

## **KRIEG IM AETHER**

Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich  
im Wintersemester 1975/1976

Leitung: Abteilung für Übermittlungstruppen, Divisionär A. Guisolan

### **Passive IR-Sichtgeräte Orientierung über den gegenwärtigen Stand der Technik**

Referent: Dr. Fred Mast

5-1

## PASSIVE IR - SICHTGERÄTE

### Orientierung über den gegenwärtigen Stand der Technik

Dr. F. Mast

Die Entwicklung passiver Infrarot-Sichtgeräte hat in den letzten fünf Jahren keine bahnbrechenden Fortschritte erzielt. Wohl hat man die Detektoren weiter verbessert und die Technologie der Herstellung vervollkommt. Auch hat man Reihendetektoren, bestehend aus einer grossen Anzahl Elementen mit genügender Gleichmässigkeit, hergestellt und Sichtgeräte gebaut, deren Bildqualität und Empfindlichkeit bereits den hohen Ansprüchen im militärischen Sektor genügen. Jedoch ist die Komplexität der Geräte, und dementsprechend auch ihr Preis sehr hoch. Das Wunschziel eines Infrarot-Sichtgerätes ohne mechanische Abtastung und ohne allzustarke Kühlung der Detektoren mit Empfindlichkeiten und räumlichem Auflösungsvermögen, die den oben angeführten Scannern vergleichbar sind, konnte bis heute nicht erreicht werden.

Nachfolgend sollen nun die hauptsächlichen physikalischen Grundlagen und die technischen Entwicklungen dieses Spezialgebietes der Infrarot-Technik skizziert werden.

#### 1. Einteilung des infraroten Spektralbereiches

Der infrarote Spektralbereich wird normalerweise in drei Teile aufgegliedert, wobei die Grenzen dieser Einteilung nicht fest definiert sind. Normalerweise wird aber folgende Aufgliederung benützt.

##### a) Nahes Infrarot (0,75 $\mu\text{m}$ - 1,5 $\mu\text{m}$ )

Die physikalischen Methoden zur Detektion dieses Spektralgebietes sind praktisch dieselben wie für sichtbares Licht. Man verwendet Photodetektoren mit äusserem Photoeffekt, photographische Materialien, u.a. Für Bildaufnahmen eignet sich auch das Vidicon in Spezialausführung.

##### b) Mittleres Infrarot (1,5 $\mu\text{m}$ - 12 $\mu\text{m}$ )

In diesem Spektralgebiet verwendet man heute meistens die vor allem im letzten Jahrzehnt entwickelten Quantendetektoren (innerer Photoeffekt). Äusserer Photoeffekt und photographische Materialien fallen hier und für längere Wellenlängen aus. Auch thermische Detektoren werden in diesem Spektralbereich benützt. In diesem mittleren Infrarotgebiet arbeiten heute alle passiven Sichtgeräte.

##### c) Fernes Infrarot (12 $\mu\text{m}$ - 1000 $\mu\text{m}$ )

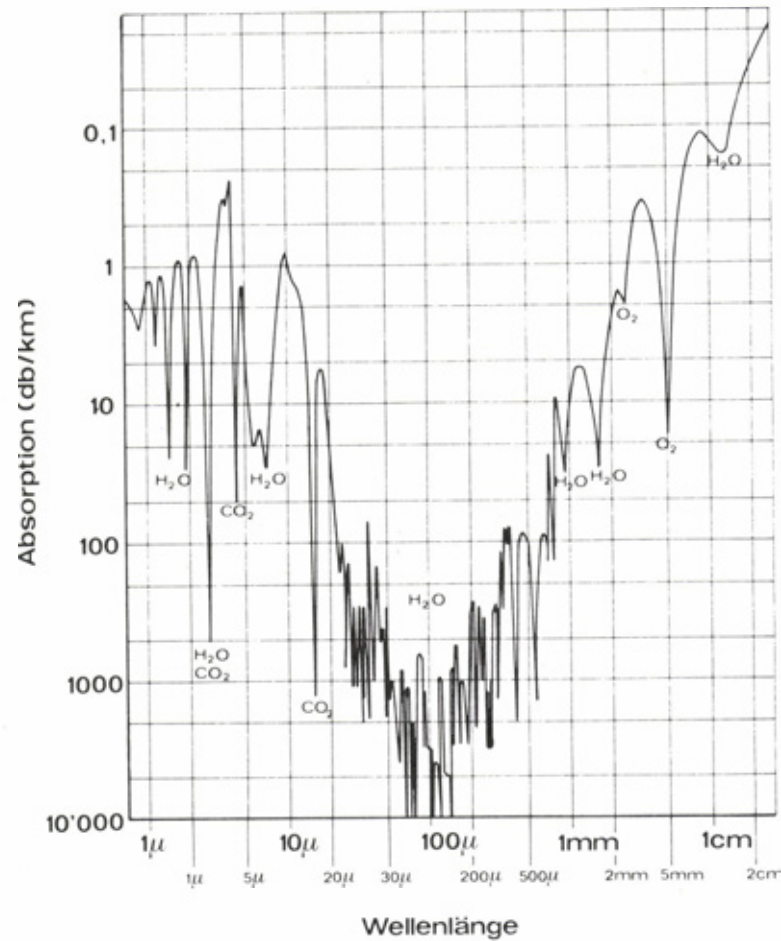
Die gebräuchlichste Methode zur Detektion im fernen Infrarot sind die thermischen Detektoren.

"Krieg im Aether", Folge XV

## 5 - 2

## 2. Transmissionseigenschaften der Atmosphäre

Wenn man Sichtgeräte im mittleren Infrarot verwenden will, muss man natürlich die Absorptionseigenschaften der Atmosphäre und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (vor allem Luftfeuchtigkeit) kennen.

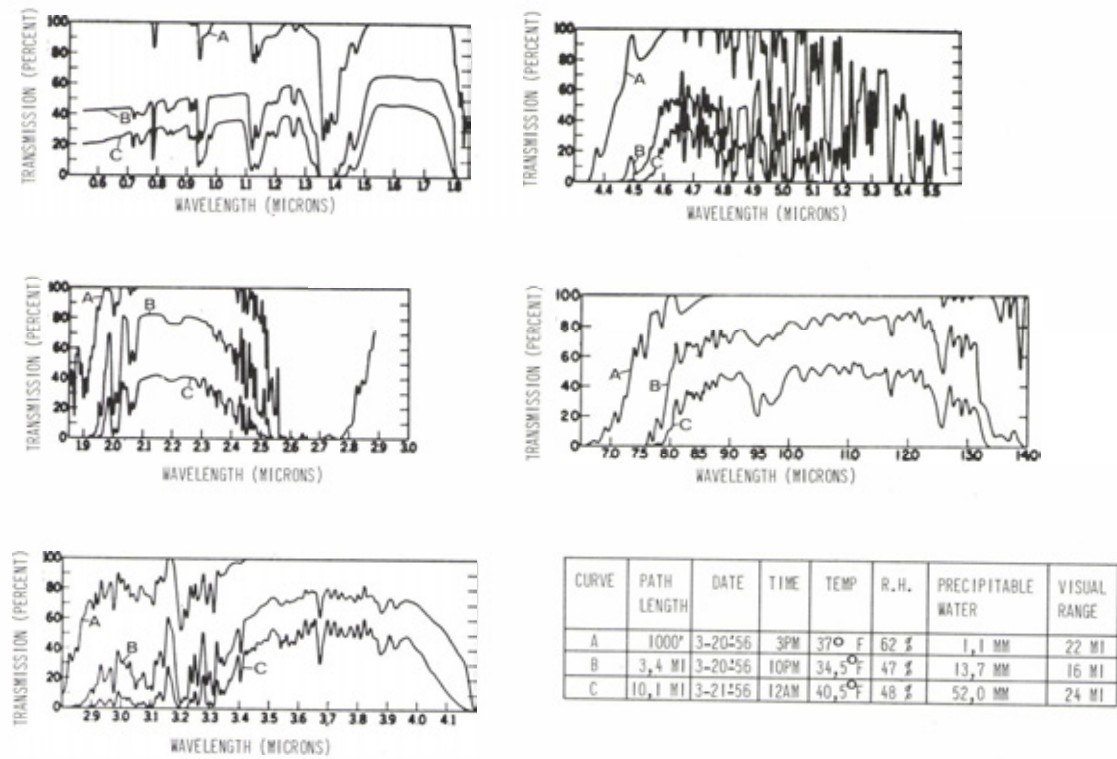


Figur 1: Absorption der Atmosphäre (760 Torr, Wasser  $7,5 \text{ g/m}^3$  horizontaler Absorptionsweg)

Figur 1 zeigt die Absorption der Luft in log-log Darstellung. (Diese Kurve stammt aus dem Institut von Prof. Kneubühl, ETH-Z.) Für uns hauptsächlich interessant sind die Spektralgebiete mit kleiner Absorption von  $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$  (begrenzt durch die Absorption von Wasser auf der einen, und von Kohlendioxyd auf der anderen Seite) und das Gebiet von  $3,4 \mu\text{m}$  bis  $4,1 \mu\text{m}$  und  $4,4 \mu\text{m}$  bis  $5,3 \mu\text{m}$ , unterbrochen durch eine Kohlendioxyd-Absorption.

Figur 2 zeigt die Absorption in diesen Spektralbereichen deutlicher und zeigt auch die Abhängigkeit vom Wassergehalt der Luft. Es sei an dieser Stelle noch vermerkt, dass die Sichtverhältnisse in diesem mittleren Infrarot doch stark beeinflusst werden durch die meteorologischen Verhältnisse. Nebel und Regen reduzieren die Sichtweite stark, und zwar erstens wegen der grösseren Absorption der Strahlung und zweitens wegen der bei bedecktem und regnerischem Wetter sich stark reduzierenden Temperaturkontraste.

5 - 3



Figur 2: Atmosphärisches Transmissions-Spektrum (0,5 μ - 14 μ, horizontaler Absorptionsweg)

3. Strahlungseigenschaften

Der Zweck der passiven Infrarot Sichtgeräte ist, die Wärmestrahlung verschiedener Objekte sichtbar zu machen, die sich geringfügig von der Umgebungstemperatur unterscheiden. Figur 3 zeigt die spektrale Emission des schwarzen Körpers bei 300°K, also ca. Umgebungstemperatur. Das Maximum liegt bei ca. 10 μm. Die gestrichelte Kurve zeigt die differentielle Emission des schwarzen Körpers, welche für unsere Zwecke besonders wichtig ist, weil sie die Änderung der Strahlungsenergie für kleine Temperaturunterschiede gegen die Umgebungstemperatur in Funktion der Wellenlänge angibt.

Für die Gesamtenergie  $E_g$  der schwarzen Strahlung gilt:

$$E_g = \sigma T^4$$

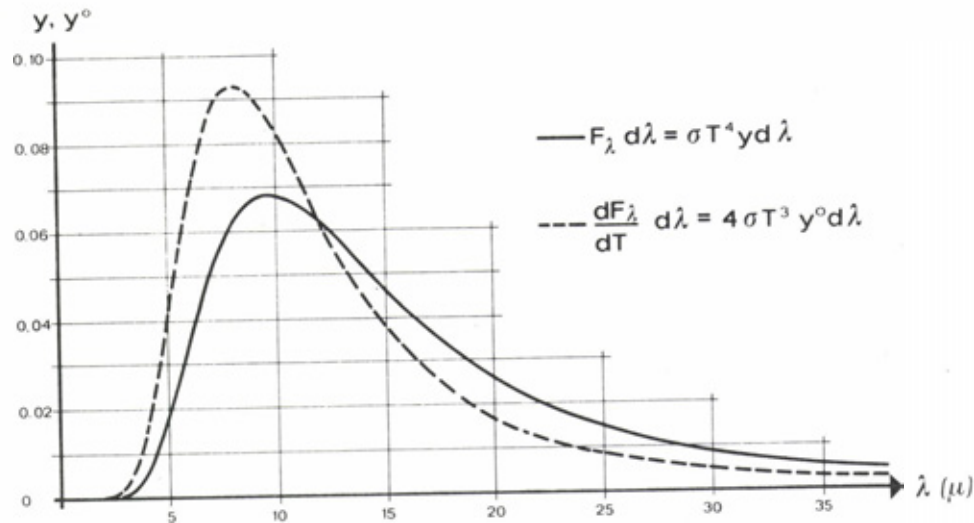
Für die Gesamt-Strahlung der differentiellen Energie

$$E_g = 4\sigma T^3 \Delta T$$

so dass wir als Strahlungscontraste erhalten

5 - 4

$$K = \frac{E_{dg}}{E_g} = 4 \frac{\Delta T}{T}$$



Schwarze Strahlung bei 300° K

Figur 3: Spektrale Emission des schwarzen Körpers bei 300°K und differentielle spektrale Emission

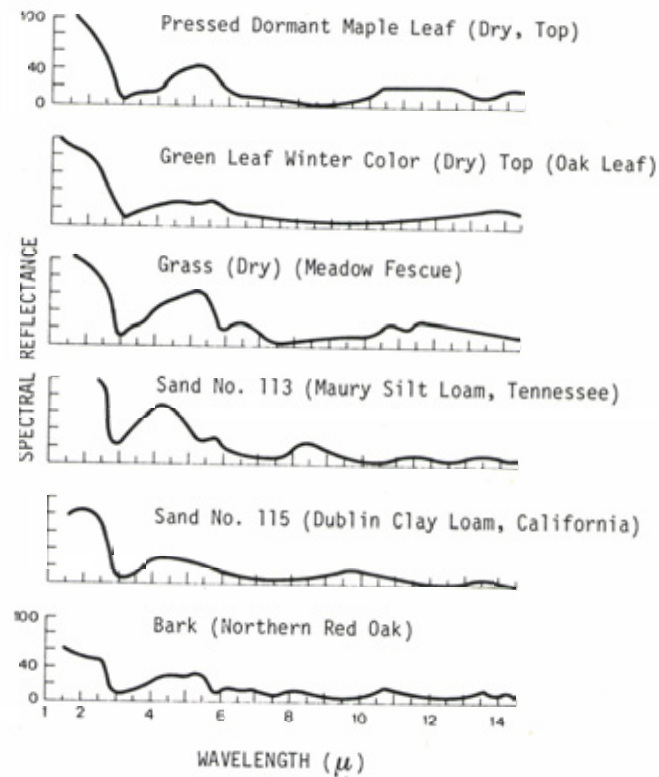
Da man für Infrarot-Sichtgeräte heute eine Empfindlichkeit fordert, die es gestattet, eine Strahlungsenergie sicher zu detektieren, die äquivalent einer Temperaturerhöhung von 0,2°K ist, bedeutet dies, dass man einen Kontrast der Strahlungsenergie von 2 Promillen noch feststellen muss. Die hellsten Stellen des Bildes entsprechen dann je nach Art des Displays ca. 4 % des infraroten Strahlungscontrastes. Dies ergibt einen wesentlichen Unterschied gegenüber dem Sichtbaren, wo die Objekte viel höhere Strahlungscontrastes haben und man bestrebt ist, diese möglichst genau wiederzugeben.

Ausser der Temperatur spielt auch das Emissionsvermögen  $E$  (oder Reflexionsvermögen  $r = 1 - E$ ) der Objekte eine Rolle. Dieses ist für die meisten Materialien (ausgenommen natürlich Metalle) sehr hoch (d.h. fast 1). Figur 4 verdeutlicht dies (von oben nach unten Ahornblätter, Eichenblätter, trockenes Gras, lose Erde, Ton-Boden, Eichenrinde). In einem geschlossenen Bau von konstanter Umgebungstemperatur ist dieses von eins abweichende Emissionsvermögen im betrachteten Spektralgebiet nicht von Bedeutung, dagegen kann es im Freien besonders bei klarem Himmel erheblich zur Kontraststeigerung (in Spezialfällen auch zu Kontrastminderung) gegenüber der rein thermischen Strahlung beitragen. Das Spektralgebiet von 3,5  $\mu\text{m}$  - 5,3  $\mu\text{m}$  wird dabei, wie man aus Figur 4 sieht, noch mehr betroffen.



5 - 5

MEASURED VALUES OF RADIANT EMISSIVITY AND REFLECTANCE 85



Figur 4: Emissionsvermögen verschiedener Objekte  
(von oben nach unten, Ahorn-Blätter, Eichenblätter,  
trockenes Gras, lose Erde, Ton-Boden, Eichenrinde)

#### 4. Physikalische Grenzen der Empfindlichkeit

Die auf das Photoelement auftreffende Strahlung ist natürlich nicht kontinuierlich sondern statistischen Schwankungen unterworfen, was als Photonenrauschen bezeichnet wird. Das Rauschquadrat ist dabei proportional der elektrischen Bandbreite  $\Delta f$  des Empfängers. Im wesentlichen gilt folgendes: Bezeichnen wir mit  $N$  die Anzahl der auf der Detektorfläche eintreffenden und dort wirksamen Photonen pro Sekunden und  $cm^2$ , so ist die Anzahl  $n$  der auf die Fläche  $A$  des Detektors pro Sekunde auftreffenden Photonen

$$n = NA$$

$N$  ist natürlich in erster Linie durch die Umgebungstemperatur, vorhandenen Absorptionen bzw. Filtern im Strahlengang und der relativen Oeffnung des Objektivs bestimmt. Das Signal selbst (d.h. also die kleinen Aenderungen der Strahlungsenergie gegenüber der mittleren Umgebungstemperatur) ist für die Berechnung des Photonenrauschens wegen der sehr kleinen Strahlungskontraste vernachlässigbar.

Für die Schwankungen des Photonenstromes gilt dann die bekannte Gleichung:

## 5 - 6

$$(\Delta n)^2 = 2\Delta fNA$$

(Diese Gleichung gilt streng nur solange  $e^{\frac{h\nu}{kT}} \gg 1$ , was bei den uns interessierenden Temperaturen und Wellenlängenbereichen gut erfüllt ist)

Für ein Signal-Rauschverhältnis von eins, d.h.

$$\frac{ns}{\sqrt{(\Delta n)^2}} = 1$$

folgt deshalb für die notwendige Anzahl Signalquanten

$$ns = \sqrt{2\Delta fN \cdot A}$$

oder

$$\frac{ns}{\sqrt{A \cdot \Delta f}} = \sqrt{2N}$$

Wenn man  $ns$  statt in Anzahl Quanten pro sec. in Watt ausdrückt, so bezeichnet man den Reziprokwert des Ausdruckes auf der linken Seite obiger Gleichung als Detectivity  $D^*$  [Watt<sup>-1</sup> cm sec<sup>-1/2</sup>]. Er ist eine für die Klassierung von Infrarotdetektoren wichtige Grösse. Man hat also

$$D^* = \frac{1}{\sqrt{2N}}$$

und sieht, dass sie im Strahlungsfeld nur gegeben ist durch die auf die Detektorfläche auftreffende Anzahl Quanten pro cm<sup>2</sup> und sec. Damit ist also die Grenze des physikalisch Möglichen gegeben, d.h. die kleinste, noch detektierbare Signalgrösse (oder die grösste, sinnvolle Detectivity eines Empfängers) ist durch das Strahlungsrauschen der Umgebung festgelegt.

## 5. Detektoren

### a) Thermische Detektoren

Die ältesten Detektoren für längerwelliges Infrarot sind thermische Detektoren, wobei die Temperaturänderung des Widerstandes (Bolometer) oder die Thermospannung (Thermoelement) gemessen, und damit die Strahlungsenergie ermittelt wird. In neuerer Zeit kamen auch pyroelektrische Detektoren hinzu. Vor allem die Trägheit, sowie ihre beschränkte Empfindlichkeit haben diesen Detektoren bei ihrer Verwendung in Sichtgeräten bis heute nur geringen Erfolg gebracht.

### b) Quantendetektoren

Nach dem Zweiten Weltkrieg begannen intensive Untersuchungen bezüglich Photodetektoren mit innerem Photoeffekt. Deutschland hatte während des Weltkrieges schon Bleisulfid-Detektoren entwickelt und benützt. Der Haupttrend der Entwicklung lag darin, mit diesem inneren Photoeffekt in längeres Wellenlängengebiet vorzustossen. Man suchte also Halbleiter mit geringem Abstand zwischen Valenzband und Leitfähigkeitsband. Zuerst fand man Bleiselenid und Indium-Antimonid mit Grenzwellenlängen von 7  $\mu\text{m}$ .

Im Zuge der stürmischen Halbleiterentwicklung suchte man auch bekannte Halbleiter mit Störstellen zu versehen, die nur eine geringe Aktivierungsenergie benötigen. Die bekanntesten darunter sind Ge mit Au dotiert (Grenzwellenlänge 8-10  $\mu\text{m}$ ), Ge/Hg (13  $\mu\text{m}$ ), Ge/Cu (25  $\mu\text{m}$ ), GeSn (110  $\mu\text{m}$ ). Der Nachteil dieser dotierten Photodetektoren (extrinsic) ist ihre notwendige starke Kühlung, welche ca.  $T = 500/\lambda c$  beträgt, d.h. für eine Grenzwellenlänge von 10  $\mu\text{m}$  eine Temperatur von 50°K. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Absorption der Halbleiter für das zu verwendende Wellenlängengebiet.

Aus diesen Gründen war es klar, dass geeignete Detektoren Eigenhalbleiter (intrinsic detectors) sein sollten, also Halbleiter mit möglichst kleinem Abstand zwischen Valenzband und Leitfähig-

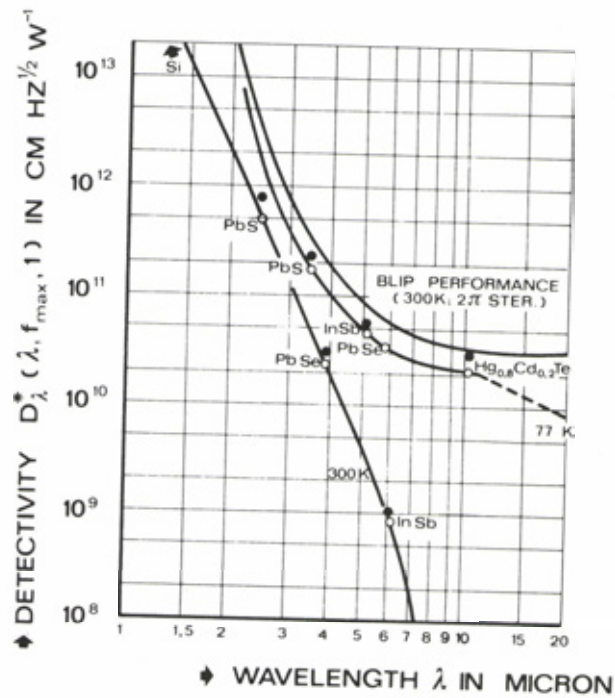
5-7

keitsband. Die Kühlung solcher Halbleiter muss nicht so weit getrieben werden (etwa  $T=1000/\lambda c$ ) wie bei dotierten Halbleitern. In den letzten Jahren ist es gelungen, durch Mischen zweier verträglicher Verbindungen Kristalle mit kontrollierbarem Energie-gap zu erhalten. Eines dieser Kristalle hat dabei einen Band-Abstand, welcher praktisch null ist (semi-metal). Zwei solcher Systeme wurden bis heute gefunden, nämlich:

- CdTe / HgTe
- und
- PbTe / SnTe

wobei das letztere System noch nicht so weit durchentwickelt ist, um kommerziell erhältlich zu sein. Der heute gebräuchlichste Detektor ist daher CdHgTe.

Alle diese Quantendetektoren werden heute nach ihrer Detectivity klassiert, um so ermitteln zu können, wie weit man an den Idealfall eines Detektors herankommt. Figur 5 soll das verdeutlichen. Die oberste Kurve stellt dabei die sogenannte Blip-(Background-Limited-Performance) Detectivity in Funktion der Grenzwellenlänge des Detektors dar. Dabei wurde angenommen, dass die Umgebungstemperatur 300°K beträgt und der Oeffnungswinkel des Detektors  $2\pi$  rad beträgt. Normalerweise kann man in Sichtgeräten den Oeffnungswinkel wegen der relativen Apertur des Objektivs höchstens  $\pm 20^\circ$  machen. Deshalb sollte für unsere Zwecke diese Kurve ca. um einen Faktor 3 höher liegen. Unter diesen Umständen treffen weniger Quanten der Umgebungstemperaturstrahlung auf die Detektorfläche ein, und dadurch steigt, wie wir gesehen haben, die Blip-Detectivity. Man sieht aber aus dieser Darstellung, dass die heute erhältlichen Detektoren schon verhältnismässig gut sind, aber den Idealfall noch nicht erreicht haben. Es fehlt also für unsere Zwecke noch ein Faktor von ca. 4, welcher aber im Labor an einzelnen Exemplaren bereits erreicht wurde.



Figur 5: Detectivity einiger intrinsic-Photohalbleiter

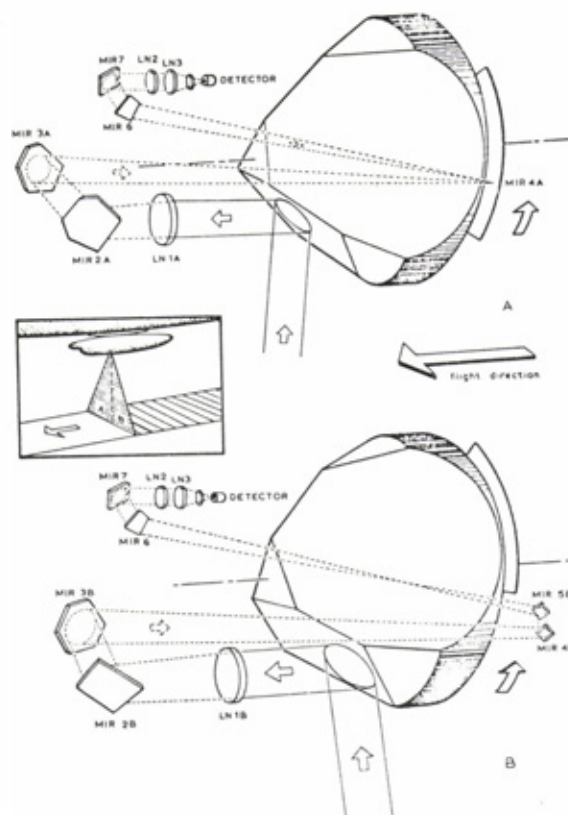


5-8

## 6. Infrarot-Bildgeräte

Um nun mit diesen Infrarot-Detektoren Bilder zu machen gibt es im wesentlichen nichts anderes, als mit mechanischen Abtastern, wie zu Nipkow's Zeiten, das Objektiv Punkt für Punkt an der Photozelle vorbeizuführen und das so gewonnene Bildsignal wieder zu einem Bild zusammensetzen. Das schöne Prinzip der Ladungsspeicherung über eine Bildperiode und nachfolgender Abtastung, das uns beim Fernsehen von der einfachen Photozelle über das Ikonoskop, Superikonoskop, Orthikon bis zum Image-Orthikon und Vidikon geführt hat, bleibt uns hier vorerst hauptsächlich wegen des geringen Bildsignalkontrastes versagt.

Die erste Anwendung von Bildgeräten im militärischen Bereich waren die sogenannten Line-Scanner. Diese sind in Flugzeugen eingebaut und Richtung Boden orientiert. Die mechanische Abtastung erfolgt dabei nur in einer Zeile, während die Fortbewegung des Flugzeuges die dazu senkrechte Richtung automatisch abtastet. Bild 6 soll das verdeutlichen und auch eine typische Abtast-Einrichtung solcher Scanner zeigen (Oude-Delft).



Figur 6: Prinzip eines Line-Scanners (Oude-Delft)

Bild 7 zeigt eine repräsentative Bodenaufnahme, wie sie mit solchen Scannern gemacht wird. Typisch für diese Anwendung war die Abtastung von 200 000 Bildpunkten pro sec., was einer Bandbreite von ca. 100 kHz entspricht. Die Temporaufauflösung ist 0,5°K. Die Signal-Information wurde entweder direkt im Flugzeug auf Photopapier aufgezeichnet oder das elektrische Signal auf Magnetband gespeichert.

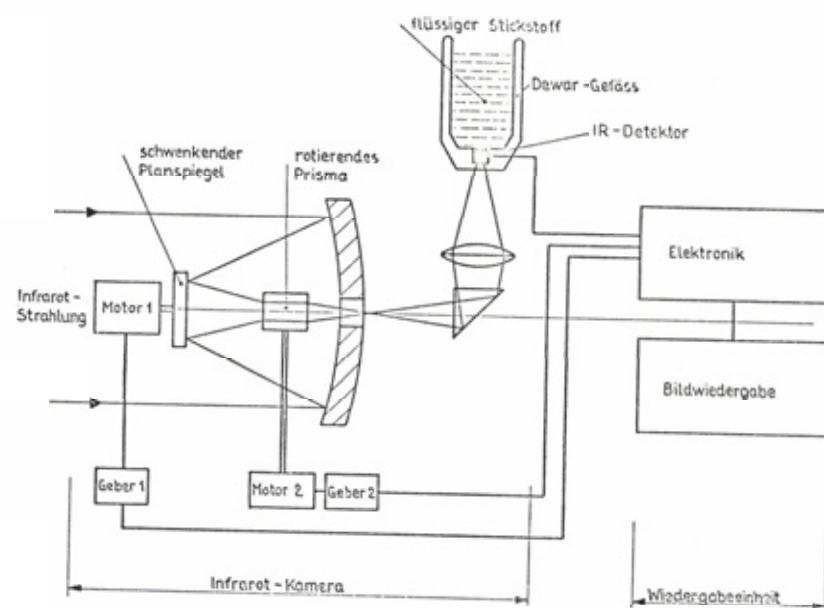
Die Herstellung von Scannern mit mechanischer Abtastung in beiden Richtungen unter Verwendung eines einzigen Detektors war ein weiterer Schritt der Entwicklung. In der Regel wird das Bild in 100 x 100 Elemente zerlegt und mit einer Bildwechselfrequenz von ca. 20 Bildern pro Sekunde gearbeitet,

5 - 9



Figur 7: Typische Luft-Boden-Aufnahme mit diesem Gerät

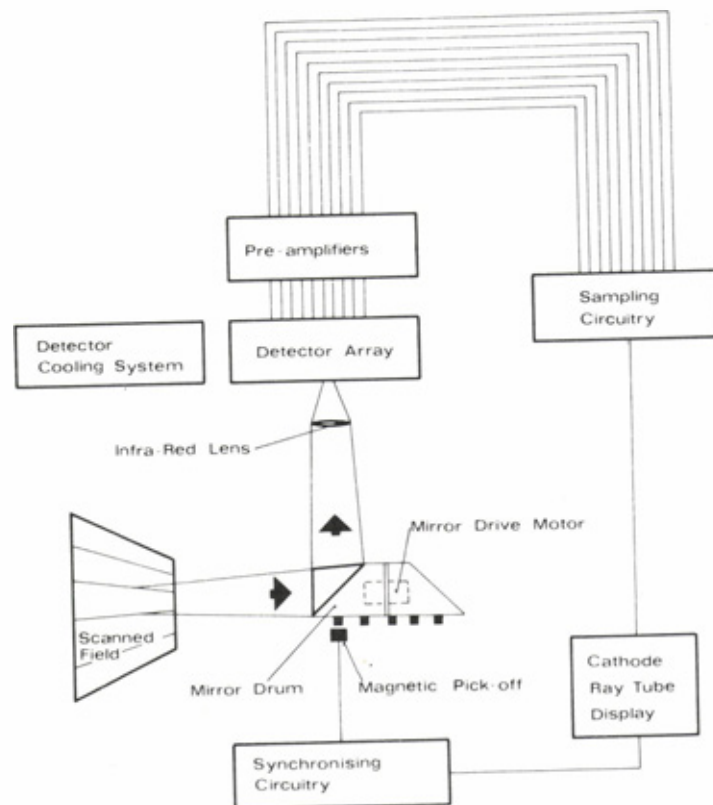
was auch wieder 200 000 Bildpunkte pro Sekunde ergibt. Das Schema einer solchen Anordnung findet sich in Figur 8, wobei die horizontale Ablenkung durch einen rotierenden Glaskörper und die Vertikalablenkung durch einen Spiegel erfolgt.



Figur 8: Prinzipieller Aufbau eines Ein-Zellen Infrarot-Sichtgerätes

## 5-10

Nun ist es leider so, dass Geräte für Boden-Boden-Aufklärung mit nur einem Detektor in ihrer Empfindlichkeit und räumlicher Auflösung zu bescheiden sind, um die militärischen Bedürfnisse erfüllen zu können. Man verlangt für diesen Zweck heute Temperaturauflösungen von  $0,2^{\circ}\text{K}$  und eine räumliche Auflösung von  $0,4 \text{ m Rad}$ , um Menschen in einer Entfernung von  $500 \text{ m}$  noch gut feststellen zu können. Da man die Bildwechselfrequenz aus Gründen des zeitlichen Auflösungsvermögens nicht ändern wollte, war man also gezwungen, mehrere Detektoren gleichzeitig zu verwenden. In der Regel verwendet man 15 bis 100 Detektoren, was natürlich einen Gewinn des Signal-zu-Rauschverhältnisses bringt. Dieser Gewinn läuft etwa proportional mit der Wurzel aus der Anzahl Detektoren, weil eben jetzt das Frequenzband für den Einzeldetektor schmaler wird. Die Verwendung von mehreren Elementen bringt, wenn man für eine Gruppe von Zeilen je ein Element verwendet, noch den Vorteil mit sich, dass dann die mechanische Abtastgeschwindigkeit kleiner gehalten werden kann. Allerdings werden an die Gleichmässigkeit der Detektoren relativ hohe Anforderungen gestellt. Figur 9 zeigt das Schema eines solchen Mehrlement-Scanners.



Figur 9: Optischer und elektronischer Aufbau eines Mehrlement-Sichtgerätes

In Hinsicht Bildqualität stellen solche Geräte das Beste dar, was man heute erreichen kann. Sie wurden vor allem in den USA (Hughes, Honeywell, etc.) und England hergestellt. Natürlich ist die Komplexität dieser Geräte und auch ihr Preis sehr hoch, so dass ihre Verwendung derzeit sehr limitiert ist. Figur 10 und Figur 11 zeigen zwei Bilder die mit einem solchen Gerät gemacht wurden, und Figur 12 zeigt das entsprechende Gerät (Hawker-Siddeley). (Die Kühleinrichtung und Elektronik befindet sich dabei ausserhalb des gezeigten Gerätes.)

Es gibt auch die Möglichkeit, mehrere Detektoren entlang einer Zeile anzuordnen und die Bildsignale der einzelnen Detektoren entsprechend ihrem Abstand und der Abtastgeschwindigkeit zu verzögern und aufzusummieren. Vorteil dieser Methode ist, dass an die Gleichmässigkeit der Detektoren keine so grossen Anforderungen gestellt werden müssen, weil ja jedes Bildelement durch alle Detektoren ge-

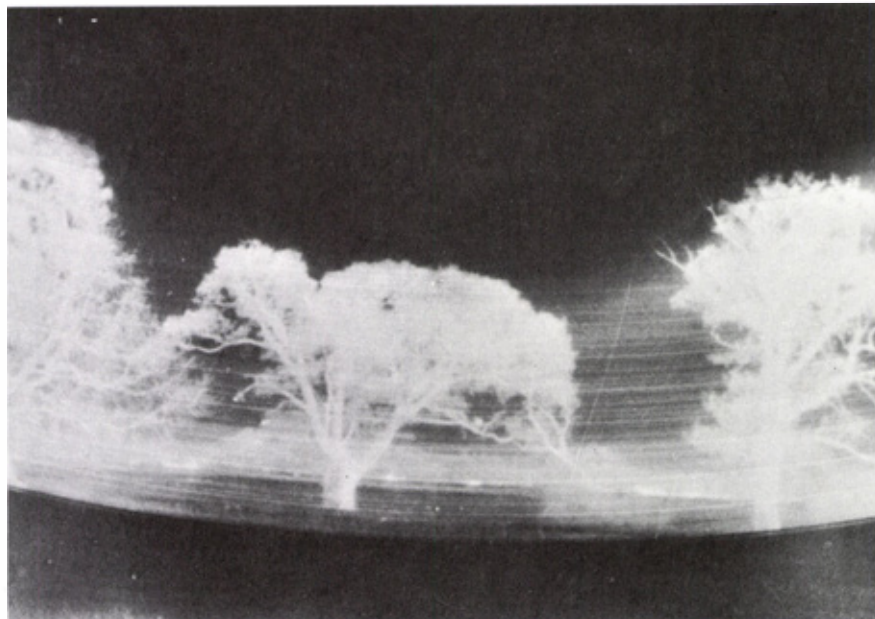


5-11

sehen wird. Bezüglich Signal- und Rauschverhältnis gilt natürlich dasselbe wie bei der Parallel-Methode. Ein erheblicher Nachteil dieses Verfahrens ist, dass keine Reduktion der Abtastgeschwindigkeit möglich ist.



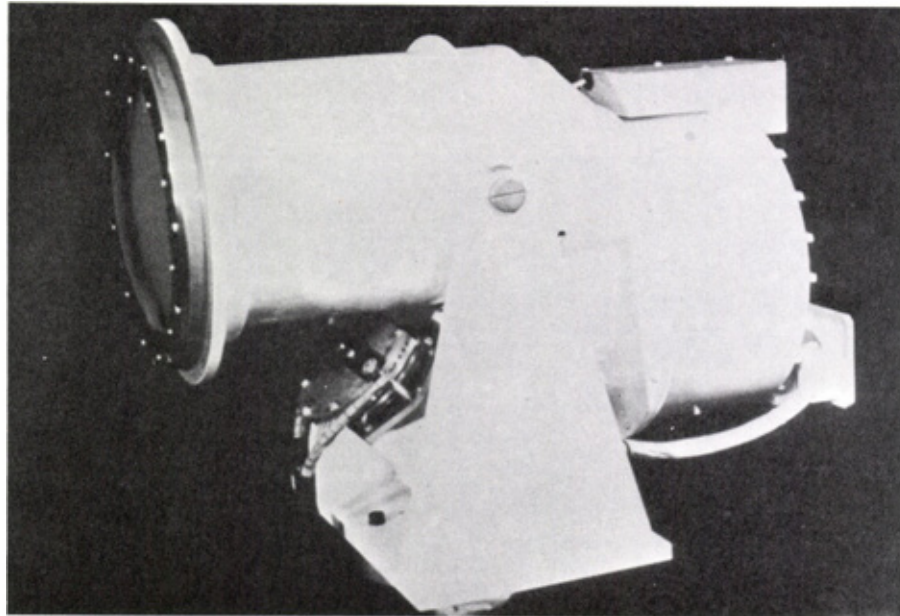
Figur 10: Aufnahme mit Multielement-Scanner (Hawker-Siddeley)  
Autos im Vordergrund 100 m, im Hintergrund 400 m  
Entfernung



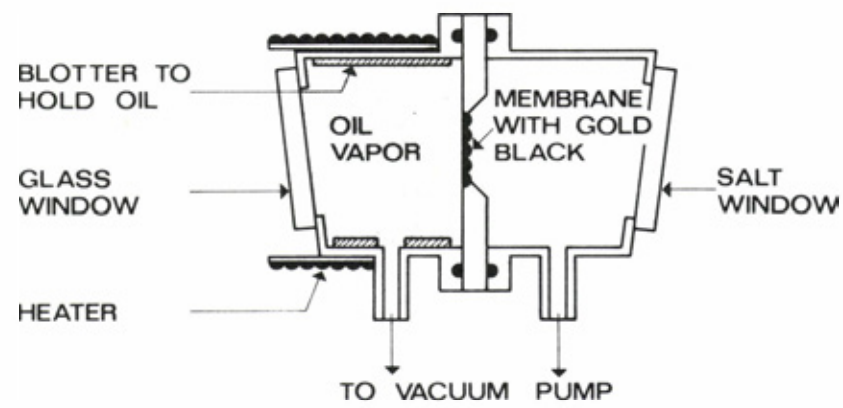
Figur 11: Aufnahme mit Multielement-Scanner (Hawker-Siddeley)  
Auto im Hintergrund ca. 1,5 km Entfernung



5-12



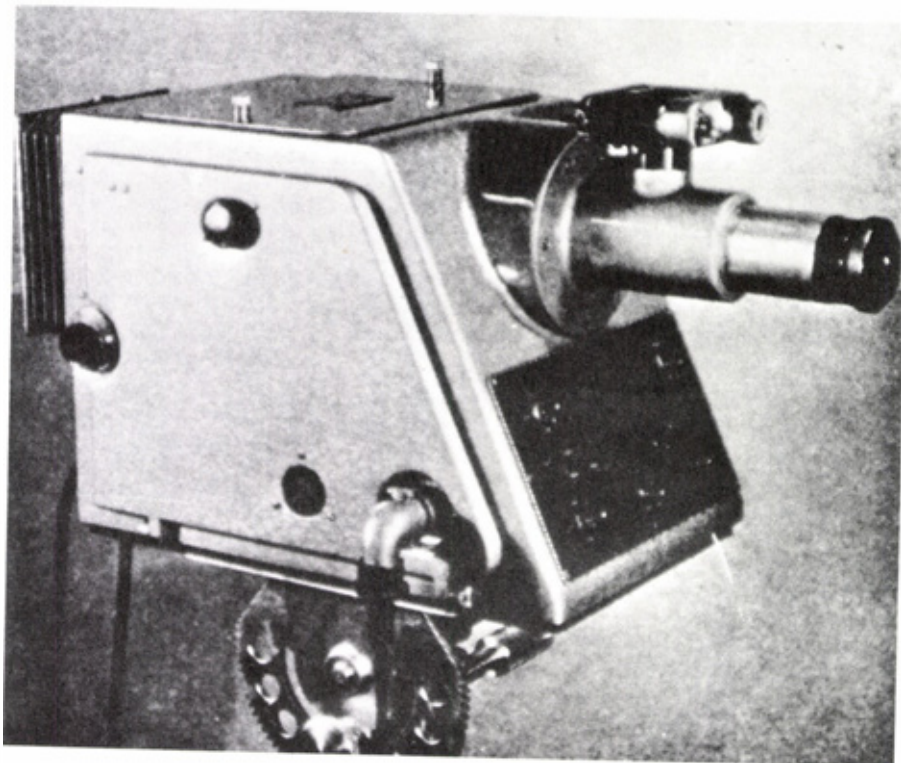
Figur 12: Multielement-Scanner (Hawker-Siddeley)



Figur 13: Prinzip des Evaporograph

### 7. Infrarot-Bildgeräte ohne mechanische Abtastung

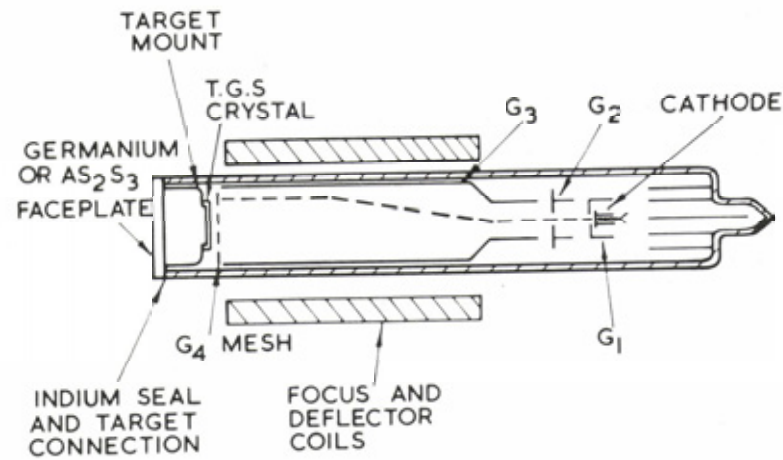
Da die mechanische Abtastung bei schnellen Bildabtastern immer Schwierigkeiten mit sich bringt, hat man selbstverständlich schon lange versucht Geräte zu entwickeln, welche ohne diese auskommen. Es gibt hier eine Anzahl von Vorschlägen. Die meisten von diesen sind aber nicht über das Versuchsstadium hinausgekommen. Die historisch älteste Methode ist wohl die Evaporographie. Sie wurde bereits in den 20er Jahren (Czerny) im Labor bearbeitet und später in den USA (Baird-Atomic) weiterentwickelt und hier bis in die 60er Jahre kommerziell vertrieben. Das Prinzip ist einfach und in Bild 13 dargestellt. Auf einem dünnen Membran-Film, auf welchem Gold-Black zum Zwecke der Infrarotabsorption aufgedampft ist, befindet sich ein sehr dünner Oelfilm. Das Wärmebild wird mittels einer Infrarot-Optik direkt auf diese Membran abgebildet, wobei sich diese entsprechend der Strahlungsverteilung erwärmt. An den Stellen höherer Membrantemperatur wird daher der Oelfilm infolge Verdampfung dünner gegenüber Stellen geringerer Temperatur. Die Empfindlichkeit des Gerätes ist nicht sehr hoch, weil die Verdampfungsenergie des Oeles relativ gross ist. Im besten Fall kann eine äquivalente Temperaturdifferenz von  $1^{\circ}$  bei ca. 0,5 sec. Belichtungszeit erreicht werden. Bild 14 zeigt ein solches Gerät (Baird-Atomic). Die Membran wird beleuchtet und in Reflexion betrachtet. Die Intensität des reflektierten Lichtes ändert sich mit der Dicke der Oelschicht (Interferenz).



Figur 14: Evaporograph (Baird-Atomic)

In den letzten Jahren ist es auch gelungen eine rein elektronische Aufnahmeröhre für Wärmebilder zu entwickeln. Diese Röhre, die eine grosse Ähnlichkeit mit den Vidikon-Aufnahmeröhren der Fernsichttechnik aufweist wird daher meistens als Pyricon bezeichnet. Die physikalische Grundlage für dieses Verfahren ist der pyroelektrische Effekt, wie er bei vielen ferro-elektrischen Kristallen auftritt. Darunter versteht man die Temperaturabhängigkeit der inneren Polarisierung solcher Kristalle. Am weitest häufigsten wird Triglycinsulfat verwendet mit einer pyroelektrischen Konstanten von etwa  $3 \cdot 10^{-8}$  Coulomb  $\text{cm}^{-2}$  pro Grad und einer Dielektrizitätskonstante  $\epsilon = 40$  bei Zimmertemperatur (Curie-Temperatur ca.  $50^{\circ}\text{C}$ ). Das Prinzip dieser Aufnahmeröhre soll an Hand von Figur 15 kurz

5-14



Figur 15: Schema des Pyricon

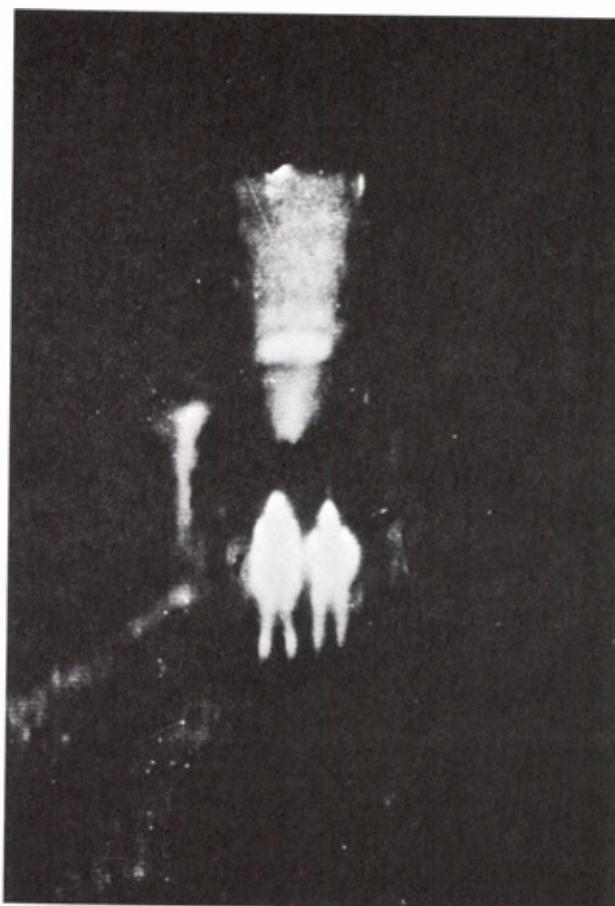
erörtert werden. Das Infrarotbild wird mittels einer Optik (nicht gezeichnet) auf den TGS-Kristall (Dicke ca.  $20 \mu$ ) geworfen. Dabei erhält der Kristall örtlich eine Wärmeverteilung, die etwa in jedem Punkt der dort auftreffenden Energie der Infrarot-Strahlung entspricht. Der Kristall ist auf der Bildseite mit einer Elektrode versehen und wird auf der anderen Seite durch den abtastenden Elektronenstrahl praktisch auf Kathodenpotential gehalten. Wenn das Wärmebild und damit die Temperaturverteilung im Kristall zeitlich konstant ist, kann eine solche Aufnahmeröhre kein Bildsignal liefern. Ändert sich aber die Temperaturverteilung zeitlich, so ändert sich auch die Polarisation im Kristall und damit das Potential an seiner Oberfläche. Damit muss der Elektronenstrahl an den Stellen geänderter Temperatur die Oberfläche des Kristalles durch Aufbringen von freien Ladungen wieder auf Kathodenpotential bringen, wodurch das Bildsignal entsteht. Da der TGS Kristall ein guter Isolator ist, darf das Vakuum in der Röhre nicht allzu hoch sein, um auch einen positiven Ionenstrom zu ermöglichen, der verhindern muss, dass der TGS Kristall zu stark negativ aufgeladen wird und so jeden Elektronenstrom zum Kristall komplett unterbunden würde.

Weil also, wie ausgeführt, diese Röhre nur zeitliche Änderungen des Wärmebildes sichtbar zu machen gestattet, muss dieses entweder durch einen Chopper vor der Röhre, zeitlich verändert werden oder dauernd auf dem TGS Kristall bewegt werden. Die Empfindlichkeit dieser Aufnahme-Röhre ist begrenzt durch die Wärmeleitfähigkeit im Kristall und durch seine relativ hohe Dielektrizitätskonstante und kann daher die Qualität der Multielement-Scanner nicht erreichen.

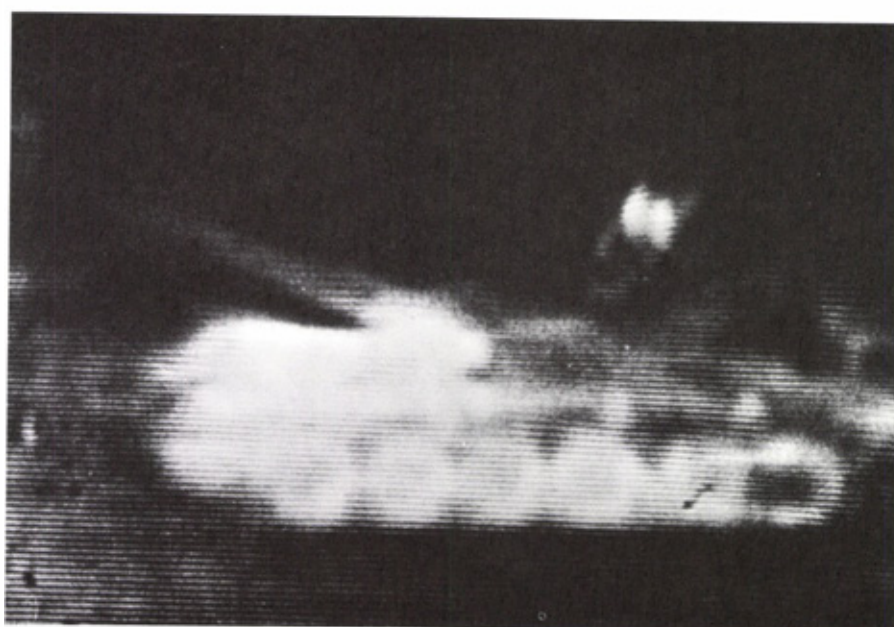
Ein weiteres Verfahren, welches auch wie alle bisher besprochenen Nicht-Scanner-Sichtgeräte thermische Detektion benützt, ist das Panicon der Firma Gretag AG (siehe Bild 16). Es benützt als Detektor ebenfalls eine Oelschicht, wie der Evaporograph und basiert auf dem Effekt der Öldeformation infolge der Abhängigkeit der Oberflächenspannung mit der Temperatur. Figur 17 zeigt das Prinzip des Panicon. Durch eine Infraroptik wird die Wärmestrahlung des Objektes über einen Raster auf die Oelschicht abgebildet. Die Oelschicht befindet sich auf einem möglichst gut wärmeisolierenden Träger. Die so entstehenden örtlichen Temperaturdifferenzen der Öloberfläche verursachen ihre Verformung. Diese kann mit einer Schlierenoptik direkt sichtbar gemacht werden. Das Gerät ist von bestechender Einfachheit und braucht zum Betrieb nur eine kleine Batterie zur Speisung der Beleuchtungslampe (0,8 W). Das Panicon hat eine Empfindlichkeit von  $0,3^{\circ}\text{K}$  und eine räumliche Auflösung von  $1 \text{ mrad}$  in horizontaler und  $2 \text{ mrad}$  in vertikaler Richtung. Unter den Infrarot-Geräten ohne mechanische Abtastung steht es in Hinsicht Bildqualität und Empfindlichkeit bis heute sicher an der Spitze.



5-15



Figur 18: Aufnahme Panicon: 2 Personen in 70 m Entfernung



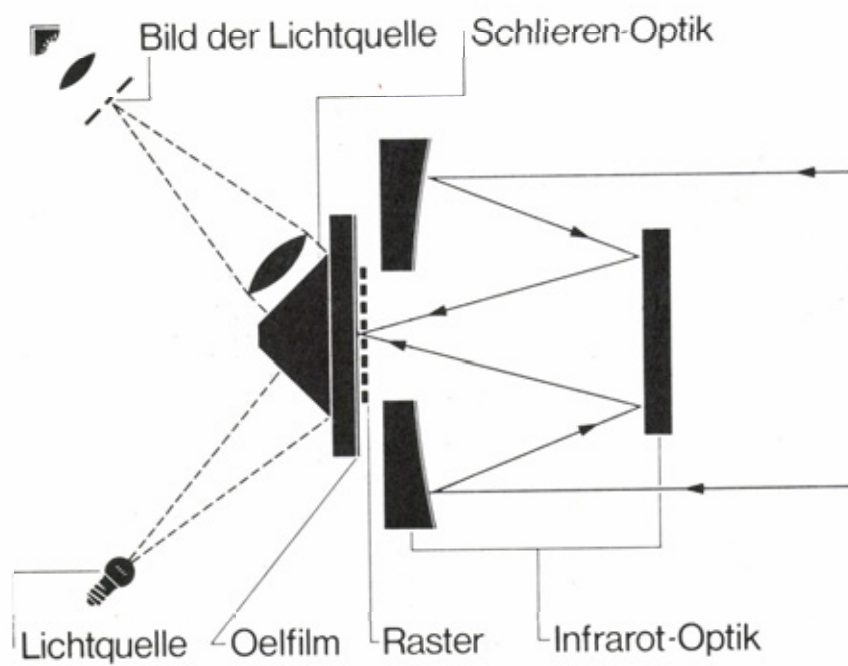
Figur 19: Panzer in 100 m Entfernung (2 Personen im Turm)



5-16



Figur 16: Panicon (Gretag)



Figur 17: Gretag Panicon 7510

Schlussbemerkungen

Aus dieser Uebersicht des gegenwärtigen Standes der Infrarot-Technik lässt sich folgendes sagen: Mit den Multielement-Scannern können heute die hohen Ansprüche auf dem militärischen Sektor erfüllt werden. Die hohe Komplexität der Geräte und damit ihr Preis rechtfertigt ihre Anwendung aber nur in Spezialfällen, z.B. in Flugzeugen (FLIR = Forward Looking Infrared). Für eine weite Verbreitung dieser Geräte zum Zwecke der Boden-Boden-Beobachtung ist heute noch nicht zu denken. In den USA hofft man durch Uniformisierung der Arrays und der Optik in Modularbauweise eine Preissenkung ermöglichen zu können.

Die zukünftige Entwicklung der Infrarot-Sichtgeräte wird natürlich darauf gerichtet sein, die mechanische Abtastung zu vermeiden. Ob das unter Verwendung von gekühlten Quantendetektoren in Verbindung mit CCD (Charged-Coupled-Devices) möglich ist, wird nach ersten theoretischen und praktischen Versuchen eher pessimistisch beurteilt. Für die Verwendung von thermischen Detektoren in solchen Geräten stellt aber bis heute die Wärmeleitfähigkeit des Targets ein echtes Hindernis dar, die Empfindlichkeit weiter zu erhöhen.