

**Abschlussbericht für den Zeitraum: 01.08.2002 bis 31.07.2004**

Forschungsthema:

Computergestützte Bilddatenauswertung der Flammvisualisierung im ultravioletten Spektralbereich zur Beurteilung, Steuerung und Regelung industrieller Thermoprozesse (COMBITHERM)

Gaswärme-Institut e. V., Essen  
Name der Forschungsstelle

81 ZBG / 1  
AiF-Vorhabens-Nr.

01.08.2002 bis 31.07.2004  
Bewilligungszeitraum

**Abschlussbericht für den Zeitraum: 01.08.2002 bis 31.07.2004**

Forschungsthema:

Computergestützte Bilddatenauswertung der Flammvisualisierung im ultravioletten Spektralbereich zur Beurteilung, Steuerung und Regelung industrieller Thermoprozesse (COMBITHERM)

Essen, den 05.11.2004  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des Projektleiters

DVGW  
AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)

81 ZBG / 1  
AiF-Vorhaben-Nr

**Gemeinsamer Sachbericht (Schlussbericht) der Forschungsstellen 1 und 2  
für die Projektlaufzeit 01.08.2002 bis 31.07.2004**

1. Forschungsthema
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung
3. Forschungsziel und Lösungsweg
4. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum
5. Wirtschaftliche Bedeutung für kleinere und mittlere Unternehmen
6. Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse
7. Durchführende Forschungsstellen

## 1 Forschungsthema

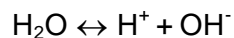
Computergestützte Bilddatenauswertung der Flammvisualisierung im ultravioletten Spektralbereich zur Beurteilung, Steuerung und Regelung industrieller Thermoprozesse (COMBITHERM)

## 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

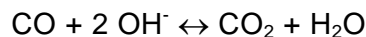
Komplexe thermische Prozesse in Industrieöfen sind infolge der in ihnen ablaufenden Wechselwirkungen schwer beherrschbar und beeinflussen die Umwelt durch Emissionen als auch durch Abfallstoffe (Stäube, Abwasser u. a.). Diese Prozesse erfordern nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung für eine effektive Prozessführung den Einsatz innovativer Technologien. Optische Messtechniken werden diesbezüglich als besonders geeignet angesehen, denn nur die optischen Messtechniken erlauben den direkten und dabei berührungslosen und rückwirkungsfreien messtechnischen Zugriff auf die Prozesse im Brennraum der thermischen Anlage.

Das von den Forschungsstellen 1 und 2 in den Jahren 2001 und 2002 entwickelte industrietaugliche optische Messverfahren für die Brennräume von Thermoprosessanlagen (FLORIAN) kennzeichnet diesbezüglich im Hinblick auf eine qualitative und quantitative UV-Flammendiagnostik einen neuen Stand der Technik. Erdgasflammen in industriellen Thermoprosessanlagen (Temperaturen > 1000 °C) und besonders die Flammenbereiche, die für den eigentlichen Wärmetransfer verantwortlich sind, lassen sich mit dem FLORIAN-System erstmalig visualisieren und analysieren. Im sichtbaren und infraroten Spektralbereich (bisherige Stand optischer Messtechniken) ist hingegen nicht oder nur sehr bedingt eine Flammvisualisierung möglich.

Das Verfahren der UV-Flammendiagnostik nutzt aus, dass die bei der Verbrennung entstehenden Hydroxid-Radikale OH bei 306,4 nm UV-Licht aussenden, welches nicht durch Strahlungsspektren von Wänden oder weiteren gasförmigen Komponenten überlagert wird. Durch geeignete Filtertechniken in Kombination mit bildverstärkenden Kamerasystemen wird das von OH-Radikalen ausgesandte UV-Licht separiert. Diese qualitative Information über vorliegende OH-Konzentrationen kann somit hinsichtlich einer Flammenbeurteilung und -optimierung ausgewertet werden. Das Verbrennungsradikal OH entsteht durch Hochtemperaturdissoziationsprozesse gemäß



Dadurch sind die Stellen erhöhter OH-Konzentration auch Stellen hoher Temperatur und dadurch verstärkter NO<sub>x</sub>-Bildung. Somit lässt sich die Verbrennung bereits anhand des Flammenbildes in Richtung auf die NO<sub>x</sub>-Bildung optimieren. Weiterhin lassen die Verteilungen der detektierten OH-Radikale auch Aussagen über Flammenkonturen zu. Da OH gemäß der Reaktion



maßgeblich für den Abbau und die Aufoxidation von CO verantwortlich ist, beschreibt die Grenze der OH-Konzentration auch die Grenze der Flamme. Flammengeometrie und Flammenlage können somit durch das entwickelte Verfahren bzgl. einer Erhöhung der Effektivität des Thermoprosesses beeinflusst werden. Diese UV-Flammendiagnostik (FLORIAN) bildet somit die Projektbasis für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben COMBITHERM.

### 3 Forschungsziel und Lösungsweg

#### a) Forschungsziel

Das Forschungsziel von COMBITHERM war die Schaffung eines Funktionsmusters für ein neuartiges Prozessregelungssystem für industrielle Thermoprozessanlagen auf Basis einer UV-Flammendiagnostik. Bei der betrachteten Gruppe von Thermoprozessanlagen handelt es sich vorrangig um Anlagen, wo auf Grund des Feuerraumhintergrundes bisher keine Flammen visualisierbar sind (z. B. Industrieöfen aus den Bereichen Stahl, Aluminium, Glas, Anlagen der Baustoffindustrie, der Chemie, der Nahrungsmittelbranchen und aus dem gesamten Kraftwerksbereich). Die computergestützte und industrietaugliche UV-Flammendiagnostik, die sich u. a. durch eine robuste Miniatur-Ofenraumsensorik auszeichnet, soll dazu in die bestehende Prozessregelung einer industriellen Feuerungsanlage als „aufgesetztes Regelsystem“ eingebunden werden. Mit Erreichen des Projektzieles sollen nachweislich Prozessoptimierungen und Emissionsreduzierungen erfolgen. Dieses Forschungsziel konnte erreicht werden (vgl. Pkt. 4). Die F/E-Arbeiten im Vorhaben COMBITHERM führten zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichtes weltweit zu einem neuen Produkt und zu einem neuen Verfahren:

Produkt: Funktionsmuster für ein bildgebendes UV-Sensorsystem mit peripherer Gerätetechnik, koppelbar mit vorhandenen Prozessregelsystemen.

Verfahren: Permanente UV-Flammendiagnose im Hinblick auf OH-Verbrennungsradikale, Flammentemperatur, NO<sub>x</sub>-Bildung, Flammengeometrie, Flammenlage. Einbindung dieser Prozessdaten in die Prozessregelung.

#### b) Lösungsweg

Zum Erreichen des o. g. Forschungszieles war gemäß der Vorhabensbeschreibung COMBITHERM folgender Lösungsweg geplant (Arbeitsplan):

- Iststandsanalysen zum Regelverhalten für die betrachteten Thermoprozessanlagen (s. o.) auf Basis von Literaturrecherchen und Vor-Ort-Analysen. *Arbeitspaket A.*
- Ableitung von Führungsgrößen aus den Iststandsanalysen unter dem Aspekt der Visualisierung von OH-Radikalen und Definition der Schnittstellen für die UV-Signaleinbindung in die Prozesssteuerung. *Arbeitspaket B.*
- UV-Flammvisualisierungen und computergestützte Bilddatenauswertungen im Hinblick auf die zu entwickelnde Regelung an den Industrieofenversuchsständen der Forschungsstellen 1 und 2 und an der ausgewählten industriellen Thermoprozessanlage. Aufbau von UV-Visualisierungsdatenbanken mit Protokollierung der jeweiligen Betriebszustände. *Arbeitspaket C.*
- Aufbau der Signalausgabe für die Einbindung der computergestützten UV-Bilddatenauswertung in die Steuerung und Regelung der Thermoprozessanlage. Aus den computergestützten Bilddatenauswertungen (UV-Visualisierungsdatenbanken) muss ein „Bewertungskriterium“ bzw. „Messsignal“ für den Bilddatenabgleich (Soll/Istbilder) und die Ableitung der Steuersignale entwickelt werden. Aufbau des Funktionsmusters des UV-Regelsystems. *Arbeitspaket D.*
- Industrieerprobung des Funktionsmusters, Modifizierung, Auswertung, Ergebnistransfer. *Arbeitspaket E.*

#### 4. Durchgeführte Arbeiten im gesamten Bearbeitungszeitraum

Die FuE-Arbeiten der Forschungsstellen 1 und 2 orientierten sich am Arbeitsplan der Vorhabensbeschreibung (vgl. Pkt. 3) und den Abstimmungen im PBA. Ein Zwischenstand der FuE-Ergebnisse wurden am 26.03.2003 während einer Sitzung des Fachausschusses II „Ofenbau und Wärmewirtschaft-Feuerfeste Werkstoffe“ und des Fachausschusses VI „Umweltschutz“ der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft e. V. in Würzburg vorgetragen.

Insgesamt wurden in der Projektlaufzeit zwei Zwischenberichte sowie der vorliegende Abschlussbericht erstellt und an den Projektträger über den DVGW weitergeleitet. Der 1. Zwischenbericht für den Bearbeitungszeitraum 01.08.2002 bis 31.12.2002 wurde am 28.02.2003 erstellt. Der 2. Zwischenbericht umfasste den Bearbeitungszeitraum vom 01.01.2003 bis 31.12.2003. Er wurde am 28.02.2004 an den Projektträger gemäß der Richtlinie für das FuE-Vorhaben weitergeleitet. Der vorliegende Abschlussbericht umfasst den gesamten Bearbeitungszeitraum vom 01.08.2002 bis 31.07.2004.

Am 03.04.2003 tagte der projektbegleitende Ausschuss (PBA) dieses Vorhabens in Cottbus. Der erreichte Stand der Arbeiten wurde vorgetragen und umfassend diskutiert. Der weitere Verlauf des Projektes wurde diskutiert und der Arbeitsplan diesbezüglich präzisiert. Die Festlegungen flossen in die Projektbearbeitung ein. Die beiden o. g. Zwischenberichte und der vorliegende Abschlussbericht wurden an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses weitergeleitet.

Die Ziele der Arbeitspakete A-E der Vorhabensbeschreibung (vgl. Anlage) wurden erreicht. Darüber wird unter Pkt. 4 berichtet. Besonders erfreulich ist, dass das Funktionsmuster für ein neuartiges Prozessregelungssystem für industrielle Thermoprozessanlagen auf Basis einer UV-Flammendiagnostik bereits auf der glasstec 2004 in Düsseldorf vom 09.-13.11.2004 von beiden Forschungsstellen präsentiert werden kann.

Die geplanten FuE-Arbeiten im COMBITHERM-Vorhaben wurden von den Forschungsstellen 1 und 2 wie folgt ausgeführt:

##### 4.1 Arbeiten an der Forschungsstelle 1

Die Forschungsstelle 1 bearbeitete federführend o. g. **Arbeitspaket A**. Nach Literatur- und Patentrecherchen zur F/E-Thematik, diese wurden über die gesamte Projektlaufzeit weitergeführt, erfolgten die Iststandsanalysen des Regelverhaltens (Vor-Ort-Analysen) anhand folgender ausgewählter Thermoprozessanlagen:

- Erdgasbeheizte Glasschmelzwannen, insbesondere im Raum Sachsen.
- Erdgasbeheizte thermische Reststoffverwertungsanlagen in Industriegebieten Sachsens, z. B. in Freiberg (z. B. Pyrolyseanlagen, Mittel- und Hochtemperaturreaktoren, Drehrohr- und Pendelöfen).
- Industrieöfen aus dem Bereich Stahl (Wärmebehandlungsöfen wie erdgasbeheizte Durchlauf-Vergüteeanlage, Durchlauf-Härteöfen).

Im Hinblick auf die Mess- und Regelgrößen für die Regelung und Überwachung der Thermoprozessanlagen spielt die Temperaturerfassung über Thermoelement- und Pyrometermessungen eine übergeordnete Rolle. Weitere Messgrößen sind Drücke, Abgaszusammensetzungen, Medienmengen und bei Glasschmelzwannen z. B. der Glasstand. Diese Messgrößen sind z. T. fehlerbehaftet, störanfällig und relativ träge. Außerdem werden die Verhältnisse in den Ofenräumen durch diese Messgrößen nicht allumfassend dargestellt (Black-Box-System). Hier setzt das Vorhaben COMBITHERM an. Zusätzlich zu dieser ge-

genwärtigen Regelung soll eine Prozessregelung nach der UV-Flammvisualisierung, welche wesentliche Flammeneigenschaften, wie OH-Radikale, Flammentemperatur, NO<sub>x</sub>-Bildung in der Flamme, Flammgeometrie und Flammenlage berücksichtigt, integriert werden.

Um eine höhere Qualität der Projektergebnisse zu erzielen, wurden zusätzlich zum Arbeitsplan auch im Jahr 2003 die FuE-Arbeiten in den **Arbeitspaketen A und B** parallel zu den anderen Arbeitspaketen fortgesetzt.

Auch das o. g. **Arbeitspaket B** wurde gemäß Arbeitsplan der Vorhabensbeschreibung federführend von der Forschungsstelle 1 bearbeitet. Die „neuen“ Führungsgrößen für das UV-Regelsystem wurden aus den Iststandsanalysen zum Regelverhalten der Thermoprozessanlagen abgeleitet. Sie stellen sich zusammenfassend wie folgt dar:

- Das bisherige Regelkonzept mit o. g. Führungsgrößen (Mess- und Regelgrößen) bleibt unverändert erhalten.
- Die folgenden neuen Führungsgrößen aus der UV-Flammvisualisierung werden über u. g. Parameter und Soll-Ist-Vergleiche für diese Parameter (Soll: z. B. Musterbild für Flammgeometrie oder OH-Radikale) in das bisherige Regelkonzept integriert:

- OH-Radikale in den Flammen im Vergleich (Ort, Menge) ⇒ OH-Parameter
- Flammentemperatur im Vergleich ⇒ T-Parameter
- NO<sub>x</sub>-Bildung im Vergleich ⇒ NO<sub>x</sub>-Parameter
- Flammgeometrie, Flammenausbildung, Flammensitz ⇒ Flammenparameter

Folglich sollen nicht Absolutwerte für o. g. Größen in die Regelung einfließen, sondern die benannten Parameter als Abweichung zu vorgegebenen Sollwerten. Auf Basis dieser Ergebnisse konnten die Schnittstellen für die Signaleinbindung der UV-Flammvisualisierung in die Prozesssteuerung definiert werden. In Übersichtsform sah diese Schnittstellendefinition im Zeitraum der Bearbeitung von Arbeitspaket B wie folgt aus:

UV-Sensorik ⇒ UV-Kamera ⇒ 1. PC mit UV-Frame-Grabber und Bildauslese-Software (UV-Visualisierungs-PC) ⇒ 2. PC mit Bildbearbeitungs-Software ⇒ Kopplung 2. PC mit Bildbearbeitungs-Software über spezielle PC-Karte ⇒ S 7-Prozesssteuerung

Auf Basis bisheriger F/E-Arbeiten wird von folgenden Geschwindigkeiten bzgl. Messwernerfassung, Messwertverarbeitung und Messwertausgabe an die S 7-Prozesssteuerung ausgegangen:

Messwernerfassung mit UV-Kamerasystem	Messwertverarbeitung	Messwertausgabe an S 7
500 - 1000 ms, max. 4000 ms, wenn sehr schwache UV-Signale vorhanden sind	ca. 4 s	alle 30 s

Von der Forschungsstelle 1 erfolgte im Berichtszeitraum weiterhin der Einsatz des UV-Systems an ausgewählten industriellen Thermoprozessanlagen im Rahmen von **Arbeitspaket C** (federführende Bearbeitung von Forschungsstelle 2, s. u.). Anregungen für die Auswahl von industriellen Thermoprozessanlagen wurden in o. g. Sitzung des PBA am 03.04.2003 gegeben. Es erfolgten Funktionsuntersuchungen und UV-Flammvisualisierungen über längere Zeiträume sowie bei unterschiedlichen Betriebszuständen in den Glaswerken Haldensleben, Piesau und Bernsdorf, am Glasschmelzofen der TU Bergakademie Freiberg sowie an einem Kammerofen in Krauschwitz und an einem Drehrohr-

ofen in Freiberg. Schwerpunkt bildeten Visualisierung, Speicherung und Auswertung der Bilddaten aus der UV-Flammvisualisierung. Gemäß Arbeitsplan wurde auch flankierend und ergänzend zur UV-Flammvisualisierung das optische Diagnosesystem OPTISOS® zur Ofenraumvisualisierung und Thermografie eingesetzt. Die erhaltenen Daten aus der UV-Flammenanalytik und der OPTISOS® - Ofenraumvisualisierung (Visualisierungsdatenbanken) wurden im Hinblick auf das zu entwickelnde UV-Regelsystem (Arbeitspaket D, s. u.) mit den herkömmlich erfassten Prozessregelgrößen (Temperaturen, Drücke, Abgasanalysen, Medienmengen) verglichen. Alle genannten industriellen Thermoprozessanlagen waren gasbeheizt.

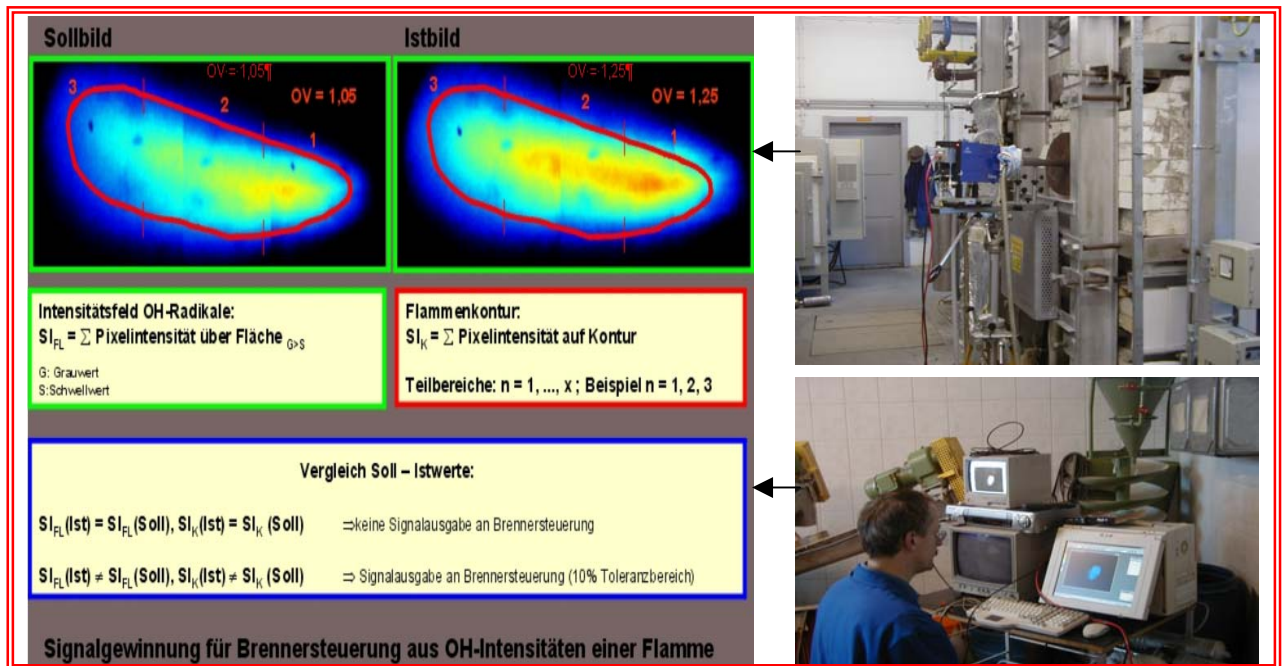
Die Einbeziehung mehrerer industrieller Thermoprozessanlagen in das Arbeitspaket C (Plan: 1 industrielle Thermoprozessanlage) wird einer breiteren und effektiver Vermarktung der Projektergebnisse dienlich sein und wurde vom PBA angeregt.

Bei den UV-Flammvisualisierungen an industriellen Thermoprozessanlagen kam es im 1. Halbjahr 2003 mit den beiden verfügbaren UV-Sensorsystemen (vgl. auch Arbeiten an Forschungsstelle 2) zu erheblichen Problemen bzgl. der Bildqualität und der Wärmebelastung der Optik, insbesondere, wenn die Systeme an den weit verbreiteten Glasschmelzwannen eingesetzt wurden. Das hatte Einfluss auf das auswertbare Bildmaterial zur weiteren Bearbeitung für das UV-Brennerregelsystem (Projektziel im Vorhaben COMBITHERM). Daraufhin erfolgten von der Forschungsstelle 1 umfangreiche FuE-Arbeiten zur Lösung der Problematik, indem wärmetechnische und optische Berechnungen sowie die Neukonstruktionen und Fertigung von neuen Bauteilen für beide UV-Systeme durchgeführt wurden. Diese FuE-Arbeiten, die im Arbeitsprogramm des COMBITHERM-Vorhabens nicht enthalten aber zwingend notwendig waren, führten zu zwei im Hinblick auf das Projektziel völlig überarbeiteten und optimierten UV-Visualisierungssystemen. Diese optimierten Systeme wurden von Forschungsstelle 1 unter Labor- und Industriebedingungen getestet (s. o.). Dabei zeigte sich, dass die durchgeführten Systemoptimierungen erfolgreich waren.

Es konnte somit festgestellt werden, dass die Sensorseite des zu entwickelnden Funktionsmusters eines UV-Regelsystems (aufgesetztes Regelsystem) fertiggestellt und erfolgreich in der Praxis erprobt werden kann. Für Forschungsstelle 1 ergab sich somit ein gegenüber dem Arbeitsplan erhöhter Aufwand innerhalb der Arbeitsetappe C. Die UV-Flammvisualisierungen an den industriellen Thermoprozessanlagen wurden parallel zu Arbeitspaket D auch im Jahr 2004 fortgesetzt.

Mit der Bearbeitung von **Arbeitspaket D** (federführende Bearbeitung durch die Forschungsstelle 1) wurde planmäßig im Dezember 2003 begonnen. Der Meilenstein für diese Arbeitsetappe ist das Funktionsmuster einer aufgesetzten Brennerregelung auf Basis einer UV-Flammenanalyse. Die Grundlage für das Arbeitspaket D bilden die im Arbeitspaket C erstellten Visualisierungsdatenbanken. Es ging zunächst um die Konzeption von Bildbearbeitung und Bildanalyse für die Signaleinbindung in die Prozesssteuerung (Brennerregelung) der industriellen Thermoprozessanlage. Der im Dezember 2003 erreichte Stand für die Konzeption des Funktionsmusters geht aus **Bild 1** hervor. Dabei wurden die Kenngrößen **OH-Intensitätsparameter** sowie **OH-Geometrie-Parameter** aus der UV-Flammvisualisierung entsprechend **Bild 1** fixiert. Dabei bilden die Kenngrößen **OH-Intensitäts-Parameter** sowie **OH-Geometrie-Parameter** die Grundlage für die Bildvergleiche und die Beeinflussung der Brennersteuerung.





Regelkonzept

UV-Sensorsystem an Glasschmelzwanne

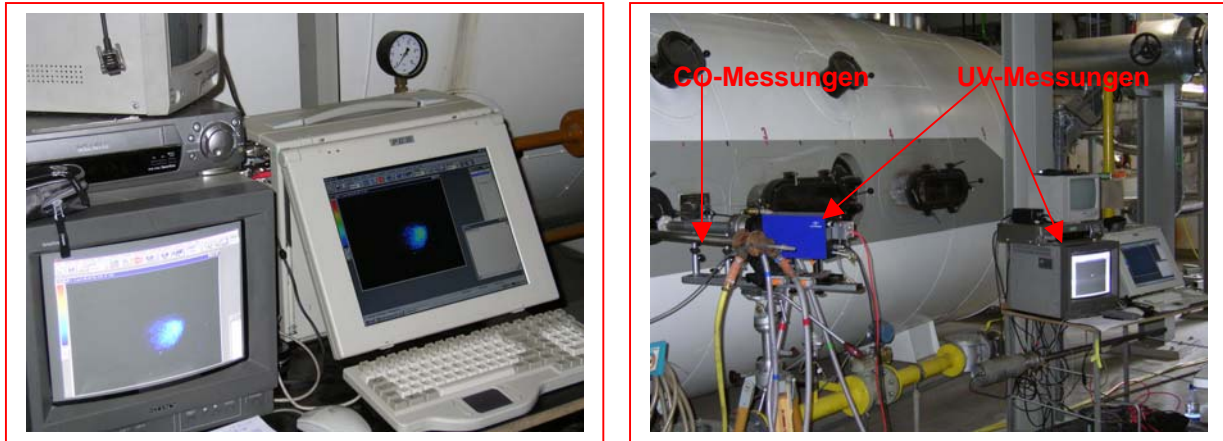
**Bild 1:** Regelkonzept (links) und Darstellung zur Aufnahmesituation des UV-Sensorsystems an einer Glasschmelzwanne (rechts).

In das Arbeitspaket D wurde bereits ab Dezember 2003 der Industriepartner STG Cottbus (STG = Software Technologie Glas) aktiv einbezogen. Diese Einbeziehung entspricht der Vorhabensbeschreibung und dem Arbeitsplan des COMBITHERM-Projektes. Dadurch wird u. a. auch eine rasche Markteinführung für die F/E-Ergebnisse gegeben (s. u.).

Der Aufbau des Funktionsmusters eines UV-Regelsystems als „aufgesetzte Regelung“ im Arbeitspaket D erfolgte von Januar bis Juli 2004 gemeinsam mit der Forschungsstelle 2 und dem Industriepartner STG Cottbus (s. o.). Das Arbeitsziel wurde erreicht und das Funktionsmuster wird unter Pkt. 4.2 ausführlich dargestellt.

Nach dem Aufbau des Funktionsmusters des UV-Regelsystems erfolgten ebenfalls gemeinsam mit Forschungsstelle 2 Industrieerprobungen an verschiedenen Thermoprozessanlagen (**Arbeitspaket E**). Die Industrieerprobungen wurden von Juli bis Oktober 2004 über die eigentliche Projektlaufzeit hinaus durchgeführt.

Das folgende **Bild 2** zeigt ein Beispiel für eine Industrieerprobung des Funktionsmusters an einer gasbeheizten Thermoprozessanlage mit einem 10 MW Brenner von August 2004.



**Bild 2:** Industrieerprobung des Funktionsmusters nach Pkt. 4.2 an einem Prüfflammenrohr mit einem eingebauten 10-MW-Gasgebläsebrenner. Eingebautes UV-Sondensystem und periphere Gerätetechnik (Monitore, PC, Speichereinheit). Parallel zur OH-Visualisierung und zur Abgasanalytik erfolgten CO-Messungen in der Flamme (linkes Teilbild).

Der 10 MW-Gasbrenner konnte durch die Ermittlung der wesentlichen Flammeneigenschaften wie OH-Radikale, Flammentemperatur,  $\text{NO}_x$ -Bildung in der Flamme, Flammengeometrie und Flammenlage und über die Eingriffe in die Brennerregelung in Hinblick auf die Verbrennung optimiert werden (Prozessoptimierung und Emissionsreduzierungen). Dies wurde durch parallele CO-Messungen in der Flamme (**Bild 2**) und Abgasanalysen nachgewiesen.

Bei den Industrieerprobungen stellten sich jedoch auch Schwachstellen, insbesondere im Hinblick auf die Kommunikation zwischen Kamera-PC und Steuerungs-PC heraus. Lösungen waren noch bis zur Erstellung des Abschlussberichtes möglich. Es handelt sich eben „nur“ um ein Funktionsmuster des UV-Regelsystems, was allerdings als Ziel des COMBITHERM-Vorhabens definiert wurde. Zur „Industriereife“ sind noch weitere Entwicklungsarbeiten und Praxiserprobungen notwendig.

#### 4.2 Arbeiten an der Forschungsstelle 2

Von der Forschungsstelle 2 erfolgten innerhalb von **Arbeitspaket A** Literatur- und Patentrecherchen zur F/E-Thematik. Weiterhin wurden Iststandsanalysen zum Regelverhalten von Thermoprozessanlagen durchgeführt.

Diese Iststandsanalysen sind unter besonderer Berücksichtigung von Glasschmelzwannen in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz erfolgt. Die Ergebnisse dieser Analysen fließen in die o. g. Sachverhalte zur Thematik „Ableitung von Führungsgrößen“ ein (**Arbeitspaket B**, s. o.). Für Glasschmelzwannen, als wesentlichen Ofentyp der betrachteten Gruppe von Thermoprozessanlagen (s. o.), wurde diesbezüglich eine Führungsstrategie für eine integrierte UV-Regelung entwickelt.

Für die federführende Bearbeitung von **Arbeitspaket C** erfolgten zunächst F/E-Arbeiten zur Auswahl einer als Projektdemonstrator geeigneten Thermoprozessanlage, insbesondere im Hinblick auf die Ofenraumbedingungen und den Einbauort des UV-Gerätesystems. In Absprache mit Forschungsstelle 1 und dem PBA wurde die Einbeziehung mehrerer industrieller Thermoprozessanlagen in das **Arbeitspaket C** insbesondere im Hinblick auf eine breitere und effektivere Vermarktung der Projektergebnisse beschlossen (s. o.). Neben den auf

S. 7 aufgeführten industriellen Thermoprozessanlagen wurden für die FuE-Arbeiten im **Arbeitspaket C** Glasschmelzwannen in Rheinland-Pfalz ausgewählt.

Vor dem Industrieinsatz innerhalb von **Arbeitspaket C** sind von der Forschungsstelle 2 im 1. Quartal 2003 Untersuchungen zur thermischen Beständigkeit der UV-Sensorik im Dauerbetrieb realisiert worden. Eine dauerhafte thermische Beständigkeit, insbesondere unter den hohen thermischen Anforderungen einer Glasschmelzwanne, stellt ein primäres Erfordernis für die Einbindung des Systems in einen Regelkreis dar.

Es konnte festgestellt werden, dass bei Ofenraumtemperaturen bis 1350 °C, einer Spülluftmenge von 5 Nm<sup>3</sup>/h sowie einer Kühlwassermenge von 5 l/min die Eintrittspupille der UV-Sensorik (Objektivbereich) bis max. 50 °C belastet wird. Die Spezialkleber für das UV-Linsensystem im Bereich der Eintrittspupille sind im Dauerbetrieb bis max. 80 °C belastbar, so dass die gemessene thermische Belastung kein Problem darstellt. Bei Temperaturen von 1650 °C zzgl. Flammenstrahlung (Bedingungen Glasschmelzwanne) wird aber bereits der Grenzbereich der thermischen Beständigkeit für die UV-Sensorik erreicht, wenn von o. g. praxistauglichen Parametern für die Spülluft- und Kühlwassermenge ausgegangen wird.

Vor Beginn der Industrieerprobungen mit dem UV-Sensorsystem an Glasschmelzwannen erfolgten deshalb weitere Untersuchungen unter Einbeziehung verschiedener UV-durchlässiger Wärmeschutzfilter. Die Ergebnisse waren hoffnungsvoll, so dass beschlossen wurde, mit den UV-Flammvisualisierungen an industriellen Glasschmelzwannen zu beginnen. Vorher mussten gemäß Arbeitsplan noch Untersuchungen an den Versuchsglasschmelzöfen zur Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen den OH-Signalen aus der UV-Flammvisualisierung und wichtigen Größen zur Beurteilung von Flammen durchgeführt werden.

Bei UV-Flammvisualisierungen an der GWI-Hochtemperaturtestbrennkammer und an industriellen Glasschmelzwannen in Rheinland-Pfalz kam es jedoch wie bereits mit dem DBI-UV-System (s. o.) auch mit dem GWI-UV-System zu erheblichen Problemen bzgl. der Bildqualität und der Wärmebelastung der Optik. Keiner der Einsätze lieferte auswertbares Bildmaterial zur weiteren Bearbeitung im Hinblick auf das UV-Brennerregelsystem.

Auf Grund dieser Problematik und der umfassenden Systemüberarbeitung bei Forschungsstelle 1 (s. o.) stand für die geplanten Tests bei Forschungsstelle 2 innerhalb der **Arbeitsetappe C** zunächst kein System zu Verfügung. Der sich dadurch ergebende Verzug in den FuE-Arbeiten konnte bis inkl. September 2003 nicht aufgeholt werden. Nach Überarbeitung, Optimierung und Erprobung des 2. UV-Systems (s. o.) konnte bei Forschungsstelle 2 erst ab Oktober 2003 mit den in der **Arbeitsetappe C** geplanten Untersuchungen begonnen werden. Das gemäß Arbeitsplan (s. Anlage) vorgesehene Arbeitspensum in dieser Arbeitsetappe konnte deshalb bis 12/2003 nicht realisiert werden. Aus diesen Gründen wurden von der Forschungsstelle 2 für 2003 weniger finanzielle Mittel abgerufen. Die bis 12/2003 nicht realisierbaren FuE-Arbeiten in der **Arbeitsetappe C** wurden ohne Abstriche an den Arbeitsetappe D und E (siehe Anlage) im Jahr 2004 nachgeholt.

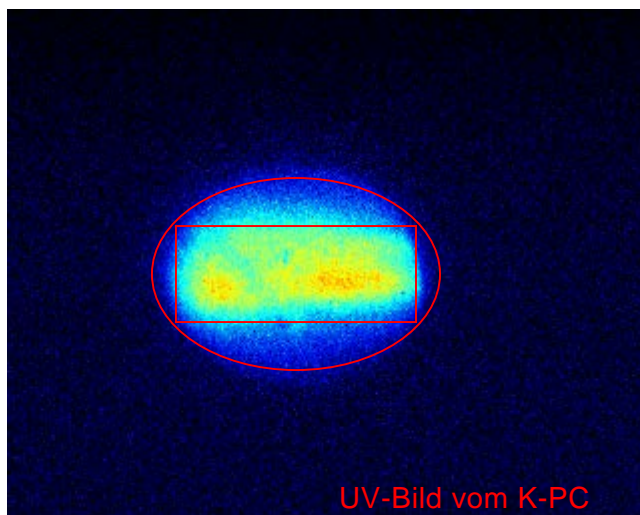
Mit der Bearbeitung von **Arbeitspaket D** (federführende Bearbeitung durch die Forschungsstelle 1, vgl. Pkt. 4.1) wurde planmäßig im Dezember 2003 begonnen. Die aus **Bild 1** ersichtliche Konzeption von Bildbearbeitung und Bildanalyse für die Signaleinbindung in die Prozesssteuerung (Brennerregelung) der industriellen Thermoprozessanlage bildete die Grundlage für den Aufbau des Funktionsmusters eines UV-Regelsystems für die Brenner.

Dem UV-Regelsystem, einem Funktionsmuster für ein bildgebendes UV-Sensorsystem mit peripherer Gerätetechnik, koppelbar mit einer vorhandenen Prozessregelung, liegt folgendes Prinzip zu Grunde:

- Es besteht aus 2 PCs, dem **Kamera-PC (KPC)** und dem **Steuerungs-PC (SPC)**.
- Im SPC ist als Schnittstelle zu einer S7-Steuerung eine Karte CP-5611 vorhanden.
- Der KPC befindet sich im Bereich der UV-Sonde (Ofenbereich).
- Der SPC kann sich z. B. auf der Messwarte befinden und ist über Netzkabel oder WLAN mit dem KPC verbunden.
- Durch den KPC erfolgt die Aufnahme von Einzelbildern über die DaVis-Software der LaVision GmbH.
- Durch den SPC ist ein „Remote-Zugriff“ auf den KPC möglich. Der SPC kopiert und speichert eine von DaVis automatisch abgelegte Datei vom KPC.
- Ein Einzelbuffer-Transfer erfolgt zum SPC.
- Verworfenen Daten werden auf dem KPC gelöscht.
- Der Bildbereich wird manuell bestimmt. Dabei wird eine Maske festgelegt, außerhalb des Bildbereiches werden die Werte auf Null gesetzt.
- Alle Dateien werden mit Datum und Uhrzeit sowie zusätzlichen Informationen (z. B. bei Glasschmelzwannen Zeitbezug zum Feuerwechsel) abgelegt.
- Dateien der als „Bestzustand“ ausgewählten Einstellungen werden automatisch und manuell in MS-Excel abgespeichert.
- Zur geeigneten Darstellung der UV-Bilder ist eine Farbspreizungs- und Paletten-Auswahl-Subroutine in die auf dem SPC laufende Software integriert. Zur Aktivierung der Farbspreizungs- und Paletten-Auswahl-Subroutine und zur Festlegung der Obergrenzen sind in der „Labor“-Umgebung Buttons eingefügt.
- Das UV-Regelsystem kann in die bestehende Prozessregelung einer industriellen Feuerungsanlage als „aufgesetztes Regelsystem“ eingebunden werden.

Die folgenden **Bilder 3-7** beschreiben das entwickelte Funktionsmuster des „aufgesetzten Regelsystems“. Die dargestellten Funktionen laufen auf dem SPC mit den abgefragten Daten vom KPC (UV-Visualisierungs-PC = Kamera-PC.)

Gemäß **Bild 3** wird zunächst der relevante Bildschirmbereich durch Setzen von Masken in einer entsprechenden IMX-Datei, Speicherformat der DaVis-Software, LaVision GmbH, manuell festgelegt. Die entsprechende Datei wird dabei mit Datum und Uhrzeit abgelegt.



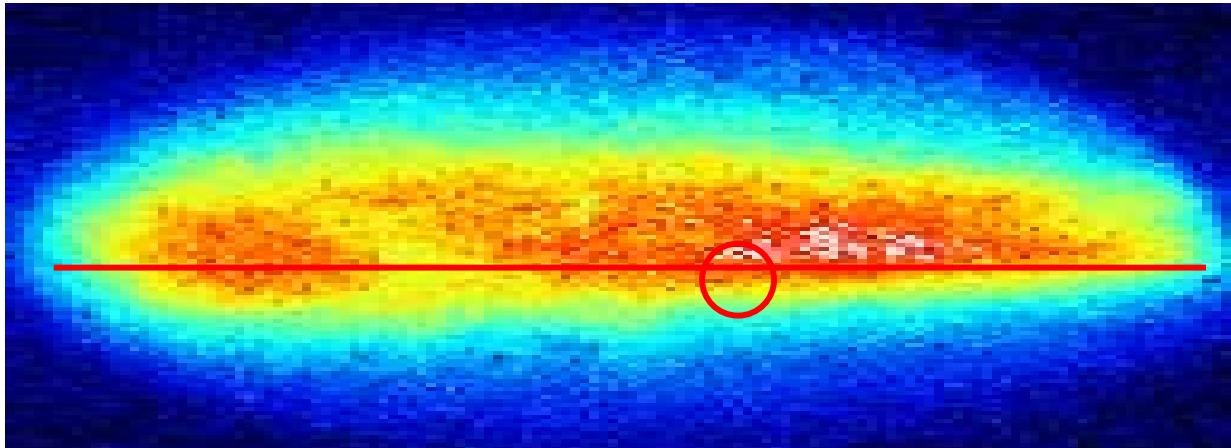
**Bild 3:** Bildbereichsbestimmung über das Festlegen von Masken am SPC

Entsprechend **Bild 4** erfolgt die Auswertung der UV-Bilder nach den UV-Kenngrößen

- OH- bzw. NO<sub>x</sub>- Intensitäten (OH-Intensitäts-Parameter)
- Lage und Kontur der Flammen (OH-Geometrie-Parameter)

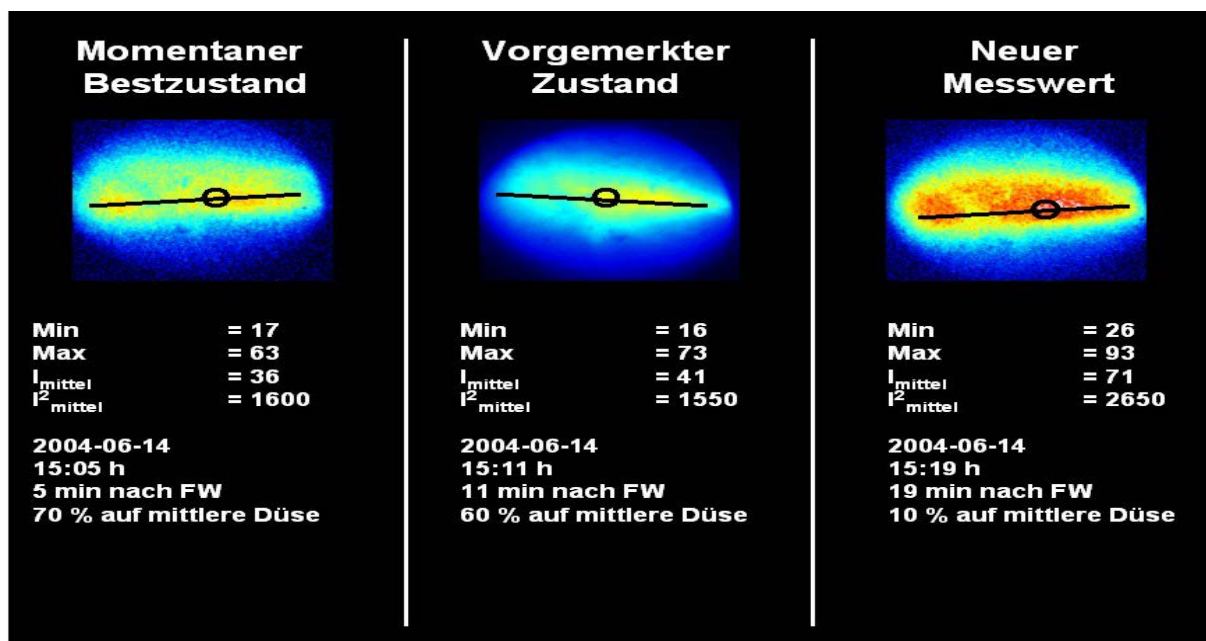
Für die OH-Intensitäts-Parameter und OH-Geometrie-Parameter werden folgende Kenngrößen bestimmt:

- Intensitätsminimum,
- Intensitätsmaximum,
- Mittelwerte der Intensitäten,
- Mittelwerte der Quadrate,
- Flammenachse, dabei erfolgt eine Bestimmung der Maxima pro Spalte und Zeile sowie die Berechnung beider Regressionsgeraden,
- Schwerpunkt der dargestellten Flamme, die Berechnung erfolgt gemäß einer Bestimmung für unregelmäßige Flächen.

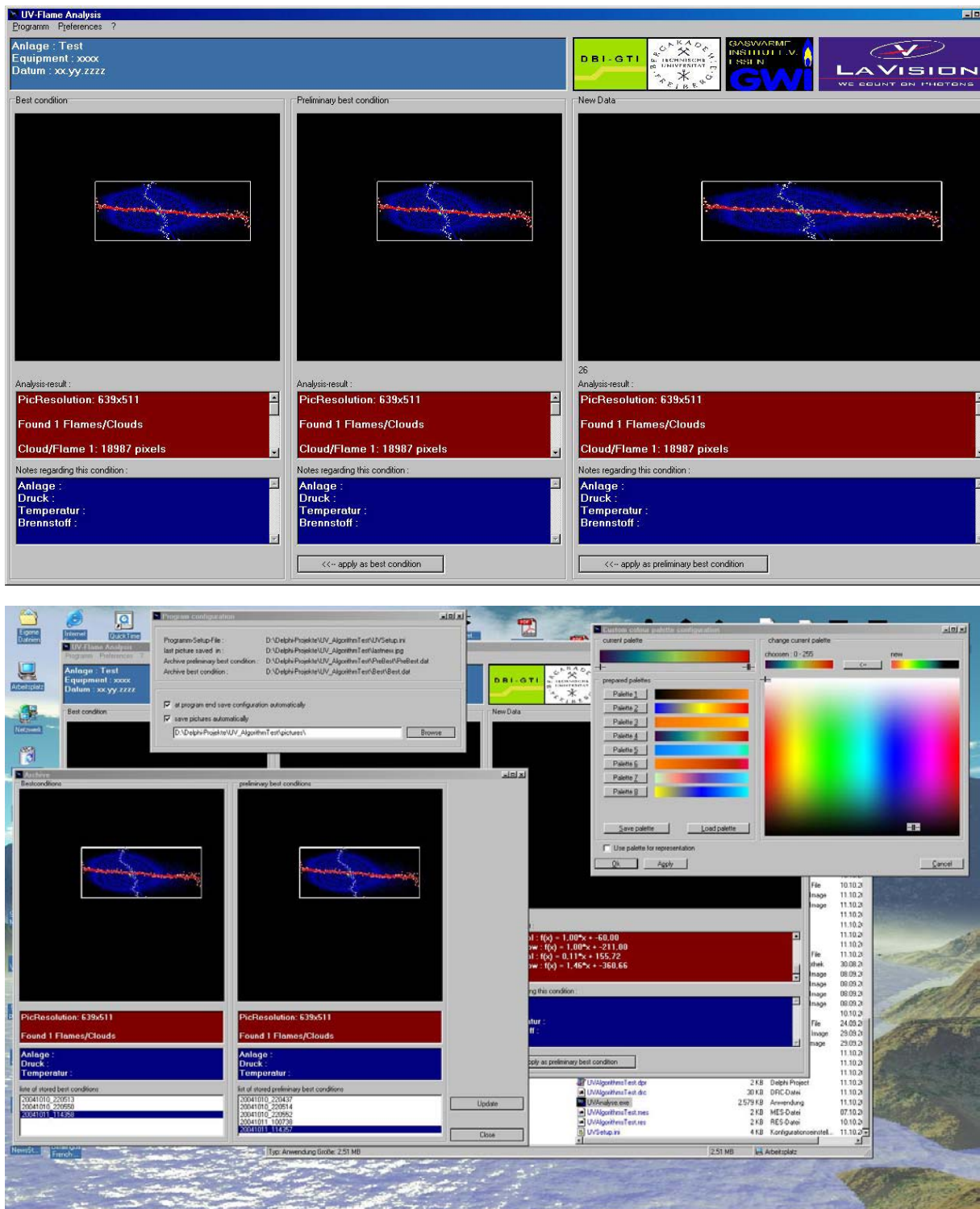


**Bild 4:** Auswertung der UV-Aufnahmen nach den OH- Intensitäten sowie Lage und Kontur der Flammen (Regressionsgerade, Schwerpunkt, s. rote Linien).

Die folgenden **Bilder 5 und 6** beschreiben das Regelsystem auf Basis o. g. Kennwerte. Danach werden für die o. g. Kennwerte die Zustände „Momentaner Bestzustand“, „Vorgemerakter Zustand“ und „Neuer Messwert“ auf dem SPC abgelegt (Primärdaten der UV-Flammvisualisierung kommen vom KPC).



**Bild 5:** Beschreibung des Funktionsmusters „Aufgesetztes UV-Regelsystem“



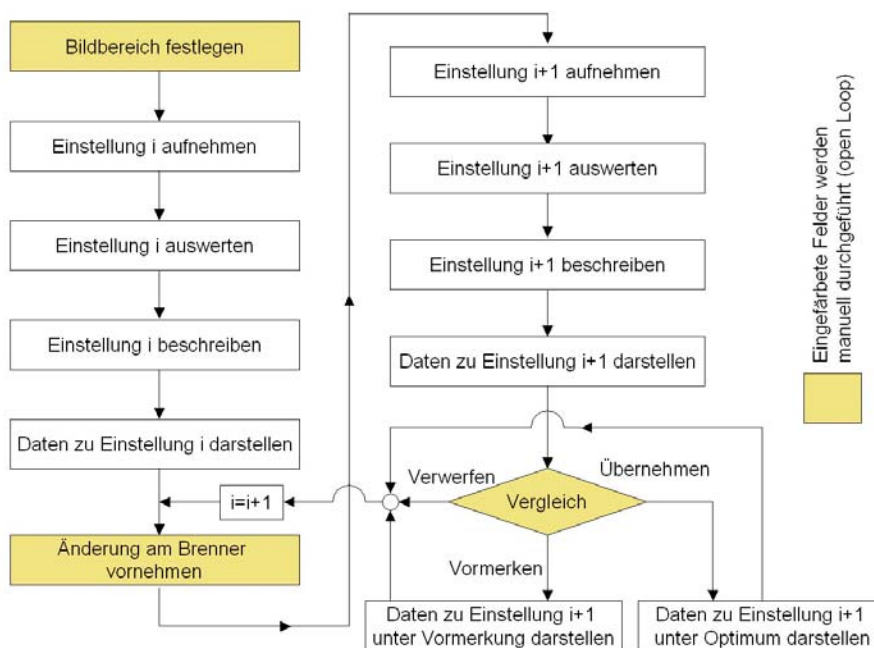
**Bild 6:** Darstellung der Programmoberfläche des von den Forschungsstellen 1 und 2 entwickelten und aufgebauten Funktionsmusters „Aufgesetztes UV-Regelsystem“. Software: STG GmbH Cottbus (SPC) und LaVision GmbH Göttingen (KPC).

Die konkreten Prozessbedingungen (z. B. Glasschmelzwannen in den **Bildern 5 und 6**) werden zu den abgelegten Bildern und Kenngrößen mit vermerkt. Auch Änderungen gegenüber Standard-Einstellungen werden notiert. Automatisch wird z. B. bei Glasschmelzwannen abgespeichert, wie viel Minuten nach Feuerwechsel die Aufnahme getätigt wurde. Die Luftvorwärmtemperatur wird ebenfalls mit eingelesen. Ständig erfolgen über den SPC

die Abfragen, ob die neuen UV-Messwerte vom KPC „Verworfen“, „Vorgemerkt“ oder „Übernommen“ werden.

Somit kann die permanente UV-Flammendiagnose über den KPC im Hinblick auf OH-Verbrennungsradikale, Flammentemperatur,  $\text{NO}_x$ -Bildung, Flammgeometrie, Flammenlage gezielt in die Prozessregelung als aufgesetzte und verfeinerte Regelung eingebunden werden. Die Kopplung zu einer S7-Steuerung erfolgt über die im SPC enthaltene Karte CP-5611 (s. o.).

Das folgende **Bild 7** zeigt eine Übersicht zum Regelmechanismus des UV-Regelsystems.



**Bild 7:** Übersicht zum Mechanismus des UV-Regelsystems. Funktionsmuster „Aufgesetztes UV-Regelsystem“. Erreichtes Produkt: Funktionsmuster für ein bildgebendes UV-Sensorsystem, koppelbar mit vorhandenem Prozessregelung. Erreichtes Verfahren: Permanente UV-Flammendiagnose im Hinblick auf OH-Verbrennungsradikale, Flammentemperatur,  $\text{NO}_x$ -Bildung, Flammgeometrie, Flammenlage.

Das Arbeitsziel von Arbeitspaket D wurde somit erreicht und gemeinsam mit Forschungsstelle 1 konnten im Zeitraum Juli bis Oktober 2004 Industrieerprobungen an verschiedenen Thermoprozessanlagen (**Arbeitspaket E**) erfolgen. Aussagen zur Industrieerprobung innerhalb von Arbeitspaket E sind unter Pkt. 4.1 enthalten. Auch das Arbeitsziel von Arbeitspaket E wurde erreicht.

## 5. Wirtschaftliche Bedeutung für kleinere und mittlere Unternehmen (kmU)

Die entsprechenden Angaben in der Vorhabensbeschreibung konnten im wesentlichen erreicht werden. Entsprechend dem AiF-Leitfaden Teil 4.1.19 sind die erreichten Forschungsergebnisse den Fachgebieten Verfahrenstechnik, Produktion, Mikrosystemtechnik

sowie Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik und gemäß AiF-Leitfaden Teil 4.1.20 den Wirtschaftszweigen

24	Chemische Industrie
26	Glasgewerbe, Keramik
27/28	Metallerzeugung
72/74	Erbringung von Dienstleistungen

zuzuordnen. Sowohl auf der Seite der künftigen Nutzer der FuE-Ergebnisse (Betreiber von Thermoprozessanlagen) als auch auf der der künftigen Anbieter sind kmU vertreten. Auf der Seite der Anbieter dominieren die kmU deutlich. Die kmU unter den Nutzern/Betreibern von Thermoprozessanlagen (und natürlich auch die Nicht-kmU, z. B. Betreiber von großen Glasschmelzwannen) erhöhen ihre Leistungsfähigkeit, indem sie durch Anwendung des FuE-Ergebnisses die bereits benannten wirtschaftlichen und umweltrelevanten Effekte realisieren (Prozessoptimierung, Reduzierung von Emissionen, Erhöhung der Produktqualität). Sie erhöhen damit auch ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der Konkurrenz. Investitionskosten und pay-back-Zeiten werden in der Größenordnung liegen, die eine Nutzung durch kmU mit vertretbarem finanziellen Risiko möglich macht.

Als Anbieter der FuE-Ergebnisse werden sich innovative kmU aus unterschiedlichen Branchen profilieren. Diese werden einerseits kmU aus den Branchen Elektronik, Mikrosystemtechnik, Spezialfertigung, Softwareentwicklung sein, die anwenderspezifisch modifizierte Gerätesysteme fertigen und installieren. Für die Wartung dieser Systeme sowie für anwenderspezifische Dienstleistungen an den Thermoprozessanlagen der Kunden kommen die o. g. Hersteller selbst oder spezialisierte Dienstleister (Ingenieurbüros, Engineering-Unternehmen, innovative SHK-Unternehmen) in Frage. Alle einbezogenen Unternehmen können durch Nutzung des FuE-Ergebnisses ein neues Geschäftsfeld bearbeiten, ihren Umsatz steigern und letztendlich ihre Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit erhöhen.

## **6. Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse**

Hierbei wird ebenfalls auf die Vorhabensbeschreibung zum Forschungsprojekt und die Fortschreibung des Gemeinsamen Verwertungsplanes, welcher Bestandteil des Schlussberichtes ist, verwiesen. Die darin enthaltenen Aussagen zur beabsichtigten Umsetzung der F/E-Ergebnisse werden von den Forschungsstellen 1 und 2 beachtet.

Insbesondere wird der projektbegleitenden Ausschusses, dem Experten aus den relevanten Branchen unter gebührender Berücksichtigung des KMU-Bezuges des Projektes angehören, für die Umsetzung der in den Arbeitsetappen A-E erreichten Projektergebnisse eine wesentliche Rolle spielen. Weiterhin wird die als Unterauftragnehmer eingesetzte Firma STG (s. o.) auf Basis ihrer weitreichenden internationalen Kundenkontakte als Multiplikator für die gesamte Glasindustrie wirken. Diesbezüglich gibt es bereits konkreten Absprachen.

Auch die unmittelbar bevorstehenden Messen (GAT 2004 sowie glasstec 2004, s. o.), auf denen das entwickelte neuartige UV-Regelsystem präsentiert wird, ist für die rasche Umsetzung bedeutungsvoll. Daneben agieren Firmen aus dem Kundenkreis der Antragsteller als Multiplikatoren.

Die antragstellende Mitgliedsvereinigung (MV) DVGW wird die Verbreitung und Umsetzung der Projektergebnisse über ihre Fachausschüsse und Mitgliedsfirmen betreiben. Neben der MV DVGW haben weitere MV großes Interesse am Projekt bekundet. Durch sie wird eine Vielzahl von Firmen repräsentiert, die Thermoprozessanlagen betreiben. Repräsentanten



dieser MV sind im Projektbegleitenden Ausschuss vertreten. Eine weitere Möglichkeit der Umsetzung ist die Überführung des Projektergebnisses in die europäische Dimension, zunächst über Kundenkontakte und die EU-Forschungsförderung.

## 8. Bibliographische Daten

Mitgliedsvereinigung      Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.  
Josef-Wirmer-Str. 1-3  
D-53123 Bonn

FSt 1                              DBI Gastechnologisches Institut Freiberg gGmbH  
Halsbrücker Straße 34  
09599 Freiberg  
Projektleiter: Herr Dr.-Ing. Matthias Werschky

FSt 2                              Gaswärme-Institut e.V. Essen  
Hafenstraße 101  
45356 Essen  
Projektleiter: Herr Dr.-Ing. Axel Scherello

**Anlage**

**Protokoll Sitzung PBA  
Arbeitsplan Projekt COMBITHERM**