

Berührungslose Temperaturmeßtechnik für industrielle Prozesse

Dr.-Ing. Frank Nagel, Dr.-Ing. Manfred Zimmerhackl, Prof. Dr.-Ing. Günter Hofmann,
DIAS Angewandte Sensorik GmbH,
Dr.-Ing. Helmut Budzier, Technische Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik und
DIAS Angewandte Sensorik GmbH

Die berührungslose Temperaturmeßtechnik findet immer mehr Verbreitung in der industriellen Prozeßmeßtechnik. Dazu tragen neben neuen Geräteentwicklungen auch die in einer Übersicht dargestellten vereinheitlichten Kenngrößen für Strahlungsthermometer bei, die dem Anwender eine bessere Vergleichbarkeit und Einsatzvorbereitung ermöglichen. Der Emissionsgradeinfluß läßt sich auf Grund der großen Applikationserfahrungen immer besser beherrschen und anwendungsspezifische Gerätelösungen ermöglichen viele neue Anwendungsgebiete, von denen einige beispielhaft beschrieben werden.

1 Einleitung

Immer mehr Industriebereiche erkennen die Vorteile der berührungslosen Temperaturmeßtechnik und lösen herkömmliche berührende Temperaturmeßgeräte durch Pyrometer ab. Dazu hat ein breites Angebot ausgereifter Strahlungsthermometer, Zeilenkameras und Wärmebildgeräte beigetragen. Darüber hinaus sind in zunehmendem Maße auch kundenspezifische Lösungen für bestimmte Branchen entwickelt worden, die den Einsatz der berührungslosen Temperaturmeßtechnik überhaupt erst ermöglicht haben. Es ist also sowohl eine breitere Anwendung der berührungslosen Temperaturmeßtechnik als auch eine Zunahme speziell angepaßter Lösungen zu beobachten.

Nach der kurzen Darstellung grundlegender technischer Parameter von Geräten zur berührungslosen Temperaturmessung und Bemerkungen zum Emissionsgradeinfluß sollen im folgenden ausgewählte Beispiele kundenspezifischer industrieller Branchenlösungen dargestellt werden.

2 Grundlegende Geräteparameter

Unterstützung im Verständnis und der Applikation vermittelt die VDI/VDE-Richtlinie 3511, Blatt 4 „Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie“ [1]. In Blatt 6 zu dieser Richtlinie erfolgte nun eine wichtige Ergänzung, die angibt, durch welche technischen Daten ein Strahlungsthermometer charakterisiert werden sollte. Diese Daten verbessern die Vergleichbarkeit und ermöglichen dem Anwender eine bessere technische Auslegung und Kontrolle seiner Meßeinrichtung. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die bei Strahlungsthermometern anzugebenden meßtechnischen Daten. Weiterhin sind in Blatt 6 obiger Richtlinie wichtige Hinweise zur „Erhaltung der Spezifikation von Strahlungsthermometern“ enthalten, die sich vor allem an industrielle Anwender richten und Störungen vermeiden helfen sollen. Hingewiesen wird insbesondere auf Reinhaltung des Objektivs, Vermeidung von unzulässigen Umgebungstemperaturen bzw. Temperaturschocks, Wasserschäden und mechanischen Beschädigungen.

Bei Infrarot-Bildgeräten und -Linienkameras sind neben den Parametern nach Tabelle 1 weitere technische Daten von Bedeutung, die das räumliche Abbildungs- und Auflösungsvermögen beschreiben [2].

3 Emissionsgradeinfluß

Die größte Hemmschwelle für den Einsatz berührungsloser Temperaturmeßtechnik ist nach wie vor der Emissionsgrad, da vielen potentiellen Anwendern Erfahrungen im Umgang damit fehlen. Das daraus resultierende mangelnde Vertrauen in die pyrometrischen Meßmethoden ist jedoch oft unbegründet. Jahrzehntelange Erfahrungen bei den Anbietern und Spezialisten sowie die Vielfalt der erfolgreich gelösten Applikationen haben dazu geführt, daß von zahlreichen Materialien deren Emis-

onsverhalten bekannt ist. Dennoch darf mit dem Emissionsgradeinfluß nicht sorglos umgegangen werden, da er sehr oft die Ursache für Erfolg oder Mißerfolg einer Applikation ist. Gleichung (1) gibt den relativen Temperaturmeßfehler als Funktion der relativen Emissionsgradabweichung an [3]:

$$\frac{\Delta T_o}{T_o} = \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{T_U}{T_o} \right)^b \right] \frac{\Delta \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \quad (1)$$

mit der Temperatur des Meßobjekts T_o , der Umgebungstemperatur T_U und dem Bandemissionsgrad ε_b und

$$b \approx \frac{c_2}{\lambda_{eff} T_m} \quad (2)$$

mit der Planckschen Strahlungskonstanten c_2 , der effektiven Meßwellenlänge λ_{eff} und der mittleren Meßbereichstemperatur T_m .

Mit Gleichung (2) läßt sich der Exponent bzw. Faktor b abschätzen, der die spektralen Eigenschaften des Pyrometers berücksichtigt. Für Pyrometer mit schmalen Spektralbereich kann man die effektive Meßwellenlänge näherungsweise mit Gleichung (3) ermitteln.

$$\lambda_{eff} \approx \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{2} \quad (3)$$

Für ein ideales Gesamtstrahlungs-pyrometer wird $b = 4$. Liegt die Meßtemperatur genügend hoch über der Umgebungstemperatur, kann man deren Einfluß vernachlässigen. Der relative Temperaturmeßfehler beträgt in diesem Falle ein Viertel des relativen Emissionsgradfehlers. Vorsicht ist insbesondere bei sehr niedrigem bzw. instabilen Emissionsgrad geboten. Hierbei ist die Inanspruchnahme eines Spezialisten zur Abklärung anzuraten.

Aus den Gleichungen (1) und (2) wird auch deutlich, daß der Emissionsgradeinfluß generell mit kürzer werdendem Wellenlängenbereich des Meßgerätes sinkt. Diesem Umstand tragen neuere Meßgeräteentwicklungen Rechnung, indem kurzwelligere Spektralbereiche für pyrometrische Messungen angeboten werden.

4 Applikationsbeispiele

4.1 Strahlungs-pyrometer in Vakuum-Prozessen

In vielen Halbleiterfertigungs- und anderen Bearbeitungsprozessen unter Vakuumbedingungen ist die Oberflächentemperatur eine wesentliche Einflußgröße. Entscheidende Voraussetzung für ihre strahlungs-pyrometrische Messung ist die Kenntnis der Strahlungseigenschaften der verwendeten Substrate und Schichten und die daraus resultierende Auswahl angepaßter Meßwellenlängen, Gerätesysteme und Signalverarbeitungsstrategien. Besonders Schichtdicken- und Temperaturabhängigkeiten der spektralen Strahlungseigenschaften von dünnen Halbleiter- bzw. Metallschichten müssen berücksichtigt werden.

Neben den Meßobjekteigenschaften stellt die infrarot-optische Zugänglichkeit des Meßobjektes ein typisches Problem für Vakuum-Rezipienten dar. Meist erfolgt die Strahlungsmessung durch Schaugläser (Quarzglas bis ca. 2,5 μm , Saphir bis 5 μm , ZnSe bis 15 μm Meßwellenlänge). Problematisch ist deren Einsatz bei Bearbeitungsprozessen, bei denen eine Bedampfung des Fensters erfolgt. Abhilfe können zusätzliche auswechselbare Schutzscheiben bzw. Folien oder geeignet angeordnete Schutzgasdüsen bringen. Unerlässlich in diesen Einsatzbereichen ist die regelmäßige Kontrolle des Bedampfungszustandes der Fenster z.B. durch Kontrollmessungen an speziellen Testsubstraten. Alternativ zu

den Schaugläsern stehen auch Lichtwellenleiter mit Vakuumdurchführung und speziellen bedampfungsgeschützten Lichtleitoptiken zur Verfügung.

Die Vielfalt der eingesetzten Substrate, Beschichtungsmaterialien und Vakuumkammern erfordert häufig angepaßte Pyrometerlösungen, die spezielle Optiken, Meßwellenlängen, Ausgangssignale und Softwareschnittstellen umfassen. In Abbildung 1 ist ein realisiertes Beispiel dargestellt.

Meßtechnische Daten (Bemerkungen)	Anzugebende Randbedingungen	Beispielangaben
Meßbereich (Bereich, in dem die Meßunsicherheit eingehalten wird)		-30 °C bis 350 °C
Meßunsicherheit	Umgebungstemperatur des Meßgerätes und Meßtemperatur	0,5 K bei T_u von 10 °C bis 50 °C und Meßtemperatur von 100 °C oder 0,2 K \pm 1 % des Meßwertes bei T_u von 25 °C und Meßtemperatur von 0 °C bis 100 °C
Temperaturdrift	Bezugseigentemperatur des Meßgerätes	0,02 K/K (25 °C) oder 0,2 %/K (25 °C)
Langzeitstabilität	Meßtemperatur Eigentemperatur Einstellzeit	0,1 K/Monat bei Meßtemperatur = 50 °C, Eigentemperatur = 25 °C und Einstellzeit = 1 s
Wiederholbarkeit	Umgebungstemperatur Meßtemperatur Einstellzeit	0,2 K über 24 h, Umgebungstemperatur = 15 °C, Meßtemperatur = 50 °C, Einstellzeit = 1 s
Rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD) (bezogen auf den Effektivwert des Rauschens)	Meßtemperatur Einstellzeit	0,2 K (20 °C, 0,25 s)
Spektralbereich	von 50 % Abfall zu 50 % Abfall, oder Mittenwellenlänge und Halbwertsbreite (HWB)	8 bis 14 μ m oder 3,9 μ m, HWB 0,15 μ m
Meßfeld / Meßfeldgröße	prozentualer Abfall des Strahlungswertes, Entfernung oder Verhältnis Abstand zu Meßfeld	5 mm \varnothing (90 %) bei 500 mm Abstand oder Distanzverhältnis 120:1 (95 %) bei 1000 mm Abstand
Einstellzeit	Temperatursprung (Anfangs- und Endwert), relative Annäherung an Endwert	0,5 s (25 °C, 100 °C, 90 %)
Erfassungszeit (Meßwertangabe kann zu einem anderen Zeitpunkt erfolgen)	wie bei Einstellzeit	0,5 s (25 °C, 100 °C, 90 %)
Zulässiger Umgebungstemperaturbereich (Bereich, in dem das Meßgerät betrieben werden darf)		10 °C bis 50 °C
Zulässiger Lagertemperaturbereich (Bereich, in dem das Meßgerät gelagert werden darf)		-20 °C bis 80 °C

Tabelle 1: Meßtechnische Daten für Strahlungsthermometer nach VDI/VDE 3511, Blatt 6

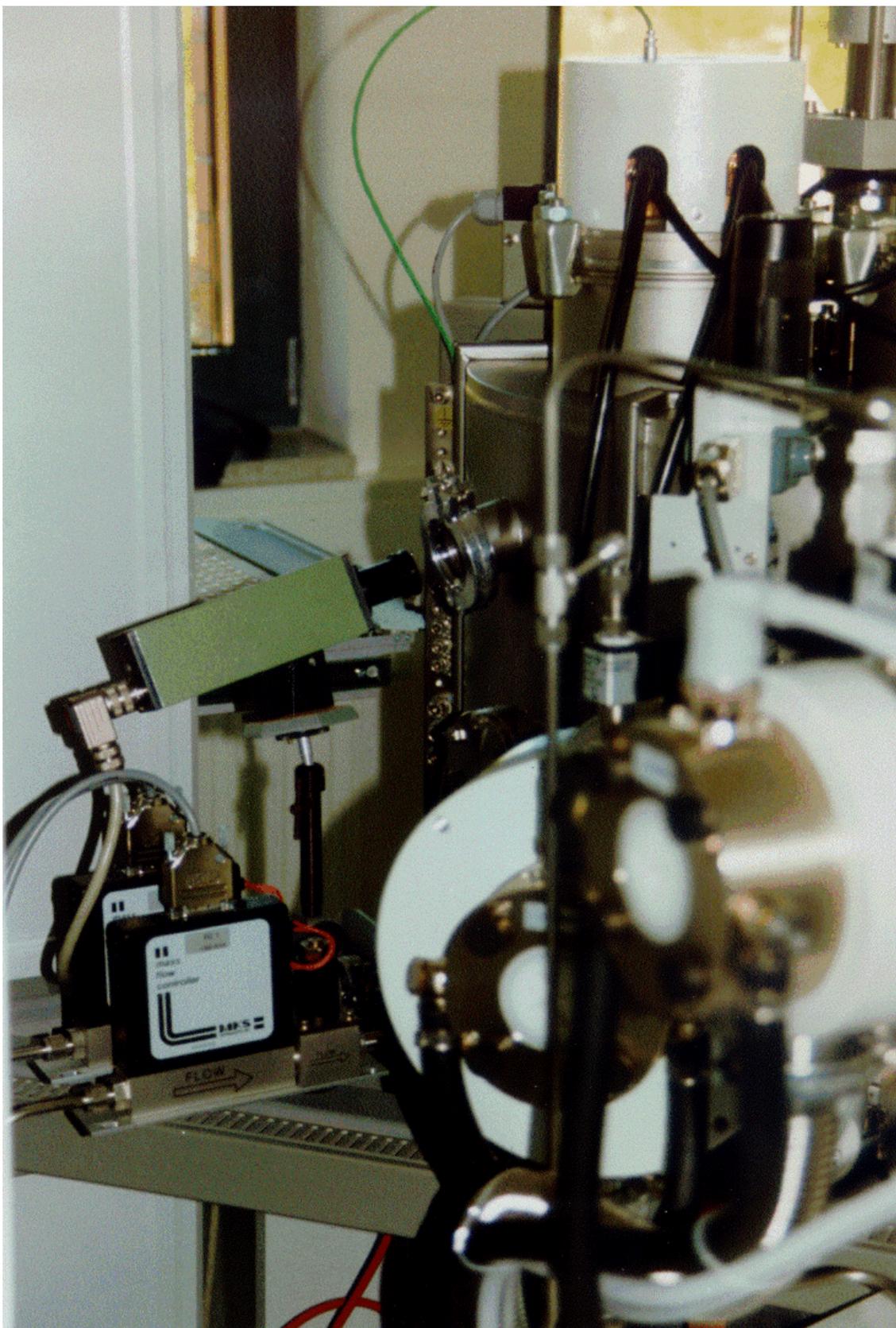


Abbildung 1: Pyrometrische Meßvorrichtung an einer Vakuum-Anlage

4.2 Applikationen der ungekühlten Infrarot-Linien- und -Kleinarraykameras PYROLINE und PYROFIELD

Berührungslose Temperaturmeßaufgaben in der industriellen Fertigungsmeßtechnik beschränken sich nicht auf punktförmige Messungen. Häufig werden Angaben über die Temperaturverteilung auf großen Oberflächen oder simultane Einzelmeßwerte auf mehreren Meßobjekten gefordert. Lösungsmöglichkeiten reichen vom Einsatz mehrerer Strahlungs-pyrometer über die Kopplung mechanischer Ablenkeinheiten mit einem Pyrometer bis zum Einsatz räumlich und thermisch hochauflösender kalibrierter Wärmebildsysteme. Innerhalb dieses Spektrums ermöglichen ungekühlte Linien- oder Kleinarraykameras kompakte, kostengünstige Lösungen mit einem gegenüber hochauflösenden Wärmebildgeräten reduzierten räumlichen Auflösungsvermögen und geringeren Kosten.

Mit den Infrarot-Kameras PYROLINE und PYROFIELD stehen dem Anwender zwei berührungslose Temperaturmeßgeräte für den industriellen Einsatz zur Verfügung [4]. Kernstück der Systeme bildet ein pyroelektrischer Sensor, dessen 128 Elemente auf einer Linie (PYROLINE) bzw. als 16x8-Matrix (PYROFIELD) angeordnet sind [5]. Aufgrund des physikalischen Wirkprinzips wird keine Kühlung benötigt. Zusammen mit dem weitgehenden Verzicht auf mechanisch bewegte Teile wird eine hohe Lebensdauer und Langzeitstabilität bei vergleichsweise niedrigen Preisen erreicht. Das Schutzgehäuse mit der integrierten Kühl- und Objektivfreibläseinrichtung gestattet den Einsatz in der industriellen Prozeßmeßtechnik. Abbildung 2 skizziert am Beispiel der Linienkamera den prinzipiellen Aufbau des Kamerakopfes, der alle zum Betrieb erforderlichen Baugruppen enthält. Die wesentlichen Module sind:

- korrigiertes Infrarot-Objektiv,
- Chopper,
- pyroelektrischer Mehrelementsensormit Breit- oder Schmalbandspektralfilter,
- Signalverarbeitungseinheit mit digitalem Signalprozessor,
- Gehäusebaugruppe.

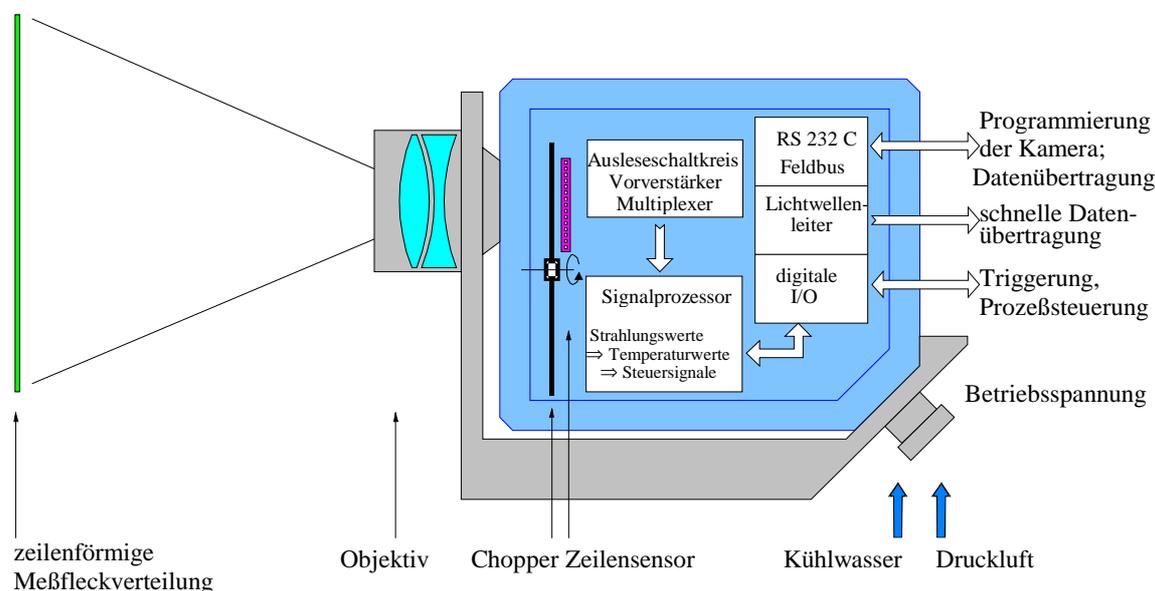


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau der Infrarot-Linienkamera

Aufgrund der im allgemeinen abgesetzten Montage in der Nähe des zu überwachenden Prozesses besitzen die Kameras keine Bedienelemente. Zur Steuerung, Überwachung und Meßwertübertragung dient eine RS 232-Schnittstelle. In Verbindung mit einem PC erfolgt darüber die Programmierung,

Parametrierung und Meßdatenerfassung. Optional kann die Datenübertragung in Echtzeit (128 Hz Zeilenfrequenz) und über größere Entfernungen über eine Lichtleitkabelverbindung mit PCMCIA-Schnittstellenkarte realisiert werden.

Die Kameras arbeiten auch autonom ohne ständig angeschlossenen PC. Über vier unabhängig voneinander programmierbare, galvanisch getrennte Ein- bzw. Ausgänge können einfache Überwachungsaufgaben gelöst werden. Alle Parameter für den stand-alone-Betrieb werden über die PC-Verbindung (tragbarer PC, Laptop) einmalig vor Ort programmiert. Ein integrierter nichtflüchtiger Speicher sorgt dafür, daß auch nach einer Betriebsspannungsunterbrechung die Kameras mit den programmierten Werten weiterarbeiten.

Tabelle 2 enthält wesentliche technische Parameter der Geräte:

Meßbereich(e)	MB1: 0...80 °C, MB2: 50...550 °C, MB3: 450...1250 °C
Spektralbereich	8...12 µm, applikationsspezifische Sonderbereiche
Sensor	pyroelektrischer 128-Element-Sensor mit CMOS-Multiplexer
Objektiv	Brennweite/Blende: 18 mm / 0,8, Öffnungswinkel: 40° x 0,3° (PYROLINE), räumliche Auflösung (50 %): 6 mrad 48° x 24° (PYROFIELD) Meßentfernung: 10 cm ... ∞
Temperaturauflösung ¹	≤ 0,2 K für MB1, ≤ 0,5 K für MB2 und MB3
Meßunsicherheit ¹	± 1 K ± 1 % vom Meßwert
Temperaturdrift	0,1 K/K _{TU} (T < 100°C), ± 0,1 %/K _{TU} (T > 100°C), Bezugstemperatur 25 °C
Zeilenfrequenz	intern 128 Hz, wählbar 128 Hz, 64 Hz, 32 Hz, ... , 1/128 Hz
Zulässiger Umgebungstemperaturbereich	Arbeitstemperatur: (0...50)°C ohne Wasserkühlung, (- 25...150) °C mit Wasserkühlung
Ein-/Ausgänge	Schnittstelle: RS 232 (Draht bzw. LWL) Digitaleingänge: 5 ... 25 V Digitalausgänge: OC-Ausgänge, (I _c ≤ 50 mA, U _{ce} ≤ 25 V)
Hilfsenergie	10...36 V DC / 10...20 W

¹ Angaben für (8...12)µm, 18 mm Optik, 32 Hz, schwarzer Strahler, Umgebungstemperatur 25°C.

Tabelle 2: Ausgewählte technische Daten PYROLINE und PYROFIELD

Anwendungsschwerpunkt von Infrarot-Linien- und -Kleinarraykameras ist die kontinuierliche flächenhafte Temperaturüberwachung in Fertigungsprozessen. Linienkameras kommen bevorzugt dann zum Einsatz, wenn sich das Meßobjekt selbst bewegt. Typische Anwendungen sind die Temperaturmessung auf Papierbahnen, Schüttgut-Transportbändern, Flachglasscheiben, Zementdrehrohröfen u.ä. Analog hierzu eignen sich Kleinarraykameras für Temperaturmessungen an stationären Meßobjekten, bei denen kontinuierlich Temperaturverteilungen erfaßt werden sollen, die Anforderungen an die räumliche Auflösung jedoch gering sind.

Neben Anwendungen der Temperaturmeßtechnik existieren verschiedenste Einsatzfälle, bei denen nicht die Absoluttemperatur maßgebend ist, sondern lediglich Temperaturunterschiede bzw. Strahlungssignale auszuwerten sind. Die Kontrolle von Beschichtungen mit thermischen Prüftechniken [6], die Überwachung von Füllständen und die Brandüberwachung sind diesem Bereich zuzuordnen.

Die unterschiedlichen Anforderungen erfordern modulare Systeme von anpassungsfähigen Hard- und Softwarelösungen. Einige Variationsmöglichkeiten sollen im folgenden angeführt werden.

Spektralbereichsanpassung

Die Verwendung abbildungskorrigierter Objektive für die Spektralbereiche 3...5 μm und 8...14 μm begrenzt die Modifikationen auf diese Fenster. Neben den breitbandigen Standardbereichen können speziell angepaßte Spektralfilter zum Einsatz kommen, die unmittelbar als Sensorfenster integriert werden:

- Glasoberflächentemperaturmessung: 4,8...5,2 μm
- Temperaturmessung durch heiße Gase und nichtrußende Flammen: $3,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$
- Temperaturmessung im heißen Abgas: $4,5 \pm 0,05 \mu\text{m}$

Getriggerte Messung

Zwei Triggereingänge ermöglichen die Synchronisation der Meßwertaufnahme mit äußeren Ereignissen und zwar getrennt für die Aufnahme von einzelnen Zeilen und für das komplette Bild. In Verbindung mit Drehgebern ist beispielsweise eine weitgehend geschwindigkeitsunabhängige Temperaturmessung an Papier- oder Isolierstoffbahnen (Abbildung 3) bzw. rotierenden Objekten möglich, bei der die eindeutige Zuordnung zwischen Meßdaten und Position auf dem Meßobjekt gewährleistet wird.

Kombination mit Drehverstellern

In Verbindung mit kompakten Drehverstellern (ein- bzw. zweiachsig) lassen sich mit der Linienkamera nahezu beliebige Winkelbereiche abscannen. Der getriggerte Meßbetrieb ermöglicht auch hierbei positionsgenaue Messungen. Von Interesse sind derartige Meßsysteme für zeitunkritische Überwachungsaufgaben (z.B. Brandüberwachung) in großen Winkelbereichen (bis 360°), die von hochauflösenden Wärmebildsystemen ebenfalls nur mit zusätzlichen Positioniersystemen abgedeckt werden können.

Die Standardsoftware beinhaltet:

- meßkopffinterne Firmware zum Betrieb des in der Kamera integrierten Signalprozessors,
- PC-Software zu Service- und Inspektionszwecken,
- PC-Software zur Visualisierung und Archivierung der Meßergebnisse sowie zur Steuerung der Kamera, lauffähig auf PC's mit Windows-Betriebssystem.

Applikationsspezifische Anpassungen, spezielle Filter und Auswertungen erfolgen bevorzugt in der PC-Software.

Die IR-Kameras sind mit einem Signalprozessor ausgerüstet, der über die Auswertung der Meßwerte hinaus eine Vielzahl von Prozeßsteuerungsaufgaben ausführen kann. Die Meßwernerfassung (Strahlungswerte) erfolgt mit einer Datenbreite von 16 Bit. Im Signalprozessor folgt die Umrechnung in Temperaturwerte, bei der Umgebungstemperatureinfluß, Empfindlichkeitsunterschiede der Einzelpixel, vorgegebene Emissions- und Transmissionsgrade berücksichtigt werden. Die interne Speicherung von bis zu 128 Temperaturverläufen in Echtzeit ist möglich. Aus den Meßwerten können eigenständig Steuerbefehle oder Alarmsignale abgeleitet und über digitale Schnittstelle oder in Form von Schaltfunktionen ausgegeben werden. Dazu erfolgt eine Zoneneinteilung des gemessenen Temperaturprofils, die zusätzlich auch zeitabhängig sein kann, womit der zeitliche Temperaturverlauf eines Meßobjektes überwacht werden kann. Für jede Zone wird ein separater Emissionsgrad berücksichtigt.

Für den Betrieb der Kamera mit einem externen Rechner steht eine komfortable Auswerte- und Betriebssoftware zur Verfügung (Abbildung 3). Sie beinhaltet:

- Steuerung und Parametrierung der Kamera,
- Darstellung der Meßwerte in verschiedenen Normierungen als Temperaturprofil oder Thermobild,
- Vereinbarung von Überwachungszonen und Grenzwerten,
- Speichern, Laden und Drucken von Temperaturprofilen oder Thermobildern,
- Punkttemperaturbestimmung.

Optionale Softwaremodule vervollständigen die applikationsanpaßbaren Systeme. Eine Recorderfunktion gestattet das lückenlose Aufzeichnen der Meßwerte und die anschließende Nachbearbeitung, z.B. ein zeitverzögertes Abspiel schneller Vorgänge, die Neuskalierung der Darstellung oder die nachträgliche Veränderung von Emissions- bzw. Transmissionsgrad. Speziell für Aufgaben zur Überwachung von Oberflächenstrahlungseigenschaften, Füllständen oder der Lage von Bauteilen kommt ein skalierbares Differentiationsfilter zum Einsatz. Weitere Zusätze dienen u.a. dem Datenexport oder Paßwortschutz der Software.

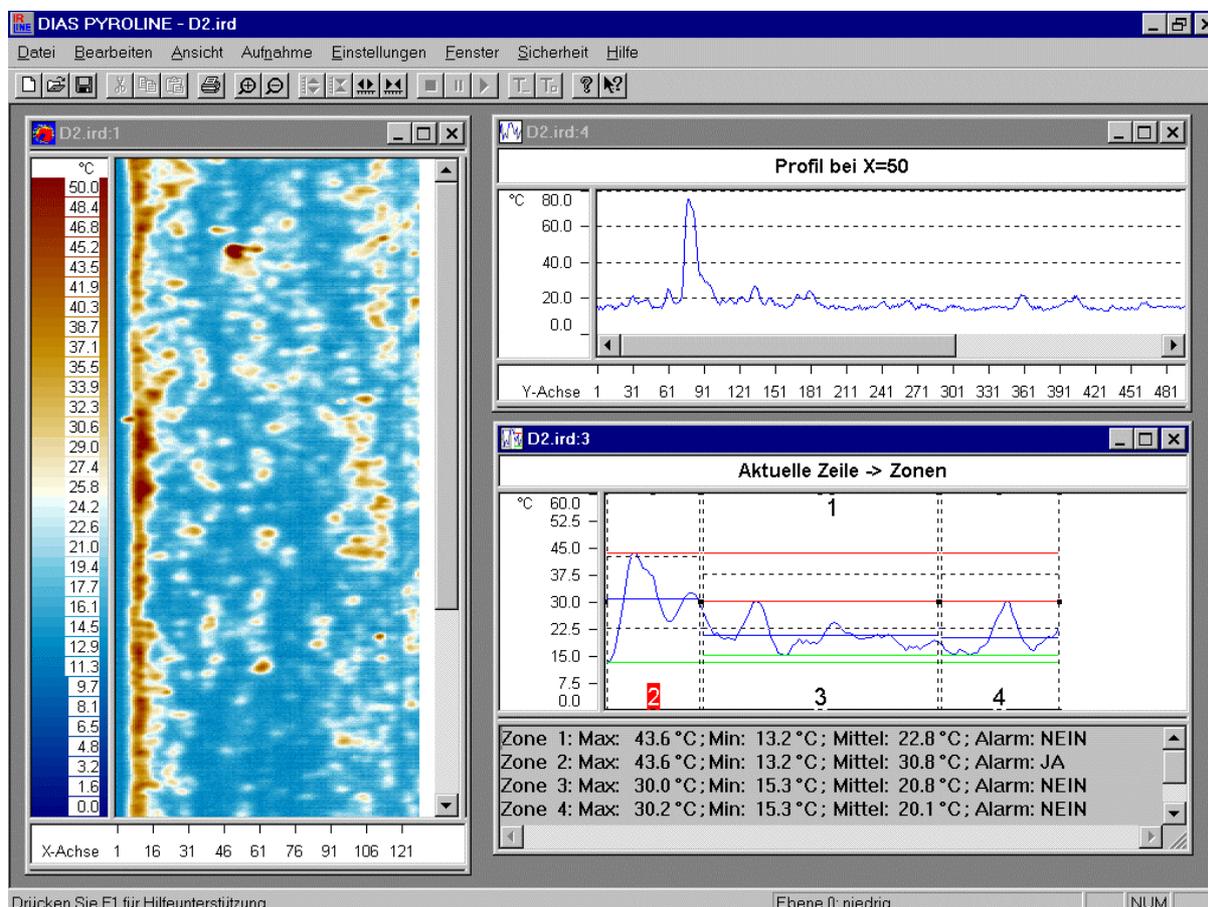


Abbildung 3: Visualisierungssoftware unter WINDOWS, Zonenüberwachung bei der Produktion von Mineralwolle

Optionale Softwaremodule vervollständigen die applikationsanpaßbaren Systeme. Eine Recorderfunktion gestattet das lückenlose Aufzeichnen der Meßwerte und die anschließende Nachbearbeitung, z.B. ein zeitverzögertes Abspiel schneller Vorgänge, die Neuskalierung der Darstellung oder die nachträgliche Veränderung von Emissions- bzw. Transmissionsgrad. Speziell für Aufgaben zur Überwachung von Oberflächenstrahlungseigenschaften, Füllständen oder der Lage von Bauteilen kommt ein skalierbares Differentiationsfilter zum Einsatz. Weitere Zusätze dienen u.a. dem Datenexport oder Paßwortschutz der Software.

4.3 Infrarot-Kamera PYROINC zur Feuerraumüberwachung

Um Verbrennungsvorgänge z.B. in Müllverbrennungsanlagen optimal regeln zu können, werden Informationen über die Temperaturverteilung im Feuerraum benötigt. Infrarot-Kameras sind dafür besonders geeignet, da man bei einer Wellenlänge von 3,9 µm durch die Flammen hindurch messen kann. Die rauen Einsatzbedingungen, hohe Umgebungstemperaturen und die Forderungen nach

möglichst wartungsfreiem Dauerbetrieb über viele Jahre stellen solch hohe Anforderungen, daß handelsübliche IR-Kameras kaum geeignet sind oder der Betrieb mit entsprechenden Schutzvorrichtungen zu teuer wird.

Einsatzversuche zeigten, daß eine hohe räumliche Auflösung zwar visuell sehr ansprechende Bilder liefert, aber von einer Prozeßregelung kaum umgesetzt werden kann, da z.B. nur eine begrenzte Anzahl von Stellgliedern für die Luftzuführung zur Verfügung steht. In der Regel wird dann mittels Software über mehr oder weniger große Bildabschnitte integriert und mit den entsprechenden Mittelwerten gearbeitet.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde eine spezielle Infrarot-Kamera für die Feuerraumüberwachung entwickelt, die mit einer relativ geringen Anzahl von Bildpunkten preiswert realisierbar ist und die Forderungen für eine Prozeßregelung im Industriedauereinsatz unter rauen Umgebungsbedingungen voll erfüllt (Abbildung 4) [7].

Der prinzipielle Aufbau der Kamera entspricht der bereits im Abschnitt 4.2 beschriebenen Kamera PYROFIELD mit den Besonderheiten:

- Spektralfilter $3,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$ zur Durchdringung der Flammen
- Spezialobjektiv (Länge ca. 1 m) zum Einbau in die isolierte Ofenwand

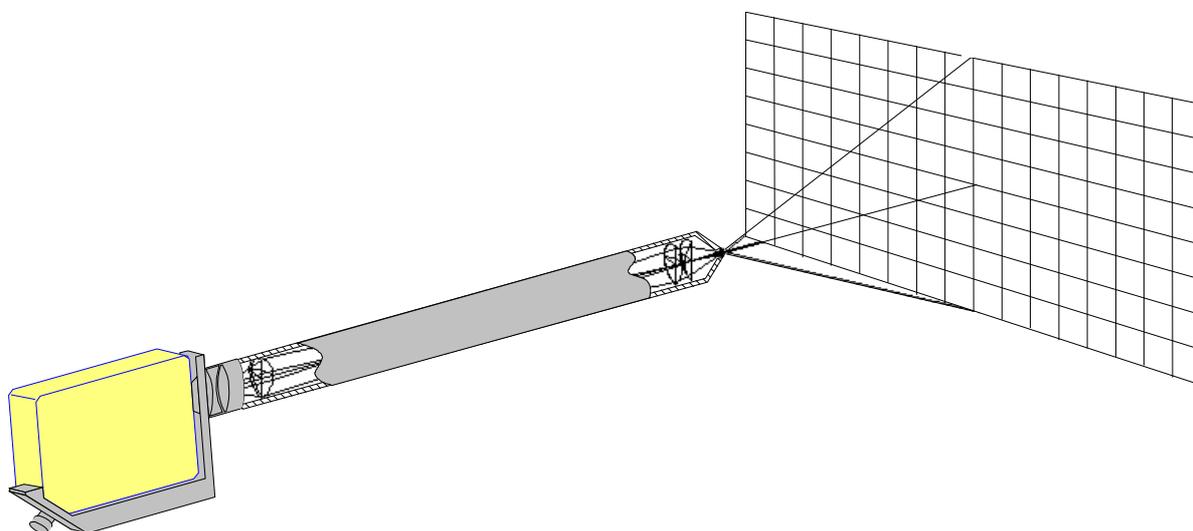


Abbildung 4: IR-Kamera mit Stielaugenobjektiv zur Feuerraumüberwachung

Bisherige Einsätze von IR-Kameras zur Feuerraumüberwachung waren gekennzeichnet durch voluminöse Kühl- und Schutzgehäuse, in denen die Kamera samt Objektiv untergebracht waren und die große Durchbrüche in der Ofenwand zur Folge hatten. Um diesen Aufwand zu reduzieren wurde eine Art Stielaugenoptik für den IR-Bereich entwickelt. Die IR-Kamera kann damit außerhalb der Ofenwandisolierung betrieben werden. Das entwickelte Objektiv besitzt Wasserkühlung, hat eine Eintrittspupille von nur wenigen Millimetern, die durch Druckluft vor Verschmutzung freigehalten wird und widersteht damit einer Temperaturbelastung von mehr als 1500°C . Mit einer Einbaulänge von 1000 mm und einem Durchmesser von ca. 100 mm wird die Ofenwand nur wenig beeinflusst.

Die entwickelte IR-Kamera zur Feuerraumüberwachung erreicht folgende Parameter:

- Meßbereich: 650°C bis 1500°C
- Temperaturauflösung: besser 1 K
- Spektralbereich: $3,9 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$
- Genauigkeit: $\pm 1 \text{ K} \pm 1 \%$ vom Meßwert
- Bildwinkel: größer 70°
- Bildfrequenz: 32 Hz, wählbar bis 1/128 Hz



Beim Einsatz in Müllverbrennungsanlagen ist eine hohe Dynamik der Verbrennungsvorgänge festzustellen, wenn das Glutbett durch die Flammenfront hindurch beobachtet wird. Für die Prozeßregelung ist deshalb eine spezielle Software erforderlich. Die IR-Kamera hat sich im Einsatz bewährt und ermöglicht einen Dauerbetrieb zur optimalen Feuerregelung und damit insbesondere zur Senkung der Umweltbelastung.

4.4 Schnelle IR-Zeilenkamera zur Hochgeschwindigkeits-Reifenprüfung

Erhöhung der Produktivität ist oft mit höherer Prozeßgeschwindigkeit verbunden und die Forderungen nach schnelleren Sensoren nehmen zu. Insbesondere für die Messung der Temperaturverteilung von schnell bewegten Objekten wurde eine IR-Zeilenkamera entwickelt, die mit einer Zeilenfrequenz im kHz-Bereich arbeitet. Als Sensor wird eine Zeile mit 160 Photowiderständen und thermoelektrischer Kühlung eingesetzt. Die Zeitkonstante der Photowiderstände ist kleiner als 10 μ s. Ein besonderer Anwendungsfall ist die Hochgeschwindigkeits-Reifenprüfung.

Die Kamera besteht aus einem Kamerakopf, einem Steuergerät, zwei schwarzen Strahlern und einem PC, der mit einem Framegrabber und einer digitalen I/O-Karte ausgestattet ist (Abbildung 5). Als Eingangssignal sind Null- und Winkelimpulse eines Inkrementalgebers (Encoder) erforderlich. Die Meßwertausgabe erfolgt als Profil am Bildschirm, als Datei oder als digitaler Impuls. Alle Bedienelemente sind vom PC aus steuerbar. Die Messung erfolgt simultan über eine Linie (Zeile) mit 160 Pixeln. Durch die Rotation des Objekts wird ein zweidimensionales Bild (Profil) erzeugt. Ein Encoder synchronisiert die Kamera mit dem Meßobjekt. Der Encoder löst vorzugsweise 1° auf (360 Zeilen je Umdrehung). Die entstehende zweidimensionale Abbildung (z.B. Abwicklung der Lauffläche eines Reifens) besteht demzufolge aus 160 Spuren (aufgezeichnet durch die 160 Pixel) und 360 Zeilen (getriggert durch den Encoder). Auf Wunsch sind andere Triggerpunktanzahlen möglich.

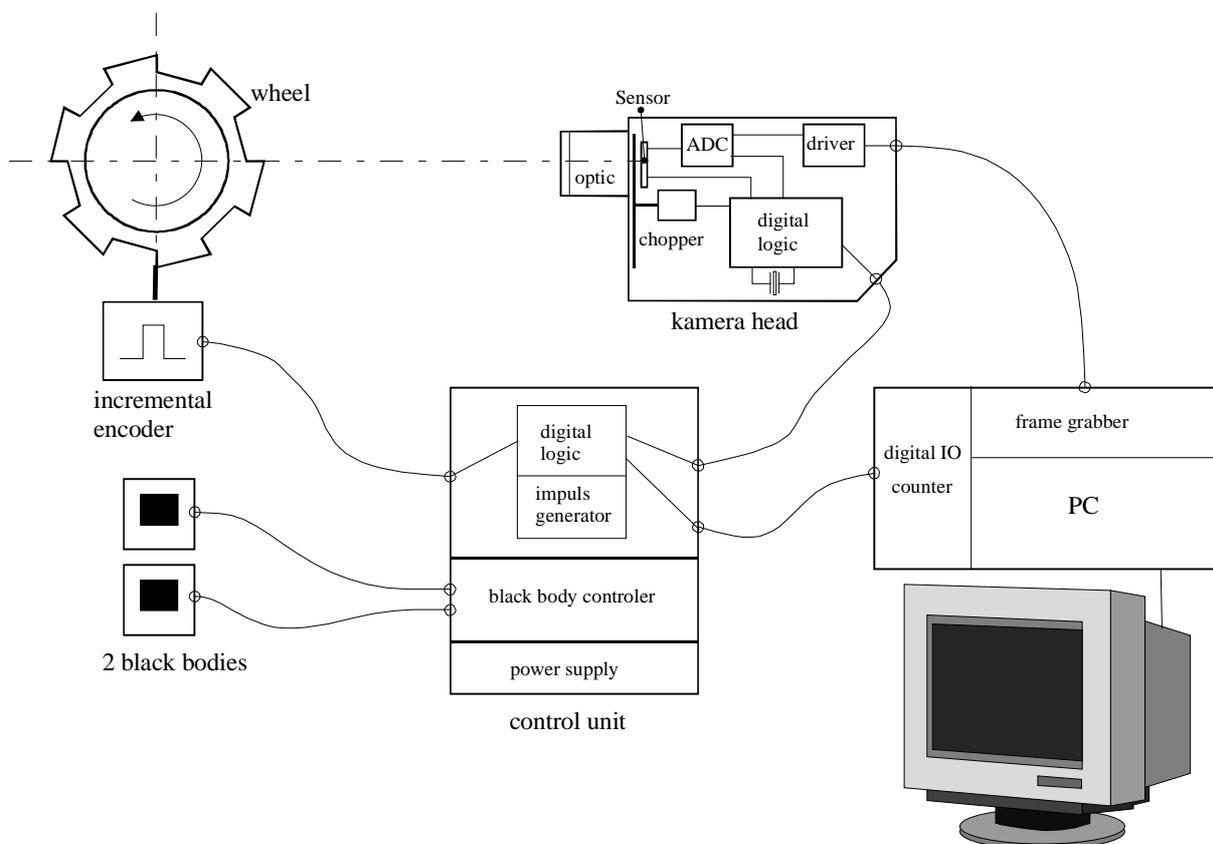


Abbildung 5: Aufbau des Kamerasystems HRP-250

Mit dem Kamerasystem HRP-250 werden folgende ausgewählte technische Daten erreicht:

- Meßtemperaturbereich: 50 °C bis 180 °C
- Spektralbereich: 3 µm bis 5 µm
- Temporaufösung: 0,5 K bei 50 °C
- Meßunsicherheit: 2 K ± 2 % vom Meßwert
- Bildwinkel (Zeile): 29,7° x 0,13°
- Räumliche Auflösung: 3,3 mrad (90 %)
- Zeilenfrequenz: max 18 kHz

Weitere Informationen sind über [8] abrufbar. Mit dem vorgestellten Kamerasystem sind Temperaturverteilungen an rotierenden Reifen bis zu Geschwindigkeiten von mehr als 300 km/h meßbar (Abbildung 6).

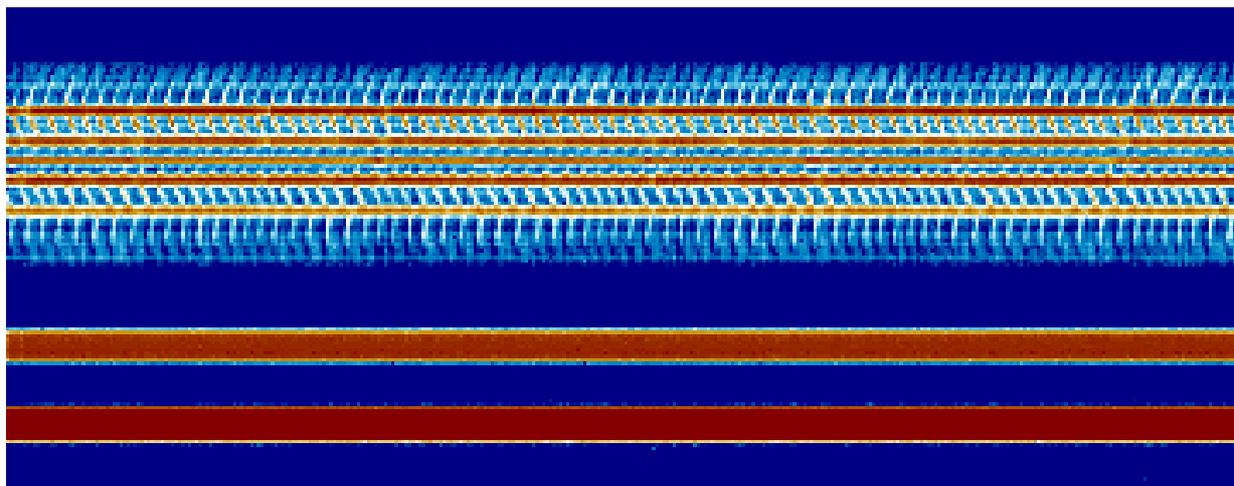


Abbildung 6: Temperaturverteilung auf der Lauffläche eines Reifens beim Hochgeschwindigkeitstest

5 Literatur

- [1] VDI/VDE-Richtlinie 3511. Blatt 4 „Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie“
- [2] H.-R. Tränkler, E. Obermeier: *Sensortechnik*. Kap. 15, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998
- [3] F. Nagel: *Mehrkanalpyrometrische Temperaturmessung auf metallischen Oberflächen im Niedertemperaturbereich unter Berücksichtigung ihrer Strahlungseigenschaften*. Dissertation, TU Dresden, 1994
- [4] U. Hoffmann, T. Reichardt, H. Budzier, M. Zimmerhackl, G. Hofmann: *Ungekühlte IR-Kameras PYROLINE und PYROFIELD für die industrielle Temperaturmessung*. 5. Fachtagung Infrarot-Sensoren und Systeme, Dresden, 1997
- [5] V. Norkus, H. Budzier, T. Sokoll, G. Hofmann, U. Hoffmann, N. Heß: *High-sensitivity pyroelectric linear arrays and their applications*. SPIE Infrared Detectors and Focal Plane Arrays IV 2746 (1996) S. 51-59
- [6] G. Walle, U. Netzelmann, T. Vetterlein, N. Meyendorf: *Infrarotsensoren für die dynamische Thermografie und ihre Anwendung in der zerstörungsfreien Materialprüfung*. 5. Fachtagung Infrarot-Sensoren und Systeme, Dresden, 1997
- [7] M. Zimmerhackl, U. Hoffmann, K. Keldenich, H. Möllenhoff, G. Hoven: *IR-Camera for Control of Combustion Processes*. 3. Internationaler Kongreß OPTO 1998, Erfurt
- [8] Internet <http://www.dias-gmbh.de>

