

## MWIR-Wärmebildkamera mit Mikrobolometer

Dr.-Ing. Helmut Budzier<sup>1,2</sup>, Dipl.-Ing. Volker Krause<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. habil Gerald Gerlach<sup>1</sup>,  
Dimitar Wassiliew<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU Dresden, Institut für Festkörperelektronik, D-01062 Dresden

<sup>2</sup> DIAS Infrared GmbH, Gostritzer Straße 63, D-01217 Dresden

Bisher arbeiteten ungekühlte Wärmebildkameras mit Mikrobolometern ausschließlich im fernen Infrarotbereich (LWIR: long-wave infrared range; 8  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$  Wellenlänge). Mittlerweile stehen auch Mikrobolometer mit Breitbandfenster und akzeptabler Absorption im mittleren Infrarotbereich (MWIR: mid-wave infrared range; 3  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge) zur Verfügung. Damit ist es möglich, ungekühlte Wärmebildkameras für den MWIR zu entwickeln. Besonders für industrielle Applikationen bietet das MWIR ein erweitertes Anwendungsspektrum, wie beispielsweise die Messung der Temperatur von Glas, die Feuerraumüberwachung in Müllverbrennungsanlagen oder die Detektion von Schlacke in der Stahlindustrie.

Um eine hohe Messgenauigkeit zu erzielen, muss man störende Einflüsse im MWIR, die u.a. durch die Absorption der Infrarotstrahlung durch Kohlendioxid und Wasserdampf der Luft hervorgerufen werden, eliminieren. Dies erfolgt durch den Einsatz von schmalbandigen Infrarotfiltern deren Transferrücklinie optimal an die jeweilige Messaufgabe angepasst wird.

Das entwickelte Kamerasystem basiert auf einem Mikrobolometer mit  $320 \times 240$  Pixeln. Es besitzt ein industrietaugliches Gehäuse und kann mit einer Wasserkühlung und einer Freiblaseeinrichtung für die Optik ausgestattet werden.

### 1 Einleitung

Mit der Verfügbarkeit von Mikrobolometern, die auch im MWIR empfindlich sind /1/, ergeben sich neue Einsatzbereiche für ungekühlte Wärmebildsysteme. Um diese Systeme optimal einsetzen zu können, müssen die Unterschiede der Wellenlängenbereiche des MWIR und LWIR berücksichtigt werden. Im Abschnitt 2 werden beide Wellenlängenbereiche vorgestellt und die rauschäquivalente Temperaturdifferenz NETD (noise equivalent temperature difference) für unterschiedliche Wellenlängenbereiche berechnet. Im folgenden Abschnitt 3 wird ein ungekühltes Wärmebildsystem für den MWIR vorgestellt. Abschließend werden einige Applikationsmöglichkeiten benannt.

### 2 Mikrobolometer im MWIR

#### 2.1 Empfindlichkeit

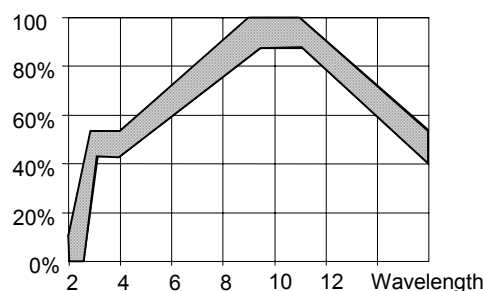


Bild 1: Typische normierte Empfindlichkeit des eingesetzten Mikrobolometers /2/

Mikrobolometer sind thermische Detektoren, die theoretisch eine wellenlängenunabhängige Empfindlichkeit besitzen. In der Praxis wird diese jedoch durch das eingesetzte Sensorfenster und die Absorptionseigenschaften der Bolometerelemente eingeschränkt. Die typische normierte Empfindlichkeit des eingesetzten Mikrobolometers ist in Bild 1 dargestellt. Im MWIR ist die Empfindlichkeit etwa halb so groß wie im LWIR. Das Sensorfenster begrenzt die Empfindlichkeit auf einen Wellenlängenbereich von ca. 2,5 µm bis 16 µm.

## 2.2 NETD

Aus dem fotometrischen Grundgesetz ergibt sich die Bestrahlungsstärke  $E$  für ein Pixel:

$$E = \frac{\tau \pi}{4 k^2 + 1} M(T) \quad (1)$$

$M$  ist die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers,  $T$  seine absolute Temperatur,  $\tau$  die Transmission der Übertragungsstrecke und  $k$  die Blendenzahl der verwendeten Optik. Für die spezifische Ausstrahlung gilt:

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda \quad (2)$$

mit den Planckschen Konstanten  $c_1$  und  $c_2$ , der Wellenlänge  $\lambda$  und den Wellenlängenbereichsgrenzen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ . Eine bekannte Lösung von Gleichung 2 ist das Stefan-Boltzmann-Gesetz ( $\lambda_1 = 0$  und  $\lambda_2 = \infty$ ):

$$M(T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

Im Bild 2 ist die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers für einige Wellenlängenbereiche dargestellt.

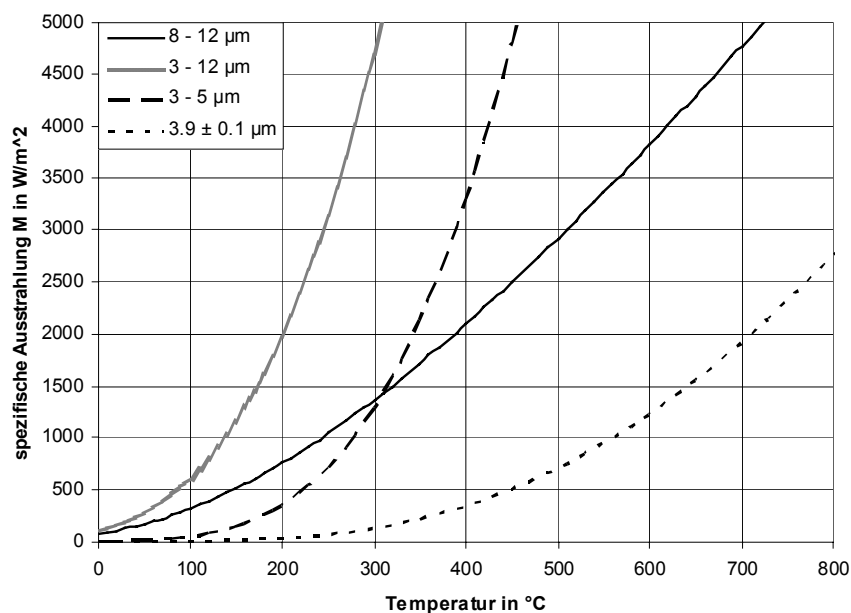


Bild 2: Spezifische Ausstrahlung

Heute verfügbare Bolometerarrays sind noch nicht hintergrundbegrenzt und die Empfindlichkeit ist zumindest bereichsweise unabhängig von der Wellenlänge. Die rauschäquivalente Temperaturdifferenz NETD berechnet sich dann zu:

$$NETD(T) = \frac{4k^2 + 1}{\alpha \tau A_p} \frac{1}{\frac{\partial M(T)}{\partial T}} NEP \quad (4)$$

mit dem Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  und der Pixelfläche  $A_p$ . Der erste Term der Gleichung enthält nur optisch-geometrische Größen. Die  $NEP$  widerspiegelt die thermische Auflösung des Sensors. Beide Terme sind wellenlängenunabhängig. Die differentielle Strahlendichte  $\partial M/\partial T$  beschreibt die Abhängigkeit der  $NETD$  von der Objekttemperatur  $T$  und vom Wellenlängenbereich, in dem das System arbeitet:

$$\frac{\partial M(T)}{\partial T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T) \frac{c_2}{\lambda T^2} \frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda \quad (5)$$

Die differentielle Strahlendichte ist im Bild 3 dargestellt.

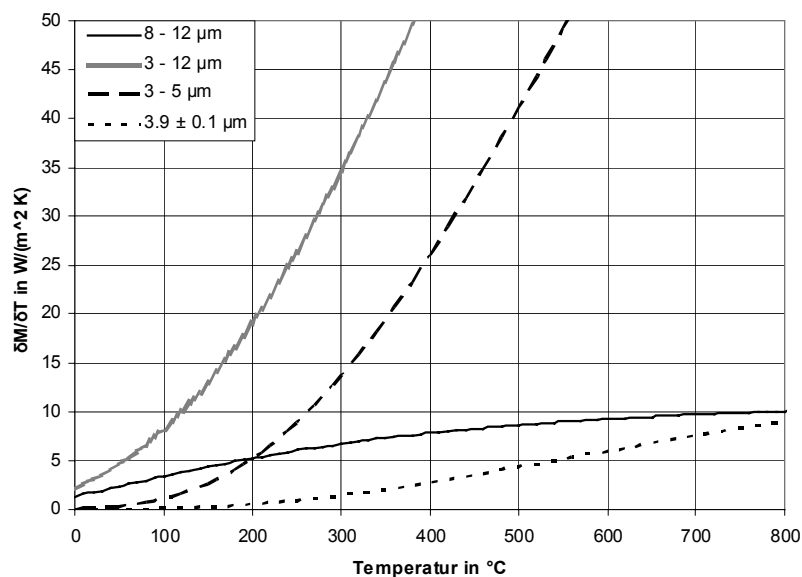


Bild 3: Differentielle Strahlendichte

Zur Normierung wollen wir den Spezialfall der Gesamtstrahlung ansetzen (Gleichung 3). Dann gilt für die differentielle Strahlendichte:

$$\frac{\partial M(T)}{\partial T} = 4 \sigma T^3 \quad (6)$$

Die  $NETD$  wird mit diesem Wert und mit  $\alpha = 1$  zum Minimum:

$$NETD_{\min} = \frac{4k^2 + 1}{4 \tau A_p} \frac{1}{\sigma T^3} NEP \quad (7)$$

Normiert man jetzt die *NETD* auf dieses Minimum erhält man:

$$NETD_n = \frac{NETD}{NETD_{\min}} = \frac{4 \sigma T^3}{\alpha \frac{\partial M(T)}{\partial T}} \quad (8)$$

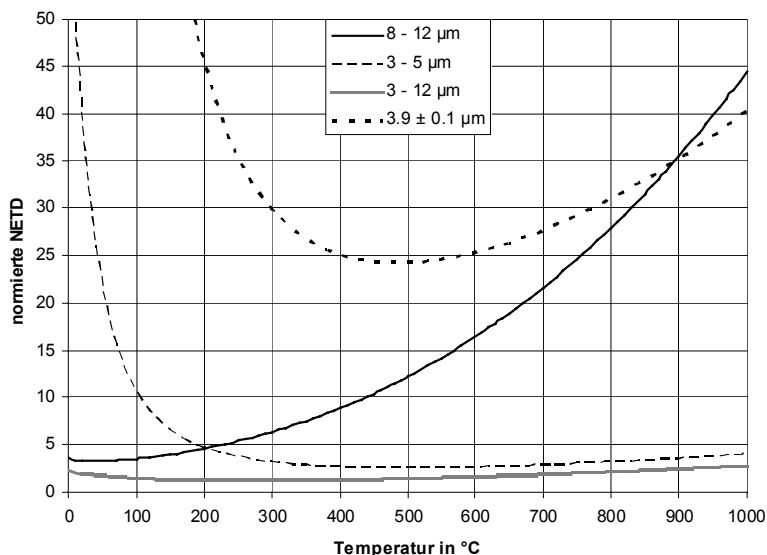


Bild 4: Normierte *NETD*

Dieser Ausdruck hängt nur noch von der Objekttemperatur und dem gewählten Wellenlängenbereich ab. Bild 4 zeigt die normierte *NETD*. Kleinere Werte der normierten *NETD* weisen auf bessere Temperaturauflösungen hin. Der minimale Wert der normierten *NETD* beträgt 1. In Tabelle 1 sind die Minima der normierten *NETD* für einige Spektralbereiche zusammengefasst.

	8 μm bis 12 μm	3 μm bis 12 μm	3 μm bis 5 μm	3,9 μm ± 0,1 μm
Minimum bei ca.	40 °C	280 °C	500 °C	480 °C
Minimale relative <i>NETD</i>	3,25	1,23	2,55	24,2

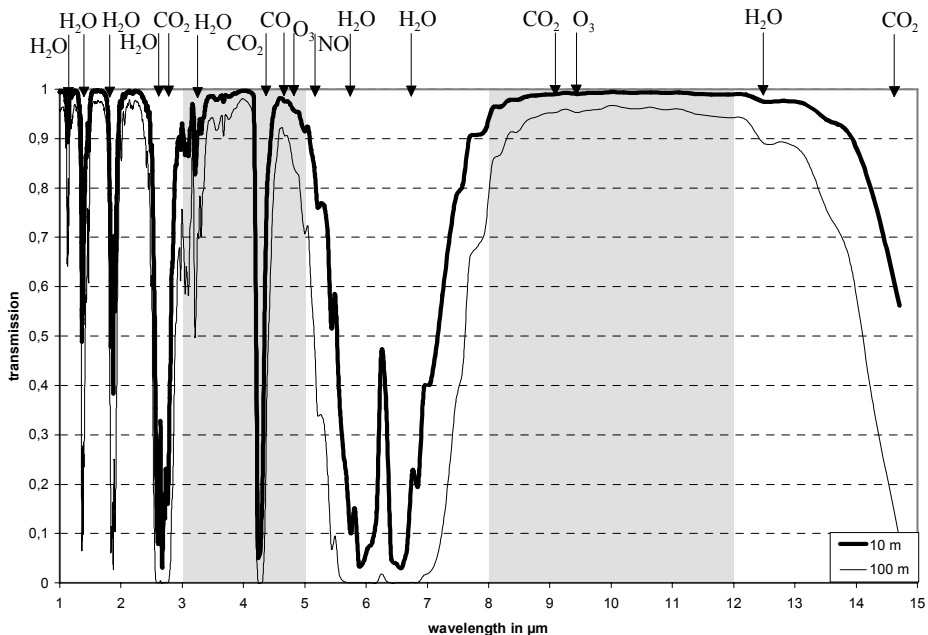
Tabelle 1: Minima der normierten *NETD*

Betrachtet man die Schnittpunkte der normierten *NETD* für die dargestellten Wellenlängenbereiche erkennt man, dass der Bereich von 8 μm bis 14 μm für Messungen unter 200 °C Objekttemperatur die beste Temperaturauflösung bietet. Im Gegensatz dazu ist der Wellenlängenbereich von 3 μm bis 5 μm für Messungen oberhalb von 200 °C Objekttemperatur geeigneter.

### 2.3 Transmission der Atmosphäre

Die Auswahl des Wellenlängenbereiches in dem das Kamerasystem arbeitet kann allerdings nicht nur aufgrund einer optimalen *NETD* erfolgen. Die Transmission der Übertragungsstrecke ist ebenfalls zu berücksichtigen. Bild 5 zeigt die Transmission der Atmosphäre bei einer Messstrecke von 10 m und 100 m. Einige Absorptionsbanden bekannter Gasen sind eingezeichnet. Vor allem der Einfluss von Wasserdampf im Wellenlängenbereich von 5 μm bis 8 μm macht eine breitbandige Messung unmöglich. Die Transmission der Atmosphäre hängt in diesem Bereich stark von der Luftfeuchte ab. Um den

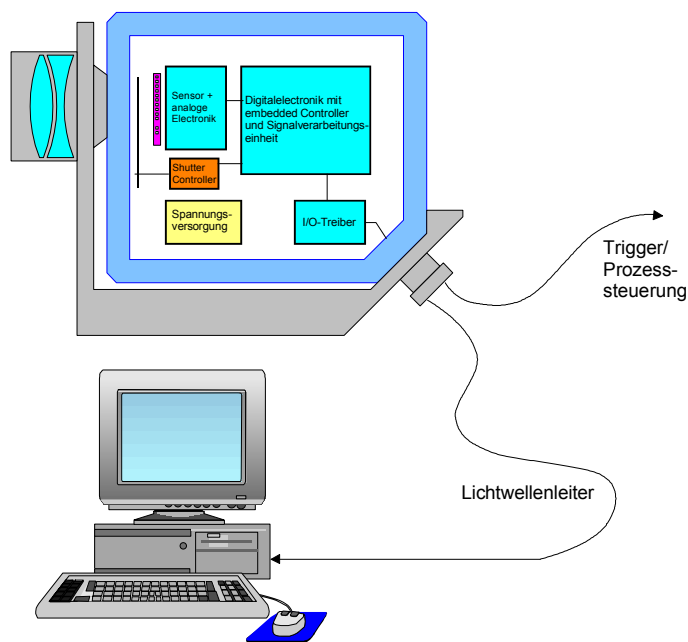
Einfluss der Atmosphäre auf das Messergebnis gering zu halten, ist es erforderlich, den Spektralbereich stark einzuengen und an die jeweilige Messaufgabe anzupassen.



**Bild 5:** Transmission der Atmosphäre (Berechnet mit LOWTRAN; Mitteleuropäischer Sommer; Horizontale Messstrecke in 10 m Höhe)

### 3 Kamerasystem

Die Entwicklung des Kamerasystems basiert auf einem universellen Infrarot-2D-Kamerasystem für Mikrobolometer [3]. Bild 5 zeigt den Systemaufbau.



**Bild 5:** Systemaufbau

Im Kamerakopf (Bild 6) befinden sich u.a. die Ansteuerelektronik für den Detektor und ein Embedded Controller für die Signalvorverarbeitung. Diese führt die notwendigen Korrekturen des Sensorsignals, z.B. den Ausgleich der Pixelungleichförmigkeit, durch. Die Bildauswertung erfolgt in einem PC.



Bild 6: Kamerakopf mit Standardoptik

Besonderen Wert musste auf die Entwicklung des optischen Kanals (Optik, Filter, Sensoranordnung) gelegt werden. Bei schmalbandigen Filtern ist die Hintergrundstrahlung, die durch das Filter selber und das Detektorgehäuse entsteht, oftmals größer als die Objektstrahlung. Die Hintergrundstrahlung wird nur durch die Absorptionseigenschaften der Pixel begrenzt und variiert mit der Temperatur des optischen Kanals und der Gehäusetemperatur des Sensors. Die Temperatur des optischen Kanals ist abhängig von der Umgebungstemperatur und der im Inneren der Kamera erzeugten Verlustleistung. Zur Kompensation der Hintergrundstrahlung ist ein Kameraverschluss (Shutter) erforderlich. Bei einer Änderung der Temperatur des optischen Kanals wird dieser geschlossen und ein Referenzsignal aufgenommen. Mit Hilfe spezieller Korrekturalgorithmen wird der Einfluss der Hintergrundstrahlung mittels des Referenzsignals eliminiert. Die Häufigkeit des Shutterns wird durch die Temperaturänderungen des optischen Kanals vorgegeben. Der Shutter kann mit dem zu messenden Prozess synchronisiert werden. Tabelle 2 zeigt einige technische Daten des Standardkameranagements.

Spektralbereich	3 $\mu\text{m}$ bis 5 $\mu\text{m}$	4,8 $\mu\text{m}$ bis 5,2 $\mu\text{m}$
Temperaturmessbereich	100 °C bis 500 °C (in 2 Bereichen)	200 °C bis 1250 °C (in 2 Bereichen)
Detektor	Mikrobolometer mit 320 $\times$ 240 Pixel	Mikrobolometer mit 320 $\times$ 240 Pixel
NETD	0,5 K @ 200 °C	1 K @ 300 °C
Bildwinkel	32° $\times$ 24°	32° $\times$ 24°
Bildfrequenz	50 Hz	50 Hz
Arbeitstemperaturbereich	0 °C bis 50 °C (ohne Wasserkühlung), -25 °C bis 150 °C (mit Wasserkühlung)	0 °C bis 50 °C (ohne Wasserkühlung), 25 °C bis 150 °C (mit Wasserkühlung)

Tabelle 2: Ausgewählte technische Daten

Zwei Triggereingänge ermöglichen die Synchronisation der Messung mit dem Prozess zur Aufnahme einzelner Bilder oder zur Aufzeichnung von Bildfolgen. Das Schutzgehäuse mit integrierter Kühl- und Objektivfreiblasereinrichtung gestattet den Einsatz in der industriellen Prozessmesstechnik. Eine modular aufgebaute Software vervollständigt das Kamerasystem.

## 4 Applikationsbeispiele

Anwendungsschwerpunkt des Kamerasystems ist die kontinuierliche flächenhafte Temperaturmessung und -überwachung in Fertigungsprozessen. Neben den breitbandigen Standardbereichen 3  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$  und 8  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$  werden speziell angepasste Spektralfilter eingesetzt, z.B. für:

- Glasoberflächentemperaturmessung: 4,8  $\mu\text{m}$  bis 5,2  $\mu\text{m}$
- Temperaturmessung durch heiße Gase und nichtrußende Flammen: 3,9  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$
- Temperaturmessung in heißen Gasen: 4,5  $\mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$
- Detektion von Schlacke in der Stahlindustrie: 3  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$

## 5 Literatur

- [1] J. L. Tissot, O. Legras, C. Trouilleau, A. Crastes, B. Fieque: Uncooled microbolometer detector: recent development at ULIS, Proc. SPIE Vol. 5987, 2005, Seiten 200-210
- [2] Datenblatt Microbolometer UL 01 12 1, Firma ULIS (Frankreich), 2005
- [3] H. Budzier, B. Vollheim, V. Krause, G. Hofmann, G. Gerlach: High-performance infrared 2D cameras based on various microbolometer focal plane arrays, 8<sup>th</sup> Int'l Conference for Infrared Sensors and System, Proceedings, Erfurt: AMA 2004, Seiten 201-206