

Gemeinsamer Schlussbericht

Projekt

Optisches, Minimal - Invasives Analysesystem für die UV- Flammen-Diagnose in Thermoprozessanlagen

Forschungsstelle (FSt.) 1: DBI - Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI)

Forschungsstelle (FSt.) 2: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen (GWI)

Forschungsstelle (FSt.) 3: Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik (ITO)

AiF-Forschungsvereinigung: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches
e.V. – DVGW

IGF-Vorhaben Nr.: 15890 BG

Projektlaufzeit: 01.04.2009 bis 31.05.2012

Berichtszeitraum: 01.04.2009 bis 31.05.2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	9
Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis	10
Kurzzusammenfassung	11
Zusammenfassung	12
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	13
2 Stand der Technik	14
3 Forschungsziele / Ergebnisse / Lösungsweg	19
3.1 Forschungsziele	19
3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	19
3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	19
3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	20
3.2.1 Projektstrategie	20
4 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	22
4.1 Arbeitspaket 1: Konzeptentwicklung des Gesamtsystems	23
4.1.1 Arbeitsschritt 1.1: Definition der Anforderungskriterien für das Gesamtsystem (DBI)	23
4.1.2 Arbeitsschritt 1.2: Erstellung des optischen Grobkonzeptes (DBI, ITO, GWI)	26
4.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung der optischen Komponenten	32
4.2.1 Arbeitsschritt 2.1: Detaillierte Auslegung, Design und Simulationen (ITO)	32
4.2.2 Arbeitsschritt 2.2: Entwicklung Lichteintrittssystem (DBI, ITO)	38
4.2.3 Arbeitsschritt 2.3: Entwicklung Detektorsystem (DBI, GWI)	43
4.2.4 Arbeitsschritt 2.4: Bau, Erprobung und Kalibrierung des optisches System unter Laborbedingungen (DBI, GWI, ITO)	52
4.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung einer auf die Miniaturoptik angepassten Hochtemperatursonde	56
4.3.1 Arbeitsschritt 3.1: Entwicklung des Sondenkopfes (DBI)	56
4.3.2 Arbeitsschritte 3.2: Entwicklung von gekühltem Sondenkorpus inkl. Medienversorgung (DBI)	61
4.3.3 Arbeitsschritt 3.3: Fertigung und Integration der Sonde (DBI)	66
4.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung einer Steuerung und einer Bildverarbeitungssoftware	69
4.4.1 Arbeitsschritt 4.1: Entwicklung einer Steuerung für die bewegliche Komponenten (DBI, GWI)	69
4.4.2 Arbeitsschritt 4.2: Entwicklung Bildverarbeitungssoftware (GWI) ..	71
4.5 Arbeitspaket 5: Erprobung der Sonde	76

4.5.1	Arbeitsschritt 5.1: Funktionsprobe des Gesamtsystems unter Laborbedingungen (DBI)	76
4.5.2	Arbeitsschritt 5.2: Heißerprobung im Technikum (GWI, DBI)	80
4.5.3	Arbeitsschritt 5.3: Erprobung an Industrieanlagen (GWI, DBI)	85
4.5.4	Arbeitsschritt 5.4: Abschlussbewertung (DBI, GWI, ITO)	91
5	Gegenüberstellung der Zielsetzung mit den erreichten Ergebnissen	92
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	94
7	Auswirkungen der erzielten Ergebnisse auf den wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Fortschritt, insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	95
7.1	Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse	95
7.2	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU	95
8	Erfolge und geplante Veröffentlichungen und Beitrag zum Wissenstransfer.....	97
9	Schutzrechte	99
10	Einschätzung Realisierbarkeit Transferkonzept.....	99
11	Literaturverzeichnis.....	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufnahmen von Flammen eines Schweißbrenners a.) mit einer Digitalkamera b.) mit dem UV-Laborkamerasystem und c.) mit dem FLORIAN-System.....	16
Abbildung 2:	Vergleich Stand der Technik – FLORIAN-Verfahren (links) und Zielstellung des Projektes – variable Messmöglichkeiten durch unterschiedliche Blickrichtungen (rechts).....	17
Abbildung 3:	Vorteile einer Winkeloptik zur Separation einer Flamme bei Mehrbrennersystemen (links: FLORIAN, rechts: Projektzielstellung)	17
Abbildung 4:	FLORIAN-UV-System im Industrieinsatz an einer Glasschmelzwanne, FSt. DBI, GWI.....	24
Abbildung 5:	Übliche Einbaumaße in der Industrie für die Sensorik, Durchmesser der Durchführung 45 mm, FSt. DBI.....	24
Abbildung 6:	Prinzipvarianten für Sondenkopfspülung bzw. -kühlung und deren Eigenschaften, FSt. DBI	25
Abbildung 7:	Farbkorrektur für das FLORIAN-Systems in Abhängigkeit der Wellenlänge, FSt. ITO	27
Abbildung 8:	UV-Endoskopsystem FLORIAN: 41 Linsen aus Kalziumfluorid und Quarz, FSt. DBI, ITO	27
Abbildung 9:	Verzeichnungskorrektur des FLORIAN-Systems, FSt. ITO.....	28
Abbildung 10:	Kennlinien UG11 (links) und UV-Bandenfilter (rechts)	29
Abbildung 11:	Entwickeltes optisches Grobkonzept mit elektronischem Bildübertragungssystem (Variante 3); Darstellung des Strahlenganges für Blickrichtungen von 0 - 90°, FSt. DBI, GWI, ITO.....	30
Abbildung 12:	Erhöhung der Transmission des Endoskopsystems durch Aufblenden, FSt. ITO.....	33
Abbildung 13:	Flammen eines Schweißbrenners, aufgenommen mit verschiedenen Detektionssystemen, FSt. DBI	33
Abbildung 14:	Studie Frontobjektiv Faserbündel als Objektiv-Design, FSt. ITO.....	35
Abbildung 15:	Design-Studie für ein Bildverstärker-Objektiv für die Variante „Elektronische Bildübertragung“, FSt. ITO	36
Abbildung 16:	Prinzip Bildverstärker, Quelle LaVision	36
Abbildung 17:	Entwicklung des Lichteintrittssystem und Beispiel für Erarbeitung der Fertigungsunterlagen des Lichteintrittssystem, FSt. DBI.....	39
Abbildung 18:	Entwicklung des Lichteintrittssystems; Darstellung der UG11-Wärmeschutzfilter und der erforderlichen Spaltmaße UG11-0° und UG11-90°, FSt. DBI.....	40
Abbildung 19:	Entwicklung des Lichteintrittssystems; Daten der konzipierten und ausgewählten UG11-Wärmeschutzfilter, FSt. DBI, ITO, Quelle Schott AG.....	41
Abbildung 20:	Entwicklung des Lichteintrittssystems; Daten Kaltlichtspiegel (UV Enhanced Aluminium, FSt. DBI	42

Abbildung 21:	Prinzipschema Kühlmodul mit Anordnung Optikkomponenten und entwickelten Lichteintrittssystemen, FSt. DBI	42
Abbildung 22:	Versuchsaufbau zur Vermessung von Transmission und Auflösungsvermögen des konzipierten UV-Objektives, FSt. ITO	44
Abbildung 23:	Ergebnisse von Transmissionsmessungen für das konzipierte UV-Objektiv, FSt. ITO	44
Abbildung 24:	Versuchsaufbau für Testmessungen zur Schärfe, FSt. ITO	44
Abbildung 25:	Testbild für Bildschärfe bei 301, 308, 315 nm, FSt. ITO	45
Abbildung 26:	Ausgewählte Ergebnisse von MTF-Messungen (UV-Objektiv), FSt. ITO	46
Abbildung 27:	Wellenlängenabhängige Brennweite, Berechnungen und Messungen, FSt. ITO.....	47
Abbildung 28:	Entwicklung Detektorsystem, Daten vom ausgewählten und untersuchten UV-Objektiv, FSt. DBI, GWI.....	48
Abbildung 29:	Entwicklung Detektorsystem, Daten des konzipierten und ausgewählten Miniatur-Restlichtverstärkers, FSt. DBI, Quelle: Fa. Phototek Limited, United Kingdom	49
Abbildung 30:	Entwicklung Detektorsystem, Daten Spezial-Kamerasystem, Typ Zelos-415 GV PoE, FSt. DBI, Quelle: Kappa optronics GmbH	50
Abbildung 31:	Entwicklung Detektorsystem, Daten des in den Strahlengang ein- und ausschwenkbaren OH-Filters 306,4 nm (UV-Filter), Quelle: Fa. SCHOTT AG	51
Abbildung 32:	Beispiel Fertigungsunterlagen Detektorsystem, FSt. DBI.....	51
Abbildung 33:	Versuchsaufbau für Erprobung, Vergleiche und Kalibrierung des optischen Systems unter Laborbedingungen, Versuchstechnikum DBI	53
Abbildung 34:	Endoskopisches FLORIAN-UV-System mit OH-Filter; Belichtungszeit 1000 ms, Verstärkung 100%, Abstand Bunsenbrenner-Sondenaug 80 cm	54
Abbildung 35:	UV-Laborkamerasystem mit OH-Filter, mit und ohne Restlichtverstärker; Belichtungszeiten 100 ms bzw. 2228 ms, Abstand Bunsenbrenner-Objektiv 80 cm.....	54
Abbildung 36:	Aufnahme der OH-Radikale für 2 UV-Quellen mit neuem Kamerasystem und Restlichtverstärker; Belichtungszeit 100 ms, Restlichtverstärkung 37%, Abstand Bunsenbrenner-Objektiv 80 cm	55
Abbildung 37:	Teil der Fertigungszeichnung für den Sondenkopf, Grundlage für die Simulationen, FSt. DBI	57
Abbildung 38:	Simulationsgeometrie zur Bewertung der thermischen Belastung der Wärmeschutzgläser im Sondenkopf, FSt. DBI	58
Abbildung 39:	Geschwindigkeits- und Temperaturprofil für $u_{\text{ein}}=3\text{m/s}$, Kühlung an Innenseite und Mantelfläche, FSt. DBI.....	60
Abbildung 40:	Ausgewählter Ausschnitt einer Fertigungszeichnung für den Sondenkorpus, FSt. DBI als Grundlage der Modellierungen (CFD-Simulationen) bei der FSt. GWI	61

Abbildung 41:	Darstellung der simulierten Sondengeometrie, FSt. GWI; Basis Fertigungszeichnung gemäß Abbildungen 37 und 40	62
Abbildung 42:	Simulierte Temperaturverteilung im Wasserkreislauf beim 2-Rohr-System, CFD-Simulationen, FSt. GWI	63
Abbildung 43:	Lokale Temperaturüberhöhung in der 3-Rohr-Variante, CFD-Simulationen, FSt. GWI	63
Abbildung 44:	Temperaturverteilung im Wasserkreislauf des Sondenkörpers, finales Design. CFD-Simulationen, FSt. GWI	64
Abbildung 45:	Stromliniendarstellung der Strömung im Wasserkanal des Sondenkörpers, eingefärbt mit dem Geschwindigkeitsbetrag; CFD-Simulationen, FSt. GWI	65
Abbildung 46:	Gefertigtes Sondenkühlmodul und entwickeltes Trägersystem für alle optischen und mechanischen Bauteile des Lichteintrittssystem (AS 2.2) und des Detektorsystems (AS 2.3)	66
Abbildung 47:	Prinzipskizze für die Integration der Optikkomponenten in das Sondenkühlmodul.....	67
Abbildung 48:	Prinzipbild für die Integration der Optikkomponenten in das Sondenkühlmodul.....	67
Abbildung 49:	Vollelektronisches UV-Bildübertragungssystem mit den Bereichen Lichteintritt, Detektorsystem und Trägerbauteil.....	68
Abbildung 50:	Vollelektronisches UV-Bildübertragungssystem mit den Bereichen Lichteintritt, Detektorsystem und Trägerbauteil und sichtbarer thermischer Überwachung, befestigt am entwickelten Träger.....	68
Abbildung 51:	Übersichtsdarstellung der Steuerung der optischen, beweglichen Komponenten (rot) und der Medienüberwachung (blau)	70
Abbildung 52:	Vollmotorische ferngesteuerte Verstellmöglichkeit für bewegliche optische Komponenten.....	70
Abbildung 53:	Visualisierungs-PC, Steuerungs-PC, Überwachung und Bedienpult für die Fernsteuerung der beweglichen optischen Komponenten, des Restlichtverstärkers sowie der Spezialkamera.....	71
Abbildung 54:	Spezial-PC-System für die Fernsteuerung aller Komponenten des UV-Analysesystems.....	71
Abbildung 55:	UV-Software DaVis 6.0 der Fa. LaVision, u. a. Basis der FuE-Arbeiten	72
Abbildung 56:	OPTISOS-Softwareentwicklung der FSt. DBI zur Darstellung von Temperaturfeldern von Aufnahmen im sichtbaren Wellenlängenbereich [26 – 29]	72
Abbildung 57:	Von der FSt. DBI käuflich erworbene Visualisierungssoftware METROLUX	73
Abbildung 58:	Von der FSt. DBI käuflich erworbene Steuerungs- und Visualisierungssoftware Zelos 415 M (Fa. Kappa optronics GmbH Gleichen)	73
Abbildung 59:	Beispielbild für entwickelte Bildverarbeitungssoftware, FSt. DBI; Echtbild einer UV-Flammvisualisierung mit dem entwickelten Analysesystem	74

Abbildung 60:	Beispielbild für entwickelte Bildverarbeitungssoftware, Darstellung der OH-Intensitäten im ausgewählten Feld; Echtbild einer UV-Flammvisualisierung mit dem entwickelten Analysesystem und eingelegtem OH-Filter	75
Abbildung 61:	Sonde mit 2 Öffnungen, Umgebungstemperatur 773K, FSt. DBI	77
Abbildung 62:	Sonde mit verdeckter Frontöffnung, Umgebungstemperatur 773 K, FSt. DBI	78
Abbildung 63:	FuE-Arbeiten zur Optimierung des Öffnungswinkels und zur Verbesserung des Strahlungswärmeschutzes an den UG11-Wärmeschutzgläsern im Rahmen der Funktionserprobungen des Gesamtsystems unter Laborbedingungen, FSt. DBI	79
Abbildung 64:	Funktionserprobung Gesamtsystem unter Laborbedingungen mit ausgewählten UV-Quellen (Beispiel Kerzenflamme, Abstand 1 m, OH-Filter 306,4 nm)	80
Abbildung 65:	Heißerprobung Sondenkühlmodul bis 1300 °C am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI	81
Abbildung 66:	1. Heißtest des entwickelten UV-Komplettsystems am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI bei Ofenraumtemperaturen bis 1300 °C und Vergleichsmessungen (CO-Messungen mit Absaugsonden, Labor-UV-Kamerasystem)	82
Abbildung 67:	Ergebnisse des 1. Heißtests des Komplettsystems am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI (Blickrichtung 90°-Winkelblick).....	82
Abbildung 68:	Das Strahlungsspektrum im Ofenraum (Gesamtstrahlung, Ruß- und Wandstrahlung, Gasstrahlung, Strahlung der OH-Radikale).....	83
Abbildung 69:	Heißerprobung im Technikum der FSt. GWI, Einbaubedingungen für die entwickelte UV-Winkelsonde	84
Abbildung 70:	Periphere Gerätetechnik zur Datenaufzeichnung und zur kompletten Fernsteuerung der Sonde.....	84
Abbildung 71:	Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme für Blickrichtung 90° (Winkelblick) , Heißerprobung an Versuchsanlage der FSt. GWI	85
Abbildung 72:	Industrieerprobung des UV-Analysesystems bei der Ritzenhoff AG; Einbau des Sondenkühlmoduls mit vollelektronischem Bildübertragungs- und Detektorsystem in die Glasschmelzwanne.....	85
Abbildung 73:	Industrieerprobung des UV-Analysesystems bei der Ritzenhoff AG, Komplettsystem vor Einbau in die Glasschmelzwanne	86
Abbildung 74:	Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme bei Blickrichtung 0° (Geradausblick)	86
Abbildung 75:	Bewertung von Sondenkühlmodul und elektronischem Bildübertragungssystem nach Industrieinsatz an der Glasschmelzwanne	87
Abbildung 76:	Industrieerprobung bei der Fa. Telux-Spezialgas GmbH	88
Abbildung 77:	Industrieerprobung bei der Fa. Telux-Spezialgas GmbH, Steuerungs- und Visualisierungs-PC sowie T-Überwachung im Sondeninneren, Bereich UG11-Wärmeschutz	88

Abbildung 78:	Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme bei Blickrichtung 0° (Geradausblick)	89
Abbildung 79:	Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme bei Blickrichtung 0° (Geradausblick)	90
Abbildung 80:	Systemüberprüfungen nach Durchführung der Industrietests an der Glasschmelzwanne	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Realisierte Arbeitsschritte und realisierter Zeitplan (bewilligter Antrag + bewilligte Projektverlängerungen).....	22
Tabelle 2:	Personalausgaben, Geräteausgaben, Leistungen Dritter.....	94
Tabelle 3:	Tabellarische Zusammenstellung über den Transfer der Ergebnisse....	98

Formelzeichen-, Index- und Abkürzungsverzeichnis

α	Wärmeübergang in W/m^2K
AP	Arbeitspaket
AS	Arbeitsschritt
CCD	Lichtempfindliches elektronisches Bauteil einer Kamera (engl. Charge-Coupled Device)
CFD	Numerische Strömungsmechanik (engl. computational fluid dynamics) / Simulationsprogramm
ε	Emissionskoeffizient
f	Ortsfrequenz der Modulation
Fa.	Firma
FEM	Finite-Elemente-Methode
FLORIAN	Flammendiagnostik zur Optimierung und Regelung gasbeheizter Industrieofen-Anlagen
Fst.	Forschungsstelle
FuE	Forschung und Entwicklung
H ⁺	Wasserstoffionen
KMU	Klein- und Mittelständische Unternehmen
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
LP	Linienpaare
N	Normzustand
NA	Numerische Apparatur
NO _x	gasförmige Oxide des Stickstoffes (Schadstoff)
OH	OH-Verbrennungsradikale
OPTISOS	Optisches Sondensystem
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
Q	Wärmemenge
T	Temperatur in °C bzw. K
UG11	Bezeichnung für Wärmeschutzgläser
UV	Ultraviolett

Kurzzusammenfassung

Zur umfassenden Bewertung und Analyse von Erdgasflammen in industriellen Thermoprozessanlagen unter vollen Betriebsbedingungen wurde ein kompaktes industrietaugliches optisches UV-Sensorsystem entwickelt.

Im Vergleich mit dem aktuellen nationalen und internationalen Stand der Forschung stellt die Entwicklung eine absolute Neuheit dar. Das optische, Minimal-Invasive Analysesystem zeichnet sich u. a. durch eine hohe Auflösung und Lichtstärke sowie durch eine variable Blickrichtung von 0 - 90 ° aus.

Für eine Brenneinstellung und eine Optimierung des Verbrennungsprozesses, z. B. bei Gasbeschaffenheitsänderungen, ermöglicht das System eine qualitative und quantitative UV-Analyse von Erdgasflammen (Verbrennungsradikale, Schadstoffbildung, Flammgeometrie) unter allen typischen Einbau- und Ofenraumbedingungen von industriellen Thermoprozessanlagen.

Aktuelle Anfragen aus der Industrie, insbesondere der Glasindustrie, der Metallurgie und der Kraftwerkstechnik, zeigen einen großen Bedarf für das erreichte FuE-Ziel auf.

Das IFG-Vorhaben 15890 BG der Forschungsvereinigung Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), Josef-Wirmer-Straße 1-3, 53123 Bonn, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Zusammenfassung

Zur umfassenden Bewertung und Analyse von Erdgasflammen in industriellen Thermoprozessanlagen unter vollen Betriebsbedingungen wurde von den Forschungsstellen DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI), Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) sowie Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik (ITO) ein kompaktes, industrietaugliches optisches UV-Sensorsystem für die UV-Flammenanalyse in industriellen Thermoprozessanlagen entwickelt. Die günstige Konstellation der Projektpartner mit einer Optik-Institution und zwei führenden Gas-Forschungsinstituten, die auf diesem Fachgebiet mit gemeinsamen Erfahrungen aufwarten können (z. B. FLORIAN-Entwicklung) ermöglichten, diese nicht einfache und komplexe Aufgabenstellung zu lösen.

Im Vergleich mit dem aktuellen nationalen und internationalen Stand der Forschung stellt die Entwicklung eine absolute Neuheit dar. Der Stand der Technik zum Zeitraum des Projektstartes zeichnete sich für eine Industrieanwendung nur durch eine axiale Blickrichtung bei einem Gesichtsfeldwinkel von max. 40° aus. Durch das kleine Gesichtsfeld kann nur in Ausnahmefällen der gesamte Prozessraum überschaut werden. Der Sensor ist daher für viele Probleme der Industrie nicht einsetzbar. Der Stand der Technik zum Projektstart ermöglichte weiterhin nur einen qualitativen Nachweis mit sehr schwachen OH-Signalen aufgrund zu hoher Übertragungsverluste / geringe Lichtstärke im Endoskop.

Die erreichten Ergebnisse des Projektes, die zur Entwicklung des UV-Analysesystems führten, stellen hauptsächlich folgenden innovativen Beitrag auf dem Fachgebiet dar:

- Ein fernbedienbares, industrietaugliches, robustes und kompaktes bildgebendes UV-Sensorsystem zur UV-Flammenanalyse in industriellen Thermoprozessanlagen mit einer Kombination aus hoher Auflösung und Lichtstärke sowie variabler Blickrichtung,
- Eine qualitative und quantitative UV-Analyse von Erdgasflammen auf Verbrennungsradikale und Schadstoffbildung unter allen typischen Einbau- und Ofenraumbedingungen von industriellen Thermoprozessanlagen,
- Durch variable Blickrichtung ist die UV-Flammenanalyse oftmals von einer Einbaustelle auch bei Mehrbrennersystemen für Entfernungen von 50 cm bis unendlich möglich.

Das entwickelte UV-Analysesystem konnte bereits erfolgreich unter Industriebedingungen getestet werden. Die Tests im Technikum und an Industrieanlagen bestätigten auch die von den FSt. durchgeführten Berechnungen, Modellierungen und experimentellen Untersuchungen zur Auslegung des Systems. Für eine Brenneinstellung und eine Optimierung des Verbrennungsprozesses, z. B. bei Gasbeschaffenheitsänderung, wird das entwickelte Analysesystem u. a. ein wichtiges Hilfsmittel darstellen. Aktuelle Anfragen aus der Industrie, insbesondere der Glasindustrie, der Metallurgie und der Kraftwerkstechnik zeigen einen großen Bedarf für das erreichte FuE-Ziel auf.

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte gemäß des von den Gutachtern befürworteten Projektablaufplanes.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Vor dem Hintergrund eines wirtschaftlichen Anlagenbetriebes in Verbindung mit einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes erlangt die Wirkungsgradsteigerung gasbefuerter Industrieanlagen immer stärkere Bedeutung. Gleichzeitig muss allerdings dafür Sorge getragen werden, dass das Prozessgut hohen Qualitätsanforderungen entspricht und der Schadstoffausstoß – speziell der von Stick- und Kohlenstoffoxiden – unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte bleibt. Unter diesen Gesichtspunkten ist es notwendig, nicht nur die Anlagen und den Prozess, sondern auch die Methoden und Techniken zur Erfassung der im Feuerraum stattfindenden Vorgänge zu qualifizieren.

Die Zustandserfassung und Regelung von Feuerungssystemen in industriellen Thermoprozessanlagen erfolgt gegenwärtig über die Messung der eingetragenen Mengen sowie über die Analyse der Abgase. Beide Größen sind fehlerbehaftet, da die Zusammensetzung und der Heizwert des eingesetzten Erdgases nur als Mittelwerte vom Versorger bereitgestellt werden. Kurzzeitige Schwankungen oder Veränderungen im Rahmen der Lieferbedingungen sind als Eingangsgrößen für die Prozesssteuerung nicht verfügbar. Des Weiteren setzt sich das Abgas meist aus den Verbrennungsprodukten mehrerer Brenner zusammen, so dass man keine Aussagen über das Umsetzungsverhalten in den Flammen einzelner Brenner treffen, geschweige denn in diese Vorgänge zielorientiert eingreifen kann.

Für eine aussagekräftige Diagnose von Thermoprozessanlagen ist die Beobachtung des Nutzraumes während des Betriebes von entscheidender Bedeutung. Nicht nur die Planung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen ist damit genauer möglich, sondern auch die energetische Optimierung von Feuerungssystemen sowie von Transport- und Erwärmungsvorgängen. Für die Optimierung von Feuerungssystemen ist die Analyse des UV-Spektrums von herausragender Bedeutung. Innerhalb von Flammen leuchten freie Radikale (OH) besonders intensiv, während die Hintergrundstrahlung von Wänden und Wärmegütern klein ist. Auf diese Weise lassen sich Verbrennungszonen und Ausbrandbereiche eingrenzen, Sauerstoffmangel bzw. die Entstehung von Schadstoffen (NO_x) feststellen und optimieren.

Die Beobachtung des Nutzraumes der Thermoprozessanlagen scheitert in sehr vielen Fällen an der ungenügenden Zugänglichkeit während des Betriebes. Einerseits sind Beobachtungsöffnungen begrenzt vorhanden, andererseits schränken neben der hohen Prozesstemperatur verschiedene Schutzgase, aggressive Medien oder hohe Drücke den Zugang für optische Sonden ein. Für die Beobachtung des Nutzraumes von Thermoprozessanlagen werden optische, berührungslos arbeitende Messtechniken als besonders geeignet angesehen. Nur sie erlauben den direkten und dabei rückwirkungsfreien Zugriff auf die Prozesse im Brennraum der thermischen Anlage.

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik wurde zu Projektbeginn im Rahmen der Erstellung der Vorhabensbeschreibung umfassend recherchiert. Diese Recherche ist auch zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch aktuell. Das ergaben aktuelle Literatur und Patentrecherchen [55].

Der Dieser Stand bezüglich optischer Analyseverfahren ist durch Systeme gekennzeichnet, die eine, mehr oder weniger, eingeschränkte Reaktionsrauminnspektion im heißen, drucklosen und hinsichtlich Staub, Schlacke und Verschleiß auslösender Gasbestandteile wenig belasteten Anlagenzustand ermöglichen. Die Systeme detektieren überwiegend im sichtbaren Wellenlängenbereich und z. T. im nahen Infrarotbereich [1 - 34]. Das einzige am Markt verfügbare System mit einem umfangreichen Leistungsspektrum (Einsatz in Druckbehältern, UV-Visualisierung u. a.) ist das an der Forschungsstelle 1 (DBI) entwickelte endoskopische Schlüsseloch-Diagnosesystem OPTISOS [1 - 4, 11, 26 -29, 34].

Erdgasflammen in industriellen Thermoprozessanlagen bei Temperaturen größer 1000 °C lassen sich mit diesen Systemen in der Regel nicht visualisieren, denn vor der Hintergrundstrahlung der Feuerräume heben sich die Erdgasflammen im sichtbaren Spektralbereich über 400 nm kaum ab [28, 29, 35 - 38]. In diesem Spektralbereich können nur rußende Flammen detektiert werden. Man ist jedoch bestrebt, die Rußbildung sowohl bei gasförmigen als auch bei flüssigen Brennstoffen zu vermeiden. In einigen Fällen kann es zu einer partiellen Rußbildung kommen, die bei mehrstufigen Brennern in den Luftmangelzonen – also in unmittelbarer Brennernähe – auftritt. Die Abmessung dieser leuchtenden Rußzone entspricht bei weitem nicht der Kontur der eigentlichen Flamme. Die Flammenbereiche, die für den eigentlichen Wärmetransfer verantwortlich sind, können im sichtbaren Wellenlängenbereich nicht erfasst werden, da die für die Wärmeübertragung verantwortlichen Abgaskomponenten CO₂ und H₂O hauptsächlich im infraroten Spektralbereich emittieren. Auch der Einsatz von Infrarotkameras liefert keine zusätzlichen Informationen, da die in diesem Spektralbereich wirkende Gasstrahlung durch die Festkörperstrahlung der Wände um ein Mehrfaches überlagert wird [37].

Untersuchungen im UV-Bereich (200 – 400 nm) können die Reaktionszone von Flammen detektieren [28, 29, 35, 37]. Das Verfahren der UV-Flammendiagnostik nutzt die Strahlung der bei der Verbrennung entstehenden Hydroxid-Radikale (OH) bei 306,4 nm aus. Diese Strahlung wird nicht durch Strahlungsspektren von Wänden oder weiteren gasförmigen Komponenten überlagert. Durch geeignete Filtertechniken in Kombination mit bildverstärkenden Kamerasystemen wird das von OH-Radikalen ausgesandte UV-Licht detektiert. Die Information über die vorliegende OH-Konzentration kann somit für die Beurteilung und Optimierung von Flammen ausgewertet werden.

Das Verbrennungsradikal OH entsteht durch Hochtemperaturdissoziationsprozesse gemäß



Die Stellen erhöhter OH-Konzentration sind auch Stellen erhöhter Temperatur und damit erhöhter NO_x-Bildung. Weiterhin lassen die Verteilungen der detektierten OH-Radikale auch Aussagen über Flammenkonturen zu. Da das OH-Radikal 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 im Hinblick auf die Erhöhung der Effektivität des Thermoprozesses beeinflusst werden.

Angetrieben von den hohen Anforderungen der Motorenhersteller an die Visualisierung von Verbrennungs- und Gemischbildungsvorgängen in Motoren wurde in den letzten Jah-

ren verstärkt an der Entwicklung von besonders lichtstarken und zugleich UV-transparenten, technischen Endoskopen geforscht. Ein wesentlicher Fortschritt wurde durch die Integration diffraktiver Komponenten zur effektiven Aberrationskorrektur erzielt, wodurch eine ca. 10-fache Lichtstärke im Vergleich zu einem kommerziell verfügbaren rein refraktiven Endoskop realisiert werden konnte [39, 49]. Diese reinen Quarz-UV-Optiken ermöglichen erstmals eine minimalinvasive Anwendung von UV-LIF-Messungen für die Optimierung der Gemischbildung und Verbrennung in Motoren. Diese Entwicklungsrichtung wurde durch den Einsatz von Erdgas als Brennstoff im Ottomotor noch forciert. Über den Einsatz von UV-durchlässigen Endoskopen bei der Entwicklung von Wasserstoffverbrennungsmotoren wird u. a. in [37] berichtet.

Eine interessante Anwendung in der Motorenentwicklung wurde in [38] dargestellt. Durch den Einbau und die Zusammenschaltung von drei UV-sensitiven Visualisierungssystemen am Zylinderkopf eines Motors waren räumliche Untersuchungen im Brennraum möglich. Die damit gewonnenen Daten bildeten die Grundlage für weiterführende Berechnungen.

Interessante Forschungsberichte über den Einsatz von Faseroptiken zur Lichtübertragung in Endoskopen sind in der Literatur [40 - 43, 49 - 51] enthalten. Allerdings liegt das damit detektierte UV-Licht im Wellenlängenbereich 350 bis 380 nm. Weitere Angaben zu Faseroptiken und Linsensystemen, die im UV-Bereich detektieren und der Untersuchung von Verbrennungsvorgängen dienen, befinden sich in [44 - 48]. Dabei wurden jedoch keine industriellen Thermoprozessanlagen betrachtet. Die Entwicklungen in der Motorentechnik lassen sich nur bedingt auf Thermoprozessanlagen übertragen, da die Prozessräume wesentlich größer sind und in Motoren die Hintergrundstrahlung völlig fehlt.

Ausführliche Recherchen zum aktuellen Stand der Technik ergaben, dass gerade im Bereich der Thermoprozessanlagen, die in vielen wichtigen Industriezweigen (z. B. Metallurgie, Metallverarbeitung, Keramik) eingesetzt werden, keine ausgereiften Systeme auf dem Markt vorhanden sind. Die Notwendigkeit, Thermoprozessanlagen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz und Schadstoffemission weiter zu optimieren, macht den Forschungsbedarf auf diesem Gebiet deutlich. Mit der von den Forschungsstellen durchgeführten Entwicklung eines **Optischen, Minimal-Invasiven Analysesystems für die UV-Flammen-Diagnose in Thermoprozessanlagen** wurde ein Beitrag zur Lösung der genannten Problematik geleistet. Dabei sollen die neuen UV-transparenten Systeme für Thermoprozessanlagen im Vergleich zu den am Markt befindlichen Systemen, die vorwiegend in der Motorenforschung eingesetzt werden, komplexen und extremen Anforderungen genügen. Diese Anforderungen sind im Detail:

- Die optischen Komponenten müssen für Einsatztemperaturen bis zu einer Ofenraumtemperatur von 1800 °C einsetzbar sein.
- Die Arbeitslänge der Sonden/Endoskope muss bei mind. 1,50 m liegen und der Außendurchmesser muss klein genug für typische Ofenöffnungen sein.
- Die Flammenbewertung muss von sehr wenigen Einbaustellen aus möglich sein, d. h. die Sonde muss über ein großes Gesichtsfeld und eine variable Blickrichtung bis 90° zur Sondenachse verfügen.
- Die Sonde muss in Atmosphären mit Partikeln und kondensierbaren Gasbestandteilen dauerhaft einsetzbar sein.
- Die Sonde muss Vibrationen in Thermoprozessanlagen tolerieren.
- Die eingesetzten elektronischen Komponenten müssen Temperaturen bis 70 °C dauerhaft standhalten.
- Auf Grund der Entfernung zwischen Objektiv und Beobachtungsgegenstand (z. B. Erdgasflamme) werden hohe Anforderungen an die Bildqualität im Wellenlängenbereich von 300 - 350 nm, auch im Fernbereich, gestellt.

Aus Anfragen aus der Industrie, insbesondere der Glasindustrie und der Metallurgie, geht ein großer Bedarf für das anvisierte FuE-Ziel hervor. Der neue bildübertragende Miniatur-UV-Sensor mit variabler Winkeloptik basiert auf den Erfahrungen, die mit dem bereits von der Forschungsstelle DBI entwickelten Sondensystem OPTISOS (optisches Sondensystem zur kameragestützten Visualisierung von Thermoprozessanlagen) gewonnen wurden. Dieses soll mit dem von beiden Forschungsstellen (DBI und GWI) entwickelten Verfahren zur UV-Flammendiagnostik (Flammendiagnostik zur Optimierung und Regelung gasbeheizter Industrieofen-Anlagen, kurz: FLORIAN) kombiniert werden.

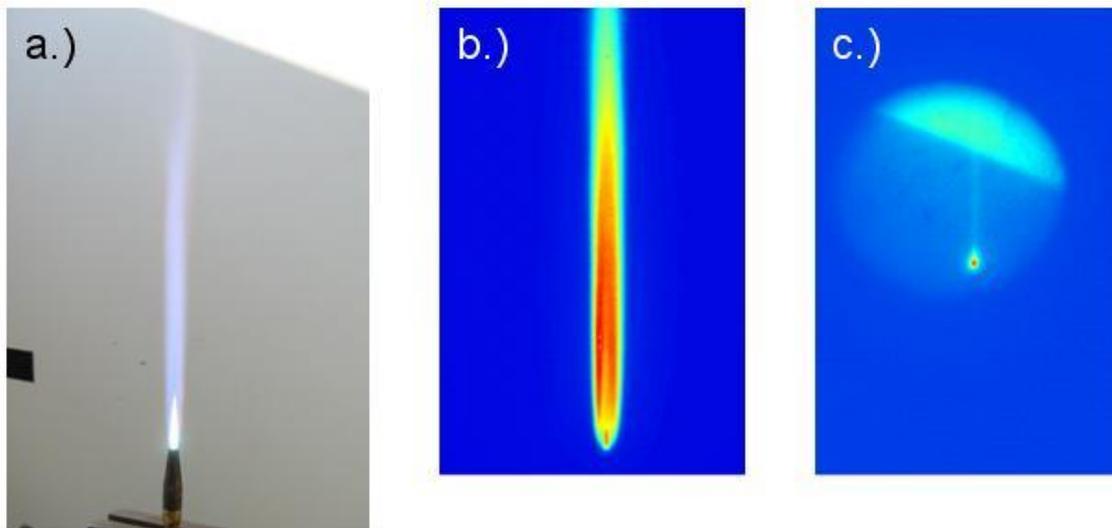


Abbildung 1: Aufnahmen von Flammen eines Schweißbrenners a.) mit einer Digitalkamera b.) mit dem UV-Laborkamerasystem und c.) mit dem FLORIAN-System

Mit der UV-Flammendiagnostik (Standardlaborkameras) wurden bereits umfangreiche Untersuchungen an Versuchsanlagen der Forschungsstellen sowie an verschiedenen Industrieanlagen aus mehreren Wirtschaftszweigen durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden einerseits die Vorteile des existierenden Systems erkannt. Sie machten aber andererseits auch die Schwachstellen deutlich.

Dies wird besonders am Beispiel in **Abbildung 1** deutlich. Die Abbildung zeigt die Flamme eines Schweißbrenners im sichtbaren Spektralbereich sowie deren Visualisierung mit Hilfe einer UV-Laborkamera bzw. mit dem für das FLORIAN-Verfahren verwendete Endoskop. Für beide Systeme wurde eine CCD-Kamera von der Firma LaVision mit einer Auflösung von 640 x 512 Pixeln verwendet. Der Objektstand war für beide Systeme identisch. Während jedoch mit dem Laborsystem nur eine Aufnahme gemacht wurde, erfolgte die Aufnahme mit dem Florian-System mit Hilfe der sogenannten „On-Chip-Integration“, bei der eine Vielzahl von Einzelbildern zu einem Bild aufsummiert werden. Trotz der „On-Chip-Integration“ über 100 Einzelbilder ist die erreichte Intensität des rechten Bildes (FLORIAN-System) erheblich geringer (**Abbildung 1**).

Das für das FLORIAN-Verfahren verwendete optische System erlaubte nur eine axiale Beobachtung des Messobjektes mit einem fixen Gesichtsfeldwinkel von 40°. Damit werden die Beobachtungsmöglichkeiten in einer Thermoprozessanlage erheblich eingeschränkt. Gelingt es sowohl die Blickrichtung als auch den Gesichtsfeldwinkel variabel zu gestalten, kann nahezu der gesamte Ofeninnenraum von einigen wenigen Einbaustellen erfasst werden (**Abbildung 2**). Darüber hinaus können Flammen von unterschiedlichen Messpositionen aus aufgenommen werden, was nicht nur die Aussagekraft der Aufnah-

men wesentlich erhöht, sondern auch Detailaufnahmen ermöglicht, wie z. B. die separate Aufnahme einer einzelnen Flamme bei einem Mehrbrennersystem (**Abbildung 3**).

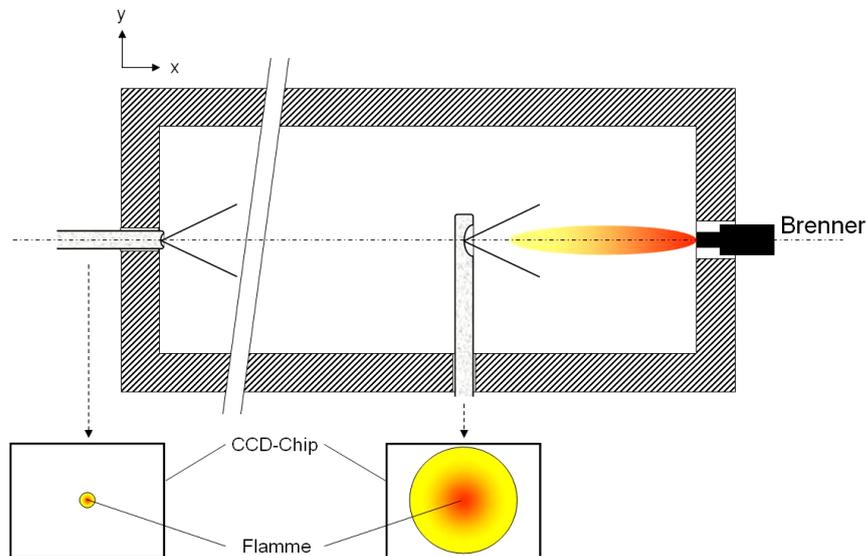


Abbildung 2: Vergleich Stand der Technik – FLORIAN-Verfahren (links) und Zielstellung des Projektes – variable Messmöglichkeiten durch unterschiedliche Blickrichtungen (rechts)

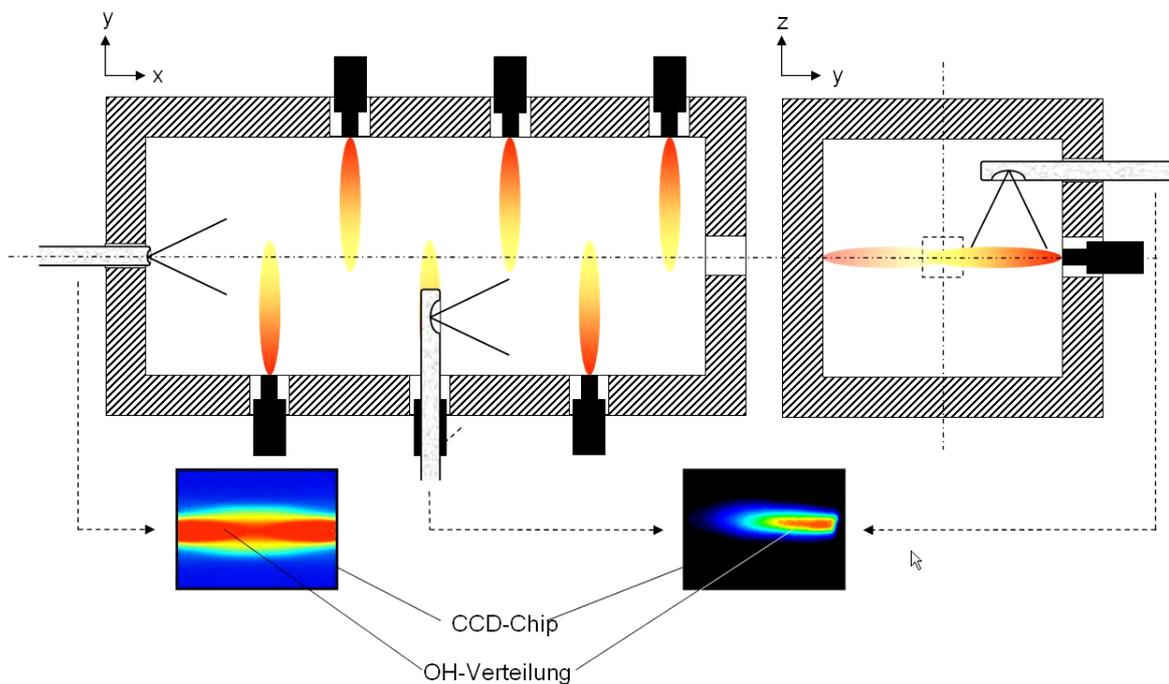


Abbildung 3: Vorteile einer Winkeloptik zur Separation einer Flamme bei Mehrbrennersystemen (links: FLORIAN, rechts: Projektzielstellung)

Als wesentliche Schwachstellen des FLORIAN-Systems sind folgende Punkte zu nennen:

- Das eingesetzte Endoskop gestattete nur eine axiale Blickrichtung bei einem Gesichtsfeldwinkel von 40°. Damit ist von einer Einbaustelle aus nur ein kleiner Bereich des Ofeninnenraumes detektierbar.

- Durch die geringe Aperturblende und die hohen Übertragungsverluste im Endoskop ergab sich eine sehr hohe Dämpfung des OH-Signals. Die Folgen waren große Ungenauigkeiten in der Bewertung der Flammen. Der Fernbereich (> 5 m) ist nicht mehr detektierbar.
- Das System war wegen der Temperaturempfindlichkeit der verklebten Linsenbaugruppen und seiner Schwingungsanfälligkeit nicht für einen längeren Betrieb in einer industriellen Umgebung (1600 °C) geeignet.
- Die Schmutzempfindlichkeit des Sondenauges war relativ hoch.

Damit ist ein quantitativer und reproduzierbarer Nachweis von Verbrennungsradikalen unter Industriebedingungen stark fehlerbehaftet. Dennoch zeigte das FLORIAN-Verfahren die Möglichkeit auf, in ausgewählten Versuchsanlagen Flammen zu analysieren und den Verbrennungsprozess zu optimieren. Diese Untersuchungen haben das Bottleneck im gegenwärtig eingesetzten optischen Bildübertragungssystem identifiziert.

Das im FuE-Vorhaben zu entwickelnde UV-Sondensystem soll eine Lösung für die genannten Schwachstellen bieten und die Performance deutlich verbessern.

3 Forschungsziele / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziele

3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Zur umfassenden Bewertung und Analyse von Erdgasflammen in Thermoprozessanlagen unter vollen Betriebsbedingungen sollte ein industrietaugliches optisches UV-Sensorsystem entwickelt werden. Das Miniatur-Sensorsystem für den minimalinvasiven Einsatz in Thermoprozessanlagen sollte sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Variable Blickrichtung mit einer Abweichung von bis zu 90° zur Sensor-/Endoskopachse und einem Gesichtsfeldwinkel von bis zu 70°,
- Außendurchmesser der Hochtemperatursonde < 70 mm,
- Eine Bildübertragung im UV-Bereich zwischen 300 - 350 nm mit geringer Intensitätsschwächung der Strahlung und hoher Auflösung,
- Bildverarbeitung zum Ausgleich von Verzerrungen, von Absorptionsschwankungen der Optik in Abhängigkeit vom Einfallswinkel sowie der quantitativen Bestimmung von OH-Radikalverteilungen,
- Stabiler Betrieb bei einer Reaktionsraumtemperatur bis 1800 °C in einer mit Partikel und kondensierbaren Bestandteilen verunreinigten Atomsphäre.

3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der entwickelte Miniatur-UV-Sensor stellt im Vergleich mit dem aktuellen nationalen und internationalen Stand der Forschung [55] eine Neuheit dar. Der Stand der Technik zum Zeitpunkt der Antragstellung zeichnet sich für eine Industrieanwendung nur durch eine axiale Blickrichtung bei einem Gesichtsfeldwinkel von max. 40° aus. Durch das kleine Gesichtsfeld konnte nur in Ausnahmefällen der gesamte Prozessraum überschaut werden. Der Sensor war daher für viele Probleme der Industrie nicht einsetzbar. Der Stand der Technik ermöglichte nur einen qualitativen Nachweis mit sehr schwachen OH-Signalen aufgrund zu hoher Übertragungsverluste / geringe Lichtstärke im Endoskop. Die Ergebnisse des Projektes liefern den folgenden innovativen Beitrag:

- Industrietaugliches, bildgebendes UV-Sensorsystem mit einer Kombination aus hoher Auflösung und Lichtstärke sowie variabler Blickrichtung und variablem Gesichtsfeldwinkel,
- Industrietaugliche, robuste Miniatur-Ofenraumsensorik, für Dauerbetrieb geeignet,
- Qualitative und quantitative UV-Analyse von Erdgasflammen unter allen typischen Einbau- und Ofenraumbedingungen von industriellen Thermoprozessanlagen,
- UV-Flammenanalyse auf Verbrennungsradikele und Schadstoffbildung in der Flamme von einer Einbaustelle in der Thermoprozessanlage, auch bei Mehrbrennersystemen und Entfernungen > 5 m.

3.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

3.2.1 Projektstrategie

Um die Strategie zur Erreichung der Projektziele klarer herauszuarbeiten, werden zunächst die zum Projektstart möglichen Konzepte erläutert.

Das Kernstück des SONDENSYSTEMS bildet eine UV-transparente Miniaturoptik, die eine Beobachtung selbst durch kleinste Schauöffnungen ermöglichen soll. Das optische System soll aus folgenden Hauptkomponenten aufgebaut sein:

- Lichteintrittssystem für variable Blickwinkel,
- Weitwinkel-Objektiv und Bildübertragungssystem,
- Ein Detektorsystem für UV-Licht bestehend aus einem Lichtverstärker oder Lichtwandler und dem Bilddetektor.

Das Lichteintrittssystem soll aus einem beweglichen Spiegel bestehen, der die Umlenkung des Strahlenganges bis 90° gestattet. Dieser sollte aber auch aus dem Strahlengang heraus geklappt werden können, um die axiale Blickrichtung zu ermöglichen. Zusätzlich ist ein Wärmeschutzfilter vorzusehen, der die in das SONDENSYSTEM eintretende Strahlungsenergie auf den gewünschten Spektralbereich begrenzt.

Für die Bildübertragungssysteme wurden zu Projektstart drei Varianten in die Betrachtung aufgenommen. Die Recherche zum Stand der Technik zeigte, dass seit der Entwicklung des FLORIAN-Verfahrens neue Konzepte zur Verfügung stehen (s. o.). Um aber eine objektive Bewertung durchführen zu können, sind Detailuntersuchungen für jedes Konzept zwingend notwendig. Die zu untersuchenden Varianten sollen im Folgenden genauer dargestellt werden.

Variante 1: Bildübertragungssystem auf Basis einer mehrstufigen Relay-Optik

Diese Grundvariante ist ein starres Endoskop, bestehend aus Linsen und Relay-Elementen zur Weiterleitung von Zwischenbildern über 1,5 m Länge, das zusammen mit Objektivbaugruppen zur Realisierung der objekt- und bildseitigen Parameter, wie z.B. Feldwinkel, Arbeitsabstand oder auch Größe des Detektors ausgelegt und optimiert ist. Als optische Korrektur Elemente soll neben unterschiedlichen UV-Materialien, wie z. B. CaF₂, BaF₂, MgF₂, insbesondere die Verwendung von asphärischen oder diffraktiven Elementen zur Aberrationskorrektur anhand von unterschiedlichen Designansätzen untersucht werden. Hierdurch kann voraussichtlich auf den Einsatz von Kittmaterialien gänzlich verzichtet werden, um einerseits die UV-Transmission nicht negativ zu beeinträchtigen und andererseits Vorteile im thermischen Verhalten zu gewinnen.

Variante 2: Faserbasiertes Bildübertragungssystem

Als Alternative soll ein Endoskop, bestehend aus einem Quarzfaserbündel mit möglichst dünnen Einzelfasern, in die Konzeptionsphase einbezogen werden. Für die detaillierte Erfassung des Inspektionsraumes stehen heute im sichtbaren Spektralbereich Glasfaser-Endoskope zur Verfügung, die z. B. bei einem Sondendurchmesser von 8 mm und einem Einzelfaserdurchmesser von nur 6 Mikrometer eine optische Auflösung von ca. 40.000 Bildpunkten aufweisen. Insbesondere auf der Brennraumseite wird bei diesem Konzept ein spezielles Objektiv benötigt, um ein Zwischenbild zu erzeugen, das in das geordnete

Faserbündel eingekoppelt werden kann. Der Bilddetektor kann dann direkt an das Faserbündel angeschlossen werden.

Die Recherche nach Lösungen, evtl. mit neu zusammengestellten Komponenten für den UV-Bereich, soll im Rahmen des Projektes durchgeführt werden. Dabei kann u. a. auf Erfahrungen des ITO aus der Realisierung eines UV-LIF-Sensors mit Quarzfasern für Anregung und Detektion zurückgegriffen werden [51].

Um Aussagen hinsichtlich der optischen Auflösung und dem damit verbundenen Durchmesser des Endoskops tätigen zu können, müssen u. a. die Fragen, wie dicht die Einzel Fasern zu einem Bildleitbündel angeordnet werden können und wie hoch die UV-Lichtübertragung der entsprechenden Fasern ist, beantwortet werden. Neben umfangreichen Recherchearbeiten sollen – wie bei den unterschiedlichen Linsenmaterialien – experimentelle Voruntersuchungen an Einzelkomponenten durchgeführt werden, um frühzeitig einen möglichen Einsatz von Glasfasern abschätzen zu können.

Variante 3: Elektronisches Bildübertragungssystem

In die Untersuchungen soll eine elektronische Bildübertragung ohne Stablinsen oder Glasfasern einbezogen werden. Der Lichteintritt wird auch bei dieser Variante mit einem beweglichen Spiegel realisiert. Als Hauptkomponenten folgen danach ein UV-transparentes Objektiv, ein Bandfilter für die erforderliche Wellenlänge sowie ein Bilddetektorsystem, das in den Sondenkopf eingeordnet werden kann. Der Detektor besteht aus einem Bildwandler (Wandlung der UV-Strahlung in sichtbares Licht) und einer Miniaturkamera. Für die notwendige Integration in den Sondenkopf müssen thermisch und mechanisch robuste Miniaturbauteile eingesetzt werden. In der Konzeptionsphase sind diesbezüglich umfassende Betrachtungen und Recherchen, auch zur erreichbaren Auflösung und Bildqualität, erforderlich. Da sich dieses System im Sondenkopf befindet, ist den thermischen Randbedingungen besondere Beachtung zu schenken.

Das Detektorsystem sollte bei möglichst hoher UV-Sensitivität auch hinsichtlich Auflösung und Dynamik für die vorgesehene Auswertung ausgewählt werden. Das dazu eingesetzte Objektiv ist verantwortlich für die Bildschärfe bei möglichst hoher Lichtstärke.

Für die o. g. Varianten 1 und 2 des Bildübertragungssystems können gleiche Komponenten verwendet werden. Die Variante 3 erfordert ein stark miniaturisiertes Detektorsystem, das in den freien Durchmesser des Sondenkörpers eingeordnet werden muss.

Aus den vorbereitenden Analysen scheint die Variante 3 die höchste Lichtstärke für das Bilderfassungssystem zu ermöglichen. In diesem Falle muss jedoch ein stark miniaturisiertes Detektorsystem entwickelt werden. Ohne eine detaillierte Untersuchung ist nicht eindeutig vorauszusehen, welche der Varianten die beste Bildübertragung ermöglicht und ob sie in die gegebenen geometrischen Randbedingungen eingeordnet werden können.

Schwerpunkt des ersten Projektabschnittes bildete deshalb die detaillierte Analyse der drei Konzepte hinsichtlich ihrer Bildübertragungsqualität und der Integrierbarkeit in eine Hochtemperatursonde mit einem sehr geringen Durchmesser bei gleichzeitig hohen Anforderungen an die thermische Stabilität der Komponenten.

Im zweiten Projektabschnitt lag das Hauptaugenmerk gemäß Planung des Vorhabens auf der Entwicklung von Sondenkopf und -korpus, die den thermischen und mechanischen Schutz der optischen Komponenten gewährleisten sollen. Zusätzlich war eine entsprechende Bildverarbeitungssoftware für die Analyse von Flammen zu entwickeln.

Der letzte Projektabschnitt blieb ebenfalls planmäßig der Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems vorbehalten. Es waren sowohl Erprobungen an bekannten, leicht zugänglichen Technikumsanlagen vorgesehen, als auch Erprobungen an Industrieanlagen.

Das wissenschaftlich-technische Ziel wurde gegenüber dem Antrag nicht verändert, konnte aber nur mit erhöhtem personellem Aufwand erreicht werden. Gleichzeitig ist es gelungen, bei wesentlicher Verbesserung der Funktionalität und Robustheit des Analysesystems, für die UV-Flammen-Diagnose die finanziellen Aufwendungen für das erforderliche opto-elektronische Bildübertragungssystem wesentlich zu senken. Damit wird u. a. auch die Nachhaltigkeit der erreichten FuE-Ergebnisse bedeutend erhöht.

Die erreichten Ergebnisse während der Projektlaufzeit vom 01.04.2009 bis 31.05.2012 wurden bisher in drei Zwischenberichten für die Projektjahre 2009, 2010 sowie 2011 dargestellt [52 - 54]. In den folgenden Ausführungen werden die Verwendung der Zuwendung und die in den einzelnen Arbeitspaketen und Arbeitsschritten erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt und den vorgegebenen Zielstellungen des Antrages gegenübergestellt. Die folgende Gliederung in 5 Arbeitspakete und 15 Arbeitsschritte entspricht dabei vollständig dem Arbeitsplan der genehmigten Vorhabensbeschreibung (Kurz- und Langfassung).

4.1 Arbeitspaket 1: Konzeptentwicklung des Gesamtsystems

4.1.1 Arbeitsschritt 1.1: Definition der Anforderungskriterien für das Gesamtsystem (DBI)

Im Arbeitsschritt 1.1 (vgl. **Tabelle 1**) erfolgte die Definition der Anforderungskriterien für das Gesamtsystem unter Leitung der Forschungsstelle DBI. Das entsprach der genehmigten Projektplanung (vgl. Vorhabensbeschreibung des Projektantrages). Von der Forschungsstelle GWI wurde zu diesem Arbeitsschritt zugearbeitet. Auf Basis der im Vorfeld der Antragstellung an den Versuchsanlagen der Forschungsstellen 1 und 2 sowie an verschiedenen Industrieanlagen durchgeführten Untersuchungen mit den vorhandenen Systemen OPTISOS und FLORIAN (**Abbildung 4**), aus Umfragen bei potenziellen Nutzern sowie auf Grundlage der Diskussionen bei Projektmeetings am 27.05.2009 und 02.12.2009 mit dem projektbegleitenden Ausschuss, konnte die Definition der Anforderungskriterien erfolgen.

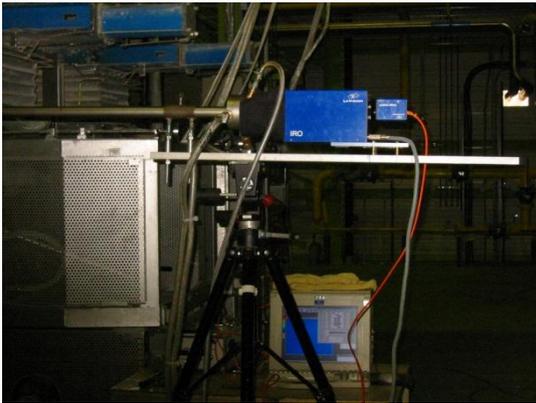


Abbildung 4: FLORIAN-UV-System im Industrieinsatz an einer Glasschmelzwanne, FSt. DBI, GWI

Folgende Anforderungskriterien an das zu entwickelnde System wurden fixiert:

1. Bildübertragung im UV-Bereich zwischen 300 - 350 nm, optimiert auf 306 nm \pm 5 nm, sowie 612 nm (Positionierung des Systems), Transmissionsverluste ohne Filter (Absorption/Reflexion) < 20 %, Mindestauflösung 100 Linien, Ziel Detektor VGA-Auflösung (Auflösung geht gegen Lichtstärke),
2. Arbeitslänge der Sensorik 1,00 - 1,50 m, Präzisierung nach Berechnung,
3. Außendurchmesser der Sensorik klein genug für typische Ofenraumöffnungen, 40 - 70 mm sind jedoch für 90 % der Einsatzfälle ausreichend (**Abbildung 5**),

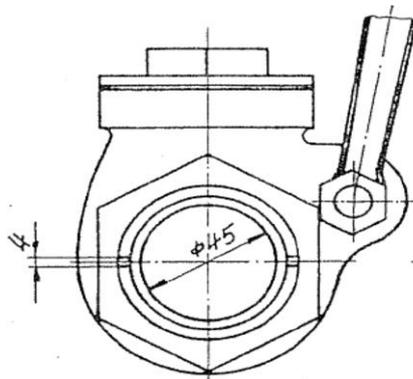


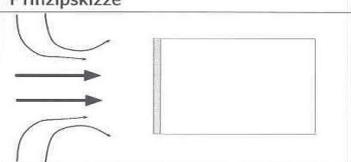
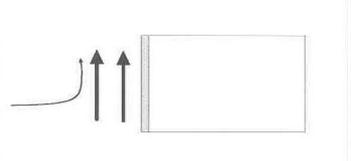
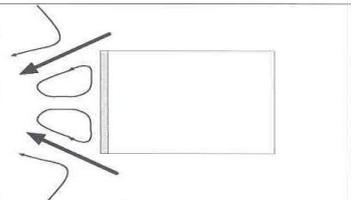
Abbildung 5: Übliche Einbaumaße in der Industrie für die Sensorik, Durchmesser der Durchführung 45 mm, FSt. DBI

4. Eignung für oxidierende, reduzierende und partikelbeladene Ofenraum-atmosphären, auch mit aggressiven Bestandteilen wie z. B. Chlor und Schwefel sowie für leichte Über- oder Unterdrücke im Bereich \pm 20 mbar,
5. Einsatz des Systems und stabiler Betrieb für Ofenraumtemperaturen bis 1700 °C und Flammentemperaturen bis 2000 °C,
6. Geeignet für Umgebungstemperaturen an den Thermoprozessanlagen, die Werte bis 80 °C erreichen können, z. B. im Brennergang von Glasschmelzwannen; Bei einer Umgebungstemperatur von 80 °C am Sondeneinbauort muss eine Einsatzzeit von ca. 1 Stunde gewährleistet sein,

7. Für die Kühlung und Spülung aller Baugruppen und die Spülung des Sichtfensters ist Wasser (Trinkwasser oder gereinigtes Brauchwasser) und ein gasförmiges Medium (z. B. Pressluft, Argon, Stickstoff) erforderlich. Für die Sichtfensterkühlung und Spülung wurden Varianten diskutiert (**Abbildung 6**). Es wird die Querströmung realisiert. Folgende Grenzwerte für die Medienmengen wurden aus Umfragen bei potentiellen Nutzern für o. g. Ofenraumtemperaturen fixiert:

Wasser: max. 600 l/h, gasförmiges Kühl- und Spülmedium: max. 30 m_N³/h

Die **Abbildung 6** zeigt die zu realisierende Querströmung im Bereich der Sichtfenster.

Prinzipskizze	Eigenschaften
	Zuströmung <ul style="list-style-type: none"> • Sehr gute Kühlung • Partikel und Rauchgas werden in direkt Richtung Sonde 'eingezogen'
	Querströmung <ul style="list-style-type: none"> • Gute Kühlung • Partikel und Rauchgas werden nur aus bestimmten Richtungen und bei genügend hoher Anfangsgeschwindigkeit in Richtung Sonde 'eingezogen'
	Abströmung <ul style="list-style-type: none"> • Kühlung nur durch Rückströmgebiete • Partikel und Rauchgas werden nur aus bestimmten Richtungen und bei genügend hoher Anfangsgeschwindigkeit in Richtung Sonde 'eingezogen'

Die Querströmung ist für die Sichtfensterspülung und Sichtfensterkühlung die effektivste Variante

Abbildung 6: Prinzipvarianten für Sondenkopfspülung bzw. -kühlung und deren Eigenschaften, FSt. DBI

8. Für größtmögliche Flammvisualisierungen von einer Einbaustelle aus wurden die folgenden optischen Parameter festgelegt:
- Gesichtsfeldwinkel 60 - 70° bei einer variablen Blickrichtung von 0 bis 90° zur Sensorachse
 - minimaler Abstand Sondenauge-Flamme: 0,5 m
 - maximaler Abstand Sondenauge-Flamme: 10 m
9. Das System muss für die rauen Industriebedingungen an den Thermoprozessanlagen ausreichend robust und insbesondere für Servicefälle modular aufgebaut sein.

Die Mitglieder des PbA haben diesen fixierten Anforderungskriterien zugestimmt.

4.1.2 Arbeitsschritt 1.2: Erstellung des optischen Grobkonzeptes (DBI, ITO, GWI)

Den Arbeitsschritt 1.2 (vgl. **Tabelle 1**) bearbeiteten die 3 Forschungsstellen gemeinsam. Das entsprach der genehmigten Projektplanung.

Entsprechend der Projektstrategie (vgl. Pkt. 3.2.1) wurde das Grobkonzept auf Basis folgender möglicher 3 Varianten für die Bildübertragung (vgl. Pkt. 3.2.1) unter Berücksichtigung o. g. Anforderungskriterien erstellt:

Variante 1: Bildübertragungssystem auf Basis einer mehrstufigen Relay-Optik

Variante 2: Faserbasiertes Bildübertragungssystem

Variante 3: Elektronisches Bildübertragungssystem

Eine Grundlage für die durchgeführten FuE-Arbeiten zur Erstellung des optischen Grobkonzeptes bildet das existierende UV-Endoskopsystem FLORIAN mit einer mehrstufigen Relay-Optik (s. o.). Zunächst wurde daher das FLORIAN-System auf Basis der vorhandenen Unterlagen in der Raytracing-Software ZEMAX (ZEMAX Development Corporation, www.zemax.com) implementiert, um die Leistungsdaten des ursprünglichen Optikdesigns quantitativ untersuchen zu können. Die für das Projekt wesentlichen Eigenschaften des bestehenden Systems sind (vgl. **Abbildung 7 bis** **Abbildung 9**):

- Eintrittspupille hat Durchmesser von 0,8 mm und eine working F# von 43,
- Erfassungsbereich: 60° Vollwinkel,
- Entwicklung für einen freien Rohrdurchmesser von 10 mm,
- Farbkorrektur für einen weiten Spektralbereich von ca. 300 - 700 nm,
- Verzeichnung mit maximal 2 % im relevanten Spektralbereich gut korrigiert,
- Letzte Übertragungsstufe erzeugt ein Bild von 28 mm Durchmesser. Bei 3 Linienpaare (LP)/mm sinkt die MTF unter 0.5. Dies entspricht 164 Pixeln über der Detektorfläche.

Die Modulationsübertragungsfunktion MTF errechnet sich aus:

$$\text{MTF}(f) = \text{Bildkontrast}(f) : \text{Objektcontrast}(f), \quad (1)$$

wobei f die Ortsfrequenz der Modulation darstellt.

Die **Abbildung 7** zeigt die Farbkorrektur für das FLORIAN-System in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Der Korrekturbereich erstreckt sich dabei von ca. 300 - 700 nm.

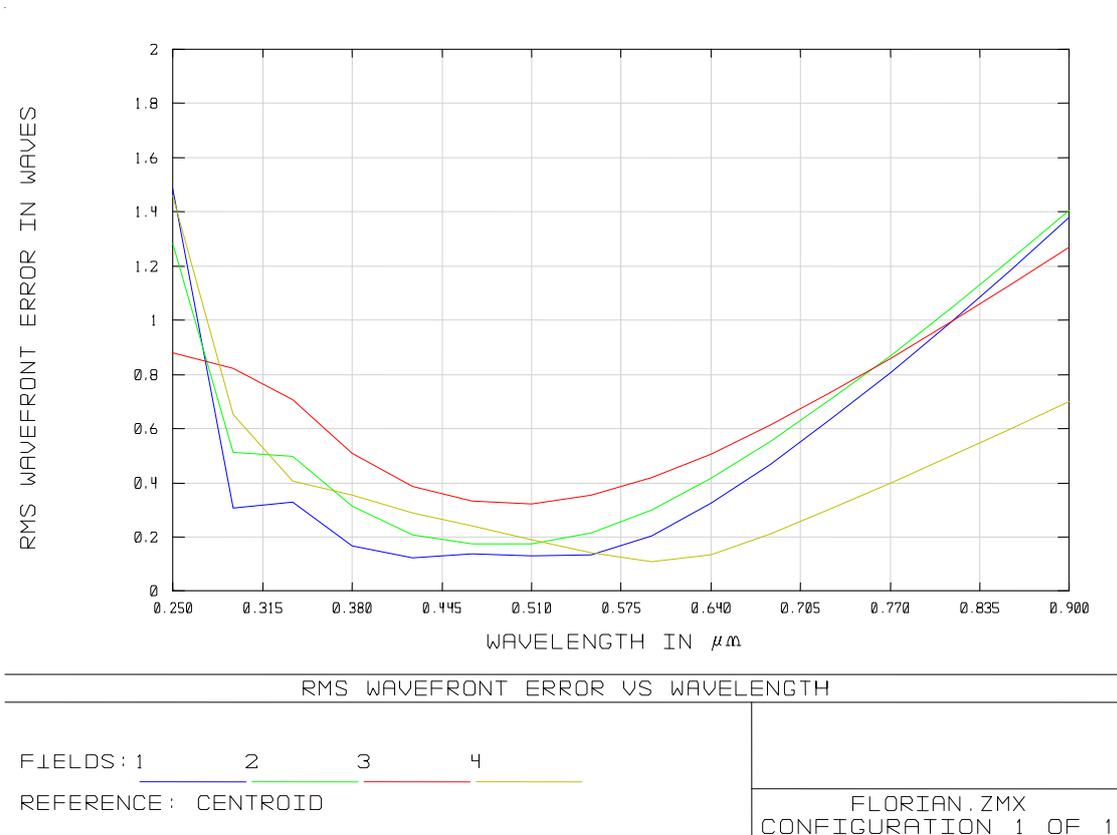


Abbildung 7: Farbkorrektur für das FLORIAN-Systems in Abhängigkeit der Wellenlänge, FSt. ITO

Im FLORIAN-UV-Endoskopsystem befinden sich gemäß **Abbildung 8** 41 Linsen aus Kalziumfluorid und Quarz.

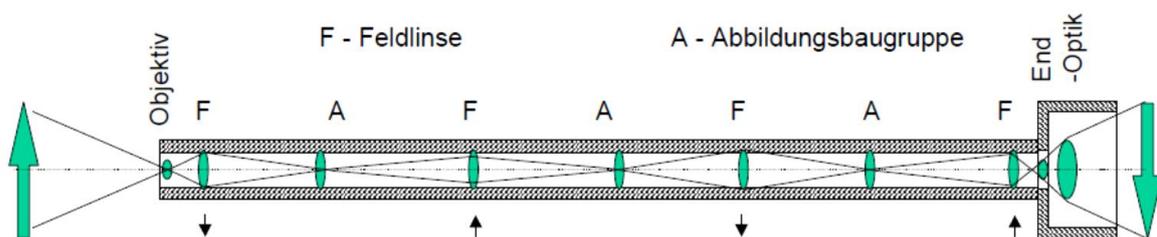


Abbildung 8: UV-Endoskopsystem FLORIAN: 41 Linsen aus Kalziumfluorid und Quarz, FSt. DBI, ITO

Aus der **Abbildung 9** geht die vermessene Verzeichnungskorrektur des FLORIAN-Systems hervor.

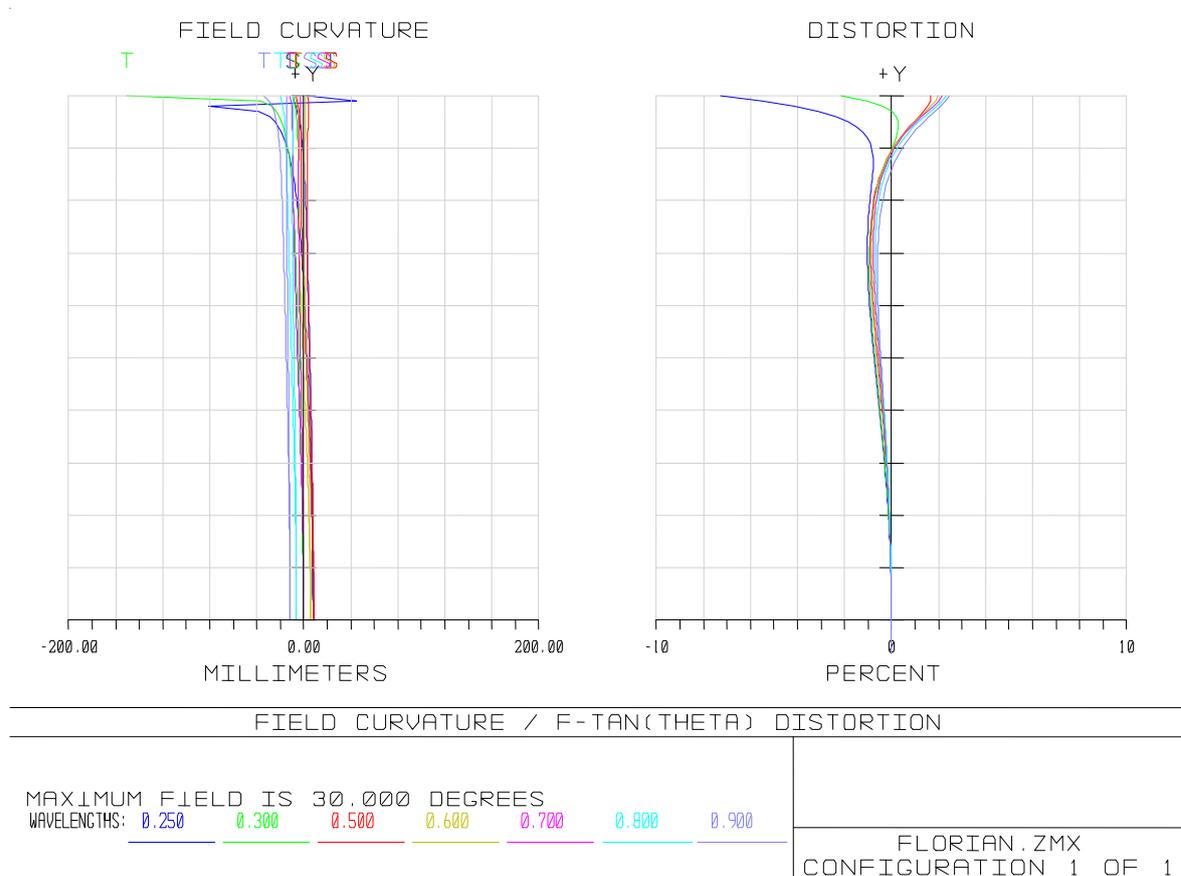
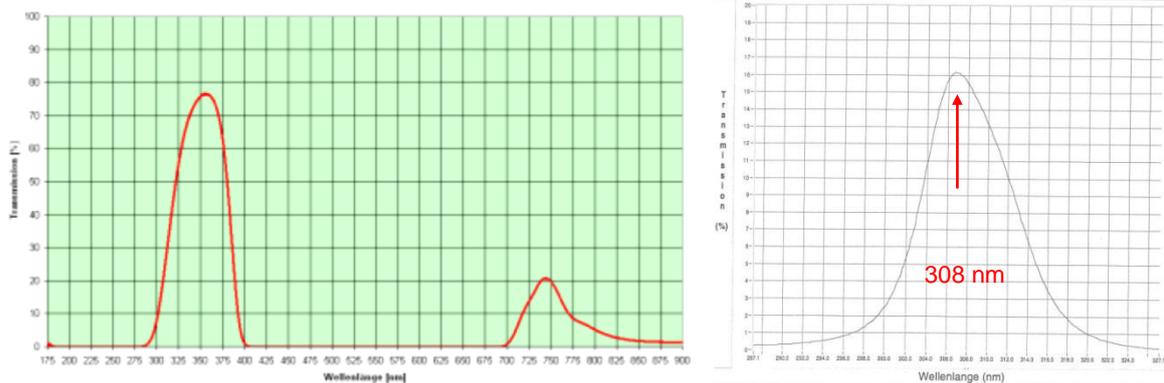


Abbildung 9: Verzeichnungskorrektur des FLORIAN-Systems, FSt. ITO

Für den Betrieb der FLORIAN-Sonde kommen weiterhin Spektralfilter zur Unterdrückung von Hintergrundlicht und Wärmestrahlung zum Einsatz (**Abbildung 10**). Diese Filter sind:

1. Wärmefilter UG11:
 - Transmission für die OH-Bande bei 308 nm: ca. 75 %.
 - Transmission für die Orientierung bei ca. 690 - 740 nm: ca. 8 %.
2. UV-Bandenfilter bei 308 nm:
 - Transmission für die OH-Bande bei 308 nm: ca. 15 %.

Damit wird allein durch die Filterkombination das Nutzlicht um etwa eine Größenordnung reduziert. Für ein faserbasiertes Bildübertragungssystem existieren andere Probleme (z.B. Begrenzung der Anzahl an Bildpunkten), die unter Pkt. 4.2 dargestellt werden.



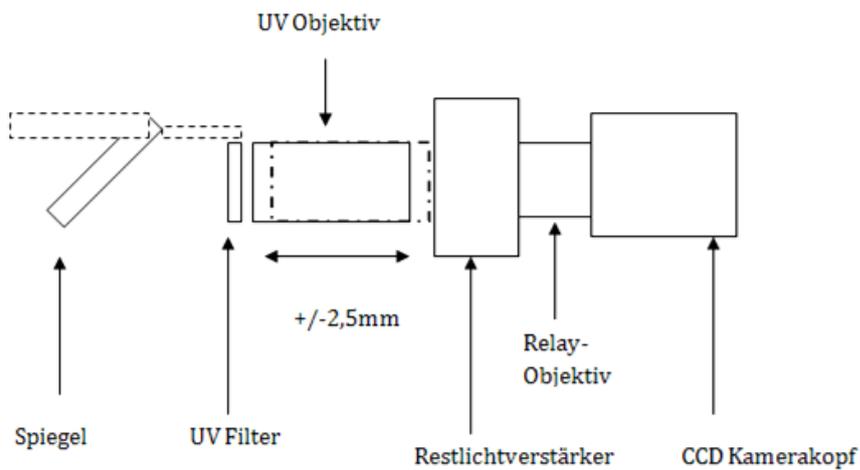
Quelle: Schott, <http://www.silvia-kowollik.de/astro/video/venusbeobachtung-uv.htm>

Abbildung 10: Kennlinien UG11 (links) und UV-Bandenfilter (rechts)

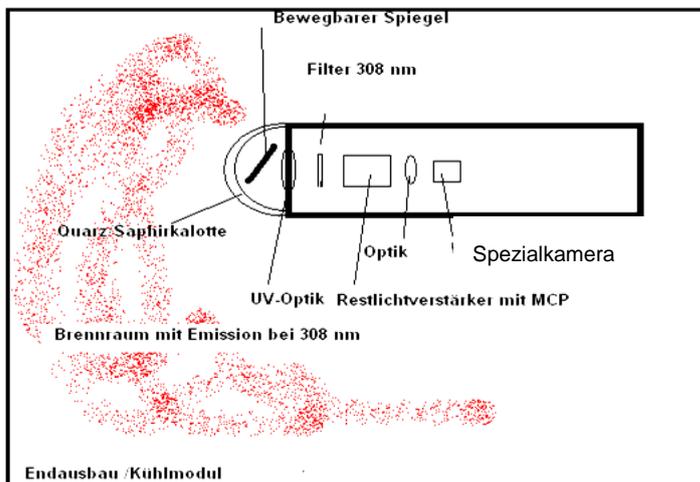
Auf Basis dieser optischen Grundlagen sowie der erarbeiteten Anforderungskriterien (s. o.) erfolgten mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (Fa. LaVision, Fa. Optocon GmbH, Fa. LOI Thermprocess GmbH, Fa. RC Ritzenhoff Cristal AG, Fa. Telux Spezialglas GmbH, Fa. CBBM GmbH) umfassende Diskussionen, wobei u. a. die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten für die Bildübertragung gegenübergestellt wurden. Für die detaillierte Auslegung der optischen Komponenten wurden die Bildübertragungsvarianten unter Pkt. 4.2 nochmals näher betrachtet (s. u.).

Insbesondere wegen der hohen Transmissionsverluste bei einem Bildübertragungssystem auf Basis einer mehrstufigen Relay-Optik (Variante 1), der Begrenzung der Anzahl an Bildpunkten bei einem faserbasiertes Bildübertragungssystem (Variante 2) und der vergleichsweise hohen Kosten bei den Varianten 1 und 2 soll die Variante 3 (Elektronisches Bildübertragungssystem) gemäß **Abbildung 11** für die weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten favorisiert werden.

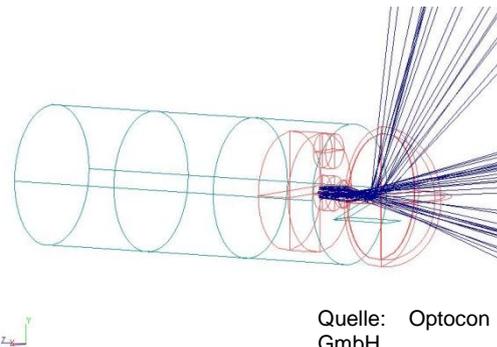
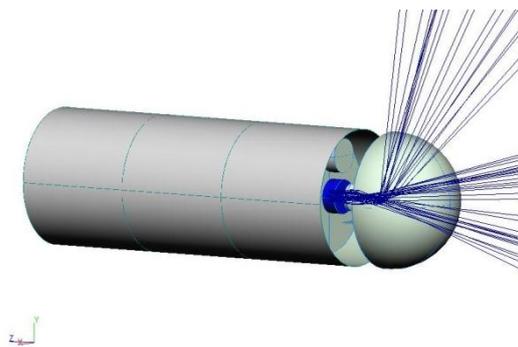
Um das dargestellte optische Grobkonzept in ein kostengünstiges, robustes, qualitativ hochwertiges, minimalinvasives und industrietaugliches Sensorsystem zur umfassenden Bewertung und Analyse von Erdgasflammen in Thermoprozessanlagen unter vollen Betriebsbedingungen umzusetzen, sind neben weiteren Recherchen zu den in Frage kommenden konkreten Bauteilen umfangreiche Versuche, Berechnungen und Neukonstruktionen (Kühlmodul u. a.) erforderlich, die im Folgenden dargestellt werden.



Grobaufbau für die opto-elektronischen Bauteile



- Z. B. wassergekühlte Kugelkalotte für den Lichteintrittsbereich (Quarz / Saphirkalotte), Durchmesser max. 32 mm
- Beweglicher Spiegel hinter der Kugelkalotte, angetrieben über Mikromotor
- UV-Optik hinter dem Spiegel
- Filtergruppe
- Evtl. Restlichtverstärker hinter der UV-Optik
- Kamera mit Optik hinter dem Bildverstärker



Quelle: Optocon GmbH

Möglicher Einbau der opto-elektronischen Bauteile in ein Kühlmodul

Abbildung 11: Entwickeltes optisches Grobkonzept mit elektronischem Bildübertragungssystem (Variante 3); Darstellung des Strahlenganges für Blickrichtungen von 0 - 90°, FSt. DBI, GWI, ITO

Für das entwickelte optische Grobkonzept nach **Abbildung 11** wurde von den Forschungsstellen das Lichteintrittssystem (DBI), das Bildübertragungssystem (ITO) sowie das Detektorsystem (DBI, GWI) spezifiziert. Dazu ausgewählte Angaben:

Lichteintrittssystem:

- Eine Variante stellt die wassergekühlte Kugelkalotte aus Saphir- bzw. Quarzglas entsprechend **Abbildung 11** dar.
- Eine weitere Variante besteht in entsprechenden Öffnungen in einem wassergekühlten SONDENSCHUTZMODUL für 0°-Blick und 90°-Blick, welche mit einem gasförmigen Medium bespült werden, Gesichtsfelder bis 60° ermöglichen und als SONDENAUGEN UV-transparente Wärmeschutzfilter zur Blockung der Strahlung > 800 nm enthalten.
- Die Darstellung des Strahlenganges und des Bewegungsbereiches des Spiegels gehen aus **Abbildung 11** hervor.
- Ein beweglicher Spiegel wird hinter der Kugelkalotte bzw. hinter den Wärmeschutzfiltern, angetrieben über einen Mikromotor, platziert.
- Der Durchmesser des Spiegel sollte < 20 mm betragen.

Bildübertragungssystem:

- Ein UV-Filter (OH-Filter 306,4 nm) wird nach dem Spiegel positioniert.
- Das elektronische Bildübertragungssystem stellt sich nach dem UV-Filter gemäß **Abbildung 11** mit UV-Objektiv, ggf. Restlichtverstärker, Relay-Optik und Spezialkamera dar. Zusätzlich sind für die Bewegung von Spiegel und UV-Filter sowie für die Fokussierung mechanische Bauteile und Stellmotoren erforderlich. Weiterhin wird ein Träger für die opto-elektronischen Bauteile benötigt.
- Ein evtl. Einsatz eines Restlichtverstärkers wird in Abhängigkeit von den Ergebnissen der weiteren FuE-Arbeiten geklärt.
- Weiterhin sind Fragen der Vorzugsposition des Objektivs sowie die Objektivauslegung zu klären.

Detektorsystem:

- Es erfolgte eine Vorauswahl möglicher Kamerasysteme für die Variante ohne Restlichtverstärker (Kamera muss im Bereich 800 - 300 nm detektieren) bzw. mit Restlichtverstärker (Kamera muss im sichtbaren Wellenlängenbereich 400 - 800 nm detektieren). Die Vorauswahl erfolgte insbesondere nach den Kriterien Auflösung und Kontrast.
- Weiterhin erfolgte die Konzepterstellung und die Vorauswahl für einen evtl. benötigten UV-transparenten Restlichtverstärker, gemäß **Abbildung 11**. Der Restlichtverstärker muss eine Baugröße < 40 mm aufweisen und im interessanten Wellenlängenbereich um 306,4 nm eine Transmission im von 70 - 90% besitzen. Diesbezüglich wurde weltweit recherchiert. Die Beschaffung entsprechend Konzeption stellte während der Bearbeitung immer wieder ein Problem dar (s. o.).

Als Schutzfenster (Lichteintrittssystem) dient nach dem Grobkonzept zunächst eine wassergekühlte Quarz/Saphir-Kugelkalotte. Weitere Möglichkeiten für diesen Bereich und den evtl. benötigten Wärmeschutzfilter werden in Betracht gezogen und in die FuE-Arbeiten von AP 2 integriert.

Es wird auf Grund des im Vergleich zum FLORIAN-System großen Lichteintrittsbereiches beim entwickelten optischen Grobkonzept versucht, ohne Restlichtverstärker auszukom-

men. Gelingt das nicht, muss ein miniaturisierter Restlichtverstärker auf Basis vorhandener Systeme entwickelt werden (s. o.). Umfangreiche Untersuchungen dazu liefen im AP 1 bei der FSt. DBI.

Die Zielstellung im Arbeitspaket 1 wurde gemäß Projektplanung erreicht. Die Konzeptentwicklung für das Gesamtsystem als Basis für die folgenden Arbeitspakete ist erfolgt.

4.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung der optischen Komponenten

4.2.1 Arbeitsschritt 2.1: Detaillierte Auslegung, Design und Simulationen (ITO)

Für die detaillierte Auslegung der optischen Komponenten war es erforderlich, die Bildübertragungsvarianten nochmals näher zu betrachten. Das entsprach auch der Projektplanung. Die FuE-Arbeiten erfolgten unter Leitung der Forschungsstelle ITO. Die Forschungsstellen DBI und GWI waren an den Forschungsarbeiten beteiligt. Die FuE-Arbeiten wurden unter Berücksichtigung der entwickelten Anforderungskriterien (s. o.) und der vorliegenden Erfahrungen mit dem FLORIAN-System durchgeführt. Als erstes sollte die Bildübertragungsvariante „Linsensystem“ analysiert werden.

Variante 1: Relay-Linsensystem (ITO)

Das FLORIAN-System ist ein klassisches Relay-Linsensystem. Durch den Einsatz bei 300 nm reduziert sich die Auswahl an möglichen Linsenmaterialien. In FLORIAN wurden Quarzglaslinsen in Kombination mit Kalziumfluoridlinsen eingesetzt (vgl. **Abbildung 8**).

Damit konnte eine breite spektrale Korrektur erzielt werden. Diese ist für die eigentliche Beobachtung um 308 nm jedoch nicht notwendig, da die interessante OH-Emission schmalbandig im Spektralbereich von ca. 306 - 315 nm stattfindet. Lediglich für die Orientierungsaufnahmen ist ggf. eine breitere spektrale Korrektur sinnvoll. Es kommt daher auch eine weitere, sehr flexible Form der Korrektur des optischen Systems in Betracht: die Korrektur durch ein (oder mehrere) diffraktive optische Elemente. Diffraktive Flächen können sehr effektiv zur Farbkorrektur eingesetzt werden, da die Dispersion dieser Elemente derjenigen von refraktiven, also brechenden Flächen entgegengerichtet ist. Diese können in Quarzglas realisiert werden, so dass farbkorrigierte Systeme aus nur einem Material realisiert werden können. Quarzglas ist ein Material mit sehr guten Festigkeitseigenschaften sowie einer nur geringen thermischen Ausdehnung. Ein Fokus der Untersuchungen lag daher auf hybriden (refraktiv/diffraktiven) Ansätzen, die auf Kosten der breitbandigen Korrektur durch Aufblenden eine höhere Lichtstärke erzielen können.

Die Analyse des FLORIAN-Endoskopsystems ergab, dass das System den zur Verfügung stehenden Bauraum gut nutzt. In Endoskopen muss für einen verlustfreien Energietransport die Erhaltung der Helmholtz-Lagrange Invarianten gelten. Daher ist ein Aufblenden des Systems (größere Eintrittspupille) nur mit mehr Baugruppen und damit einem deutlich höheren Aufwand möglich. Mehr Baugruppen bedeuten auch höhere Verluste an mehr Grenzflächen. Anhand des Beispiels der FLORIAN-Sonde kann dies veranschaulicht wer-

den (**Abbildung 12**). Die **Abbildung 13** zeigt die großen Transmissionsverluste der FLORIAN-Sonde anhand von Realaufnahmen an einem Schweißbrenner.

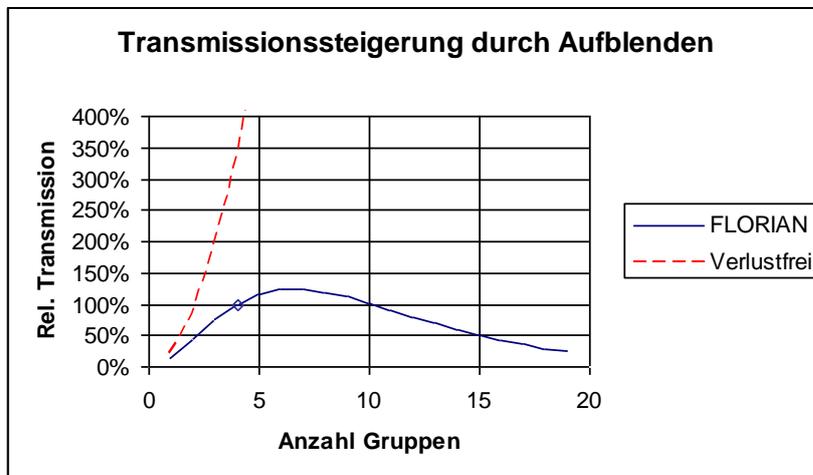


Abbildung 12: Erhöhung der Transmission des Endoskopsystems durch Aufblenden, FSt. ITO



Abbildung 13: Flammen eines Schweißbrenners, aufgenommen mit verschiedenen Detektionssystemen, FSt. DBI

Ein Endoskop mit einem festgelegten Durchmesser benötigt mehr Baugruppen mit kürzerer Brennweite, wenn es mehr Licht transportieren muss. Da diese jeweils eine endliche Transmission von weniger als 100 % haben, wird ein Teil des Gewinns durch das Aufblenden durch die Absorptions- und Reflektionsverluste der Baugruppen wieder kompensiert. Die blaue Kurve in **Abbildung 12** entspricht dem Beispiel FLORIAN (bei der Raute, 4 Relaygruppen), wobei für jede der vergüteten Flächen ein Verlust durch Restreflektivität und Absorption von 1,5 % angenommen wurde.

Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass bei einem erforderlichen Durchmesser für das Relaysystem von 10 mm eine höhere Lichtleistung in einem klassischen Endoskopansatz nur mit hohem Aufwand an Komponenten zu realisieren ist. Die Transmission nimmt exponentiell mit der Länge des Systems ab.

Weiterhin erfolgten FuE-Arbeiten zur Bildübertragungsvariante „Faserbündel“.

Variante 2: Faserbündel (ITO)

Geordnete Lichtleiter-Bündel werden in flexiblen Endoskopen zur Bildübertragung eingesetzt. Sie ersetzen die Relay-Linsengruppen im klassischen Endoskopsystem. Ihr Vorteil liegt neben der hohen Flexibilität, die hier jedoch eine untergeordnete Rolle spielt, in der guten Längenskalierbarkeit. Der zu übertragene UV-Wellenlängenbereich im UV um 308 nm lässt als Material nur noch Quarzfasern zu. Die meisten klassischen Fasermaterialien transmittieren in diesem Spektralbereich nicht mehr. Ausnahmen bilden eher exotische Fasern wie Saphir-Fasern, die jedoch in ihrer minimalen Stärke beschränkt sind und typischerweise nicht unter 75 µm Durchmesser angeboten werden, dementsprechend werden sie in der Regel nicht in bildgebenden Lichtleiterbündeln eingesetzt.

Quarzfasern (high-OH all silica fibers) transmittieren bis weit in den UV-Bereich. Typische Werte für die Dämpfung liegen für 308 nm bei 0.27 dB/mⁱ, also bei etwa 6 % pro Meter, womit eine Längenskalierung keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamttransmission hat. Viel wesentlicher für die Gesamttransmission ist der Füllfaktor, also dem Flächenverhältnis zwischen der Summe der transmittierenden Faserkerne und der Gesamtstirnfläche des Lichtleiters. Alleine die Anordnung der runden Fasern in einem typischerweise hexagonalen Gitter reduziert den Füllfaktor auf etwa 90 %. Zusätzlich muss noch der nichttransmittierende Fasermantel berücksichtigt werden, so dass der Füllfaktor typisch unterhalb von 70 % bleibt.

Ein weiterer begrenzender Faktor bei Lichtleiter-Bündel ist die numerische Apertur der Einzelfasern. Diese beträgt für UV-Quarzfasern typisch 0.22. Nur Licht, das innerhalb dieser NA auf die Faser fällt, wird transmittiert. Eine interessante Alternative bieten „Hard Polymer-Clad Fibers“ wie die Produkte Optran® HUV der Firma CeramOptecⁱⁱ. Diese werden als high-NA-Version mit einer NA von bis zu 0.48 angeboten. Problematisch ist die geringe realisierbare Pixelzahl. Quarz-Quarz-Fasern werden ab 100 µm Kerndurchmesser angeboten, womit sich auf 10 mm etwas unter 100 Pixel realisieren lassen. Die high-NA Polymer-beschichteten Fasern werden erst ab Kern-Durchmessern von 200 µm aufwärts angeboten, womit sich auf 10 mm weniger als 50 Pixel realisieren lassen.

Für die geringe Pixelzahl lassen sich jedoch sehr lichtstarke Objektive realisieren. Das Designbeispiel in **Abbildung 14** zeigt ein Hybridobjektiv, das gegenüber dem FLORIAN-Endoskop eine – gemessen an der Eintrittspupille – etwa 20fach größere Lichtstärke aufweist, bei einem Erfassungswinkel von 70° (Vollwinkel), gerechnet für die high-NA Fasern mit einer NA von 0.48. Dasselbe Objektiv würde sich auch für Standard-Quarzfasern eignen, die dann jedoch die Lichtstärke begrenzen würden. Der Gewinn gegenüber FLORIAN betrüge etwa einen Faktor 4. Durch die vergleichsweise geringe zu erreichende Auflösung ist das Design der Einkoppeloptik unkritisch. So erreicht das Designbeispiel in beiden Fällen bereits das physikalisch Machbare. Die Blende muss nicht zur Reduktion von Aberrationen reduziert werden, die Limitierung ist der Akzeptanzwinkel des Faserbündels.

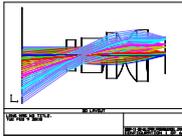


Abbildung 14: Studie Frontobjektiv Faserbündel als Objektiv-Design, FSt. ITO

Weiterhin erfolgten FuE-Arbeiten zur weiteren Betrachtung der elektronischen Bildübertragungsvariante mit einem Lichtverstärker (auch Restlichtverstärker oder Bildverstärker benannt).

Variante 3: Lichtverstärker (DBI, GWI, ITO)

Anstatt das Bild über faserbündel- oder linsenbasierte Relaysysteme aus dem Endoskop zu transportieren, ist es auch denkbar, das Bild bereits in der Sonde zu digitalisieren. Dafür müssen der Bildverstärker und die Kamera in das Endoskop integriert werden. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Nahezu unbegrenzte Längenskalierbarkeit, da nur digitale Signale übertragen werden müssen,
- Schlanker Schaft der Sonde, da nur ein Kabel zum Sondenkopf führt.

Das dafür erarbeitete Optikdesign für ein Bildverstärker-Objektiv wird in **Abbildung 15** gezeigt. Allerdings müssen bei diesem Ansatz einige technologische Probleme gelöst werden, die insbesondere den voraussichtlich notwendigen Bildverstärker betreffen. Da dieser in den Sondenkopf integriert werden muss, kann nicht auf einen konventionellen Standard-Bildverstärker gemäß **Abbildung 16** zurückgegriffen werden.

Hier muss eine kundenspezifische Lösung erarbeitet werden. Von der optischen Seite her definiert der Bildverstärker die Anforderungen, insbesondere an die Auflösung. Erreichbar erscheint eine Bildflächendiagonale von 12 mm. Die Auflösung eines Bildverstärkers wird maßgeblich durch die Channelgröße der Multi-Channel-Plate (MCP) bestimmt. Bei einem typischen Channelabstand von etwa 6 μm liegt die Auflösung nominell bei ca. 40 LP/mm.ⁱⁱⁱ

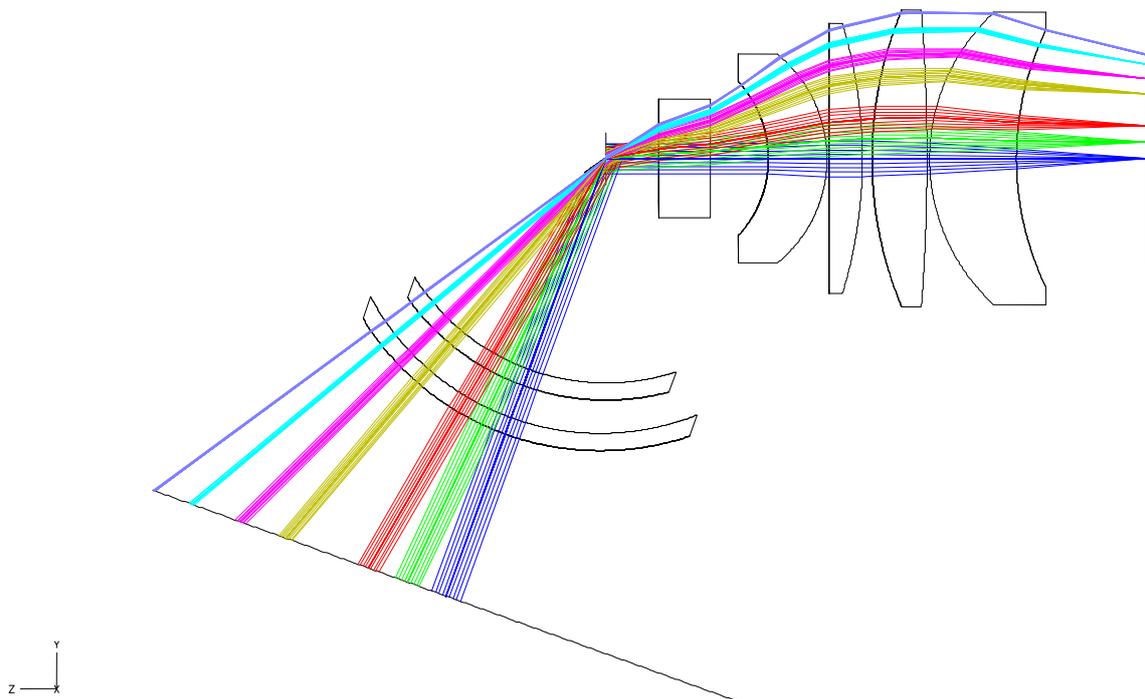


Abbildung 15: Design-Studie für ein Bildverstärker-Objektiv für die Variante „Elektronische Bildübertragung“, FSt. ITO

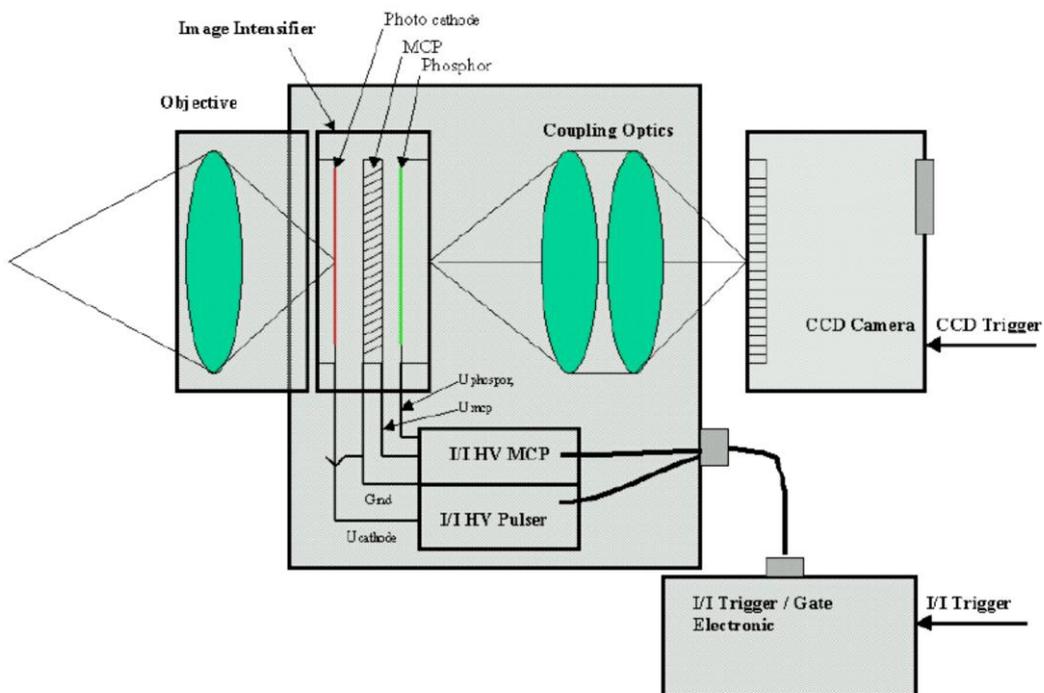


Abbildung 16: Prinzip Bildverstärker, Quelle LaVision

Der Durchmesser des hybriden optischen Systems liegt unter 20 mm, der Erfassungswinkel bei 67°. Es ist ein Filter vorgesehen, der motorisiert verfahren werden sollte, um zwischen den verschiedenen Erfassungsbereichen umschalten zu können. Die Eintrittspupille wurde mit 3 mm möglichst groß ausgelegt, was der etwa 14-fachen Lichtstärke im Vergleich zum FLORIAN-System entspricht.

Zusammenfassend sind auf Basis der im AS 2.1 untersuchten Bildübertragungskonzepte Linsensystem, Fasersystem und Lichtverstärker im Hinblick auf die Anforderungskriterien und das erstellte optische Grobkonzept (**Abbildung 11**) folgende Aussagen möglich:

1. Skalierbarkeit: Der klassische endoskopische Ansatz eignet sich am schlechtesten zur Realisierung von Systemen länger als 1 Meter. Hierfür müssen Linsengruppen wiederholt werden, wobei jede neue Gruppe zusätzliche Reflektions- und Absorptionsverluste einführt. Dagegen ist die Dämpfung im Faserbündel bei den angestrebten Längen unkritisch. Die elektronische Bildübertragungsvariante gemäß erarbeiteten Grobkonzept (**Abbildung 11**) ist hier durch die Digitalisierung des Bildes bereits im Sondenkopf am unkritischsten.
2. Lichtstärkenbegrenzung: Die Lichtstärke lässt sich beim klassischen endoskopischen Ansatz durch Erhöhung der Anzahl an Relay-Linsengruppen steigern. Hierbei ist die Transmission der Einzelgruppe eine kritische Größe, die über die Gesamttransmission entscheidet. Nach den durchgeführten FuE-Arbeiten ist eine Verdoppelung der Gruppenanzahl noch realistisch, womit bei einer sehr guten Transmission der Einzelgruppen eine gegenüber FLORIAN etwa vierfach höhere Lichtstärke erreicht werden kann. Die Lichtstärke wird beim Lichtleiter-Ansatz im Wesentlichen durch den Lichtleiter bestimmt. Bei der Verwendung von high-NA-Fasern ist nach den durchgeführten Simulationen eine Steigerung der Lichtstärke um etwa einen Faktor 12 denkbar. Ähnlich hohe Werte erscheinen bei der erarbeiteten elektronischen Bildübertragungsvariante gemäß erarbeiteten Grobkonzept (**Abbildung 11**) realistisch.
3. Auflösung: Die beste Auflösung lässt die elektronische Bildübertragungsvariante gemäß **Abbildung 11** erwarten, gefolgt vom klassischen Endoskopdesign. Die Verfügbarkeit dünner high-NA-Fasern limitiert aktuell die Auflösung des Lichtleiterbündelansatzes.

Die durchgeführten FuE-Arbeiten im AS 2.1 begründen damit das erstellte optische Grobkonzept, gemäß **Abbildung 11** als effektivstes Konzept, welches im weiteren Projektverlauf umgesetzt wird. Der projektbegleitende Ausschuss hat der Konzeptauswahl zugestimmt.

Quellen

i Quelle: Specification Sheet „All Silica High OH 0.22 NA Fibers“, www.lasercomponents.com.

ii Quelle: www.ceramoptec.de/optran_huv_hwf.htm

iii Quelle: „MCP IMAGE INTENSIFIERS“, Datenblatt, www.photek.com

4.2.2 Arbeitsschritt 2.2: Entwicklung Lichteintrittssystem (DBI, ITO)

Der Arbeitsschritt wurde unter Federführung der FSt. DBI und ITO bearbeitet. Die Entwicklung des Lichteintrittssystems erfolgte auf Basis des optischen Grobkonzeptes (**Abbildung 11**) und der nachfolgenden FuE-Arbeiten im AS 2.1.

Die seit der Entwicklung des optischen Grobkonzeptes durchgeführten Forschungsarbeiten und Beratungen mit entsprechenden Herstellerwerkstätten für den Sondenkopf und Sondenkorpus ergaben, dass die gemäß **Abbildung 11** dargestellte wassergekühlte Kugelkalotte für das Lichteintrittssystem ungeeignet ist. Insbesondere die Verbindung Quarz/Saphierkalotte mit dem hochlegierten CrNi-Stahl ist fertigungsmäßig problematisch und kostenintensiv. Außerdem stellt die wasserdurchflossene Glaskalotte unter harten Industriebedingungen eine Gefahr dar. Trotzdem hätte eine solche Lösung für den Lichteintritt auch große Vorteile (stufenlose Blickrichtung, großer Gesichtsfeldwinkel, keine thermischen Probleme an Wärmeschutzgläsern u. a.). Daher wird diese Konzeption auch über das Projekt hinaus weiter verfolgt.

Für das im Projekt zu entwickelnde Analysesystem für die UV-Flammendiagnose wird das Lichteintrittssystem in ein wassergekühltes SONDENSCHUTZMODUL aus CrNi-Stahl mit entsprechend berechneten Öffnungen für 0°-Blick und 90°-Blick integriert. An den beiden Lichteintrittsöffnungen werden UG11-Wärmeschutzgläser angeordnet, die beidseitig mit einem gasförmigen Medium gleichmäßig gespült werden (Abführen der Strahlungswärme, Verhinderung der Verschmutzung).

Zur Bewertung der thermischen Belastung des Lichteintrittssystems im Bereich der Wärmeschutzgläser (Bandpassfilter UG11) der UV-Winkelsonde wurden bei der FSt. DBI mithilfe der FEM-Software COMSOL-Multiphysics 4.1 Simulationen auch innerhalb der AP 3 und 5 durchgeführt. Da die Strömungsführung im Inneren der Sonde sehr komplex ist, waren die diesbezüglichen FuE-Arbeiten schwierig und erstreckten sich über einen längeren Zeitraum. Die Ergebnisse werden in den folgenden AP vorgestellt.

Die **Abbildung 17** zeigt die im Rahmen der Erstellung der Fertigungsunterlagen für das Lichteintrittssystem durchgeführten Untersuchungen zur Größe der Eintrittsöffnungen. Das Ziel ist, bei möglichst kleinem Lichteintritt (Verringerung der Wärmebelastung auf die Optikbauteile) die Abschattung möglichst gering zu halten.

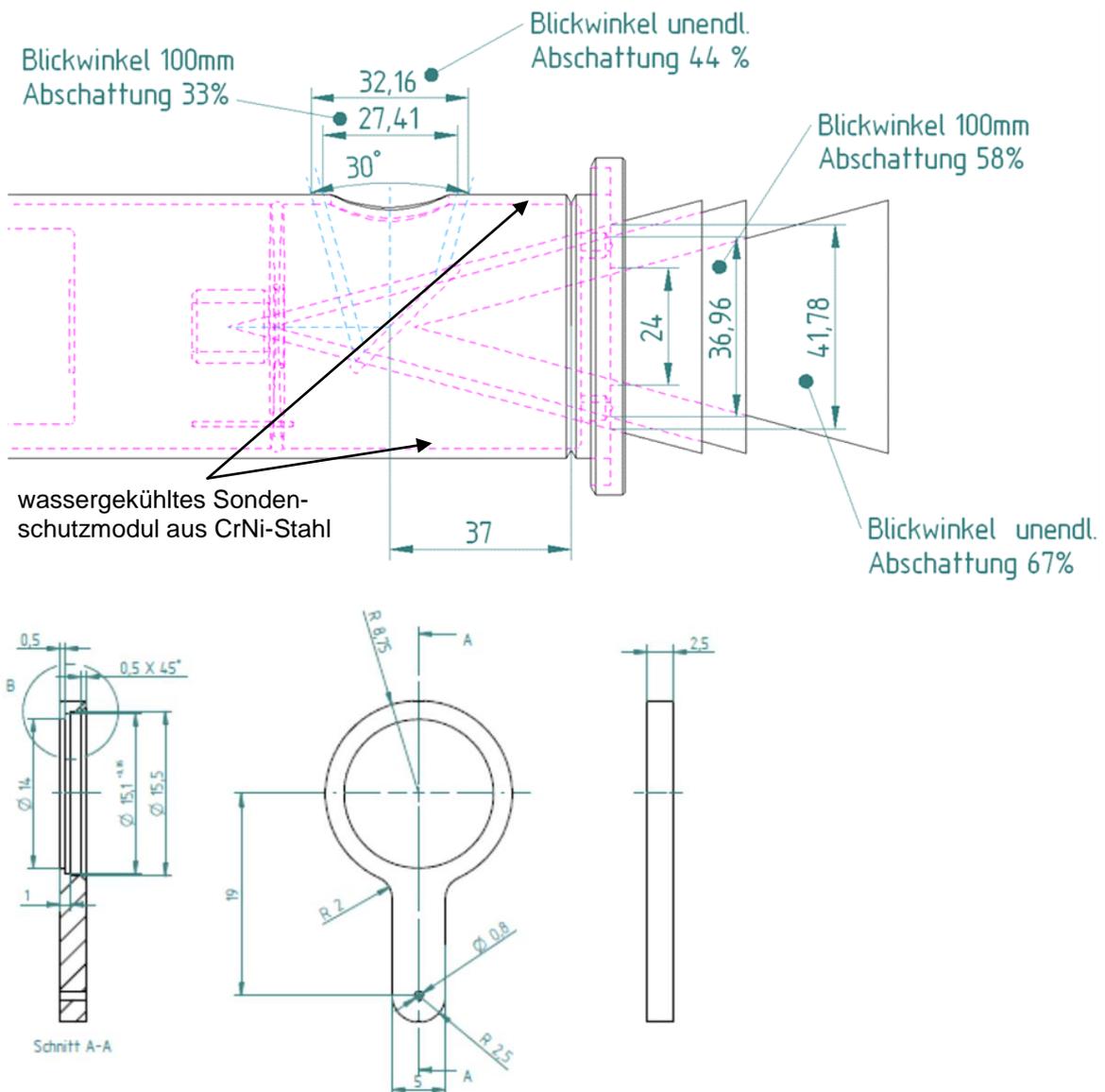
Das entwickelte Lichteintrittssystem ist insgesamt durch folgende Bauteile und Parameter gekennzeichnet (vgl. **Abbildung 17 bis Abbildung 20**):

- Optimierte Öffnungen im SONDENSCHUTZMODUL aus CrNi-Stahl, **Abbildung 17**,
- Durchmesser für UG11-Wärmeschutzfilter 0° beträgt 30 mm, **Abbildung 18**,
- Durchmesser für UG11-Wärmeschutzfilter 90° beträgt 26 mm, **Abbildung 18**,
- Einsatz von Hochtemperatur-Fasermaterialien als Klemmmaterial der UG11-Fassungen,
- Ausgewählte UG11-Wärmeschutzfilter besitzen hohe Transmission im Bereich 300 - 350 nm und Strahlungsblockung oberhalb 900 nm. Ein weiteres Schutzfenster wird auf Basis dieser Materialauswahl nicht benötigt (**Abbildung 19**),
- Die konzipierten und berechneten Spaltmaße zwischen Kühlmodul (inneres Rohr) und den UG11-Wärmeschutzgläsern zur Sicherstellung einer optimalen Kühlung und Spülung des Lichteintrittssystems (Strömungsgeschwindigkeiten ca. 15 m/s) gehen aus **Abbildung 18** hervor,
- Der konzipierte Kaltlichtspiegel Pyrex[®] 7740, Beschichtung UV Enhanced Al, als weiterer Bestandteil des Lichteintrittssystems, geht aus **Abbildung 20** hervor.

Spiegel und motorische Ein- und Ausschwenkeinrichtungen wurden so konzipiert und konstruiert, dass beide in den zylindrischen Innenraum des Kühlmoduls passen und am Träger für die Optikkomponenten befestigt sind. Die motorische Ein- und Ausschwenkeinrichtung für den Spiegel ist fernbedienbar und ermöglicht variable Blickrichtungen von 0° bis 90° (Geradaus- und Winkelblick).

Das thermisch am höchsten belastete Lichteintrittssystem wird unmittelbar hinter den UG11-Wärmeschutzfiltern mit einem Ni-CrNi-Thermoelement überwacht (Anzeige- und Alarmierungsfunktion).

Alle erstellten Fertigungsunterlagen für das Lichteintrittssystem befinden sich in digitaler Form (2D und 3D) bei FSt. DBI. Eine skizzenhafte Darstellung für das Lichteintrittssystem, auf deren Basis die Fertigungsunterlagen erstellt wurden, zeigt **Abbildung 11**.



Fertigungsunterlagen Filterhalterung

Abbildung 17: Entwicklung des Lichteintrittssystem und Beispiel für Erarbeitung der Fertigungsunterlagen des Lichteintrittssystem, FSt. DBI

Allgemeine Strömung	
Max Volumenstrom Spülluft	40 Nm ³ /h
statischer Anschlussdruck	5 bar
Innendurchmesser Leerrohr	50 mm
Maximale Leerrohrgeschwindigkeit	5,7 m/s
Strömungsgeschwindigkeit um Restlichtverstärker	15,7 m/s
UG11 Gläser	
Spaltmaß UG11_0°	3,50 mm
Durchmesser UG11_0°	30 mm
Querschnittsfläche UG11_0° - Boden	330,0 mm ²
Durchmesser UG11_90°	26 mm
kleinster Abstand UG11_90° - Wand	2 mm
Querschnittsfläche UG11_90° - Wand	330,0 mm ²

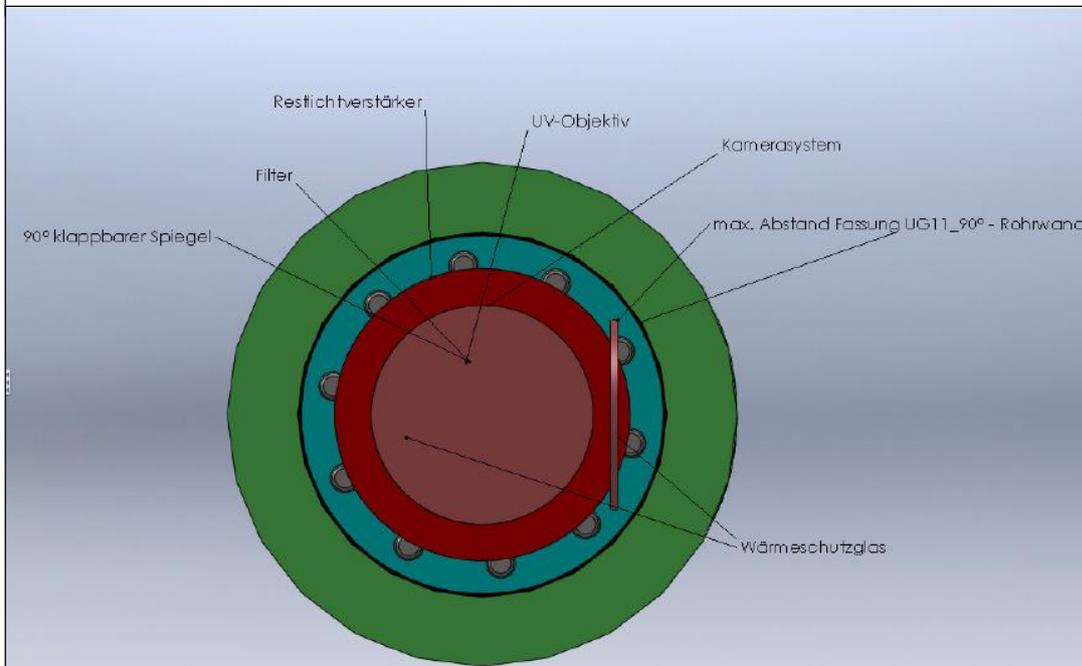


Abbildung 18: Entwicklung des Lichteintrittssystems; Darstellung der UG11-Wärmeschutzfilter und der erforderlichen Spaltmaße UG11-0° und UG11-90°, FSt. DBI

UG11			Dichte ρ [g/cm ³] 2,92		Bemerkungen Ionengefärbtes Glas Bandpassfilter [!] Langzeitveränderungen des polierten Glases möglich V Transmissionsänderungen durch Einwirkung starker ultravioletter Strahlung möglich Alle Angaben ohne Toleranzen sind als Richtwerte zu verstehen. Spezifizierte Werte sind lediglich die unter "Spektrale Garantiewerte" aufgeführten Angaben.													
Reflexionsfaktor P_r 0,91		Blasenhaltigkeit Blasenklasse 2																
Referenzdicke d [mm] 1		Chemische Haltbarkeit FR Klasse 0 SR Klasse 3,0 AR Klasse 2,2																
Spektrale Garantiewerte <table border="1"> <tr><td>τ_i (254 nm)</td><td>\geq 0,06</td></tr> <tr><td>τ_i (334 nm)</td><td>\geq 0,90</td></tr> <tr><td>τ_i (405 nm)</td><td>\leq 0,001</td></tr> <tr><td>τ_i (694 nm)</td><td>\leq 0,26</td></tr> <tr><td>τ_i (725 nm)</td><td>\leq 0,32</td></tr> </table>		τ_i (254 nm)	\geq 0,06	τ_i (334 nm)		\geq 0,90	τ_i (405 nm)	\leq 0,001	τ_i (694 nm)	\leq 0,26	τ_i (725 nm)	\leq 0,32	Transformationstemperatur T _g [°C] 645					
τ_i (254 nm)	\geq 0,06																	
τ_i (334 nm)	\geq 0,90																	
τ_i (405 nm)	\leq 0,001																	
τ_i (694 nm)	\leq 0,26																	
τ_i (725 nm)	\leq 0,32																	
Brechzahl n <table border="1"> <tr><th>λ [nm]</th><th>Element</th><th>n</th></tr> <tr><td>365</td><td>Hg</td><td>1,59</td></tr> <tr><td>587,6</td><td>He</td><td>1,56</td></tr> </table>		λ [nm]	Element	n		365	Hg	1,59	587,6	He	1,56	Wärmeausdehnung <table border="1"> <tr><td>$\alpha_{10-70^\circ\text{C}}$ [10⁻⁶/K]</td><td>7,8</td></tr> <tr><td>$\alpha_{20-200^\circ\text{C}}$ [10⁻⁶/K]</td><td>9,0</td></tr> <tr><td>$\alpha_{20-300^\circ\text{C}}$ [10⁻⁶/K]</td><td></td></tr> </table>		$\alpha_{10-70^\circ\text{C}}$ [10 ⁻⁶ /K]	7,8	$\alpha_{20-200^\circ\text{C}}$ [10 ⁻⁶ /K]	9,0	$\alpha_{20-300^\circ\text{C}}$ [10 ⁻⁶ /K]
λ [nm]	Element	n																
365	Hg	1,59																
587,6	He	1,56																
$\alpha_{10-70^\circ\text{C}}$ [10 ⁻⁶ /K]	7,8																	
$\alpha_{20-200^\circ\text{C}}$ [10 ⁻⁶ /K]	9,0																	
$\alpha_{20-300^\circ\text{C}}$ [10 ⁻⁶ /K]																		
		Temperaturkoeffizient T _s [nm ² /K]																

Farbmetrische Auswertung											
Lichtart	A (Planck T = 2856 K)			Lichtart	Planck T = 3200 K			Lichtart	D65 (T _e = 6504 K)		
d [mm]	1	2	3	d [mm]	1	2	3	d [mm]	1	2	3
x				x				x			
y				y				y			
Y				Y				Y			
λ_d [nm]				λ_d [nm]				λ_d [nm]			
P_s				P_s				P_s			

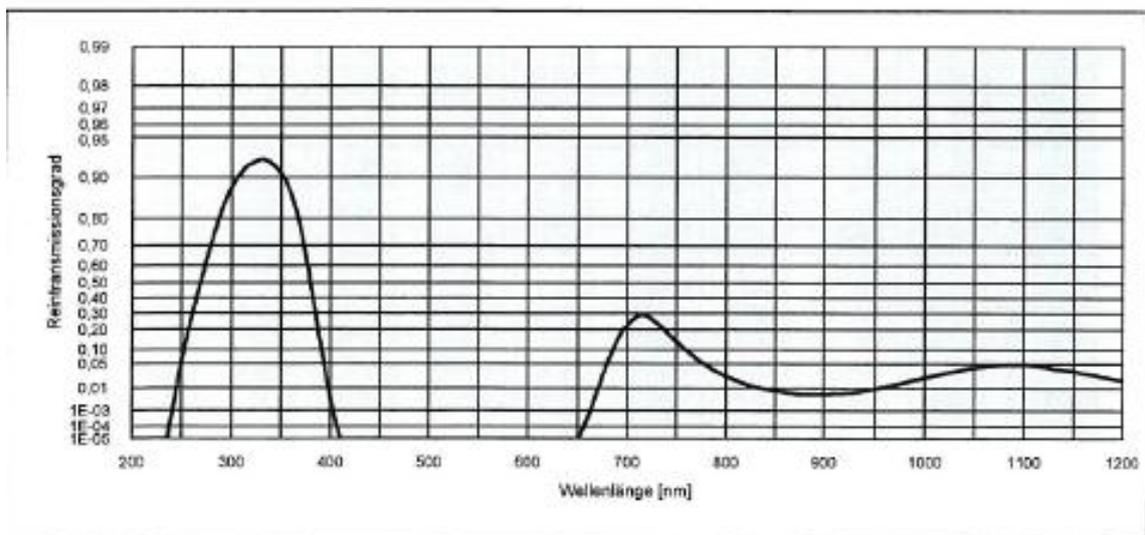


Abbildung 19: Entwicklung des Lichteintrittssystems; Daten der konzipierten und ausgewählten UG11-Wärmeschutzfilter, FSt. DBI, ITO, Quelle Schott AG

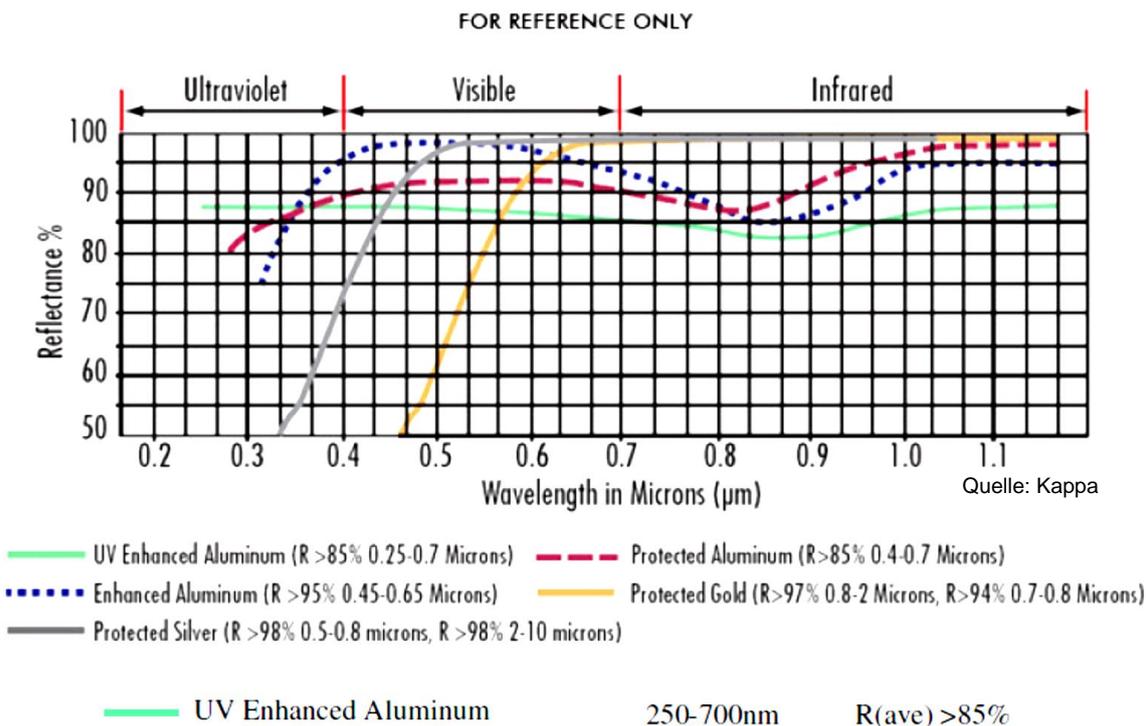


Abbildung 20: Entwicklung des Lichteintrittssystems; Daten Kaltlichtspiegel (UV Enhanced Aluminium, FSt. DBI)

Vor der Fertigung des Lichteintrittssystems wurde ein Modell gebaut, welches sowohl die Anordnungen im Lichteintrittsbereich als auch die Anordnung der anderen Optikbauteile im Kühlmodul zeigt. Die **Abbildung 21** zeigt das Prinzipschema des Modells.

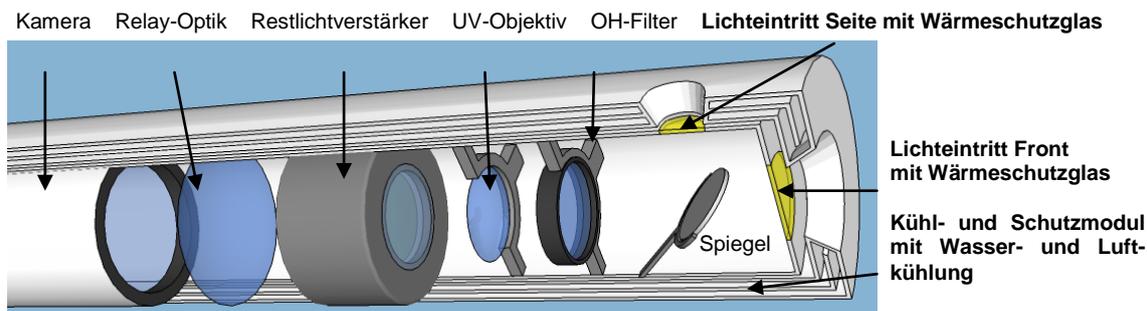


Abbildung 21: Prinzipschema Kühlmodul mit Anordnung Optikkomponenten und entwickelten Lichteintrittssystemen, FSt. DBI

4.2.3 Arbeitsschritt 2.3: Entwicklung Detektorsystem (DBI, GWI)

Parallel zu AS 2.2 wurde entsprechend der Projektplanung (vgl. Vorhabensbeschreibung) unter Leitung der FSt. DBI und GWI das vollständige Detektorsystem (Bezeichnung: elektronisches Bildübertragungssystem bzw. Spezialkameranystem für UV-Winkelsonde) entwickelt. Es besteht aus den folgenden optischen Hauptbauteilen:

- OH-Filter 306,4 nm (UV-Filter),
- UV-Objektiv,
- Restlichtverstärker,
- Relay-Optik,
- Spezialkamera,
- Stellmotoren für Spiegel und OH, Filter und Fokussierung,
- Trägersystem für Optikbauteile.

Die Entwicklungen und Optimierungen wurden durch Simulationen begleitet. Es erfolgten weltweite Recherchen zur Entwicklung des Detektorsystems. Umfangreiche FuE-Arbeiten waren im Hinblick auf ein geeignetes UV-Objektiv sowie einen geeigneten Restlichtverstärker und die Spezialkamera erforderlich. Entsprechend dem entwickelten optischen Grobkonzept mit elektronischem Bildübertragungssystem (**Abbildung 11**) werden an diese Bauteile durch den erforderlichen Einbau in ein wassergekühltes Sondenschutzmodul zusätzlich zu den erforderlichen optischen Kennwerten folgende Anforderungen gestellt:

- Miniaturisierte Bauteile, Forderung Durchmesser < 40 mm,
- Betriebstemperaturen bis 60 °C ohne Beeinflussung der optischen Kennwerte,
- Gemäß **Abbildung 18** ergeben sich an diesen Bauteilen Strömungsgeschwindigkeiten bis 15 m/s für das benötigte gasförmige Spülmedium (Pressluft, Argon, Stickstoff, je nach Thermoprozess und Ofenraumatmosfera). Dieser mechanischen Beanspruchung müssen die Bauteile standhalten.

Im Hinblick auf die UV-Objektivauswahl erfolgten bei der FSt. ITO umfangreiche FuE-Arbeiten zur Vermessung von Transmission und Auflösungsvermögen (**Abbildung 22 bis Abbildung 27**). Dabei wurde der bereits konzipierte und ausgewählte Restlichtverstärker, der o. g. Anforderungen entspricht, berücksichtigt. Der Versuchsaufbau wird in **Abbildung 22** aufgezeigt. Ausgewählte Untersuchungsergebnisse zeigen die **Abbildung 23 bis Abbildung 27**.

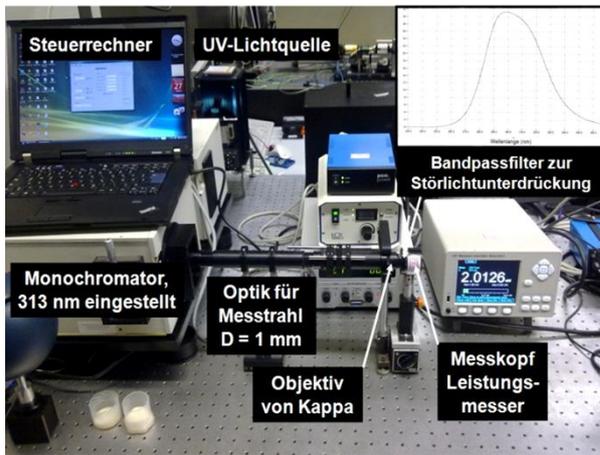


Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Vermessung von Transmission und Auflösungsvermögen des konzipierten UV-Objektives, FSt. ITO

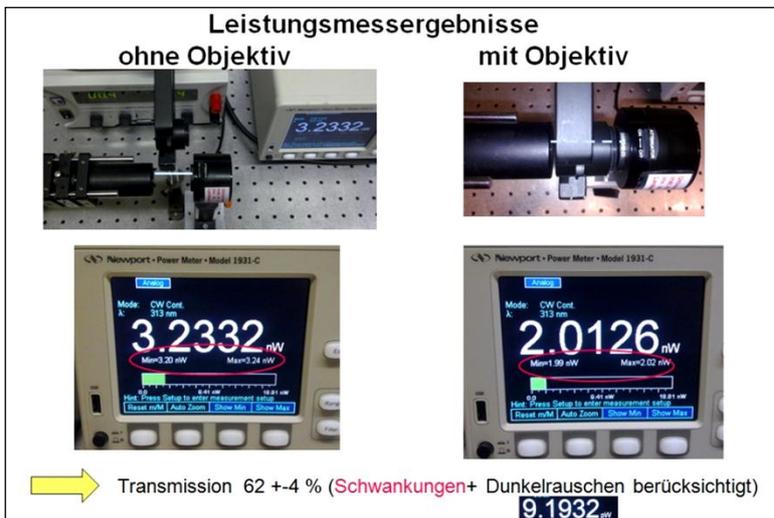


Abbildung 23: Ergebnisse von Transmissionsmessungen für das konzipierte UV-Objektiv, FSt. ITO

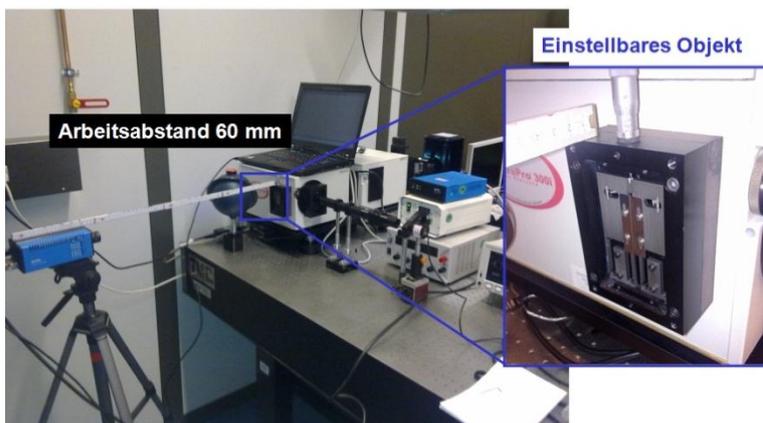


Abbildung 24: Versuchsaufbau für Testmessungen zur Schärfe, FSt. ITO

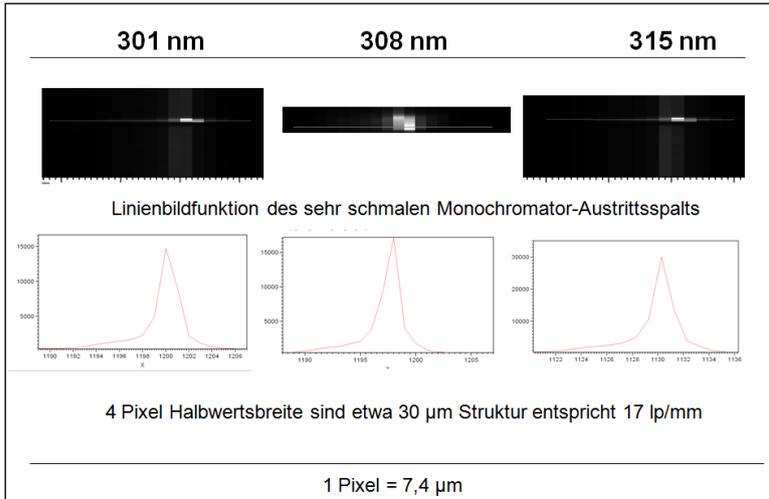
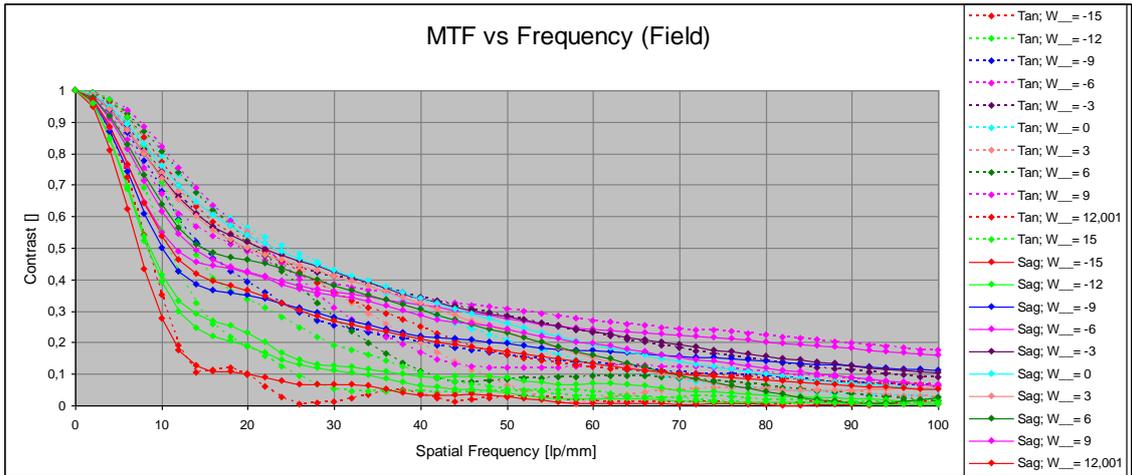
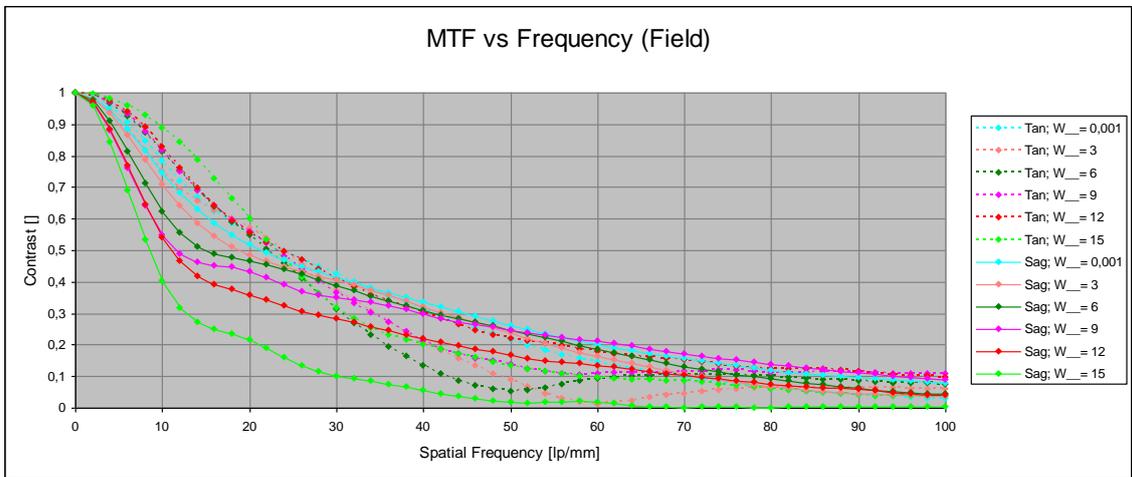


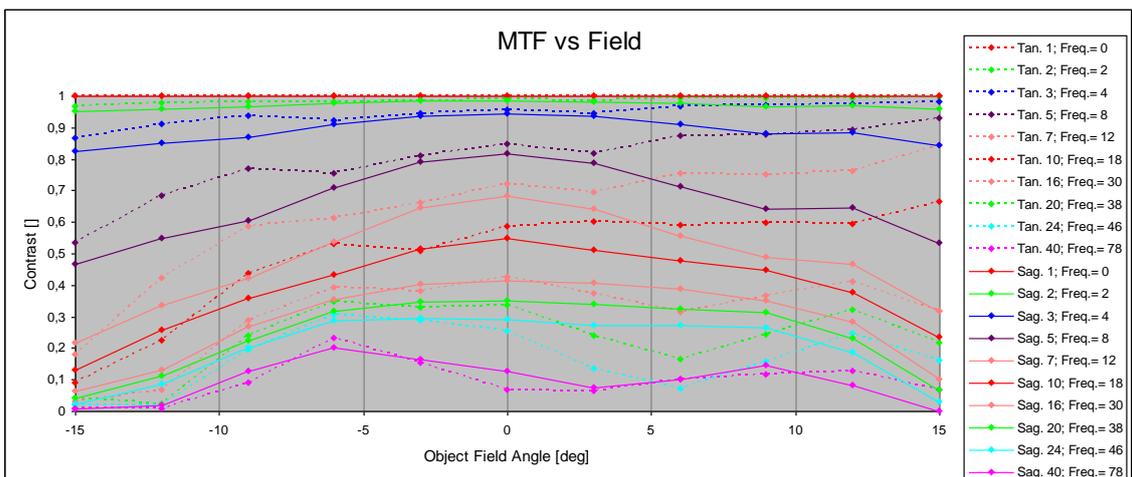
Abbildung 25: Testbild für Bildschärfe bei 301, 308, 315 nm, FSt. ITO



MTF-Messung bei 420 nm



MTF-Messung bei 644 nm



MTFMessung bei 644 nm

Abbildung 26: Ausgewählte Ergebnisse von MTF-Messungen (UV-Objektiv), FSt. ITO

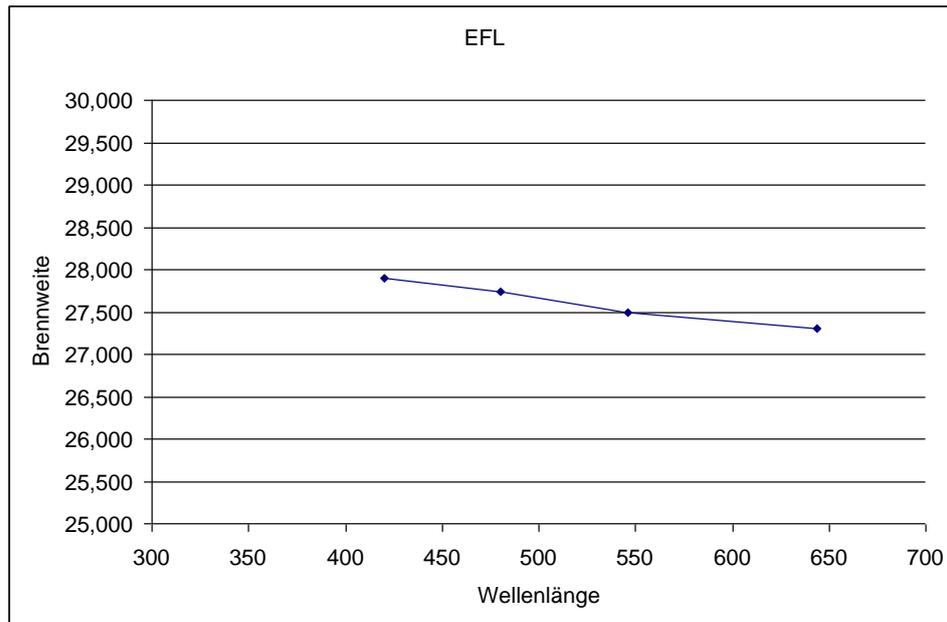


Abbildung 27: Wellenlängenabhängige Brennweite, Berechnungen und Messungen, FSt. ITO

Auf Basis der durchgeführten FuE-Arbeiten zur Vermessung von Transmission und Auflösungsvermögen (**Abbildung 22 bis Abbildung 27**) konnte das benötigte UV-Objektiv nach **Abbildung 28** endgültig ausgewählt werden. Folgende Aussagen zum UV-Objektiv sind möglich:

- Die o. g. Anforderungen an Miniaturisierung sowie thermische und mechanische Beständigkeit werden erfüllt.
- Die Abbildungsleistung des ausgewählten UV-Objektivs (vernünftiger Kontrast bis ca. 30 LP/mm, entspricht einer Strukturauflösung von 17 μm im Bild, der allerdings im Bereich Bildrand abfällt) passt nach den Vermessungen gut für den Einsatz mit dem ausgewählten Restlichtverstärker (s. u.).
- Die gemessene Brennweite liegt im sichtbaren Bereich je nach Wellenlänge bei ca. 27,5 mm.
- Bei der OH-Einsatzwellenlänge wurde mit einem dünnen Lichtstrahl auf der Achse des Objektivs eine Transmission von etwa 60 % gemessen. Das sind für die vorliegende Aufgabenstellung sehr gute Werte.

Die **Abbildung 28** zeigt Daten vom ausgewählten und untersuchten UV-Objektiv.

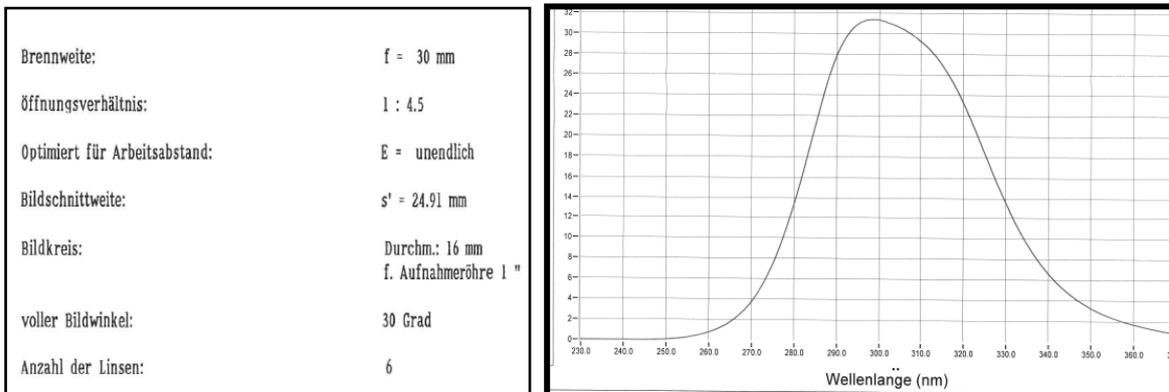


Abbildung 28: Entwicklung Detektorsystem, Daten vom ausgewählten und untersuchten UV-Objektiv, FSt. DBI, GWI

Auf Basis umfangreicher Recherchen sowie experimenteller und theoretischer Untersuchungen innerhalb von AP 2 kann auf einen geeigneten (Anforderungskriterien s. o.) UV-empfindlichen Restlichtverstärker nicht verzichtet werden. Nach den Untersuchungen ist ein einstufiger Restlichtverstärker für die Aufgabenstellung passend. Es zeigte sich, dass ein zweistufiger Verstärker nicht erforderlich ist, es sei denn, einzelne Photonen sind zu detektieren. Das ist nicht notwendig und würde den Preis für das UV-Winkelondenssystem unnötig erhöhen.

Die weltweite Suche nach einem Hersteller eines für die Aufgabenstellung geeigneten Restlichtverstärkers mit entsprechenden optischen, thermischen, mechanischen und geometrischen Eigenschaften (s. o.) war äußerst schwierig und immer wieder von Rückschlägen gekennzeichnet. Schließlich konnte das Bauteil bei der Fa. Photek Limited, United Kingdom über den deutschen Vertriebspartner AMS München bestellt werden. Die **Abbildung 29** zeigt ausgewählte Daten vom Restlichtverstärker.

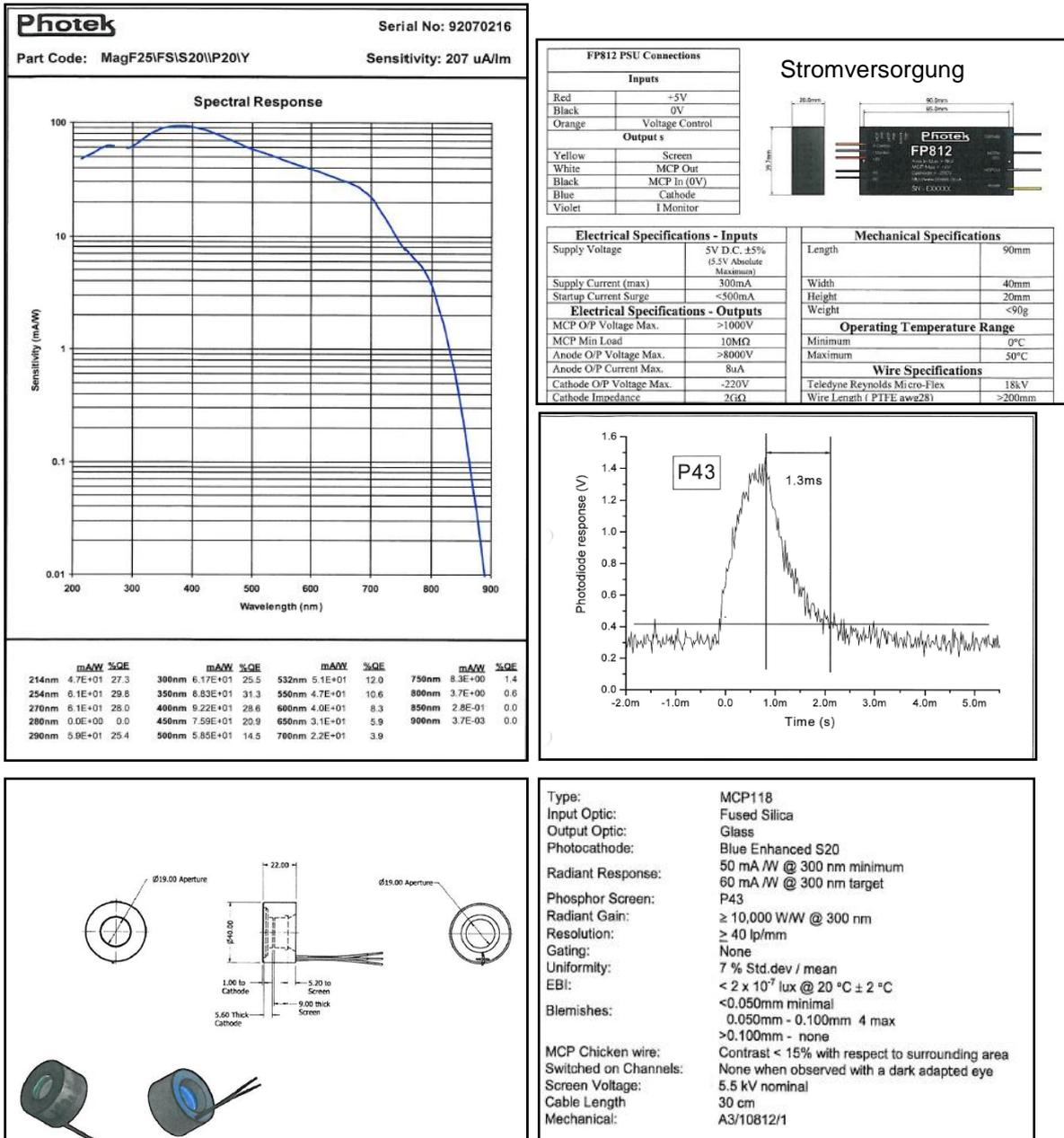


Abbildung 29: Entwicklung Detektorsystem, Daten des konzipierten und ausgewählten Miniatur-Restlichtverstärkers, FSt. DBI, Quelle: Fa. Phototek Limited, United Kingdom

Entsprechend **Abbildung 29** hat der Restlichtverstärker im für die OH-Detektierung relevanten Spektralbereich um 306,4 nm eine spektrale Empfindlichkeit von ca. 70 mA/W. Auch alle weiteren optischen, thermischen, mechanischen und geometrischen Anforderungskriterien (s. o.) werden mit diesem Restlichtverstärker erfüllt. Weiterhin musste der Restlichtverstärker den optischen Kennwerten der weiteren Detektorbauteile UV-Objektiv und Spezialkamera entsprechen. Auch das konnte durch die experimentellen Untersuchungen am ITO nachgewiesen werden. Daten zum Kamerasystem enthält **Abbildung 30**.

Die Daten des ebenfalls zum Detektorsystem gehörenden schwenkbaren OH-Filter 306,4 nm (UV-Filter) werden in **Abbildung 31** aufgezeigt.

Technische Daten	
Sensorspezifische Daten	
CCD Sensor	1/2" Interline Transfer CCD Progressive Scan mit Mikrolinsen (Sony ICX 415)
Pixelgröße (H x V)	8,3 µm x 8,3 µm
Lichtempfindliche Fläche (H x V)	7,48 mm x 6,15 mm
Pixelanzahl (H x V)	782 x 582 active, 823 x 592 total
Spektrale Empfindlichkeit (ohne IR Sperrfilter)	400 nm – 1000 nm
Full Well Capacity	25 000 e ⁻
A/D-Umwandlungsfaktor	1,5 e ⁻ / Schritt
Filter	RGB Bayer Filter
Dynamik	63 dB (gemessen im Dunkelbild, bei 33 ms Belichtungszeit und 0 dB Verstärkung)
Schnittstellenspezifische Daten	
Schnittstelle	Gigabit Ethernet
Coding	III Color YUV 4:2:2, RGB 24, Mono 14 (RAW data) II Mono 14, Mono 12, Mono 8
Kamera Output Format	Vollbild: 782 x 582 Pixel, 50 Fps Binning: 2-fach 4-fach II Bildgröße (Pixel): 340 x 290 170 x 140 II Frame Rate: 93 Fps 156fps
Belichtungszeit	Partial Scan: Bildgröße frei einstellbar manuell: 1 µs bis 120 s automatisch (AE): 1 µs bis 15 ms bei 782 x 582 Pixel
Signal Processing	
System	14 Bit digital
Verstärkung	manuell/automatisch (AGC): 0 bis 18 dB
Enhancement	Kantenanhebung einstellbar, Histogramm-Stretching, Histogramm-Ausgleich
Farbverarbeitung	III Lichtquellentyp, Farbeinstellung (RGB), automatischer Weißabgleich, Farbsättigung
Gamma	0,3 bis 2,2, ladbar
Diagnose	z.B.: Bildgröße, Bildwiederholrate, Testbild...
Linien-generator	2 Linienkreuze: Position, Farbe und Stil einstellbar, Kreislinien
Messfenster	Position und Größe einstellbar
Synchronisation	intern/extern, Reset/Restart (Verzögerung <10 µs), Frame on Demand
Trigger	Hardware Trigger variabel einstellbar, fixe Triggerverzögerung < 10 µs; Frame on Demand Software Trigger: via Software Development Kit (SDK Zelos)
System Integration	
Rechnervoraussetzungen	separates Infoblatt
Software Zelos Tools	separates Infoblatt (SDK Zelos - Software Development Kit und Steuersoftware KCC Zelos)
Schnittstellenprotokoll	GigE Vision
Allgemeine Technische Daten	
Schnittstellen	12-poliger Systemstecker (Gigabit Ethernet, PoE, Steuer- und Triggersignale)
Objektivanschluss	C-Mount, Auflagemaß einstellbar, CS-Mount auf Anfrage
Filter	IR Filter
Temperatur	Betriebstemperatur -20°C bis +65°C, Lagertemperatur -30°C bis +70°C
Betriebsspannung	PoE 48 V, extern 9 bis 48 V, ~ 3 W
Schutzklasse	IP 54
Maße / Gewicht	40 x 40 x 47 mm / ca. 170 g
Kabellänge	Ethernet (mind. CAT5e) bis zu 100 m
Artikel-Nr.	III Color: Zelos-415C GV PoE 961-2156 II Monochrom: Zelos-415M GV PoE 951-2156

Abbildung 30: Entwicklung Detektorsystem, Daten Spezial-Kamerasystem, Typ Zelos-415 GV PoE, FSt. DBI, Quelle: Kappa optronics GmbH

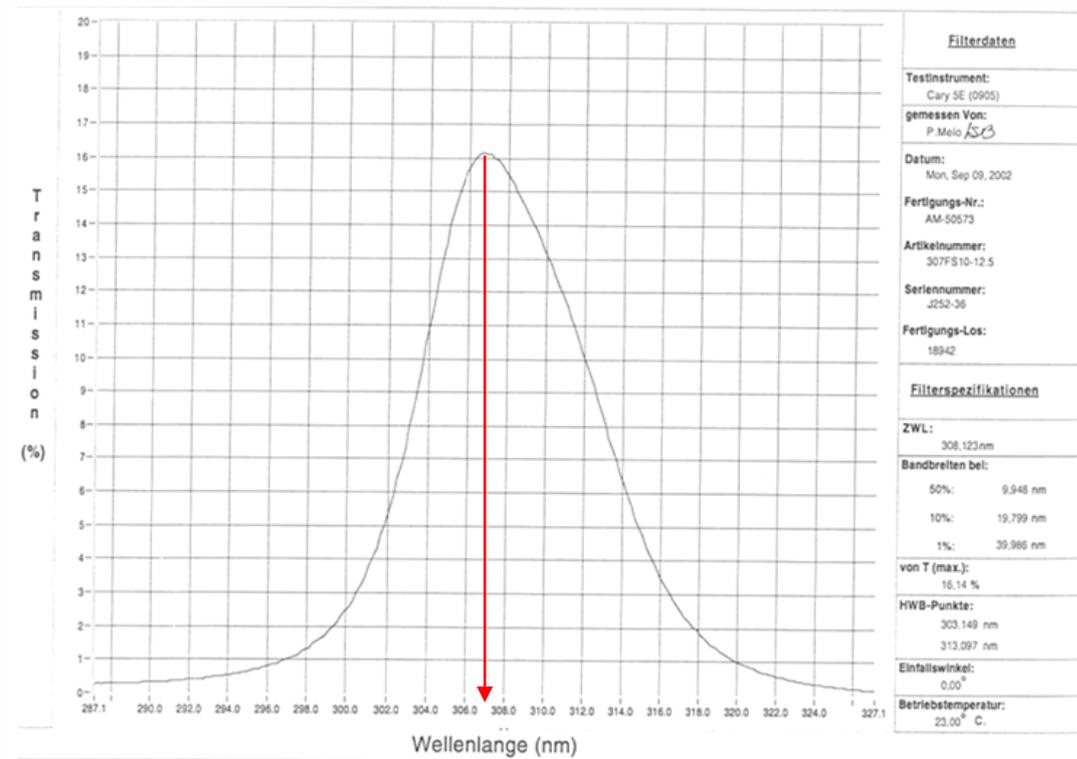


Abbildung 31: Entwicklung Detektorsystem, Daten des in den Strahlengang ein- und ausschwenkbaren OH-Filters 306,4 nm (UV-Filter), Quelle: Fa. SCHOTT AG

Die erstellten Fertigungsunterlagen für das Detektorsystem liegen ebenfalls in digitaler Form bei der FSt. DBI vor. Die **Abbildung 32** zeigt als Beispiel für die erstellten Fertigungsunterlagen des Detektorsystems die Aufnahme für den Restlichtverstärker.

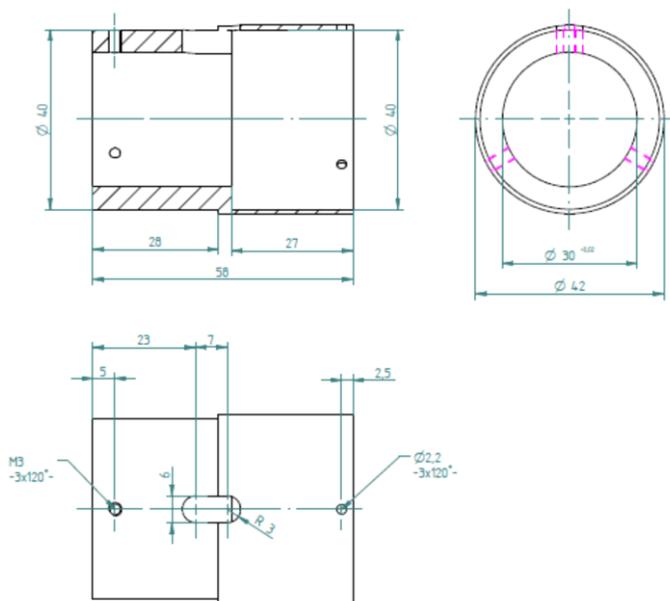


Abbildung 32: Beispiel Fertigungsunterlagen Detektorsystem, FSt. DBI

4.2.4 Arbeitsschritt 2.4: Bau, Erprobung und Kalibrierung des optisches System unter Laborbedingungen (DBI, GWI, ITO)

Die Untersuchungen wurden von allen 3 Forschungsstellen gemeinsam durchgeführt. Wie geplant, wurde mit der Fertigung des elektronischen Bildübertragungssystem (Detektor-system) eine externe Firma (Fa. Kappa optronics GmbH Gleichen) beauftragt. Mit den ausgewählten und bestellten Optikbauteilen gemäß AS 2.3

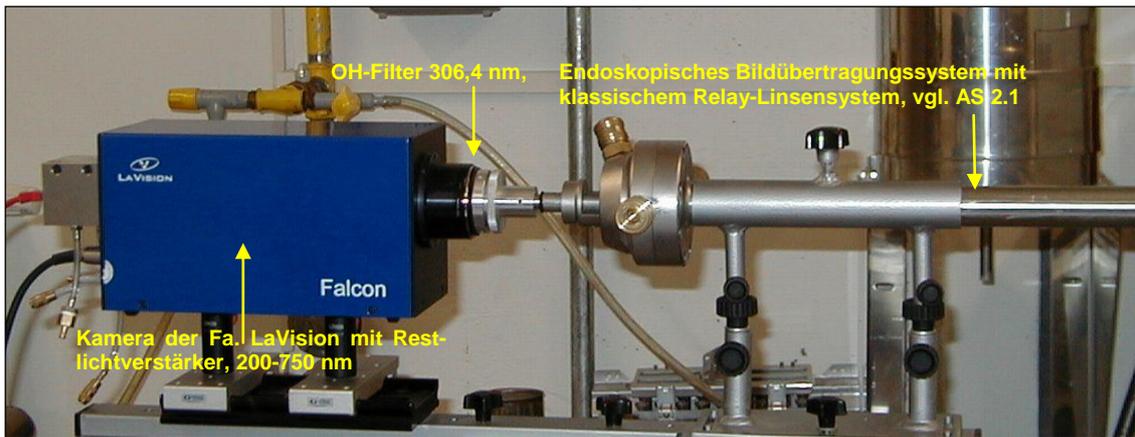
- OH-Filter 306,4 nm,
- UV-Objektiv,
- Restlichtverstärker,
- Relay-Optik,
- Spezialkamera

erfolgten mit vergleichbaren Leihkomponenten Aufbau und Funktionstests inkl. Kalibrierungen mit definierten UV-Strahlungsquellen (s. u.). Dabei wurden Vergleiche mit dem bisherigen UV-Laborkamerasystem und dem endoskopischen FLORIAN-UV-System durchgeführt. In die Untersuchungen wurden trotz der erfolgten Kameraauswahl (s. o.) nochmals weitere Kameras einbezogen. Weiterhin wurden die Versuche unter Laborbedingungen mit und ohne Restlichtverstärker durchgeführt.

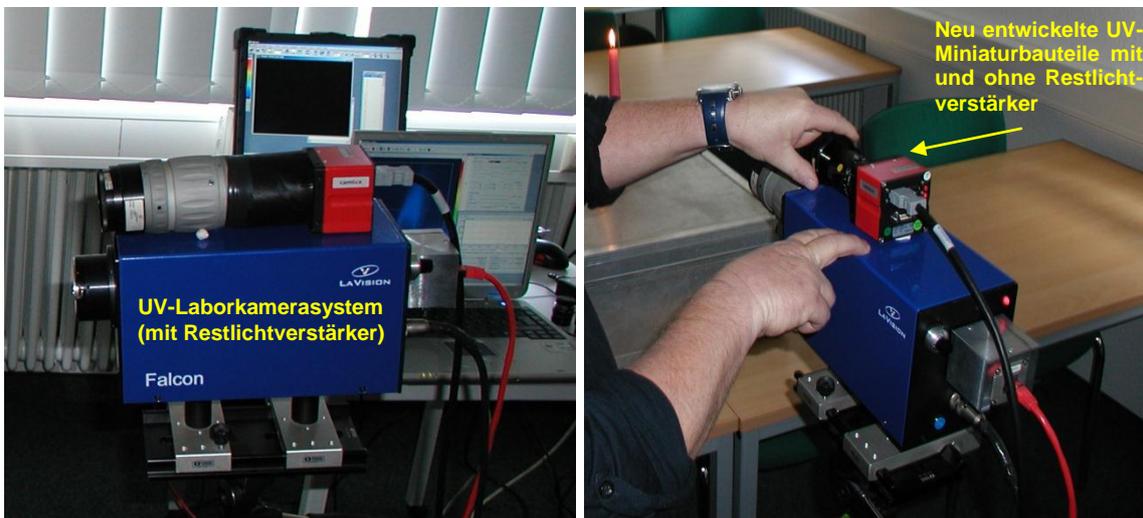
Die Untersuchungen fanden im Technikum der FSt. DBI statt. Zur Unterstützung der Versuche bei FSt. DBI hat ein Techniker der FSt. GWI die umfangreichen Arbeiten begleitet. Die Untersuchungen unter Laborbedingungen erstreckten sich über einen Zeitraum von 6 Monaten. Als UV-Quellen dienten:

- Kerzenflamme,
- Bunsenbrenner (Erdgas H, Versorgungsgebiet Freiberg mit 98 % Methan),
- 100 kW-Gebläsebrenner im Freibrand und im keramischen Versuchsstand (Erdgas H, Versorgungsgebiet Freiberg mit 98 % Methan),
- Spezial-UV-Lampe.

Die **Abbildung 33** zeigt ausgewählte Aufnahmen vom Versuchsaufbau mit dem UV-Laborkamerasystem, dem endoskopischen FLORIAN-UV-System sowie den neuen UV-Miniaturbauteilen (s. o.) für das im Projekt entwickelte elektronische Bildübertragungssystem zum Einbau in eine wassergekühlte Hochtemperatursonde (vgl. AP 3). Für die Vergleichszwecke wurden UV-Quellen und Abstände vom Objektiv zur UV-Quelle nicht verändert. Weiterhin wurde immer der gleiche OH-Filter 306,4 nm zur Detektierung speziell der OH-Verbrennungsradikale eingesetzt.



Endoskopisches FLORIAN-UV-System für Vergleichszwecke



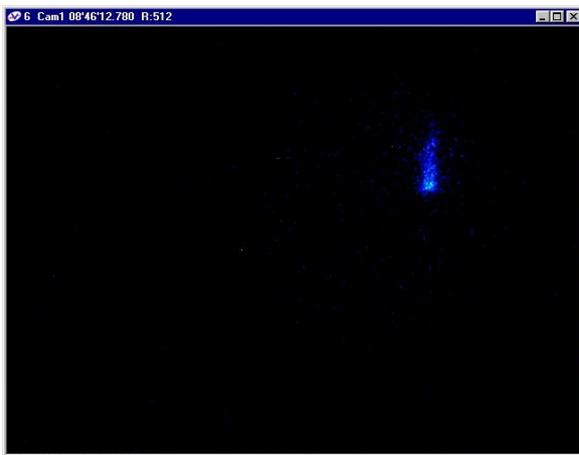
UV-Laborkamerasystem mit Restlichtverstärker (Vergleiche) und neuen UV-Miniaturbauteilen



UV-Laborkamerasystem und neu entwickelte UV Miniaturbauteile

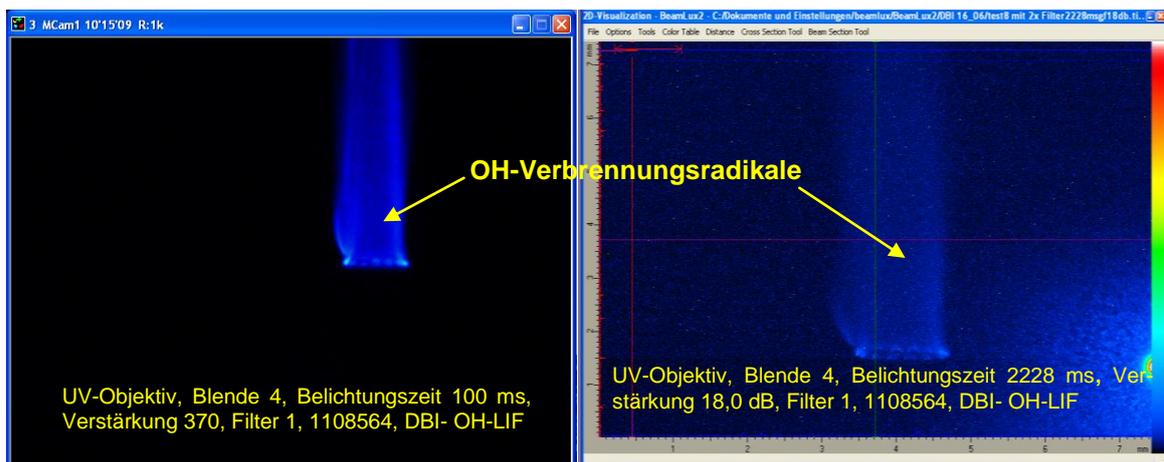
Abbildung 33: Versuchsaufbau für Erprobung, Vergleiche und Kalibrierung des optischen Systems unter Laborbedingungen, Versuchstechnikum DBI

Die **Abbildung 34** zeigt die OH-Verbrennungsradikale des Bunsenbrenners, aufgenommen mit dem endoskopischen FLORIAN-System bei einer Belichtungszeit von 1000 ms und einer Restlichtverstärkung von 100 %. Die gleiche UV-Strahlungsquelle wurde mit dem UV-Laborkamerasystem mit und ohne Restlichtverstärkung detektiert (**Abbildung 35**). Es wird eindeutig sichtbar, dass bei Wegfall des transmissionsschwächenden UV-Endoskopes bereits bei vergleichsweise sehr kurzen Belichtungszeiten (100 ms mit Restlichtverstärkung von 37 %) eine hohe Qualität der Flammvisualisierung möglich wird. Ohne Restlichtverstärker ist unter Laborbedingungen allerdings eine lange Belichtungszeit von > 2 s erforderlich, um eine entsprechende Abbildungsqualität zu erreichen. Belichtungszeiten > 500 ms sind für den industriellen Einsatz des UV-Systems vielfach ungeeignet.



Quelle: DBI

Abbildung 34: Endoskopisches FLORIAN-UV-System mit OH-Filter; Belichtungszeit 1000 ms, Verstärkung 100 %, Abstand Bunsenbrenner-Sondenaug 80 cm

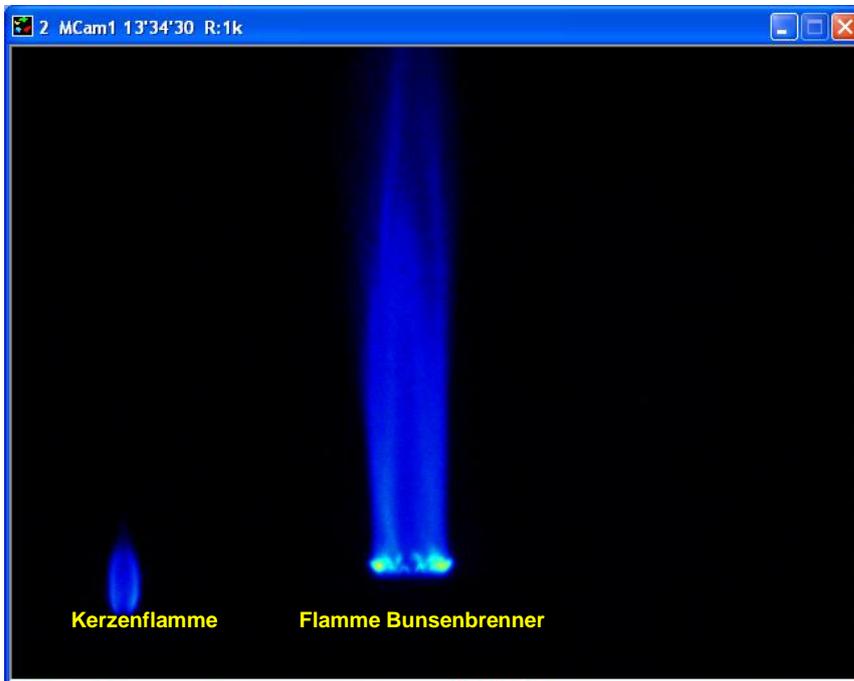


UV-Laborkamera mit Restlichtverstärker

UV-Laborkamera ohne Restlichtverstärker Quelle: DBI

Abbildung 35: UV-Laborkamerasystem mit OH-Filter, mit und ohne Restlichtverstärker; Belichtungszeiten 100 ms bzw. 2228 ms, Abstand Bunsenbrenner-Objektiv 80 cm

Die **Abbildung 36** zeigt die analoge Darstellung (Strahlungsquelle, Abstände) für die o. g. neuen Optikbauteile mit Restlichtverstärker zur Realisierung des entwickelten elektronischen Bildübertragungssystems. Als 2. UV-Quelle wurde eine Kerzenflamme verwendet.



Quelle DBI

Abbildung 36: Aufnahme der OH-Radikale für 2 UV-Quellen mit neuem Kamerasystem und Restlichtverstärker; Belichtungszeit 100 ms, Restlichtverstärkung 37 %, Abstand Bunsenbrenner-Objektiv 80 cm

Die Untersuchungen wurden mehrfach wiederholt und die Ergebnisse waren auch im Langzeitbereich reproduzierbar. Die zu Beginn der Messungen erfolgte Kalibrierung wurde im Verlaufe von Langzeitmessungen stündlich überprüft. Nachkalibrierungen ergaben sich nur innerhalb der Warmlaufphase (ca. 30 min). Auch die Einbeziehung weiterer Kameras brachten gleiche Tendenzen hinsichtlich des wichtigen Bauteils „Restlichtverstärker“. Es zeigte sich, dass auf den baugrößenbestimmenden Restlichtverstärker auf keinen Fall verzichtet werden kann.

Die Ziele im Arbeitspaket 2 zur Entwicklung der optischen Komponenten wurden erreicht und entsprechen der Vorhabensplanung. Das wesentliche Ergebnis im AP 2 ist, dass die optischen Komponenten für die UV-Winkelsonde konzipiert, festgelegt und bestellt wurden und mit den ausgewählten Optikbauteilen bereits Funktionstests und Testmessungen mit einer definierten UV-Strahlungsquelle erfolgten. Die mit der Fertigung des Bildübertragungsgerätes beauftragte externe Firma (Fa. Kappa optronics GmbH, Gleichen) hatte Lieferprobleme und so kam es im Projektverlauf zu Verzögerungen, die eine Projektverlängerung erforderten.

4.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung einer auf die Miniaturoptik angepassten Hochtemperatursonde

4.3.1 Arbeitsschritt 3.1: Entwicklung des Sondenkopfes (DBI)

Die Entwicklung des Sondenkopfes erfolgte unter Leitung der FSt. DBI. Die FSt. GWI hat insbesondere im Hinblick auf die Bewertung der erstellten Fertigungsunterlagen zugearbeitet. Der Sondenkopf muss die folgenden Optikbauteile gemäß AS 2.2 (Entwicklung des Lichteintrittssystems, vgl. **Abbildung 17**) aufnehmen:

- 2 UG11-Wärmeschutzgläser,
- Kaltlichtspiegel.

Weitere Einzelheiten (Spaltmaße u. a.) wurden im AS 2.2 aufgeführt. Der Sondenkopf ist ein entscheidendes Bauteil des zu entwickelnden UV-Analysesystems. Neben der Aufnahme o. g. Optikbauteile müssen insbesondere die UG11-Wärmeschutzgläser im Zusammenspiel mit der Sondenkopfkonstruktion, dem Spülgasstrom und der Wasserkühlung von Sondenkopf und Sondenkorpus alle folgenden opto-elektronischen Bauteile (Kaltlichtspiegel, OH-Filter, Restlichtverstärker, Relay-Optik, Spezialkamera, Stellmotoren, Mechanik, Trägersystem, Kabel) sicher vor den extremen Umgebungsbedingungen des Feuerraumes schützen. Die benannten optischen und mechanischen Bauteile dürfen keinen Temperaturen $> 60\text{ °C}$ ausgesetzt werden.

Die Bespülung der Wärmeschutzgläser (optische Schutzfenster) mit einem gasförmigen Spülmedium (Pressluft, Stickstoff, Argon) muss eine mögliche Ablagerung von Partikeln auf diesen Gläsern wirksam und dauerhaft verhindern. Bei der Bespülung der Wärmeschutzgläser kommt es weiterhin darauf an, dass die Wärmeabfuhr der Adsorptionsgläser optimal ist und dass sich ein möglichst gleichmäßiges Temperaturniveau über der Glasoberfläche einstellt. Temperaturunterschiede von mehr als 100 K über die Glasoberfläche würden zum Versagen der Gläser führen (Risse, Abplatzungen u. a.). Die konzipierten und ausgewählten UG11-Wärmeschutzgläser (Daten vgl. **Abbildung 19**) sind nicht beschichtet. Die Ausblendung der gefährlichen Wärmestrahlung im Spektralbereich $> 800\text{ nm}$ erfolgt durch Einfärbung der Gläser. Trotzdem liegt die Transformationstemperatur als Kriterium für die thermische Belastung bei 545 °C .

Die Erstellung der Fertigungsunterlagen für den Sondenkopf wurde deshalb von Simulationen der Strömungs- und Temperaturverteilung im Bereich der Wärmeschutzgläser im Sondenkopf begleitet. Das entsprach ebenfalls der Projektplanung.

Die **Abbildung 37** zeigt aus den erstellten Fertigungsunterlagen den für die Simulationen zunächst zu Grunde gelegten Bereich des Sondenkopfes.

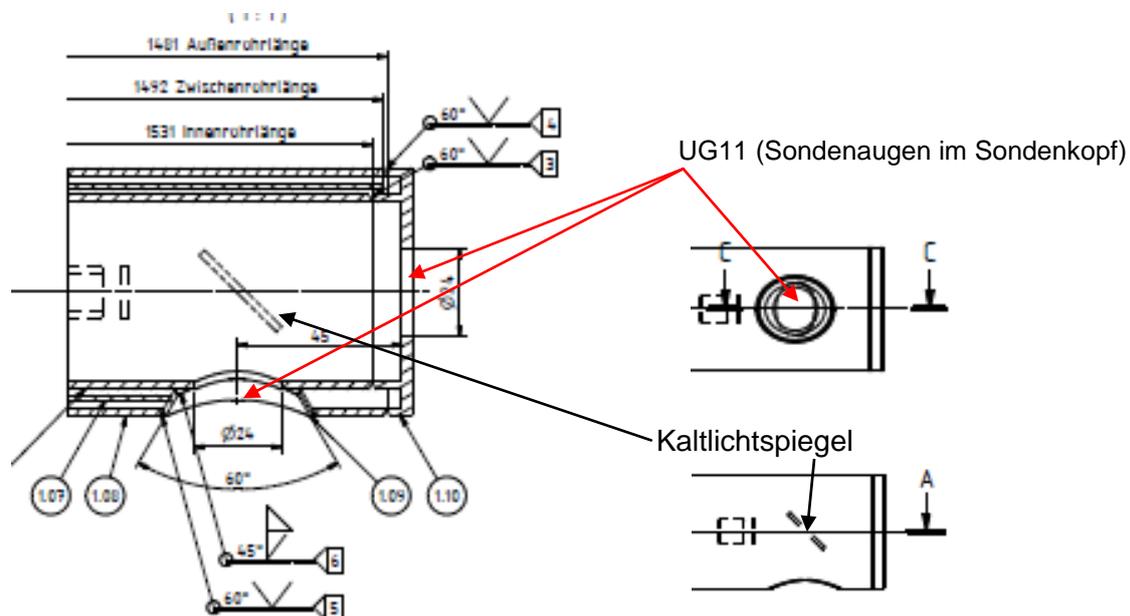


Abbildung 37: Teil der Fertigungszeichnung für den Sondenkopf, Grundlage für die Simulationen, FSt. DBI

Zur Bewertung der thermischen Belastung der Wärmeschutzgläser wurden mithilfe der FEM-Software COMSOL-Multiphysics 4.1 Simulationen erstellt. Da die Strömungsführung im Inneren der Sonde komplex ist, mussten jedoch folgende Vereinfachungen getroffen werden.

- Die Betrachtung der Sonde beschränkt sich auf den relevanten Bereich, d. h. die Berechnung erfolgt nur im vorderen Bereich (ab dem Bildverstärker), so dass der Rechenaufwand möglichst gering bleibt, jedoch Einlaufbereiche für die Strömung vorhanden sind.
- Die Wasserkühlung im Mantel der Sonde wird für die Simulationen zur thermischen Belastung der Wärmeschutzgläser nicht näher betrachtet, sie beeinflusst zwar die Temperatur der Kühlluft, kann aber nur mit hohem Rechenaufwand abgebildet werden und erfordert die Festlegung von Annahmen. Stattdessen kann die Lufttemperatur am Eintritt des Simulationsbereichs vorgegeben werden. Diese Vorgehensweise ist zwar ebenfalls mit Annahmen verbunden, welche jedoch experimentell sicherer bestätigt werden können.
- Strömungsbereiche, in denen die Spaltweite < 1 mm ist, werden vernachlässigt. Sie führen aufgrund der geringen Querschnittsabmessungen und der vergleichsweise großen Länge zum Anstieg der Elementanzahl und somit zur Zunahme des Rechenaufwands. Eine Ausnahme stellen gestreckte Elemente (swept mesh) dar. Die Anwendung dieser Elemente ist wegen des seitlichen Kühlluftaustritts und der Umlenkung der Strömung jedoch nicht möglich.
- Die Strömung im inneren Bereich des Sondenkopfes, also an den Innenseiten der Wärmeschutzgläser und im Bereich des Spiegels, kann nicht betrachtet werden, da die Geometrie durch die Berücksichtigung dieses Bereichs zu komplex wird und der Rechenaufwand deutlich ansteigt. Im Rahmen der Simulation kann die

Kühlung an der Innenseite der Gläser entweder vernachlässigt oder durch die Definition von Wärmeübergangskoeffizienten und „externen“ Temperaturen näherungsweise abgebildet werden.

- Auch die Betrachtung des Einflusses der Einfassung der Wärmeschutzgläser auf die Kühlung kann nicht vollständig abgebildet werden. Hierzu wäre die Berücksichtigung der angrenzenden, dünnwandigen Aluminiumwandung und der Silikonschicht zwischen Glas und Fassung nötig. Die Kühlung über die Mantelfläche des Glases kann entweder vollständig vernachlässigt werden, oder durch die Vorgabe einer abgeschätzten Oberflächentemperatur in die Berechnung eingehen.
- Um den Rechenaufwand zu reduzieren, ist es weiterhin möglich, die Symmetrie der Sonde zu nutzen und nur eine Hälfte zu betrachten.

Unter Einbeziehung der zuvor genannten Vereinfachungen ergibt sich die in **Abbildung 38** gezeigte Simulationsgeometrie.

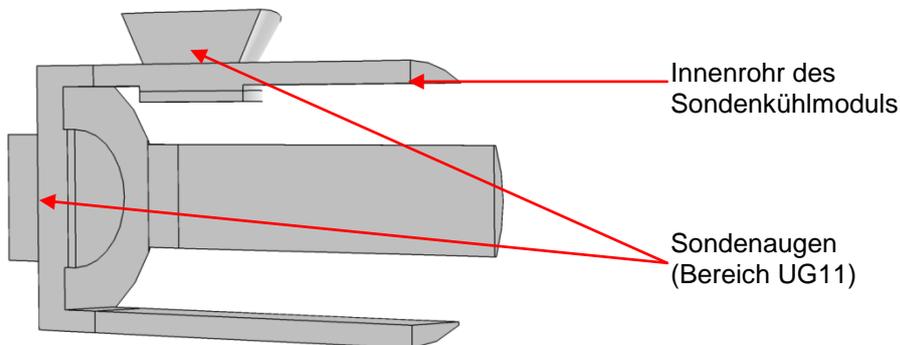


Abbildung 38: Simulationsgeometrie zur Bewertung der thermischen Belastung der Wärmeschutzgläser im Sondenkopf, FSt. DBI

Zur Berechnung des Temperaturprofils in den Wärmeschutzgläsern ist es erforderlich, die Bilanzgleichungen und Randbedingungen des Modells zu definieren. Dabei müssen der Wärme- und der Stofftransport berücksichtigt werden. Die Strömung wird im Modell durch die Navier-Stokes-Gleichung für laminare kompressible Strömungen beschrieben. An den Eintrittsquerschnitten wird die Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben, am Austritt der Druck. Im Rahmen der Simulation wird dabei die Ausströmung gegen atmosphärischen Druck angenommen. In der Wärmebilanz werden Wärmetransport durch Konvektion, Leitung und Strahlung berücksichtigt. Der Eintrag der Wärmestrahlung in das Wärmeschutzglas wird als Volumenquelle angenommen (Gleichung 2), da das verwendete UG11 nicht beschichtet, sondern „durchgefärbt“ ist (s. o.).

$$Q = \varepsilon_{12} \sigma (T_{\text{Umgebung}}^4 - T_{\text{UG11}}^4) / h_{\text{UG11}} \quad (2)$$

Die Werte für Emissionskoeffizienten (ε) und Umgebungstemperatur müssen hier entsprechend der Einsatzbedingungen definiert werden. Des Weiteren wurden folgende Randbedingungen definiert:

Luft Eintrittstemperatur:	20 °C
Emissionskoeffizient UG11:	1
Emissionskoeffizient Umgebung:	0,93
Umgebungstemperaturen:	500 - 1600 °C

Bei den durchgeführten Simulationen wurde zunächst ausschließlich die Kühlung über die Außenseiten der Wärmeschutzgläser berücksichtigt. Die berechneten Temperaturen sind dementsprechend höher als unter realen Bedingungen zu erwarten ist. Zur Berücksichtigung der Kühlung über die Mantelflächen bzw. über die Mantelfläche und die Innenseite der Wärmeschutzgläser wurden, zusätzlich zu den anfangs genannten Randbedingungen, die Temperatur an der Mantelfläche mit 325 K und die Bedingungen des Wärmeübergangs an der Innenseite ($\alpha=10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}$; $T_{\text{ext}}=305 \text{ K}$) definiert. Aufgrund der Kühlung über die Mantelfläche sinkt die maximale Temperatur deutlich von 723 K auf 509 K, während sich die Lage des Maximums in das Zentrum des Wärmeschutzglases verlagert. Die zusätzliche Berücksichtigung der konvektiven Kühlung an der Unterseite des Glases führt zu einem Temperaturrückgang von lediglich 6 K. Als Beispiel für die durchgeführten Simulationen zeigt die **Abbildung 39** ein modelliertes Geschwindigkeits- und Temperaturprofil für den interessierenden Bereich des Sondenkopfes.

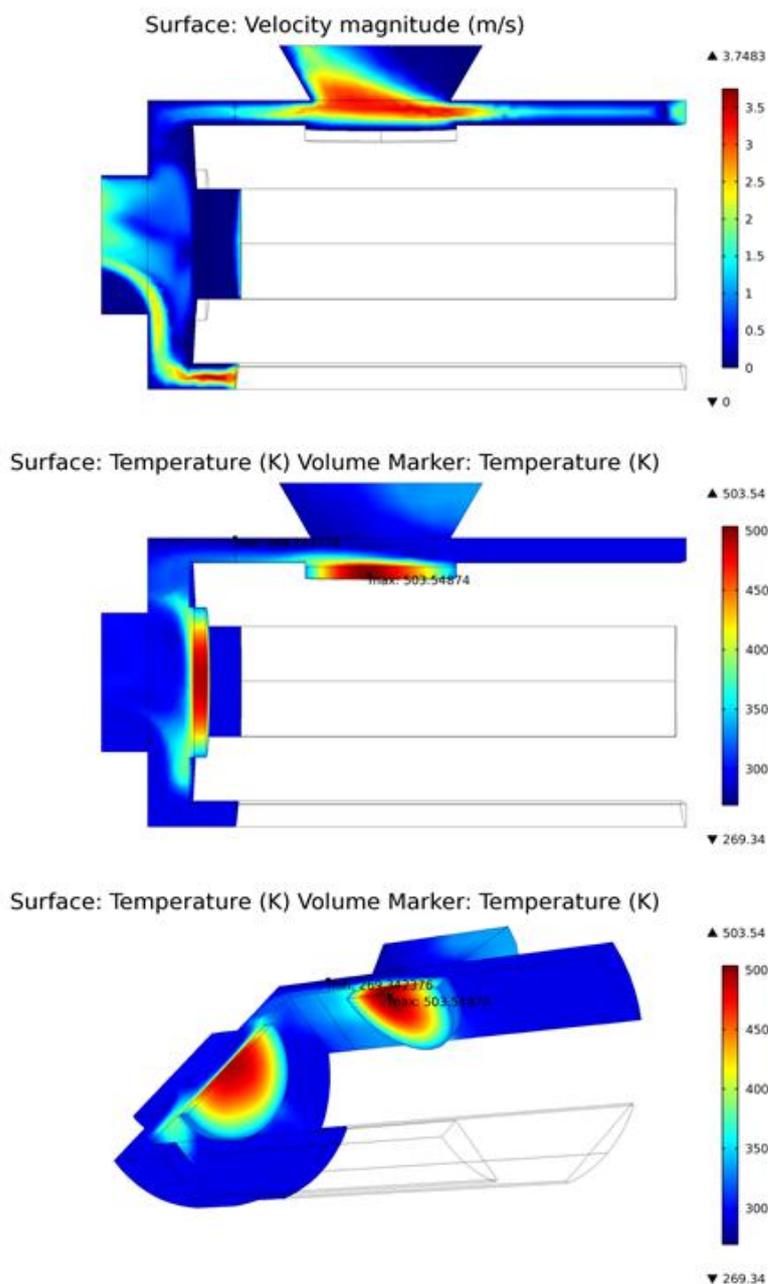


Abbildung 39: Geschwindigkeits- und Temperaturprofil für $u_{\text{ein}}=3\text{m/s}$, Kühlung an Innenseite und Mantelfläche, FSt. DBI

Es wurde sichtbar, dass die Temperaturen im Bereich der Wärmeschutzgläser zu hoch sind. Ebenfalls liegen die Temperaturunterschiede von der Mitte bis zum Rand des Glases oberhalb des Limits (s. o.). Daraufhin erfolgten konstruktive Änderungen, insbesondere im Bereich des Spaltes zwischen Wärmeschutzglas und Kühlmodul. Weiterhin wurde eine Möglichkeit entwickelt, den Kühl- und Spülstrom des gasförmigen Mediums auf das „aktive“ Sondenaug zu konzentrieren. Die Anforderung an die max. Menge für den Volumenstrom des gasförmigen Spül- und Kühlmediums von $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ wird damit ebenfalls eingehalten. Die Auslegung des Spülsystems und der Fensterspülung im Sondenkopf ist damit erfolgt.

Die entsprechenden Fertigungszeichnungen liegen bei der Fst. 1 vor.

4.3.2 Arbeitsschritte 3.2: Entwicklung von gekühltem Sondenkorpus inkl. Medienver- sorgung (DBI)

Die Entwicklung des gekühlten Sondenkorpus inkl. Medienversorgung erfolgte unter Leitung der FSt. DBI. Auch die Fertigungszeichnungen für den Sondenkorpus wurden in Abstimmung mit der FSt. GWI von der FSt. DBI erstellt und liegen am Standort Freiberg in digitalisierter Form als 2D- und 3D-Zeichnungen vor.

Auf Basis dieser Fertigungszeichnungen erfolgten von der FSt. GWI Modellierungen und wärmetechnische Berechnungen (CFD-Simulationen) für das wassergekühlte Bauteil Sondenkorpus, wobei auch der Sondenkopf mit den Lichteintrittssystemen wasserseitig berücksichtigt wurde. Auch diese Vorgehensweise entsprach der Projektplanung der Vorhabensbeschreibung.

Der Sondenkorpus muss das entwickelte elektronische Bildübertragungssystem gemäß AS 2.3 (s. o.) aufnehmen sowie thermischen und mechanischen Schutz bieten. Insbesondere für den mechanischen Schutz der empfindlichen Miniaturoptiken wird das Trägersystem für die opto-elektronischen Bauteile des elektronischen Bildübertragungssystems mit Schwingungsdämpfern zum Sondenkorpus versehen. Der Sondenkorpus besitzt einen Kühlmantel für die erforderliche Wasserkühlung sowie die Medienanschlüsse für das Kühlwasser und das gasförmige Spülmedium. Der Sondenkorpus ist mit dem Sondenkopf verbunden und stellt auch für den Sondenkopf die erforderlichen Spül- und Kühlmedien bereit.

Wie bereits für das Bauteil Sondenkopf beschrieben, sind Temperaturen $> 60\text{ °C}$ an allen optischen Komponenten, die sich im Sondenkorpus (Kühlmodul) befinden, zu vermeiden.

Die **Abbildung 40** zeigt einen ausgewählten Ausschnitt einer Fertigungszeichnung für den Sondenkorpus, die als Grundlage für die bei der FSt. GWI durchgeführten Simulationen und wärmetechnischen Berechnungen diente.

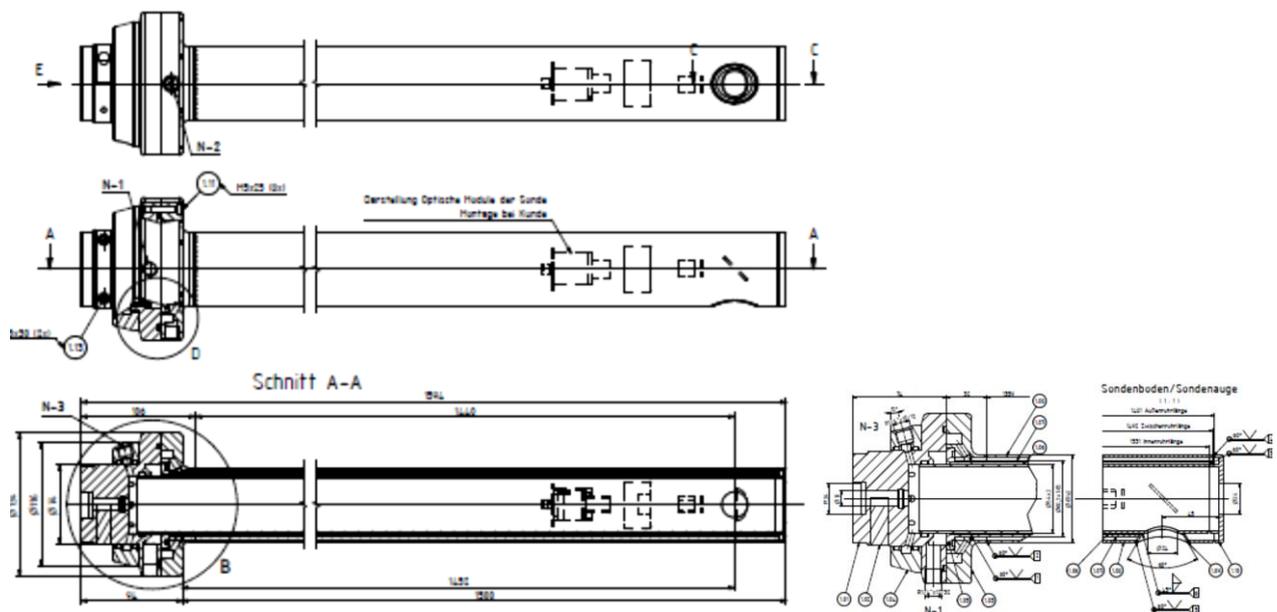


Abbildung 40: Ausgewählter Ausschnitt einer Fertigungszeichnung für den Sondenkorpus, FSt. DBI als Grundlage der Modellierungen (CFD-Simulationen) bei der FSt. GWI

Von der FSt. GWI wurden eine Reihe von numerischen Strömungssimulationen durchgeführt, mit denen die Eignung der verschiedenen Kühlkonzepte für den Sondenkörper (Sondenkorpus, Sondenkopf) untersucht wurden. Dazu wurden die Strömungs- und Wärmeübertragungsprozesse im Sondenkörper mit Hilfe von CFD-Simulationen abgebildet, um auf diese Weise sicherzustellen, dass die von FSt. DBI vorgegebenen Maximaltemperaturen ($T_{\max}=60^{\circ}\text{C}$) im Sondeninneren bei Ofenraumtemperaturen bis 1800°C und Kühlwassermengen $< 1 \text{ m}^3/\text{h}$ nicht überschritten werden. Gleichzeitig musste sichergestellt werden, dass die Temperaturen im Kühlwasserkreislauf der Sonde nicht über die Siedetemperatur des Wassers hinausgehen, da ansonsten die lokale Wärmeübertragung drastisch abnimmt und es zu Verdampfungserscheinungen kommt, so dass der Sondenkörper beschädigt wird. Die Darstellung der simulierten Geometrie des Sondenkorpus geht aus **Abbildung 41** hervor.

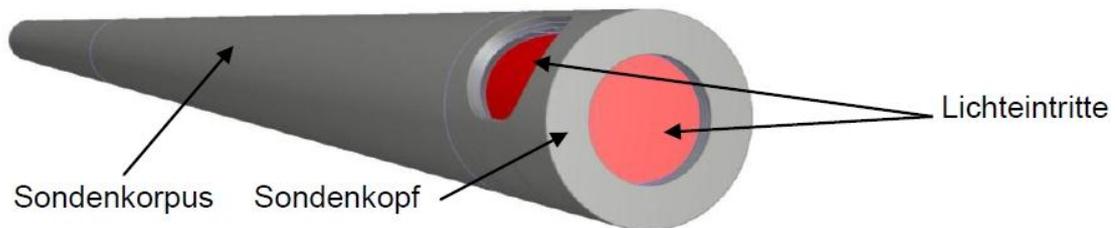


Abbildung 41: Darstellung der simulierten Sondengeometrie, FSt. GWI; Basis Fertigungszeichnung gemäß Abbildungen 37 und 40

Basierend auf realitätsnahen Randbedingungen wurden daher im Laufe des Projekts verschiedene Geometrievarianten mit Hilfe der CFD-Software FLUENT untersucht. Die Ofenraumtemperatur wurde dabei auf 1800°C festgelegt, der Kühlwasservolumenstrom auf 400 l/h (bzw. 3 bar Leitungsdruck) bei einer Vorlauftemperatur von 30°C . Die Spülluft im Sondeninneren wurde bei den Simulationen berücksichtigt, der vorgegebene Volumenstrom betrug $10 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$. Der Sondenkorpus hat insgesamt eine Länge von $1,50 \text{ m}$. Der thermisch hochbelastete Bereich hatte bei den Simulationen eine Länge von 500 mm .

Um die geometrischen Abmessungen vom Sondenkorpus (Außendurchmesser) möglichst gering zu halten, wurde zuerst ein 2-Rohr-System mit den oben genannten Randbedingungen simuliert. Die Simulationen zeigten die Gefahr einer erheblichen Überhitzung an den Sichtöffnungen auf, die sich durch die ungeeignete Strömungsführung im 2-Rohr-System ergab (**Abbildung 42**).

Daraufhin wurde nach Rücksprache mit den Projektpartnern auf das bereits in der FLORIAN-Sonde bewährte 3-Rohr-Kühlsystem zurückgegriffen (vgl. **Abbildung 40**). Auch für diese Geometrie wurden bei gleichen Randbedingungen CFD-Simulationen durchgeführt.

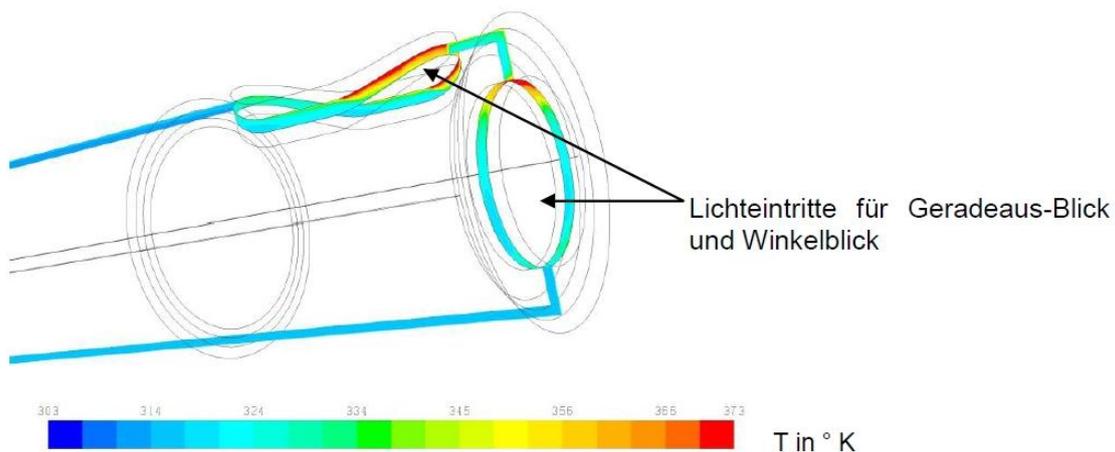


Abbildung 42: Simulierte Temperaturverteilung im Wasserkreislauf beim 2-Rohr-System, CFD-Simulationen, FSt. GWI

Jedoch ergaben sich auch beim 3-Rohr-System in den Simulationen gefährliche lokale Temperaturspitzen, siehe auch **Abbildung 43**. Problematisch erschien hier insbesondere der Bereich unmittelbar hinter dem seitlichen Lichteintritt, der im FLORIAN-System in dieser Form nicht vorhanden ist. Anhand der Strömungssimulationen konnte gezeigt werden, dass an dieser Stelle die Gefahr eines Rezirkulationsgebiets besteht, das zu einer lokalen Temperaturüberhöhung führen kann.

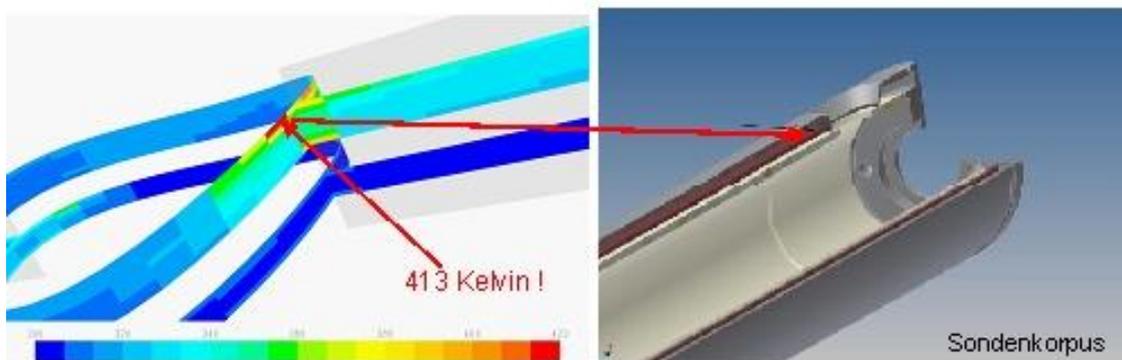


Abbildung 43: Lokale Temperaturüberhöhung in der 3-Rohr-Variante, CFD-Simulationen, FSt. GWI

Daraufhin wurde eine strömungstechnisch optimierte Version mit Hilfe von CFD-Verfahren entwickelt und untersucht, bei der durch einen metallenen, keilförmigen Einbau hinter dem seitlichen Lichteintritt die Ausbildung einer Rezirkulationszone unterbunden wird. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich durch diesen Einbau lokale Temperaturüberhöhungen im Wasserkreislauf verhindern lassen. Nach Rücksprache mit den Projektpartnern wurde jedoch deutlich, dass sich die vorgeschlagene Geometrie, obwohl strömungs- und wärmetechnisch erheblich vorteilhafter, fertigungstechnisch nicht umsetzen ließ.

Aus mehrfachen Beratungen der Projektpartner, auch unter Einbeziehung der Fertigungswerkstatt für den Sondenkopf und den Sondenkorpus, wurde festgestellt, dass sich aus konstruktions- und fertigungstechnischen Gründen ein Spalt zwischen der seitlichen Bohrung und dem mittleren Rohr befindet, der bei den bisherigen Simulationen nicht berücksichtigt worden war. Durch diesen Spalt ist es möglich, dass kaltes Wasser (Wasser-

vorlauf) unmittelbar in den Rücklaufkanal (Wasserrücklauf) des Sondenkorpus eintritt, ohne den Wasserkanal bis zum Sondenkopfe zu durchlaufen.

Des Weiteren wurde die Trennwand, die hinter dem seitlichen Lichteintritt den Zu- und Ablauf des Wasserkreislaufs trennt, entfernt, da auch diese Trennwand aus fertigungs-technischen Gründen nicht umsetzbar war.

Um den Einfluss des Spalts und der fehlenden Trennwand hinter dem seitlichen Lichteintritt auf die Kühlung des Sondenkörpers zu untersuchen, wurden weitere Simulationen durchgeführt, wobei die Weite des Spalts, die sich nicht exakt bestimmen ließ, mit 1 mm angenommen wurde.

Einige ausgewählte Ergebnisse aus diesen Simulationen sind in den **Abbildung 44 und Abbildung 45** dargestellt. Es zeigt sich, dass durch das Kühlwasser (Vorlauf), welches durch den Spalt unmittelbar in den Rücklauf vor dem seitlichen Auge eintritt, die Bildung einer Rezirkulationszone, die an dieser Stelle zu gefährlichen lokalen Temperaturüberhöhungen führt, gestört wird, da hier kaltes Wasser unmittelbar eingebracht wird. Auf diese Weise wird die Maximaltemperatur im Wasserkühlkreislauf bei o. g. Parametern auf etwa 70 °C reduziert.

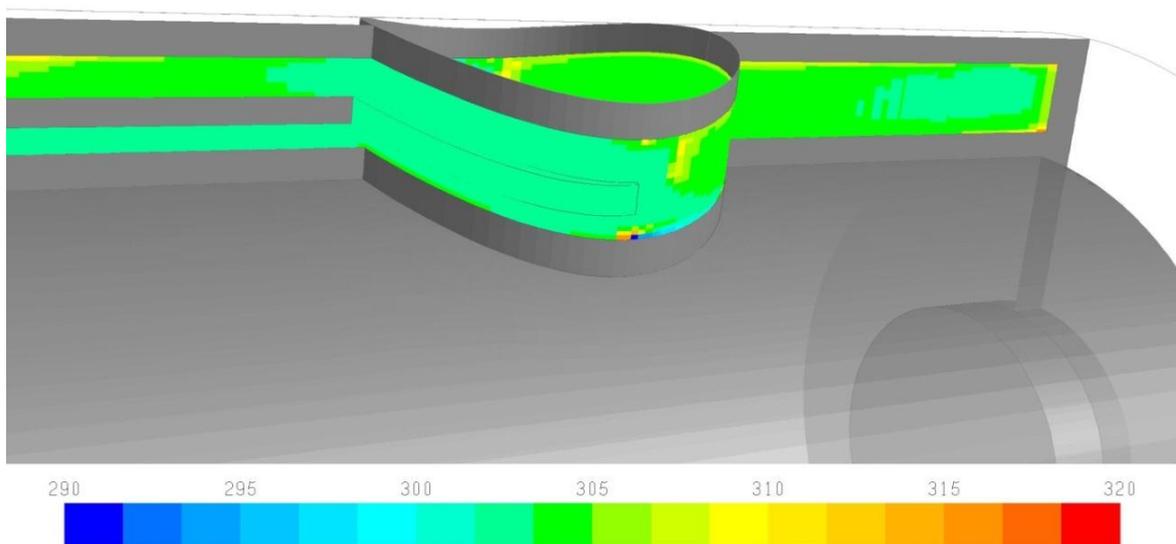


Abbildung 44: Temperaturverteilung im Wasserkreislauf des Sondenkörpers, finales Design; CFD-Simulationen, FSt. GWI

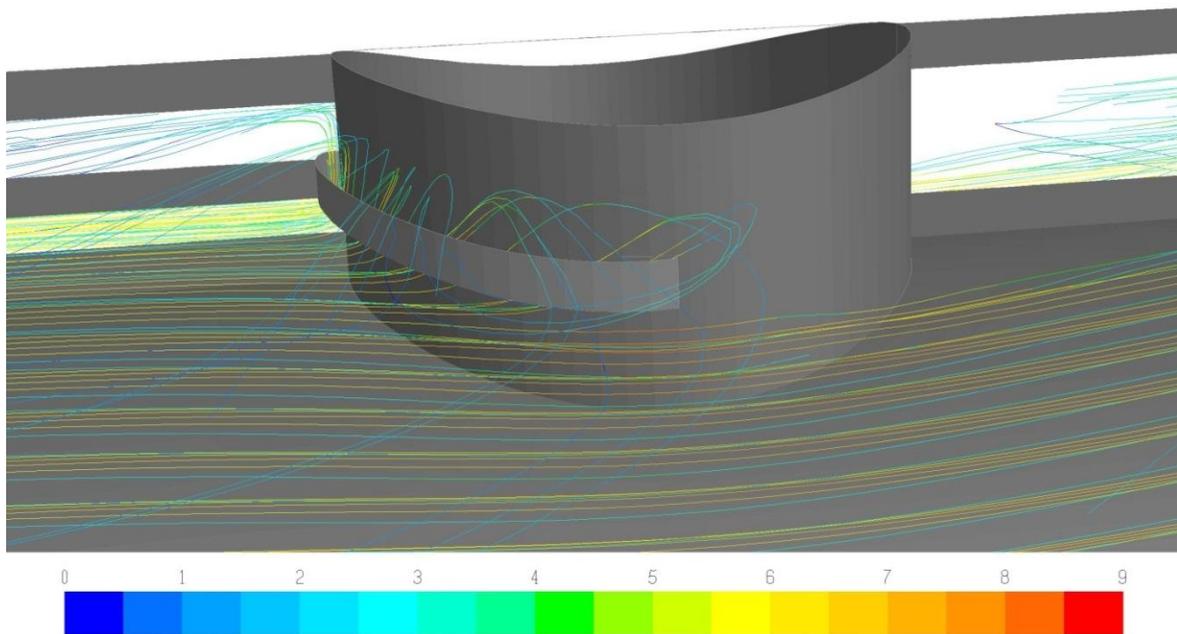


Abbildung 45: Stromliniendarstellung der Strömung im Wasserkanal des Sondenkörpers, eingefärbt mit dem Geschwindigkeitsbetrag; CFD-Simulationen, FSt. GWI

Auf Basis der durchgeführten Simulationen für den wassergekühlten Sondenkörper (Sondenkorpus mit Sondenkopf und Medienanschlüssen für Wasserkühlung und das gasförmige Spülmedium) konnten die erstellten Fertigungszeichnungen für den Fertigungsbetrieb freigegeben werden.

Gemäß der im AS 1.1 erarbeiteten Anforderungskriterien für das Gesamtsystem, d. h. Ofenraumtemperaturen bis 1700 °C und Flammentemperaturen bis 2000 °C, ein thermisch hochbelasteter Bereich des Sondenkorpus von 500 mm (1700 - 1200 °C, Bereich Feuerraum/Ofenwand), eine Begrenzung der für die Optikbauteile relevanten Temperatur im Sondenkörper auf max. 60 °C sowie eine Begrenzung der Kühlwasserrücklauftemperatur auf max. 80 °C, ergeben sich aus den Berechnungen und Simulationen folgende Anforderungen an die Kühl- und Spülmedien des Sondenkörpers:

- Kühlwasservorlauftemperatur max. 30 °C,
- Kühlwasservolumenstrom 600 l/h,
- Kühlwasserdruck 3 bar (statisch),
- max. Eintrittstemperatur des gasförmigen Spül- und Kühlmediums 30 °C,
- Volumenstrom des gasförmigen Spül- und Kühlmediums (Pressluft, Argon oder Stickstoff) 30 m³_N/h,
- Druck des gasförmigen Spül- und Kühlmediums 2 bar (statisch).

Die erstellten Fertigungsunterlagen berücksichtigen auch das entwickelte Sicherheitssystem zur Überwachung der für die Optikbauteile relevanten Temperatur von 60 °C im Sondenkörper. Auf die thermische Überwachung wird im AS 3.3 eingegangen.

4.3.3 Arbeitsschritt 3.3: Fertigung und Integration der Sonde (DBI)

Die FuE-Arbeiten im AS 3.3 erfolgten unter Leitung der FSt. DBI. Die FSt. GWI und ITO haben die durchgeführten FuE-Arbeiten zur Fertigung des Sondenkühlmoduls und zur Integration der Sonde mit begleitet. Weiterhin erfolgten abschließende CFD-Simulationen für das Kühlmodul von der FSt. GWI und nochmalige Vermessungen am endgültigen UV-Objektiv von FSt. ITO.

Auf Basis der in den AS 3.1 und 3.2 erstellten Fertigungsunterlagen erfolgte die Fertigung des Sondenkühlmoduls, bestehend aus Sondenkopf mit Lichteintrittsöffnungen und Sondenkorpus mit Anschlüssen für die Medienversorgung, extern von der Fa. ASE in Chemnitz. Das entsprach der Projektplanung.

Die **Abbildung 46** zeigt das gefertigte Sondenkühlmodul mit dem ebenfalls entwickelten und gefertigten Trägersystem für die optischen und mechanischen Komponenten.



Abbildung 46: Gefertigtes Sondenkühlmodul und entwickeltes Trägersystem für alle optischen und mechanischen Bauteile des Lichteintrittssystem (AS 2.2) und des Detektorsystems (AS 2.3)

Nach der Fertigung des Sondenkühlmoduls erfolgten im Technikum der FSt. DBI Wasserdruckprüfungen zur Dichtheitskontrolle mit einem Prüfdruck von 5 bar über einen Zeitraum von 24 Stunden. Danach wurde das System nochmals zerlegt, um insbesondere den Innenbereich des Kühlmoduls (Einbauort für alle optischen und mechanischen Komponenten) auf evtl. vorhandene geringfügige Leckagen zu prüfen. Die dokumentierte Prüfung des Sondenkühlmoduls ergab keine Beanstandungen.

Damit waren die Voraussetzungen geschaffen, die optischen und mechanischen Komponenten mit Hilfe eines Trägersystems in das Sondenkühlmodul zu integrieren (vgl. **Abbildung 46**). Vor dieser Integration erfolgten nochmalige Funktionsproben für das am Trägersystem montierte optische und mechanische System im Technikum der FSt. DBI.

Die **Abbildung 47 und Abbildung 48** zeigen eine Prinzipskizze und ein Prinzipbild für die Systemintegration. Die Bauteile der entwickelten Systeme Lichteintritt (vgl. AS 2.2) sowie Detektor (AS 2.3) sind sichtbar. Nicht dargestellt sind die mechanischen Bauteile und Mikromotoren zur Verstellung des Spiegels (Blickrichtung 0 – 90°), zur Bewegung des UV-Filters 306,4 nm in und aus dem Strahlengang sowie zur Fokussierung (Bewegung des UV-Objektives).

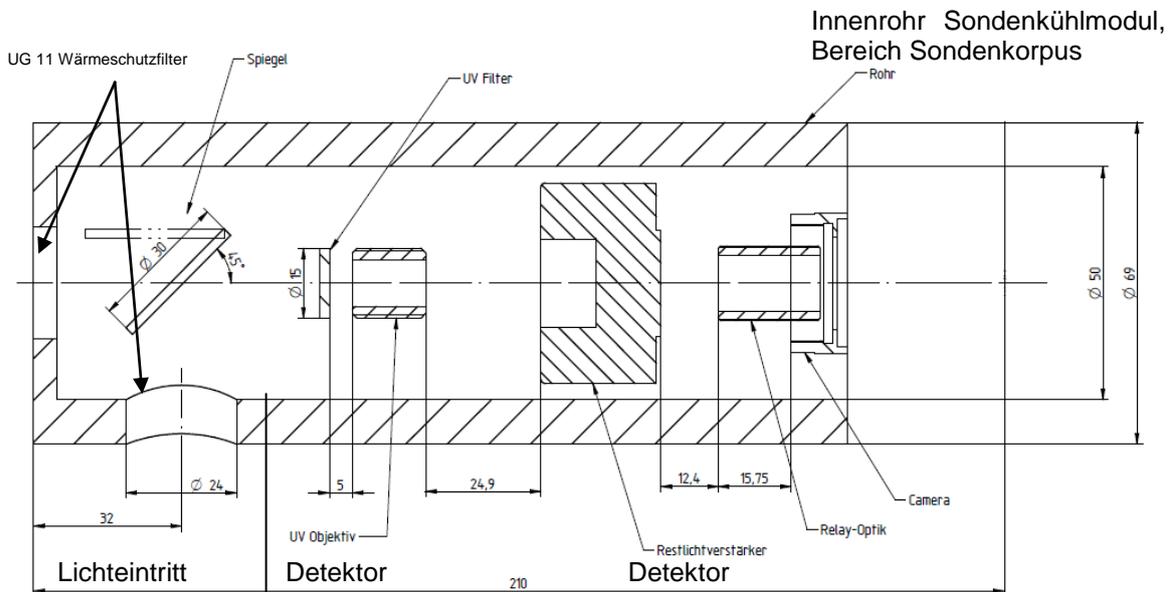


Abbildung 47: Prinzipskizze für die Integration der Optikkomponenten in das Sondenkühlmodul

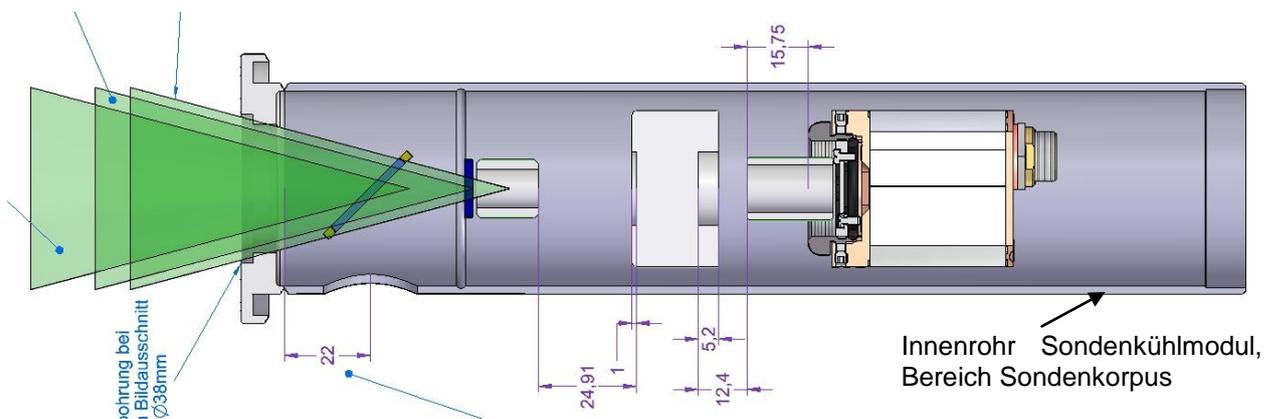


Abbildung 48: Prinzipbild für die Integration der Optikkomponenten in das Sondenkühlmodul

Die **Abbildung 49** und **Abbildung 50** zeigen 2 Fotos vom vollelektronischen UV-Bildübertragungssystem, montiert am Trägersystem nach **Abbildung 46** zum Einschub in das Wasserkühlmodul.

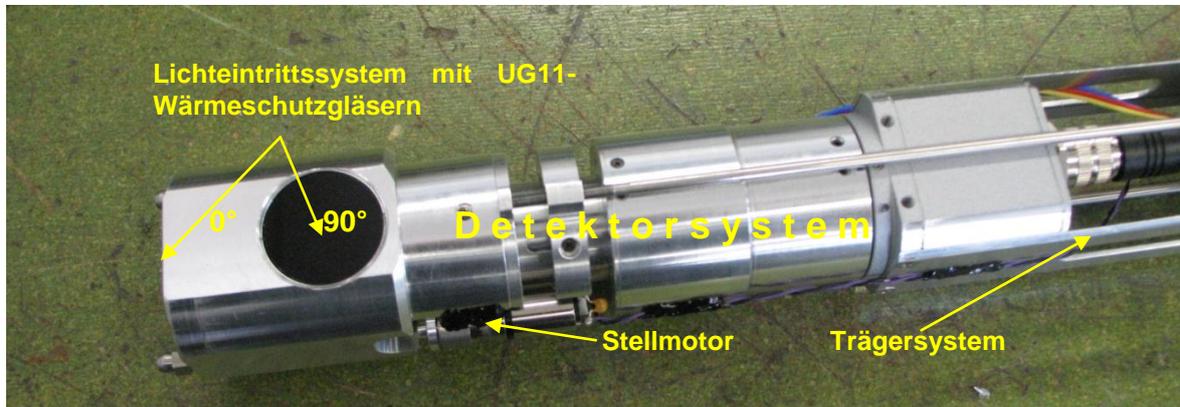


Abbildung 49: Vollelektronisches UV-Bildübertragungssystem mit den Bereichen Lichteintritt, Detektorsystem und Trägerbauteil

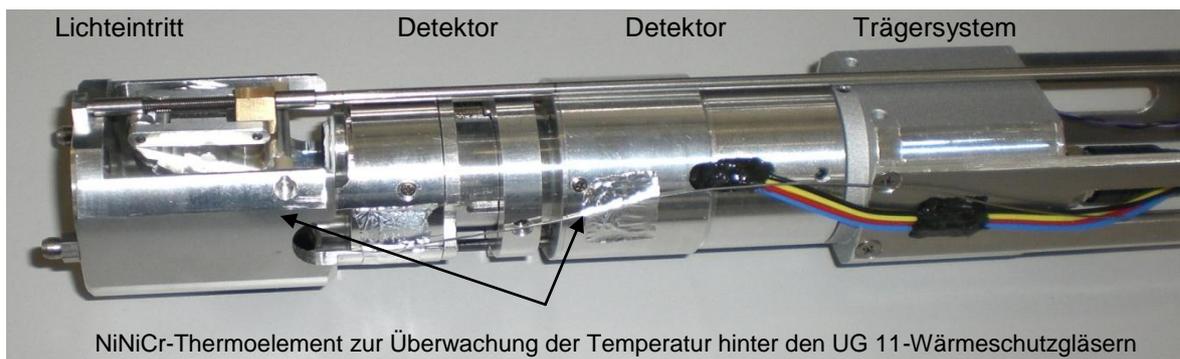


Abbildung 50: Vollelektronisches UV-Bildübertragungssystem mit den Bereichen Lichteintritt, Detektorsystem und Trägerbauteil und sichtbarer thermischer Überwachung, befestigt am entwickelten Träger

Nach der erfolgreichen Integration aller optischen und mechanischen Bauteile in das Sondenkühlmodul, bestehend aus Sondenkopf, Sondenkorpus und Anschlüssen für die Kühl- und Spülmedien (s. o.), wurde das Gesamtsystem entsprechenden Funktionsproben unterzogen. Die Funktionsproben waren erfolgreich.

Das Ziel im Arbeitspaket 3, die Entwicklung einer auf die Miniaturoptik angepassten Hochtemperatursonde aus CrNi-Stahl (Sondenkühlmodul) und die Integration des Sondenkühlmoduls und aller optischen und mechanischen Bauteile zum Gesamtsystem, wurde mit Zeitverzug (s. o.) und erhöhten FuE-Aufwendungen erreicht. Die erhöhten Aufwendungen resultierten aus immer wieder erforderlichen Anpassungen des optischen Konzeptes und Modifizierungen des Kühlsystems im Bereich der opto-elektronischen Bauteile und des Wärmeschutzfilters sowie aus einer Überarbeitung des Designs der Strömungsführung für die Kühlmedien. Das erreichte Ziel von AP 3 entspricht der Vorhabensplanung.

4.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung einer Steuerung und einer Bildverarbeitungssoftware

4.4.1 Arbeitsschritt 4.1: Entwicklung einer Steuerung für die bewegliche Komponenten (DBI, GWI)

Die Bearbeitung erfolgte unter Federführung der FSt. DBI und GWI. Das entsprach der ursprünglichen Projektplanung. Folgende beweglichen optischen Komponenten des entwickelten optischen minimalinvasiven UV-Analysesystems gemäß Arbeitspaket 3 (vgl. **Abbildung 47 bis Abbildung 50**) sind im Hinblick auf die erforderliche Funktionalität (vgl. Pkt. 3.1.1 Forschungsziele) anzusteuern:

- Spiegel (Kaltlichtspiegel, UV Enhanced Aluminium), Bewegung für variable Blickrichtung von 0 - 90°,
- OH-Bandpassfilter 306,4 nm, Ein- und Ausfahren aus dem Strahlengang für Detektierungen im sichtbaren Wellenlängenbereich (400 - 800 nm) und im UV-Wellenlängenbereich um 306,4 nm zur UV-Flammenanalyse,
- Objektivverstellung zur Fokussierung im Bereich 50 cm bis unendlich.

Das im Projekt entwickelte Konzept des „Vollelektronischen Bildübertragungssystems“ (vgl. AS 1.2, **Abbildung 11**) führte zwar zu einer deutlichen Senkung der Gerätekosten aber auch, bedingt durch die nicht vorhergesehene größere Anzahl von Steuerungsfunktionen, zu einem höheren Aufwand bei der Entwicklung der Steuerungshard- und -Software bei FSt. DBI.

Aus Gründen einer besseren Bedienung und Praxistauglichkeit wurde eine vollmotorische Verstellmöglichkeit für o. g. Komponenten entwickelt, die zunächst so nicht vorgesehen war. Die überarbeitete Steuerungskonzeption führte zur Auswahl von Faulhaber-Mikromotoren (Gleichstrommotoren), die gegen Last fahren. Damit wird erreicht, dass die beweglichen Optikkomponenten (s. o.) auch bei einem Kräfteeintrag durch die Spülluftumströmung (5 - 15 m/s, vgl. AS 2.2 und 2.3) fixiert werden. Das hat im Hinblick auf die Visualisierungsqualität herausragende Bedeutung.

Aus Gründen einer besseren Praxistauglichkeit wurden in Abstimmung mit allen Projektpartnern 2 Steuersysteme für o. g. bewegliche Komponenten konzipiert und entwickelt, die beide auch die erforderlichen Regel- und Überwachungsfunktionen für die Temperaturen hinter den UG11-Gläseren (vgl. **Abbildung 50**), die Wasserrücklauftemperatur und die Volumenströme für Wasser und das gasförmige Medium enthalten. Bei Grenzwertüberschreitungen (Grenzwerte vgl. AS 3.2) erfolgen optische und akustische Alarmierungen. Die entwickelten Steuersysteme sind:

- a. Externe Steuereinheit für Direktanschluss an das UV-System ohne PC,
- b. Steuerungssoftware, die über den an das Kamerasystem angeschlossenen Industrie-PC die Bedienung der Digitalkamera und des Restlichtverstärkers (Auflösung, Framerate, Verstärkung u. a.) und der o. g. beweglichen optischen Komponenten ermöglicht.

Die **Abbildung 51 bis Abbildung 54** zeigen die entwickelten Steuerungsmöglichkeiten für die o. g. beweglichen optischen Komponenten auf. Alle o. g. beweglichen Komponenten sowie auch der Restlichtverstärker und die über die Relay-Optik angekoppelte Digitalkamera des UV-Analysesystem sind somit komplett über Bedienpult und Spezial-Industrie-PC fernsteuerbar.

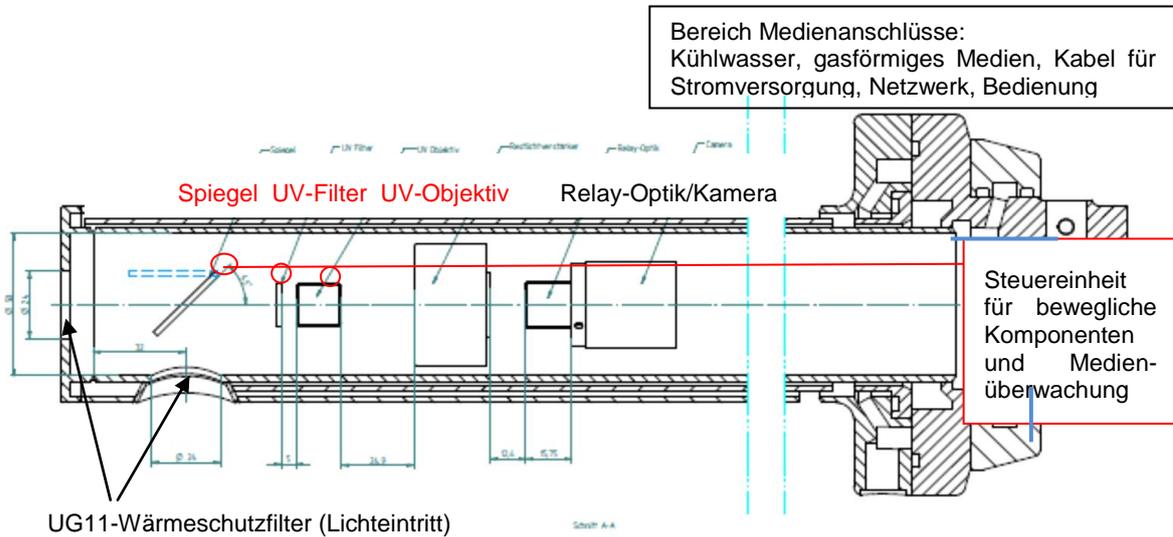


Abbildung 51: Übersichtsdarstellung der Steuerung der optischen, beweglichen Komponenten (rot) und der Medienüberwachung (blau)

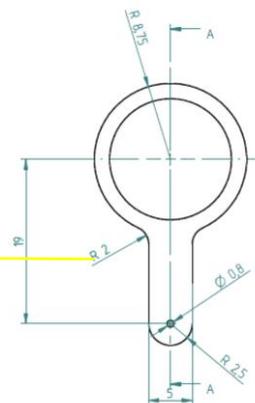
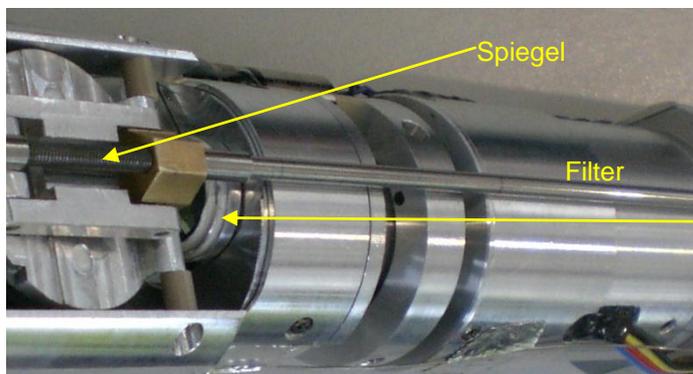


Abbildung 52: Vollmotorische ferngesteuerte Verstellmöglichkeit für bewegliche optische Komponenten



Abbildung 53: Visualisierungs-PC, Steuerungs-PC, Überwachung und Bedienpult für die Fernsteuerung der beweglichen optischen Komponenten, des Restlichtverstärkers sowie der Spezialkamera

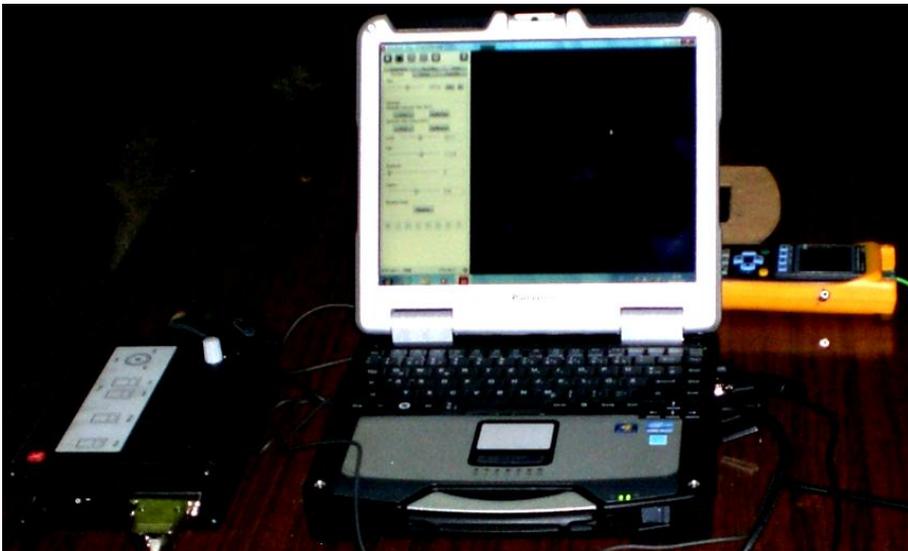


Abbildung 54: Spezial-PC-System für die Fernsteuerung aller Komponenten des UV-Analysesystems

4.4.2 Arbeitsschritt 4.2: Entwicklung Bildverarbeitungssoftware (GWI)

Die für eine quantitative und qualitative UV-Flammenanalyse erforderliche Bildverarbeitungssoftware wurde unter Leitung der FSt. GWI entwickelt. Die FSt. DBI hat aufgrund des sich ergebenden größeren und schwierigeren Bearbeitungsumfangs im Hinblick auf die Softwareentwicklung zugearbeitet. Wie geplant bildete u. a. die aus dem FLORIAN-System bei den FSt. DBI und GWI vorhandene UV-Visualisierungs-Software DaVis 6.0 der Fa. LaVision die Basis der FuE-Arbeiten. Die **Abbildung 55** zeigt anhand einer echten UV-Aufnahme aus einem Feuerraum ein Beispiel für diese UV-Visualisierungssoftware.

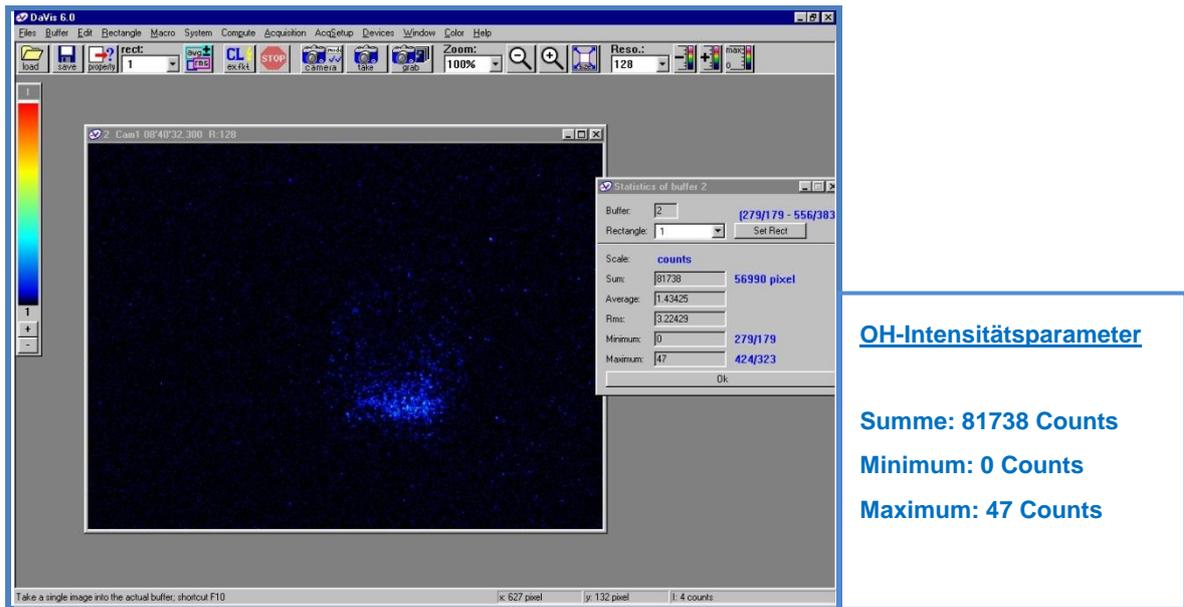


Abbildung 55: UV-Software DaVis 6.0 der Fa. LaVision, u. a. Basis der FuE-Arbeiten

Weiterhin wurden in die Entwicklungsarbeiten hinzugezogen:

- OPTISOS-Software der FSt. DBI (**Abbildung 56**),
- Visualisierungssoftware METROLUX (**Abbildung 57**),
- Steuerungs- und Visualisierungssoftware Zelos 415 M (**Abbildung 58**).

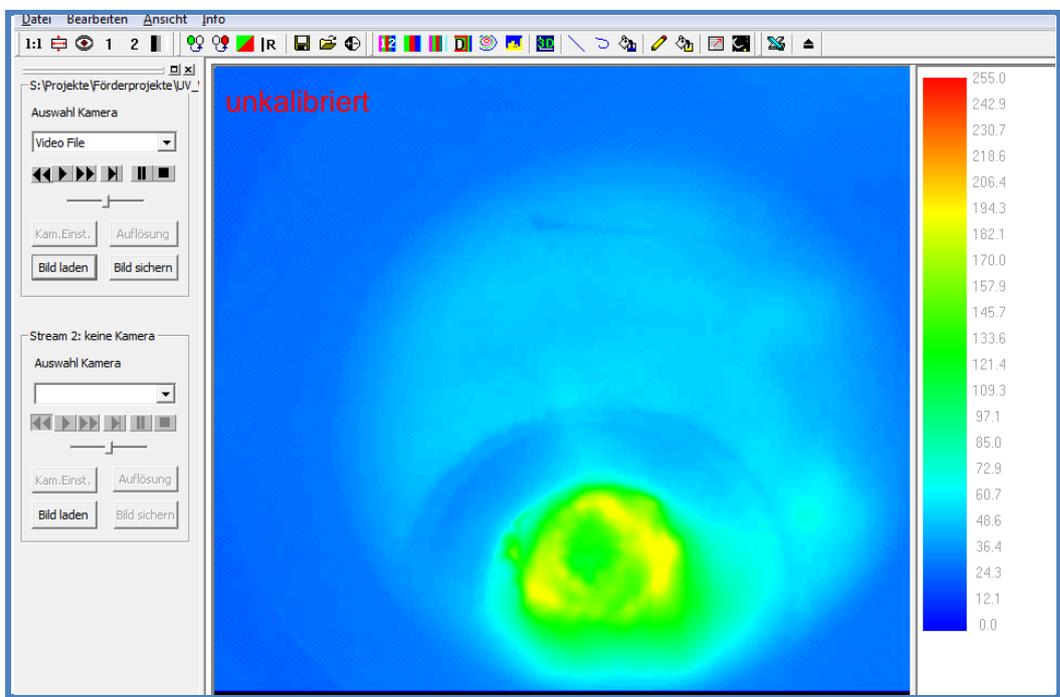


Abbildung 56: OPTISOS-Softwareentwicklung der FSt. DBI zur Darstellung von Temperaturfeldern von Aufnahmen im sichtbaren Wellenlängenbereich [26 – 29]

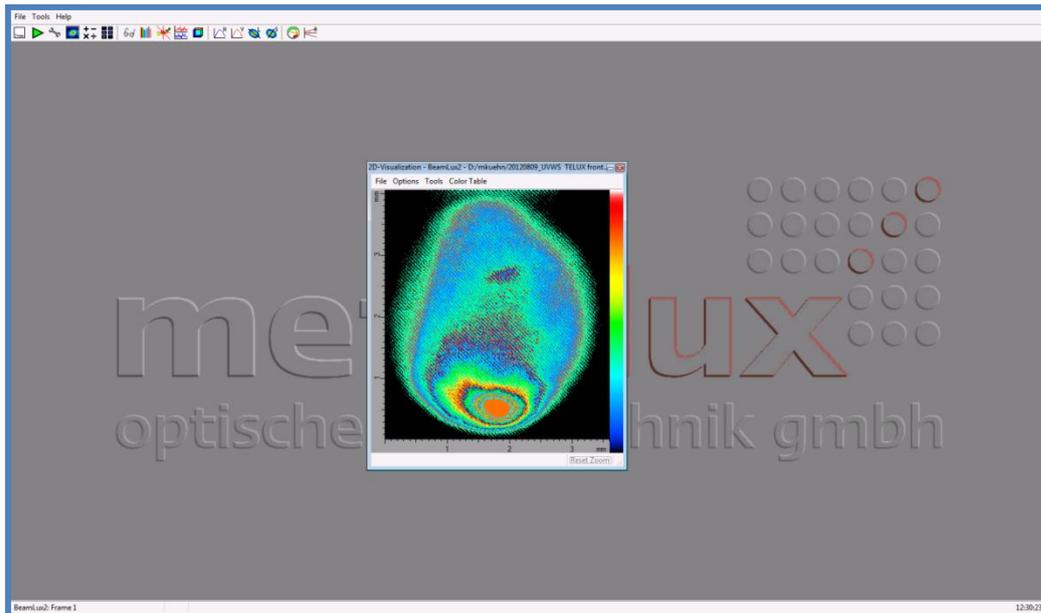


Abbildung 57: Von der FSt. DBI käuflich erworbene Visualisierungssoftware METROLUX

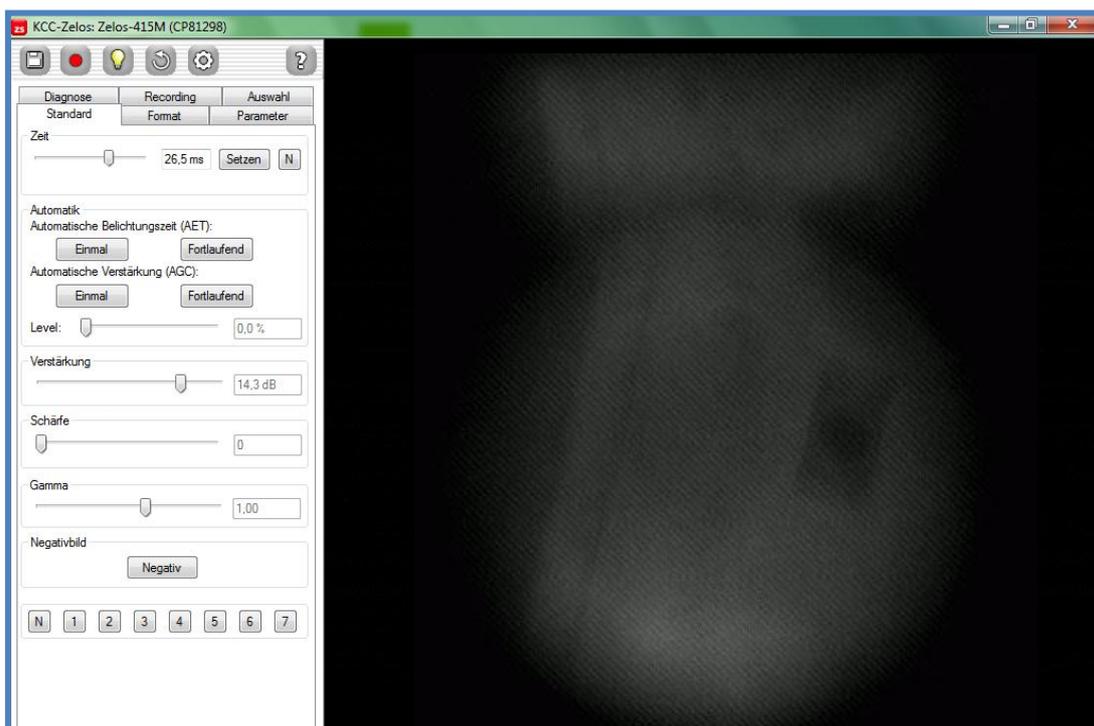


Abbildung 58: Von der FSt. DBI käuflich erworbene Steuerungs- und Visualisierungssoftware Zelos 415 M (Fa. Kappa optronics GmbH Gleichen)

Ausgewählte Darstellungen der entwickelten Bildverarbeitungssoftware zeigen die **Abbildung 59** und **Abbildung 60**. Die Software ermöglicht u. a.:

- Auswertung der OH-Intensitätsverteilungen (qualitativ und quantitativ),
- Auswertung und Vergleiche von Flammgeometrien,
- Auswertung der Homogenitäten,

- 3D View zur 3D-Darstellung von Intensitätsverteilungen,
- Statistische Auswertung der OH-Intensitätsverteilungen,
- Entzerrung der Verteilungsbilder in Abhängigkeit vom aufgenommenen Bildwinkel,
- Ausgleich der Bildvignettierung,
- Prozessdatenbezogene Bild- und Videodaten-speicherungen der Visualisierungsergebnisse in verschiedenen Formaten.

Zur Entwicklung der Bildverarbeitungssoftware waren bei der FSt. GWI u. a. zusätzlich umfangreiche Flammenuntersuchungen notwendig, die den Einsatz eines Technikers zum Versuchsaufbau und -durchführung erforderten.

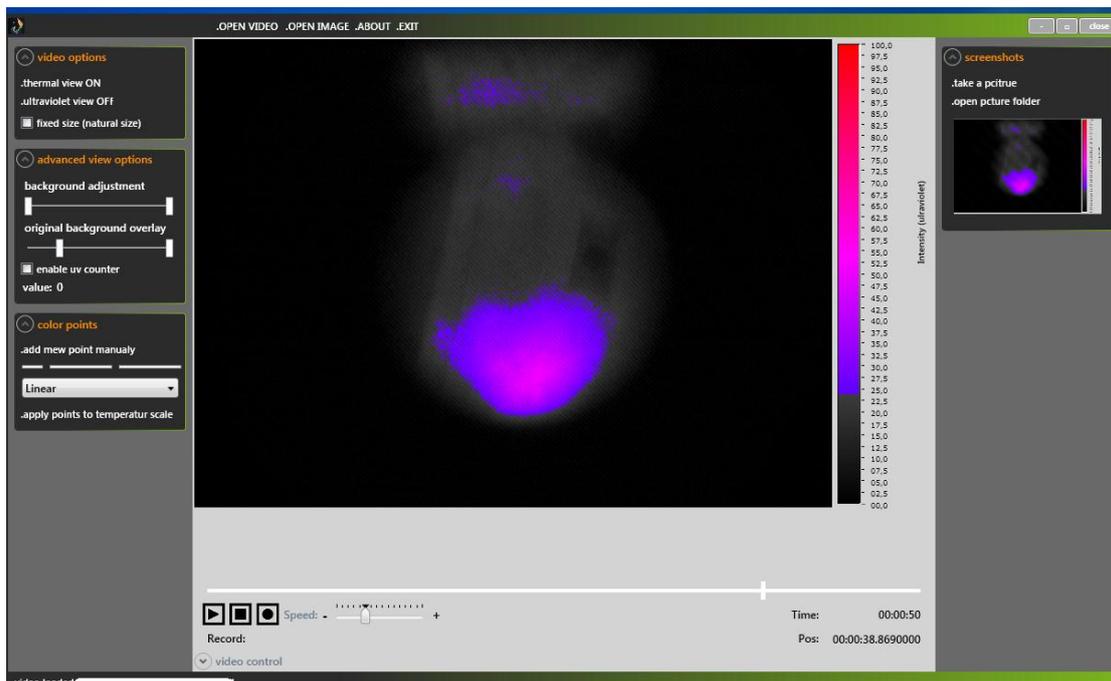


Abbildung 59: Beispielbild für entwickelte Bildverarbeitungssoftware, FSt. DBI; Echtbild einer UV-Flammvisualisierung mit dem entwickelten Analysesystem

4.5 Arbeitspaket 5: Erprobung der Sonde

4.5.1 Arbeitsschritt 5.1: Funktionsprobe des Gesamtsystems unter Laborbedingungen (DBI)

Die FSt. DBI war für diesen Arbeitsschritt gemäß genehmigter Projektplanung federführend tätig, die FSt. GWI arbeitete zu. Nach der Fertigstellung aller Komponenten und der Integration dieser zum Gesamtsystem im AS 3.3 sowie der erfolgten Entwicklung der Systemsteuerung und der Bildverarbeitungssoftware in den AS 4.1 und 4.2 waren die Voraussetzungen für den Start der Funktionsproben unter Laborbedingungen gegeben.

Die Arbeiten erfolgten gemäß Projektplanung (vgl. **Tabelle 1**). Im Bearbeitungszeitraum 2011 zeigte sich jedoch, dass wesentlich umfangreichere FuE-Arbeiten im AS 5.1 erforderlich sind und dass auch der zeitliche Rahmen ohne Abstriche an den FuE-Arbeiten der anderen Arbeitsschritte im Arbeitspaket 5, insbesondere durch die geplante und erforderliche Erweiterung des Anwendungsfeldes (noch höhere Temperaturen, längere Einsatzzeiten an der Ofenanlage, vom Normaldruck abweichende Ofenraumdrücke u. a.), vergrößert werden musste. Auch bei erforderlichen Funktionsproben unter Laborbedingungen, die parallel zur Heißeerprobung im Januar 2012 notwendig wurden (s. u.), zeigte sich, dass das Ziel des Arbeitsschrittes „Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Systems Sonde / periphere Technik / Bildverarbeitungssoftware / Steuerung“ definitiv nur mit erhöhtem Aufwand erreicht werden kann (vgl. /54/).

Folgende zusätzliche FuE-Arbeiten, über die bereits in /54/ berichtet wurde, waren von den FSt. DBI und GWI innerhalb von AS 5.1 erforderlich:

- Zusätzliche Strömungsberechnungen zur Optimierung der Kühlmedienführung, insbesondere im Bereich der beiden UG11-Wärmeschutzfilter und des verstellbaren UV-Spezialspiegels,
- Weitere komplexe wärmetechnische Berechnungen (CFD-Simulation) für das wasser- und luftgekühlte Sondenmodul (Sondenkopf mit Korpus),
- Überarbeitung des Designs der Sondenaugen zur Verbesserung des Strahlungswärmeschutzes,
- Zusätzliche Arbeiten zum Design der Kalibrierung (mechanische Systeme zur Schärfenregulierung und zum Schwenken des UV-Spiegels),
- Aus den vorgenannten zusätzlichen bzw. vertiefenden FuE-Arbeiten resultieren diverse Modifikationen am SONDENSYSTEM, die wiederum zusätzliche Testreihen im Labormaßstab bedingten, auch parallel zu den FuE-Arbeiten im AS 5.2 (s. u.).

Für extreme thermische Anforderungen des entwickelten Analysesystems für die UV-Flammendiagnose in Thermoprozessanlagen (Ofenraumtemperaturen > 1600 °C, Flammentemperaturen > 2000 °C, Ofenraumüberdruck bis 20 mbar, System-Einsatzzeiten > 3 Stunden) erfolgten von der FSt. DBI erneute Simulationen der Strömungs- und Temperaturverteilung im Bereich der Wärmeschutzgläser und der Sondenaugen zur weiteren Optimierung der Öffnungswinkel sowie zur Verbesserung des Strahlungswärmeschutzes im kritischen Sondenaugenbereich.

Die Ergebnisse der Simulationen (Strömungs- und Temperaturverteilungen) sind in den **Abbildung 61** und **Abbildung 62** dargestellt.

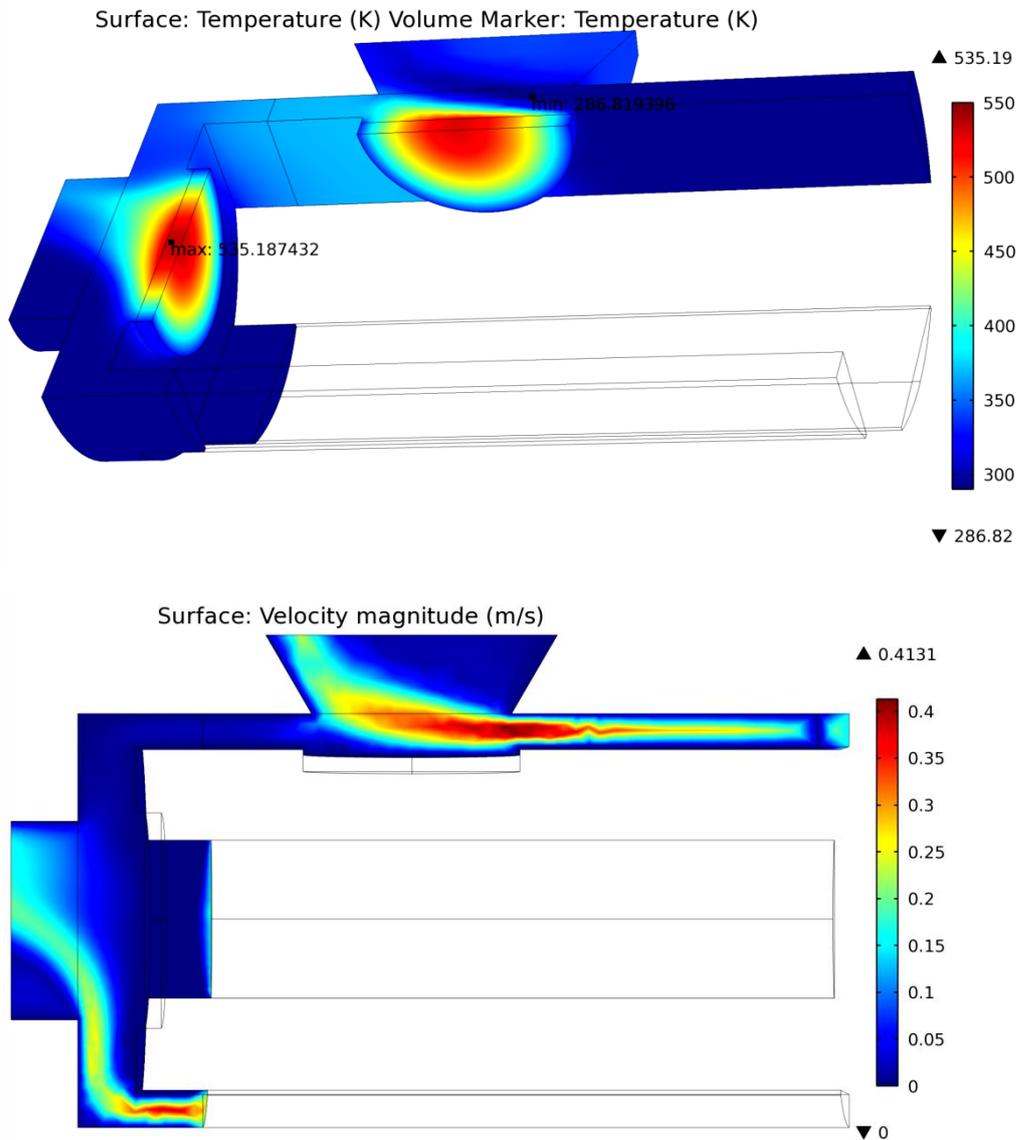


Abbildung 61: Sonde mit 2 Öffnungen, Umgebungstemperatur 773K, FSt. DBI

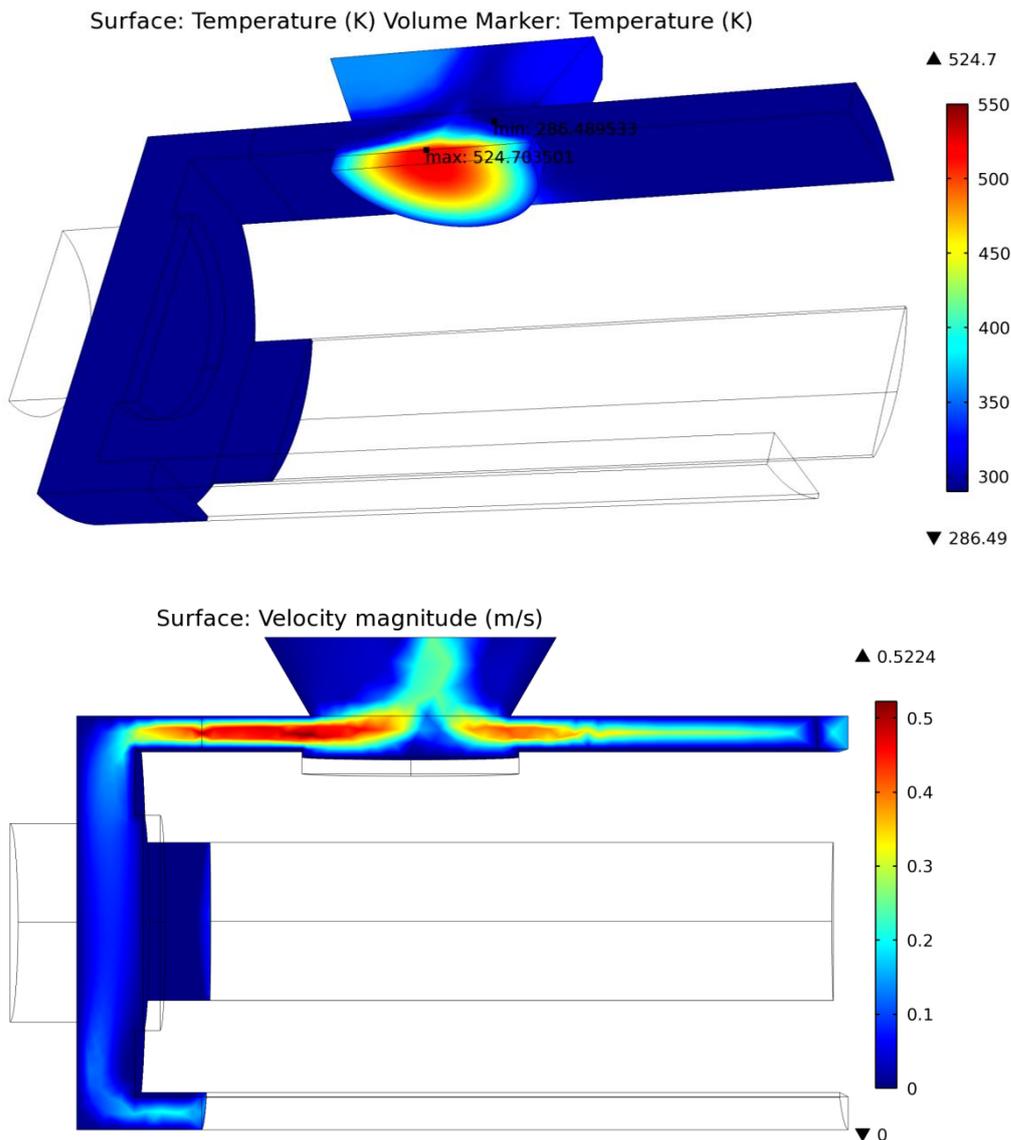


Abbildung 62: Sonde mit verdeckter Frontöffnung, Umgebungstemperatur 773 K, FSt. DBI

Es zeigte sich, dass bei Verdecken einer nicht verwendeten Sondenöffnung (z. B. bei 90°-Winkelblick Verdeckung der Frontöffnung) die Wärmebelastung am Sondenauge (Bereich UG11-Wärmeschutzgläser) sinkt. Bei extremen thermischen Beanspruchungsbedingungen (s. o.) macht demzufolge das Verdecken einer nicht verwendeten Sondenöffnung Sinn.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden von der FSt. DBI unmittelbar konstruktiv umgesetzt und die Bauteile aus hitze- und zunderbeständigem Stahl 1.4841 gefertigt. Die **Abbildung 63** zeigt die entwickelten Bauteile zur Verbesserung des Strahlungswärmeschutzes.

Bei den Funktionsproben unter Laborbedingungen erfolgten gemäß Projektplanung u. a. folgende FuE-Arbeiten von FSt. DBI:

- Test der Bildverarbeitungssoftware und Steuerung,
- Funktionstest der peripheren Technik mit der Sonde,
- Kalibrierung des Systems am Beispiel UV-Quellen.

Die **Abbildung 64** zeigt ein Beispiel für die durchgeführten Funktionserprobungen des Gesamtsystems unter Laborbedingungen mit ausgewählten UV-Quellen.

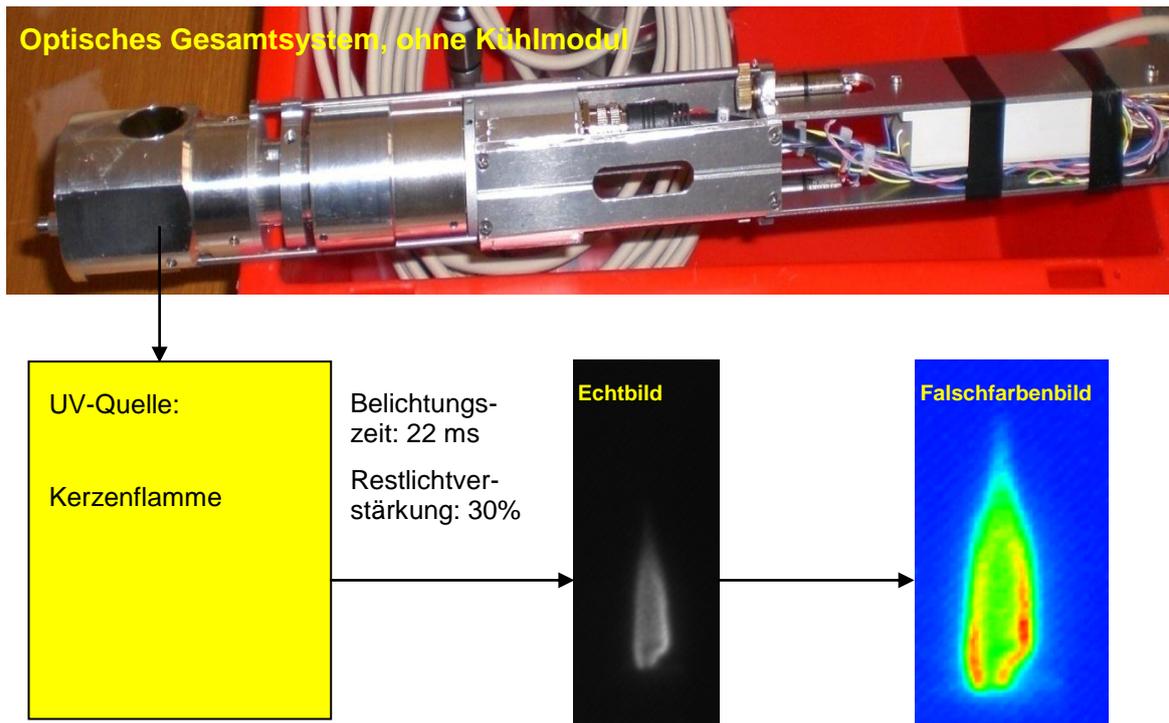


Abbildung 64: Funktionserprobung Gesamtsystem unter Laborbedingungen mit ausgewählten UV-Quellen (Beispiel Kerzenflamme, Abstand 1 m, OH-Filter 306,4 nm)

Die Funktionserprobungen unter Laborbedingungen zeigten sehr gute Ergebnisse im Hinblick auf die Zielstellung im Projekt auf. Das Eigenleuchten der OH-Verbrennungsradikale (Detektierung bei 306,4 nm) konnte in Echtzeit (Belichtungszeit 22 ms) bei vergleichsweise sehr guter Qualität visualisiert werden. Insgesamt waren mit Abschluss der FuE-Arbeiten im AS 5.1 alle Voraussetzungen für die Heißerprobungen im AS 5.2 geschaffen.

4.5.2 Arbeitsschritt 5.2: Heißerprobung im Technikum (GWI, DBI)

Die FSt. GWI war für diesen AS federführend tätig. Der ursprüngliche Projektplan gemäß **Tabelle 1** sah eine einzige Heißerprobung im Temperaturbereich um 1650 °C an der semi-industriellen Versuchseinrichtung im Technikum der FSt. GWI vor. Dies war aufgrund der Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten auch gerechtfertigt.

Durch die Verschiebung der opto-elektronischen Bauteile in die Sondenspitze und die Neukonzeption der Kühlung ergab sich nun aber ein hohes Schädigungsrisiko durch thermische Überbeanspruchung. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Heißerprobungen zunächst im niedrigeren Temperaturbereich bis 1300 °C an den Versuchsständen der FSt. DBI zwischen allen Projektpartnern abgestimmt und durchgeführt.

Nach den Heißerprobungen erfolgten jeweils Funktionsproben und Kalibrierungsberprfungen unter Laborbedingungen. Von der FSt. DBI waren somit zusätzliche FuE-Arbeiten erforderlich.

Die **Abbildung 65** zeigt eine Aufnahme der Heißerprobung des Kühlmoduls (Sondenkopf mit Sondenkorpus und Medienanschlüssen) zunächst ohne die optischen und mechanischen Bauteile am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI bei Ofenraumtemperaturen bis 1300 °C. Alle für das Sondenkühlmodul erforderlichen thermisch bedeutsamen Parameter (Temperaturen, Durchflüsse von Wasser und Luft, Drücke) wurden protokolliert.

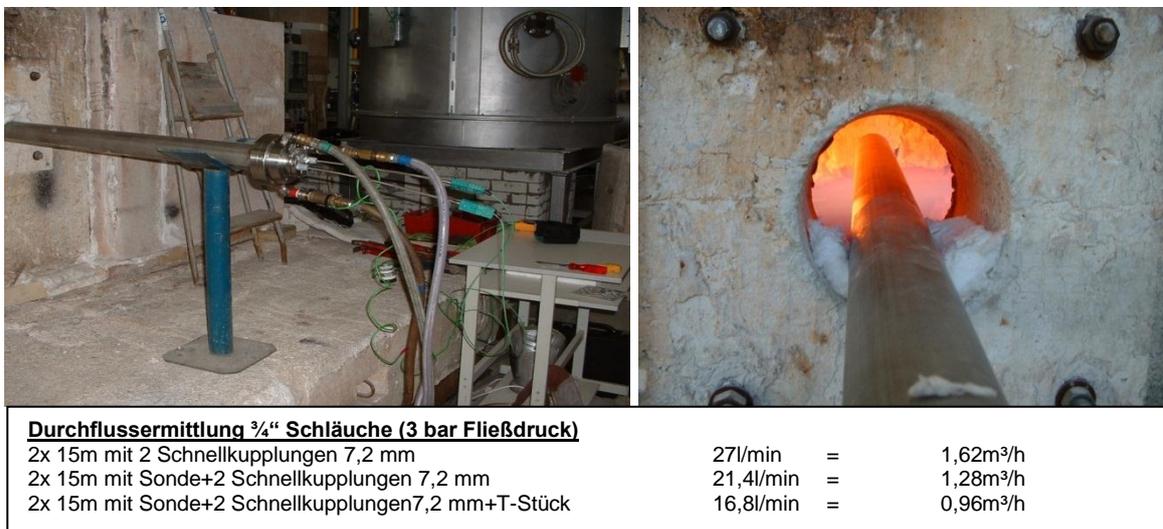


Abbildung 65: Heißerprobung Sondenkühlmodul bis 1300 °C am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI

Die erreichten positiven Ergebnisse der kalten Funktionsproben (AS 5.1) sowie die ebenfalls positiven Ergebnisse der Heißerprobung des Kühlmoduls bildeten die Voraussetzung für den 1. Heißtest des Komplettsystems am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI (**Abbildung 66**) unter folgenden Versuchsbedingungen:

- Erdgasbrenner, Brennerleistung 250 kW,
- Ofenraumtemperatur bis 1300 °C,
- Vorlaufwasser 15 °C, Rücklaufwasser 19 °C (300 l/h), Spülluftmenge 10 m³_N/h,
- T_{UG 11} max. 14,7 °C (Ausgangstemperatur 9,7 °C).

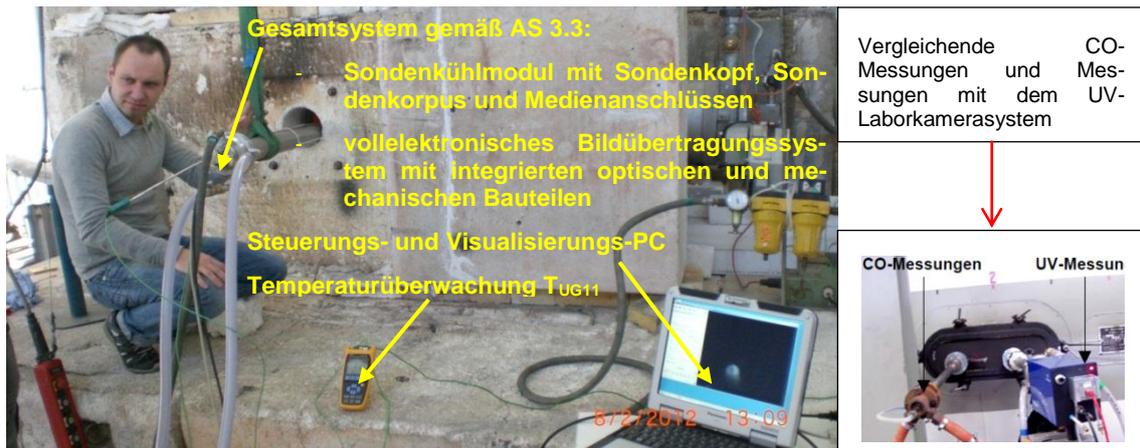


Abbildung 66: 1. Heißtest des entwickelten UV-Komplettsystems am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI bei Ofenraumtemperaturen bis 1300 °C und Vergleichsmessungen (CO-Messungen mit Absaugsonden, Labor-UV-Kamerasystem)

Ein ausgewähltes Ergebnis der UV-Flammendiagnose zeigt **Abbildung 67**.

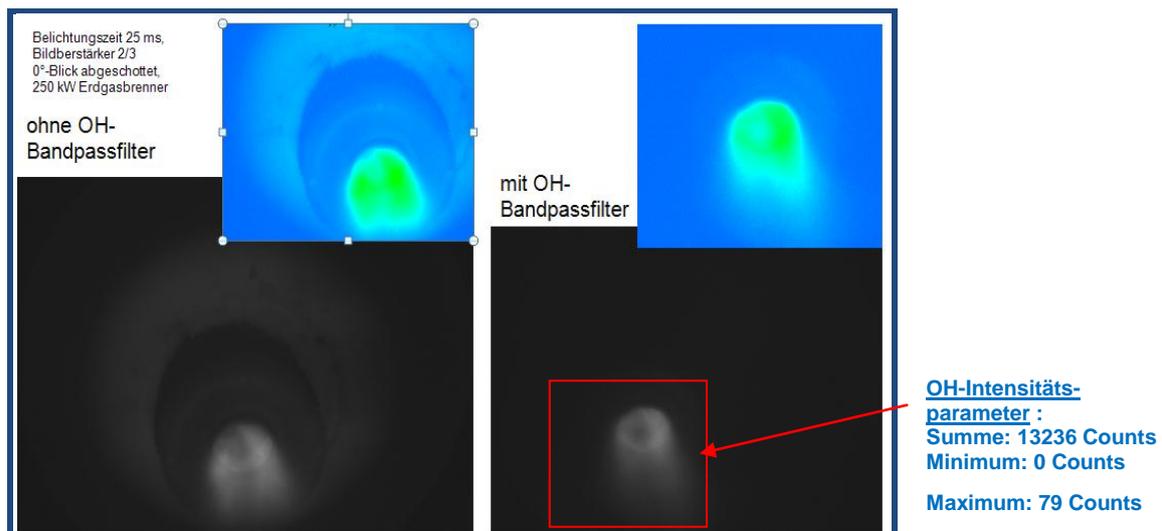


Abbildung 67: Ergebnisse des 1. Heißtests des Komplettsystems am keramischen Versuchsstand der FSt. DBI (Blickrichtung 90°-Winkelblick)

Die ersten Heißerprobungen des Komplettsystems am Versuchsstand waren sehr erfolgreich. Im Vergleich mit dem FLORIAN-System (vgl. AS 2.4, **Abbildung 34**) und auch mit dem Laborkamerasystem (vgl. AS 2.4, **Abbildung 35**) wird mit dem entwickelten kompakten UV-Analysesystem eine neue Bildqualität bei der Detektion der OH-Verbrennungsradikale erreicht (Lichtstärke, Kontrast, Rauschen, Schärfe). Bereits bei einer Kurzzeitbelichtung von 25 ms (**Abbildung 67**) ergeben sich bei gleicher Leistung des Restlichtverstärkers Intensitäten wie bei einer Belichtungszeit von 100 ms mit dem uV-Laborkamerasystem.

Das Verfahren der UV-Flammendiagnostik nutzt entsprechend Pkt. 2 die Strahlung der bei der Verbrennung entstehenden Hydroxid-Radikale (OH) bei 306,4 nm aus. Diese

Strahlung wird nicht durch Strahlungsspektren von Wänden oder weiteren gasförmigen Komponenten überlagert (**Abbildung 68**).

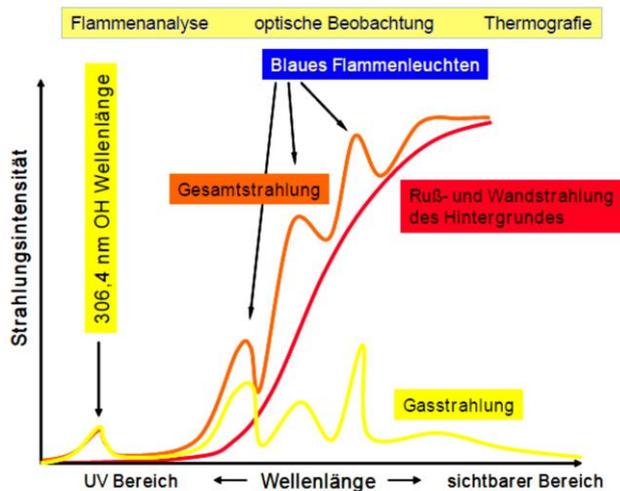


Abbildung 68: Das Strahlungsspektrum im Ofenraum (Gesamtstrahlung, Ruß- und Wandstrahlung, Gasstrahlung, Strahlung der OH-Radikale)

Entsprechend den Darlegungen unter Pkt. 2 zum Verbrennungsradikal OH können die **OH-Intensitäten** und daraus abgeleitete Flammentemperaturen und Schadstoffbildungen sowie **Flammgeometrien, Flammenlagen und Flammenausbrand** durch das entwickelte UV-Analysesystem im Hinblick auf die Optimierung des Thermoprozesses qualitativ und quantitativ dargestellt werden.

Die entwickelte Software (vgl. AS 4.2) trägt diesen Zusammenhängen Rechnung und ermöglicht neben der bildhaften Darstellung (**Abbildung 67**) der OH-Verbrennungsradikale u. a. folgende Aussagen:

- vergleichende Darstellungen der **OH-Intensitäten** als Zahlenwert,
- vergleichende Darstellungen zur **Flammgeometrie** und zum **Flammenausbrand**.

Zusätzlich durchgeführte Gas- und Temperaturmessungen mit Hilfe von wassergekühlten Absaugsonden (**Abbildung 66**) zur Bestimmung von Flammenausdehnung und Flammenausbrand bestätigten die Ergebnisse der OH-Messungen mit dem entwickelten Analysesystem.

Die **Abbildung 69 bis Abbildung 71** zeigen die Heißerprobung des entwickelten Analysesystems im Technikum der FSt. GWI unter folgenden Bedingungen:

- 250 kW-Erdgasbrenner,
- Ofenraumtemperatur 800 °C - 1300 °C,
- TUG11 max. 20,3 °C (Ausgangstemperatur 14,5 °C),
- Sondenaug (90°-Winkelblick) in etwa 50 cm langen Erdgasflamme positioniert (vgl. **Abbildung 69**).

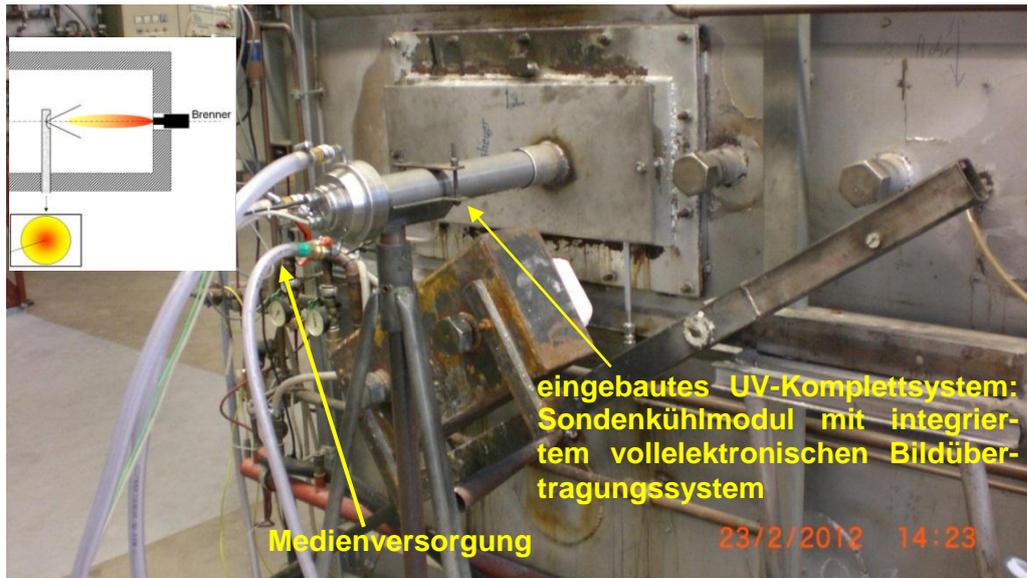


Abbildung 69: Heißerprobung im Technikum der FSt. GWI, Einbaubedingungen für die entwickelte UV-Winkelsonde

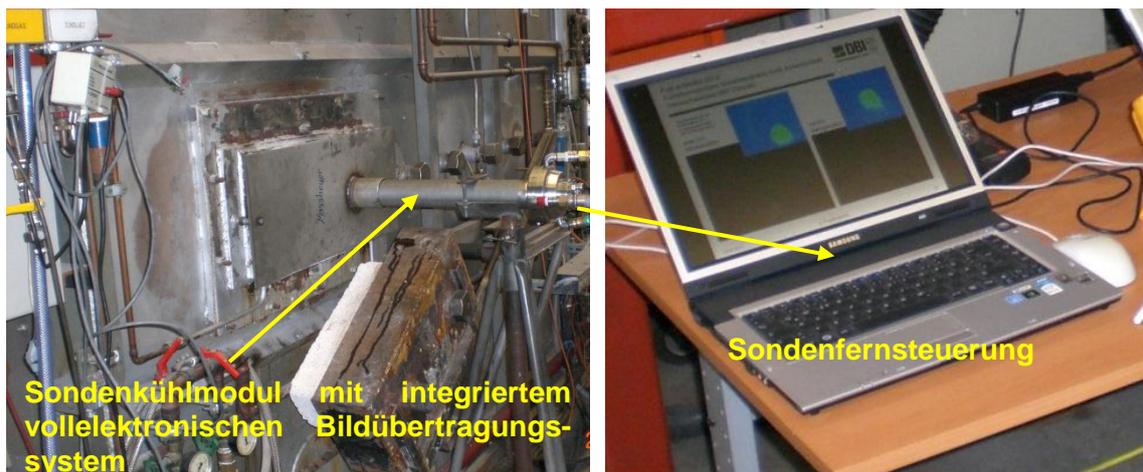


Abbildung 70: Periphere Gerätetechnik zur Datenaufzeichnung und zur kompletten Fernsteuerung der Sonde

Das Visualisierungsergebnis geht aus **Abbildung 71** hervor. Ebenso wie bei der 1. Heißerprobung im DBI-Technikum konnte das Visualisierungsergebnis am GWI-Versuchsstand vollständig überzeugen. Entsprechend o. g. Darlegungen für die 1. Heißerprobung konnten die OH-Intensitäten, sowie die **Flammgeometrie, Flammenlage und Flammenausbrand** qualitativ und quantitativ bewertet werden.

Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses konnten sich von der erreichten Qualität des entwickelten UV-Analysesystems während der Versuchsdurchführung überzeugen (vgl. Protokoll PbA-Sitzung am 23.02.2012). Hinsichtlich der durchgeführten Vergleiche mit dem FLORIAN-System sowie einem UV-Laborkamerasystem gelten o. g. Aussagen des Heißtests am DBI-Versuchsstand.

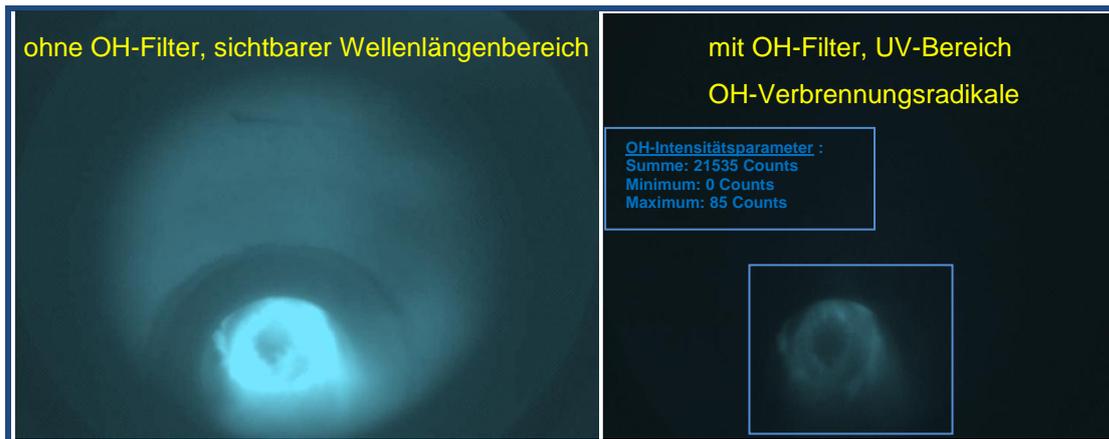


Abbildung 71: Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme für Blickrichtung 90° (Winkelblick), Heißerprobung an Versuchsanlage der FSt. GWI

4.5.3 Arbeitsschritt 5.3: Erprobung an Industrieanlagen (GWI, DBI)

Mit der Erprobung des entwickelten UV-Analysesystems an industriellen Thermoprozessanlagen soll die Einsatztauglichkeit überprüft werden. Die Erprobungen erfolgten unter Federführung der FSt. DBI, die FSt. GWI und ITO beteiligten sich an den Ergebnisbewertungen. Entsprechend der Projektplanung wurden die Industrieerprobungen an drei Thermoprozessanlagen durchgeführt. Um die Erprobung unter besonders extremen thermischen Beanspruchungsbedingungen zu absolvieren, wurden Glasschmelzwannen ausgewählt, wobei die Betreiber dem projektbegleitenden Ausschuss angehörten.

Die erste Industrieerprobung an einer Glasschmelzwanne erfolgte bei der Ritzenhoff AG in Marsberg (**Abbildung 72 bis Abbildung 74**).



Abbildung 72: Industrieerprobung des UV-Analysesystems bei der Ritzenhoff AG; Einbau des Sondenkühlmoduls mit voll-elektronischem Bildubertragungs- und Detektorsystem in die Glasschmelzwanne

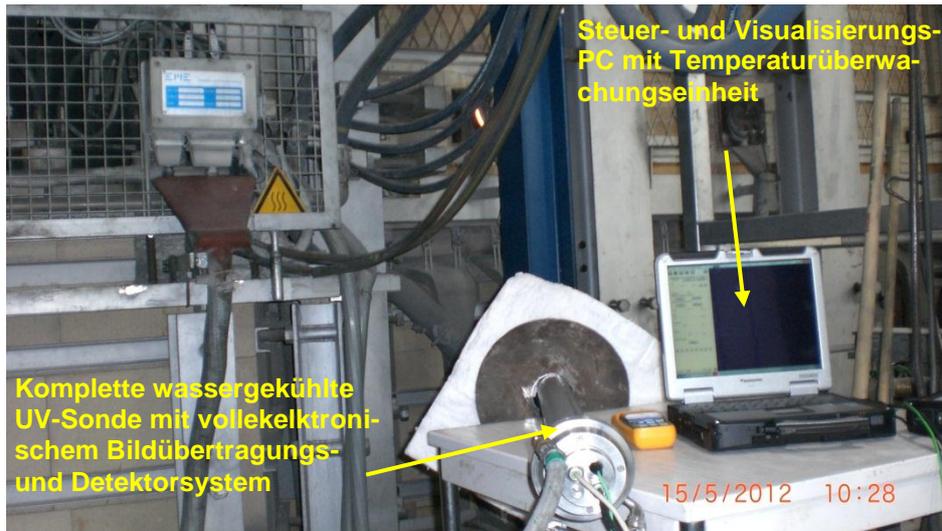


Abbildung 73: Industrieprobung des UV-Analysesystems bei der Ritzenhoff AG, Komplettsystem vor Einbau in die Glasschmelzwanne

Die UV-Visualisierung in der Schmelzwanne war für die Blickrichtung 0° erfolgreich. Die **Abbildung 74** zeigt ein ausgewähltes Ergebnis. Das linke Teilbild wurde im sichtbaren Wellenlängenbereich aufgenommen (400 - 800 nm) und zeigt die Erdgasflamme für die Betriebsweise „Feuer links“. Das rechte Teilbild zeigt bei integriertem OH-Filter ausschließlich die OH-Verbrennungsradikale.

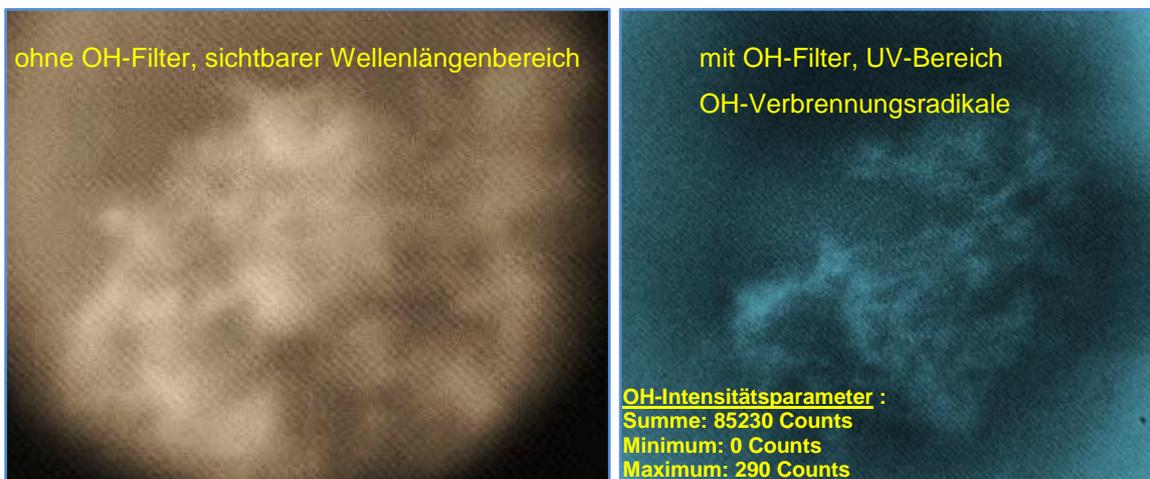


Abbildung 74: Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme bei Blickrichtung 0° (Geradausblick)

Die gemessenen Temperaturen im Sondenaugenbereich (in der Sonde, hinter den UG11-Wärmeschutzgläsern) und die Wasserrücklauftemperaturen waren über den Visualisierungszeitraum im absolut grünen Bereich:

$T_{UG\ 11}$ max. 29,5 °C (Ausgangstemperatur 20,4 °C), Spülgasmenge 20 m³_N/h

$T_{Wasserrücklauf}$ max. 35 °C (Ausgangstemperatur 25 °C), Menge 600 l/h.

Die gemessenen Werte entsprechen den durchgeführten Berechnungen für Sondenkopf und Sondenkorpus des Wasserkühlmoduls (vgl. AS 3.1 und 3.2). Die entwickelte UV-

Sonde mit integriertem elektronischen Bildübertragungs- und Detektorsystem ist danach auch für extreme thermische Beanspruchungsbedingungen, wie sie bei Glasschmelzwan-
nen vorherrschen, grundsätzlich geeignet.

Thermische Probleme bereitete die UV-Visualisierung in der Glasschmelzwanne bei Blick-
richtung 90°. Die Sonde musste dafür 600 mm in Ofenraum eingeführt werden und es
kam zum Temperaturanstieg hinter UG11 bis 85 °C (Grenzwert 60 °C). Die Funktionalität
war dabei nicht gestört, die Visualisierung konnte fortgesetzt werden. Die Sonde wurde
jedoch auf Grund der Grenzwertüberschreitung aus der Glasschmelzwanne gezogen und
umfassend bewertet (**Abbildung 75**).



Abbildung 75: Bewertung von Sondenkühlmodul und elektronischem Bildübertragungssystem nach Industrieinsatz an der Glasschmelzwanne

Die Bewertung brachte folgende Ergebnisse:

1. Am „Innenleben“ (elektronisches Bildübertragungs- und Detektorsystem) waren keinerlei Schäden sichtbar, die Funktionsproben ergaben die vollständige Funktionalität des UV-Analysesystems.
2. Die beiden UG11-Gläser zeigten Risse und das UG11-Glas für Blickrichtung 90° zeigte zusätzlich leichte Deformationen.
3. Die beiden UG11-Gläser wurden ersetzt.

Zur Klärung der Risse an den UG11-Wärmeschutzgläsern erfolgten bei der FSt. DBI weitere Simulationen mithilfe der FEM-Software COMSOL-Multiphysic 4.1, Gespräche mit dem Glashersteller (Schott AG) und genauere Untersuchungen der Rissverläufe bei den UG11-Gläsern. Danach ergeben sich folgende Ursachen für die Schädigungen:

1. Die Rissverläufe deuten auf Spannungsrisse hin, die sich bei ungleichmäßiger Erwärmung der UG11-Gläser ergeben (Temperaturgradient von der heißeren Mitte zum kühleren Rand).
2. Das Temperaturniveau an den UG11-Wärmeschutzgläsern ist mit > 300 °C bei den extremen Beanspruchungsbedingungen der Glasschmelzwanne zu hoch.

Durch entsprechende Maßnahmen (Änderung Strömung UG11-Gläsern u. a.) müssen die genannten Schädigungsursachen beseitigt werden. Im Zusammenhang mit Berechnungen (FEM-Software COMSOL-Multiphysic 4.1) zur Strömung und Wärmebelastung erfolgten an den UG11-Wärmeschutzgläsern folgende Änderungen:

1. Veränderung der Anströmung von Vorder- und Rückseite der Gläser,
2. Auswahl und Bestellung von UG11-Wärmeschutzgläsern der Stärke 2 mm (bisher 1 mm),
3. Schaffung einer Möglichkeit zur Konzentration des Spülgasstromes auf das zur Visualisierung eingesetzte Sondenauge.

Es wird an dieser Stelle darauf verwiesen, dass es unter weniger extremen thermischen Beanspruchungsbedingungen, wie sie z. B. beim Industriekessel mit Feuerraumtemperaturen bis 1300 °C (vgl. Pkt. 4.5.2) vorhanden sind, keinerlei thermische Probleme im Bereich der Sondenaugen/UG11-Wärmeschutzgläser gab, selbst dann nicht, als sich die Sondenaugen (Geradeaus- und Winkelblick) direkt in der Flamme des Erdgasbrenners befanden.

Zwei weitere Industrieerprobungen erfolgten bei der Fa. Telux-Spezialglas GmbH, Weißwasser. Die **Abbildung 76** zeigt die Sonde unmittelbar vor Einbau in die Schmelzwanne.



Abbildung 76: Industrieerprobung bei der Fa. Telux-Spezialglas GmbH

Die thermischen Beanspruchungsbedingungen waren entsprechend **Abbildung 72** und **Abbildung 76** in der Schmelzwanne der Fa. Telux noch höher als in der Schmelzwanne der Fa. Ritzenhoff. Die **Abbildung 77** zeigt den Steuerungs- und Visualisierungs-PC während des Industrieinsatzes an der Glasschmelzwanne.



Abbildung 77: Industrieerprobung bei der Fa. Telux-Spezialglas GmbH, Steuerungs- und Visualisierungs-PC sowie T-Überwachung im Sondeninneren, Bereich UG11-Wärmeschutz

Die **Abbildung 78 und Abbildung 79** zeigen ausgewählte Ergebnisse der Industrieprobungen an der Glasschmelzwanne der Telux-Spezialglas GmbH.

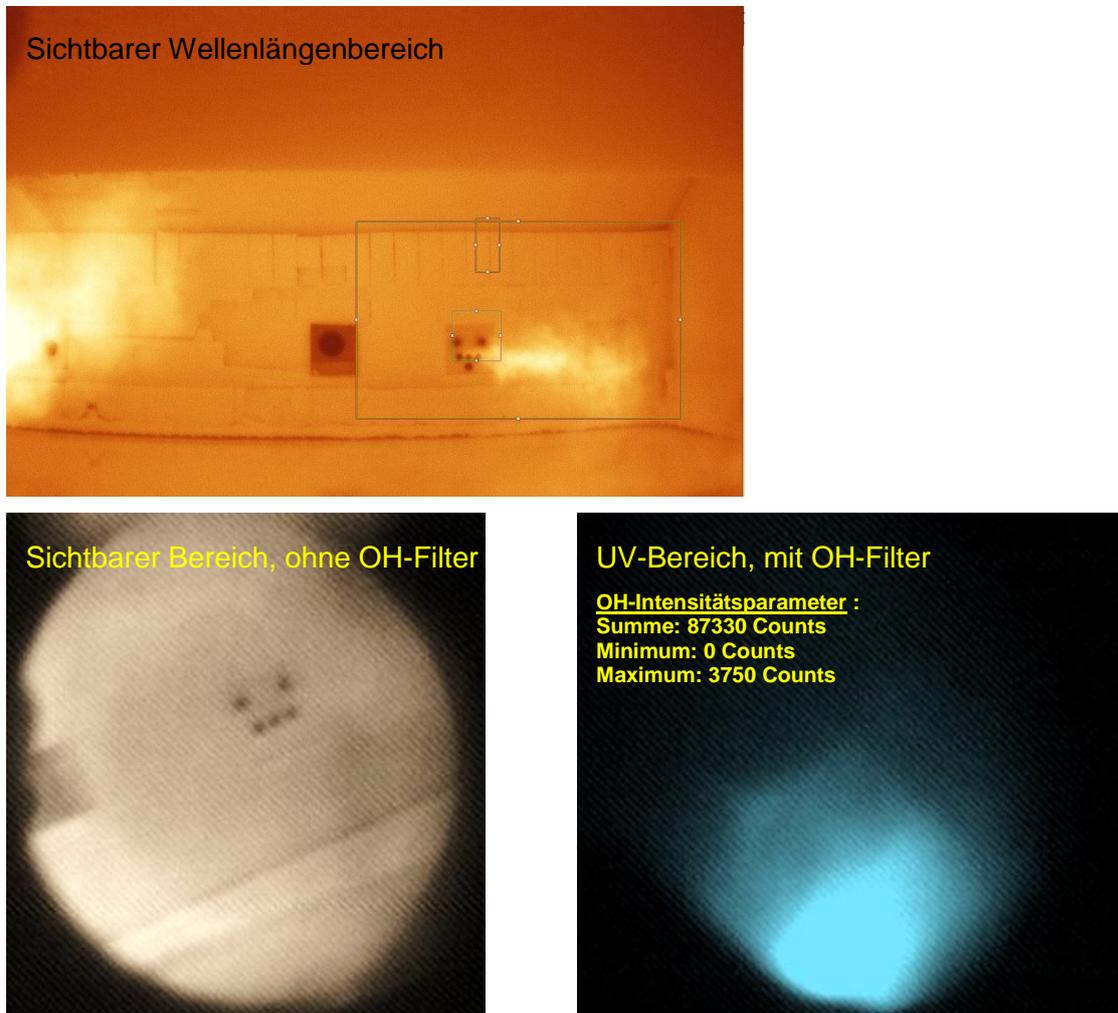


Abbildung 78: Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme bei Blickrichtung 0° (Geradausblick)

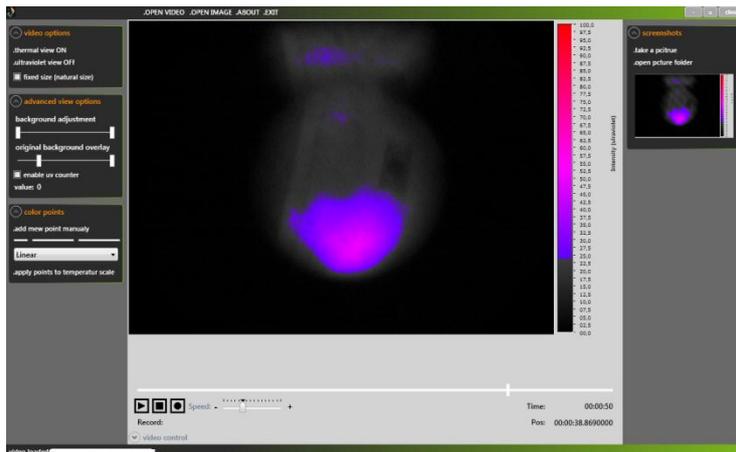


Abbildung 79: Qualitative und quantitative Bestimmung der OH-Radikalverteilung in der Flamme bei Blickrichtung 0° (Geradausblick)

Die Erprobung an der Glasschmelzwanne der Fa. Telux-Spezialgas GmbH brachte unter höchsten thermischen Beanspruchungsbedingungen folgende Ergebnisse:

1. Die UV-Visualisierung in der Schmelzwanne war für die Blickrichtung 0° erfolgreich, für die Blickrichtung 90° nur teilweise (Glasbeschädigung, s.u.).
2. Die gemessenen Temperaturen im Sondenaugenbereich bei Blickrichtung 0° (in der Sonde, hinter den UG11-Wärmeschutzgläsern, $27,7^\circ\text{C}$, vgl. **Abbildung 77**) und die Wasserrücklauftemperaturen (max. 30°C) waren trotz höherer thermischer Beanspruchungsbedingungen gegenüber der GW Ritzenhoff über den Visualisierungszeitraum im absolut grünen Bereich.
3. Am „Innenleben“ (elektronisches Bildübertragungs- und Detektorsystem) waren ebenfalls keinerlei Schäden sichtbar, die Funktionsproben ergaben die vollständige Funktionalität des UV-Analysesystems (**Abbildung 80**).
4. Die o.g. Maßnahmen zur Anpassung der Strömungsbedingungen im Bereich des 90° -UG11-Wärmeschutzglases an die hohen thermischen Beanspruchungsbedingungen brachten positive Ergebnisse, konnte jedoch Temperaturen $> 60^\circ\text{C}$ hinter dem UG11-Glas bei 90° -Winkelblick und auch die Rissbildung im Glas nicht verhindern. Hier sind bei der Überführung des entwickelten Funktionsmuster in ein Industriesystem bei Einsatz in Glasschmelzwannen noch Nachbesserungen notwendig.



Abbildung 80: Systemüberprüfungen nach Durchführung der Industrietests an der Glasschmelzwanne

Die Zielstellung im Arbeitspaket 5 „Erprobungen der Sonde“ wurde erreicht. Die Einsatztauglichkeit des entwickelten UV-Systems konnte auch unter harten Industriebedingungen nachgewiesen werden.

4.5.4 Arbeitsschritt 5.4: Abschlussbewertung (DBI, GWI, ITO)

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse erfolgte von allen 3 Forschungsstellen eine Bewertung des entwickelten Gesamtsystems. Diesbezüglich sind folgende Aspekte zu nennen:

1. Durch eine sehr gute fachliche Zusammenarbeit der 3 Forschungsstellen und durch die vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen auf dem Fachgebiet ist es gelungen, ein kompaktes, komplett fernbedienbares und kostengünstiges optisches minimal-invasives Analysesystem für die UV-Flammenanalyse in industriellen Thermoprozessanlagen zu entwickeln.
2. Durch diese Entwicklung wurde ein neuer Stand der Technik auf dem Fachgebiet erreicht. Das wurde u. a. durch die Mitglieder der Projektbegleitgruppe zur Systempräsentation am 24.02.2012 beim GWI in Essen bestätigt (vgl. Protokoll).
3. Im Vergleich mit dem FLORIAN-System und auch mit einem UV-Laborkamerasystem (Stand Projektstart) wird mit dem entwickelten UV-Analysesystem eine neue Bildqualität bei der Detektierung der OH-Verbrennungsradikale bzgl. Lichtstärke, Kontrast, Rauschen, Schärfe (50 cm bis unendlich), Gesichtsfeld und Blickrichtung (0 – 90°, d. h. Geradeaus- und Winkelblick) erreicht. Sehr wesentlich ist, dass das sehr schwache Eigenleuchten der OH-Verbrennungsradikale bei 306,4 nm durch das leistungsfähige Detektorsystem ruckelfrei in Echtzeit detektierbar ist. Bereits bei einer Kurzzeitbelichtung von 25 ms (**Abbildung 67**) ergeben sich bei gleicher Leistung des Restlichtverstärkers Intensitäten wie bei einer Belichtungszeit von 100 ms mit dem UV-Laborkamerasystem.
4. Fehler bei der Detektierung der OH-Verbrennungsradikale (Intensitäten, Geometrien) sind durch das optische Bestimmungsverfahren möglich. Insbesondere die Ofenraumatmosfera und die konkreten Strahlungsbedingungen können zu Fehlern führen. Falls sehr genaue Absolut-Messungen benötigt werden, bei vielen Industrieprozessen sind relative Vergleichsmessungen ausreichend, empfehlen sich z. B. stichpunktartige Vergleichsmessungen zur Erfassung von Ausbrandgrenzen mit wassergekühlten CO-Absaugsonden.
5. Die Einsatzfähigkeit unter Industriebedingungen ist gegeben. Bei extremen thermischen Beanspruchungen (Glasschmelzwannen) kann es ohne Einschränkung der Funktionalität im Bereich des 90°-UG11-Wärmeschutzfilters zu thermischen Überlastungen kommen, die Rissbildungen in den Gläsern zur Folge haben können. Diesbezüglich muss im Hinblick auf die Überführung des Funktionsmusters in ein Industriesystem noch nachgebessert werden.

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte gemäß des von den Gutachtern befürworteten Projektablaufplanes. Die Zielstellung des Vorhabens wurde erreicht.

5 Gegenüberstellung der Zielsetzung mit den erreichten Ergebnissen

Unter Pkt. 4 werden die in den geplanten 5 Arbeitspaketen mit insgesamt 15 Arbeitsschritten erreichten Einzelergebnisse umfassend dargestellt. Die Bearbeitung entsprach dabei vollständig dem Arbeitsplan der genehmigten Vorhabensbeschreibung. Für jedes einzelne Arbeitspaket konnte festgestellt werden, dass mit den Ergebnissen die Einzelzielsetzungen erreicht wurden. Somit wurde auch die Gesamtzielsetzung und die Innovation gemäß Pkt. 3 erreicht.

Zur Erreichung der Zielsetzung waren auf Basis des von den Gutachtern bestätigten Lösungswegs (vgl. Langfassung und Kurzfassung des Forschungsantrages sowie **Tabelle 1**) folgende Arbeiten erfolgreich durchgeführt worden:

Arbeitspaket 1 (Pkt. 4.1): Konzeptentwicklung des Gesamtsystems mit den 2 Arbeitsschritten Definition der Anforderungskriterien für das Gesamtsystem sowie Erstellung des optischen Grobkonzeptes.

Ergebnis: Die Konzeptentwicklung für das Gesamtsystem unter Einbeziehung der Anforderungskriterien und in Abstimmung mit dem PbA als Basis für die folgenden Arbeitspakete 2 - 5 ist erfolgt.

Arbeitspaket 2 (Pkt. 4.2): Entwicklung der optischen Komponenten mit den 4 Arbeitsschritten Detaillierte Auslegung, Design und Simulationen zu den Weitwinkelobjektiven und den verschiedenen Bildübertragungssystemen, Entwicklung des Lichteintrittssystems, Entwicklung des Detektorsystems sowie Bau und Erprobung des optischen Gesamtsystems.

Ergebnis: Das wesentliche Ergebnis ist, dass die optischen Komponenten für die UV-Winkelsonde konzipiert, festgelegt und bestellt wurden und mit den ausgewählten Optikbauteilen bereits Funktionstests und Testmessungen mit definierten UV-Strahlungsquellen erfolgen konnten.

Arbeitspaket 3 (Pkt. 4.3): Entwicklung einer auf die Miniaturoptik angepassten Hochtemperatursonde mit den 3 Arbeitsschritten, Entwicklung des Sondenkopfes, Entwicklung von gekühltem Sondenkorpus und Medienversorgungssystem sowie Integration der Sonde.

Ergebnis: Das Ziel im Arbeitspaket 3, die Entwicklung einer auf die Miniaturoptik angepassten Hochtemperatursonde aus CrNi-Stahl (Sondenkühlmodul) und die Integration des Sondenkühlmoduls und allen optischen und mechanischen Bauteilen zum Gesamtsystem wurden mit Zeitverzug und erhöhten FuE-Aufwendungen erreicht. Das Gesamtsystem stellt ein fernbedienbares, industrietaugliches, robustes, kompaktes und preisgünstiges bildgebendes UV-Sensorsystem zur UV-Flammenanalyse in industriellen Thermoprozessanlagen mit einer Kombination aus hoher Auflösung und Lichtstärke sowie variabler Blickrichtung dar.

Arbeitspaket 4 (Pkt. 4.4): Entwicklung einer Steuerung und einer Bildverarbeitungssoftware mit den 2 Arbeitsschritten Entwicklung einer Steuerung für die beweglichen Komponenten sowie Entwicklung einer Bildverarbeitungssoftware.

Ergebnis: Es wurde eine komfortable und den rauen Industriebedingungen angepasste Sondensteuerung sowie eine geeignete Bildverarbeitungssoftware entwickelt. Die entwickelte Sondensteuerung ist je nach Einsatzbedingungen und Aufgabenstellung über den

Spezial-Industrie-PC oder über ein Bedienpult möglich. Die Sonde wird darüber komplett ferngesteuert.

Arbeitspaket 5 (Pkt. 4.5): Erprobung der Sonde mit den 4 Arbeitsschritten Funktionsprobe des Gesamtsystems unter Laborbedingungen, Heißerprobungen im Technikum, Erprobungen an Industrieofenanlagen sowie Abschlussbewertung.

Ergebnis: Die Einsatztauglichkeit des entwickelten UV-Systems konnte unter Laborbedingungen, im Technikum und unter harten Industriebedingungen nachgewiesen werden. Die Erprobungen waren wesentlich umfassender als geplant. Das wird sich positiv auf die Überführung der erreichten Entwicklung in die Praxis auswirken.

Die hohe Komplexität und wissenschaftliche Spezifik der FuE-Arbeiten erforderten einen höheren Aufwand an Forschungspersonal als im Antrag spezifiziert. Das wissenschaftlich-technische Ziel wurde gegenüber dem Antrag nicht verändert, konnte aber nur mit erhöhtem personellem Aufwand erreicht werden. Gleichzeitig ist es gelungen die Aufwendungen für die erforderlichen Geräte zu senken. Das ist sehr wesentlich für die Überführung der Projektergebnisse in die Industrie.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung des Analysesystems für die UV-Flammendiagnostik führte zu einem neuen Stand der Inspektionstechnik. Entsprechend umfangreich mussten dazu Konzepte entwickelt, geprüft und umgesetzt werden. Alle Stufen erforderten die Verifizierung durch experimentelle Untersuchungen an den Komponenten bzw. am Gesamtsystem. Zum Abschluss fanden Tests in der Praxis in unterschiedlichen Industrieanlagen statt.

Zusätzlich hatten die Projektpartner das Problem, dass fest terminierte Zulieferungen (hier insbesondere der Restlichtverstärker) nicht zu den vertraglich festgelegten Zeitpunkten eintrafen. In der Folge mussten Arbeiten umorganisiert und das Projekt kostenneutral verlängert werden.

Gegenüber der ursprünglichen Konzeption hat es während der Projektbearbeitung wesentliche Änderungen mit der Konsequenz gegeben, den Arbeits- und Finanzierungsplan anpassen zu müssen. Diese Änderungen erfolgten im engen Kontakt zum Erstzuwender und zur AiF und sind letztlich in den Änderungsbescheid vom 21.03.2012 eingeflossen. Somit ergeben sich, wie unten dargestellt, praktisch keine Abweichungen gegenüber dem Finanzierungsplan.

Tabelle 2: Personalausgaben, Geräteausgaben, Leistungen Dritter

Position	DBI-GTI		GWI		ITO	
	EFZ 1	Verw.nachw.	EFZ 2	Verw.nachw.	EFZ 3	Verw.nachw.
A. Personalausgaben						
A.1	155.250,00 €	157.314,82 €	107.620,00 €	107.636,11 €	57.850,00 €	58.365,42 €
A.2	31.050,00 €	31.371,34 €	21.770,00 €	21.766,41 €	0,00 €	0,00 €
A.3	2.410,00 €	602,00 €	8.950,00 €	8.953,05 €	0,00 €	0,00 €
A.4 Pauschale	9.940,00 €	9.940,00 €	9.660,00 €	9.660,00 €	4.030,00 €	4.030,00 €
Summe Personalausgaben	198.650,00 €	199.228,16 €	148.000,00 €	148.015,57 €		62.395,42 €
B. Ausgaben f. Geräte						
Spezialkammersystem	21.630,00 €	21.633,01 €				
Steuerrechner	5.890,00 €	5.896,45 €				
Optische Sonde	15.940,00 €	17.307,22 €				
Restlichtverstärker	9.040,00 €	9.044,00 €				
Summe Geräteausgaben	52.500,00 €	53.880,68 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
D. Pauschale f. Sonst. Ausgaben	44.000,00 €	44.000,00 €	29.500,00 €	29.484,43 €	12.270,00 €	12.270,00 €
Summe beantr.Zuwendg/Ausgaben	295.150,00 €	297.108,84 €	177.500,00 €	177.500,00 €	74.150,00 €	74.665,42 €

7 Auswirkungen der erzielten Ergebnisse auf den wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Fortschritt, insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

7.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die angestrebten Forschungsergebnisse sind den folgenden Wirtschaftszweigen bzw. Fachgebieten zuzuordnen:

Wirtschaftszweige: Chemische Industrie, Glasindustrie, Keramik-Industrie, Kraftwerkstechnik, Metallurgie, Metallerzeugung, Erbringung von Dienstleistungen

Fachgebiete: Verfahrenstechnik, Produktion, Mikrosystemtechnik

7.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Mit dem entwickelten industrietauglichen, optischen, Minimal-Invasiven Analysesystem für die UV-Flammendiagnose in Thermoprozessanlagen können gemäß der Projektplanung umfassende Bewertungen und Analysen von Erdgasflammen in Thermoprozessanlagen erfolgen. OH-Intensitäten und daraus abgeleitete Flammentemperaturen und Schadstoffbildungen sowie Flammgeometrie, Flammenlage und Flammenausbrand können somit durch das entwickelte UV-Analysesystem im Hinblick auf die Optimierung des Thermoprozesses qualitativ und quantitativ dargestellt werden.

Das entwickelte UV-Sensorsystem kann sowohl als integrierter Bestandteil der Betriebsführung durch den Betreiber als auch als eine externe Dienstleistung durch Dritte praktiziert werden. Somit werden auf dem Markt drei Gruppen angesprochen: Gerätehersteller, Dienstleister und Endnutzer.

- Hersteller des Gerätesystems: Umsatzerhöhung, Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen, Erhöhung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit
- Anbieter der Dienstleistung: Gleiche Effekte
- Anlagenbetreiber: Prozessoptimierung (Erhöhung der Effizienz, Energie- und Kosteneinsparung, Senkung der Stillstandszeiten), Emissionsreduzierung, Erhöhung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit

Hervorzuheben ist der große Beitrag des entwickelten Analysesystems zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit für die Anlagenbetreiber der Thermoprozessanla-

gen. Das zeigte sich bereits bei den während der Projektlaufzeit erfolgten Industrieerprobungen (vgl. Pkt. 4.5). Durch die mögliche Visualisierung und Optimierung des Verbrennungsprozesses, z. B. durch Korrekturen bei den Flammentemperaturen, der Schadstoffbildung und dem Flammenausbrand (s. o.), kann die Effizienz des Verbrennungsprozesses wesentlich erhöht werden. Damit sind Kostenreduktionen sowie Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU möglich.

Auch eine Senkung des Materialverschleißes (z. B. Verdampferrohre im Kraftwerksbereich) durch Korrekturen an der Flammenlage und am Flammenausbrand mit einer dadurch möglichen Verhinderung von Hochtemperaturkorrosion an Stahlbauteilen sowie Feuerfestmaterialien helfen Kosten zu sparen und die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU zu erhöhen.

8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen und Beitrag zum Wissenstransfer

Gemeinsam mit dem vorliegenden Bericht wird auch der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft eingereicht (s. Anlage). Dieser Plan existierte bei der Antragstellung noch nicht und ist auch nicht Teil des Weiterleitungsvertrages. Er wurde im abgelaufenen Berichtszeitraum gemeinsam von den 3 Forschungsstellen entsprechend den Richtlinien der AiF erarbeitet.

Entsprechend dem Plan zum Ergebnistransfer wurden Arbeitsstand und Zwischenergebnisse in den 4 Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (27.05.2009, 02.12.2009, 13.07.2010, 24.02.2012) präsentiert und diskutiert. Diverse technische Anregungen der Partner (z. B. Außendurchmesser und Arbeitslänge der Sensorik, optische Parameter für die Flammvisualisierung) wurden akzeptiert und in die Aufgabenstellung übernommen. Hinsichtlich des Plans zum Ergebnistransfer wurde von allen Mitgliedern des PbA gefordert, zu einem möglichst frühen Zeitpunkt eine Preiskalkulation für das auf den Markt zu transferierende System zu erstellen. In den Preis sollen Einzelpreise der Komponenten, Montage der Komponenten zum System, Installation des Systems an der Thermoprozessanlage und Wartung als Einzelpreise einfließen. Die Kalkulation ist unerlässlich für eine Einschätzung der Transferchancen als Teil der Dissemination. Die Institute übernahmen diese Forderung aus der Praxis. Eine erste grobe Preiskalkulation lag bereits im Projektmonat 24 vor.

Die Zwischenergebnisse wurden auch der Forschungsvereinigung DVGW e. V. präsentiert. Gemeinsam mit dem DVGW wurde fixiert, Ergebnisse in den DVGW-Mitteilungen 2012 zu präsentieren. Ergebnisse des FuE-Vorhabens wurden im Tätigkeitsbericht der FSt. 2 im 1. Heft 2010, 2011 und 2012 der GASWÄRME International veröffentlicht. Weiterhin wurden Projektergebnisse auf der glasstec 2010 sowie auf der GAT 2011 vorgestellt. Eine weitere Veröffentlichung erfolgte auf der Jahrestagung der DGaO (Deutsche Gesellschaft für Angewandte Optik) vom 29.05. - 02.06. 2012 in Eindhoven (Niederlande) mit einem Poster „A minimal invasive visualization system for industrial combustion chambers at 310 nm“ von allen 3 FSt. ITO, GWI und DBI. Eine umfassende Präsentation der erreichten Ergebnisse ist auf der glasstec 2012 (23. - 26.10.2012, Düsseldorf) auf dem DGG-Gemeinschaftsstand von FSt. DBI geplant. Das entwickelte Optische, Minimal - Invasive Analysesystem für die UV-Flammen-Diagnose in Thermoprozessanlagen wird anhand von Postern, Flyern und gegenständlich dargestellt. Dabei wird die Funktionalität mit einer UV-Quelle anhand des entwickelten Prototyps demonstriert.

Über die Realisierung der weiteren im Plan zum Ergebnistransfer fixierten Transfermaßnahmen wurde durch den PbA anlässlich der Sitzung am 24.02.2012 befunden. Dabei wurden u. a. Veröffentlichungen auf Messen und in Vorträgen für 2012 angeregt. Ein Vortrag zur Thematik wurde am 21.03.2012 zum 21. FOGI-Seminar „Feuerfest-Materialien und deren Anwendung im Industrieofenbau“, Ort Duisburg, von der FSt. DBI gehalten.

Zum Fokus „industrielle Umsetzung“ ist zu sagen, dass der Partner TELUX Spezialglas GmbH (Mitglied im PbA) bei Erfolg des Projektes stark am Einsatz eines Systems an seiner Glaswanne interessiert ist. Er sieht damit die Möglichkeit, eines seiner gravierenden Probleme im Produktionsprozess zu lösen (Einfluss von nicht angekündigten Schwankungen der Gasbeschaffenheit auf Prozess und Produkt).

Die Aufstellung der potentiellen künftigen Nutzer (zunächst Zielgruppe 1 lt. Plan zum Ergebnistransfer) wurde begonnen. Sie wird 2012 im Rahmen einer Praktikumsarbeit fortgesetzt.

In Anbetracht der o. g. Aktivitäten kann konstatiert werden, dass der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft als wichtiges Instrument der Erfolgskontrolle genutzt wird und im Berichtszeitraum anteilig erfüllt wurde.

Eine tabellarische Zusammenstellung über den Transfer der Ergebnisse des Forschungsprojektes und die erfolgten Veröffentlichungen wird in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3: Tabellarische Zusammenstellung über den Transfer der Ergebnisse

Tabellarische Zusammenstellung über den Transfer der Ergebnisse des Forschungsvorhabens in die Wirtschaft

Ergebnistransfer durch	Art des Transfers	Ort	Datum
PbA-Sitzung	Präsentation FST, Diskussion Lösungsweg, Abstimmung Arbeiten	Freiberg	27.05.2009
PbA-Sitzung	Präsentation Lösungsvorschläge, Festlegung Vorzugsvariante	Dresden	02.12.2009
PbA-Sitzung	Präsentation Arbeitsergebnisse, Festlegung weiterer Arbeiten	Stuttgart	13.07.2010
Messestand	25. Deutscher Flammentag Verbrennung und Feuerung	Karlsruhe	14./15.09.2011
Messestand	43. Kraftwerkstechnisches Kolloquium	Dresden	18./19.10.2011
MV FIRE e.V.	Präsentation UV-Analysesystem für Einsatz in der Hüttenindustrie	Freiberg	29.02.2012
PbA-Sitzung	Präsentation Funktionsmuster , Abst. Restarbeiten	Essen	24.02.2012
Demonstration Industrie	Einsatz UV-Analysesystem bei Ritzenhoff	Marsberg	15.05.2012
Demonstration Industrie	Einsatz des UV-Analysesystems bei TELUX	Weißwasser	30.05.2012
Demonstration Industrie	Einsatz des UV-Analysesystems bei TELUX	Weißwasser	09.08.2012
Veröffentlichung	GASWÄRME International , Heft 1, 2010, 2011, 2012, Tätigkeitsbericht FSt. GWI	Essen	2010-2012
Messestand	glasstec 2010, Demonstration Muster der UV-Sonde	Düsseldorf	23.-26.10.2010
Messestand	Gasfachliche Aussprechtagung GAT, Flyert und Poster	Hamburg	25.26.10.2011
Vortrag	AICHELIN - Instandhaltungsforum, Einsatz optischer Systeme Zustandsinspektion von Ofenanlagen	Ludwigsburg	15.11.2011
Vortrag	21. FOGI-Seminar „Feuerfest-Materialien und deren Anwendung im Industrieofenbau“	Duisburg	21.03.2012
Vortrag	63. Berg- und Hüttenmännischer Tag	Freiberg	13.-15.06.2012
Poster	Jahrestagung der DGaO (Deutsche Gesellschaft für Angewandte Optik) , Poster	Eindhofen,N	29.05.-02.06.2012
Veröffentlichung	Online-Proceedings der DGaO, http://www.dgao-proceedings.de/abstract/abstract_only.php?id=1412	Online	2012
Industrieinsatz	Glawanne TELUX , Flammenbewertung aller Brenner	Weißwasser	19.09.2012
Messestand	glasstec 2012, Poster, Flyer, Demonstration Prototyp	Düsseldorf	23.-26.10.2012
Messestand	44. Kraftwerkstechnisches Kolloquium	Dresden	23./24.10.2012
Poster	Jahrestagung Deutsche Glastechnische Gesellschaft e.V.	n.n.	Mai 2013
Poster	26. Deutscher Flammentag	Duisburg	18./19.2013
Veröffentlichung	gaswärme international	Essen	2013

9 Schutzrechte

Während der Projektlaufzeit erfolgten keine Schutzrechtsanmeldungen

10 Einschätzung Realisierbarkeit Transferkonzept

Aus folgenden Gründen wird eingeschätzt, dass der in der Anlage enthaltende Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft realisierbar ist:

- Die zahlreichen durchgeführten und geplanten Veröffentlichungen (s. o.) zu den Projektergebnissen platzieren die Entwicklung bereits beim potentiellen Anwenderkreis.
- Während der Projektlaufzeit erfolgten 4 Meetings mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Dem Ausschuss gehören u. a. Betreiber von industriellen Thermoprossanlagen an (z. B. Fa. Ritzenhoff, Fa. Telux, Fa. LOI Thermprocess GmbH), für die das entwickelte UV-Analysesystem zur Optimierung des Verbrennungsprozesses gedacht ist. Erste Teilergebnisse waren somit dem anvisierten Anwenderkreis schon während der Projektlaufzeit zugänglich.
- Es konnten während der Projektlaufzeit umfassende Tests im Technikum sowie 3 erfolgreiche Industrieversuche mit dem entwickelten UV-Analysesystem an Glaschmelzwannen durchgeführt werden. Dabei waren ebenfalls Mitglieder des projektbegleitenden Ausschuss anwesend, die sich von der Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems und den Möglichkeiten zur Erhöhung der Effizienz des Thermoprosses überzeugt haben.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Gröschel, L., Schäfer, F., Werschy, M., Klotsche, U., Krause, K.-H. Patent Nr. 44 38 229 „Einrichtung zur Videodiagnostik von Druckvergasungsreaktoren“. Tag der Anmeldung: 26.10.94. Erteilung: 05.09.96.
- [2] Werschy, M., Gröschel, L.: „Videodiagnostik zur Begutachtung von Feuer- und Reaktionsräumen unter extremsten Bedingungen für Anlagen der thermischen Abfallverwertung“. Vortrag und Posterbeitrag zur Ausstellung Energie und Umwelt, 13. 03.1996 TU Bergakademie Freiberg.
- [3] Werschy, M.: „Videodiagnostik und optische Temperaturmessung mittels Drucksonden für extremste Feuerraumbedingungen“. Vortrag 2. Workshop „Stahltechnologie, Eisenwerkstoffe und Recycling“ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Eisen- und Stahltechnologie 21. und 22. Februar 1997.
- [4] Lawrenz, M.: „Beitrag zur Weiterentwicklung einer Videotechnik zur Begutachtung von Feuer- und Reaktionsräumen unter vollen Betriebsbedingungen für Anlagen der thermischen Abfallverwertung in Deutschland“. Dipl.-Arbeit 1994 mit Literatur- und Patentrecherche zur Thematik. Fachhochschule Lausitz, Studiengang Maschinenbau.
- [5] Gierend, Chr.: „Feuerungsregelung durch Fuzzy Control“. VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), H. 6 S. 487-497.
- [6] Hentschel, H.: „Einsatz von Lasern in der Motormesstechnik und zur Visualisierung von Strömungen.“ VDI-Berichte Nr. 617 (1986) 347-376.
- [7] Hentschel, W., Holdorf, D.: Saugrohr-Video. (interner Bericht), Wolfsburg 1994.
- [8] Combustion TEC, INC., USA, Information: „Furnace Monitor“ CTI Bulletin 91-4 (8/96) PIEPER GmbH-Serie FRS, Informationsmaterial: „Fernseh-Systeme für Feuerraumtemperaturen bis zu 2400°C“.
- [9] BASF Ludwigshafen, Informationsmaterial: „Hochtemperatur-Videoperiskop ViPer®“. Stand 1997.
- [10] Informationsmaterial „High Temperature Color Camera System“ FIREYE, Inc. 3 Manchester Road, Derry, NH 03038 USA. 1997.
- [11] Werschy, M., Gröschel, L. und Krause, K.-H.: Das Sondensystem OPTISOS für Feuerraumbewertungen und Thermographie. GASWÄRME International 46 (1997) Heft 10, Oktober, S. 479-483.
- [12] Informationsmaterial im Internet (www.sobotta.de/htmlfiles/a3-de.htm). SOBOTTA GmbH Sondermaschinenbau. Ohlenhohnstraße 27, D-53819 Neunkirchen-Seelscheid.
- [13] Hörotron GmbH: „IBUS Infrarot-Brennraum-Überwachungssystem“. Produktinformation IBUS Ausgabe Juni 1996.
- [14] Hörotron GmbH: Thermografie und Bildverarbeitung - ThermoSystem V 1.3x. Produktinformation 1995.
- [15] PIEPER GmbH: „ASZ 208-Automatische Rückziehvorrichtung in revolutionärer Lineartechnik und mit variabler Sondeneinbautiefe“. Produktinformation 1996.
- [16] FIREYE® ATT Automatisierungstechnik GmbH, Germany: „Series F 640 Water Cooled, Air Purged High Temperature Color Camera System“. Produktinformation März 1997.

- [17] Instal AMC Engineering & FIREYE: „Specification for high temperature color camera system“. Dokumentation April 1997.
- [18] Schracke, F., Baer, M.: UV/IR Flame Signature Scanner basierend auf Fuzzy-Logik mit graphischer Bewertung von Öl-, Gas- und Kohleflammen“. GASWÄRME International 46(1997) H. 11, S. 539-542.
- [19] Busch, M., Rampp, F., Martin, J., Horn, J.: „Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur Verbesserung des Verbrennungs-, Ausbrand- und Emissionsverhaltens einer Abfallverbrennungsanlage“. VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 7, S. 614-618.
- [20] Walter, M., Kremer, H., Schäfers, W., Limper, K.: „Bestimmung und Auswertung der Temperaturverteilung von Verbrennungsgut auf dem Verbrennungsrost von Müllverbrennungsanlagen“. VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 1, S. 37-45.
- [21] Becker, E., Keuchel, U., Pump, S.: „Neue Optimierung der Feuerleistungsregelung“. Abfallwirtschafts Journal 7 (1995), Nr. 11, S. 678-682.
- [22] Jaeschke, A., Keller, H. B.: „Innovative Prozeßleittechnik in der thermischen Abfallbehandlung“. Einsatz von wissensbasierten Systemen, Fuzzy Reglern und neuronalen Netzen. E & I, 111. Jg. (1994), H. 9, S. 463-469, ÖVE Springer Wien.
- [23] Wintrich, F.: Flammenbeobachtungsgerät. Patentschrift DE 196 49 264 A1, Offenlegungstag 10. Juni 1998.
- [24] Schröder, H. Chr.; Stutz, M., TÜV Süddeutschland Mannheim: „Vergleich von On-line-Systemen zur Feuerungsüberwachung und -optimierung“ 02/2001.
- [25] ORFEUS Combustion Engineering: „ORFEUS Video“. ORFEUS Combustion Engineering GmbH, Ratingen, 11/00.
- [26] Werschy, M., Flammiger T.: World Gas Conference, Nice Juni 6th-9th 2000, Poster P-719 „High-temperature gas-furnace and process control by means of the optical probe system OPTISOS“.
- [27] Werschy, M.: Hochtemperatur-Ofenrauminspektion mit dem optischen SONDENSYSTEM OPTISOS[®]. Poster P14 XXXII. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 24./25. Oktober 2000 in Dresden.
- [28] Scherello, A., Werschy, M., Kühne, W., Flamme, M.: „Fortschrittliches Flammendiagnostiksystem zur Beobachtung von Flammen im UV-Bereich unter industriellen Einsatzbedingungen“. Vortrag auf der 75. Glastechnischen Tagung in Wernigerode vom 21. Bis 23. Mai 2001.
- [29] Flamme, M., Scherello, A., Werschy, M., Kühne, W.: „FLORIAN-UV-Kamera-system zur Flammenbeobachtung unter industriellen Einsatzbedingungen“. Energie Wasser Praxis 52 (2001) 7/8, S. 21.
- [30] Hemman, P. und Hemmann, G.: „Rechnergestützte Ofenbildauswertung als Grundlage optimierter Prozessführung“. Tagungsband zur 75. Glastechnischen Tagung. S. 32 – 37, 2001.
- [31] Walter, M.: „Untersuchung von Verfahren zur kontinuierlichen Analyse der Müllverbrennung in Rostfeuerungen mit Hilfe der Infrarotthermographie“. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1996.
- [32] Walter, M.; Kremer, H.; Schäfers, W.; Limper, K.: Bestimmung und Auswertung der Temperaturverteilung von Verbrennungsgut auf dem Verbrennungsrost von Müllverbrennungsanlagen. VGB-Kraftwerkstechnik, Heft 1, S. 377 – 45, 1996.

- [33] Wintrich, F., Mindermann, K. H.: Einsatz von Pyrodetektoren als Steuerungshilfen für Feuerungsanlagen am Beispiel des MHKW Essen-Karnap, in: Rostfeuerungen zur Abfallverbrennung, Hrsg.: Reimann, D. O., EF-Verlag, Berlin, S. 567 – 584, 1991.
- [34] Werschy, M., Schäfer T.: „Visualisierung des bautechnischen Zustandes und der Temperaturfelder im Verbrennungsraum von Glasschmelzöfen“ GASWÄRME International 49(2000) H. 11, S., 567.
- [35] GWI e. V. Essen, DBI - GTI gGmbH Freiberg: Schlussbericht COMBITHERM „Computergestützte Bilddatenauswertung der Flammvisualisierung im ultravioletten Spektralbereich zur Beurteilung, Steuerung und Regelung industrieller Thermoprozesse“ (COMBITHERM). 31.10.2004
- [36] DBI GUT GmbH und DBI - GTI gGmbH im Profil. GASWÄRME International 56 1(2007), S. 51-55
- [37] Wallner-T.; Ciatti-S.-A.; Bihari-B.; Stockhausen-W.-F.; Boyer-B.: Endoskopische Untersuchungen an einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor. VKM-THD, Mitteilungen des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz Band 88 (2006) Seite 107-117, Graz: TU Graz.
- [38] Han-Kyung-Man; Velji, A.; Spicher, U: 3D-Lichtleitermesstechnik zur räumlichen Flammenanalyse in Verbrennungsmotoren. Motortechnische Zeitschrift Band 68 (2007) Heft 4, Seite 294-301.
- [39] Reichle, R., Pruss, C., Osten, W., Tiziani, H.-J., Zimmermann, F., Schulz, C.: Hybrid excitation and imaging optics for minimal invasive multiple-band UV-LIF-measurements in engines. VDI-Berichte Band 1959 (2006) Seite 223-235, Düsseldorf VDI-Verlag.
- [40] Alt, M., Eberle, F., Schaffner, P., Quarg, J.: Weiterentwicklung der Visualisierungsmethodik am Beispiel eines Mehrzylinderdieselmotors mit Benzindirektspritzung. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, 6. International Symposium on Internal Combustion Diagnostics, 6 (2003) Seite 251-262.
- [41] Geisler, F.: Endoskopische Klopfanalyse an Serienmotoren. Haus der Technik Fachbuch Band 31 (2003) Seite 112-122, Renningen-Malmsheim: Expert Verlag.
- [42] Vincent, L.: Endoskopie heute. NDT Tools of Tomorrow, Canadian Society for Nondestructive Testing. 1995 (1995) Seite 341-350, Mississauga: CSNDT.
- [43] Lorenz, P.-G.: Fiberscopes and videoimagescopes inspect internal cavities. Die Casting Engineer Band 36 (1992) Heft 2 Seite 18.
- [44] Bala, J.-L.: Multi-spectral Imaging endoscope system. Veröffentlichungsnummer: US2007038117, Veröffentlichungsdatum: 15.02.2007.
- [45] Elfert, B., Schoelly, W.: Special endoscope for visually testing for cracks. Veröffentlichungsnummer: US4628207, Veröffentlichungsdatum: 09.12.1986.
- [46] Nichols, P.-J., Kemp, B.: Monitoring of the presence of a Flame in a burner. Veröffentlichungsnummer: CA2295458, Veröffentlichungsdatum 20.07.2000.
- [47] Electrowatt tech innovat Corp (CH). Circuit for flame monitoring. Veröffentlichungsnummer: EP0908679, Veröffentlichungsdatum: 14.04.1999.
- [48] Spectus LTD (GB). Flame monitor combining UV sensor with IR flicker detector. Veröffentlichungsnummer: GB228094, Veröffentlichungsdatum: 26.04.1995.
- [49] Reichle, R., Pruss, C. u. a.: „UV-Endoskop mit diffraktiver Aberrationskorrektur für die Motorenentwicklung“, Proc. DgaO 2006

- [50] Schulz, C., Sick, V.: „Tracer-LIF Diagnostics: Quantitative Measurement of fuel concentration, temperature and air/fuel ratio in practical combustion situations“. Prog Energy Combust Sci 31, 75-121 (2005)
- [51] Reichle, R., Pruss, C. u. a.: „Fiber optic spark plug sensor for UV-LIF measurements close to the ignition spark“. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering vol. 5856, 158-168 (2005).
- [52] 1. Zwischenbericht Projekt IGF 15890 BG/1, Zeitraum 01.04.2009 bis 31.12.2009 vom 26.02.2010
- [53] 2. Zwischenbericht Projekt IGF 15890 BG/1, Zeitraum 01.01.2010 bis 31.12.2010 vom 08.03.2011
- [54] 3. Zwischenbericht Projekt IGF 15890 BG/1, Zeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2011 vom 08.03.2012
- [55] Datenbank-Recherche in FIZ-Technik (fiz-technik.de). 20.07.2012

Quellenangaben Pkt. 4.2.1

ⁱ Quelle: Specification Sheet „All Silica High OH 0.22 NA Fibers“, www.lasercomponents.com.

ⁱⁱ Quelle: www.ceramoptec.de/optran_huv_hwf.htm

ⁱⁱⁱ Quelle: „MCP IMAGE INTENSIFIERS“, Datenblatt, www.photek.com

Anlage

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft