

Prof. Dr. Jürgen Nolting

How does it work?

Wie funktionieren eigentlich Wärmebildgeräte?

Teil 10

Im Teil 6 dieser Reihe wurde die Funktionsweise von Nachtsichtgeräten erläutert. Wir haben gesehen, dass durch die Verstärkung des auch nachts vorhandenen Restlichts in vielen Fällen eine gute Sichtweite erzielt werden kann, die aber üblicherweise unter der Sichtweite liegt, die bei Tag erreicht wird. Die Technologie der Wärmebildgeräte ist hier überlegen. Durch die bildliche Darstellung der von jedem Objekt ausgehenden natürlichen Wärmestrahlung ist es möglich, Sichtweiten zu erzielen, die den Tagsichtweiten entsprechen. In etlichen Situationen wie z.B. Nebel oder Dunst kommt man sogar weiter. Wie das geht, wird in diesem Artikel erklärt.



Abb. 1: Ein typisches Wärmebildgerät, wie es für zivile Einsatzzwecke verwendet wird [1].

1 Die Natur der Wärmestrahlung

Die Bestrahlungsstärke durch Sonnenlicht in Richtung längerer Wellenlängen nimmt im mittleren und fernen Infrarot stark ab. Im Bereich des fernen Infrarots zwischen 8 und 11 μm – ein Bereich, der in der Wärmebildtechnik häufig zum Einsatz kommt – liegen nur etwa 4 % der gesamten Bestrahlungsstärke der Sonne. In der Praxis spielt die Sonnenstrahlung im fernen Infrarot keine große Rolle mehr. Dort ist vielmehr die Eigenstrahlung der beobachteten Objekte auf Grund ihrer Temperatur die hauptsächliche Strahlungsquelle. Auch im mittleren Infrarot von 3 bis 5 μm überwiegt bei nicht reflektierenden Objekten die thermische Eigenstrahlung.

Jeder Körper, der sich auf einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts befindetet, emittiert elektromagnetische Strahlung. Die größtmögliche Strahlungsenergie geben so genannte schwarze Strahler ab. Körper, die weniger Strahlung abgeben, werden als graue Strahler bezeichnet. Das Verhältnis zwischen abgegebener Strahlung und der Strahlung eines schwarzen Körpers wird als Emissionsvermögen ϵ bezeichnet. Das Emissionsvermögen ist abhängig von der Wellenlänge. Im infraroten Spektralbereich oberhalb von 3 μm kann in sehr guter Näherung fast jeder Körper als schwarzer Strahler betrachtet werden, seine Abstrahlung hängt dann nicht mehr von der Struktur des Körpers und vom Material ab sondern nur noch von seiner Temperatur. Ausnahmen bilden hier z.B. (spiegelnde) Körper mit glatter Oberfläche. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Emissionsgrade typischer Materialien [2].

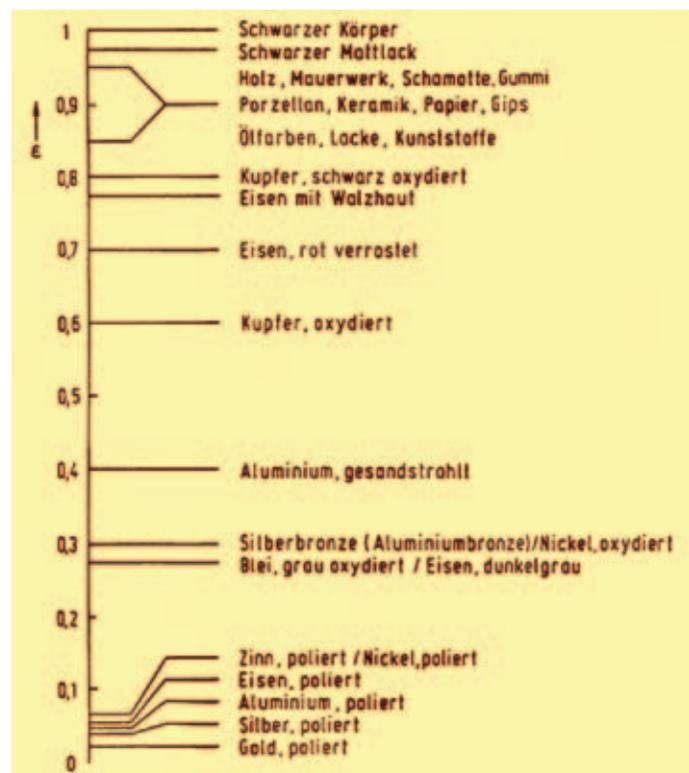


Abb. 2: Emissionsgrade typischer Materialien [2]

Die spektrale Verteilung der Strahldichte eines schwarzen Körpers wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben:

$$L_{e\lambda}(T) = \frac{2c^2 \lambda}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}$$

- c: Lichtgeschwindigkeit (= 2.9979250 x 10⁸ m/s)
- λ: Wellenlänge
- h: Plancksches Wirkungsquantum (= 6.626196 x 10⁻³⁴ Js)
- k: Boltzmannsche Konstante (= 1.380622 x 10⁻²³ J/K)

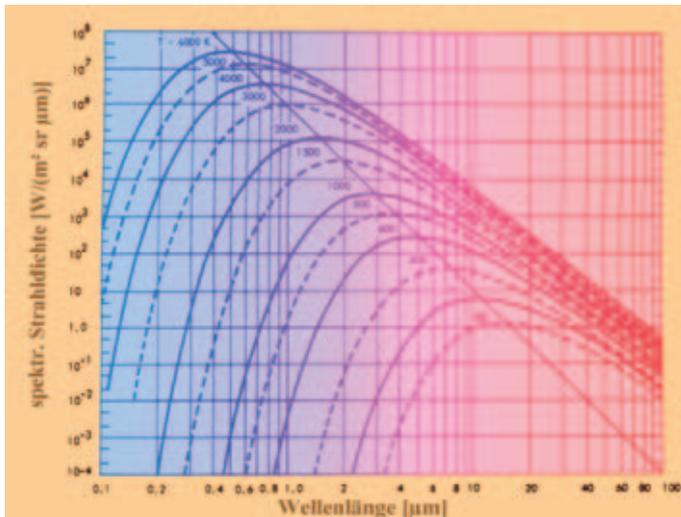


Abb. 3: Spektrale Strahldichte eines schwarzen Körpers [nach 3]

Abbildung 3 zeigt die spektrale Strahldichte eines schwarzen Körpers (Planck-Kurve) [nach 3]. Als Parameter ist die Temperatur des Körpers zwischen 200 und 6000 K aufgetragen. Wie man sieht, steigt mit steigender Temperatur die Strahldichte stark an (logarithmischer Maßstab), die Wellenlänge des Maximums verschiebt sich mehr und mehr zu kleineren Werten. Die Fläche unter der Planck-Kurve entspricht der gesamten Strahldichte des schwarzen Körpers für alle Wellenlängen. Nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz ist sie proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur. Sie reagiert also sehr empfindlich auf eine Temperaturänderung. Deshalb kann man die abgestrahlte Energie gut zur absoluten Temperaturmessung verwenden (Pyrometrie).

Wie aus Abbildung 3 weiterhin erkennbar ist, verschiebt sich das Maximum der spektralen Strahldichte mit höheren Temperaturen zu kleineren Wellenlängen. Der Zusammenhang ist einfach:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Dies ist das Wiensche Verschiebungsgesetz. Man kann unmittelbar erkennen, dass sich für die thermische Abstrahlung natürlicher Objekte mit Temperaturen über etwa 250 K die Maximumwellenlänge unterhalb von 12 μm befindet.

Für eine bildhafte Darstellung der von einer natürlichen Szene ausgehenden Wärmestrahlung ist allerdings nicht nur die Lage des Maximums der Strahlungsenergie entscheidend, sondern die Änderung der Strahlungsenergie bezogen auf die Temperaturänderung: Da sich alle Teile der Szene auf etwa der

gleichen Absoluttemperatur befinden, kann Bildinformation nur aus den geringfügigen Temperatur- und Emissionsgradvariationen der einzelnen Szenenteile um den Mittelwert herum gewonnen werden. Man kann rechnerisch zeigen, dass auch die Strahlungsänderung bei Temperaturvariation bei normalen Umgebungstemperaturen im Wellenlängenbereich zwischen 8 und 10 μm ein Maximum erreicht.

2 Durchlässigkeit der Atmosphäre für Wärmestrahlung

Elektromagnetische Strahlung erfährt beim Durchgang durch die Erdatmosphäre eine Abschwächung (Dämpfung). Ursache dafür sind im wesentlichen Absorptions- und Streuprozesse an Molekülen und Aerosolen. Eine einfache, in vielen Fällen ausreichende Näherung für die Transmission τ ist das Lambert-Beer'sche Gesetz:

$$\tau = e^{-\sigma R}$$

- σ: Extinktionskoeffizient
- R: Wegstrecke

Der Extinktionskoeffizient σ setzt sich additiv zusammen aus den Extinktionskoeffizienten für Absorption und für Streuung jeweils für Moleküle und für Aerosole. Unter einem Aerosol versteht man ein System bestehend aus Luft, in der sich fein verteilte feste (z.B. Staub) und flüssige (z.B. Wasser) Teilchen befinden. Abbildung 4 zeigt die wichtigsten atmosphärischen Aerosole, die für den optischen Bereich relevant sind [2]. Die Streuverluste durch Aerosole werden umso größer, je größer die Aerosolpartikel im Verhältnis zur Wellenlänge der Strahlung werden. Man erkennt, dass viele typische Aerosole wie z.B. Dunst, Rauch und leichter Nebel Teilchengrößen im Bereich einiger weniger Mikrometer aufweisen. Wenn es also gelingt, deutlich größere Wellenlängen zu nutzen, kann man durch Rauch, Dunst und leichten Nebel hindurchsehen.

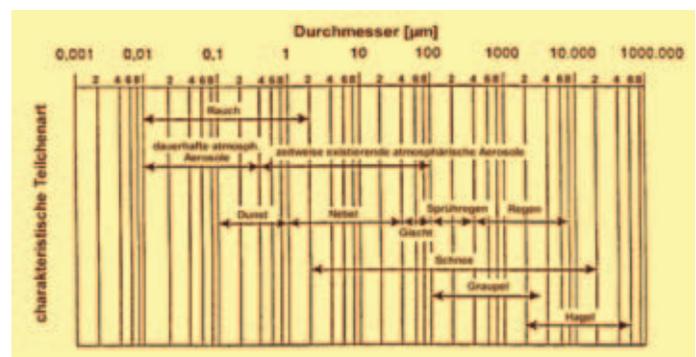


Abb. 4: Größenklassen typischer atmosphärischer Aerosole

Abbildung 5 zeigt ein atmosphärisches Transmissionspektrum eines typischen horizontalen Ausbreitungsweges mit einer Länge von 300 m [3]: Die Struktur des Transmissionspektrum ist sehr kompliziert, da zahlreiche schmalbandige Bereiche auftreten, in denen Gase wie CO₂, H₂O oder N₂O die Strahlung absorbieren. Nach dem ersten Transmissionsfenster im nahen Infrarot bis 2.5 μm erkennt man für den Bereich des thermischen Infrarots (Wellenlängen oberhalb von 3 μm), dass es im wesentlichen zwei weitere Bereiche gibt, in denen

die Atmosphäre die Strahlung gut durchlässt: Das zweite Fenster erstreckt sich von 3 bis etwa 5 μm , unterbrochen von der CO_2 -Absorption zwischen 4.2 und 4.4 μm . Das dritte Fenster erstreckt sich von etwa 7.5 μm bis 14 μm . Diese beiden Fenster, das zweite und das dritte, stellen die Spektralbereiche dar, in denen Wärmebildgeräte arbeiten können.

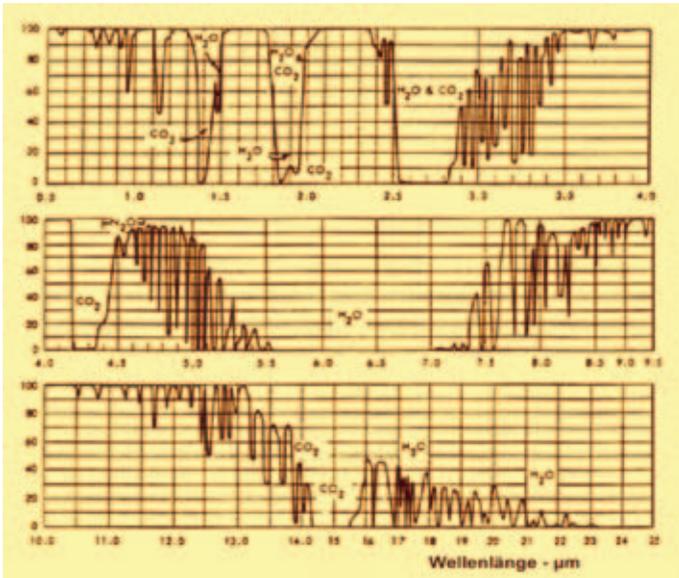


Abb. 5: Typisches Atmosphärisches Transmissionsspektrum (300 m auf Meeresniveau, Wassergehalt 5.7 mm kondensierbar, 26°C)

3 Optikmaterialien für Wärmebildgeräte

Für optische Systeme, die im IR-Bereich arbeiten sollen, müssen Materialien verwendet werden, die nur zum Teil mit herkömmlichen Gläsern vergleichbar und in ihrer Mehrzahl im sichtbaren Spektralbereich nicht transparent sind. Diese Materialien sind meistens kristallin und häufig halbleitend. Dies hat zur Folge, dass die IR-optischen Eigenschaften den allgemeinen Eigenschaften kristalliner und halbleitender Materialien ähneln. Hier sind insbesondere die Temperaturabhängigkeit, die Richtungsanisotropie der physikalischen Eigenschaften sowie die Absorption zu nennen. Meist werden synthetische (aus dem Schmelzfluss gezüchtete) Einkristalle benutzt. Der praktische Anwendungsbereich ist häufig kleiner als der Durchlässigkeitsbereich, weil auch die Dispersion berücksichtigt werden muss. Auch ist die Anwendbarkeit häufig durch Faktoren wie Wasserlöslichkeit oder auch Preis erschwert.

Abbildung 6 zeigt die Transmissionsbereiche häufig verwendeter IR-Materialien in summarischer Zusammenstellung [2]. Die Darstellung zeigt, dass es Materialien gibt, die sowohl im sichtbaren, als auch im IR-Bereich transmittieren, sowie andere, die nur in bestimmten Gegenden des IR-Bereichs durchlässig sind. Einige wichtige IR-optische Materialien sind Si, Ge, ZnSe, Ti1173, AMTIR-1 und eingeschränkt Diamant und Kochsalz (NaCl).

Silizium eignet sich als Material insbesondere für Systeme, die im MWIR-Bereich arbeiten. Für LWIR-Systeme ist es nicht geeignet, da es im Bereich um 10 μm zahlreiche Absorptionsbanden aufweist. Germanium transmittiert sowohl im mittleren als auch im fernen IR-Bereich. Es ist daher ein bevorzugtes

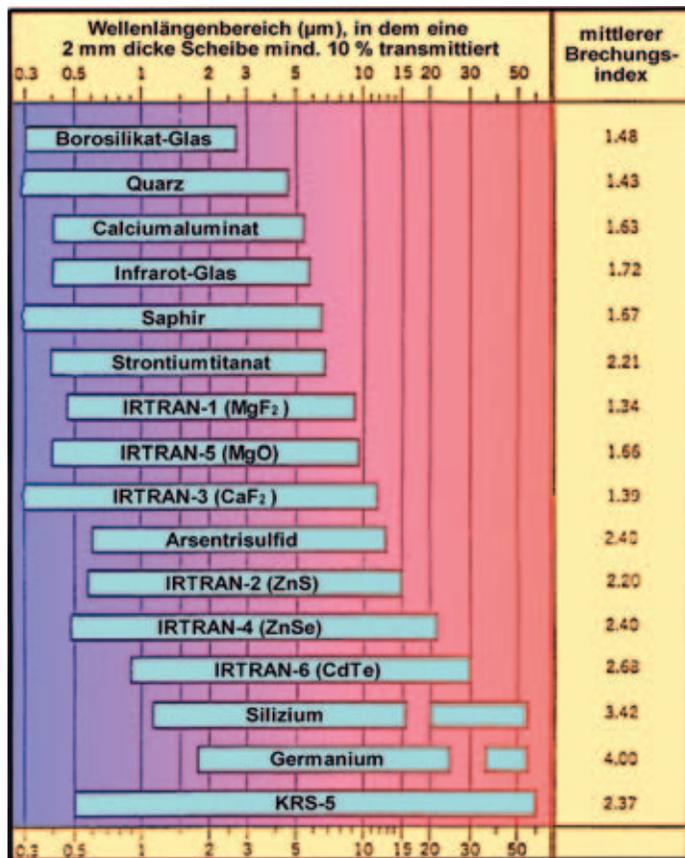


Abb. 6: Transmissionsbereiche IR-optischer Materialien

Material sowohl im 10 μm -Bereich als auch für den Bereich 3 - 5 μm , in dem es zusammen mit Silizium in Achromaten eingesetzt wird. Zinkselenid (ZnSe) transmittiert im sichtbaren Spektralbereich ab etwa 0.5 μm bis in den IR-Bereich bei 20 μm . Es erscheint in Durchsicht gelblich. ZnSe ist durch vergleichsweise kleine Absorptionskoeffizienten gekennzeichnet. Ein wenig hinderlich für die Anwendung in IR-optischen Systemen ist seine geringe mechanische Belastbarkeit und der hohe Preis. Cadmiumtellurid (CdTe) besitzt eine noch geringere IR-Absorption als ZnSe und ist daher ein bevorzugtes Material für Hochleistungsanwendungen. Es transmittiert im Sichtbaren nicht. Seine mechanische Beständigkeit ist höher als die von ZnSe , sein Preis ist erheblich höher.

Es gibt einige Materialien, die von rein optischen Standpunkten aus gesehen nahezu ideale IR-optische Eigenschaften aufweisen. Zu ihnen gehört Diamant. Diamant transmittiert gut mit Ausnahme des Wellenlängenbereichs 3 - 5 μm vom Sichtbaren bis in das extreme IR. Wegen seiner überragenden mechanischen Eigenschaften wäre Diamant das nahezu ideale IR-optische Material. Sein hoher Preis verhinderte bisher jedoch eine breite Anwendung. Neuerdings sind Verfahren in der Entwicklung, um relativ kostengünstig Diamant aus der Gasphase abzuscheiden. Bislang waren technische Anwendungen von Diamant auf kleine, Millimeter große Kristalle beschränkt, die entweder aus natürlichen Quellen stammten oder mittels der Hochdrucksynthese hergestellt wurden. Durch die Entdeckung der Gasphasenabscheidung ergibt sich die Möglichkeit, Diamant in Form von ausgedehnten Schichten und Scheiben herzustellen. Damit ergeben sich völlig neue optische, thermische und mechanische Anwendungsmöglich-

keiten dieses herausragenden Materials. Mit der am Fraunhofer Institut IAF (Freiburg) entwickelten und patentierten Mikrowellen-Plasmareaktor-Technologie [4] wurden Diamantscheiben mit bis zu 15 cm Durchmesser und mehr als 2 mm Dicke hergestellt.

Auch Kochsalz hat ein sehr weites Transmissionsspektrum. Der breiten Verwendung dieses Materials in Wärmebildgeräten steht – insbesondere für den Einsatz außerhalb geschlossener Systeme – seine hohe Wasserlöslichkeit entgegen. Es kann daher allenfalls im Inneren abgedichteter Geräte eingesetzt werden.

Eine andere Gruppe IR-transmittierender Materialien sind die glasartigen IR-Materialien. Bevorzugte Vertreter dieser Klasse sind TI 1173, IRG 100 und AMTIR-1. TI 1173 wird exklusiv von Texas Instruments hergestellt und vertrieben, AMTIR-1 ebenfalls exklusiv von Amorphous Materials (AMTIR ist die Abkürzung von Amorphous Material Transmitting Infrared Radiation). TI 1173 besteht aus Ge, Se, Sb, AMTIR-1 aus Ge, As, Se. Beide IR-Gläser enthalten giftige Substanzen, so dass bei der Bearbeitung gewisse Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden müssen.

Seit etwa 1994 gibt es aus deutscher Produktion neuartige IR-durchlässige Chalkogenidgläser, die die Firma Vitron (Jena) unter den Bezeichnungen IG2 bis IG6 vertreibt. Diese Gläser zeigen allesamt einen breiten Transmissionsbereich zwischen etwa 0.8 μm und 12 μm . Die maximal lieferbaren Durchmesser liegen bei 200 mm.

■ 4 Detektoren für den Bereich des thermischen Infrarots

Je nach eingesetzter Detektortechnologie unterscheidet man Geräte mit Quantendetektoren und thermischen Detektoren. Quantendetektoren basieren auf dem photoelektrischen Effekt, in ihnen bewirken die einfallenden Photonen die Erzeugung elektrischer Ladungsträger. Thermische Detektoren werden durch die einfallende IR-Strahlung erwärmt, dadurch ändert sich eine elektrische Kenngröße, z.B. der Widerstand beim Bolometer-Detektor. Innerhalb dieser Familien ist eine weitere Aufgliederung nach Detektormaterial und Wellenlängenbereich möglich. Die folgenden Tabellen 1 und 2 geben einen Überblick über die einzelnen Detektortypen mit typischen Pixelzahlen und Temperaturauflösungen (NETD = noise equivalent temperature difference, Szenentemperaturdifferenz für Signal/Rauschverhältnis = 1). Hat ein Gerät z.B. eine NETD von 20 mK, so kann man noch Temperaturunterschiede von 20 tausendstel Grad im Rauschen problemlos erkennen.

Die höher empfindlichen Quantendetektoren benötigen zur Erreichung der besseren Temperaturauflösung eine Kühlung auf äußerst niedrige Temperaturen. Eine einfache Kühlung durch flüssigen Stickstoff wäre zwar ausreichend, kommt für einen praktikablen Einsatz aus logistischen Gründen aber meist nicht in Frage. Aus diesem Grund werden oft Kühlaggregate eingesetzt, die auf dem gleichen thermodynamischen Prozess basieren wie ein Kühlschrank. Die miniaturisierten Kühlaggregate verwenden Helium als Kühlmedium in einem geschlossenen Kreislauf. Zur Erreichung der notwendigen Kühlleistungen von ca. 0.3 bis 1.0 W müssen elektrische Eingangsleistungen von max. 50 W aufgebracht werden. Die Abkühlzeiten bis zum Erreichen der Arbeitstemperatur liegen je nach Umgebungstemperatur im Bereich von 3 bis 10 Minuten. Abbildung 7

Detektormaterial	Wellenlängenbereich	Typ. Pixelanzahl	Typ. NETD (mK)	Belichtungszeit (ms)	Kühltemperatur
CMT	7.5 - 10.5 μm	128 x 128	20	0.2	-195°C
GaAs	8 - 10 μm	640 x 512	15	20	-195°C
CMT	3.0 - 5.0 μm	288 x 384 512 x 640	20 20	20 20	-150°C -150°C
InSb	3.0 - 5.0 μm	320 x 240	30	20	-195°C
PtSi	3.0 - 3.8 μm	640 x 480	100	20	-195°C

Tabelle 1: Kennwerte von Quantendetektoren

Detektormaterial	Wellenlängenbereich	Typ. Pixelanzahl	Typ. NETD (mK)	Belichtungszeit (ms)
$\text{VO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$	8 - 12 μm	320 x 240	150	20
BST	8 - 10 μm	320 x 240	150	20

Tabelle 2: Kennwerte von thermischen Detektoren

zeigt einen Mini-Kühler und ein Detektormodul (mit einem größeren Kühler) [5 und 6]. Leider sind diese Kühlaggregate z.Zt. noch relativ teuer. Dem Autor sind Preise im Bereich von 5000,- Euro bekannt. Daher muss wohl auf absehbare Zeit für den Einsatz im zivilen Nutzungsbereich auf ungekühlte thermische Detektoren zurückgegriffen werden. Zwar ist die thermische Auflösung dieser Detektoren um etwa einen Faktor 5 bis 10 schlechter gegenüber den Quantendetektoren, die erreichbaren Temperaturauflösungen von typisch 150 mK können für viele Einsatzfälle aber ausreichen. Wenn man allerdings hohe Reichweiten und sehr gute Temperaturauflösungen braucht, kommt man nicht umhin, den Preis für ein gekühltes Gerät zu bezahlen, der z.Zt. noch bei mehr als 20000,- Euro liegt.

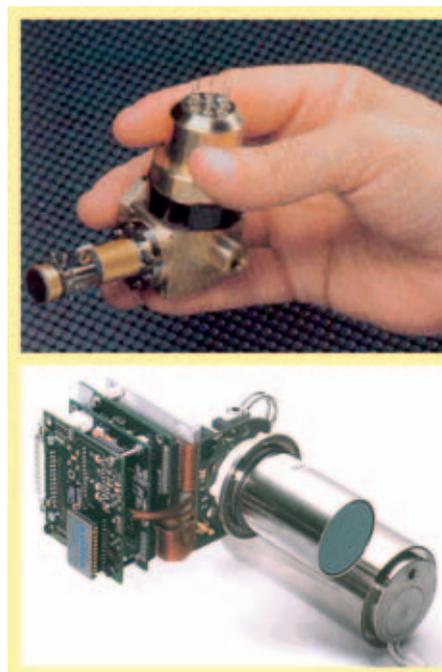


Abb. 7: Miniaturisiertes Kühlaggregate (oben) und modernes Detektormodul mit Kühlaggregate (unten)

■ 5 Aus vielen Teilen wird ein Ganzes: Aufbau typischer Geräte

Lange Zeit war man technologisch nicht in der Lage, IR-Detektoren herzustellen, die eine Pixelzahl besitzen, die zumindest für halbe VGA-Auflösung ausreichend ist. Geräte der ersten und zweiten Generation arbeiten mit Detektoren, die zu wenig Elemente aufweisen, um ein Bild auf einmal aufzunehmen. In diese Geräte ist dann immer ein opto-mechanischer Scanner eingebaut. Dabei handelt es sich zumeist um einen Schwingspiegel oder ein rotierendes Element (Spiegel oder Prisma) im Strahlengang vor dem Detektor. Der typische Aufbau eines Gerätes der ersten Generation ist in Abbildung 8 gezeigt [2].

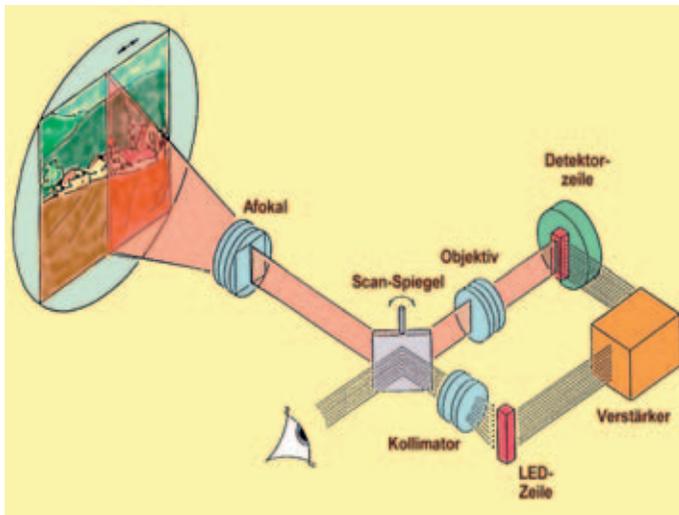


Abb. 8: Aufbau eines Wärmebildgerätes der ersten Generation

Die IR-Strahlung wird durch das Teleskop und den Scanspiegel zum Objektiv geleitet, welches die Strahlung auf die Detektorzelle fokussiert. Die Detektorsignale werden verstärkt und steuern eine LED-Zeile an. Die Elemente dieser Zeile sind geometrisch genauso angeordnet wie die Detektorelemente. Durch den Kollimator wird das Licht der LEDs über die Rückseite des Scanspiegels zum Betrachter projiziert. Bedingt durch die schnelle Bewegung dieses Spiegels erscheint dem Betrachter ein zweidimensionales Bild. Da die Bildabtastung (Vorderseite des Spiegels) und die Bildwiedergabe (Rückseite des Spiegels) prinzipbedingt exakt synchron ablaufen, ist es in diesem Konzept unerheblich, ob der Scanspiegel sich exakt gleichförmig bewegt oder durch äußere Störungen in seiner Bewegung beeinträchtigt wird. Somit ist auch unter extremen Umgebungsbedingungen (Vibrationen und Stöße) eine unverzerrte Bildwiedergabe gewährleistet.

Bei einem Gerät der zweiten Generation wird anstelle der Bildwiedergabe über LEDs das Detektorsignal elektronisch aufbereitet und als Videosignal ausgegeben. Die Bildwiedergabe erfolgt dann über einen Monitor. Aber auch ein Gerät der zweiten Generation braucht noch einen Scanner.

Ein Gerät der dritten Generation arbeitet mit einem Detektor, der genügend Elemente in einer zweidimensionalen Anordnung aufweist, so dass auf einen Scanner verzichtet werden kann. Ein solches Gerät ähnelt im Aufbau einer Videokamera. Bei Einsatz von ungekühlten Detektoren entfällt sogar das Kühlaggregat.

■ 6 Zivile und militärische Anwendungsbeispiele

Wärmebildgeräte gibt es schon seit der Zeit des zweiten Weltkriegs. In den ersten vierzig Jahren ihrer Geschichte waren Wärmebildgeräte eine rein militärisch genutzte Technologie. Die Geräte der ersten und zweiten Generation waren durch die Notwendigkeit von Scanner und Kühler kompliziert und dadurch natürlich sehr teuer. Typische Gerätepreise der neunziger Jahre lagen zwischen 100000 und 300000 DM. Abbildung 9 zeigt einige Anwendungsbeispiele der Wärmebildtechnik aus dem militärischen Bereich [7 - 10].



Abb. 9: Militärische Einsatzbeispiele:

(a) Wärmebildgerät WBG-X für den Einsatz in Panzern, (b) Zielgerät LITENING im Kampfflugzeug, (c) Wärmebildgerät OPHELIOS in der Aufklärungsdrohne KZO, (d) Wärmebildgerät für den Bundesgrenzschutz

Insbesondere mit dem Aufkommen der dritten Generation werden Wärmebildgeräte für den zivilen Nutzer interessant. Das Haupteinsatzfeld ist hier die Thermographie: Mit Wärmebildgeräten werden Wärmebrücken an Gebäuden gesucht, Wärmebildgeräte orten zu heiße Bauteile auf elektronischen Baugruppen oder defekte Hochspannungsisolatoren, Wärmebilder helfen in der medizinischen Diagnostik. Abbildung 10 zeigt eine Auswahl beispielhafter Thermographiebilder [11-13].

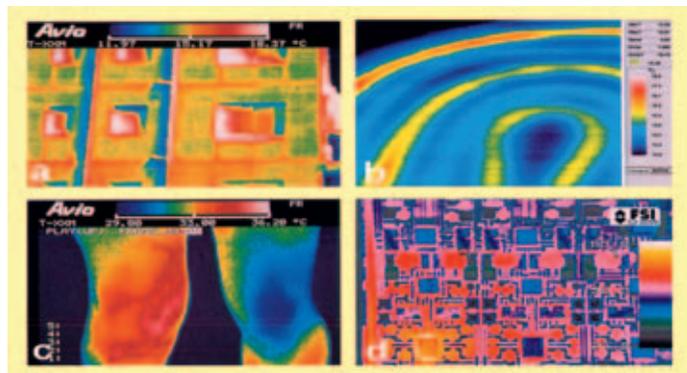


Abb. 10: Beispiele für Thermographie:

(a) Wärmebrücken an einem Gebäude, (b) Fußbodenheizung unter 5 cm Estrich und Fliesen, (c) Kniegelenkarthrose, (d) überhitzte elektronische Bauelemente

In der Thermographie werden die aufgenommenen Bilder üblicherweise in Falschfarben dargestellt. So werden die Objekttemperaturen leichter ablesbar. Will man jedoch Wärmebilder zur Orientierung einsetzen, so ist eine schwarz-weiße Darstellung wesentlich sinnvoller. Auch hierfür gibt es inzwischen Anwendungsbeispiele aus dem Zivilbereich. So können z.B. Feuerwehrleute mit dem FireFLIR [14] Personen auch in verqualmten Räumen finden. Mit dem NightDriver-Gerät [15], das seit dem Modelljahr 2000 in den Cadillac DeVille eingebaut werden kann (aber nur in den USA, das Gerät ist seit den Terroranschlägen vom September 2001 nicht mehr exportierbar), können Personen auch außerhalb des Lichtkegels der Scheinwerfer problemlos erkannt werden.



Abb. 11: (a) FireFLIR von Flir Systems, (b) NightDriver von Raytheon

Gerade dieses Gerät zeigt, wohin der Trend geht: Der Listenpreis für NightDriver betrug im Jahr 2000 nur noch 1695 US\$. Das zeigt, dass Wärmebildtechnologie durchaus in eine Preiskategorie kommen kann, die auch für den Normalverbraucher erschwinglich ist. Vielleicht kann man in gar nicht allzu ferner Zukunft solche Geräte – eingebaut in ein Nacht-Fernglas der oberen Preisklasse – dann auch beim Augenoptiker kaufen.

Anschrift der Autoren:
Prof. Dr. Jürgen Nolting,
FH Aalen – Studiengang Augenoptik,
Gartenstraße 135,
73430 Aalen

7 Literatur

- [1] Firmeninformation Raytheon Infrared: „PalmIR 250 Digital Camera“, <http://www.raytheoninfrared.com/productcatalog/prodItem16.html#> (2003)
- [2] J. Nolting: „Grundlagen und Anwendungen der Wärmebildtechnik“, Skriptum zum Lehrgang SE 3.13, Carl-Cranz-Gesellschaft, Wessling (2002)

- [3] Firmenschrift Burle: „Electro-Optics Handbook“, TP-135, Lancaster (1974)
- [4] P. Koidl: „CVD-Diamantscheiben für optische, thermische und mechanische Anwendungen“, Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik, http://www.iaf.fraunhofer.de/budi/cont_d.htm (2003)
- [5] Firmeninformation Ricor: „Applications / Technologies“ <http://www.ricor.com/tec.htm> (2003)
- [6] Firmenschrift AEG Infrarotmodule: „Integrated Detector-Cooler-Modules CMT 256x256 LWIR+MWIR, PtSi 486x640“, Heilbronn (2000)
- [7] Firmeninformation Zeiss Optronik: „Common-Modules-Wärmebildgeräte“, <http://www.zeiss-optronik.de/de/212110.html> (2003)
- [8] Firmenschrift Zeiss Optronik: „LITENING Airborne Targeting and Navigation Pod“, Oberkochen (2000)
- [9] Firmeninformation Zeiss Optronik: „ATTICA C384 MW D Anwendungen“, <http://www.zeiss-optronik.de/de/212323.html>
- [10] Image-Broschüre der Firma Zeiss-Eltro-Optronik, ohne Titel, Oberkochen (1996)
- [11] Firmenschrift Goratec: „Thermal Video System“, Buchbach (1995)
- [12] Firmenschrift Goratec: „Thermographie im Fussbodenheizungsbau“, Buchbach (1995)
- [13] Firmenschrift Stemmer PC-Systeme: „Infrarotkameras - Produktspektrum der Firma FLIR Systems Inc.“, Puchheim (1995)
- [14] Firmeninformation Flir Systems: „FireFLIR Products“, <http://www.fireflir.com/products4.htm> (2003)
- [15] Firmeninformation Raytheon Infrared: „Automotive Night Vision Camera“, <http://www.raytheoninfrared.com/productcatalog/prodItem26.html> (2001)



planung
 lichtgestaltung
 bauüberwachung



innen & architektur

© jürgen h. wustmann
 dipl. - ing.
 innenarchitekt bda, aknw
 weststrasse 2
 42477 radevormwald
 fon 0 21 95 . 93 13 45
 fax 0 21 95 . 93 13 46
 mobil 01 71 . 514 46 63
 info@design-by.de
 www.design-by.de