stromerzeugung mit teilweise stark fluktuierender Leistung. Durch die resultierende steigende Komplexität des Marktes für Stromerzeugung ist eine Erhöhung der Effizienz, sowie eine erhöhte Last- und Brennstoffflexibilität von modernen Gasturbinen notwendig. Angestrebt wird ein möglicher Betrieb der Gasturbine bei 20 % des Auslegungspunktes in Volllast. Gleichzeitig müssen über den gesamten Betriebsbereich niedrige CO und NO_x Emissionen erzielt werden. Die geringeren Temperaturen im Teillastbetrieb führen jedoch oft zu erhöhten CO Emissionen. Es müssen daher Verbrennungstechnologien entwickelt werden, die sowohl ein hohes Maß an Flexibilität, als auch eine hohe Effizienz bei geringen Schadstoffemissionen bieten.

2.1 Allgemeine Zielsetzung

Durch die hohen Temperaturen in einer hocheffizienten Gasturbine sind vor allem die Wände starken Belastungen ausgesetzt. Daher sind die Wände entweder mit einer schützenden Schicht versehen (engl. *thermal barrier coating*, TBC) oder bestehen aus einer feuerfesten Keramik. Zudem ist eine Kühlung stark belasteter Komponenten notwendig. Eine Reduktion der Kühlluft hat direkt zwei positive Aspekte. Zum einen muss dem Verdichter weniger Luft für die Kühlung entnommen werden, so dass sich eine direkte Erhöhung der Effizienz ergibt. Zum anderen gibt es weniger kalte Zonen in Wandnähe, welche zu einer erhöhten CO Emission führen können.

In dieser Hinsicht ist eine genaue Kenntnis der Wandtemperatur von entscheidender Bedeutung. Das vorliegende Projekt liefert hierfür einen wichtigen Beitrag, indem ein Messsystem für den relevanten Temperaturbereich entwickelt und eingesetzt wurde. Klassische Verfahren haben den Nachteil nicht berührungslos zu sein (Thermoelemente) oder keine Messwerte in Echtzeit (Thermofarben) liefern zu können. Thermographische Phosphore bieten eine Alternative um Wandtemperaturen mit hoher Präzision in Echtzeit bestimmen zu können. Das Messprinzip nutzt die Temperaturabhängigkeit des Abklingverhaltens phosphoreszierender Leuchtstoffe aus. Mit dem Messverfahren wurden Punktmessungen der Wandtemperatur am Gasturbinenprüfstand CEC durchgeführt. Hierfür wurde ein mobiles Messsystem aufgebaut und ein geeignetes Beschichtungsverfahren getestet. Weiterhin wurde das Verfahren zu einem bildgebenden Messverfahren weiterentwickelt und im Labormaßstab in einer Gasturbinenmodellbrennkammer getestet.

2.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Ziel des Vorhabens war die punktförmige Bestimmung von Wandtemperaturen in einer Gasturbinenbrennkammer am CEC mit thermographischen Phosphoren und die Weiterentwicklung der Methode zu einem bildgebenden Messverfahren. Das Messprinzip nutzt die Temperaturabhängigkeit der Abklingzeit sogenannter thermographischer Phosphore aus. Es sollten daher folgende technische und wissenschaftliche Ziele erreicht werden.

1. Messung von Oberflächentemperaturen am CEC Gasturbinenprüfstand
2. Entwicklung eines bildgebenden Oberflächentemperaturmessverfahrens

Es wurde daher zunächst ein mobiles Messsystem für den Einsatz am CEC aufgebaut. Der klimatisierte, mobile Container schützt dabei den Laser, sowie die Optiken für Fasereinkopplung und Detektion, sowie die Messelektronik vor störenden Umwelteinflüssen. Zur Vorbereitung der Messungen am CEC wurde zum einen ein Test der Beschichtung am CEC durchgeführt und zum anderen Labortests des mobilen Messsystems in Stuttgart durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wurde das Messverfahren für zweidimensionale Wandtemperaturmessungen weiterentwickelt. Hierfür wurde ein geeignetes Messverfahren entwickelt und getestet, welches sich gut mit der bildgebenden Faseroptiksonde der Universität Duisburg-Essen kombinieren lässt. Ein Test des Messverfahrens erfolgte in einer atmosphärischen Gasturbinenmodellbrennkammer.

2.3 Aufbau des Berichts

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse werden in Kapitel 3 vorgestellt. Das Kapitel ist dabei in drei Abschnitte gegliedert. In Abschnitt 3.1 werden die verwendeten experimentellen Aufbauten sowie die Auswertungsroutinen dargelegt. Anschließend erfolgen die Ergebnisse der Wandtemperaturmessungen am CEC (Abschnitt 3.2). In Abschnitt 3.3 werden die Messungen mit dem bildgebenden Messverfahren vorgestellt. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse des Berichts im Hinblick auf die Vorhabensziele zusammen und gibt einen Ausblick für weitere Arbeiten.

3 Ergebnisse

3.1 Experimentelle Grundlagen und Datenauswertung

Im folgenden werden die verwendeten experimentellen Aufbauten und Messtechniken vorgestellt und die Methoden zur Datenauswertung dargelegt, welche für die beiden Arbeitspakete "Messung von Oberflächentemperaturen am CEC Gasturbinenprüfstand" (Abschnitt 3.2) und "Entwicklung eines bildgebenden Oberflächentemperaturmessverfahrens" (Abschnitt 3.3) identisch waren.

3.1.1 Messprinzip und Datenauswertung

Wird ein Atom oder Molekül mit einem Laserpuls angeregt, so kann dieses unter Emission eines Photons in den Grundzustand zurückkehren. Dieser Prozess wird als laserinduzierte-Fluoreszenz bezeichnet. Ist der Übergang in den Grundzustand quantenmechanisch verboten, findet dieser auf einer längeren Zeitskala statt und der Vorgang wird als Phosphoreszenz bezeichnet. Während Fluoreszenz eine Dauer von einigen Nanosekunden aufweist, findet Phosphoreszenz typischerweise im Zeitbereich von Mikro- oder Millisekunden statt. Zusätzlich kann es zu einem strahlungslosen Übergang in den Grundzustand kommen, sogenanntes Quenching.

Thermographische Phosphore bestehen üblicherweise aus einem keramischen Host-Material, welches mit einer geringen Menge von Übergangsmetall oder Seltenen Erden dotiert sind. Diese sind verantwortlich für die Phosphoreszenz. Je nach Temperatur und Lage der Energieniveaus können Energietransferprozesse stattfinden, welche die Dauer der Phosphoreszenz beeinflussen. Bei sogenannten thermographischen Phosphoren kommt es ab einer bestimmten Temperatur zum Quenching der Phosphoreszenz, welches zu einer Verkürzung der Lebensdauer führt. Mit steigender Temperatur verkürzt sich die Abklingzeit immer mehr, so dass diese als Indikator für die Temperatur genutzt werden kann. Die genauen Energietransferprozesse sind dabei bei jedem Phosphor unterschiedlich und auch abhängig vom Host-Material.

Zur Bestimmung der Abklingzeit der Phosphoreszenz muss das exponentielle Abklingensignal analysiert werden. Hierfür existieren mehrere Verfahren. Einen guten Überblick über die verschiedenen Auswertungsmethoden gibt Fuhrmann *et.al.* [12]. Die Abklingkurve kann im einfachsten Fall mathematisch beschrieben werden durch

$$I(t) = o + A \cdot e^{-t/\tau} \quad (3.1)$$

mit dem Signal I zum Zeitpunkt t , dem Offset o , der Amplitude A und der Abklingzeit τ .

In dieser Arbeit werden im wesentlichen zwei Verfahren eingesetzt. Eine sehr schnelle Methode verwendet die lineare Regression der Summe (LRS) um die Abklingzeit über ein einfaches lineares Gleichungssystem zu ermitteln.[13, 14] Dieser Ansatz wurde in dieser Arbeit im Wesentlichen zur schnellen Bestimmung von Startwerten eingesetzt. Die Anpassung erfolgte anschließend durch nichtlineare Anpassung mit einem Levenberg-Marquardt (LM) [15, 16] Algorithmus. Durch den iterativen Charakter des Optimierungsprozesses ist dieser Ansatz allerdings in etwa um den Faktor 100 langsamer als die LRS-Methode, bietet aber mehr Flexibilität beispielsweise bei der Wichtung von Messpunkten und dem Setzen von Parametergrenzen bei der Anpassung. Auch ist die Genauigkeit etwas höher. Der Offset wird vor der Anpassung aus dem kurzen Zeitfenster direkt vor dem Beginn der Abklingkurve ermittelt. Bei der Anpassung wird der Offset fest vorgegeben und nur Abklingzeit τ und Amplitude A ermittelt. Durch eine gleichzeitige Anpassung des Offset erhöht sich die Anzahl der freien

Parameter. Dies führt zu einer höheren Standardabweichung der ermittelten Abklingzeit und ist daher nicht empfehlenswert.

In den meisten Fällen ist die Abklingkurve der Phosphoreszenz durch komplizierte Energietransferprozesse jedoch nicht monoexponentiell, sondern multiexponentiell. Bei einer multiexponentiellen Anpassung steigt die Anzahl der freien Parameter allerdings stark an, so dass im Allgemeinen keine Verbesserung im Vergleich zu einer einfachen monoexponentiellen Anpassung erzielt werden kann. Wird eine monoexponentielle Anpassung verwendet hängt die ermittelte Abklingzeit auch vom Anpassungsfenster ab, d.h. der Bereich der Abklingkurve, welcher angepasst wurde. Der Beginn der Abklingkurve ist oftmals von schnellen Prozessen und Laserstreulicht überlagert und sollte daher nicht mit angepasst werden. Im hinteren Bereich der Abklingkurve wiederum ist das Signal-zu-Rausch Verhältnis niedrig und sollte daher ebenfalls ausgeklammert werden.

Bei schwach ausgeprägten multiexponentiellen Verhalten kann das Anpassungsfenster als Zeitbereich angegeben werden, bei dem die Intensität auf einen gewissen Prozentsatz des Maximalwertes abgesunken ist (beispielsweise zwischen 60 – 2 % der Amplitude). Dieser Ansatz wird beispielsweise oft für Cavity Ring-down Spektroskopie verwendet.[17]

Ist die Abklingkurve stark multiexponentiell geprägt bietet sich ein iteratives Verfahren von Brübach *et.al.* [18] an. In diesem Fall wird das Anpassungsfenster als Vielfaches der Abklingzeit τ definiert. Konkret bedeutet dies, dass zunächst ein Startwert für τ geraten werden muss. Hieraus ergibt sich ein Zeitfenster für die Anpassung ($t_{\text{Start}} = c_1 \cdot \tau$; $t_{\text{Ende}} = c_2 \cdot \tau$). Der in diesem Fenster ermittelte Wert für τ dient als Wert zur Bestimmung des Anpassungsfensters für den nächsten Durchlauf. Nach einigen Durchläufen (typischerweise 3-5) konvergiert die Anpassung auf einen Wert für τ . Nachteil der Methode ist jedoch, dass die Anpassung länger dauert, da das Anpassungsfenster iterativ angepasst werden muss. Gerade wenn der Anfangsbereich von einem sehr kurzen, starken Signal überlagert ist (z.B. Laserstreulicht oder Fluoreszenz), welches oft der Fall ist, bietet sich dieses Verfahren an, da es deutlich robuster ist. Für das Zeitfenster haben sich Werte von $c_1 = 0,4-1$ und $c_2 = 2-3$ bewährt. In Abbildung 3.1 a ist eine Abklingkurve beispielhaft dargestellt.

Je nach Signalform kann sich auch eine biexponentielle Anpassung anbieten. Die Abklingkurve wird hierbei durch folgende Formel beschrieben:

$$I(t) = o + A_1 \cdot e^{-t/\tau_1} + A_2 \cdot e^{-t/\tau_2} \quad (3.2)$$

Die Kurve wird dann durch zwei Abklingzeiten und Amplituden repräsentiert. Die Anzahl der freien Parameter für die Anpassung ist damit größer als bei einer monoexponentiellen Anpassung. Dies führt üblicherweise zu einer höheren Standardabweichung in der ermittelten Abklingzeit. Eine biexponentielle Anpassung bietet sich nur an, wenn sich beide Abklingzeiten (τ_1 und τ_2) stark unterscheiden. Dies tritt beispielsweise auf, wenn zusätzlich zur Phosphoreszenz noch Fluoreszenz auftritt. Diese kann unter anderem vom Substrat stammen.

Da die bestimmte Abklingzeit neben der Art des Phosphors und der Temperatur auch von anderen Faktoren abhängig ist, wie z.B. der Laserenergie und der Wahl der oben genannten Auswertungsroutine, ist eine Kalibration notwendig (siehe Abschnitt 3.1.2). Durch Auftragung der so bestimmten Abklingzeiten kann eine Kalibrierkurve, wie in Abbildung 3.1 b beispielhaft gezeigt, erhalten werden. An diese kann ein Polynom angepasst werden, welches eine einfache Umrechnung der Abklingzeit in Temperatur ermöglicht.

Neben der Abklingzeit kann bei einigen Phosphoren auch das Intensitätsverhältnis zweier Emissionslinien verwendet werden. Ursache hierfür ist die temperaturabhängige Besetzung verschiedener Energieniveaus, welches im Temperaturgleichgewicht durch die Boltzmann-Verteilung gegeben ist. Der mit dieser Methode zugängliche Temperaturbereich kann sich von der Abklingzeitmethode unterscheiden. Wie bei der Abklingzeitmethode muss zur Bestimmung der Temperatur zunächst eine Kalibrationsmessung unter definierten Bedingungen in einem Ofen erfolgen. Nachteil dieser Methode ist die geringere Sensitivität und damit geringere Genauigkeit der Messmethode. Darüber hinaus ist die Methode anfälliger für systematische Messfehler.

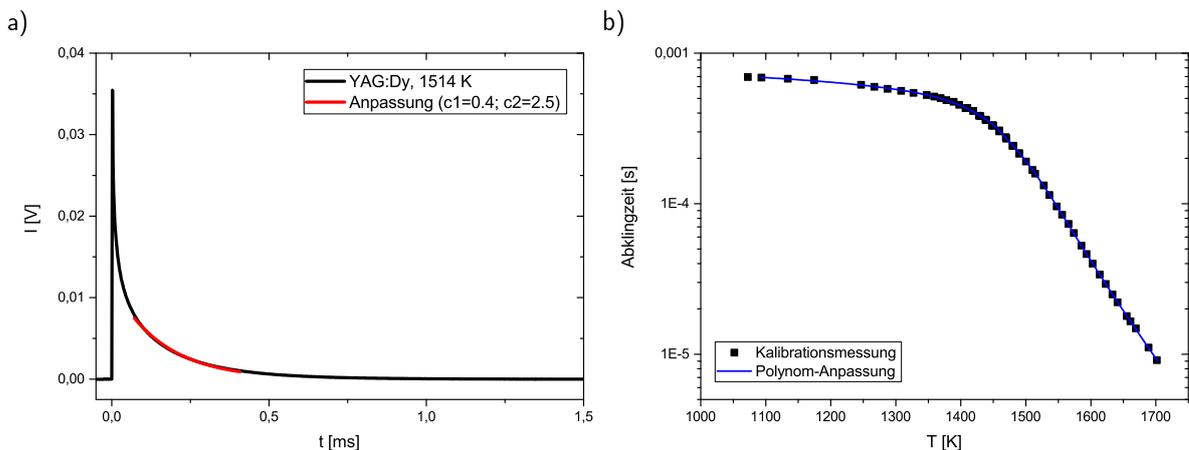


Abbildung 3.1: Abklingkurve und exponentielle Anpassung von YAG:Dy bei 1514 K (a). Kalibrationsdatensatz für YAG:Dy mit Polynom-Anpassung (b).

3.1.2 Kalibration und Beschichtung

Zur Beschichtung eines Substrats mit dem Phosphor wurde das Phosphorpulver mit einem flüssigen Binder (HPC oder LRC Binder, Zyp Coatings) vermischt. Die Mischung wurde mit einer Luftsprühpistole (Badger 100, Düse L, Vordruck 2 bar) auf das Substrat gesprüht. Um die Homogenität der Beschichtung zu erhöhen und um die Schichtdicke besser kontrollieren zu können, wurden mehrere Schichten aufgetragen und nach jeder Schicht mit einer Heißluftpistole getrocknet. Nach der Beschichtung wurde das Substrat (wenn möglich) für eine Stunde bei 350 °C und eine weitere Stunde bei 1000 °C ausgeheizt.

Zur Bestimmung der Schichtdicke wurde ein Schichtdickenmessgerät (Sauter, TE 1250-0.1 FN) verwendet. Die Genauigkeit beträgt ca. 5 µm. Das Messgerät kann Schichtdicken auf metallischen Substraten bestimmen. Bei Beschichtungen auf nichtmetallischen Substraten wurde daher ein Stück Stahlblech im gleichen Beschichtungsvorgang beschichtet.

Für Kalibrationsmessungen und Tests der thermographischen Phosphore wurde ein Hochtemperatur-Kammerofen (Boldt Wärmetechnik, BVP 10/16) eingesetzt. Die Maximaltemperatur des Ofens beträgt 1600 °C. Der Ofen ist mit einem optischen Zugang (Durchmesser 50 mm) ausgestattet um optische Messungen an den Phosphoren zu ermöglichen. Die Messungen erfolgten auf Probestücken, welche in gleicher Weise beschichtet wurden wie das Untersuchungsobjekt. Der optische Aufbau wurde soweit wie möglich identisch gehalten und die gleiche Laserenergiedichte, wie während den Messungen in der Gasturbinenbrennkammer verwendet.

3.1.3 Mobiles Messsystem

Für die Durchführung der Messungen am CEC wurde ein mobiles Messsystem entwickelt, welches alle notwendigen Komponenten beinhaltet, vor Umwelteinflüssen schützt und die Auf- und Abbauzeiten minimiert. Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus einem mobilen klimatisierten Container mit abnehmbaren Wänden mit 40 mm Styrodur Dämmung. Durch eine Durchführung lässt sich ein Lichtleiter in den Container führen. Alternativ ermöglichen Öffnungen in den Wänden die Umsetzung eines Freistrahlaufbaus für den Laserstrahl. Die Seitenwände an drei Seiten sind gleich dimensioniert, so dass die Position der Strahlaukopplung flexibel gehandhabt werden kann. Über ein Anschlusspanel wird der Laser und die Klimatisierung mit Kühlwasser und die Geräte mit Strom versorgt. Durchführungen für PC-Anschlüsse und zur Lasersynchronisierung ermöglichen eine einfache externe Ansteuerung. In Abbildung 3.2 ist das Messsystem und der optische Aufbau dargestellt.

Eine schematische Skizze des optischen Aufbaus zeigt Abbildung 3.3. Für die Anregung der untersuchten Phosphore wurde ein Nd:YAG Laser eingesetzt (Innolas GmbH, Spitlight600, 15 Hz Pulsrate, 6 ns Pulslänge).

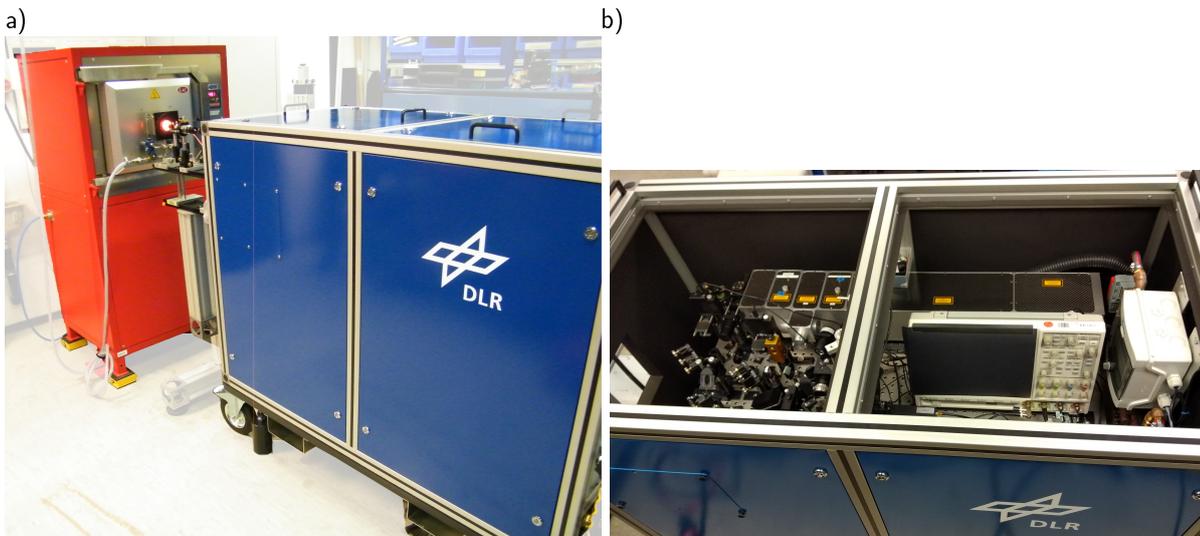


Abbildung 3.2: Fotos des mobilen Messsystems. a) Außenansicht während Kalibrationsmessungen am Hochtemperaturofen. b) Blick auf den optischen Aufbau im Container.

Zur Erzeugung von grünen und UV-Licht wurde die Fundamentale des Lasers (1064 nm) frequenzvervielfacht um so Laserlicht bei 532, 355 und 266 nm zu erzeugen. Der Laseraufbau wurde dabei so gestaltet, dass alle drei Wellenlängen gleichzeitig genutzt werden können. Die Laserenergie kann über variable Abschwächer eingestellt werden und über elektrische Klappspiegel wahlweise auf einen Energiemesskopf oder in Richtung Fasereinkopplung gelenkt werden. Je nach Phosphor ist dadurch ein schneller Wechsel zur optimalen Anregungswellenlänge möglich. Wahlweise kann das Laserlicht als Freistrahл aus den Container geleitet werden, oder in einen Lichtleiter eingekoppelt werden.

Zur Einkopplung von UV-Laserlicht (355 nm oder 266 nm) in den Lichtleiter wurde der Laserstrahl mit einer Sammellinse ($f=75$ mm) auf die Faserendfläche fokussiert. Um eine Zerstörung der Faser durch zu hohe Laserenergiedichte zu verhindern wurde dabei der Fokuspunkt des Strahls wenige Millimeter vor die Faserend-

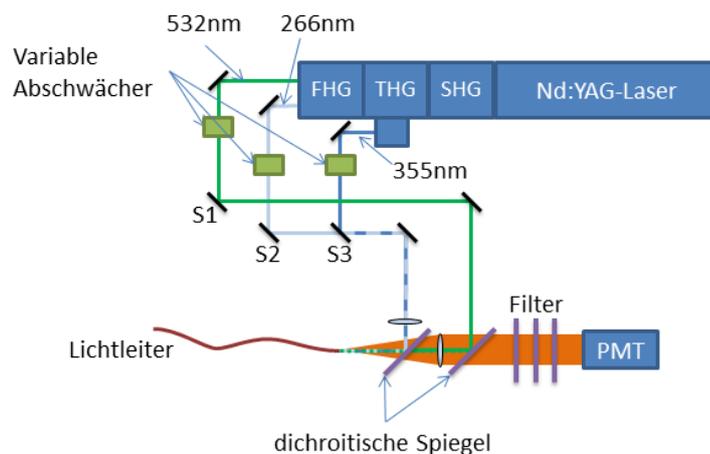


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des verwendeten optischen Aufbaus. Die Spiegel S1, S2 und S3 können entfernt werden um den Laserstrahl als Freistrahл aus dem Container zu leiten.

fläche gelegt. Die detektierte Phosphoreszenz wurde über den gleichen Lichtleiter wie das Laserlicht transportiert. Ein dichroitischer Spiegel trennt das langwellige Phosphoreszenzlicht vom kurzwelligen Laserlicht. Anschließend wird es mit einer Linse ($f=+50\text{ mm}$) kollimiert. Dieselbe Linse wird auch zur Fokussierung des Laserlichts bei 532 nm verwendet. Ein weiterer schmalbandiger dichroitischer Spiegel (SEM-NFD01-532-25x36, Laser 2000 GmbH) trennt Laserlicht bei 532 nm von der Phosphoreszenz, bevor diese einige Filter passiert. Ein Kaltglassfilter (KG4, Schott) und ein Langpassfilter (400 nm , FELH0400, Thorlabs) reduziert Einflüsse durch Wärmestrahlung, Flammenemissionen und Laserstreulicht. Je nach thermographischen Phosphor wurde ein entsprechender Bandpassfilter (Bandbreite 10 nm) eingesetzt. Dieser lässt sich über ein elektronisches Filterrad auswählen. Die Detektion erfolgte mit einem Photoelektronenvervielfacher¹ (11526-20-NF, Hamamatsu). Dieser lässt sich über ein Synchronisationssignal schalten ("gate" Funktion). Hiermit lässt sich zum einen die Sättigung des PMT durch Wärmestrahlung im Zeitbereich zwischen den Laserpulsen verhindern und zum anderen der Beginn des Signals abschneiden, wenn dieses durch Laserstreulicht oder Fluoreszenz überlagert ist. Dies spielt insbesondere bei der Fasereinkopplung des Lasers eine große Rolle. Hierbei ist das Signal durch ein intensives, kurzes Signal überlagert, wobei es sich um Fluoreszenz und Raman Streuung in dem Lichtleiter handelt[19].

Das Signal des PMTs wurde mit einem Oszilloskop aufgezeichnet (Agilent, DS07034B, 350 MHz), auf einen PC übertragen und dort mit einem LabVIEW Programm aufgezeichnet und abgespeichert. Das Programm ermöglicht die Datenauswertung in Echtzeit, so dass bei vorhandener Kalibrationsdatei direkt die Temperaturen angezeigt werden können.

3.2 Messung von Oberflächentemperaturen am CEC Gasturbinenprüfstand

Die Messungen am Gasturbinenprüfstand CEC erfolgten in enger Zusammenarbeit mit Siemens und dem IVG der Universität Duisburg-Essen. Siemens war verantwortlich für die Durchführung und Koordination der Verbrennungstests und stellte entsprechende Infrastruktur vor Ort bereit. Das IVG hat im Teilprojekt 3C eine faseroptische Sonde entwickelt, welche für den optischen Zugang benötigt wurde. Das DLR war für die Durchführung und Auswertung der Wandtemperaturmessungen verantwortlich. Zur Vorbereitung der Messungen wurde zunächst das Beschichtungssystem am CEC getestet. Nach einem erfolgreichen Test der Sondenoptik mit dem mobilen Messsystem an einem Hochtemperaturofen am DLR wurden die Wandtemperaturmessungen am CEC durchgeführt.

3.2.1 Test des Beschichtungssystems

Zur Vorbereitung der Wandtemperaturmessungen wurde zunächst die Beschichtung am CEC in der später zu untersuchenden Brennkammer getestet. Es wurden zwei Binder ausgewählt, die sich in vorherigen Experimenten als potentiell geeignet erwiesen hatten. Als Phosphor wurde YAG:Dy (Phosphor Technology) verwendet, da dieser den erwarteten Temperaturbereich (ca. $1400\text{--}1700\text{ K}$) abdeckt. Zur Beschichtung der TBC-Oberfläche wurden je $0,3\text{ g}$ Phosphorpulver (YAG:Dy) mit 3 ml flüssigen Binder (LRC und HPC, Zyp Coatings) vermischt und auf das TBC aufgesprüht. Die Dicke der Beschichtung betrug ca. $30\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$. In einer Untersuchung von Pilgrim *et al.* unter vergleichbaren Bedingungen konnte gezeigt werden, dass für eine Beschichtungsdicke von bis zu $35\text{ }\mu\text{m}$ der Unterschied zwischen gemessener und tatsächlicher Oberflächentemperatur $<1\%$ beträgt[20]. Die verwendete Schichtdicke ist damit ein Kompromiss zwischen Signalstärke und Messgenauigkeit.

Die Inspektion der Beschichtung erfolgte nach mehreren Betriebstagen und insgesamt ca. 20 Betriebsstunden unter Flammenbedingungen, nachdem die Brennkammerkomponente wieder ausgebaut worden war. Neben einer visuellen Inspektion wurde ein Emissionsspektrum aufgenommen. Ein Foto der beiden Beschichtungen nach dem Ausbau ist in Abbildung 3.4a) gezeigt. Bereits visuell ist erkennbar, dass der LRC Binder besser gehalten hat als der HPC Binder.

¹engl. *photomultiplier tube*, PMT

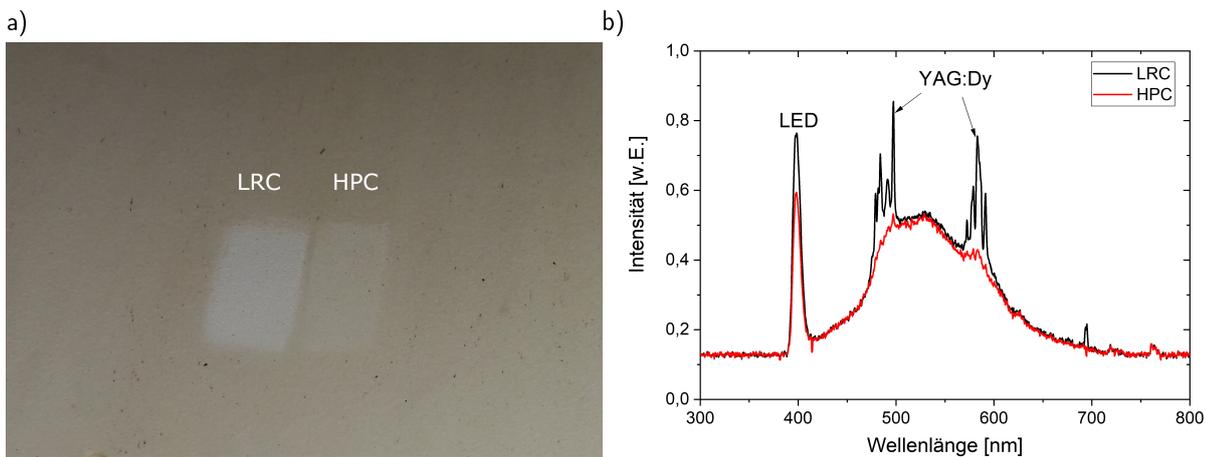


Abbildung 3.4: a): Foto der Beschichtung am CEC nach ca. 20 Betriebsstunden. b): Emissionsspektren der beiden Beschichtungen.

Dies bestätigen auch die Emissionsmessungen (siehe Abbildung 3.4b). Hierfür wurde der Phosphor mit einer UV-LED angeregt (365 nm mit UG1-Farbglasfilter) und die Phosphoreszenz mit einem Spektrometer (AvaSpec, Avantes) hinter einem 400 nm Langpassfilter (GG400, Schott) aufgezeichnet. Das Signal bei 400 nm kann der LED zugeordnet werden. Bei der Beschichtung mit LRC Binder können eindeutig die Emissionslinien von Dysprosium identifiziert werden (um 480 nm und 600 nm). Bei der HPC-Beschichtung ist das Spektrum hingegen nur schwach erkennbar. In beiden Fällen ist das Spektrum des Phosphors durch ein breitbandiges Spektrum überlagert. Vermutlich handelt es sich hierbei um das Spektrum des TBC-Substrats.

3.2.2 Experimentelles

Die Messungen wurden am Gasturbinenprüfstand Siemens Clean Energy Center (CEC) in Ludwigsfelde bei Berlin durchgeführt. In Abbildung 3.5 ist die Anlage und der verwendete Aufbau schematisch dargestellt. Der Verbrennungsprüfstand besteht im wesentlichen aus einem Druckbehälter mit einer austauschbaren sogenannten "Flow Box", welche die Strömungsbedingungen in einer realen Gasturbine nachbildet. In dem Druckgehäuse können verschiedene Brennergeometrien getestet werden. Der optische Zugang wurde mit einer wassergekühlten optischen Sonde realisiert, welche vom IVG der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde. Details zu der Sonde und dem Prüfstand können den entsprechenden Abschlussberichten der Teilprojekte 3A und 3C entnommen werden.

Der Kopf der Sonde ist modular gestaltet um verschiedene Optiken aufzunehmen. Für die Wandtemperaturmessungen wurde das Laserlicht mit einem Lichtleiter (FVA1000, high-OH, 1 mm Kerndurchmesser, Länge 18 m, LaserComponents GmbH) durch die flexible Sonde zum Sondenkopf geleitet. Zur Anregung des Phosphors wurde Laserlicht bei 355 nm verwendet. Die Kollimationsoptik ($f=+20$ mm, Durchmesser 12,7 mm) erzeugte auf der gegenüberliegenden Wand (Abstand ca. 40 cm) einen Punkt von ca. 3 cm Durchmesser. Die Einkoppel- und Transmissionseffizienz für den Laserstrahl betrug ca. 70 %. Bei einer Laserenergie von 1,6 mJ auf der Wand ergibt sich eine Laserenergiedichte auf der beschichteten Wand von $0,21 \text{ mJ/cm}^2$.

Die Beschichtung des TBC auf der Brennkammerwand wurde mit dem Phosphor (YAG:Dy, Dotierungsgrad 3 %) und Binder (LRC) durchgeführt, welches sich während des Tests der Beschichtung am CEC als am haltbarsten erwiesen hat. Für die Detektion wurde ein Bandpassfilter bei 458 nm (Bandbreite 10 nm) eingesetzt.

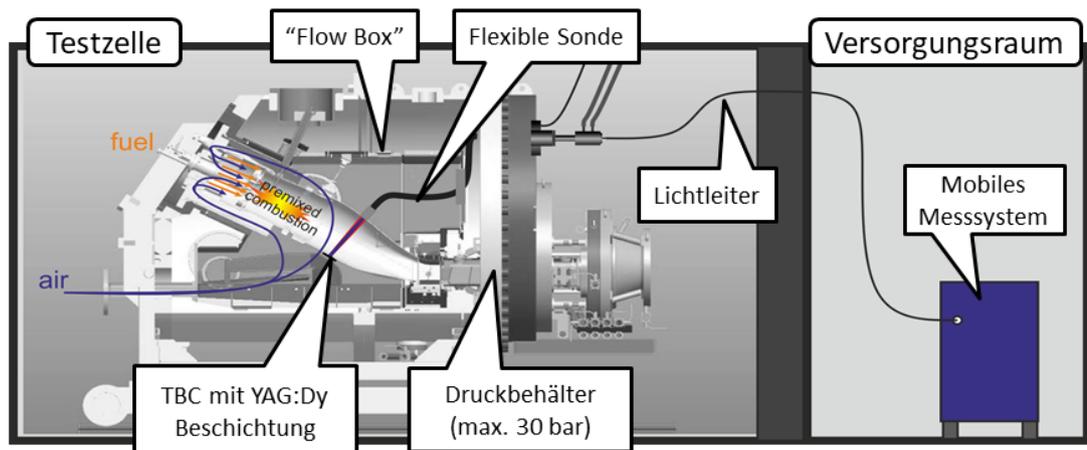


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Prüfstandes am CEC.

3.2.3 Kalibration

Die Kalibrationsmessungen wurden in Stuttgart am Hochtemperaturofen auf einem kleinen TBC Probestück durchgeführt. Um das TBC-Probestück zu erhalten wurde ein mit TBC beschichtetes Stück Stahlsubstrat mit Königswasser (Salzsäure und Salpetersäure im Verhältnis 1:3) für mehrere Stunden behandelt, bis sich die TBC-Beschichtung vom Substrat ablöste. Die Beschichtung und die experimentellen Randbedingungen wurden möglichst identisch zu den Messungen am CEC gehalten. Im Gegensatz zu den Messungen am CEC wurde ein kürzerer Lichtleiter (5 m statt 18 m) und eine andere Kollimationsoptik ($f=+100\text{ mm}$) verwendet. Der ausgeleuchtete Punkt hatte einen Durchmesser von ca. 0,5 cm statt 3 cm am CEC. Die Laserenergie wurde entsprechend angepasst um die Laserenergiedichte für beide Messungen konstant zu halten ($0,21\text{ mJ/cm}^2$).

Die Kalibrationsdaten und die hieraus berechnete Sensitivität und Standardabweichung bei den entsprechenden Temperaturen sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Im temperatursensitiven Bereich des Phosphors (oberhalb von etwa 1350 K) beträgt die Präzision etwa 0,1-0,5 %. Diese wurde aus der Standardabweichung von 150 Einzelschussmessungen bestimmt. Zur Messgenauigkeit trägt weiterhin hauptsächlich die Temperaturbestimmung im Ofen mit 0,5–0,75 % bei.

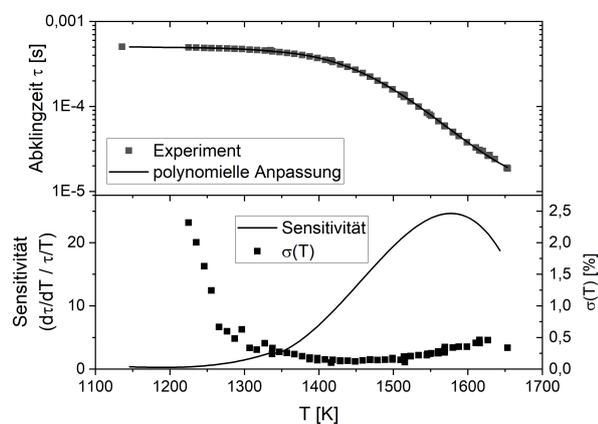


Abbildung 3.6: Ergebnisse der Kalibrationsmessungen für die Wandtemperaturmessungen am CEC.

3.2.4 Wandtemperaturmessungen

Während der Messkampagne am CEC konnten an zwei Messtagen erfolgreich Wandtemperaturmessungen durchgeführt werden. In Abbildung 3.7 ist das verwendete "gating" Schema des PMT und beispielhaft Abklingkurven mit verschiedenen Mittelungen dargestellt. Vor dem Laserpuls wurde der PMT für 1 ms angeschaltet um das Niveau der Hintergrundstrahlung zu bestimmen. Dann wurde der PMT für 1 μ s ausgeschaltet um ein starkes Störsignal auszublenden. Danach wurde das eigentliche Phosphoreszenzsignal aufgezeichnet. Bei dem Störsignal handelte es sich vermutlich um laserinduzierte Raman-Streuung oder Fluoreszenz innerhalb des langen Lichtleiters. Durch die Verwendung von nur einem Lichtleiter wird dieses Signal von der Detektionsoptik ebenfalls eingefangen. In einer ähnlicher Untersuchung wurde dies ebenfalls beobachtet[19]. Wie in dieser Arbeit wurde dort eine Anregungswellenlänge von 355 nm verwendet um mit YAG:Tm Wandtemperaturmessungen durchzuführen. Während bei 365 nm keine sinnvolle Signaldetektion möglich war, konnten bei einer Detektionswellenlänge von 456 nm (welches fast identisch mit der hier verwendeten Wellenlänge von 458 nm ist) noch Messungen durchgeführt werden. Die Signale wurden allerdings stark durch das kurze Störsignal am Beginn der Abklingkurven beeinträchtigt. Als eine mögliche Lösung wurde die Verwendung eines Faserbündels mit separaten Lichtleitern für Anregung und Detektion und zusätzlicher spektraler Filterung im Sondenkopf vorgeschlagen. Diese Lösung ist experimentell allerdings sehr aufwändig und teuer. Als weitere Lösung wurde die Anregung von anti-Stokes verschobener Lumineszenz demonstriert[21]. Diese Lösung ist allerdings nicht ohne weiteres für jeden Phosphor umsetzbar. Der in dieser Arbeit verwendete PMT mit "gate" Funktion ist eine relativ einfache und elegante Lösung für das genannte Problem. Zusätzlich lässt sich hiermit der PMT in Perioden zwischen den Laserpulsen ausschalten, um ein Sättigen durch Hintergrundstrahlung zu vermeiden.

Limitierend für die Messgenauigkeit bei den Messungen am CEC war der starke Einfluss durch Hintergrundstrahlung. Hierbei handelte es sich vermutlich um CO_2^* -Chemolumineszenz, welches ein breitbandiges Emissionsspektrum aufweist[22, 23]. Einzelschussmessungen waren dadurch nicht möglich. Bereits 10 Mittelungen verbessern die Signalqualität jedoch signifikant (Abb.3.7a). Nach 100 gemittelten Laserpulsen beträgt die Standardabweichung etwa 1 % (15 K) und verbessert sich durch eine noch höhere Anzahl Mittelungen kaum noch. Auch ist eine geringe systematische Verschiebung zu niedrigeren Temperaturen bei weniger als 100 Mittelungen erkennbar (Abb.3.7b). Für die folgenden Auswertungen wurden daher jeweils 100 Einzelschüsse (entsprechend einer Messdauer von 6,7 s bei 15 Hz Repetitionsrate) einer Messserie gemittelt.

Die zeitlichen Verläufe der Wandtemperatur für die beiden Messtage sind in Abbildung 3.8 gezeigt. An beiden Tagen wurden Messungen bei bis zu 8 bar durchgeführt. Dabei konnten die Temperaturen während der

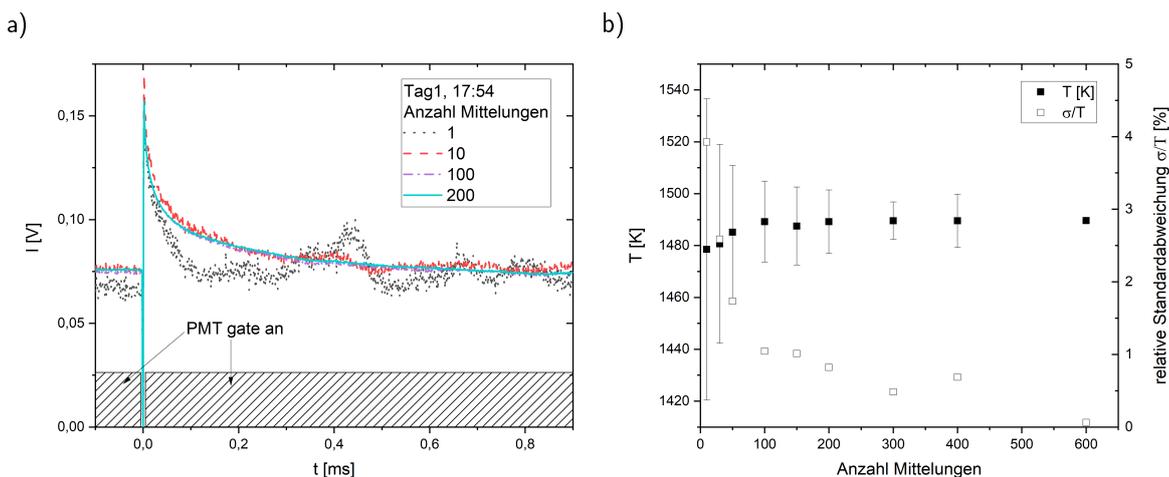


Abbildung 3.7: a) Beispielhafte Abklingkurven einer Messreihe mit 1–200 Mittelungen. Das verwendete PMT "gate" ist im schraffierten Bereich dargestellt. b) Ermittelte Temperatur und Standardabweichung für eine verschiedene Anzahl von Mittelungen.

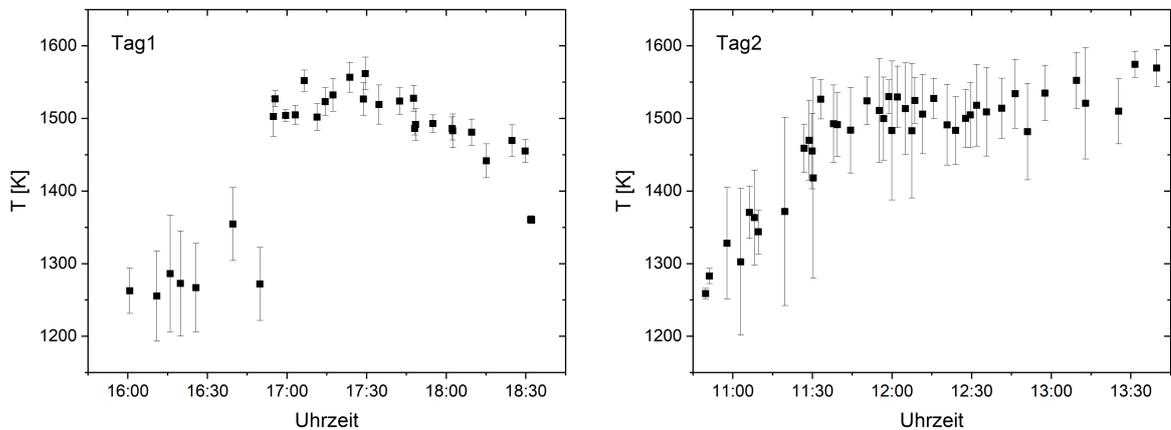


Abbildung 3.8: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den beiden Messtagen am CEC.

Aufheiz- und Hochfahrphase, der Variation der Leistung und dem Ausschalten des Brenners kontinuierlich verfolgt werden. Für jede Messserie wurden typischerweise 900 Laerpulse aufgenommen. Durch ein Verrutschen der Fasersonde in der Dichtung am Druckbehälter kam es am zweiten Messtag jedoch zu einem Bruch des Lichtleiters in der Sonde (ca. um 13:45). Hierdurch wurden weitere Messungen bei ursprünglich geplanten höheren Drücken unmöglich. Prinzipiell wären Messungen aber auch bei höheren Drücken möglich gewesen. Während des verfügbaren Zeitfensters der Messkampagne war eine Reparatur der Sonde jedoch nicht mehr möglich.

Die Signalqualität war am zweiten Messtag etwas schlechter als am ersten Tag. Wahrscheinliche Ursache hierfür war eine allmähliche Degradierung der YAG:Dy-Beschichtung auf dem TBC. Die schlechtere Signalqualität führte zu einer insgesamt höheren Messunsicherheit an diesem Messtag. Da der verwendete Phosphor für Temperaturen unterhalb von 1400 K nur eine geringe Sensitivität aufweist (siehe Abb. 3.6) sind die Temperaturen für diesen Temperaturbereich weniger genau. Dies betrifft allerdings nur die Vorwärmphase des Brenners. Bei den eigentlichen Testbedingungen (Tag 1 ab ca. 17:00 und Tag 2 ab ca. 11:30) steigt die Temperatur auf etwa 1500 K, bei welcher der Phosphor eine optimale Sensitivität aufweist.

An beiden Versuchstagen wurden verschiedene Betriebspunkte untersucht. Diese werden im Folgenden mit berechneten adiabatischen Flammentemperaturen an der Messposition und mit Temperaturen auf der Brennkammeraußenseite, die mit Thermoelementen gemessen wurden, verglichen. In Abbildung 3.9a) sind die Temperaturen für die untersuchten Betriebspunkte dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass alle drei Temperaturverläufe einen ähnlichen Verlauf zeigen. Das Minimum bei Betriebspunkt 9 wird beispielsweise von allen drei Temperaturverläufen gut wiedergegeben. Die Betriebspunkte 12 und 16 (markiert mit Kreisen in Abb. 3.9a) waren sehr ähnlich. Diese wurden mit einem Abstand von 1,5 h am selben Messtag untersucht. Hier wurden nahezu identische Wandtemperaturen gemessen (1511 K und 1510 K), welches die gute Reproduzierbarkeit des Messverfahrens zeigt.

Hervorzuheben ist der gegenläufige Trend zwischen Betriebspunkt 1–7 für die Thermoelementtemperaturen im Vergleich zu den anderen Temperaturen. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich die Thermoelemente an der Außenseite der Brennkammer befinden und somit auch von der umströmenden Luft beeinflusst werden. Ein Vergleich zwischen der adiabatischen Flammentemperatur mit den Wandtemperaturen auf der Brennkammerinnenseite ist daher sinnvoller. Dies zeigt wiederum, dass die Werte der Thermoelemente nur bedingt Rückschlüsse auf die Wandtemperaturen der Brennkammerinnenseite liefern.

Für eine ausgewählte Serie von Betriebspunkten wurden die gemessenen Wandtemperaturen gegen die berechnete adiabatische Flammentemperatur aufgetragen (Abb. 3.9b). Wie erwartet ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Der Punkt bei einer normierten adiabatischen Flammentemperatur von 1,02 scheint jedoch

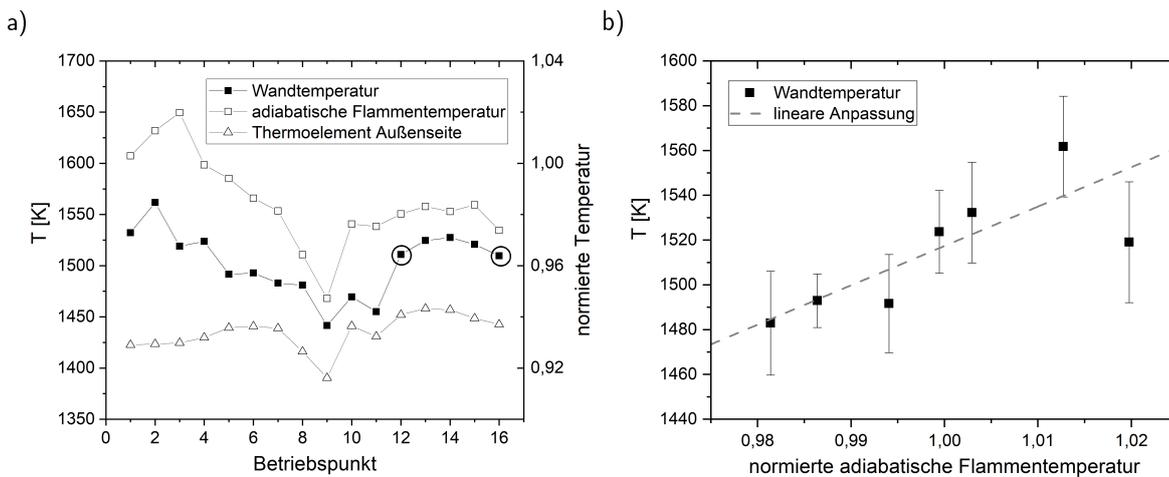


Abbildung 3.9: a) Gemessene Wandtemperaturen (geschlossene Symbole) und normierte Temperaturen (offene Symbole) für die untersuchten Betriebspunkte. Linien sind zur besseren Übersichtlichkeit eingezeichnet. b) Auftragung der Wandtemperatur gegen die normierte, adiabatische Flammentemperatur für eine ausgewählte Testserie.

zu niedrig zu sein. Um einen systematischen Fehler durch die Auswertungsroutine auszuschließen wurden verschiedene Auswertungsstrategien angewendet (z.B. frühe und späte Anpassungsfenster und bi-exponentielle statt monoexponentielle Anpassung), welches jedoch nur minimalen Einfluss auf das Ergebnis hatte. Bei zukünftigen Messkampagnen könnte dieser Aspekt gezielter untersucht werden. Eventuell ist hier der einfache Vergleich mit einer adiabatischen Flammentemperatur auch nicht ausreichend.

3.3 Entwicklung eines bildgebenden Oberflächentemperatormessverfahrens

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Entwicklung eines bildgebenden Messverfahrens vorgestellt.

3.3.1 Experimentelles

Die Messungen wurden in einer atmosphärischen Gasturbinenmodellbrennkammer SFB606 GTMC durchgeführt. Der schematische Aufbau ist in Abb. 3.10 dargestellt. Die Brennkammer wurde in der Vergangenheit bereits intensiv untersucht. Für Details wird daher auf die Literatur[24, 25] verwiesen und nur die wesentlichen Daten kurz vorgestellt.

Die Brennkammer hat eine Grundfläche von 89×89 mm und eine Höhe von 112 mm. Luft strömt durch zwei konzentrische, korotierende Drallerzeuger mit jeweils separaten Plenen. Der Luftmassenstrom kann unabhängig eingestellt werden und somit das Verhältnis L der Massenströme zwischen äußeren $\dot{m}_{air,out}$ und inneren $\dot{m}_{air,in}$ Drallerzeuger eingestellt werden. Bei $L = 1,6$ ist der Druckverlust über beide Drallerzeuger gleich.

Methan wurde durch einen Ring aus 60 Löchern (Durchmesser je 0,5 mm) in der inneren Luftdüse, 12 mm unterhalb des Düsenausgangs eingedüst. Hieraus resultiert eine teilweise ("technische") Vormischung von Brennstoff und Luft. Es wurden Flammen mit thermischer Leistung P_{th} zwischen 22,5 und 30 kW (und einem entsprechenden Äquivalenzverhältnis φ zwischen 0,63 und 0,83) und L zwischen 1,2 und 2,0 untersucht. Eine Übersicht der Flammenbedingungen ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

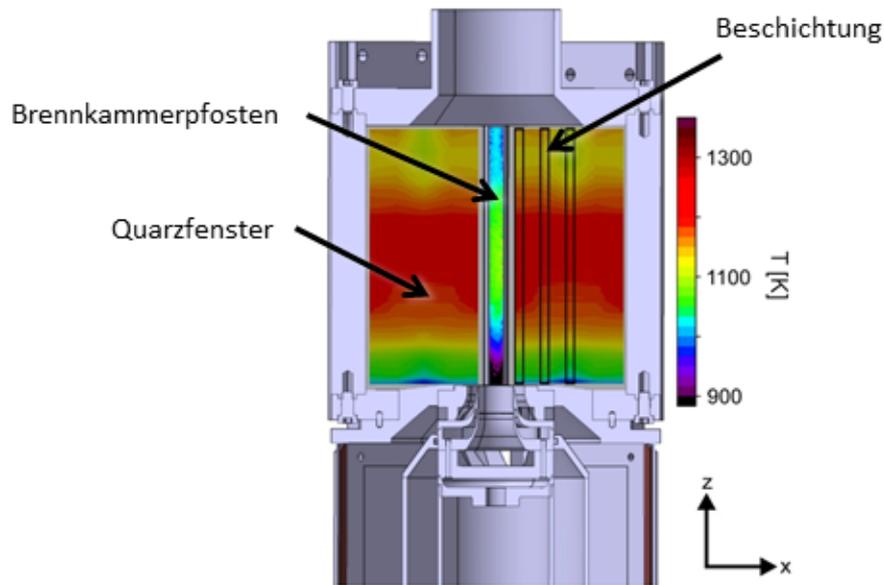


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung der Gasturbinenmodellbrennkammer SFB606. Die Temperatur auf den Quarzwänden und dem Brennkammerpfosten der Flamme A0,70 ist als Falschfarben dargestellt. Die Bereiche mit phosphoreszierender Beschichtung sind als schwarze Rechtecke hervorgehoben. Zwischen den Bereichen wurden linear interpoliert.

Die Brennkammer bietet von allen vier Seiten sehr guten optischen Zugang durch Fenster aus Quarz (1,75 mm dick). Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Zentrum des Drallerzeugers in der Ebene des Düsenausgangs.

Phosphorbeschichtungen wurden auf den Brennkammerpfosten und den Quarzwänden als 5 mm breite, vertikale Streifen aufgebracht. Eine Mischung aus 0,2 g Phosphor (YAP:Eu und YAG:Eu, Phosphor Technology) in 1 ml HPC Binder (Zyp Coatings) wurde verwendet. Um einen möglichen Einfluss auf den Strahlungswärmeverlust zu minimieren, wurden auf den Quarzfenstern drei vertikale Streifen bei $x = 0, 16,5$ und 33 mm aufgebracht (in Abb.3.10 sind die Bereiche als schwarze Rechtecke hervorgehoben), und nicht das gesamte Fenster beschichtet. Um Wandtemperaturmessungen auf der Innen- und Außenseite durchzuführen wurde das Fenster jeweils umgedreht. Die Schichtdicke wurde mit einem Schichtdickenmessgerät (Sauter, TE 1250-0.1FN) auf einem gleichzeitig beschichteten Metallblech kontrolliert und eine Dicke von ca. $10 \mu\text{m}$ erzielt. In experimentellen[26] und theoretischen[20] Untersuchungen konnte für Schichtdicken $< 20 \mu\text{m}$ nur ein vernachlässigbarer Einfluss auf die Temperatur festgestellt werden. Zusätzlich wurden in einem der Brennkammerpfosten an vier Positionen Thermolemente (Typ K) ca. $0,1$ mm unterhalb der Oberfläche platziert.

Flamme	P_{th} [kW]	φ	L	$\dot{m}_{air,in}$ [g/min]	$\dot{m}_{air,out}$ [g/min]	\dot{m}_{CH_4} [g/min]
A0,63	22,5	0,63	1,6	283	453	27
A0,70	25,0	0,70	1,6	283	453	30
A0,83	30,0	0,83	1,6	283	453	36
B0,70	25,0	0,70	1,2	335	401	30
C0,70	25,0	0,70	2,0	245	491	30

Tabelle 3.1: Übersicht über die untersuchten Flammen im SFB606 GTMC.

Für die bildgebenden Wandtemperaturmessungen wurde das gleiche Lasersystem verwendet, wie für die fasergekoppelten Messungen am CEC mit dem mobilen Messsystem (siehe Abschnitt 3.1.3). Der Laserstrahl wurde hierfür allerdings nicht in eine Faser eingekoppelt, sondern direkt als Freistrahls aus dem mobilen Messsystem herausgeführt. Hierdurch können höhere Laserenergien und eine bessere Strahlqualität erzielt werden, welche für die bildgebenden Messungen notwendig sind. Zur Anregung der Phosphore wurde die vierte harmonische (266 nm) des Nd:YAG-Lasers mit einer Pulsenergie von 20 mJ verwendet. Der Laserstrahl wurde mit einer zylindrischen ($f=-25$ mm) und einer sphärischen Linse ($f=+600$ mm) zu einem leicht divergenten Laserlichtband aufgeweitet. Die beleuchtete Fläche betrug 115×5 mm², so dass sich eine Laserenergie-dichte von ca. 3 mJ/cm² ergibt.

Phosphoreszenz wurde mit einer Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera (LaVision HSS 8, AOI 128 x 24 pixel, Bildrate 775 kHz) mit einem Weitwinkelobjektiv ($f = 12$ mm, $f/1,4$, Computar) aufgezeichnet. Der Winkel zwischen Kamera und Laserstrahl betrug ca. 30°. Ein Langpassfilter (FELH0600, Thorlabs) wurde verwendet um Laserstreulicht und Flammenemissionen zu blockieren und das Phosphoreszenzlicht zu transmittieren (Hauptemissionswellenlänge 615 nm[27]). Die Aufnahme der Kamera startete 0,28 ms vor dem Laserpuls um die Hintergrundintensität aufzunehmen. Je nach Abklingzeit des Phosphors wurden 600 bis 3000 Bilder aufgenommen und für jede Flammenbedingung typischerweise 200 Laerpulse. Aus den Bilderreihen ergeben sich für jeden Bildpunkt Phosphoreszenzabklingkurven, die analog zu den Messungen mit dem PMT ausgewertet werden.

Zweidimensionale Ergebnisse sind beispielhaft in Abbildung 3.10 dargestellt. Innerhalb der Messbereiche (der Brennkammerpfosten und die drei mit Rechtecken markierten Streifen auf dem Quarzfenster) wurde ein 2D Temperaturfeld bestimmt. Die Temperaturen auf dem Fenster zwischen diesen Bereichen wurden linear interpoliert und zur besseren Darstellung an der Symmetrieachse gespiegelt.

3.3.2 Phosphorauswahl und Kalibration

Die Temperaturen in der Brennkammer decken einen breiten Temperaturbereich von über 400 K ab. Daher wurde eine Kombination von Phosphoren verwendet. Als geeignete Phosphore für Temperaturen zwischen 900–1350 K wurden YAP:Eu und YAG:Eu identifiziert[27]. Zusätzlich wurden Messungen mit SV67 (Osram) durchgeführt, welcher bis ca. 1000 K eingesetzt werden kann. Kalibrationsmessungen wurden auf einem separaten Probestück in einem optisch zugänglichen Ofen (M104, Heraeus) durchgeführt. 50 bis 100 Laserpulse wurden bei jeder Ofentemperatur aufgenommen. Die Abklingzeiten wurden durch eine biexponentielle Anpassung ermittelt. Das Anpassungsfenster wurde vom Beginn der Kurve bis zu dem Zeitpunkt, als die Intensität auf 5 % des Anfangswertes gesunken war, gewählt. Die entsprechenden Abklingzeiten für Temperaturen zwischen 750–1350 K sind in Abbildung 3.11 dargestellt. An die gemessenen Werte wurde ein Polynom angepasst, welches eine einfache Umrechnung von Abklingzeit in Temperatur ermöglicht. Zusätzlich zu den mit der Kamera bestimmten Abklingzeiten sind auch die Werte von vorherigen Punktmessungen mit einem PMT-System gezeigt[28]. Die Übereinstimmung von beiden Messmethoden ist sehr gut. Bei gleicher Temperatur sind die Abklingzeiten der PMT Messungen etwas kürzer, welches auf die höhere Laserenergie-dichte (ca. 50 mJ/cm² bei den PMT Messungen und ca. 3 mJ/cm² mit der Kamera) zurückgeführt werden kann. Höhere Laserenergie-dichten resultieren in kürzeren Abklingzeiten[29], wobei die genaue Ursache hierfür noch nicht bekannt ist.

Zusätzlich zu den Abklingzeiten ist auch die Sensitivität der Phosphore dargestellt. Diese ist die normierte Ableitung der Kalibrationskurve. YAP:Eu wurde für Temperaturen zwischen 850–1150 K verwendet und YAG:Eu für Temperaturen oberhalb von 1100 K. Da mit dem verwendeten Ofen nur Temperaturen bis 1260 K erreicht werden konnten, wurde die Kalibrationskurve für YAG:Eu linear extrapoliert. In den angegebenen Temperaturbereich ist der Sensitivitätsfaktor für beide Phosphore größer als 20. Gerade bei kurzen Abklingzeiten steigt die Standardabweichung der ermittelten Abklingzeit auf bis zu 10 %, durch die geringe Anzahl an Datenpunkten. Durch den hohen Sensitivitätsfaktor ist die Standardabweichung der Temperatur dennoch unter 1 %.

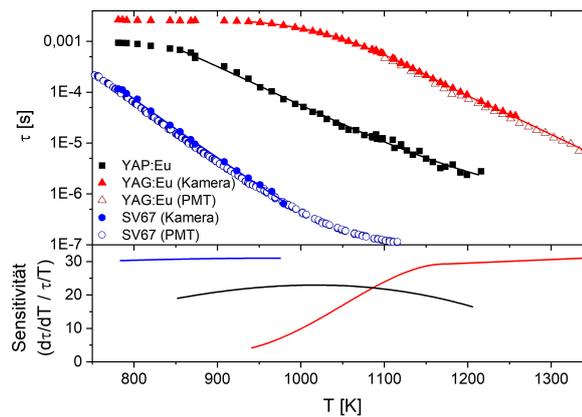


Abbildung 3.11: Kalibrationsmessungen für die Phosphore SV67, YAP:Eu und YAG:Eu bestimmt mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (geschlossene Symbole) und PMT[28] (offene Symbole).

3.3.3 Charakterisierung der Flammen

In diesem Abschnitt werden die untersuchten Flammen kurz vorgestellt. Die gemittelte OH* Chemolumineszenzintensität ist in Abbildung 3.12 gezeigt. Aus diesen Bildern lassen sich Rückschlüsse auf die Bereiche mit hoher Wärmefreisetzung ziehen. Alle Flammen haben eine V-Form und sind etwa 8 mm über der Brennergrundplatte abgehoben. Mit steigendem Luftverhältnis L sinkt die axiale Ausdehnung der Flamme signifikant. Bei konstanten L ist die radiale und axiale Ausdehnung der Flamme ähnlich. Mit steigender thermischer Leistung nimmt die Chemolumineszenzintensität zu. Vor allem in der Flammenmitte steigt die Intensität, so dass die Verteilung insgesamt homogener ist.

Aus punktwisen Laser-Raman-Messungen wurden durch Interpolation die Gastemperaturverteilungen der Flammen A0,63 und A0,70 erhalten (siehe Abb. 3.13). Details dieser Messungen können der Literatur entnommen werden[24, 30]. Die Werte wurden in einer Hälfte der Brennkammer aufgenommen und zur besseren Übersichtlichkeit gespiegelt. Durch den optischen Aufbau konnten keine Messungen für $x > 27$ mm und $z > 80$ mm durchgeführt werden. Im Gaseinlass finden sich, wie zu erwarten, die kältesten Temperaturen von ungefähr 350 K. Ab $z > 50$ mm sind die Temperaturen im Messbereich praktisch konstant und die Flammenreaktionen abgeschlossen. Die absoluten Temperaturen sind in Flamme A0,63 geringer als in Flamme A0,70 durch die deutlich magerere Mischung. Durch die geringere Reaktivität der Mischung in Flamme A0,63 ist auch die Region geringerer Temperaturen in der Gaseinlassregion deutlich größer und erstreckt sich weiter zum Rand. In dieser Flamme braucht die Mischung längere Zeit, bis die Reaktionen vollständig abgeschlossen sind.

3.3.4 Wandtemperaturmessungen

Vertikale Wandtemperaturprofile auf einem der vier Brennkammerpfosten sind in Abbildung 3.14 dargestellt. Die Form der Profile ist für alle Flammen sehr ähnlich. Während das Luftverhältnis L praktisch keinen Einfluss auf die Profile hat (Abb. 3.14 rechts), hängen die absoluten Temperaturen stark von der thermischen Leistung der Flamme ab (Abb. 3.14 links). Die Temperaturen der Thermoelemente sind durch die Position unterhalb der Oberfläche wie zu erwarten einige Grad kälter. Die Profilform passt aber sehr gut zu dem mit den Phosphoren gemessenen Verlauf.

Aus den Temperaturverteilungen auf den drei Streifen der Fenster wurden durch lineare Interpolation und Spiegelung an der Symmetrieachse zweidimensionale Temperaturprofile errechnet (siehe Abb. 3.15). Für Temperaturen bis 1150 K wurde YAP:Eu verwendet und für Temperaturen > 1100 K Werte von YAG:Eu. Im

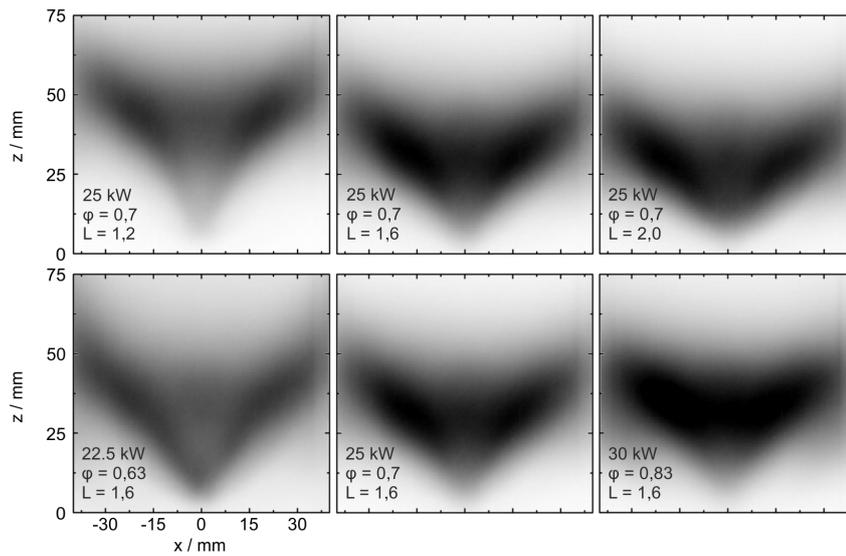


Abbildung 3.12: Gemittelte OH^* Chemolumineszenzintensität der untersuchten Flammen. Die obere Reihe zeigt die Variation von L bei $\varphi = 0,7$ und die untere Reihe die Variation von φ (und P_{th}) bei $L = 1,6$.

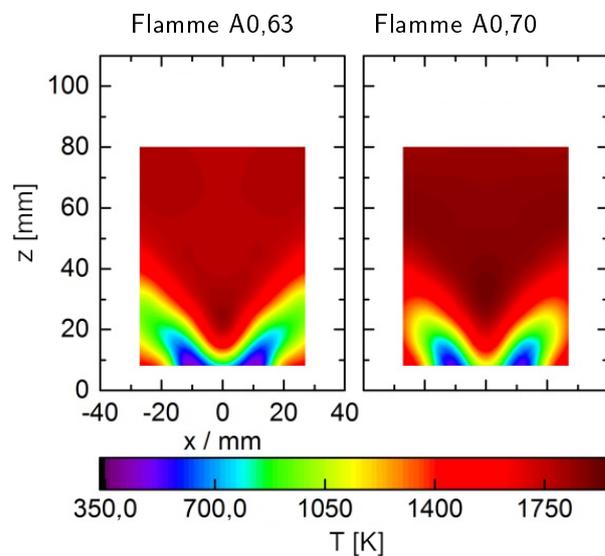


Abbildung 3.13: Gastemperaturverteilungen interpoliert aus punktförmigen Raman-Messungen.

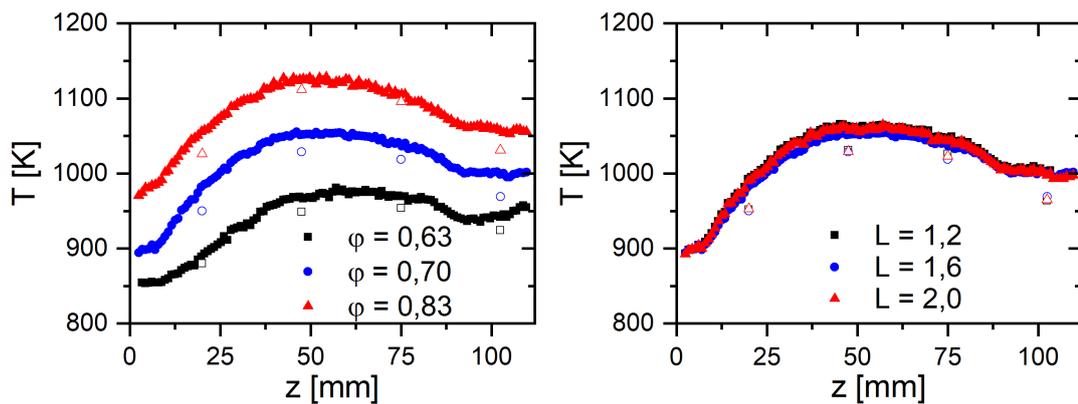


Abbildung 3.14: Temperaturprofile auf dem Brennkammerpfosten gemessen mit Phosphor-Thermometrie (geschlossene Symbole) und mit Thermoelementen 0,1 mm unterhalb der Oberfläche (offene Symbole). Variation der Stöchiometrie bei $L=1,6$ (links) und Variation von L bei $\varphi = 0,70$ (rechts).

Überlappbereich wurden die Werte gemittelt. Wie schon bei den Messungen auf dem Brennkammerpfosten beobachtet, hat das Verhältnis L nur einen geringen Einfluss auf die Temperaturverteilung (Abb 3.15 obere Reihe). Die thermische Leistung und Stöchiometrie hingegen beeinflussen nicht nur die absoluten Temperaturen, sondern deutlich auch die Form der Temperaturverteilung (Abb 3.15 untere Reihe). Für die Flamme A0,83 werden die höchsten Temperaturen in der Mitte des Fensters zwischen $z=25-75$ mm erhalten. Dieser Bereich entspricht auch der Region, in welcher die Flamme auf die Wand trifft. Für die Flamme A0,63 zeigt sich ein anderes Verhalten. Hier sind die Temperaturen in den Randbereichen höher als in der Mitte. Zudem wird das Temperaturmaximum erst bei $z = 75$ mm erreicht. Bei der Flamme A0,70 liegt die Temperaturverteilung zwischen diesen beiden Formen, ähnelt aber eher der Flamme A0,83.

Eine Erklärung hierfür ist die unterschiedliche Reaktivität der Gasmischungen, welche in Abschnitt 3.3.3 bereits angesprochen wurde. In Flamme A0,70 und A0,83 sind die Reaktionen weitgehend abgeschlossen, wenn die Flamme die Mitte des Fenster trifft. Somit werden dort auch die höchsten Temperaturen erreicht. Bei Flamme A0,63 benötigt die Mischung längere Zeit um vollständig auszureagieren. Daher werden am Rand der Fenster und bei höheren Abständen z höhere Temperaturen erzielt. Hier hatte die Gasmischung durch die längere Wegstrecke mehr Zeit um auszureagieren.

Aus der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Innen- und Außenseite lässt sich mit der Wärmeleitfähigkeit von Quarz k [31] und der Dicke des Fensters $\Delta x = 1,75$ mm die Wärmeflussdichte (Wärmefluss Φ pro Fläche A) $\Phi/A = -k\Delta T/\Delta x$ berechnen. Für die Flammen A0,63, A0,70 und A0,83 sind die entsprechenden Wärmeflüsse in Abbildung 3.16 gezeigt. Auch hier lässt sich das oben beschriebene unterschiedliche Verhalten der Flammen erkennen. Durch Integration lässt sich aus den Temperaturverteilung der Gesamtwärmefluss durch das Fenster berechnen. Durch Multiplikation mit der Fensteranzahl (vier) kann damit der Wärmeverlust durch die Fenster bestimmt werden. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Der Gesamtwärmefluss hängt damit deutlich von der thermischen Leistung der Flamme ab. Der Wärmefluss relativ zur thermischen Leistung ist für alle Flammen aber gleich und beträgt etwa 10 %.

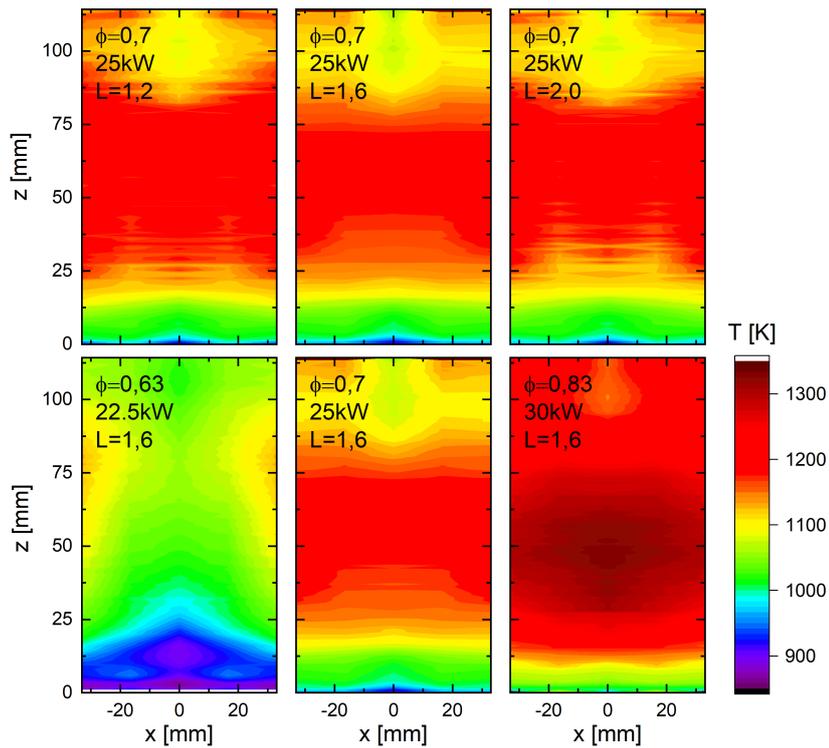


Abbildung 3.15: Zweidimensionale Temperaturverteilung auf der Innenseite der Brennkammerfenster für die untersuchten Flammen. Die Werte wurden durch lineare Interpolation aus den Messungen auf den drei Streifen erhalten und an der Symmetrieachse gespiegelt.

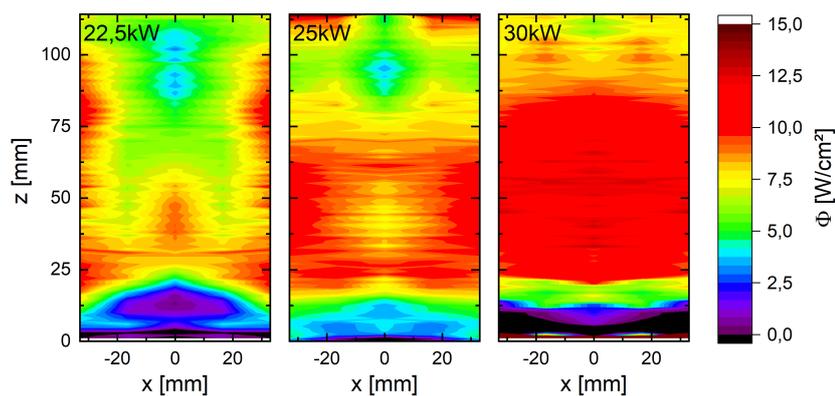


Abbildung 3.16: Zweidimensionale Darstellung der Wärmeflussdichte für die drei Flammen mit $L=1,6$ und $\Phi = 0,63$ (22,5 kW), $0,7$ (25 kW) und $0,83$ (30 kW).

Flamme	P_{th} [kW]	Φ kW	Φ/P_{th} %
A0,63	22,5	$2,2 \pm 0,5$	$9,9 \pm 2,2$
A0,70	25,0	$2,5 \pm 0,5$	$10,1 \pm 2,0$
A0,83	30,0	$2,9 \pm 0,9$	$9,7 \pm 2,9$
B0,70	25,0	$2,3 \pm 1,3$	$9,2 \pm 5,1$
C0,70	25,0	$2,2 \pm 1,2$	$8,8 \pm 4,8$

Tabelle 3.2: Wärmefluss durch die Brennkammerfenster der untersuchten Flammen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein wichtiger Parameter zur Erhöhung der Effizienz einer Gasturbine ist die Reduktion der Kühlluft, welche zur Kühlung thermisch stark belasteter Komponenten benötigt wird. Gleichzeitig können wandnahe, kalte Zonen vermieden werden, welche zu erhöhten CO Emissionen führen können. Die präzise Bestimmung der Wandtemperatur ist aus diesen Gründen außerordentlich wichtig.

Für die Durchführung von Wandtemperaturmessungen am Gasturbinenprüfstand CEC wurde ein mobiles Messsystem aufgebaut. In Zusammenarbeit mit dem IVG der Universität Duisburg-Essen (Sondenentwicklung) konnten im Rahmen des Projektes erfolgreich Wandtemperaturen bestimmt werden. Soweit bekannt ist dies die erste Demonstration faserbasierter Phosphor Thermometrie in einer Gasturbinenbrennkammer dieser Größenordnung unter Hochdruckbedingungen. Die Wandtemperaturmessungen am CEC sind insgesamt sehr positiv verlaufen und haben wertvolle Erkenntnisse geliefert. Verzögerungen bei der Sondenentwicklung wurden durch zusätzliche Tests im Labormaßstab kompensiert um eine erfolgreiche Messkampagne sicher zu stellen. Es konnte gezeigt werden, dass mit Phosphor Thermometrie auch unter den schwierigen Bedingungen am Gasturbinenprüfstand dieser Größenordnung Wandtemperaturmessungen mit guter Präzision möglich sind. Insbesondere der eingeschränkte optischer Zugang und die hohe Belastung durch Lärm und Vibrationen auf die Messausrüstung sind hier zu erwähnen. Das entwickelte mobile Messsystem schützt hierfür die Messelektronik und die Optik, und erleichtert zudem den Auf- und Abbau. Die Verwendung einer einzigen 18 m langen Faser für die Weiterleitung von Laserlicht und Phosphoreszenzsignal in Kombination mit einem PMT mit "gate"-Funktion hat sich als gute Lösung herausgestellt. Im Gegensatz zur Verwendung eines Lichtleiterbündels ist diese Lösung relativ günstig und stellt automatisch eine fast perfekte Überlagerung von Laserlicht und Phosphoreszenzlicht sicher.

Für weitere Messkampagnen kann die Qualität der Messergebnisse noch weiter verbessert werden. Als hauptsächlich limitierend hat sich der starke Einfluss von Flammenemissionen herausgestellt. Eine relativ einfache Möglichkeit wäre die Verwendung eines zweiten PMT bei einer Wellenlänge, welche nur die Flammenemissionen einfängt, aber nicht die Phosphoreszenz. So könnte das Untergrundsignal gemessen werden und direkt vom Messsignal subtrahiert werden. Eine geeignete Wellenlänge wäre z.B. um 410 nm. Das Spektrum ist hier frei von Emissionen vom Phosphor[28], während die Emissionen von CO_2 ähnlich stark wie um 458 nm sind. Alternativ könnte ein Hochgeschwindigkeitslasersystem eingesetzt werden. Bei den beobachteten Temperaturen um 1500 K lagen die Abklingzeiten um ca 0,1 ms, so dass bei einer Wiederholrate von 1 kHz keine signifikante Überlagerung von Abklingkurven zu beobachten wäre. Durch die höhere Wiederholrate ließe sich bei gleicher Messzeit die Anzahl der Mittelungen deutlich erhöhen. Beide Ansätze ließen sich auch kombinieren um Wandtemperaturen mit hoher Wiederholrate zu bestimmen, beispielsweise um transiente Effekte zu beobachten. Weiterhin wurde beobachtet, dass die Signalstärke am zweiten Messtag deutlich geringer war als am ersten Tag. Ursache war vermutlich die Degradierung der Beschichtung. Um die Haltbarkeit der Beschichtung zu verbessern könnte diese direkt in das TBC mit eingebracht werden.

In einem weiteren Arbeitspaket konnte das Punktmessverfahren erfolgreich zu einem bildgebenden Messverfahren für die Anwendung in Gasturbinenbrennkammern weiterentwickelt werden. Hierfür wurde ein Hochgeschwindigkeitskmerasystem mit einer Bildrate von 775 kHz verwendet. Der Dynamikbereich war annähernd vergleichbar wie bei einem Aufbau mit PMT, allerdings ist die Präzision, vor allem bei kurzen Abklingzeiten, durch die geringere Anzahl an Datenpunkten geringer.

Das Messverfahren wurde für die Bestimmung von zweidimensionalen Temperaturprofilen in einer atmosphärischen Gasturbinenmodellbrennkammer eingesetzt. Durch Messungen auf der Innen- und Außenseite konnten

die Wärmeflüsse durch die Wand abgeschätzt werde. Die Temperaturverteilung hing bei den untersuchten Flammen im großen Maße von der Reaktivität der Mischung ab. Hierdurch änderte sich die Region mit den höchsten Temperaturen und Wärmeflüssen. Bei geringerer Reaktivität verschob sich diese Region weiter stromab und in die Wandbereiche der Brennkammer, während bei der Flamme mit höchster Reaktivität die höchsten Temperaturen (und Wärmeflüsse) in der Fenstermitte auftraten.

Für eine faserbasierte Umsetzung des Messverfahrens könnte auf die Erfahrung der Universität Duisburg-Essen bei den Chemolumineszenzmessungen zurückgegriffen werden. Wesentliche Komponenten wie bildgebender Lichtleiter und Kopplung an eine Hochgeschwindigkeitskamera wären vergleichbar. Für die bildgebende Abbildung muss jedoch die eingekoppelte Laserleistung gegenüber den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Punktmessungen erhöht werden. Für die bildgebenden Messungen wurden in diesem Projekt Laserleistungsdichten von ca. 3 mJ/cm^2 eingesetzt, während es für die Messungen am CEC nur ca. $0,2 \text{ mJ/cm}^2$ waren. Die ausgeleuchtete Fläche war in beiden Fällen vergleichbar (ca. 7 cm^2 am CEC und 6 cm^2 für die bildgebenden Messungen). Bei der am CEC eingesetzten Faser wäre eine Verdoppelung oder Verdreifachung der Laserenergie möglich. Durch den Einsatz mehrerer Anregungsfasern wäre damit eine Erzielung der notwendigen Laserenergie gut möglich.

Abbildungen

1.1	Zeitplan des durchgeführten Projektes.	10
3.1	Abklingkurve und exponentielle Anpassung von YAG:Dy bei 1514 K (a). Kalibrationsdatensatz für YAG:Dy mit Polynom-Anpassung (b).	17
3.2	Fotos des mobilen Messsystems. a) Außenansicht während Kalibrationsmessungen am Hochtemperaturofen. b) Blick auf den optischen Aufbau im Container.	18
3.3	Schematische Darstellung des verwendeten optischen Aufbaus. Die Spiegel S1, S2 und S3 können entfernt werden um den Laserstrahl als Freistrahl aus dem Container zu leiten.	18
3.4	a): Foto der Beschichtung am CEC nach ca. 20 Betriebsstunden. b): Emissionsspektren der beiden Beschichtungen.	20
3.5	Schematische Darstellung des Prüfstandes am CEC.	21
3.6	Ergebnisse der Kalibrationsmessungen für die Wandtemperaturmessungen am CEC.	21
3.7	a) Beispielhafte Abklingkurven einer Messreihe mit 1–200 Mittelungen. Das verwendete PMT "gate" ist im schraffierten Bereich dargestellt. b) Ermittelte Temperatur und Standardabweichung für eine verschiedene Anzahl von Mittelungen.	22
3.8	Zeitlicher Verlauf der Temperaturen an den beiden Messtagen am CEC.	23
3.9	a) Gemessene Wandtemperaturen (geschlossene Symbole) und normierte Temperaturen (offene Symbole) für die untersuchten Betriebspunkte. Linien sind zur besseren Übersichtlichkeit eingezeichnet. b) Auftragung der Wandtemperatur gegen die normierte, adiabatische Flammentemperatur für eine ausgewählte Testserie.	24
3.10	Schematische Darstellung der Gasturbinenmodellbrennkammer SFB606. Die Temperatur auf den Quarzwänden und dem Brennkammerpfosten der Flamme A0,70 ist als Falschfarben dargestellt. Die Bereiche mit phosphoreszierender Beschichtung sind als schwarze Rechtecke hervorgehoben. Zwischen den Bereichen wurden linear interpoliert.	25
3.11	Kalibrationsmessungen für die Phosphore SV67, YAP:Eu und YAG:Eu bestimmt mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (geschlossene Symbole) und PMT[28] (offene Symbole).	27
3.12	Gemittelte OH* Chemolumineszenzintensität der untersuchten Flammen. Die obere Reihe zeigt die Variation von L bei $\varphi = 0,7$ und die untere Reihe die Variation von φ (und P_{th}) bei $L = 1,6$	28
3.13	Gastemperaturverteilungen interpoliert aus punktförmigen Raman-Messungen.	28
3.14	Temperaturprofile auf dem Brennkammerpfosten gemessen mit Phosphor-Thermometrie (geschlossene Symbole) und mit Thermoelementen 0,1 mm unterhalb der Oberfläche (offene Symbole). Variation der Stöchiometrie bei $L=1,6$ (links) und Variation von L bei $\varphi = 0,70$ (rechts).	29
3.15	Zweidimensionale Temperaturverteilung auf der Innenseite der Brennkammerfenster für die untersuchten Flammen. Die Werte wurden durch lineare Interpolation aus den Messungen auf den drei Streifen erhalten und an der Symmetrieachse gespiegelt.	30

3.16 Zweidimensionale Darstellung der Wärmeflussdichte für die drei Flammen mit $L=1,6$ und $\Phi =$
0,63 (22,5 kW), 0,7 (25 kW) und 0,83 (30 kW). 30

Tabellen

3.1	Übersicht über die untersuchten Flammen im SFB606 GTMC.	25
3.2	Wärmefluss durch die Brennkammerfenster der untersuchten Flammen.	31

Literatur

- [1] Aldén, M., Omrane, A., Richter, M., and Särner, G., 2011. "Thermographic phosphors for thermometry: A survey of combustion applications". *Prog. Energ. Comb. Sci.*, **37**(4), pp. 422 – 461.
- [2] Brübach, J., Pflitsch, C., Dreizler, A., and Atakan, B., 2013. "On surface temperature measurements with thermographic phosphors: A review". *Prog. Energ. Comb. Sci.*, **39**(1), pp. 37 – 60.
- [3] Steenbakker, R. J. L., Wellman, R. G., Nicholls, J. R., and Feist, J. P., 2008. "Sensor TBCs: Remote In-Situ Condition Monitoring of EB-PVD Coatings at Elevated Temperatures". In ASME Turbo Expo 2008, pp. 269–278.
- [4] Clarke, D. R., and Gentleman, M. M., 2007. "Luminescence sensing of temperatures in thermal barrier coatings". *Surf. Coat. Technol.*, **202**(4-7), pp. 681 – 687.
- [5] Feist, J. P., Sollazzo, P. Y., Berthier, S., Charnley, B., and Wells, J., 2012. "Application of an Industrial Sensor Coating System on a Rolls-Royce Jet Engine for Temperature Detection". *J. Eng. Gas Turbines Power*, **135**(1), Nov., p. 012101.
- [6] Seyfried, H., Särner, G., Omrane, A., Richter, M., Schmidt, H., and Aldén, M., 2005. "Optical Diagnostics for Characterization of a Full-Size Fighter-Jet Afterburner". In ASME TurboExpo2005, pp. 813–819.
- [7] Noel, B. W., Borella, H. M., Lewis, W., Turley, W. D., Beshears, D. L., Capps, G. J., Cates, M. R., Muhs, J. D., and Tobin, K. W., 1991. "Evaluating Thermographic Phosphors in an Operating Turbine Engine". *J. Eng. Gas Turbines Power*, **113**(2), Apr., pp. 242–245.
- [8] Omrane, A., Ossler, F., and Aldén, M., 2002. "Two-dimensional surface temperature measurements of burning materials". *Proc. Combust. Inst.*, **29**(2), pp. 2653 – 2659.
- [9] Omrane, A., Särner, G., and Aldén, M., 2004. "2D-temperature imaging of single droplets and sprays using thermographic phosphors". *Appl. Phys. B*, **79**(4), pp. 431–434.
- [10] Jaber, A., Zigan, L., Sakhrieh, A., and Leipertz, A., 2012. "Laser-Induced Phosphorescence in Combustion Diagnostics: Calibration at Extremely High Temperatures". *11th Int. Conference on Combustion and Energy Utilization (ICCEU)*, May.
- [11] Jovicic, G., Zigan, L., Will, S., and Leipertz, A., 2015. "Phosphor thermometry in turbulent hot gas flows applying Dy:YAG and Dy:Er:YAG particles". *Measurement Science and Technology*, **26**(1), p. 015204.
- [12] Fuhrmann, N., Brübach, J., and Dreizler, A., 2014. "On the mono-exponential fitting of phosphorescence decays". *Appl. Phys. B*, **116**(2), pp. 359–369.
- [13] Everest, M. A., and Atkinson, D. B., 2008. "Discrete sums for the rapid determination of exponential decay constants". *Rev. Sci. Instrum.*, **79**(2), p. 023108.
- [14] Matheson, I. B. C., 1987. "The Method of successive integration - a general technique for recasting kinetic-equations in a readily soluble form which is linear in the coefficients and sufficiently rapid for real-time instrumental use". *Anal. Instrum. (NY)*, **16**(3), pp. 345–373.
- [15] Levenberg, K., 1944. "A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares.". *Quart. Appl. Math.*, **2**, pp. 164–168.

- [16] Marquardt, D. W., 1963. "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, **11**(2), pp. 431–441.
- [17] Yalin, A. P., and Zare, R. N., 2002. "Effect of Laser Lineshape on the Quantitative Analysis of Cavity Ring-Down Signals". *Laser Phys.*, **12**(8), p. 1065.
- [18] Brübach, J., Janicka, J., and Dreizler, A., 2009. "An algorithm for the characterisation of multi-exponential decay curves". *Opt. Lasers Eng.*, **47**(1), pp. 75 – 79.
- [19] Eldridge, J. I., Allison, S. W., Jenkins, T. P., Gollub, S. L., Hall, C. A., and Walker, D. G., 2016. "Surface temperature measurements from a stator vane doublet in a turbine afterburner flame using a YAG:Tm thermographic phosphor". *Meas. Sci. Technol.*, **27**(12), p. 125205.
- [20] Pilgrim, C. C., Feist, J. P., and Heyes, A. L., 2013. "On the effect of temperature gradients and coating translucence on the accuracy of phosphor thermometry". *Meas. Sci. Technol.*, **24**(10), Aug., p. 105201.
- [21] Eldridge, I. J., 2018. "Single fiber temperature probe configuration using anti-Stokes luminescence from Cr:GdAlO₃". *Meas. Sci. Technol.*, **29**(6), June, p. 065206.
- [22] Goers, S., Witzel, B., Heinze, J., Stockhausen, G., van Kampen, J., Schulz, C., Willert, C., and Fleing, C., 2014. "Endoscopic Chemiluminescence Measurements as a Robust Experimental Tool in High-Pressure Gas Turbine Combustion Tests". In Proc. ASME Turbo Expo 2014. GT2014-26977.
- [23] Guethe, F., Guyot, D., Singla, G., Noiray, N., and Schuermans, B., 2012. "Chemiluminescence as diagnostic tool in the development of gas turbines". *Appl. Phys. B*, **107**(3), June, pp. 619–636.
- [24] Arndt, C. M., Severin, M., Dem, C., Stöhr, M., Steinberg, A. M., and Meier, W., 2015. "Experimental analysis of thermo-acoustic instabilities in a generic gas turbine combustor by phase-correlated PIV, chemiluminescence, and laser Raman scattering measurements". *Exp. Fluids*, **56**(4), Mar., p. 69.
- [25] Meier, W., Dem, C., and Arndt, C., 2016. "Mixing and reaction progress in a confined swirl flame undergoing thermo-acoustic oscillations studied with laser Raman scattering". *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **73**, May, pp. 71–78.
- [26] Knappe, C., Algotsson, M., Andersson, P., Richter, M., Tunér, M., Johansson, B., and Aldén, M., 2013. "Thickness dependent variations in surface phosphor thermometry during transient combustion in an HCCI engine". *Combust. Flame*, **160**(8), pp. 1466 – 1475.
- [27] Kissel, T., Brübach, J., Euler, M., Frotscher, M., Litterscheid, C., Albert, B., and Dreizler, A., 2013. "Phosphor thermometry: On the synthesis and characterisation of Y₃Al₅O₁₂:Eu (YAG:Eu) and YAlO₃:Eu (YAP:Eu)". *Mater. Chem. Phys.*, **140**(2–3), pp. 435–440.
- [28] Nau, P., Yin, Z., Lammel, O., and Meier, W., 2018. "Wall temperature measurements in gas turbine combustors with thermographic phosphors". *J. Eng. Gas Turbines Power*, **141**(4), Dec., p. 041021.
- [29] Nau, P., Yin, Z., Geigle, K. P., and Meier, W., 2017. "Wall temperature measurements at elevated pressures and high temperatures in sooting flames in a gas turbine model combustor". *Appl. Phys. B*, **123**(12), Nov., p. 279.
- [30] Arndt, C. M., Stöhr, M., Severin, M. J., Dem, C., and Meier, W., 2017. "Influence of air staging on the dynamics of a precessing vortex core in a dual swirl gas turbine model combustor". In *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Propulsion and Energy Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, July.
- [31] Bityukov, V. K., and Petrov, V. A., 2000. "Optical quartz glass as a reference substance for the thermal conductivity coefficient of partially transparent materials". *High Temp.*, **38**(2), pp. 293–299.

CEC Phosphore II– Schlussbericht – Teile I + II (Ende)

Oberflächentemperaturmessungen im Clean Energy Center mit thermographischen Phosphoren

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verbrennungstechnik (VT)