



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7014

**Anwendung des
INSPECT-Systems zur
kamerabasierten Analyse
von Verbrennungsprozessen
am Beispiel der thermischen
Abfallbehandlung**

**S. Zipser, A. Gommlich, J. Matthes,
Ch. Fouda, H. B. Keller**

Institut für Angewandte Informatik

Februar 2005

Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7014

**Anwendung des INSPECT-Systems zur
kamerabasierten Analyse von
Verbrennungsprozessen am Beispiel der
thermischen Abfallbehandlung**

S. Zipser, A. Gommlich, J. Matthes,
Ch. Fouda, H. B. Keller

Institut für Angewandte Informatik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2004

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-070148

Zusammenfassung:

Bei industriellen Verbrennungsprozessen lassen sich durch den Einsatz innovativer Steuer- und Regelungsverfahren die Schadstoffemissionen reduzieren, die Energieeffizienz und die Anlagenverfügbarkeit steigern sowie die Betriebskosten senken. Diese Verfahren erfordern die detaillierte Kenntnis des lokal unterschiedlichen Verbrennungszustands, der sich mit Hilfe konventioneller Messungen nur unzureichend beschreiben lässt. Neue Möglichkeiten werden hierbei durch den Einsatz von Video- und Infrarotkameras eröffnet. Über eine rechnergestützte Bildauswertung lassen sich Kenngrößen berechnen, die den verteilten Verbrennungszustand beschreiben und zur Optimierung einsetzbar sind.

Am Institut für Angewandte Informatik (IAI) wurden entsprechende Verfahren zur Infrarot- und Videobildauswertung entwickelt und für den Einsatz an Industrie- und Pilotanlagen in das INSPECT-System integriert. Der Bericht beschreibt den Einsatz von Video- und Infrarotkameras zur Beobachtung von Verbrennungen, die Bildauswertung und die INSPECT-Anwendungen zur Online-Auswertung bei Rost- und Drehrohrfeuerungen.

Abstract: Application of the INSPECT-System for a camera-based analysis of combustion processes at the example of the thermal waste treatment

Modern control strategies help to reduce the pollutant emission and to maximize the efficiency of industrial combustion processes. Of special interest are strategies which directly influence the combustion conditions and that way e.g. enable to minimize the pollutant formation. A wide use of this approaches are still prevented because they require a detailed knowledge about the local state of the combustion, which often cannot be derived using conventional measurement techniques. A promising approach is a camera monitoring of the combustion in cooperation with an online image analysis. At the Institut für Angewandte Informatik (IAI) modern procedures for an online analysis of infrared and video images were developed. These procedures were tested and applied at pilot and full-scale grate fired combustion plants and rotary kilns as well using the INSPECT-system developed at the IAI. In this technical report we describe the stage of development with reference to the INSPECT-system, the online image analysis, and the current applications.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ausgangspunkt und Gliederung des Berichts	1
2	Das INSPECT-System	3
2.1	Aufbau und Funktionsweise	3
2.2	Einsatz moderner Methoden der Software-Entwicklung	5
2.3	Übersicht zu den INSPECT-Versionen	6
3	Kamerabasierte Prozessführung	8
3.1	INSPECT als Komponente bei der Prozessführung	8
3.2	Einsatz von Video- und Infrarotkameras	10
3.3	Beschreibung der Infrarotkameras des IAI	12
4	Bildvorverarbeitung und -bewertung	16
4.1	Unterdrückung von Bildstörungen	16
4.2	Bildbeurteilung über statische und dynamische Bildgütemaße	19
5	Infrarot- und Videoanalyse bei Rostfeuerungen	23
5.1	Thermische Abfallbehandlung in Rostfeuerungen	23
5.2	Infrarotbasierte INSPECT-Anwendung bei Rostfeuerungen	27
5.3	Videobasierte INSPECT-Anwendung bei Rostfeuerungen	33
6	Infrarotanalyse bei Drehrohren	36
6.1	Verbrennung im Drehrohr	36
6.2	Infrarotbasierte INSPECT-Anwendung bei Drehrohren	37
7	Zusammenfassung und Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	42

Formelzeichen und Abkürzungen

$A_{BZ,Rel}$	relative Brennzonenfläche
C_δ	Grauwertübergangsmatrix
C	Kohlenstoff
C_nH_m	allg. Kohlenwasserstoff
Cl_2	Chlor
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
F_A	Analysebild
F^B	Binärbild
F_{Diff}	Differenzbild
F_{NP}, F_{NF}	Bild partikelminimiert, flammenminimiert
F_R	Rohbild
g	Grauwert
H_2O	Wasser, Wasserdampf
J_V	Validitätsmaß
J_D, J_S	Bildgütemaß dynamisch, statisch
J_R	Rekonstruktionsgrad
k, K	Abtastschritt (T_A), T_Z
$K_{S,D}, K_{S,S}$	Schwellwert dynamisch, statisch
\dot{M}_B	Brennstoffstrom
$\dot{M}_P, \dot{M}_{P,i}$	Primärluftstrom (gesamt), Primärluftstrom Zone i
\dot{M}_S	Sekundärluftstrom
N, N_{Ges}	Bildanzahl, Bildpunktanzahl Gesamtbild
O_2	Sauerstoff
t	Zeit
T_A	Abtastzeit
T_Z	Zykluszeit
\mathcal{C}	Bildmerkmal Kontrast
\mathcal{E}_f	Bildmerkmal Energie (erste Ordnung)
\mathcal{E}_s	Bildmerkmal Energie (zweite Ordnung)
\mathcal{R}	Bildmerkmal Korrelation
\mathcal{U}	Bildmerkmal Homogenität
λ	Wellenlänge
ϑ	Temperatur in Grad Celsius
τ	Zeitverschiebung
Φ	Winkel

CASE	Computer Aided Software Engineering
CCD	Charge Coupled Devices
GUI	Graphical User Interface
INSPECT	Intelligent and Safe Process Control Tool, Software tool des IAI
IAI	Institut für Angewandte Informatik
ITC-TAB	Institut für Technische Chemie - Bereich Thermische Abfallbehandlung
IKET	Institut für Kern- und Energietechnik
IR	Infrarot
MDA	Model Driven Architecture
MVA	Müllverbrennungsanlage
ODBC	Open Database Connectivity
RGB	Rot, Grün und Blau
TAMARA	Testanlage zur Müllverbrennung mit Abgasreinigung, Rückstands- behandlung und Abwasseraufbereitung; Versuchsanlage des FZ Karlsruhe
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
THERESA	Halbtechnische Anlage zur thermischen Entsorgung Spezieller Abfälle; Versuchsanlage des FZ Karlsruhe
UML	Unified Modelling Language
XML	Extended Modelling Language

1 Einleitung

1.1 Motivation

Verbrennungsprozesse sind meist mit der Emission von Schadstoffen verbunden. Zwar konnte die Schadstoffemission durch

- eine verbesserte Verbrennungstechnologie,
- eine effektivere Abgasreinigung sowie
- einen erhöhten Automatisierungsgrad

bereits deutlich reduziert werden, jedoch ergeben sich aus der zunehmenden Nutzung alternativer Brennstoffe neue Herausforderungen. Bislang dominiert ein enges Spektrum von Brennstoffen wie Kohle und Erdgas. Die Verbrennung dieser (Regel-) Brennstoffe gelingt emissionsarm und effizient, weil aufgrund der weitgehend konstanten Brennstoffeigenschaften speziell optimierte Technologien einsetzbar sind. Es besteht jedoch die wirtschaftliche und ökologische Notwendigkeit, verstärkt alternative Brennstoffe wie Biomasse oder Abfallstoffe einzusetzen.

Diese Brennstoffe zeichnen sich durch signifikant variierende chemisch-physikalische Eigenschaften aus. Das führt zu einer ungleichmäßigen und instationären Verbrennung, die schwierig zu beherrschen ist. Eine optimale Verbrennung lässt sich hier nur dann gewährleisten, wenn die Prozessführung automatisch an die aktuelle Verbrennungs- und Brennstoffsituation angepasst wird. Das erfolgt gegenwärtig nur teilweise, weil der aktuelle Verbrennungszustand bzw. wichtige Prozessgrößen nicht bekannt sind.

Bestimmte Prozessgrößen lassen sich jedoch in Verbindung mit einer rechnergestützten Bildanalyse über Infrarot- und Videokameras gewinnen. Die Ergebnisse einer kamerabasierten Online-Analyse sind bei der manuellen Prozessoptimierung nutzbar, vor allem aber sind sie direkt in die automatische Prozessführung integrierbar. Mit diesem Ziel wurden am Institut für Angewandte Informatik (IAI) Online-Analyseverfahren für Infrarot- und Videokameras entwickelt, in das INSPECT-System¹ integriert und im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten bei Rost- und Drehrohranlagen eingesetzt.

1.2 Ausgangspunkt und Gliederung des Berichts

Die Nutzung kamerabasierter Kenngrößen zur Anpassung der Verbrennungsführung wird bereits seit längerem angestrebt. Arbeiten die sich bereits mit dem Einsatz von Kameras bei industriellen Feuerungsprozessen auseinandersetzen sind u.a. [31, 34, 40, 41, 44, 58, 65].

¹INSPECT... Intelligent and Safe Process Control Tool, entwickelt am IAI

Erste Untersuchungen zur Einbindung von Kameras in die Prozessführung wurden 1987 von Sutinen et al. [59] vorgestellt. Hier wurden Messgrößen aus Videobildern gewonnen und zur automatischen Feuerungsregelung einer Anlage für Holzabfälle schwankender Qualität genutzt.

Der Aufbau entsprechender Steuer- und Regelstrategien ist aufgrund der Komplexität der Verbrennungsprozesse (zahlreiche nichtlineare Wechselwirkungen) und der Prozessdynamik i.Allg. nicht trivial. Einige Ansätze zur kamerabasierten Prozessführung bei Rostverbrennungen sind in [4, 7, 8, 24, 32, 36, 39, 52, 53] beschrieben. Für Drehrohrverbrennungen finden sich Hinweise in [27, 62].

In diesem Bericht wird hierauf nicht vertiefend eingegangen, sondern primär die Gewinnung von Kenngrößen zur Beschreibung des Verbrennungszustands betrachtet. Trotz verbesserter Kameratechnik, leistungsfähigen Rechnern und der Verfügbarkeit umfangreicher Softwarepakete zur Bildverarbeitung liegen derzeit noch Defizite bei der Online-Bildanalyse bezüglich

- der Eliminierung von Bildstörungen,
- der Bewertung der Bildgüte und
- der repräsentativen Kenngrößenberechnung vor.

Neben den Auswertelgorithmen selbst sind auch die Soft- und Hardwarelösungen bislang meist auf spezielle Anlagen bzw. Verfahren zugeschnitten. Entsprechend ist eine Modifikation bzw. Übertragung aufwändig. Aufgrund dessen wurden am IAI zum einen neue Online-Bildanalyseverfahren entwickelt und zum anderen das Softwaresystem INSPECT aufgebaut.

In diesem Bericht werden der Stand der Entwicklung in Bezug auf das INSPECT-System, die Kameratechnik, die Verfahren zur Bildverarbeitung sowie die derzeit in INSPECT implementierten Applikationen beschrieben.

In Abschnitt 2 wird zunächst der prinzipielle Aufbau von INSPECT vorgestellt. In Abschnitt 3 wird die Einbindung kamerabasierter Messgrößen in eine automatische Prozessführung diskutiert, ausgehend von einer Betrachtung der Video- und Infrarottechnik die im Rahmen der Arbeiten des IAI verwendeten Infrarotkameras vorgestellt und das INSPECT-System als Komponente der kamerageführten Prozessführung erläutert. Bei der kamerabasierten Prozessführung spielt die Bildvorverarbeitung sowie die Bewertung von Aufnahmen hinsichtlich der in ihnen enthaltenen Störungen eine wesentliche Rolle. Auf diese Aspekte wird in Abschnitt 4 eingegangen.

Nach einer knappen Einführung in die spezifischen Problemstellungen werden in den Abschnitten 5 und 6 die INSPECT-Anwendungen für Rost- und Drehrohrverbrennungen beschrieben. Abschließend wird in Abschnitt 7 der Entwicklungsstand zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

Graphische Benutzerschnittstellen (GUI)

Die graphischen Benutzerschnittstellen (GUI...Graphical User Interface) erlauben die Visualisierung aller Prozessdaten sowie die online-Parametrierung durch den Benutzer. Durch eine XML-basierte Konfiguration wird für jede GUI-Instanz komplett spezifiziert, welche Prozessgrößen wie dargestellt werden bzw. welche Parameter durch den Benutzer wie modifiziert werden können. Typische INSPECT-Realisierungen besitzen eine sog. Monitor-GUI und eine Developer-GUI. Die Monitor-GUI generiert ein Wartenbild, in dem das aktuelle Kamerabild, die wichtigsten Bildkenngrößen sowie ein Alive-Signal, das das ordnungsgemäße Arbeiten des INSPECT-Systems und aller Komponenten widerspiegelt, dargestellt sind. Die Developer-GUI dient der Parametrierung des INSPECT-Systems, insbesondere der Bildverarbeitung.

Prozessdatenarchivierung (Database-Gateway)

Der Client zur Prozessdatenarchivierung erlaubt das Speichern aller Prozessgrößen in einer Datenbank. Durch Nutzen der ODBC-Schnittstelle (ODBC...Open Database Connectivity) von Windows können verschiedene Datenbankmanagementsysteme zur Archivierung verwendet werden. Durch die INSPECT-Server-Konfiguration wird festgelegt, welche Prozessgrößen zyklisch an die Archivierung übermittelt werden. Die Prozessdatenarchivierung kann auf einem separaten Rechner laufen und je nach Bedarf im laufenden Betrieb an- und abgemeldet werden, ohne den Betrieb des restlichen Systems zu beeinflussen.

Schnittstelle zum Prozessleitsystem (Process-Control-Gateway)

Die Schnittstelle zum Prozessleitsystem erlaubt die Übermittlung gemessener und berechneter Prozessgrößen an ein übergeordnetes Prozessleitsystem. Durch unterschiedliche Realisierungen dieses Clients ist zur Zeit sowohl die digitale Kommunikation mit Feldbussystemen (z. B. Interbus) als auch die analoge Ausgabe über Stromschnittstellen möglich.

2.2 Einsatz moderner Methoden der Software-Entwicklung

Um die hohen Anforderungen sowohl an die Zuverlässigkeit als auch an die Flexibilität des INSPECT-Systems erfüllen zu können, wurde ein modellorientiertes Vorgehen bei der Software-Entwicklung (Modell Driven Architecture - MDA) gewählt [29].

Dazu wurden alle Komponenten des INSPECT-Systems in UML (UML...Unified Modelling Language) sowohl statisch (Klassendiagramme) als auch dynamisch (Zustandsdiagramme)

2 Das INSPECT-System

Für die praktische Umsetzung neuer Prozessführungsstrategien auf der Basis der automatischen Verarbeitung von Infrarot- bzw. Videobildern ist ein Software-System notwendig, das folgende Funktionen erfüllt:

- die Erfassung der Infrarot- und Videobilder,
- die Bildverarbeitung in Echtzeit,
- die Online-Visualisierung von Prozessdaten,
- die Parameteranpassung über graphische Benutzerschnittstellen,
- die Ankopplung an übergeordnete Prozessleitsysteme und
- die Prozessdatenarchivierung.

Zudem muss das Software-System einerseits zuverlässig sein, um einen 24h-Betrieb auf industriellen Anlagen zu gewährleisten, andererseits muss es aber auch flexibel sein, so dass neue Algorithmen mit geringem Aufwand umsetzbar sind. Da kein System existierte, das diese Anforderungen erfüllt, wurde am IAI in Zusammenarbeit mit den Firmen Aonix GmbH und Ci-Tec GmbH das INSPECT-System entwickelt.

2.1 Aufbau und Funktionsweise

INSPECT ist ein verteiltes Client-Server-System, das aus einem INSPECT-Server und verschiedenen INSPECT-Clients besteht, die mit dem Server über ein TCP/IP-basiertes Sicherheitsprotokoll kommunizieren. Den prinzipiellen Aufbau des INSPECT-Systems zeigt Bild 1. Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten näher beschrieben.

INSPECT-Server

Der INSPECT-Server organisiert das dynamische An- und Abmelden der INSPECT-Clients und ermöglicht den zyklischen Datenaustausch mit den Clients über sog. Remote-Comp-Moduls. Alle erfassten Prozess- und Bilddaten werden den Application-Moduls zur zyklischen Auswertung (z.B. Bildverarbeitung) bereitgestellt. Die Ergebnisse dieser Auswertung können dann anderen Application- bzw. Remote-Comp-Moduls und somit den angeschlossenen Clients übermittelt werden.

Der INSPECT-Server überwacht die Verarbeitungszeit der einzelnen Module und sorgt für eine (vorab festgelegte) konstante Zykluszeit, innerhalb derer alle angemeldeten Module aufgerufen werden. Bei fehlerhaftem Arbeiten eines Moduls wird das Modul automatisch aus dem zyklischen Aufruf entfernt und kann automatisch oder manuell neu angemeldet werden.

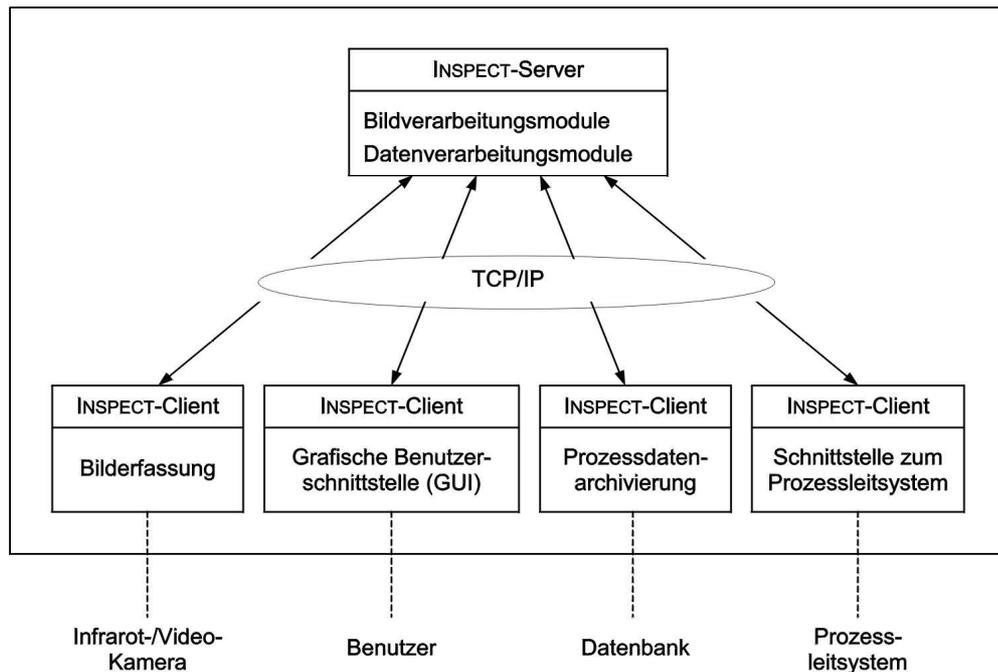


Bild 1: Aufbau des INSPECT-Systems

Über eine XML-basierte Konfiguration wird für jede INSPECT-Realisierung festgelegt, welche Module (Clients) zur Laufzeit angemeldet und welche Daten welchem Modul zyklisch zur Verfügung gestellt werden. Außer den problemspezifischen Auswertelgorithmen ist damit für verschiedene Anwendung lediglich die Anpassung der INSPECT-Konfiguration notwendig.

Bilderfassung (Kamera-Gateway)

Der Bilderfassungs-Client bildet die Schnittstelle zwischen dem INSPECT-Server und der Infrarot- bzw. Videokamera. Die Bilderfassung kann mit diesem Client in einem separaten Rechner erfolgen. Verschiedene Realisierungen dieses Clients erlauben sowohl die direkte Kommunikation mit digitalen Kameraschnittstellen als auch die Erfassung und Digitalisierung analoger Bilder über eine Framegrabber-Karte.

Bildarchivierung (Image-Record-Gateway)

Für die Dokumentation des Prozessablaufs und für die Entwicklung neuer Bildauswertungen ist es sinnvoll, zu festen Zeitpunkten einzelne Bilder oder auch Bildsequenzen zu speichern. Der Image-Record-Gateway generiert stündlich einen neuen Ordner, und legt dort die Bilder mit aufsteigender Nummerierung ab. Zusätzlich wird eine Statusdatei angelegt, in der einer Bildnummer der Aufnahmezeitpunkt sowie weitere Statuswerte zugeordnet sind.

im Case-Tool (CASE... Computer Aided Software Engineering) *Software through Pictures 8.3* der Aonix GmbH modelliert [33,37].

Aus diesem Modell wurde mit Hilfe einer speziellen Template-Technologie der Quellcode für das INSPECT-System automatisch generiert. Als Implementierungssprache wurde aufgrund der Zuverlässigkeitsanforderungen Ada95 verwendet [30]. Die Bildverarbeitungsalgorithmen selbst werden über C^{++} -basierte Bildverarbeitungsbibliotheken in INSPECT implementiert, wobei der C^{++} -Code maschinell über das Bildverarbeitungstool Halcon [43] erzeugt wird. Dort sind die Algorithmen im proprietären Halcon-Format abgelegt. Die peripheren graphischen Benutzerschnittstellen wurden in Java programmiert.

Durch den Einsatz dieses modellorientierten Vorgehens können Änderungen am INSPECT-System bequem im graphischen UML-Modell bzw. in der Halcon-Entwicklungsumgebung durchgeführt werden. Die Modifikation des Quell-Codes erfolgt danach durch automatische Code-Generierung.

2.3 Übersicht zu den INSPECT-Versionen

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die derzeitigen INSPECT-Applikationen. INSPECT 2.3 IAI und 2.4 IAI werden im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten zur infrarotbasierten Analyse von Rost- und Drehrohrverbrennungen eingesetzt [56,69].

Für die Umsetzung von Regelungen für industrielle Rostverbrennungen, die Informationen aus einer online IR-Bildauswertung einbeziehen, wurden in Kooperation mit der Fa. MARTIN GmbH speziell angepasste Auswerteverfahren entwickelt [42,70]. Die Fa. MARTIN nutzt zur Regelung von Rostverbrennungen bereits seit längerem Infrarotkameras, so dass bei der Entwicklung die bereits vorliegenden Erfahrungen einfließen. Die INSPECT-Applikationen 2.3 MARTIN und 2.1 MARTIN werden derzeit an mehreren Müllverbrennungsanlagen (z.B. Fribourg/Schweiz, Göteborg/Schweden, Brescia/Italien, Sendai/Japan) eingesetzt.

Das INSPECT 2.1 Video wird dagegen zur videobasierten Überwachung des Ausbrands bei einer Rostfeuerung industriell genutzt.

Tabelle 1: INSPECT-Versionen und ihre Komponenten

	2.1 MARTIN	2.1 Video	2.3 MARTIN	2.3 IAI	2.4 IAI
Anlage	Rost	Rost	Rost	Rost	Drehrohr
Kamera-Gateway	Infrarot	Video	Infrarot	Infrarot	Infrarot
Bildvorverarbeitung	+	+	+	+	+
Kenngrößenberechnung	+	+	+	+	+
Develop-GUI	+	-	+	+	+
Monitor-GUI	+	+	+	+	+
Process-Control-Gateway	+	+	+	+	+
Database-Gateway	-	-	-	-	+
Image-Record-Gateway	+	+	-	+	+

3 Kamerabasierte Prozessführung

3.1 INSPECT als Komponente bei der Prozessführung

Erfahrene Operateure können aus Video- oder Infrarotaufnahmen wesentliche Informationen über den Verbrennungszustand ableiten und daraufhin die Prozessführung anpassen. Allerdings ist eine manuelle Verbrennungsanalyse meist nicht permanent durchführbar. Zudem schwankt die Einschätzung der Verbrennungssituation oft individuell, so dass eine objektive und rechnergestützte Auswertung der Verbrennung geboten ist. Die hierbei gewonnenen Kenngrößen lassen sich in automatisch arbeitende Regelungen einbinden.

Jedoch sind die Video- oder Infrarotaufnahmen meist von unvermeidbaren Störungen wie aufgewirbelten Partikeln oder transienten Flammen überlagert. Wird der Einfluss der Störungen nicht mittels Bildverarbeitung unterdrückt, werden die berechneten Kenngrößen verfälscht. Der Bildauswertung muss deshalb eine Bildvorverarbeitung vorangehen, bei der die Störungseinflüsse eliminiert werden. Inwieweit die Eliminierung der Störungen gelingt, hängt von der Charakteristik der Störungen (optische Dichte, Dynamik, Zeitdauer und Fläche) ab.

Bei der Bildvorverarbeitung und zur Abschätzung der Validität der Kenngrößenberechnung ist es notwendig, den Grad der Störungen durch Bildgütemaße zu quantifizieren. Hierbei ist eine Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Bildgüte anzustreben, wie in Abschnitt 4 noch gezeigt wird.

Die Struktur einer automatisch arbeitenden kamerabasierten Prozessführung zeigt Bild 2. Die Komponenten Kamera, Vorverarbeitung, Bildanalyse und Prozessführung werden nachfolgend kurz beschrieben.

- **Kamera**

Die Strahlungsintensität (z.B. von einem Feststoffbrennbett in einer Rostfeuerung oder von einer Flamme) wird durch eine Kamera in einem geeigneten Spektralbereich erfasst. Die Kamera liefert äquidistant abgetastete Rohbilder.

Beim INSPECT-System kann über Gateways sowohl mit Infrarot- als auch mit Videokameras gearbeitet werden. Bei Infrarotkameras lassen sich über eine GUI die Parameter für die Temperaturberechnung vorgeben. Darüber hinaus wird in der GUI der Kamerastatus (Sensortemperatur, Status, Kennlinie, ...) angezeigt.

- **Vorverarbeitung**

Typischerweise liegen in den Rohbildern F_R Störungen vor, deren Einfluss durch die Bildvorverarbeitung zu minimieren ist. Das Ergebnis der Vorverarbeitung ist das Analysebild F_A . Um die nicht auswertbaren Aufnahmen zu selektieren, wird bei der Vorverarbeitung die statische Bildgüte geprüft.

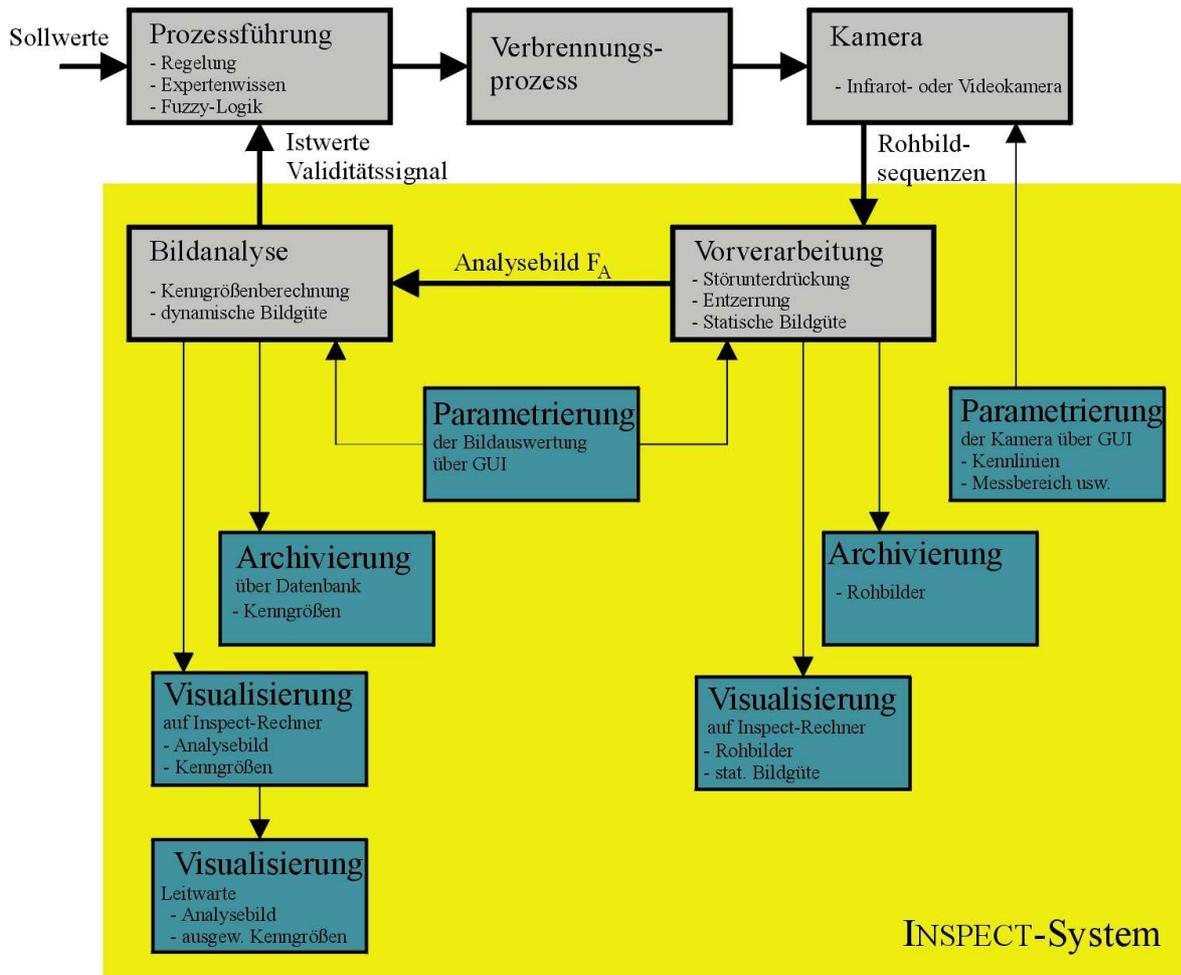


Bild 2: INSPECT als Komponenten bei der kamerabasierten Prozessführung

Werden bei der Auswertung flächenbezogene Kenngrößen wie die Fläche einer Brennzonenzone ermittelt, muss sichergestellt sein, dass das Analysebild flächentreu ist. Ist dies nicht bereits durch eine zweckmäßige Kamerapositionierung gegeben, muss der Bildauswertung eine perspektivische Entzerrung vorangehen.

Beim INSPECT-System kann über eine GUI die Bildvorverarbeitung an die individuellen Anlagenbedingungen (Art der Störungen, Parameter des geometrischen Modells für die Entzerrung usw.) angepasst werden. Um dies zu erleichtern, werden die Rohbilder und das perspektivisch entzerrte Analysebild u.a. lokal am INSPECT-Rechner angezeigt. Weiterhin lassen sich die Rohbilder für eine spätere offline-Auswertung in unterschiedlichen Formaten speichern.

- **Bildanalyse**

Anhand des Analysebilds der Bildvorverarbeitung erfolgt die Berechnung der interessierenden Kenngrößen (z.B. Temperaturprofile, Feuerlage oder Bildgüte).

Hierbei sind die Auswerteverfahren anwendungsspezifisch zu parametrieren. Bei INSPECT erfolgt dies über entsprechende GUI's. INSPECT ermöglicht auch eine Visualisierung und Archivierung der Kenngrößen. Die Visualisierung erfolgt i.d.R. zusammen mit einer Darstellung des Analysebilds sowohl am INSPECT-Rechner als auch über ein Videosignal in der Leitwarte.

Bei lang anhaltenden und großflächigen Störungen ist eine Bildanalyse nur bedingt sinnvoll, denn die Kenngrößen sind dann nicht repräsentativ. Solche Störsituationen müssen durch die Bildgütebewertung sicher erkannt werden, und sich in einem niedrigen Validitätssignal niederschlagen. Anhand vom Validitätsmaß J_V wird entschieden, ob die Prozessführung kamerabasiert oder konventionell erfolgt.

- **Prozessführung**

Das Validitätssignal und die Istwerte der Kenngrößen werden über INSPECT-Gateways an das Prozessleitsystem übergeben. Einige Kenngrößen sind unmittelbar als Regelgrößen einsetzbar, beispielsweise die Feuerlage in einem Feststoffbrennbett. Andere Kenngrößen wie das Längstemperaturprofil in einem Drehrohr sind zwar keine direkten Regelgrößen, jedoch lassen sie sich unter Nutzung von Expertenwissen und mit Verfahren aus der Fuzzy-Logik zur Parameteranpassung/Optimierung bei der Prozessregelung heranziehen.

3.2 Einsatz von Video- und Infrarotkameras

Zur Messung der Strahlungsemission kommen bei Verbrennungsprozessen mehrheitlich Videokameras zum Einsatz. Beobachtet werden die Flammen von Gas-, Öl- und Kohlestaubbrennern sowie der Feststoffausbrand bei Rostverbrennungen [4, 6, 15, 19, 21, 44, 45, 54, 59]. IR-Kameras werden zur Messung von Brennbetttemperaturen [7, 8, 10–12, 63], aber auch bei Drehrohrverbrennungen eingesetzt [34, 62].

Bei Videokameras werden üblicherweise CCD-Sensoren (CCD... charge coupled devices) genutzt. Sie sind für den sichtbaren Wellenbereich ($0,4 - 0,7\mu\text{m}$), teilweise aber auch für den angrenzenden nahen IR-Bereich bis $1,3\mu\text{m}$ verwendbar [26].

CCD-Kameras sind über die sog. Verhältnispyrometrie (s.a. [3]) prinzipiell auch für Temperaturmessung bei Flammen einsetzbar (z.B. [15, 44]). Eine Voraussetzung ist, dass sich die Flamme näherungsweise als grauer Körper beschreiben lässt. Das ist i.d.R. nur möglich, wenn breitbandig strahlender Ruß vorliegt.

Bei Verwendung von Farbkameras ist bei der Verhältnispyrometrie vorzugsweise der Rot- und der Grünkanal auszuwerten, weil im Blaukanal das Signal-Rausch-Verhältnis gering ist. Wie eigene Untersuchungen zeigten, sind für die Verhältnispyrometrie keine Standard-Ein-

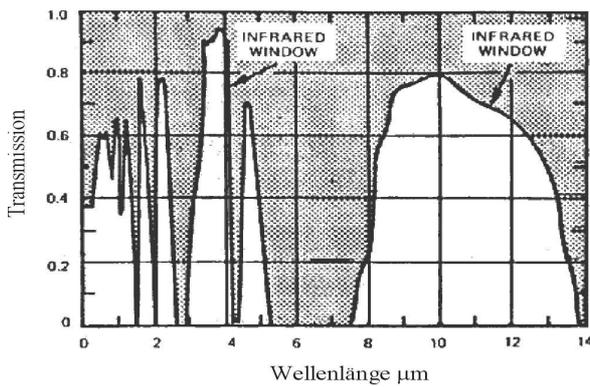
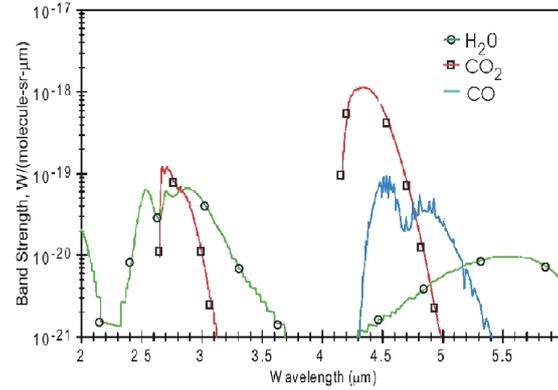


Bild 3: IR-Transmission von Luft [50]

Bild 4: IR-Strahlungsintensität von CO, CO₂ und H₂O bei 2000 °K [46]

Chip-RGB-Kameras einsetzbar. Bei ihnen lassen sich die Farbkanäle nicht einzeln ansteuern, d.h. die Belichtungszeit und Blende ist für alle Kanäle identisch. Bei Flammen orientiert sich die maximale Belichtung am Rotkanal, weil dessen Intensität am höchsten ist (Strahlungsintensität Rot \gg Grün \gg Blau). Damit ist die Empfindlichkeit der Kamera im Grün- und Blaukanal zu gering und die Messfehler sind entsprechend hoch. Einen Ausweg bieten hier 3-Chip-Kameras bzw. 1-Chip-Kameras mit einem höheren Dynamikbereich (z.B. die demnächst verfügbaren CMOS-Kameras).

IR-Kameras werden primär zur Messung von Festkörpertemperaturen eingesetzt. Sie arbeiten mit Bolometer- oder Quantendetektoren. Wie bei CCD-Kameras werden bei Quantendetektoren die Photonen der Strahlung photoelektrisch erfasst. Um eine thermisch bedingte Ladungsträgerfreisetzung und damit Messfehler zu unterbinden, muss das Detektormaterial auf Temperaturen unter 100°K gekühlt werden [20]. Das ist relativ aufwändig und anfällig, weshalb in modernen Kameras zunehmend Bolometerdetektoren eingesetzt werden. Bei ihnen wird die IR-Strahlung auf einen Absorber gelenkt, der sich dadurch erwärmt. Die Erwärmung wird thermoelektrisch ermittelt und ist ein Maß für die Strahlungsintensität.

Die Detektoren von Standard-IR-Kameras sind für Messungen unter atmosphärischen Bedingungen optimiert. Bei Luft im Normzustand liegen zwei größere Wellenbereiche vor, in denen die zu messende IR-Strahlung nicht bzw. nur relativ geringfügig überstrahlt oder absorbiert wird (sog. atmosphärische Fenster). Sie liegen bei ca. 3 – 5 μm und 8 – 12 μm (Bild 3).

Die spektralen Eigenschaften von Gasen hängen von der Zusammensetzung, dem Druck und der Temperatur ab. Bei Verbrennungsgasen liegen atmosphärische Fenster bei 2,0-2,4 μm , 3,3-4,1 μm und 8-12 μm [63,64]. Besonders geeignet ist der Bereich 3,8-4,0 μm . Das Bild 4 zeigt, dass die Strahlungsintensität der IR-relevanten Abgaskomponenten CO, CO₂ und H₂O bei 2000 °K in diesem Bereich vernachlässigbar gering ist.

Bei den für Brennräume optimierten IR-Kameras wird die Festkörpertemperatur aus der Strahlungsintensität im Bereich $3,8 - 4,0 \mu m$ ermittelt, wobei die Modellannahme grauer Körper vorausgesetzt wird. Diese und weitere einschränkende Annahmen sind bei Verbrennungsprozessen mit ihren stark variierenden Bedingungen i.d.R. nicht streng erfüllt. Für die IR-basierte Brennbetttemperaturmessung konnte in [12] allerdings nachgewiesen werden, dass unter realen Bedingungen der relative Messfehler weniger als 10 % beträgt. Diese Abschätzung wird auch von Manca et al. [36] bestätigt.

Wie Bild 4 zu entnehmen ist, besitzen einige der für die Verbrennungsoptimierung relevanten Gase wie CO oder H₂O charakteristische Strahlungsbanden. Damit ergibt sich prinzipiell die Möglichkeit, das örtliche Auftreten der Gase im Brennraum durch eine Messung im jeweiligen Spektrum der maximalen Strahlungsintensität zu erfassen und diese Informationen zur gezielten Unterdrückung von Schadstoffen (z.B. CO-Strahlen) einzusetzen [22]. Zur Entwicklung entsprechender Mess- und Regelstrategien wurde die PYROINK-IR-Kamera des IAI so ausgelegt, dass sie die IR-Strahlung über spezielle Bandpassfilter multispektral erfasst.

Hinzuweisen ist auf die Unterschiede bei absoluten und relativen Video- und Infrarotmessungen. Bei relativen Messungen können ausschließlich die Strahlungsunterschiede (d.h. Strukturen) innerhalb von Einzelaufnahmen ausgewertet werden. Absolute zeitliche Schwankungen der Strahlungsintensität bzw. des Temperaturniveaus sind nur mit absolut messenden IR-Kameras erfassbar. Soll über Videokameras die zeitliche Veränderungen etwa der Flammenintensität ermittelt werden, muss ebenfalls absolut gemessen werden d.h. mit fester Belichtungszeit und Blende.

3.3 Beschreibung der Infrarotkameras des IAI

Für die Messung der Wärmestrahlung in Brennräumen stehen mit der AVIO Tsv 100 und einer modifizierten PYROINK 10.2 zwei absolut messende Infrarotkameras mit Bolometerdetektoren zur Verfügung (Bilder 5 und 6). Bei beiden Kameras sind die Objektive jeweils in einer wasser- und luftgekühlten Lanze integriert, die direkt in den Brennraum hineinragt.

Infrarotkamera AVIO Tsv 100

Die AVIO Tsv 100 (Hersteller Goratec GmbH München) hat einen Zeilendetektor mit einer spektralen Empfindlichkeit von $\lambda = 3 - 5 \mu m$. Der Wellenbereich wird jedoch durch einen Bandpass auf $\lambda = 3,9 \pm 0,1 \mu m$ beschränkt, so dass weitgehend die Feststoffstrahlung im Brennraum erfasst wird. Die AVIO-Kamera ist absolut messend und für den Messbereich $0 - 1500^\circ C$ kalibriert. Die Bildauflösung beträgt 320×240 Pixel, das Sichtfeld ist $53 \times 40^\circ$ groß.

Einzelaufnahmen können über ein herstellerspezifisches Datenformat über eine 3,5 " Diskette aufgezeichnet werden. Die maximale Temperaturauflösung beträgt dann 12 Bit. Weiterhin steht ein analoges Videosignal zur Verfügung. Zur Online-Verarbeitung der Bilddaten ist deshalb eine Digitalisierung über einen Framegrabber erforderlich, wobei sich allerdings die nutzbare Auflösung auf 8 Bit reduziert.

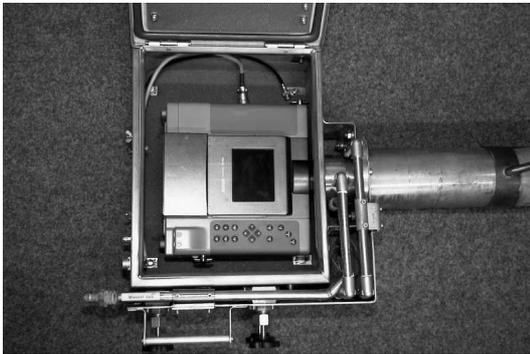


Bild 5: IR-Kamera AVIO Tsv 100

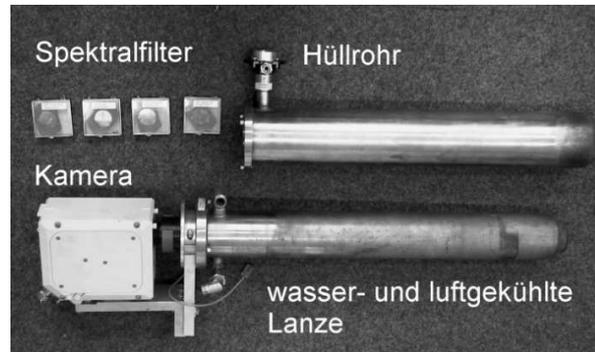


Bild 6: IR-Multispektralkamera des IAI, eine modifizierte PYROINK 10.2

Infrarotkamera PYROINK 10.2

Die PYROINK 10.2 (Hersteller Dias Infrared GmbH, Dresden) besitzt ein ungekühltes Bolometerarray mit 128×256 Pixeln. Die spektrale Empfindlichkeit ist über optische Filter vorgebar, die in den Strahlengang eingeschoben werden. Folgende Bandpassfilter liegen vor:

- $2,9 \pm 0,1 \mu m$ für die H_2O -Strahlung
- $3,9 \pm 0,1 \mu m$ zur Messung der Festkörperstrahlung
- $4,55 \pm 0,1 \mu m$ für die CO_2 -Strahlung und
- $4,8 \pm 0,1 \mu m$ für die CO -Strahlung.

Der kalibrierte Messbereich beträgt $400\text{--}1500^\circ C$ und wird mit 14 Bit aufgelöst. Das Sichtfeld beträgt $44 \times 44^\circ$ und die Bildrate 25 Hz. Die PYROINK-Kamera besitzt eine digitale Schnittstelle, die über ein Glasfaserkabel angesprochen wird. Mit einer speziellen PC-Einsteckkarte können die gemessenen Strahlungsintensitäten bzw. die Temperaturwerte ausgelesen werden. Die Berechnung der Temperaturwerte erfolgt kameraintern anhand der Kalibrierkurven für die o.g. Wellenbereiche. Eine rechnerische Kompensation der Hintergrundstrahlung (Hintergrundtemperatur) und der Übertragungsverluste (Transmissionskoeffizient) ist möglich.

Bei der PYROINK-Kamera erfolgt eine Überwachung der internen Sensor- und Kamertemperatur. Beim Überschreiten der Grenzwerte wird ein Alarm ausgelöst. Ist die Kamera auf die Rückzugsvorrichtung (Bild 7) montiert, wird dann ein Ausfahren über den mobilen

Schaltschrank (Bild 8) eingeleitet. Ein Ausfahren der Kamera wird ebenfalls ausgelöst, wenn die Luft-, Wasser- oder Stromversorgung ausfällt bzw. wenn dies über INSPECT per Software ausgelöst wird.



Bild 7: Rückzugsvorrichtung für die PYROINK 10.2



Bild 8: Mobiler Schaltschrank der PYROINK 10.2 mit Kamera-PC

Beispiele für Multispektralmessungen mit der PYROINK 10.2

Mit der Multispektralkamera des IAI wurden unter Nutzung des INSPECT-Systems an der Pilotanlage TAMARA des ITC-TAB² IR-Messungen durchgeführt. Eine Auswahl der Aufnahmen zeigen die Bilder 9 bis 12. Sie wurden mit geringem zeitlichen Abstand bei stationären Verhältnissen aufgezeichnet, wobei die Kamera vom Rostende über das Brennbett sieht (vgl. Position der Videokamera in Bild 20 auf S. 24).

Das Bild 10 zeigt die (Festkörper-) Strahlung im Bereich des atmosphärischen Fensters bei $\lambda = 3,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$. Wie auch bei den anderen Aufnahmen ist hier eine treppenartige Struktur über dem gesamten Brennbett erkennbar. Das ist auf die relativ dünne Brennbettdicke zurückzuführen, so dass die Struktur des gestuften Rostaufbaus erkennbar wird. Bei industriellen Rostfeuerungen ist in den IR-Aufnahmen die Roststruktur meist nur unmittelbar am Rostende sichtbar. Im Vergleich zu Bild 21 (S.27, es zeigt das Brennbett einer industriellen Anlage von oben) sind bei Bild 10 die Grenzen der Hauptbrennzone nicht klar abgegrenzt.

In Übereinstimmung mit anderen Anlagen strahlt der kalte Bereich der Brennstoffaufgabe über dem Brennbett nur schwach. Ebenso nimmt die Strahlungsintensität bzw. die Temperatur auf dem Brennbett nach der Hauptbrennzone zum Rostende hin ab.

In Bild 9 ist vom Rostbeginn bis zur Brennraumdecke eine starke H₂O-Strahlung erkennbar. Wasserdampf wird am Beginn des Brennbetts in der Trocknungszone aus dem Festbrennstoff ausgetrieben, s.a. Abschnitt 5.

²Institut für Technische Chemie - Bereich Thermische Abfallbehandlung, Forschungszentrum Karlsruhe

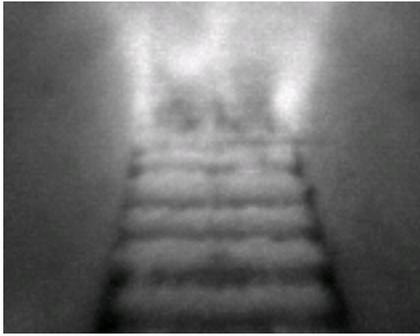


Bild 9: IR-Aufnahme mit $\lambda = 2,9 \pm 0,1 \mu m$
(H₂O-Strahlung, TAMARA)

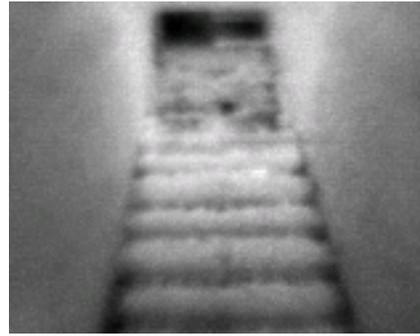


Bild 10: IR-Aufnahme mit $\lambda = 3,9 \pm 0,1 \mu m$
(Festkörperstrahlung, TAMARA)

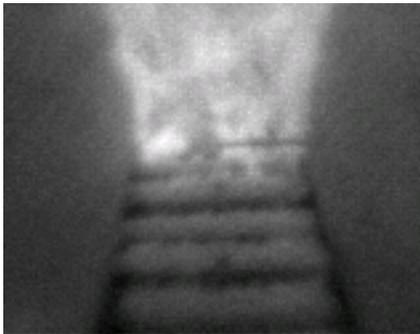


Bild 11: IR-Aufnahme mit $\lambda = 4,55 \pm 0,1 \mu m$
(CO₂-Strahlung, TAMARA)

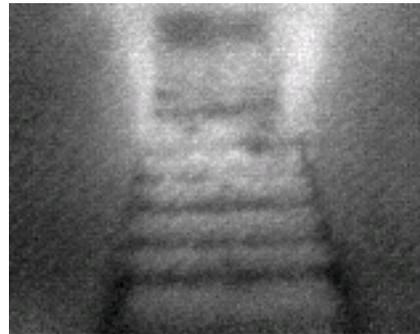


Bild 12: IR-Aufnahme mit $\lambda = 4,8 \pm 0,1 \mu m$
(CO-Strahlung, TAMARA)

Ähnliche Verhältnisse zeigt das Bild 11, das die CO₂-Strahlung wiedergibt. Hier liegt im Unterschied zu Bild 9 die Gasfront jedoch näher am Brennbettende. Das ist im Hinblick auf die Erkenntnisse über den Verfahrensablauf plausibel, denn die CO₂-Bildung erfolgt überwiegend nach der Trocknungszone in der Hauptbrennzone.

Das Bild 12 zeigt die Strahlungsintensität der CO-Bande. Gegenüber allen anderen Aufnahmen ist hier ein merkliches Messrauschen erkennbar, das auf die geringe Strahlungsintensität zurückgeführt wird. Dennoch sind jeweils zwei stärker strahlende Gasstrahlen nahe der seitlichen Brennkammerwand gut erkennbar.

4 Bildvorverarbeitung und -bewertung

Störungen wirken sich verfälschend auf die Auswertergebnisse aus. Ihr Einfluss muss deshalb unterdrückt werden. Aus Sicht der Bildverarbeitung ist die Störsituation bei Infrarot- und Videoaufnahmen sehr ähnlich. Deshalb lassen sich die am Beispiel von Infrarotaufnahmen nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Störunterdrückung weitgehend auf Videoaufnahmen übertragen. Allerdings muss bei (RGB-) Videoaufnahmen jeder Farbkanal einzeln verarbeitet werden oder aber es erfolgt eine Konversion der RGB-Aufnahmen in ein einkanaliges Graubild.

4.1 Unterdrückung von Bildstörungen

Typische Störungen sind Partikel und Flammen. Diese Störungen sind nicht mittelwertfrei, so dass ihr Einfluss nicht durch eine zeitliche Mittelung unterdrückt werden kann. Partikel werden von der Verbrennungsluft aufgewirbelt. Ihr Auftreten und ihre Eigenschaften variieren stark. Beispielsweise können sowohl dunkle als auch leuchtende (brennende) Partikel auftreten. Flammen emittieren Strahlung meist in einem breiten Spektrum. Bei infrarotbasierten Temperaturmessungen stören besonders rußende Flammen, weil sie auch in den atmosphärischen Fenstern strahlen.

Ausgangspunkt der Störungsunterdrückung ist die Annahme, dass innerhalb einer bestimmten Zeitspanne jeder Bildpunkt mindestens einmal ungestört erfasst wird. Über die Detektion und Rekonstruktion der gestörten Bildpunkte lässt sich dann ein störungsfreies Analysebild aufbauen.

Unterdrückung von Partikelstörungen bei IR-Aufnahmen

Störungen sind als Objekte detektierbar, wenn sie gemeinsame Merkmale (z.B. Grauwertähnlichkeit, Texturen oder Kanten [25, 48, 57]) besitzen, über die sie eindeutig klassifizierbar sind. Eine Klassifikation über die stark variierenden Partikelmerkmale ist oft nicht möglich. Zur Detektion kann jedoch ausgenutzt werden, dass die Partikeldynamik im Regelfall wesentlich höher ist als die Dynamik des Hintergrunds, dessen Strahlung sich bei hinreichend geringer Abtastzeit T_A nur wenig ändert.

Folglich sind die ungestörten Bildbereiche in zwei nacheinander abgetasteten (Roh-) Bildern $\mathbf{F}_{R,k}$ und $\mathbf{F}_{R,k-1}$ stark korreliert. Die durch schnelle Partikelstörungen beeinflussten Bildbereiche sind hingegen unkorreliert. Die in $\mathbf{F}_{R,k}$ und $\mathbf{F}_{R,k-1}$ enthaltenen Partikel lassen sich deshalb über eine Auswertung des Differenzbilds

$$\mathbf{F}_{Diff,k} = \mathbf{F}_{R,k} - \mathbf{F}_{R,k-1} \quad (1)$$

ermitteln. Der nur langsam veränderliche Hintergrund erzeugt in $\mathbf{F}_{Diff,k}$ betragsmäßig kleine Grauwerte g , die partikelgestörten Bereiche von $\mathbf{F}_{R,k}$ und $\mathbf{F}_{R,k-1}$ erzeugen betragsmäßig größere Grauwerte. Zur Partikeldetektion ist $\mathbf{F}_{Diff,k}$ zu binarisieren. Hierbei hat sich ein Schwellwert bewährt, der sich aus einem statischen Schwellwert $K_{S,S}$ und einen dynamischen Schwellwert $K_{S,D}$ zusammensetzt [67]

$$g_{\mathbf{F}_{Diff,k}^B}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } |g_{\mathbf{F}_{Diff,k}}(x, y)| \geq K_{S,S} + K_{S,D}(x, y) \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2)$$

Die lokalen dynamischen Schwellwerte $K_{S,D}(x, y)$ bilden in ihrer Gesamtheit die Schwellwertmatrix $\mathbf{K}_{S,D}$. Sie repräsentiert den mittleren Grauwert um den jeweiligen Punkt (x, y) in \mathbf{F}_{Diff} . Zweckmäßige Schwellwertmatrizen lassen sich beispielsweise über Rechteck- oder Gaußfilter (s.a. [25]) aus dem Differenzbild \mathbf{F}_{Diff} gewinnen.

Beispiel zur Unterdrückung von Partikelstörungen

Die Funktionsweise der Partikelerkennung wird anhand der Bilder 13 und 14 verdeutlicht, die jeweils durch einen hellen und einen dunklen Partikel gestört sind. Das Bild 15 zeigt das Differenzbild $\mathbf{F}_{Diff,k}$. Dort heben sich die Grauwerte der (partikel-) gestörten Bereiche deutlich vom Hintergrund ab, während die Grauwerte der ungestörten Bereiche nur gering variieren. Die dynamische Schwellwertmatrix $\mathbf{K}_{S,D}$ (Bild 16) wird über eine Rechteckfilterung des Differenzbilds gewonnen.

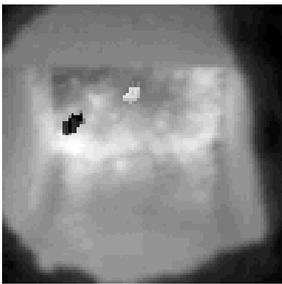


Bild 13: IR-Bild $\mathbf{F}_{R,k}$ mit Partikelstörungen

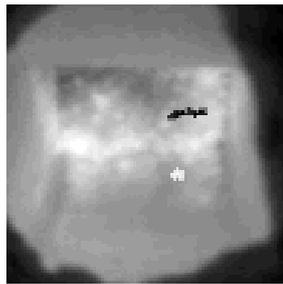


Bild 14: IR-Bild $\mathbf{F}_{R,k-1}$ mit Partikelstörungen

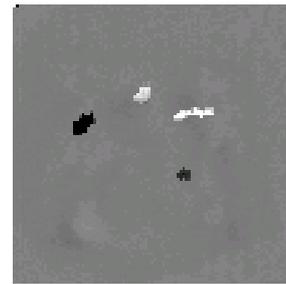


Bild 15: Differenzbild $\mathbf{F}_{Diff,k}$

Auf das Differenzbild wird nun die zweiseitige Schwellwertoperation angewendet, der Zahlenwert des statischen Schwellwertes $K_{S,S}$ wurde hier mit 10 festgelegt. Das Bild 17 zeigt, dass alle Partikel richtig erkannt werden³.

³Die Bilder \mathbf{F}_k und \mathbf{F}_{k-1} wurden überlagert und die detektierten Störungen markiert.

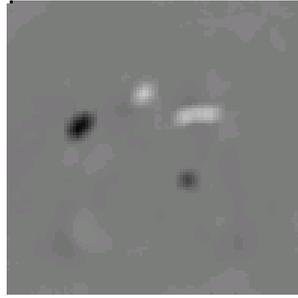


Bild 16: Schwellwertmatrix $\mathbf{K}_{S,D}$

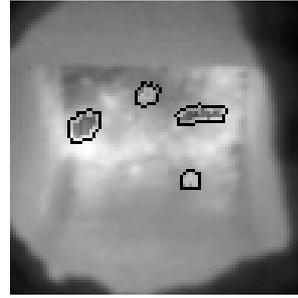


Bild 17: Erkannte Störungen (umrandet)

Unterdrückung von Flammenstörungen bei IR-Aufnahmen

Unter bestimmten Bedingungen lassen sich Flammen in IR-Aufnahmen manuell gut erkennen. Günstige Bedingungen sind ein schwach strahlender Hintergrund, flammentypisch schnelle Auszüngelungen und eine charakteristische Flammentextur. Die Flammenerkennung ist schwierig bzw. nicht möglich, wenn die Hintergrundstrahlung im Bereich der Flammenstrahlung liegt. Bei RGB-Aufnahmen ist die Situation ähnlich, jedoch sind dort zur Flammendetektion u.U. zusätzlich die Farbverhältnisse der Flamme auswertbar.

Unter den Bedingungen, wie sie beispielsweise bei Rostfeuerungen vorliegen, lassen sich Flammen bislang nicht explizit als Objekte detektieren. Unter der Annahme, dass die Flammen den interessierenden aber schwächer strahlenden Hintergrund temporär und partiell verdecken, lässt sich der Flammeneinfluss durch Verwendung eines Minimumfilters

$$\mathbf{F}_{NF,K} = \min_{i=k-M+1}^k \mathbf{F}_i \quad (3)$$

wesentlich reduzieren. Durch den Minimumfilter entsteht aus M Eingangsbildern das Filterbild $\mathbf{F}_{NF,K}$, wobei die Grauwerte von $\mathbf{F}_{NF,K}$ die wertemäßig geringsten Bildpunkte aller Eingangsbilder sind.

Die Verwendung eines Minimumfilters ist nur zulässig, wenn die Eingangsbilder keine Störungen enthalten, die die Grauwerte des ungestörten Hintergrunds unterschreiten. Zu beachten sind hier vor allem schwach strahlenden Partikelstörungen, deren verfälschender Einfluss sich sonst im Analysebild akkumuliert.

Für die Störunterdrückung ist daraus abzuleiten, dass bei der Gewinnung des Analysebilds \mathbf{F}_A im ersten Schritt eine Unterdrückung des Partikeleinflusses erfolgen muss. Erst im zweiten Schritt ist aus den partikelfreien Zwischenbildern der Flammeneinfluss über eine Minimumfilterung reduzierbar.

Schema zur Unterdrückung von Partikeln und Flammen

Im Hinblick auf die genannten Zusammenhänge ist zur Erkennung und Eliminierung von Partikel- und Flammenstörungen folgendes Schema zweckmäßig Bild18:

1. Minimierung der Partikelstörungen. Aus benachbarten Bildern der eingelesenen Bildsequenz (geringe Abtastzeit T_A) wird zunächst ein Differenzbild errechnet. Aus dem Differenzbild wird jeweils über eine glättende Filterung die dynamische Schwellwertmatrix gewonnen und zur Binarisierung des Differenzbilds eingesetzt. Die gestörten Bildbereiche werden durch ungestörte Bildbereiche ersetzt, so dass partikelfreie Zwischenbilder F_{NP} entstehen.
2. Minimierung der Flammenstörungen. Die partikelfreien Zwischenbilder der aktuellen Bildsequenz werden minimumgefiltert, so dass pro Zyklus (Abtastzeit T_Z) ein partikelfreies und flammenminimiertes Zwischenbild / Analysebild vorliegt. Wenn sich die Flammenstörungen über längere Zeiträume erstrecken, wird das Analysebild über eine Minimumfilterung der Zwischenbilder mehrerer Zyklen ermittelt.

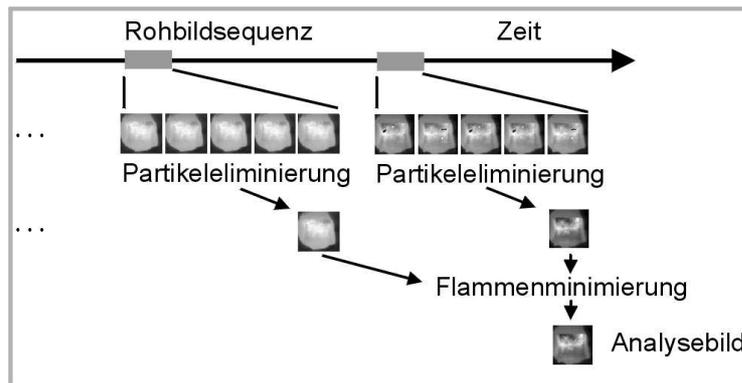


Bild 18: Schema zur Unterdrückung von Partikeln und Flammen

4.2 Bildbeurteilung über statische und dynamische Bildgütemaße

Störungen beeinträchtigen, auch wenn sie durch die Bildvorverarbeitung eliminiert werden, die Gültigkeit bzw. Validität J_V der Kenngrößen. Der Einfluss der Störungen muss daher quantitativ über statische und dynamische Bildgütemaße (J_S und J_D) beschrieben werden [66].

Statische Bildgüte

Zur Bewertung der statischen Bildgüte (Einzelbildbewertung) existieren zwei Ansätze. Die erste Herangehensweise wird durch die aus der Literatur bekannten Verfahren (Berechnung der Störungskennzahl [63], Vergleich von Nominalhistogrammen [42]) und weiteren

histogrammbasierten Kenngrößen beschrieben. Weitere Möglichkeiten basieren auf der von Haralick et al. [18] eingeführten Grauwertübergangsmatrix \mathbf{C}_δ . Mit der Grauwertübergangsmatrix werden die Häufigkeiten von Grauwertnachbarschaften beschrieben. Die aus \mathbf{C}_δ berechenbaren Kenngrößen wie die Energie 2. Ordnung \mathcal{E}_s oder die Korrelation \mathcal{R} erlauben somit eine Bewertung der Bildstruktur.

Beide Ansätze wurden am IAI im Rahmen einer Diplomarbeit anhand einer Testbildsequenz mit Flammen und Partikeln überprüft [16]. Hierfür wurden die entsprechenden Merkmale für alle Einzelbilder bestimmt und die Gestörtheit der Einzelbilder auf einer Skala von Null (geringe Bildgüte) bis Eins (hohe Bildgüte) manuell eingeschätzt. Um den Zusammenhang zwischen der manuellen Bildbewertung und den Bildmerkmalen zu ermitteln, wurden die Bildmerkmale mit der manuellen Einschätzung korreliert. Die Tabelle 2 zeigt, dass eine betragsmäßig hohe Korrelation zwischen der manuellen Bildgütebewertung und den Bildmerkmalen

- Energie 1. Ordnung \mathcal{E}_f ,
- Energie 2. Ordnung \mathcal{E}_s und
- Korrelation \mathcal{R}

vorliegt. D.h. diese Bildmerkmale eignen sich besonders für eine statische Bildgütebewertung⁴.

Tabelle 2: Korrelation zwischen der manuell bestimmten Bildgüte und den maschinell berechneten Bildkenngrößen

Bildkenngröße	$R_{x,y}$
Energie (1. Ord.) \mathcal{E}_f	-0,71
Energie (2. Ord.) \mathcal{E}_s	-0,74
Korrelation \mathcal{R}	0,79

Gemäß dem Schema von Bild 2 (S. 9) erfolgt im INSPECT-System bei der Bildvorverarbeitung eine Berechnung der statischen Bildgüte für jedes Rohbild. Dies ist notwendig, um stark gestörte Einzelbilder von vorn herein aus der Verarbeitung auszuschließen. Die statische Bildgüte wird bei den INSPECT-Applikationen aus der Korrelation \mathcal{R} abgeleitet.

Dynamische Bildgüte

In der Bildverarbeitung wird jeder als gestört erkannte Bildpunkt $g_k(x, y)$ durch den zuletzt als ungestört erkannten Bildpunkt $g_{k-\tau_k}(x, y)$ ersetzt. Auf diese Weise entsteht ein störungs-

⁴Die Untersuchungen sind detailliert in [16] dokumentiert. In [67] ist ein weiteres Beispiel zur statischen Bildgütebewertung angegeben.

freies Analysebild $\mathbf{F}_{A,k}$. Vorausgesetzt wird, dass alle Störungen detektiert werden und die Störungsdauer nicht den Zeithorizont der Bildverarbeitung T_{Max} übertrifft.

Bei diesem als Rekonstruktion bezeichneten Vorgehen nimmt die Aktualität des Analysebilds umso mehr ab, je stärker auf vergangene Bilddaten zurückgegriffen wird. Um diesen Aspekt in die Bewertung einzubeziehen, wird ein dynamisches Bildgütemaß J_D

$$J_D = 1 - J_R \quad (4)$$

berechnet, das auf dem Rekonstruktionsgrad J_R

$$J_R = \frac{T_A}{T_{Max}} \frac{\sum \tau_k(g_{\mathbf{F}_A})}{N_{Ges}} \quad \forall g \in \mathbf{F}_A \quad (5)$$

beruht. Die Zahlenwerte des Rekonstruktionsgrads liegen zwischen Null und Eins. In den Rekonstruktionsgrad J_R geht damit die Anzahl der gestörten Bildpunkte ein, wobei sie zusätzlich über ihr sog. Alter τ_k gewichtet werden.

Wenn keine Störungen ermittelt werden, stimmt das Analysebild \mathbf{F}_A mit dem aktuellen Rohbild \mathbf{F}_R überein, und der Rekonstruktionsgrad ist Null. Je größer die Anzahl der rekonstruierten Bildpunkte ist und je älter die zur Rekonstruktion genutzten Bilddaten sind, desto höher ist der Rekonstruktionsgrad. Der Rekonstruktionsgrad ist Eins, wenn das Analysebild \mathbf{F}_A vollständig aus den Bildpunkten des ältesten Rohbilds besteht. Ein typisches Beispiel für den Verlauf des dynamischen Rekonstruktionsgrads zeigt das Bild 19. Weil aus dem Anfangszustand heraus gestartet wird, stimmen zu Beginn das Roh- und das Analysebild überein und der Rekonstruktionsgrad ist Null.

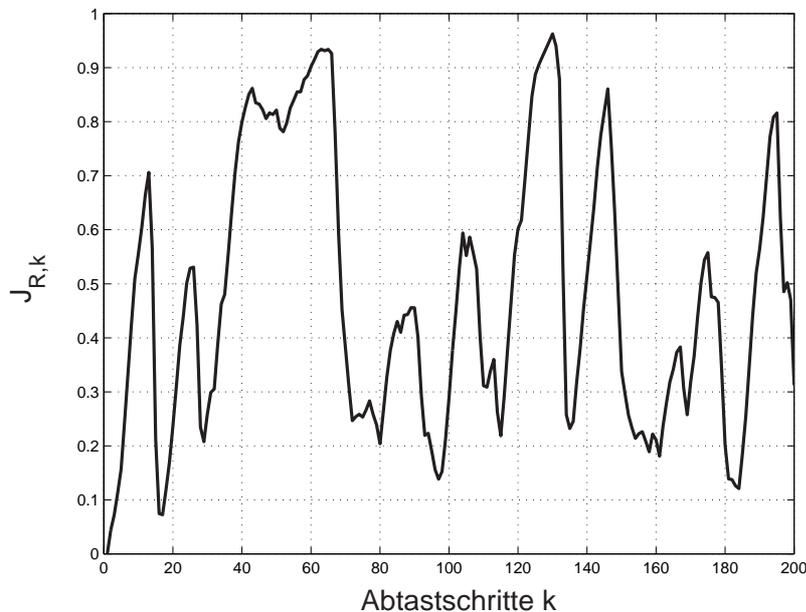


Bild 19: Verlauf des Rekonstruktionsgrads (der Filterhorizont beträgt 20 Schritte)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Beurteilung von Bildstörungen eine komplexe Aufgabenstellung ist, die unterschiedlichen Aspekten Rechnung tragen muss. Zweckmäßig

ist eine Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Bildgüte. Um der Vielzahl möglicher Störsituationen gerecht zu werden, ist bei der statischen Bildgütebewertung u.U. die Verwendung mehrerer Bildmerkmale notwendig. Hierbei sind vor allem Bildmerkmale zweckmäßig, die die Bildstruktur berücksichtigen.

Der Rekonstruktionsgrad beschreibt, in welchem Maß bei der Bildvorverarbeitung auf zurückliegende Bilddaten zurückgegriffen wird. Er ist ein Maß für die Aktualität des Analysebilds und damit auch für die Validität der auf seiner Basis ermittelten Größen.

5 Infrarot- und Videoanalyse bei Rostfeuerungen

Rostfeuerungen finden ihre breite Anwendung bei der thermischen Behandlung von Abfall- und Reststoffen in Müllverbrennungsanlagen (MVA). Die Maximierung der nutzbaren Wärmeenergie sowie die Minimierung der Schadstoffemission sind dabei die wesentlichen Anforderungen. Für einen optimalen Prozessablauf sind komplexe Steuer- und Regelungsstrategien notwendig, für deren Einsatz die detaillierte Kenntnis des momentanen Prozesszustands vorausgesetzt wird.

Typischerweise besitzen die bei Rostverbrennungen eingesetzten Brennstoffe veränderliche Eigenschaften, die zu einem instationären und lokal unterschiedlichen Verbrennungsverhalten führen. Dadurch kann der verteilte Prozess lokal (z.B. Temperaturverteilung im Feststoffbrennbett) stark von dem mittleren Verhalten des Prozesses (z.B. Abgastemperatur) erheblich abweichen. Weil die gesamte Temperaturverteilung nur bedingt über Thermoelemente erfasst werden kann, müssen spezielle Infrarotkameras eingesetzt werden. Andere wesentliche Informationen über den Verbrennungszustand wie die Ausbrandgrenze oder die Fläche brennenden Materials im hinteren Rostbereich lassen sich über Videokameras ermitteln.

5.1 Thermische Abfallbehandlung in Rostfeuerungen

Das Abbrandverhalten der Brennstoffe unterliegt aufgrund der veränderlichen und heterogenen chemischen und physikalischen Eigenschaften (z.B. Heizwert, Feuchte, Stückigkeit und Homogenität) starken Schwankungen. Die Brennstoffe bestehen neben den brennbaren Komponenten Kohlenstoff C und Wasserstoff H₂ auch aus den nicht brennbaren Bestandteilen Stickstoff N₂, Wasser H₂O und Sauerstoff O₂. Hinzu kommen Schadstoffe wie Schwefel S und Chlor Cl und Anteile von Schwermetallen, die aber auf Grund ihres geringen Masseanteils die Verbrennung nur unwesentlich beeinflussen.

Aufgebaut sind die Müllverbrennungsanlagen (s.a. [1, 2, 14, 38, 49]) aus einem zum Ende hin geneigten Rost, auf dem die Brennstoffe, unterstützt durch konstruktionsabhängige Transportmechanismen (zu unterscheiden sind Wander-, Rückschub-, Vorschub- und Walzenrost) zum Rostende befördert werden (siehe Bild 20). Je nach Bauart des Rostes wird das Brennbett zonenweise von unten mit primärer Verbrennungsluft durchströmt. In jeder Zone i ist die Primärluftmenge \dot{M}_{P_i} , die Transportgeschwindigkeit und teilweise auch die Schürung beeinflussbar. Über dem nach oben verengten Brennraum befindet sich der sog. erste Zug. Entsprechend seiner Positionierung ist zwischen Gleich-, Mittel- und Gegenstromfeuerung zu unterscheiden [51]. Das Bild 20 zeigt eine Mittelstromfeuerung.

Bei modernen Anlagen wird zur Gewährleistung eines vollständigen Gasausbrands im ersten Zug Sekundärluft \dot{M}_S eingedüst. Sie sorgt für eine gute Vermischung mit den noch unver-

brannten Brenngasen und stellt zusätzlichen Sauerstoff zur Oxidation bereit. Im Dampfkessel wird die Verbrennungswärme zur Dampferzeugung genutzt. Der Rost wird an der Aufgabeseite (Rostbeginn) über einen regelbaren Zuteiler mit Brennstoff beschickt. Auf dem Rost durchläuft der Brennstoff in einem Zeitraum von ca. 30-60 min folgende Phasen:

- Trocknung,
- Pyrolyse,
- Zündung und
- Feststoffabbrand.

Am Rostbeginn wird der Brennstoff durch Strahlung aus dem Brennraum und die von unten einströmende Primärluft getrocknet. Mit zunehmender Erwärmung werden die flüchtigen Bestandteile ausgegast. Anschließend erfolgt bei der Pyrolyse unter O_2 -Mangel die Umwandlung in Koks C und brennbare Gase. Mit dem Erreichen von ca. $250^\circ C$ zündet der Brennstoff und beginnt von oben nach unten durch die Brennstoffschicht abzubrennen.

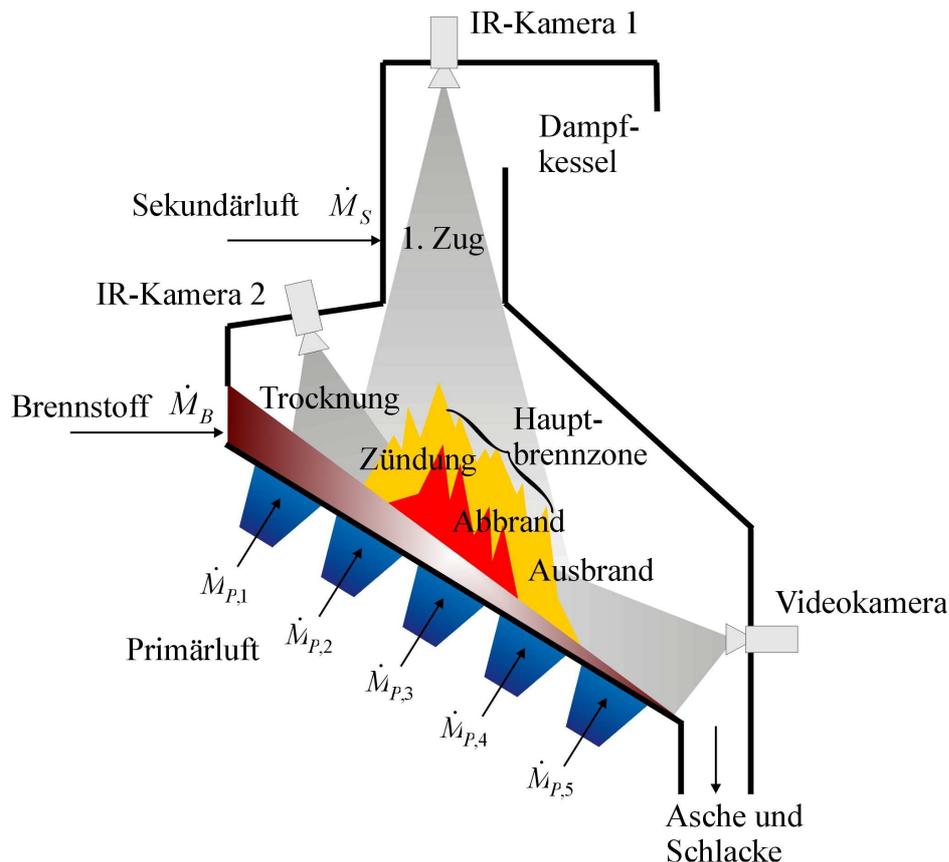


Bild 20: Prinzip einer Rostverbrennung; Überwachung durch IR- und Videokameras

Die einzelnen Phasen der Verbrennung laufen aufgrund der veränderlichen Brennstoffe u.U. parallel ab. Die Heterogenität der Brennstoffe kann beispielsweise dazu führen, dass sich mehrere Brennzonen auf dem Rost ausbilden.

Im Gegensatz zur schnellen und direkten Verbrennung bei gasförmigen Brennstoffen müssen bei Festbrennstoffen die Brenngase zuerst freigesetzt werden. Der Feststoffabbrand ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt der Verbrennung und wird üblicherweise in Analogie zum Kohlenstoff-Abbrand [14, 28, 47] modelliert. Hierbei wird von einer Schüttung kugelförmiger Partikel ausgegangen, die jeweils mit einer schmalen Grenzschicht reagieren (Näheres in [1, 13]). Die Wechselwirkungen zwischen den glühenden Brennstoffpartikeln und der Umgebung wird durch die Primärluftzugabe bestimmt, so dass die Verbrennungsintensität über die Primärluftzugabe steuerbar ist.

Nach der Trocknungsphase werden aus dem Feststoff Wasserstoff H_2 , Kohlenwasserstoffe C_nH_m und andere flüchtige Bestandteile freigesetzt, deren Oxidation nur teilweise im Brennbett erfolgt. Mit steigender Temperatur entstehen aus dem Kohlenstoff im Brennstoff die Gase CO und CO_2 . Die vollständige Umsetzung von CO zu CO_2 erfolgt erst in der Gasphase über der Brennzone, weil die Menge des in die Brennzone eingebrachten Sauerstoffs i.d.R. nicht für eine vollständige Verbrennung ausreicht [23]. Durch den Brennstoffumsatz nimmt die Höhe der Feststoffschicht zum Rostende hin ab. Dort liegen die nicht brennbaren Bestandteile als Asche und Schlacke vor. Die Schlacke wird über einen Nassentschlacker ausgetragen der eine rasche Abkühlung und einen luftdichten Brennraumabschluss ermöglicht.

Damit der Zustand des Verbrennungsprozesses gezielt beeinflusst werden kann, ist neben der Kenntnis von Zustandsgrößen wie dem Dampfmassenstrom, der Abgasmenge und -temperatur sowie der Zusammensetzung des Abgases insbesondere aber auch die Temperaturverteilung im Feststoffbrennbett von Interesse.

Infrarotbasierte Kenngrößen bei Rostfeuerungen

Die Temperaturverteilung im Feststoff bzw. im Brennbett lässt sich mit Hilfe von IR-Kameras erfassen. Aus den IR-Aufnahmen lassen sich zahlreiche Kenngrößen bestimmen. Eine für die Prozessoptimierung besonders wichtige Kenngröße ist die Lage der Brennzone im Feststoffbrennbett. Die Eigenschaften der Brennzone (Lage, Temperatur, Fläche) schwanken in Abhängigkeit von den Brennstoffeigenschaften und der Prozessführung und haben i.Allg. einen erheblichen Einfluss auf die Energieeffizienz und die Schadstoffbildung [56]. Um die o.g. Brennzoneneigenschaften zu ermitteln, muss die Brennzone mittels Bildverarbeitung explizit detektiert werden, s.a. [66]. Bei Rostverbrennungen lassen sich aus den IR-Aufnahmen (zumindest prinzipiell) folgende Kenngrößen ermitteln:

- das Längstemperturprofil,
- die Zünd- und Ausbrandgrenze,
- die Längs- und Querlage der Hauptbrennzone (Gesamtrost),
- die Längs- und Querlage der Bahnbrennzonen (Brennzone in jeder Rostbahn),

- die Flächen aller Brennzonen,
- die mittleren Temperaturen aller Brennzonen,
- die mittleren Temperaturen über jedem Rostsegment sowie
- die statische und dynamische Bildgüte.

Videobasierte Kenngrößen bei Rostfeuerungen

Ein weiterer Ansatz zur kamerabasierten Prozessoptimierung betrifft den Feststoffausbrand. Hierbei wird das Brennbettende mit Hilfe von Videokameras beobachtet, und Aussagen über den Feststoffabbrand abgeleitet. Daraufhin kann über eine Anpassung der Luftzugabe, des Transports und ggf. der Schürung der Feststoffabbrand maximiert werden. Ein unvollständiger Abbrand ist an leuchtenden Glutnestern im Ausbrandbereich des Rostes erkennbar. Bei der hier betrachteten sog. Ausbrandüberwachung mittels Videokameras lassen sich über eine rechnergestützte Auswertung folgende Kenngrößen ermitteln:

- die Ausbrandgrenze bezüglich des Gesamtrostes,
- die Ausbrandgrenze bezüglich einzelner Rostbahnen,
- die Fläche des brennenden Materials im hinteren Rostbereich,
- die Fläche des brennenden Materials in jedem Rostsegment,
- die mittlere Intensität der brennenden Bereiche insgesamt,
- die mittlere Intensität der brennenden Bereiche in jedem Rostsegment sowie
- die statische und dynamische Bildgüte.

Hinweise zur Positionierung der Kameras

Mit einer IR-Kamera im ersten Zug der Nachbrennkammer (Position 1 in Bild 20) ist bei einer Mittelstromfeuerung i.d.R. die Hauptbrennzone beobachtbar. Dadurch sind Kenngrößen wie die Position und die Fläche der Brennzone bestimmbar. Aus anlagengeometrischen Gründen ist die gleichzeitige Betrachtung der Brennstoffaufgabe (interessant für eine frühzeitige Charakterisierung der eingebrachten Brennstoffe) und des Ausbrandes meist nicht möglich.

Zur Beobachtung des Aufgabe- und Zündbereiches ist die IR-Kamera über dem vorderen Rostbereich zu installieren (Position 2). Über die Analyse der Trocknung, der Pyrolyse und der Zündung des Brennstoffs ist eine Brennstoffcharakterisierung und damit eine vorausschauende Prozessführung möglich.

Die Position über dem Rostende ist für die Überwachung des Ausbrandes mittels Videokamera geeignet. Unvollständig verbrannter Brennstoff ist anhand der Glutnester bzw. Flammen auch im sichtbaren Spektralbereich erkennbar.

5.2 Infrarotbasierte INSPECT-Anwendung bei Rostfeuerungen

Die Bilder 21 und 22 zeigen die Sicht einer IR-Kamera auf das Feststoffbrennbett einer Rostfeuerung von oben (vgl. auch Bild 20, Kameraposition 1).

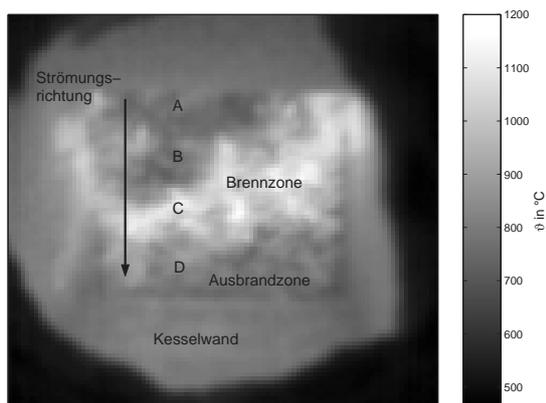


Bild 21: Temperaturverteilung bei einem Feststoffbrennbett (Sicht von oben)

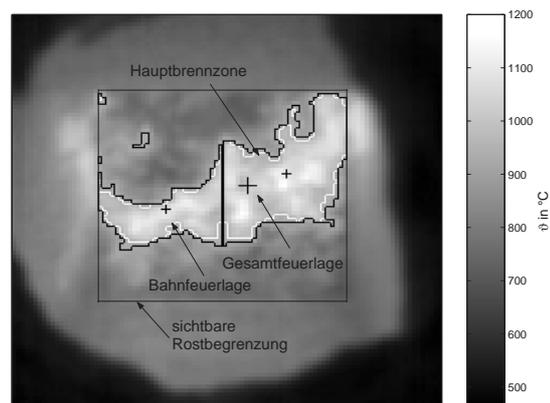


Bild 22: Ermittelte Kenngrößen für die Aufnahme von Bild 21

In der Bildmitte ist jeweils das rechteckige Brennbett erkennbar, das von den grau erscheinenden Brennraumwänden umgeben ist. Der Transport des Brennstoffes erfolgt von (A) nach (D). Im Bereich der Brennstoffaufgabe am Rostbeginn (A) ist der Brennstoff relativ kalt, so dass wenig IR-Strahlung emittiert wird. Dieser Bereich erscheint in den Bildern dunkel. Im Bereich B wird der Brennstoff erwärmt und getrocknet; infolgedessen strahlt er stärker. Anschließend entgast und pyrolysiert der Brennstoff, er zündet und brennt ab. Auf dem Brennbett hebt sich dieser Bereich C als intensiv strahlende und somit im Bild als hell dargestellte Brennzone ab. Mit fortschreitendem Umsatz nimmt die Verbrennungsintensität wieder ab und damit auch die Strahlungsintensität. Der Brennstoff geht in den Ausbrandbereich D über und kühlt ab.

(Hinweise: Das gezeigte Beispiel stellt eine ungünstige Situation mit einer bahnweise sehr unterschiedlichen und schräg liegenden Brennzone dar. Solche Situationen lassen sich bislang nur mittels spezieller IR-Kameras erkennen. Der dunkle Bildrand ist auf Anbackungen zurückzuführen).

Mit den am IAI entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmen werden aus solchen Infrarotbildern Kenngrößen wie die Temperatur, die Fläche und die Position der Brennzonen berechnet. In Bild 22 sind die Kenngrößen für einen Zweibahnrost exemplarisch eingezeichnet.

Durch die Berücksichtigung der Ortsinformation der einzelnen Kenngrößen kann den Abweichungen zu den Regelungszielen wie Kompaktheit und Position der Brennzonen gezielt entgegengewirkt werden.

Durch die Verfügbarkeit der Bildkenngrößen als Zeitreihe kann neben dem aktuellen Wert auch der Trend abgeschätzt werden. Damit stehen dem Bedienpersonal zusätzlich Informationen über das dynamische Prozessverhalten zur Verfügung.

Die Dynamik der Brennbettveränderungen verdeutlichen die Bilder 23 bis 26. Sie zeigen für einen Zeitraum von zwei Stunden die Veränderung der Brennbettkenngrößen Längsfeuerlage, Querfeuerlage, Temperatur und relativer Flächenanteil der Hauptbrennzonen einer industriellen MVA.

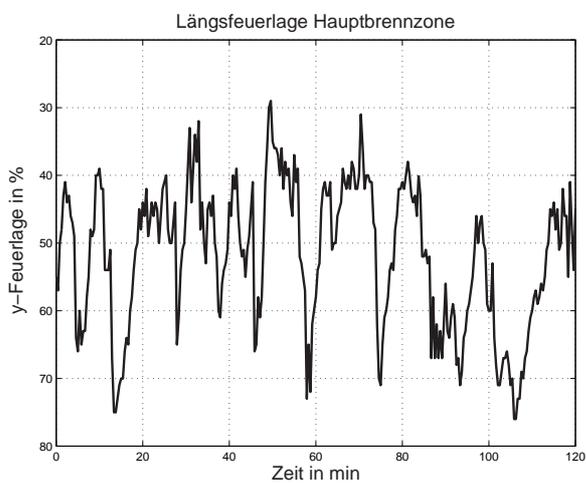


Bild 23: Längsfeuerlage

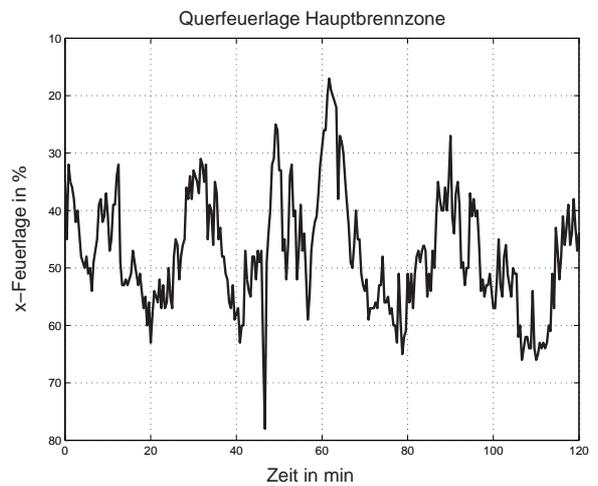


Bild 24: Querfeuerlage

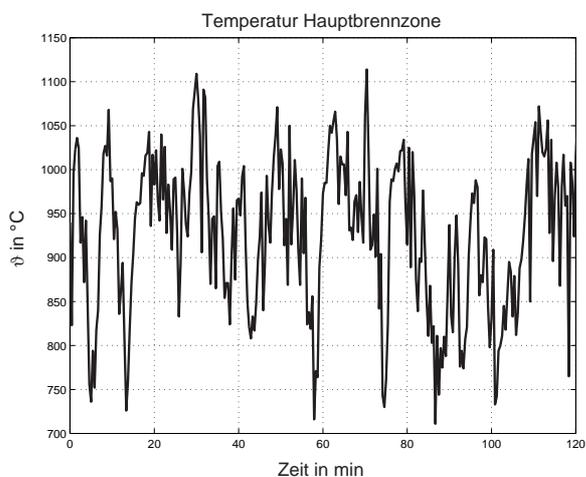


Bild 25: Temperatur Brennzonen

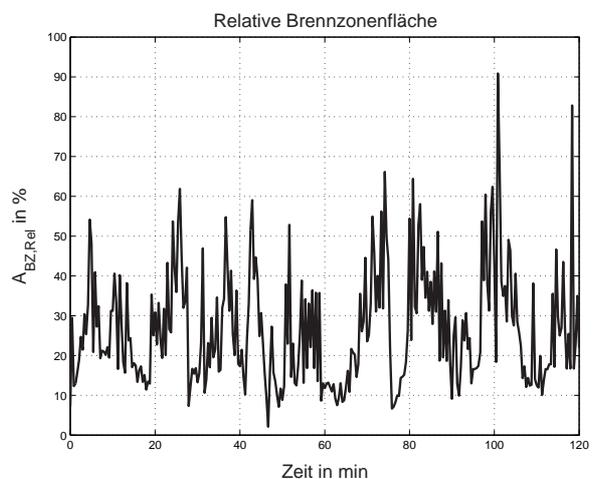


Bild 26: Fläche Brennzonen

Komponenten des INSPECT-Systems zur infrarotbasierten Regelung von Rostverbrennungen

Der INSPECT-Server wird mit dem in Bild 27 gezeigten Fenster auf dem Host-Rechner visualisiert. Das Fenster zeigt den aktuelle Status (*created, init, in cycle, request shut down, shutting down*) der INSPECT-Komponenten

- Kamera-Gateway
- Bildverarbeitung und Kenngrößenberechnung
- Developer-GUI
- Monitor-GUI
- Process-Control-Gateway und
- Image-Record-Gateway

an.

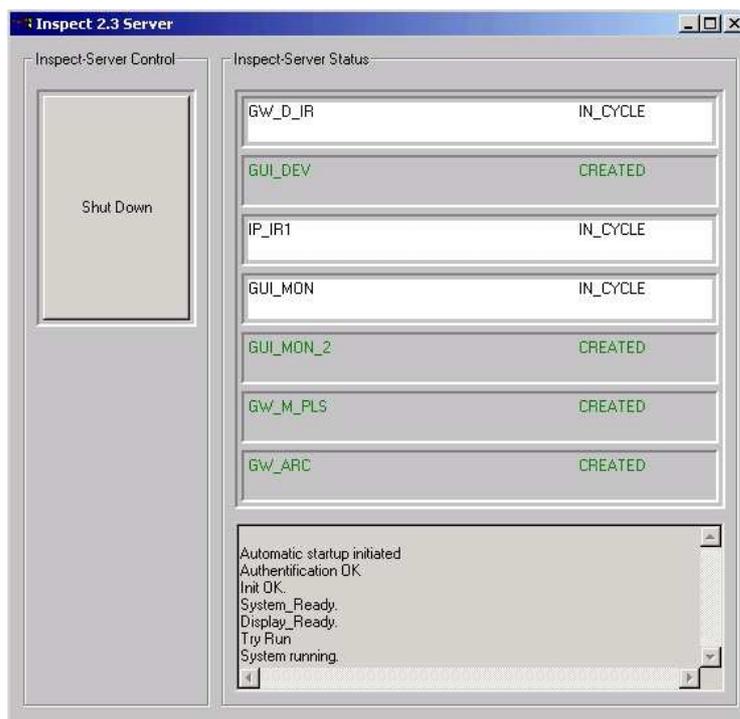


Bild 27: Fenster des INSPECT-Servers

Kamera-Gateway Der Kamera-Gateway (Bild 28) ist für die zyklische Erfassung und Übertragung der Bilddaten an den INSPECT-Server zuständig. Der Kamera-Gateway läuft i.d.R. auf einem separaten Rechner (Kamera-PC in Schaltsschrank der IR-Kamera, S.14 Bild 8).



Bild 28: Gateway der Infrarotkamera

Bildverarbeitung und Kenngrößenberechnung Sobald der INSPECT-Server über die TCP/IP-Verbindung zum Kamera-Gateway IR-Bilder erhalten hat, wird das Modul Bildverarbeitung gestartet. Das Bild 29 zeigt die Kontrollfenster der IR-Bildauswertung. Anhand dieser Kontrollfenster kann der Nutzer den Ablauf der Bildverarbeitung nachvollziehen. Neben den Bilddaten (Eingangsbilder und vorverarbeitete Bilder) werden auch die berechneten Kenngrößen sowohl textuell als auch graphisch dargestellt. Außerdem werden Statusdaten und Verarbeitungsparameter angezeigt.

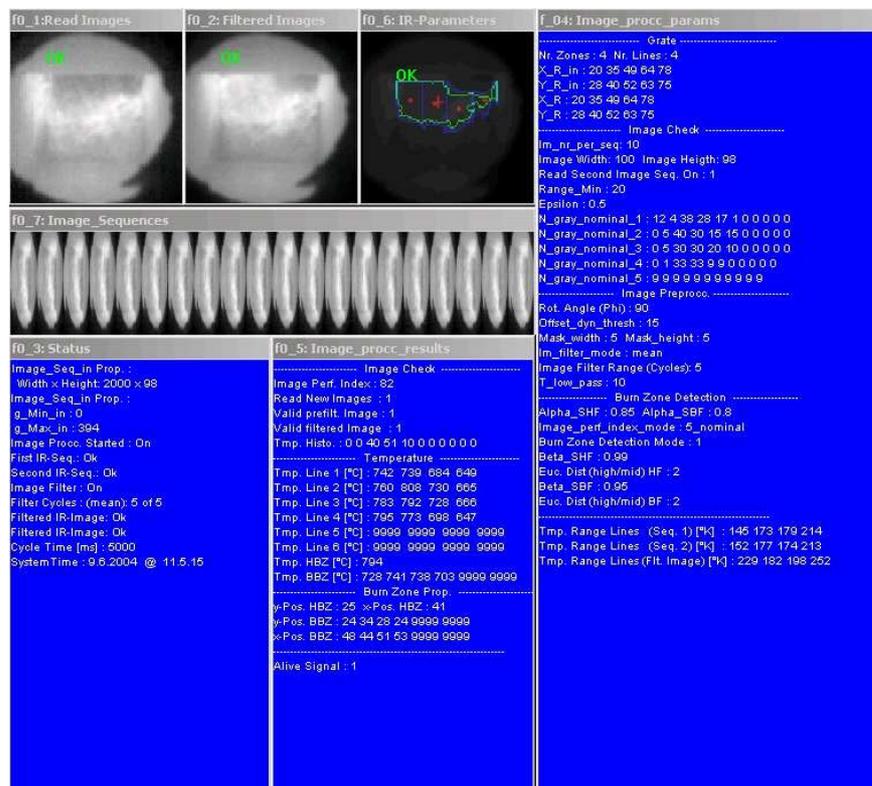


Bild 29: Kontrollfenster der IR-Bildauswertung

Developer-GUI Zur Anpassung der Bildverarbeitungsalgorithmen steht eine GUI zur Verfügung (Bild 30). Sie erlaubt es, die Parameter der Bildverarbeitung und Kenngrößenberechnung online anzupassen. Mit dieser GUI erfolgt die INSPECT-Anpassung an die individuellen Anlagenbedingungen.

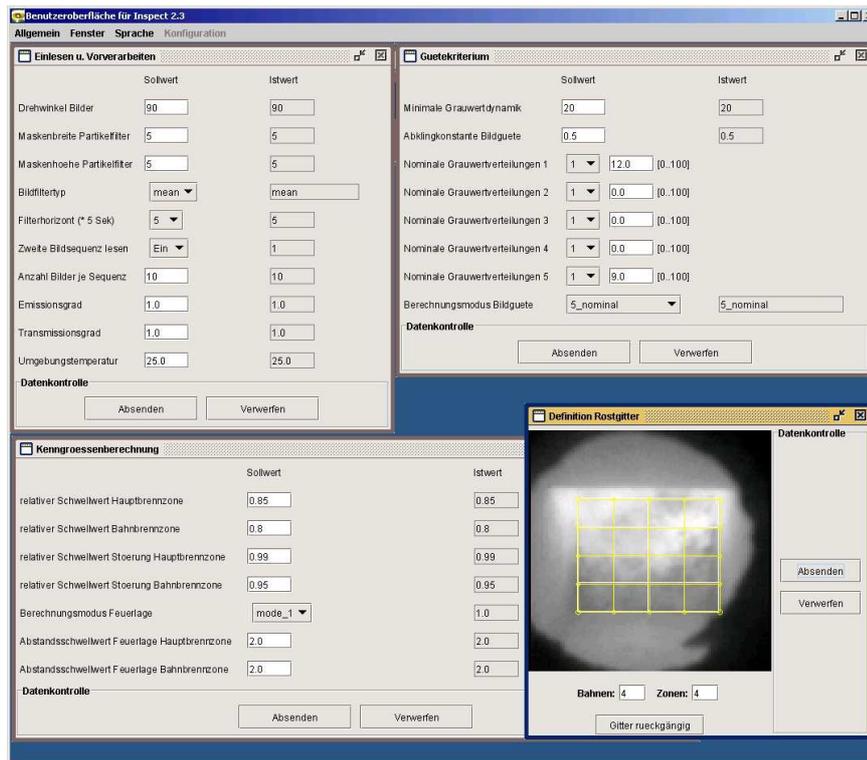


Bild 30: Graphische Schnittstelle der IR-Bildverarbeitung (Developer-GUI)

Monitor-GUI Die Monitor-GUI ist für die Darstellung der IR-Bilder in der Leitwarte der Anlage konzipiert (Bild 31). Neben dem vorverarbeiteten Bild und den darin eingezeichneten Kenngrößen kann auch der zeitliche Verlauf ausgewählter Kenngrößen dargestellt werden. Die Monitor-GUI ermöglicht dem Bedienpersonal so eine schnelle Übersicht über den aktuellen Zustand und die zeitliche Entwicklung der Verbrennung.

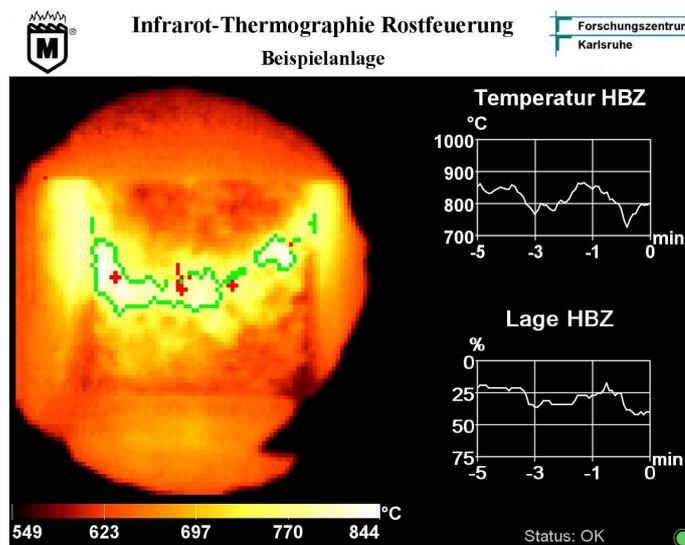


Bild 31: Graphische Schnittstelle der IR-Bildverarbeitung (Monitor-GUI)

Process-Control-Gateway Über den Process-Control-Gateway werden die ermittelten Kenngrößen online an das übergeordnete Prozessleitsystem übergeben.

Image-Record-Gateway Der Image-Record-Gateway (Bild 32) speichert die im INSPECT-Server vorliegenden Bilder für eine spätere offline Analyse mit einem Zeitstempel ab.

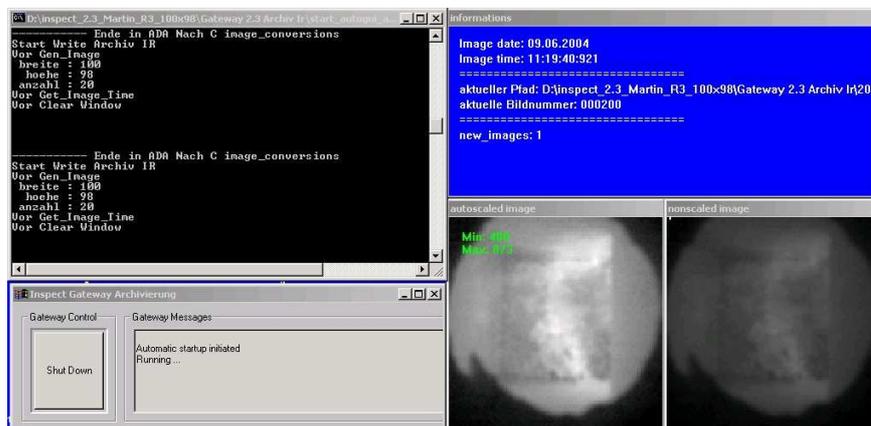


Bild 32: Image-Record-Gateway zur Archivierung von Infrarotbildern

5.3 Videobasierte INSPECT-Anwendung bei Rostfeuerungen

Eine Voraussetzung für die Deponierbarkeit von thermisch behandelten Abfällen ist die weitgehende Umsetzung der organischen Abfallbestandteile. Entsprechend liegen gesetzliche Vorschriften z.B. für den maximalen Kohlenstoff(rest)-Gehalt vor. Die Vorgaben lassen sich nur einhalten, wenn der Brennstoff nahezu vollständig ausbrennt. Zur Überwachung des Ausbrands bei der rostbasierten Feststoffverbrennung sind Videokameras geeignet.

Mit einer geeignet positionierten Kamera (siehe Bild 20) können die hinteren Brennbettzonen beobachtet werden. Es ist sinnvoll, die Auswertung der Videoaufnahmen rechnerbasiert durchzuführen. Der Brennbettzustand (der indirekt Rückschlüsse auf den Ausbrand erlaubt) lässt sich über eine online Bildauswertung durch charakteristische Kenngrößen beschreiben. So besteht ein Zusammenhang zwischen der Kenngröße Ausbrandreserve (sie beschreibt den Abstand zwischen dem Ende der Brennzone und dem Rostende) und dem Ausbrand. Über eine gezielte Beeinflussung von Stellgrößen wie die Primärluftmenge und -verteilung, die Vorschubgeschwindigkeit und ggf. die Schürung kann die Ausbrandreserve trotz schwankender Brennstoffeigenschaften im vorgegebenen Rostbereich gehalten werden.

Das Bild 33 zeigt eine Videoaufnahme vom Brennbettende einer Rostfeuerung. Im oberen Bildabschnitt liegt die Hauptbrennzone. Unmittelbar dahinter schließt sich der Ausbrandbereich an, der für die hier betrachtete Ausbrandüberwachung von Interesse ist. Im unteren Bildausschnitt ist das Rostende (Walzenrost) zu erkennen. An den Seiten des Bildes sind die Kesselwände erkennbar. Die dunklen Bereiche am oberen Bildrand sind auf Anbackungen zurückzuführen.

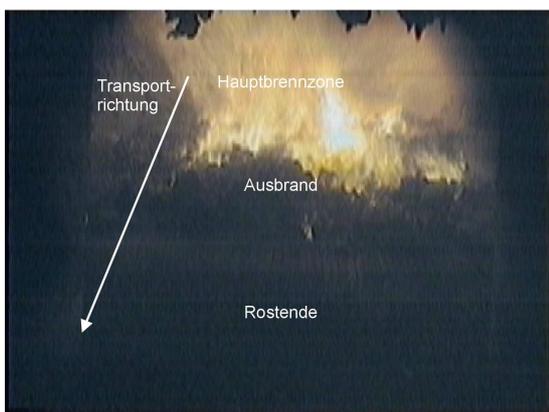


Bild 33: Videobild des Ausbrandbereichs

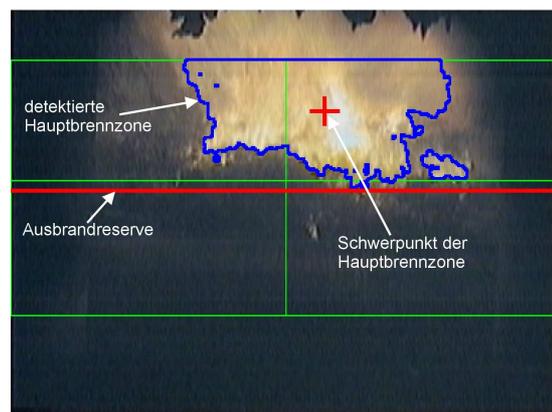


Bild 34: Ermittelte Kenngrößen für die Aufnahme von Bild 33

Die Berechnung der Bildkenngrößen basiert, wie auch bei der infrarotbasierten Bildanalyse, auf einem störungsbereinigten Analysebild. Das Analysebild wird zunächst einer geometrischen Transformation unterzogen, so dass die Kenngrößen die tatsächlichen Entfernungs- und Flächenverhältnisse wiedergeben. Außerdem wird entsprechend des Rostaufbaus ein

Gitter festgelegt. Im vorliegenden Fall besteht das Gitter aus vier Segmenten.

Das Bild 34 zeigt einige der aus Bild 33 berechneten Kenngrößen. Typischerweise werden für den Gesamtrost und für jede Bahn folgende Kenngrößen ermittelt:

- die Lage der Brennzone in Längs- und Querrichtung,
- die Fläche der Brennzone,
- die mittlere Strahlungsintensität der Brennzone und
- die Ausbrandreserve.

Komponenten des INSPECT-Systems zur videobasierten Ausbrandkontrolle

Ähnlich zur infrarotbasierten INSPECT-Anwendung besteht das INSPECT-System zur videobasierten Ausbrandkontrolle aus den Clients zur Bilderfassung, -darstellung und -speicherung sowie zur Übergabe der errechneten Kenngrößen an das Prozessleitsystem und deren Archivierung in einer Datenbank.

Unterschiede bestehen bei der Bildauswertung und damit auch bei den Kontrollfenstern (Bild 35). In einem Kontrollfenster werden die Rohbilder der Videokamera und ihre Grauwertdynamik angezeigt. Aufgrund der verzerrten Kamerasicht ist vor der Kenngrößenberechnung neben der Bildvorverarbeitung auch eine geometrische Transformation erforderlich.

Dem Anlagenpersonal ist das nicht entzerrte Bild jedoch meist vertrauter. Deshalb wird bei der Anzeige in der Leitwarte über die Monitor-GUI das nicht entzerrte aber vorverarbeitete Bild angezeigt (Bild 36). Neben dem störungsbereinigten Videobild werden auch ausgewählte Kenngrößen als Trendkurven angezeigt. Diese Darstellungen erleichtern eine manuelle Optimierung.

Derzeit erfolgt bei INSPECT 2.1 Video eine Übergabe ausgewählter Kenngrößen an das Prozessleitsystem. Das ermöglicht zum einen eine Speicherung der Kenngrößen (Monitoring der Verbrennung), zum anderen aber auch die gezielte automatische Optimierung über das Prozessleitsystem. Prinzipiell ist es auch möglich, direkt über das INSPECT-System z.B. eine Ausbrandregelung aufzubauen. In einer früheren Version von INSPECT wurde eine Ausbrandregelung bereits erfolgreich aufgebaut [4,31,32].

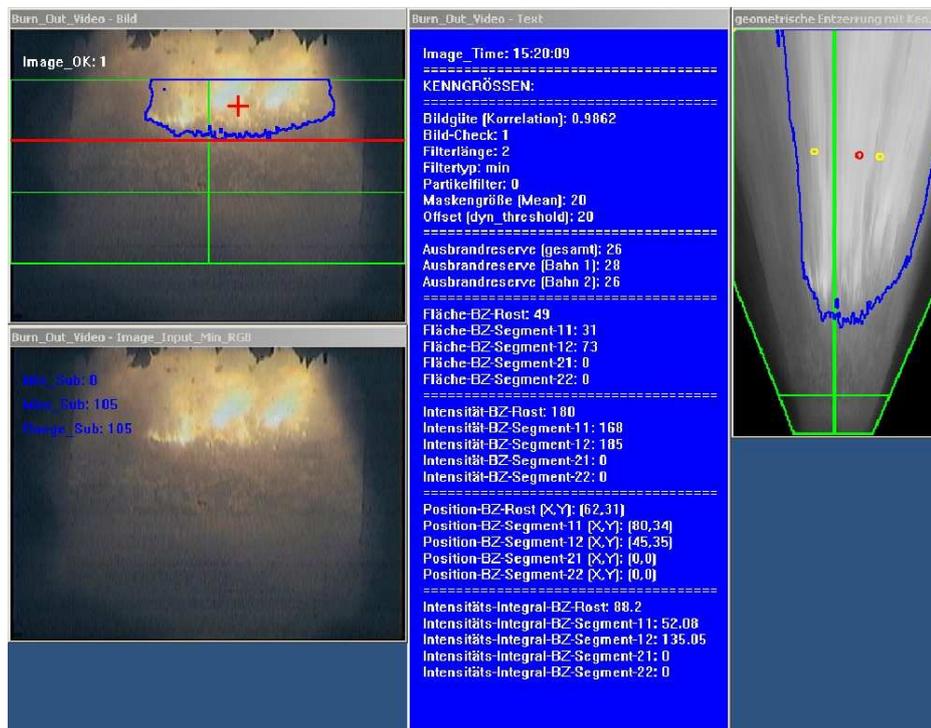


Bild 35: Kontrollfenster der Bildauswertung INSPECT 2.1 Video

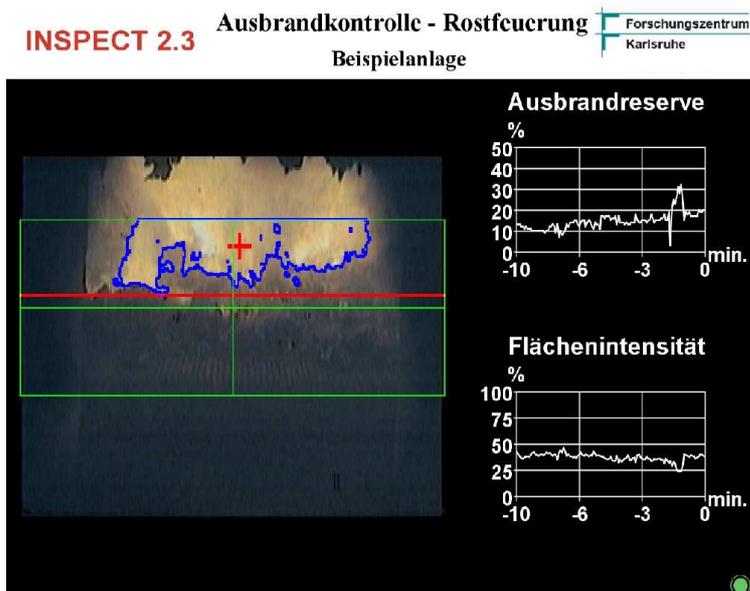


Bild 36: Wartenbild über Ausgabe der Monitor-GUI

6 Infrarotanalyse bei Drehrohren

6.1 Verbrennung im Drehrohr

Drehrohre werden zur Zementherstellung, zur Pyrolyse und zur Entsorgung von Sonderabfällen eingesetzt, s.a. [1, 27]. Neben anderen Prozessgrößen ist hierbei die Kenntnis der Temperaturen im Drehrohr für eine optimale Prozessführung von wesentlicher Bedeutung. Die Drehrohrtemperaturen lassen sich jedoch nur sehr eingeschränkt über konventionelle Thermoelemente erfassen, weshalb sich der Einsatz von Infrarotthermographie anbietet. Erste erfolgreiche Anwendungen von IR-Thermographie in Strategien zur gezielten Beeinflussung des Schlackeflusses, der die Haltbarkeit der kostenträchtigen Drehrohrauskleidung signifikant beeinflusst, werden in [62] beschrieben.

Zur Untersuchung der Sonderabfallverbrennung im Drehrohr steht am Forschungszentrum Karlsruhe die halbindustrielle Drehrohranlage THERESA zur Verfügung [5, 9, 55, 60, 61]. In Kooperation mit dem ITC-TAB und dem IKET⁵ werden an dieser Anlage auch IR-Untersuchungen durch das IAI durchgeführt. Ein Ergebnis dieser Arbeiten ist die Diplomarbeit *Entwicklung von infrarotbasierten Kenngrößen zur Beschreibung des Prozesszustands bei Drehrohröfen* [34].

Bei THERESA wird mit Hilfe der PYROINK-Kamera des IAI die Temperaturverteilung im Drehrohr erfasst. Die IR-Kamera befindet sich dabei am Drehrohrende (Bilder 37 und 38).

Das Bild 39 zeigt beispielhaft die im Drehrohr gemessene Temperaturverteilung, wobei das Drehrohrende durch einen großen und der Anfang durch einen kleinen Kreis markiert ist. In diesem Temperaturbild ist neben der zylindrischen Drehrohrwandung auch der dunkel erscheinende Aufgabeschacht (Schurre) erkennbar, über den die Festbrennstoffe eingebracht werden. Rechts oberhalb der Schurre befindet sich ein Ölbrenner, dessen leuchtende Flamme im Temperaturbild sichtbar ist.

Die Sicht der Kamera auf die zylindrische Drehrohrwand ist perspektivisch verzerrt. Zur einfacheren Analyse der Temperaturverteilung wird deshalb über eine geometrische Transformation eine virtuelle Draufsicht auf die Drehrohrwand ermittelt, siehe Bild 40. In dieser Darstellung sind die Temperaturgradienten meist besser erkennbar als im Originalbild.

⁵Institut für Kern- und Energietechnik, Forschungszentrum Karlsruhe

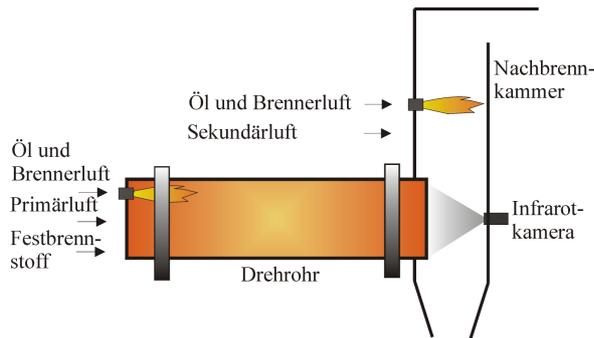


Bild 37: IR-Thermographie bei THERESA

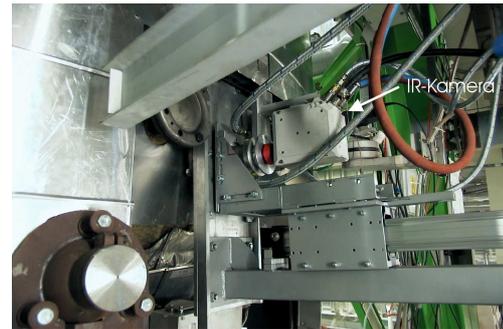


Bild 38: PYROINK-Kamera mit Rückzugsvorrichtung bei THERESA

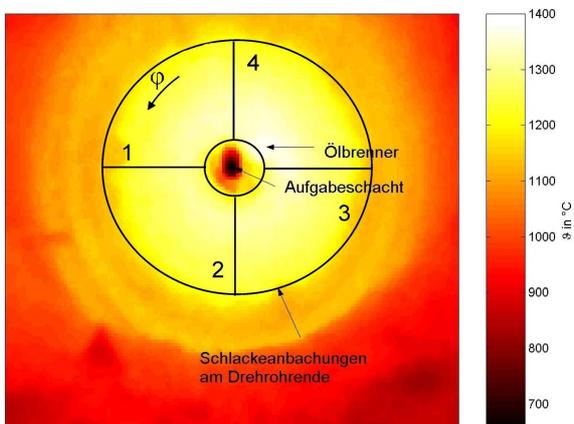


Bild 39: Wärmebild der Drehrohrinnenseite von THERESA (Kameraposition siehe Bild 37)

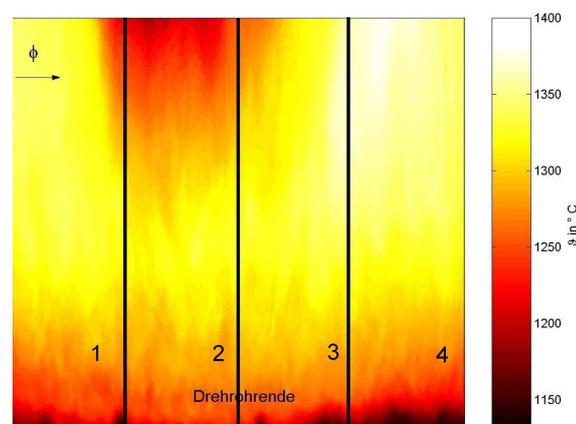


Bild 40: Geometrisch entzerrte Sicht auf die Drehrohrinnenseite

6.2 Infrarotbasierte INSPECT-Anwendung bei Drehrohren

Mit der Infrarotthermographie bei THERESA werden folgende Ziele verfolgt:

1. Analyse des Feststoffabbrands

In Analogie zu den Arbeiten bei Rostfeuerungen [56, 67] wird am IAI analysiert, wie die Betriebsbedingungen und den Ablauf der Feststoffverbrennung beeinflussen. Untersucht werden u.a. die Lage der Hauptbrennzone, der Zündpunkt und das Längstemperaturprofil im Feststoffbett.

2. Erkennung unvollständiger Verbrennungszustände

Bestimmte Brennstoffe besitzen einen so hohen Sauerstoffbedarf, dass die in das Drehrohr eingebrachte Luft nicht für eine vollständige Verbrennung ausreicht und Schadstoffe wie Ruß und Kohlenmonoxid entstehen. Für eine vollständige Umsetzung muss das Sauerstoffangebot in diesen Fällen schnell erhöht werden.

Im Gegensatz zu konventionellen Abgaskonzentrationsmessungen kann eine optische Erfassung der unverbrannten Komponenten z.B. über die Multispektralkamera (CO-Bereich) sehr rasch erfolgen. Es ist das Ziel über zweckmäßige Bildkenngrößen Regelungen aufzubauen, die die notwendigen Anpassungen schnell und automatisch durchführen.

3. IR-Messungen für ein THERESA-Wärmebilanzmodell

Am ITC-TAB und am IKET wird an Modellen für die Bilanzierung der Wärme- und Stoffströme gearbeitet. Zur Modellerstellung und Validierung müssen hierfür bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen die Drehrohrtemperaturen gemessen werden. Die Außentemperatur des Drehrohrs lässt sich über eine konventionelle IR-Kamera erfassen, die Temperaturmessung im Inneren des Drehrohrs erfolgt mit der IR-Kamera des IAI.

Infrarotbasierte Kenngrößen bei Drehrohrverbrennungen

Für die Untersuchungen an THERESA wurden am IAI Verfahren zur Auswertung von Drehrohr-IR-Aufnahmen entwickelt. Einige Verfahren wurden für eine Online-Auswertung in INSPECT integriert. In der derzeitigen Ausbaustufe lassen sich über INSPECT folgende Temperaturmessgrößen online erhalten:

- ein Längsprofil,
- ein Querprofil,
- ein freies Profil,
- ein Mittelwert über einem quadratischem Messfeld und
- zwei Kreisprofile sowie
- die statische und dynamische Bildgüte.

Die Lage aller Temperaturprofile ist über eine graphische Nutzerschnittstelle vorgebar (Bild 43). Die Lage des Längstemperaturprofils ist zwischen Drehrohranfang und -ende wählbar. Beim freien Temperaturprofil erfolgt die Messung entlang einer Geraden deren Anfangs- und Endpunkt vorzugeben sind. Über die GUI kann ein quadratisches Messfeld angegeben werden innerhalb dessen der Temperaturmittelwert bestimmt wird. Die Kreisprofile werden erfasst, weil über sie die Temperatur des ausfließenden Schlacke ermittelbar ist. Zusätzlich wird in INSPECT ein Bildgütesignal bestimmt, das auf einer Einzelbildbewertung beruht. Es dient der Erkennung von Verbrennungszuständen mit unverbrannten Komponenten.

INSPECT-Anwendung für Drehrohrverbrennungen

Das INSPECT-System (INSPECT 2.4 IAI) für Drehrohranwendungen besitzt neben der Berechnung der Temperaturkenngrößen und der Bildgüte z.Zt. folgende Funktionalitäten:

- Die Anzeige des aktuellen IR-Bilds und der Temperaturprofile auf dem INSPECT-Rechner. Das Bild 41 zeigt die entsprechenden Diagramme bzw. Kontrollfenster des INSPECT-Rechners.

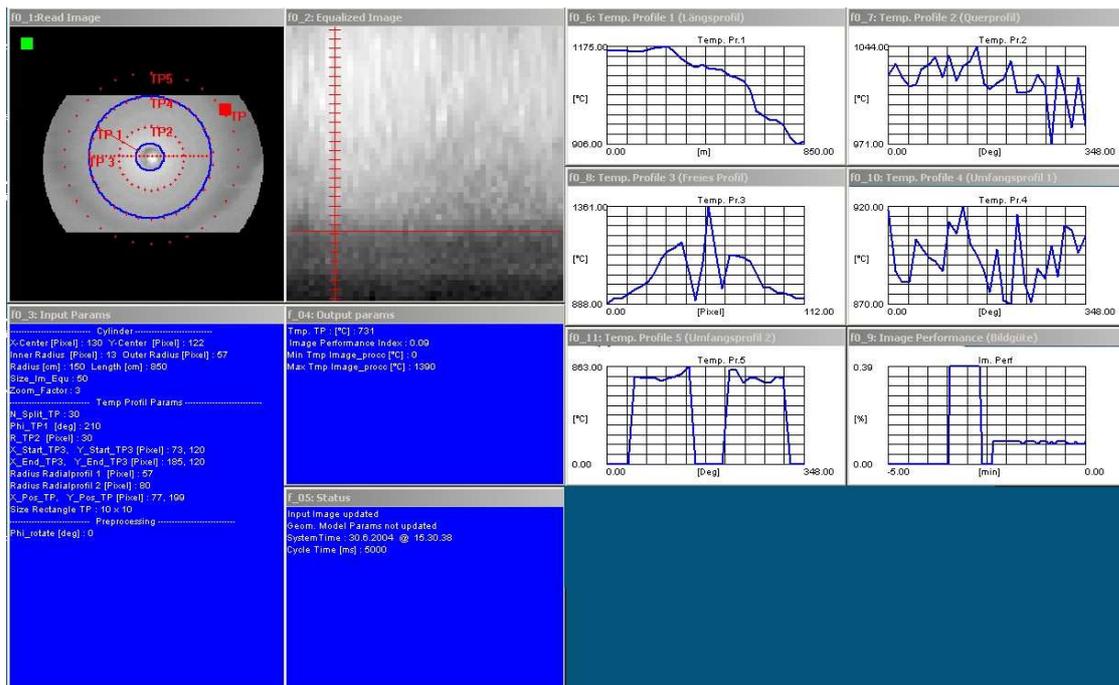


Bild 41: INSPECT-Anwendung Drehrohr; Kontrollfenster des INSPECT-Rechners

- Die Anzeige des IR-Bilds in der Leitwarte. Über einen peripheren Rechner, der über TCP/IP mit dem INSPECT-Rechner verbunden ist, wird das IR-Bild und ausgewählte Kenngrößen angezeigt. Konfiguriert ist die Darstellung der Bildgüte und des Längstemperaturprofils. Die IR-Bilder können über eine Auswahl von Farbtabellen in Pseudofarben dargestellt werden (Bild 42).
- Über eine graphische Schnittstelle können die Parameter des geometrischen Modells und der Temperaturmessung vorgegeben werden (Bild 43).
- Die o.g. Kenngrößen werden online über eine Datenbank auf einem peripheren Rechner archiviert.
- Alle IR-Aufnahmen werden für eine spätere Offline-Auswertung gespeichert.
- Das Bildgütesignal wird über eine analoge Stromschnittstelle zum Prozessleitsystem von THERESA übergeben.

Im Rahmen der zukünftigen Arbeiten zur Analyse des Feststoffabbrands sowie der Erkennung unvollständiger Verbrennungszustände sind neue zusätzliche Kenngrößen zu entwickeln und, sofern sie für eine Online-Optimierung des Prozesses sinnvoll nutzbar sind, auch in INSPECT zu implementieren.

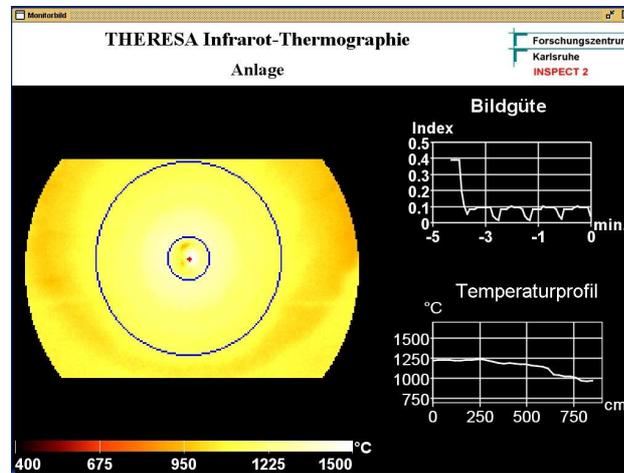


Bild 42: Anzeige in der Leitwarte via Monitor-GUI

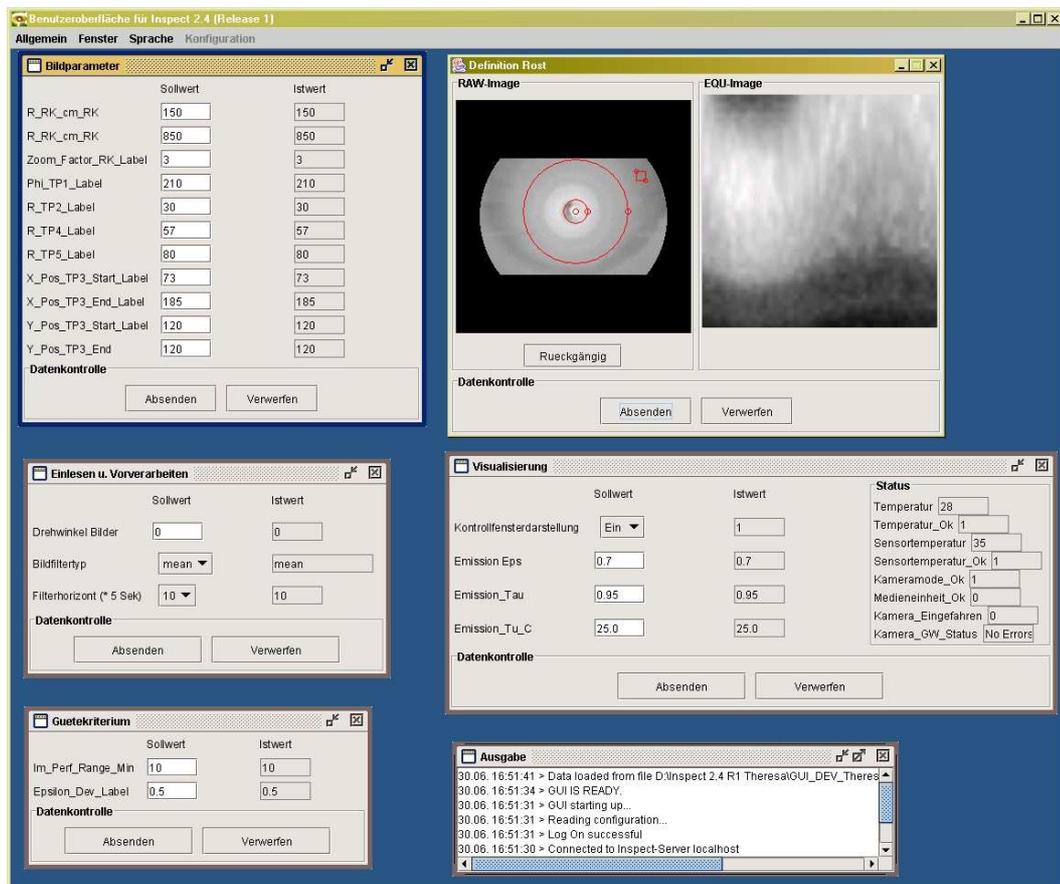


Bild 43: Developer-GUI zur Parametrierung der Bildauswertung

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Anwendung moderner Steuer- und Regelverfahren bei industriellen Verbrennungen steht u.a. die fehlende Kenntnis wichtiger Prozessgrößen entgegen. Über optische Messungen mittels Video- und Infrarotkameras, die den Verbrennungsprozess in seiner lokal unterschiedlichen Ausprägung berührungs- und rückwirkungsfrei erfassen können, lässt sich hier jedoch zumindest teilweise Abhilfe schaffen. Bislang werden Kameras überwiegend zur manuellen Überwachung eingesetzt. Das ist mit Nachteilen wie unterschiedlicher Interpretation und schwankender individueller Aufmerksamkeit verbunden, so dass eine objektive rechnergestützte Bildauswertung sinnvoll ist. Darüber hinaus erlaubt sie auch eine Einbindung der Kameras in die Prozessregelung.

Am IAI wurden Verfahren zur Online-Bildauswertung entwickelt und in INSPECT integriert. Hierzu wurden moderne Softwaremethoden genutzt die eine hohe Flexibilität und Anpassbarkeit bei gleichzeitig hoher Softwarezuverlässigkeit garantieren.

Für Rostfeuerungen die mit IR-Kameras beobachtet werden, wurden spezielle Auswerteverfahren entwickelt, in das INSPECT-System integriert und industriell eingesetzt. Die Brennbettanalyse liefert Kenngrößen die an das Prozessleitsystem übergeben, in einer Datenbank archiviert und über graphische Nutzerschnittstellen angezeigt werden können. Die Installation und Bedienung dieses INSPECT-Systems ist im INSPECT-Handbuch [35] beschrieben. Für Rostfeuerungen, bei denen über eine Videokamera das Ausbrandverhalten beobachtet wird, konnte eine weitere INSPECT-Applikation aufgebaut und ebenfalls industriell erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Auch für Drehrohranlagen wurde eine INSPECT-Applikation realisiert. Bei ihr werden IR-Aufnahmen von der Drehrohrinnenseite gespeichert und online ausgewertet sowie die errechneten Kenngrößen angezeigt und archiviert. Dieses INSPECT-System wurde im Rahmen einer Messkampagne ebenfalls erfolgreich eingesetzt.

Ein Ziel zukünftiger Arbeiten ist die Erweiterung der Algorithmen zur Bildgüte- und Kenngrößenberechnung für die bestehenden INSPECT-Anwendungen. Hier sollen die Erkenntnisse aus den im Rahmen von Forschungsvorhaben durchgeführten Messkampagnen aber auch die Erfahrungen der Industriepartner einfließen. So soll beispielsweise ein adaptives Verfahren zur Brennzonenerkennung integriert werden, für das ein Patent beantragt wurde [68].

Die Weiterentwicklungen der Kameratechnik erfordern zwar eine stete Anpassung der INSPECT-Schnittstellen sie ermöglichen aber auch neue Anwendungen. Gegenwärtig wird im Rahmen einer Diplomarbeit [17] untersucht, inwiefern sich mit Hilfe der Multispektralkamera des IAI die verbrennungsrelevanten Abgaskomponenten H_2O , CO_2 und CO im Brennraum lokalisieren lassen. Wenn dies gelingt, ist ein wesentlicher Schritt zur Entwicklung neuer Verfahren zur primärseitigen Schadstoffreduktion erfüllt. Die Grundidee für ein entsprechendes Verfahren wurde vom ITC-TAB und dem IAI bereits zum Patent angemeldet [22].

Literatur

- [1] BANK, M.: *Basiswissen Umwelttechnik: Wasser, Luft, Abfall, Lärm, Umweltrecht*. Vogel Verlag, 3. Aufl., 1995.
- [2] BECKMANN, M.; SCHOLZ, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. *BWK, Bd. 46, Nr. 5* (1994), S. 218–229.
- [3] BERNHARD, F. (Hrsg.): *Technische Temperaturmessung*. Springer Verlag, 2004.
- [4] BLOY, U.: *Entwicklung eines Fuzzy-Controllers zum Einsatz in der Ausbrandsteuerung einer Müllverbrennungsanlage*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1996.
- [5] BLUME, H.: Das THERESA-Projekt: Neue Wege der Abfallverbrennung. *AGF-Forschungsthemen: Umwelt* (1995), S. 14–15.
- [6] BREKENFELD, A.: *Ein Verfahren zur Flammendiagnose durch Bildauswertung*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1990.
- [7] BUSCH, M.; RAMPP, F.; MARTIN, J.; HORN, J.: Verbesserung des Verbrennungs-, Ausbrands- und Emissionsverhaltens einer Abfallverbrennungsanlage mittels kamerageführter Feuerleistungsregelung. *VGB Kraftwerkstechnik* 73 (1993) 7, S. 614–618.
- [8] DAIMLER, P.; SCHÄFERS, W.; HARTENSTEIN, H.-U.: Using Infrared Cameras, Fuzzy Logic and Acoustic Temperature Measurement to Improve Combustion in MWCs. *Proc. of the Asian-North American Solid Waste Management Conference, ANACON, 1998* (1998), S. 184–195.
- [9] DITTRICH, H.; MALCHER, L.; SEIFERT, H.: THERESA - ein neues Forschungsinstrument zur Verbrennung spezieller Abfälle. *20. Deutscher Flammentag, Essen, 4.-5. September 2001, VDI-Berichte, Nr. 1629* (2001), S. 397–402.
- [10] EBERT, V.; FITZER, J.; GERSTENBERG, I.; PLEBAN, K.-U.; PITZ, H.; WOLFRUM, J.; JOCHEM, M.; MARTIN, J.: Simultaneous laser-based in situ detection of oxygen and water in a waste incinerator for active combustion control purposes. *27. Symposium (Int.) on Combustion* (1998), S. 1301–1308.
- [11] EBERT, V.; FITZER, J.; PLEBAN, K.-U.; WOLFRUM, J.; MARTIN, J.; RAMPP, F.: IR-Spektroskopie zum in-situ-Nachweis von Sauerstoff und der Bestimmung der Temperatur in Rostfeuerungen. *VDI-Berichte, Nr. 1193* (1995), S. 349–356.
- [12] EBERT, V.; MEIENBURG, W.; SCHULER, F.; WOLFRUM, J.; MARTIN, J.; RAMPP, F.: In-situ Messmethoden für die Müllverbrennung mit Hilfe der Infrarottechnologie. *38. Darmstädter Seminar Abfalltechnik, Modellbildung und Intelligente Steuerungssysteme in der Umwelttechnik* (1994), S. 99–116.
- [13] EFFENBERGER, H.: Dampferzeuger und Feuerungen. *BWK 50, Nr. 4* (1998), S. 107–113.
- [14] EFFENBERGER, H.: *Dampferzeugung*. Springer-Verlag, 2000.
- [15] FISCHER, W.: *Flammenanalyse mittels tomographischer und multispektraler Bildverarbeitung*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1992.

- [16] GOMMLICH, A.: *Infrarotthermographie bei industriellen Verbrennungsprozessen*. Diplomarbeit, HTW Dresden, 2002.
- [17] GOMMLICH, A.: *Kamerabasierte Analyse ausgewählter Gaskomponenten bei Verbrennungen*. Diplomarbeit in Bearbeitung, Universität Karlsruhe, 2004.
- [18] HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I.: Textural Features for Image Classification. *IEEE Transact. on Systems, Man and Cybernetics* 3 (1973) 6, S. 610–621.
- [19] HÄRTEL, W.: *Zur Auswertung von Flammenbildern technischer Flammen*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1974.
- [20] HIERL, T.: Hochauflösende Thermobilddetektoren - Ein Quantensprung für die bildgebende Industrie-Messtechnik. *Beitragsmanuskript, 16. Heidelberger Bildverarbeitungsforum, 6. März 2001, Universität Heidelberg* (2001), S. 1–6.
- [21] HIROTA, K.; SOLOMON, H.: *A combustion control system for a refuse incineration plant*. Industrial Applications of Fuzzy Technology, Hrsg.: Hirota, K., Springer Verlag, 1993.
- [22] HUNSINGER, H.; KELLER, H.; ZIPSER, S.; FREY, H.-H.: *Vorrichtung und Verfahren zur Optimierung des Abgasausbrandes in Verbrennungsanlagen*. dt. Patentanmeldung 11.10.2003, Verfahren laufend, 2003.
- [23] HUNSINGER, H.; VEHLow, J.; PETERS, B.; FREY, H.: Performance of a pilot waste incinerator under different air/fuel ratios. *Proc. of the Internat. Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Proc. (IT'3, Portland, Oreg., May 8-12, 2000)* CD (2000).
- [24] JAESCHKE, A.; KELLER, H.: Innovative Prozessleittechnik in der thermischen Abfallbehandlung. *e & i, ÖVE /Springer Wien, 111, Nr. 9* (1994), S. 463–469.
- [25] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Verlag, 1997.
- [26] JÄHNE, B.; MASSEN, R.; NICKOLAY, B.; SCHARFENBERG, H.: *Technische Bildverarbeitung-Maschinelles Sehen*. Springer Verlag, 1995.
- [27] JÄRVENSIVU, M.; SAARI, K.; JÄMSÄ-JOUNELA, S.-L.: Intelligent control system of an industrial lime kiln process. *Control engineering practice* 9 (2001), S. 589–606.
- [28] JUNIPER, L.; WALL, T.: Combustion of particles in a large pulverized Brown Coal. *Flame, Combustion and Flame* 39 (1980), S. 69–81.
- [29] KELLER, H.; BENKLE, M.: Model driven architecture als Basis zur modellbasierten automatischen Codegenerierung. *Model Driven Architecture in der Praxis* (2000), S. 322–327.
- [30] KELLER, H.; HENNING (HRSG.), P.: *Ada, Taschenbuch Programmiersprachen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verl., 2004.
- [31] KELLER, H.; KUGELE, E.; JAESCHKE, A.; ALBERT, F.: Ein Videobild-gestütztes System zur Ausbrandoptimierung in der thermischen Abfallbehandlung. *Wasser und Boden, 49, Nr. 6* (1997), S. 15–17.

- [32] KELLER, H.; KUGELE, E.; MÜLLER, B.: Innovative Automatisierungsverfahren zur Optimierung der thermischen Abfallbehandlung. *45. IWK, Tagungsband* (2000), S. 322–327.
- [33] KERSTEN, M.; MATTHES, J.; FOU DA, C.; ZIPSER, S.; KELLER, H.: Customizing UML for the Development of Distributed Reactive Systems and Ada95 Code Generation. *Ada User Journal* 23 (2002) 3, S. 175–182.
- [34] KRAFFT, T.: *Entwicklung von infrarotbasierten Kenngrößen zur Beschreibung des Prozesszustands bei Drehrohröfen*. Diplomarbeit, FH-Karlsruhe, 2003.
- [35] KRAKAU, T.; FOU DA, C.; KELLER, H.; KERSTEN, M.; MATTHES, J.; ZIPSER, S.: Systemhandbuch Inspect 2.1. Softwaredokumentation, Ci-Tec GmbH und FZ Karlsruhe, 2002.
- [36] MANCA, D.; ROVAGLIO, M.: Infrared thermographic image processing for the operation and control of heterogeneous combustion chambers. *Combustion and Flame* 130 (2002), S. 277–297.
- [37] MATTHES, J.; KELLER, H.; HEKER, W.-D.; KERSTEN, M.; FOU DA, C.: Zuverlässige Software durch den Einsatz von UML, MDA und der Programmiersprache Ada. *Lecture Notes in Informatics (LNI)-Proc. P36* (2003), S. 167–178.
- [38] MAURER, M.: *Feuerführung in Müllverbrennungsanlagen mit wassergekühlten Vorschubrosten*. Shaker Verlag, 2000.
- [39] MEILE, E.; SCHREINER, R.: Gezielte Prozessbeeinflussung durch Aufschalten einer Infrarotkamera am Beispiel der MVA Winterthur. *Entsorgungspraxis 5 / 2002* (2000), S. 26–30.
- [40] MÜLLER, B.: *Innovative Prozeßführung in der thermischen Abfallbehandlung mit Künstlichen Neuronalen Netzen*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2000.
- [41] MÜLLER, B.; KELLER, H.: Neural Networks for On Line Estimation of the Heating Value in Thermal Treatment of Waste. *New frontiers in computational intelligence and its applications: Proc. of a CIMCA-Int. Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, Wien 17.-19. February 1999* (1999), S. 68–75.
- [42] MÜLLER, B.; KELLER, H.: Entwicklung von Algorithmen zur Prozessoptimierung mittels Infrarotthermographie, Stand 2000. Internbericht, Forschungszentrum Karlsruhe, 2000.
- [43] MVTEC SOFTWARE GMBH: machine vision technologies. <http://www.mvtec.de/> (2004).
- [44] OEST, L.; BURKHARDT, H.: *Anwendung von Bildverarbeitungs- und automatischen Bildauswertungsmethoden zum Flammenmonitoring und zur Flammenregelung*. Abschlussbericht DFG-Projekt BU-413/11-1, 1995.
- [45] OEST, L.; BURKHARDT, H.: Application of a New Iterative Minimizing Method to Vision-Guided Flame Control. *Proc. of the Fourth Meeting of the European Concerted Action on Process Tomography, ECAPT, Process Tomography-A Strategy for Industrial Exploitation, Bergen, Norway* (1995), S. 92–101.

- [46] RAWLINS, W.; LAWRENCE, W. G.; MARINELLI, W. J.; ALLEN, M.: Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning fabry-perot filter. *Sixth International Microgravity Combustion Workshop, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, NASA/CP-2001-21026* (2001), S. 57–60.
- [47] ROGERS, J.; SAROFIM, A.; HOWARD, J.; WILLIAMS, G.; FINE, D.: Combustion characteristics of simulated and shredded refuse. *Fifteenth Symposium (International) on Combustion* (1974), S. 1137–1148.
- [48] RUSS, J. C.: *The image processing handbook*. CRC Press, IEEE Press, 3 Aufl., 1998.
- [49] SATTLER, K.; EMBERGER, J.: *Umweltschutz / Entsorgungstechnik: Behandlung fester Abfälle*. Vogel Verlag, 3. Aufl., 1992.
- [50] SCHLESSINGER, M.: *Infrared technology fundamentals*. Marcel Deccer Inc., 2 Aufl., 1994.
- [51] SCHOLZ, R.; BECKMANN, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen. *VDI-Berichte, Nr. 895* (1991), S. 69–138.
- [52] SCHREINER, R.: Feuerungsregelung von MVAs mit Signalen aus einer flächenhaften Brennbett-Temperaturerfassung mittels Infrarotkamera. Poster, 20. Deutscher Flamentag, Essen 2001, 2001.
- [53] SCHULER, F.; RAMPP, F.; MARTIN, J.; WOLFRUM, J.: TACCOS-A thermography-assisted combustion control system for waste incinerators. *Combustion and Flame* 99 (1994), S. 431–439.
- [54] SCHUMACHER, W.; SCHÄFERS, W.: Regelung der Feuerungsleistung bei Müllverbrennungsanlagen. *Entsorgungspraxis, Band 9, Heft 6* (1991), S. 312–314.
- [55] SEIFERT, H.; DITTRICH, H.; MALCHER, L.: THERESA - ein neues Forschungsinstrument zur Verbrennung spezieller Abfälle. *Forschungszentrum Karlsruhe - Nachrichten, Nr.32* (2000), S. 125–131.
- [56] SEIFERT, H.; MERZ, D. (Hrsg.): *Primärseitige Stickoxidminimierung als Beispiel für die Optimierung des Verbrennungsvorgangs in Abfallverbrennungen*. Abschlussbericht zum HGF-Strategiefonds-Projekt; FZK 6944, FZ Karlsruhe, 2003.
- [57] SOILLE, P.: *Morphologische Bildverarbeitung*. Springer Verlag, 1998.
- [58] STEPHAN, V.; DEBES, K.; GROSS, H.-M.: Farbbildbasierte Flammendiagnose zur Führung von Kohlestaubfeuerungsprozessen. *VDI-VDE-Fachtagung Computational Intelligence, Baden-Baden 11./12. 5. 2000, VDI-Berichte 1526 ISBN: 3-18-681526-9* (2000), S. 551–556.
- [59] SUTINEN, R.; OLLUS, M.; LILJA, R.: Digital image processing for burning control. *Pulp & Paper Canada* 88:7 (1987), S. 59–63.
- [60] TEICHERT, H.: *Entwicklung und Einsatz von Diodenlaser-Spektrometern zur simultanen in-situ Detektion von CO, O₂ und H₂O in technischen Verbrennungsprozessen*. Dissertation, Universität Heidelberg, 2003.

- [61] TEICHERT, H.; FERNHOLZ, T.; KOETH, J.; SEIFERT, H.; WOLFRUM, J.; EBERT, V.: Schneller optischer In-situ-Nachweis von CO in Modellfeuerungsanlagen des Forschungszentrums Karlsruhe. *16. Externes TECFLAM Seminar, Verbundprojekt Combustion Control and Simulation, 5.11.2002 Karlsruhe* (2003), S. 30–42.
- [62] VOSTEEN, B.; BEYER, J.; BONKHOFER, T.: Simultaneous inner and outer thermography of rotary kilns for hazardous waste incineration - controlled protective slagging results in a considerable prolonging of refractory life. *VGB Power Tech Nr.9* (2002), S. 71–77.
- [63] WALTER, M.: *Untersuchung von Verfahren zur kontinuierlichen Analyse der Müllverbrennung in Rostfeuerungen mit Hilfe der Infrarotthermographie*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1996.
- [64] WALTER, M.; KREMER, H.; SCHÄFERS, W.; LIMPER, K.: Bestimmung und Auswertung der Temperaturverteilung von Verbrennungsgut auf dem Verbrennungsrost von Müllverbrennungsanlagen. *VGB Kraftwerkstechnik* 76 (1996) 1, S. 37–45.
- [65] WANG, S.; WU, Y.; MAO, Z.: Flame detection and temperature measurement system for cement rotary kiln. *Proc. of the Int. Conf. on Energy and the Environment, 11.-13. December 2003, Shanghai* (2003).
- [66] ZIPSER, S.: *Beitrag zur modellbasierten Regelung von Verbrennungsprozessen*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, August 2004, 2004.
- [67] ZIPSER, S.; GOMMLICH, A.; MATTHES, J.; KELLER, H.; FOU DA, C.; SCHREINER, R.: On the optimization of industrial combustion processes using infrared thermography. *Proc. of the 23rd IASTED int. conference on modelling, identification, and control; 23.-25. February 2004, Grindelwald, ACTA-Ress, Anaheim, CA* (2004), S. 386–391.
- [68] ZIPSER, S.; KELLER, H.: *Verfahren zur Erkennung und Identifikation von Brennzonen*. dt. Patentanmeldung, DE 103 02 175 A1, 2003.
- [69] ZIPSER, S.; KELLER, H.; KUGELE, E.; MATTHES, J.; FOU DA, C.: Einsatz der Infrarotthermographie zur Optimierung der Prozessführung an der MVA Ludwigshafen. Internbericht, GML, Lurgi AG und FZ Karlsruhe, 2002.
- [70] ZIPSER, S.; KELLER, H.; KUGELE, E.; MATTHES, J.; FOU DA, C.; KERSTEN, M.: Dokumentation der Bildverarbeitungsalgorithmen für die Infrarotthermographie. Internbericht, Martin GmbH und FZ Karlsruhe, 2002.