

Ungekühlte Infrarotkameras zur berührungslosen Temperaturmessung

Prof. Dr. G. Hofmann

DIAS Infrared GmbH, Gostritzer Straße 63, D-01217 Dresden

1 Einleitung

Alle Körper senden in Übereinstimmung mit dem Planckschen Strahlungsgesetz eine elektromagnetische Strahlung insbesondere im infraroten Spektralbereich (Wellenlängen von etwa $0,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $1000\text{ }\mu\text{m}$) aus. Die Intensität und Wellenlängenabhängigkeit dieser Strahlung hängen von der Temperatur und dem Emissionsvermögen des strahlenden Objektes ab. Bei Kenntnis der Emissionseigenschaften kann durch quantitative Messung der Strahlung die Temperatur des die Strahlung aussendenden Objektes berührungslos bestimmt werden.

Auf Raumtemperatur befindliche Objekte haben bei einer Wellenlänge von etwa $10\text{ }\mu\text{m}$ das Maximum ihrer spezifischen Ausstrahlung. Da im Spektralbereich von $8\text{ }\mu\text{m}$ bis $14\text{ }\mu\text{m}$ auch die Transmission der Atmosphäre sehr hoch ist, hat dieser Spektralbereich eine besondere Bedeutung bei der berührungslosen Temperaturmessung von Messobjekten im Umgebungstemperaturbereich. Haben die Messobjekte höhere Temperaturen, ist wegen geringerer Messfehler oft die Messung bei niedrigeren Wellenlängen sinnvoll. Technisch wichtige Spektralbereiche sind $3\text{ }\mu\text{m}$ bis $5\text{ }\mu\text{m}$ (Messobjekte mit einigen hundert $^{\circ}\text{C}$), $4,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $5,2\text{ }\mu\text{m}$ (Messungen an Gläsern) oder $1,4\text{ }\mu\text{m}$ bis $1,8\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $0,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $1,1\text{ }\mu\text{m}$ (Hochtemperaturmessungen, z.B. an Metallen). Auch bei diesen Wellenlängen werden atmosphärische Fenster genutzt, die eine hohe Transmission aufweisen und folglich nur einen geringen Einfluss der Messstrecke zwischen Messobjekt und Messgerät bewirken.

In den folgenden Abschnitten werden Wärmebildgeräte mit modernen linearen und zweidimensionalen Infrarot-Sensorarrays beschrieben, die vor allem für die berührungslose Temperaturmessung in industriellen Prozessen entwickelt wurden. Dabei kommen grundsätzlich ungekühlte Sensorprinzipien zum Einsatz, die wegen der nicht benötigten aufwändigen Kühlsysteme kompakte, dauerbetriebsfähige, wartungsarme und kostengünstige Infrarotkameras und darauf basierende Systemlösungen ermöglichen.

2 Infrarot-Linienkameras mit linearen Arrays

2.1 Linienkameras mit pyroelektrischen Arrays

Bei vielen industriellen Prozessen bewegen sich die zu messenden Objekte. Damit können kostengünstige Linienkameras zur Messung von Temperaturverteilungen eingesetzt werden. Die DIAS-Geräteserie PYROLINE stellt für verschiedenste industrielle Anwendungen geeignete Infrarot-Linienkameras zur Verfügung. Im Unterschied zu Linescannern werden hier keine optisch-mechanischen Ablensysteme in Verbindung mit oftmals gekühlten Eielementdetektoren verwendet, sondern es kommen ungekühlte pyroelektrische lineare Arrays zum Einsatz. Damit wird sowohl eine exakte zeitlich parallele Signalerfassung der einzelnen Bildpunkte gewährleistet als auch eine hohe Messfrequenz (bis zu 512 Zeilen pro Sekunde) ermöglicht. Gerade diese hohe Messfrequenz ist bei den immer schneller werdenden Prozessen von besonderer Bedeutung.

Im Bild 1 ist ein hier verwendetes pyroelektrisches lineares Array dargestellt. In einem Metallhermetikgehäuse befindet sich neben dem strahlungsempfindlichen pyroelektrischen Chip ein Auslese-schaltkreis, der einen Multiplexer, einen Ausgangsverstärker und für jedes Sensorelement einen rauscharmen Vorverstärker enthält. Das mit dem Ausleseschaltkreis über Mikrodrahtbrücken verbundene pyroelektrische Chip besteht aus Lithiumtantalat. Es beinhaltet 128 oder 256 Pixel mit einem

Elementmittenabstand (pitch) von 100 μm bzw. 50 μm . Die Dicke des pyroelektrischen Chips beträgt entweder etwa 20 μm oder für empfindlichkeitsgesteigerte Varianten bis zu 5 μm .

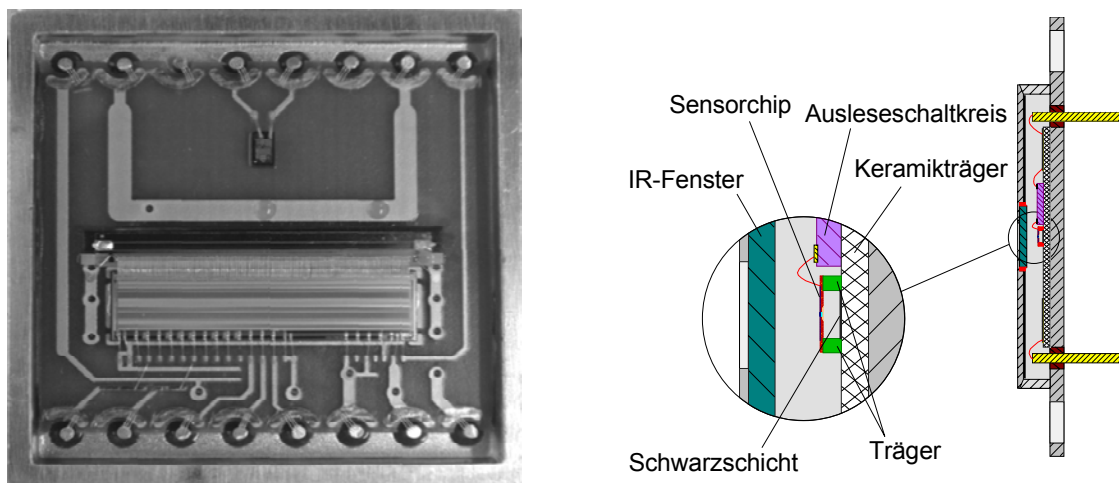


Bild 1: Pyroelektrisches lineares Array mit 128 oder 256 Pixeln (DIAS Infrared GmbH)

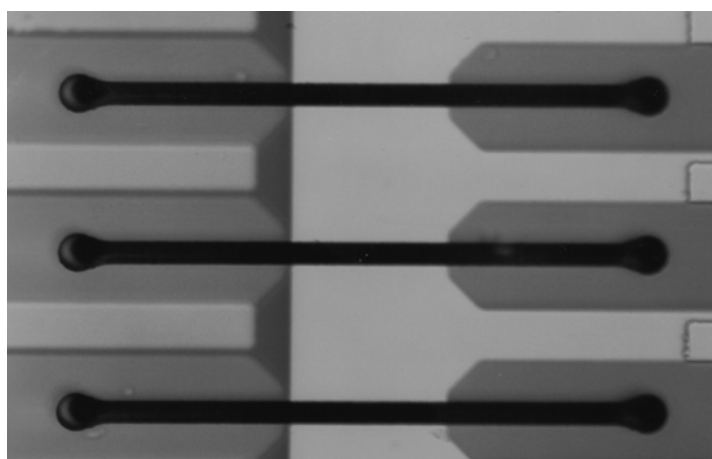


Bild 2: Ausschnitt aus einem pyroelektrischen Lithiumtantalat-Chip

Bild 2 zeigt einen Ausschnitt aus einem pyroelektrischen Chip, wobei die Gräben zwischen den empfindlichen Elementen zur Erhöhung des räumlichen Auflösungsvermögens dienen. Die einfallende Infrarotstrahlung wird in den empfindlichen Elementen absorbiert. Das führt zu Temperaturänderungen im pyroelektrischen Chip, die auf Grund des pyroelektrischen Effektes zu entsprechenden Ladungsänderungen auf den Elektrodes jedes empfindlichen Elementes führen. Der Signalverarbeitungsschaltkreis wandelt dann diese Ladungsänderungen in einfach weiterverarbeitbare elektrische Spannungen um.

Im Bild 3 sind die komplette Infrarot-Linienkamera und der darin befindliche Sensormodul dargestellt. Die einfallende Infrarotstrahlung gelangt über ein Infrarot-Objektiv in modulierter Form auf das pyroelektrische lineare Array. Die Strahlungsmodulation erfolgt mit einem Chopper, der eine sehr langzeitstabile präzise Arbeit der Kamera ermöglicht und nicht zuletzt auch gemeinsam mit dem empfindlichen Infrarotsensor die hohe Messfrequenz bis zu 512 Zeilen pro Sekunde gestattet. Die Elektronik enthält neben einer 16-Bit-A/D-Wandlung unter anderem eine komplette digitale Signalverarbeitung, die zusammen mit programmierbaren Trigger-Ein- und Alarm-Ausgängen einen stand-alone-Betrieb der Kamera ohne ständig angeschlossenen PC ermöglicht. Für die Echtzeit-Bildübertragung

steht ein Fast-Ethernet- oder ein PCI-Lichtwellenleiter-Interface zur Verfügung. Das verwendete Industrie-Kameragehäuse hat den Schutzgrad IP 65 und kann bei kritischen Umgebungsbedingungen optional mit einer Gehäuse-Wasserkühlung und einer Objektiv-Luftspülung ausgerüstet werden.



Bild 3: Ungekühlte Infrarot-Linienkamera PYROLINE (oben: Gesamtansicht, unten: Sensormodul)

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der technischen Daten verschiedener PYROLINE-Varianten. Es sind viele Messtemperaturbereiche, unterschiedliche Spektralbereiche, Pixelzahlen von 128 oder 256 und angepasste Öffnungswinkel FOV wählbar. Rauschäquivalente Temperaturauflösungen NETD bis zu 0,1 K (30 °C, 32 Hz) sind möglich. Die Messfrequenz beträgt standardmäßig 256 Zeilen pro Sekunde, die optional auf 512 Hz erhöht werden kann.

Die in der Tabelle dargestellten Varianten können bei Bedarf noch weiter an bestehende Messaufgaben angepasst werden.

Tabelle 1: Technische Daten der DIAS-IR-Linienkameras PYROLINE 128 und 256

Modell	Format	f _{max}	Spektralbereich [µm]				Messbereich					Optik		
	Y × X	Hz	LWIR	MWIR	Glas	NWIR	Standard/°C	NETD/K	optional/°C	NETD/K	Standard	optiona		
			8...14	3...5	4,8...5,2	1,4...1,8		32 Hz	f _{max}		32 Hz	f _{max}	°FOV	°FOV
Standard														
PYROLINE 128L/256Hz	128 × 1	256	×				50...550	0,5	1,5	0...80	0,2	0,5	40	56
PYROLINE 128M/256Hz	128 × 1	256		×			450...1250	0,5	1,5	200...800	0,5	1,5	60	40
PYROLINE 128G/256Hz	128 × 1	256			×		450...1250	1	3	250...800	1	3	60	40
PYROLINE 128N/256Hz	128 × 1	256				×	600...1300	1	3				60	40, 20
PYROLINE 256L/256Hz	256 × 1	256	×				50...550	0,5	1,5				40	56
PYROLINE 256M/256Hz	256 × 1	256		×			450...1250	0,5	1,5				60	40
PYROLINE 256G/256Hz	256 × 1	256			×		450...1250	1	3				60	40
PYROLINE 256N/256Hz	256 × 1	256				×	600...1300	1	3				60	40, 20
erhöhte Empfindlichkeit														
PYROLINE 128L/128Hz	128 × 1	128	×							0...80	0,1	0,2	40	56
erhöhte Messfrequenz														
PYROLINE 128L/512Hz	128 × 1	512	×				50...550	0,5	2	0...80	0,5	2	40	56
PYROLINE 256L/512Hz	256 × 1	512	×				100...800	0,5	2				40	56

2.2 Hochgeschwindigkeits-Linienkameras mit Photonensensorarrays

Für Sonderanwendungen werden noch höhere Messfrequenzen benötigt. Die DIAS-Hochgeschwindigkeits-Linienkamera PYROLINE HZK 256N gestattet Messfrequenzen von 5000 Zeilen pro Sekunde für berührungslose Temperaturmessungen ab etwa 250 °C. Zur Anwendung kommt hier ein im Raumtemperaturbereich arbeitendes lineares InGaAs-Fotodiodenarray mit 256 Elementen und einem Spektralbereich von 1,4 µm bis 1,8 µm. Bild 4 zeigt zwei typische Einsatzfälle dieser Hochgeschwindigkeits-Linienkamera bei der Temperaturmessung an rotierenden Bremsscheiben und beim Laserschweißen.

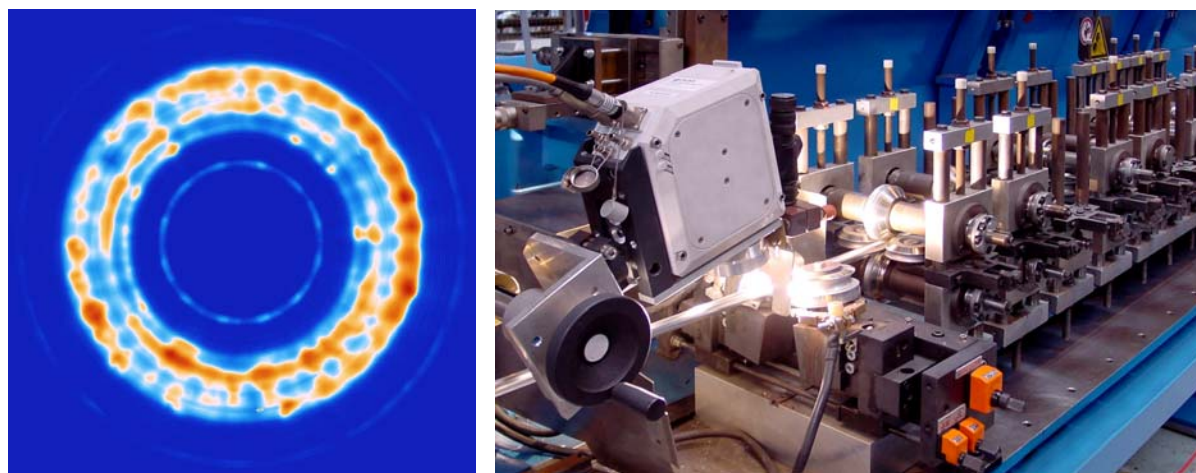


Bild 4: Hochgeschwindigkeits-Linienkamera PYROLINE HZK 256N
(links: Bremsscheibenmessung, rechts: Schweißnahtüberwachung)

3 Infrarotkameras mit 2D-Arrays

3.1 Kameras mit Mikrobolometern

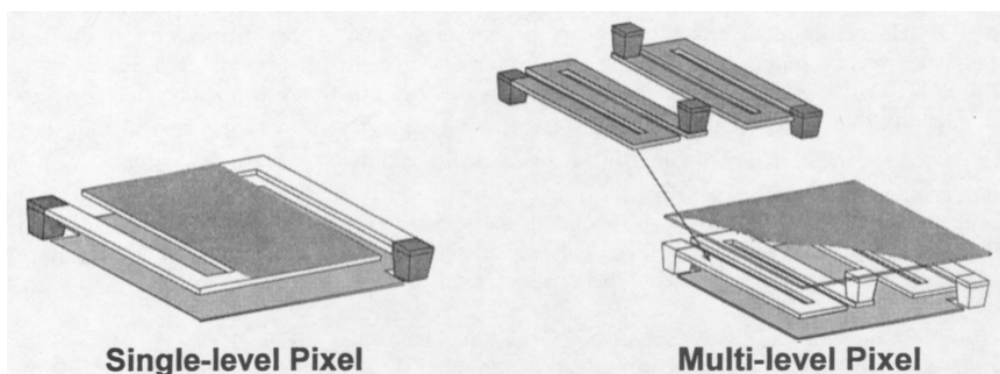
Moderne ungekühlte Wärmebildgeräte beinhalten heute zweidimensionale Mikrobolometer-Sensorarrays. Bei diesen Arrays ändert sich der elektrische Widerstand der empfindlichen Elemente als Folge von Temperaturänderungen durch die Absorption der auftreffenden Infrarotstrahlung. Auf mit Methoden der Oberflächenmikromechnik hergestellten Brückenstrukturen befindet sich eine Widerstandsschicht, z.B. aus Vanadiumoxyd (VOx). Den einzelnen empfindlichen Elementen ist jeweils eine angepasste Eingangsstufe auf dem darunter befindlichen CMOS-Ausleseschaltkreis zugeordnet. Dieser Ausleseschaltkreis realisiert auch das Multiplexing der Signale der einzelnen Pixel. Wegen des geringen Abstandes zwischen Brücken und Si-Schaltkreis ist aus thermischen Gründen im Gehäuse Vakuum erforderlich.

Tabelle 2 enthält wesentliche Daten der gegenwärtig empfindlichsten Mikrobolometer-2D-Arrays der Hersteller Raytheon, BAE Systems, DRS, ULIS und anderen. Die Unterschiede zwischen den Arrays liegen zum einen in der integrierten Ausleseelektronik. Andererseits sind mit verbesserten thermischen Isolationsstrukturen NETD-Werte unter 30 mK möglich /1//2/. Bessere thermische Isolationen der einzelnen Pixel (siehe auch Bilder 5 und 6) ermöglichen auch eine pitch-Reduzierung auf ca. 25 µm sowie die damit verbundene Realisierung von 320 × 240- und 640 × 480-Element-Arrays /1//2//3//4/. Eine gute Kombination von geringem pitch und guter NETD gelingt mit den Multi-Level-Pixeln von Raytheon /2/. Arrays mit 640 × 512 Elementen und 20 µm pitch sind in Entwicklung /5/. Darüberhinaus wird bei ULIS und Raytheon erfolgreich amorphes Silizium (a-Si) als bolometrische Schicht eingesetzt /6//7//8//9/.

Tabelle 2: Eigenschaften von ungekühlten IR-2D-Arrays
(Wellenlängen 8 μm bis 14 μm , Bildfrequenzen 30 Hz bis 60 Hz)

Hersteller	Format	Pitch	NETD (300 K)	Bemerkungen
Raytheon (USA)	320 × 240	25 μm	<35 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	25 μm	<35 mK (f/1)	VOx
	640 × 512	20 μm	26 mK (f/1)	VOx *)
		17 μm	35 mK (f/1)	VOx *)
	160 × 120	30 μm	<50 mK (f/1)	a-Si
BAE Systems (USA)	320 × 240	28 μm	<50 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	28 μm	45...50 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	17...25 μm	<40 mK (f/1)	VOx *)
DRS (USA)	320 × 240	51 μm	30...70 mK (f/1)	VOx
	320 × 240	25 μm	40...70 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	25 μm	40...70 mK (f/1)	VOx
ULIS (Frankreich)	320 × 240	45 μm	<80 mK (f/1)	a-Si
	384 × 288	35 μm	44 mK (f/1)	a-Si
	640 × 480	25 μm	50 mK (f/1)	a-Si
	384 × 288	25 μm	50 mK (f/1)	a-Si
	160 × 120	25 μm	50 mK (f/1)	a-Si
L-3 ITC (USA)	320 × 240	37,5 μm	40...60 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	25 μm	40...60 mK (f/1)	VOx
SCD (Israel)	384 × 288	25 μm	<50 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	25 μm	<50 mK (f/1)	VOx *)
NEC (Japan)	320 × 240	23,5 μm	75 mK (f/1)	VOx
	640 × 480	23,5 μm	75 mK (f/1)	VOx

(Quelle: SPIE-Konferenzen „Infrared Technology“, Orlando, 1999 bis 2006) *) z. Zt. in F&E)



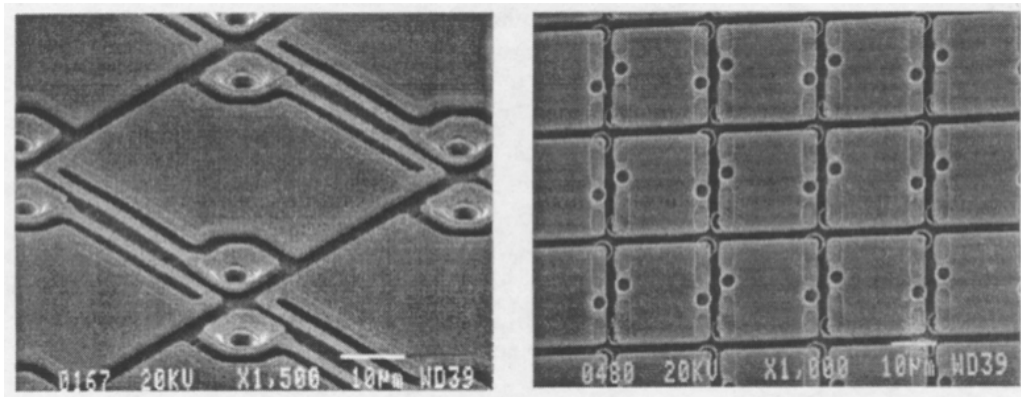


Bild 5: Single-Level- und Multi-Level-Pixel von Mikrobolometern mit einem pitch von 50 µm (links) bzw. 25 µm (rechts) /2/

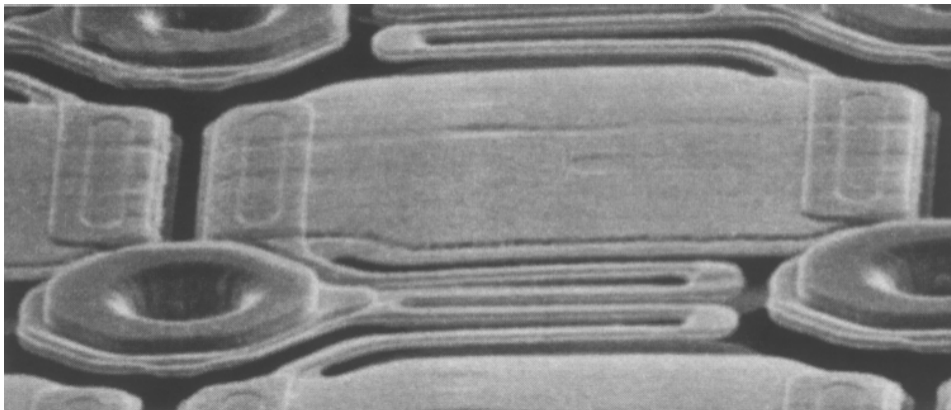
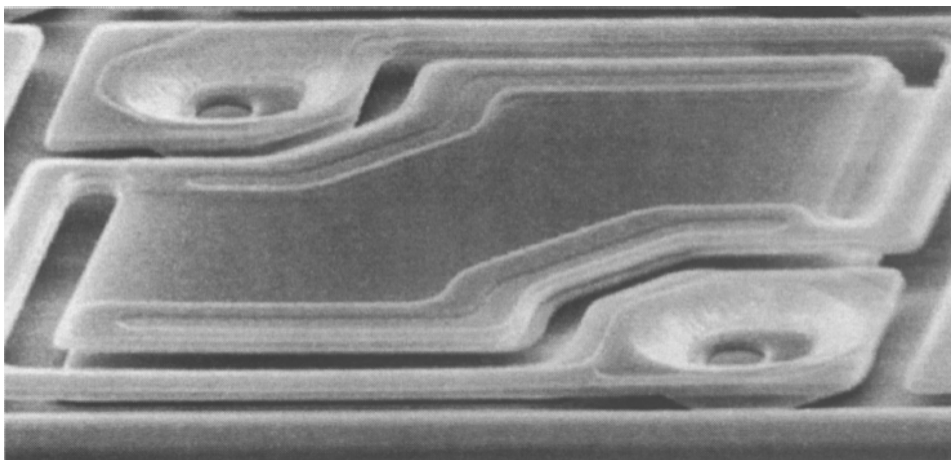


Bild 6: Mikrobolometerelemente mit einem pitch von 46 µm (oben) und 28 µm (unten) /3/

Mit derartigen Mikrobolometer-Arrays sind die DIAS-Wärmebildkameras PYROVIEW 380 und 320 ausgestattet. In Tabelle 3 sind wichtige technische Parameter zusammengestellt. Die einzelnen Typen unterscheiden sich insbesondere bezüglich der Messtemperatur- und Spektralbereiche. Durch den Einsatz verschiedener Optiken lassen sich unterschiedliche Öffnungswinkel realisieren. Neben der IP 65-Industriegehäuseversion (vgl. auch Bild 3, links) kommt noch ein Kompaktgehäuse mit dem Schutzgrad IP 54 nach Bild 7 zum Einsatz. Als Echtzeit-Datenschnittstelle wird ein Fast-Ethernet-Interface (maximal 50 Hz Bildfrequenz) verwendet. Im Bild 8 ist ein Applikationsbeispiel dargestellt.

Tabelle 3: Technische Daten der DIAS-Wärmebildkameras PYROVIEW 380 und 320

Modell	Spektralbereich	Messtemperaturbereich	NETD	Öffnungswinkel
PYROVIEW 380L (384 × 288 Pixel)	8 µm bis 14 µm	–20 °C bis 120 °C, 0 °C bis 500 °C	0,08 K (30 °C, 50 Hz)	30° × 23° (optional 59° × 46°, 15° × 12°, Makro 80 µm)
PYROVIEW 320L (320 × 240 Pixel)	8 µm bis 14 µm	–20 °C bis 120 °C, 0 °C bis 500 °C	0,08 K (30 °C, 50 Hz)	25° × 19° (optional 50° × 39°, 13° × 10°, Makro 80 µm)
PYROVIEW 320M (320 × 240 Pixel)	3 µm bis 5 µm	100 °C bis 300 °C, 200 °C bis 500 °C	0,5 K (200 °C, 50 Hz)	32° × 24° (optional 16° × 12°)
PYROVIEW 320G (320 × 240 Pixel)	4,8 µm bis 5,2 µm	200 °C bis 500 °C, 400 °C bis 1250 °C	1 K (300 °C, 50 Hz)	32° × 24° (optional 16° × 12°)
PYROVIEW 320F (320 × 240 Pixel)	Schmalbandfilter 3,9 µm	600 °C bis 1250 °C	1 K (600 °C, 50 Hz)	32° × 24° (optional 16° × 12°, Feuerraumobjektive)

Die leistungsstarke Online-Software PYROSOFT unter Windows® ermöglicht die Kamerasteuerung und -überwachung sowie die Aufnahme, Visualisierung, Bearbeitung und Archivierung der Messdaten. Besondere Funktionen sind:

- Echtzeit-Datenspeicherung
- Zonendefinition und Alarmwertüberwachung
- Trendanalyse
- Datenexport (Text, Bitmap, Video)
- Unterstützung von Prozessschnittstellen, z.B. Profibus, analoge und digitale Ein- und Ausgänge

Zur Systemintegration steht eine Programmierschnittstelle (Windows ®-DLL) zur Verfügung.



Bild 7: Wärmebildkamera
PYROVIEW 380L compact

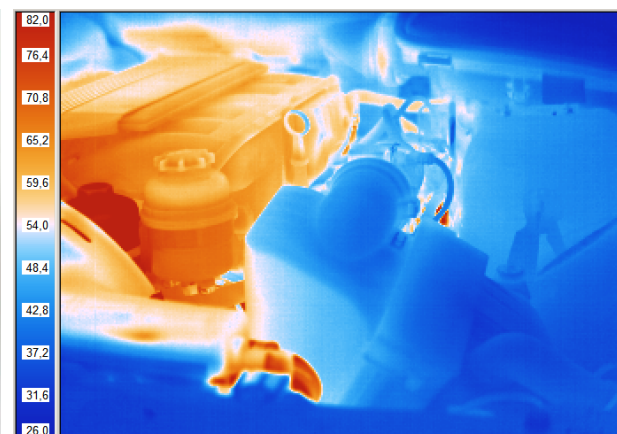


Bild 8: Thermobild eines Motorraums

Neben den stationären Infrarotkameras PYROVIEW 380 und 320 gibt es portable Geräte. Ein Beispiel ist die DIAS-Kamera MIDAS 320, die ebenfalls mit einem 320 × 240-elementigen Mikrobolometer-Array ausgestattet ist und im Spektralbereich 8 µm bis 14 µm arbeitet. Bild 9 zeigt dieses Gerät.



Bild 9: Portable Infrarotkamera MIDAS 320

3.2 Hochtemperaturkameras mit Silicium-CMOS-Arrays

Für berührungslose Temperaturmessungen ab etwa 600 °C sind Bildsensoren auf der Basis von bei Raumtemperatur arbeitenden Silicium-Photonendetektoren im Spektralbereich 0,8 µm bis 1,1 µm einsetzbar. Auf Grund der sehr steilen Spannungs/Temperatur-Kennlinie kommt es bei den meisten Si-Bildsensoren nur zu kurzen Messbereichen, z.B. 600 °C bis 750 °C. Die DIAS-Hochtemperaturkamera PYROVIEW 640N compact verwendet dagegen ein spezielles hochdynamisches Si-Fotodioden-CMOS-Array mit 640 x 480 Elementen, das einen sehr langen Messbereich von 600 °C bis 1500 °C ermöglicht. Bild 10 zeigt diese mit einem Fast-Ethernet-Interface (maximal 25 Hz Bildfrequenz) ausgerüstete Kamera. Sie verfügt außerdem über programmierbare Triggereingänge und Alarm-/Grenzwert-Ausgänge sowie über die Möglichkeit der Verwendung alternativer Tele-, Weitwinkel- und spezieller Boreskopobjektive für Feuerraumsondenapplikationen.



Bild 10: Hochtemperatur-Infrarotkamera PYROVIEW 640N compact

4 Zusammenfassung

Insbesondere mit modernen pyroelektrischen linearen Arrays und zweidimensionalen Mikrobolometer-Arrays lassen sich Infrarot-Linienkameras und Wärmebildsysteme aufbauen, die für berührungslose Temperaturmessungen in industriellen Prozessen auf Grund ihrer hohen Zuverlässigkeit, Kompaktheit und nicht zuletzt guter Preis/Leistungs-Verhältnisse sehr gut geeignet sind. Die Arrays werden in den nächsten Jahren weiterentwickelt. Bei 2D-Arrays stehen die Reduzierung des Elementmittenabstandes (pitch im Bereich 15 μm bis 20 μm) und die NETD-Verringerung bis zu Werten von 10 mK bis 20 mK (f/1, 300K) im Vordergrund. Das wird unter anderem die Kompaktheit und Empfindlichkeit der Geräte weiter verbessern. Insgesamt werden die ungekühlten Infrarotkameras ihren Marktanteil in den nächsten Jahren weiter deutlich erhöhen.

5 Literatur

- /1/ Radford, W.; Murphy, D.; Finch, A.; Hay, K.; Kennedy, A.; Ray, M.; Sayed, A.; Wyles, J.; Wyles, R.; Varesi, J.; Moody, E.; Cheung, F.: Sensitivity improvements in uncooled microbolometer FPAs. In: SPIE Infrared Technology and Application XXV 3698(1999), S. 119-130
- /2/ Murphy, D.; Ray, M.; Wyles, R.; Asbrock, J.; Lum, N.; Wyles, J.; Hewitt, C.; Kennedy, A.; Van Lue, D.; Anderson, J.; Bradley, D.; Chin, R.; Kostrzewa, T.: High sensitivity 25 μm microbolometer FPAs. In: SPIE Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII 4721(2002), S. 99-110
- /3/ Backer, B. S.; Butler, N.; Kohin, M.; Gurnee, M.; Whitwam, J. T.; Breen, T.: Recent improvements and developments in uncooled systems at BAE Systemes North America. In: SPIE Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII 4721(2002), S. 83-90
- /4/ Altman, M.; Backer, B. S.; Kohin, M.; Blackwell, R.; Butler, N.; Cullen, J.: Lockheed Martin's 640 $\times$ 480 uncooled microbolometer camera. In: SPIE Infrared Technology and Application XXV 3698(1999), S. 137-143
- /5/ Murphy, D.; Ray, M.; Kennedy, A.; Wyles, J.; Hewitt, C.; Wyles, R.; Gordon, E.; Sessler, T.; Baur, S.; Van Lue, D.; Anderson, S.; Chin, R.; Gonzalez, H.; Le Pere, C.; Ton, S.: High sensitivity 640 $\times$ 512 (20 μm pitch) microbolometer FPAs. In: SPIE Infrared Technology and Applications XXXII 6206(2006), S. 1A-1 – 1A-14
- /6/ Brady, J.; Schimert, T.; Ratcliff, D.; Gooch, R.; Ritchey, B.; McCardel, P.; Rachels, K.; Ropson, S.; Wand, M.; Weinstein, M.; Wynn, J.: Advances in amorphous silicon uncooled IR systems. In: SPIE Infrared Technology and Application XXV 3698(1999), S. 161-167
- /7/ Vedel, C.; Martin, J.-L.; Ouvrier Buffet, J.-L.; Tissot, J.-L.; Vilain, M.; Yon, J.-J.: Amorphous silicon based uncooled microbolometer IRFPA. In: SPIE Infrared Technology and Application XXV 3698(1999), S. 276-283
- /8/ Mottin, E.; Bain, A.; Martin, J. L.; Ouvrier-Buffet, J. L.; Yon, J. J.; Chatard, J. P.; Tissot, J. L.: Uncooled amorphous silicon technology: high performance achievement and future trends. In: SPIE Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII 4721(2002), S. 56-63
- /9/ Tissot, J. L.; Fieque, B.; Trouilleau, C.; Robert, P.; Crastes, A.; Minassian, C.; Legras, O.: First demonstration of 640 $\times$ 480 uncooled amorphous silicon IRFPA with 25 μm pixel-pitch. In: SPIE Infrared Technology and Applications XXXII 6206(2006), S. 18-1 – 18-4