

Dr. rer. nat. Jürgen Nolting
Carl Zeiss, Oberkochen

Wärmebildgeräte auf Basis der OPHELIOS-Module

1 Einleitung

Die geänderten weltweiten Rahmenbedingungen für die Verteidigungsaufgaben bedingen auch eine Änderung auf dem Markt für Wärmebildgeräte (WBG). So müssen z. B. in vermehrtem Umfang kleine, leichte, luft-verlastbare, mobile Fahrzeuge mit darauf zugeschnittenen WBGs ausgestattet werden. Auch Anwendungen in kleinen, unbemannten Flugzeugen stellen hohe Anforderungen an ein geringes Gewicht der Sensorik.

Die eingeführte Technologie der US-German Common Modules ist für derartige Aufgaben nicht mehr uneingeschränkt anwendbar. Neuere Technologien, wie sie mit dem deutsch-französischen Detektor zweiter Generation IRCCD 288 x 4, der im Rahmen des PARS3-Programms entwickelt wurde, zur Verfügung stehen, stellen auf Grund der hohen Systemkosten ebenfalls keine optimale Wahl dar. Die low-cost Variante mit 48 x 4 Elementen wird nur ohne on-chip-Multiplexer angeboten. Es besteht daher der Bedarf nach einem neuen Detektor vom IRCCD- oder IRCMOS-Typ, der deutlich kostengünstiger als der 288 x 4-Detektor und vielseitiger als der 48 x 4-Detektor sein sollte. Die Antwort der deutschen Wärmebildindustrie ist ein neuer Detektor mit 96 x 4 Elementen mit CCD-TDI und CMOS-Multiplexer, auf dessen Basis der OPHELIOS-Modulsatz aufgebaut ist. Dabei steht das Akronym OPHELIOS für **O**ptischer **P**assiver **H**och-Empfindlicher **L**eichter **I**nfrarot-**O**ptischer **S**ensor.

Entwicklungsleitlinie war das Erreichen einer möglichst hohen Querschnittlichkeit, ähnlich wie bei den bewährten US-German Common Modules. Dadurch ist eine Verwendung der Module in einer Vielzahl von Anwendungen möglich geworden, so daß sich durch große Stückzahlen ein niedriger Systempreis erreichen läßt.

Diese „deutschen“ Common Modules wurden im Rahmen eines gemeinsamen Entwicklungsprojektes der Firmen

- Carl Zeiss, Oberkochen
- Atlas Elektronik, Bremen
- AEG, Heilbronn
- TEMIC EZIS, Ulm
- Eltro, Heidelberg

mit Fa. Carl Zeiss als Sprecher entwickelt.

2 System-Architektur

Der prinzipielle Aufbau eines OPHELIOS-WBGs ist im Bild 1 schematisch dargestellt. Kernstück des Gerätes ist der Detektor IRCCD 96 x 4 von AEG, der durch einen Kühler mit geschlossenem Kühlkreislauf nach dem Stirling-Prinzip auf die Arbeitstemperatur von 77 K gekühlt wird. Die Detektorsignale werden gemultiplext und digitalisiert und anschließend digital so weiterverarbeitet, daß ein zeilenweise organisiertes Ausgangssignal erzeugt wird, das nach einer abschließenden D/A-Wandlung als analoges CCIR-kompatibles Videosignal zur Verfügung steht.

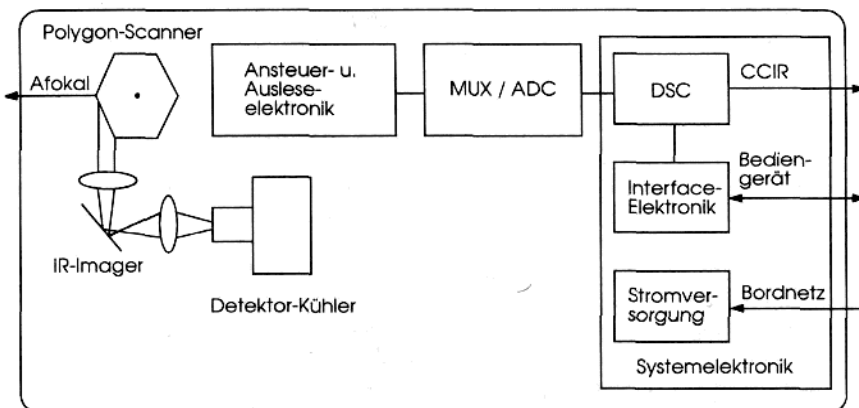


Bild 1. Blockschaltbild OPHELIOS

Das WEG OPHELIOS besteht aus 5 Modulen:

- Modul A1: Detektor/Kühler mit Ansteuer- und Auslese-Elektronik
- Modul A2: MUX/ADC
- Modul A3: Systemelektronik
- Modul A4: Polygon-Scanner
- Modul A5: IR-Imager mit thermischer Referenz.

Zur Komplettierung des Wärmebildgerätes kommen noch die systemspezifischen Komponenten Teleskop, Bediengerät und Monitor hinzu.

Wie auch bei den Common-Module-Geräten sind diese nicht Bestandteil des Modulsatzes.

3 Funktionsbeschreibung

3.1 Detektor/Kühler mit Ansteuer- und Ausleseelektronik

Das Modul A1 (Detektor/Kühler mit Ansteuer- und Ausleseelektronik) besteht aus den folgenden Komponenten:

- CMT pv-Array, empfindlich im 7,5...10,5-um-Wellenlängenbereich mit auf dem „kalten“ Träger integrierten Silizium-Ausleseschaltkreis
- Dewar mit integriertem Kaltteil
- Kompressor
- Ansteuer- und Ausleseelektronik (AAE).

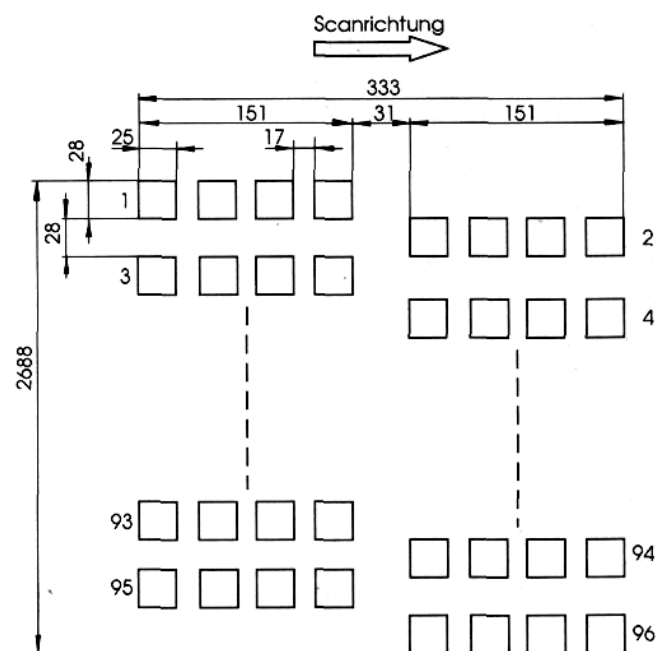


Bild 2. Geometrische Anordnung der Detektorelemente

Die 96 x 4 Elemente des Detektors sind angeordnet, wie im Bild 2 dargestellt. Jeweils 4 Elemente sind so nebeneinander plziert, daß sie beim Scannen quer zur Detektorlängsachse nacheinander dieselben Szenenteile sensieren. Die 96 Vierergruppen bilden zwei Blöcke mit je 48 Gruppen. Die Gruppen der beiden Blöcke sind senkrecht zur Scanrichtung gerade soweit gegeneinander verschoben, daß sich eine lückenlose Szenenabtastung ergibt. Die bei der vierfachen Sensierung eines Szenenelements entstehenden vier Ladungspakete werden durch ein CCD-Register elektrisch aufsummiert, so daß sich die vierfache Ladungsmenge am Ausgang dieses Registers ergibt. Da bei der Ladungssummutation das Rauschen nur mit der Wurzel der effektiven Detektorfläche ansteigt, sich somit verdoppelt, wird eine Verdopplung des Signal/Rauschverhältnisses erreicht. Dieses Verfahren wird TDI (time delay and integration) genannt. Die TDI-Register sind so ausgelegt, daß drei Belichtungen erfolgen können, während sich das Abbild der IR-Szene um einen horizontalen Pitch zum nächsten TDI-Element bewegt.

Die 96 Ausgänge der TDI-CCD-Register werden mit Hilfe von on-chip-CMOS-Multiplexern auf 8 Ausgangsleitungen zusammengefaßt.

Der Detektor bietet eine einstellbare Skimming-Funktion und die Möglichkeit des Ladungs-Partitioning. In Verbindung mit der Ansteuer- und Auslese-Elektronik sind Integrationszeiten von 0,5 ns einstellbar.

Detektor-Dewar und Kaltteil der Kühlmaschine bilden eine integrierte Einheit (IDCA, integrated detector cooler assembly). Die Regelelektronik ist in den Kompressor integriert.

Die Ansteuer- und Auslese-Elektronik AAE erzeugt alle für den Betrieb des IR-Multiplexers erforderlichen Takte und Gleichspannungen und synchronisiert den IR-Multiplexer und die Abläufe innerhalb der AAE auf die von der Systemelektronik vorgegebenen Synchronsignale.

Über eine digitale serielle Steuerschnittstelle können die von der AAE erzeugten Taktmuster umprogrammiert werden, um auf diese Weise die Einstellung unterschiedlicher Partitioning-Faktoren und Skimming-Werte vorzunehmen. Auch die Integrationszeit ist auf diese Weise einstellbar.

Die AAE hat 8 analoge Videosignalausgänge. Die analogen Ausgangssignale werden mittels Verstärkern an die Impedanz der A/D-Wandler des Moduls MUX-ADC angepaßt.

Die AAE besteht aus drei hochintegrierten SMD-Leiterkarten, die über flexible Multilayer miteinander verbunden sind. Sie wird in unmittelbarer Nähe des Detektors angeordnet.

Bild 3 zeigt eine Fotografie des Moduls.

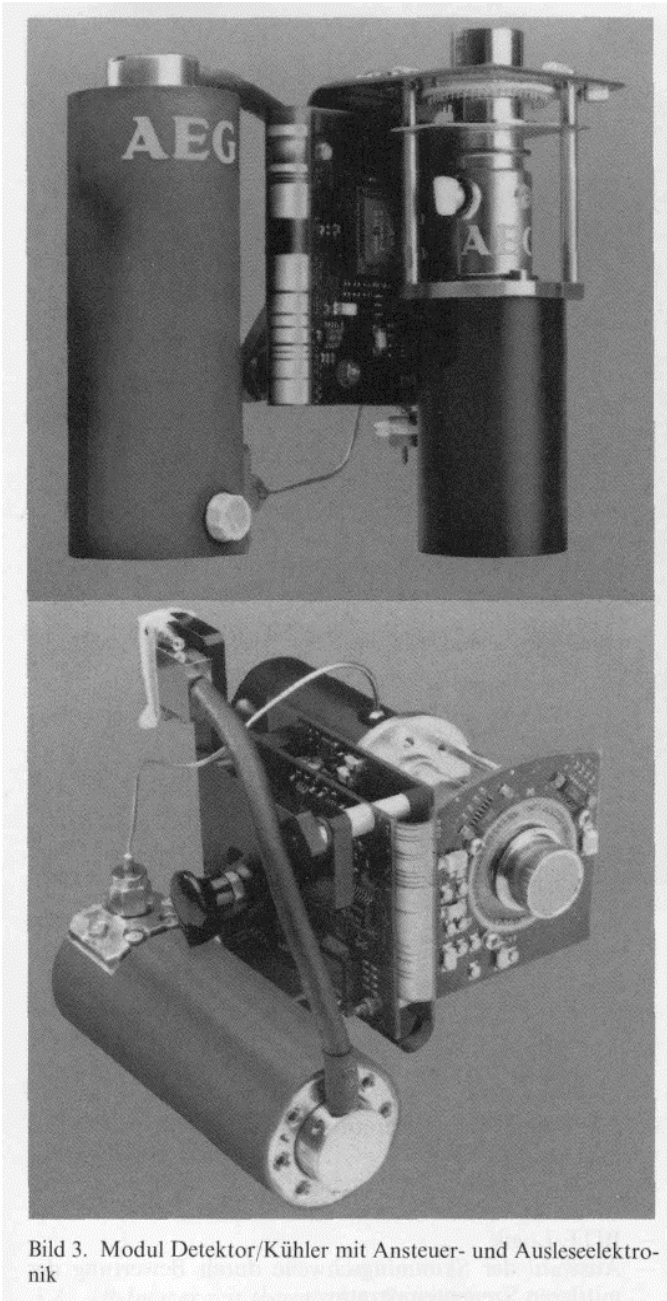


Bild 3. Modul Detektor/Kühler mit Ansteuer- und Ausleseelektronik

Das Modul wird durch folgende technische Daten charakterisiert:

Detektor:

- Empfindliche Fläche (horizontal x vertikal) : 25 x 28 μm^2
- Abstand der Einzelelemente in Zeilenrichtung : 17 μm
- Anzahl der Einzelelemente pro Zeile : 4
- Anzahl der Zeilen: 2 Gruppen zu je 48 Zeilen
- Abstand der Zeilen innerhalb einer Gruppe : 28 μm
- Abstand zwischen den Gruppen : 31 μm
- Cold Shield : FOV = 40°
- Minimaler Photonenfluß (f/1,7, -40°C) : 1,1 x 10¹⁶/cm² s
- Maximaler Photonenfluß (f/1,5, +60°C) : 1,2 x 10¹⁷/cm² s
- Antiblooming : 3,5 x 10¹⁸/cm² s

- Cut-On-Wellenlänge (50% Peak-Responsivität) : 7,45...7,75 μm
- Cut-Off-Wellenlänge (50% Peak-Responsivität) : 10,0...10,5 μm
- Integrationszeit (8 Stufen) : 0,5 μs ...2,75 μs
- Multiplexer : 12: 1
- TDI : 4fach
- Videoausgänge : 8
- Betriebsarten: Mode 1 = nom. Zykluszeit, Skimming, variable Integrationszeit
Mode 2 = nom. Zykluszeit, Skimming, Partitioning, var. Integrationszeit
- Detektivität: (Mode 1) : min. 1,0 x 10¹¹ cm Hz^{1/2}/W
(Mode 2) : min. 7,0 x 10¹⁰ cm Hz^{1/2}/W

Kühler:

- Thermische Masse des Detektoraufbaus bei Abkühlung von +63°C auf 77 K : max. 150J
- Thermische Last des integrierten Detektoraufbaus, incl. elektrischer Verlustleistung des Detektors bei 63 °C Umgebungstemperatur : max. 200 mW
- Schwankung der Detektortemperatur : < 0,2 K/s
: < 1 K/min
- Abkühlzeit bei ausgeschaltetem Detektor Umgebungstemperatur — 35 °C... +23°C : max. 3,0 min
- Leistungsaufnahme im nominalen Detektorbetrieb Umgebungstemperatur — 35 °C... + 23 °C : max. 20 W
- Zuverlässigkeit : MTBF min. 2000 h

Ansteuer- und Ausleseelektronik:

- 8 analoge Videoausgänge 0,5 V...4,5 V
- Pulsgenerator für 16 Multiplexertakte synchron zum Systemtakt und Spaltenstartimpuls
- Spannungsversorgung für 15 Multiplexer-Gleichspannungen
- Temperatursignalerzeugung 100 mV/K
- Notabschaltung des Detektors
- 2 veränderliche Spannungen für Skimming und Detektorabgleich mit 12 Bit Genauigkeit
- Betriebsmodenumschaltung, Einstellung von Skimming und Integrationszeit über serielle Schnittstelle
- Detektoreichdaten im E²PROM abgelegt.

3.2 MUX-ADC

Das Modul MUX-ADC enthält für jeden der acht Videokanäle je einen 10-Bit-AD-Wandler. Vor der AD-Wandlung erfolgt eine analoge Offsetanpassung für jede einzelne Detektorzeile zur Kompensation der unterschiedlichen Offsets der Detektorgruppen. Die zur Offsetanpassung erforderlichen Korrekturwerte werden dem MUX-ADC digital (8 Bit) übergeben. Durch diese Offsetkorrektur wird es ermöglicht, vor der AD-Wandlung bei Bedarf eine Verstärkungsanhebung durchzuführen (globale Kontrasteinstellung). Diese bewirkt, daß die AD-Wandler einstellbare Temperaturfenster zwischen 2,5 K und 25 K abdecken können. Weitere Funktionen des Moduls MUX/ADC sind

- Weiterleitung der System-Takt/Synchronsignale
- Verteilung der Takt- und Synchronsignale
- globale, in vier Stufen einstellbare analoge Verstärkung vor der AD-Wandlung

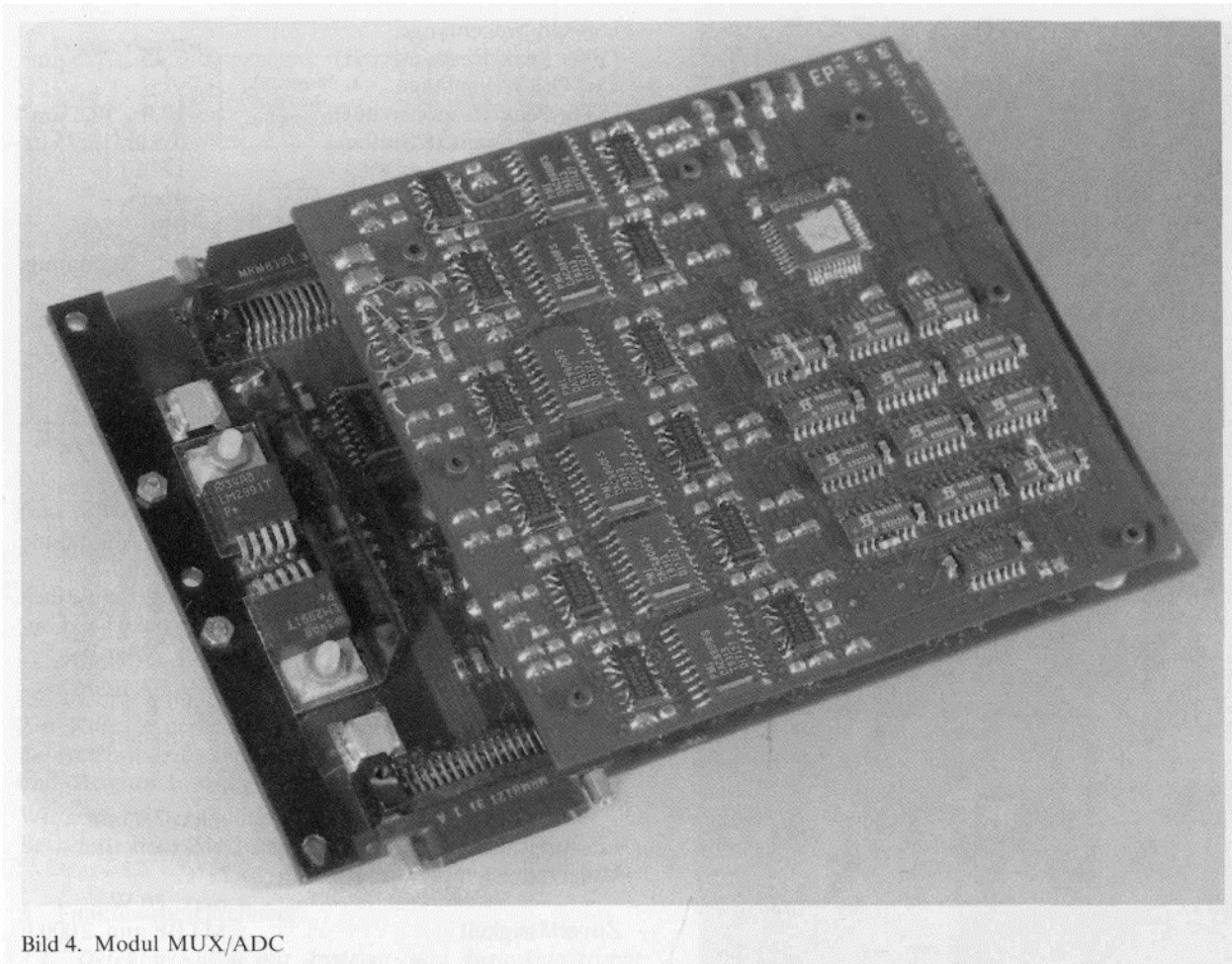


Bild 4. Modul MUX/ADC

- Zwischenspeicherung der Offset-Korrekturwerte mit einer Tiefe von 96 x 8 Bit
- Multiplexen der digitalen Videosignale (8 : 2)
- 12-Bit-Videodatenschnittstelle zur nachfolgenden Elektronik.

Das Modul MUX-ADC besteht aus zwei Leiterkarten, die in Bild 4 dargestellt sind.

Das Modul wird durch folgende technische Daten charakterisiert :

- 8 analoge Videoeingänge 0,5...4 V
- analoge Offsetkompensation 8 Bit
- 8/10 Bit ADC: Verstärkungsfehler + 2 %
(Daten tbc) Offsetfehler + 50 mV
Integrale Nichtlinearität ± 2 LSB
- in acht Stufen (3 Bit) einstellbarer globaler Kontrast: 2,5 K...25 K für Vollaussteuerung
- digitaler Multiplexer 8 : 2
- Zwischenspeicher für Offset-Korrekturwerte, Tiefe 96 x 8 Bit.

3.3 Systemelektronik

Die OPHELIOS-Systemelektronik besteht aus drei Leiterkarten und erfüllt folgende Funktionen:

- Erzeugung aller zum Betrieb eines OPHELIOS-WBGs benötigten Versorgungsspannungen
- CAN-Bus-Schnittstellenprozessor zur Kommunikation mit dem Bediengerät

- Ansteuerbaugruppen für Fokus- und Sehfeld-Umschaltung (Schaltssysteme oder Zoom)
- digitaler Scankonverter mit Grafikerzeugung und Videomischer
- prozessorgesteuerte Systemlogik zur internen Ablaufsteuerung und für Sonderfunktionen
- BITE-Logik
- Auswahl der Skimmingschwelle durch Bewertung der mittleren Szenentemperatur
- Helligkeitsregelung unter Berücksichtigung des Skimmingswertes
- Kompensation der durch die Abtastung entstehenden Bildverzerrungen.

Die Systemelektronik stellt einen analogen Videoausgang nach CCIR-Standard zur Verfügung. Ein Eingang für externe Synchronisierung des HELIOS-WBGs ist ebenfalls vorhanden. Darüber hinaus ist ein Trackerausgang mit den notwendigen Synchronsignalen realisiert.

Bild 5 zeigt eine Fotografie des Moduls.

Das Modul wird durch folgende technische Daten charakterisiert:

- digitaler Videoeingang: 2 parallele Kanäle, 12 Bit + Sync., 16 MHz, TTL
- Videoausgang: CCIR 624-4 B/G, 1 V_{ss}, 75 Ohm, max. 14.8 MHz, 256 Graustufen, max. 2 Zielmarken, Grafikoverlay im gesamten Bildfeld möglich
- Trackerausgang: wie Videoausgang, Totzeit max. 7 ms bei Vorzugsausleserichtung, sonst, max. 27 ms
- Synchronisation: Eingang und Ausgang, Composite Sync, 1 V_{ss}

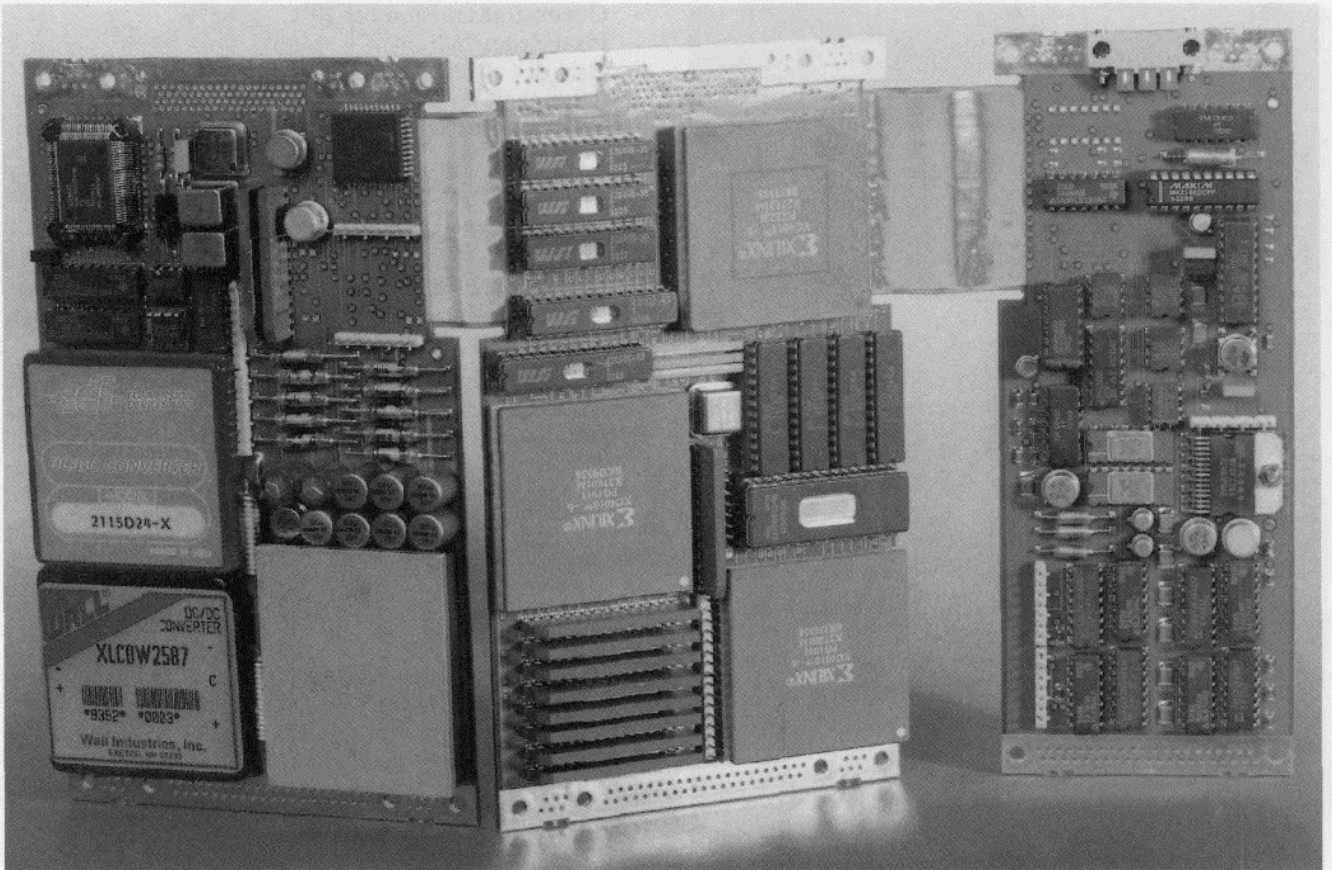


Bild 5. Modul Systemelektronik

- Trackersynchronisation: CLK: TTL, 1mA, max. 14,8 MHz
- HSync: TTL, 1 mA, 15625 Hz
- VSync: TTL, 1 mA, 50 Hz
- Bedienschnittstelle: CAN, ISO DIS 11858, max. 1 MHz
- Speicher: Bildspeicher: 1024 kByte x 8
- Grafik (SRAM): 64 kByte x 8
- Grafik (PROM): 8 kByte x 8.

3.4 IR-Imager mit thermischer Referenz

Das Modul hat zwei Aufgaben

- Abbildung auf die Detektorebene und
- Generierung thermischer Referenzen in Zusammenhang mit dem Scanner.

Um eine bei allen Temperaturen lückenlose Abtastung der Szene zu ermöglichen, ist der IR-Imager als Athermat ausgelegt. Zur Minimierung des Einflusses von Streustrahlung aus dem Geräteinneren liegt die Austrittspupille des Imagers genau im Cold Shield des Detektors. Die Eintrittspupille befindet sich auf dem Polygonscanner.

Die Linsenzahl ist minimiert durch den Einsatz von asphärischen Flächen und diffraktiv wirkenden optischen Elementen.

Zur DC-Restauration und Offset-Kompensation ist es erforderlich, in regelmäßigen Abständen jedes Detektorelement mit einem definierten Strahlungsfluß zu beaufschlagen, der in diesem Fall dem mittleren Fluß der abgetasteten Szene entspricht oder zu diesem in einem festen und bekannten Verhältnis steht (thermische Referenz). Dies erfolgt während

der Mitte der Abtastzeit des Scanners mit Hilfe einer dem Imager vorgelagerten Spiegelanordnung. Die Spiegel bewirken eine Transformation der Pupille auf den Detektor. Bild 6 zeigt den Imager, Bild 7 die thermische Referenz. Das Modul wird durch folgende technische Daten charakterisiert:

- abgeknicktes System
- Brennweite 15,03 mm
- Öffnungszahl 1,5
- Sehfeld 10°
- Transmission: > 88%
- thermische Referenz: 4 Spiegel, die in der Mitte der Abtastzeit eine Pupillentransformation auf den Detektor bewirken.

3.5 Polygon-Scanner

Das OPHELIOS-Modul Polygon-Scanner besteht aus einem öflächigen pyramidenförmigen Polygon. Die einzelnen Flächen sind gegeneinander derart verschränkt, daß eine blockweise Abtastung der Szene in drei untereinanderliegenden Teilbildern mit je 96 Zeilen erreicht wird, wie in Bild 8 dargestellt. Außerdem wird ein zweifacher Zeilensprung dadurch erreicht, daß drei der 6 Flächen gegen die restlichen drei so geneigt sind, daß sie verglichen mit diesen um eine halbe Zeile versetzt abtasten.

Das Scannerpolygon wird angetrieben von einem drehzahlgeregelten Motor. Die Phasenlage der Abtastung wird ebenfalls geregelt, auf diese Weise ist eine externe Synchronisierung des Gesamtgerätes möglich. Der Scanner enthält einen SPS (Scan Position Sensor), mit dessen Hilfe Bild- und

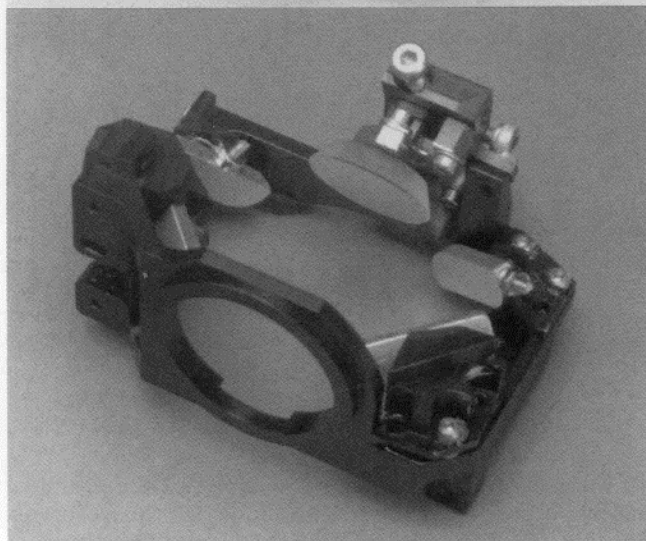


Bild 6 (oben). IR-Imager

Bild 7 (unten). Thermische Referenz

Spalten-Start-Impulse generiert werden, so daß die Ansteuer- und Ausleseelektronik synchron zum Scanvorgang betrieben werden kann.

Das Modul besteht aus dem Polygon mit Motor und Positionssensor sowie der zugehörigen Antriebs- und Regelungselektronik.

Eine Fotografie ist in Bild 9 wiedergegeben.

Das Modul wird durch folgende technische Daten charakterisiert:

- pyramidenförmiges Polygon mit 6 Facetten
- Drehzahl: 1500 U/min
- Horizontales Sehfeld: 40°
- Durchmesser 40 mm an der Basis, Mittendurchmesser 33 mm
- Scan-Effizienz: 40%.

4 System-Leistungsdaten

System ohne Afokal

- Durchmesser der Eintrittspupille: 10 mm
- Sehfeld: 30°x40°
- Sehfelddiagonale: 50°

- Gesamttransmission bei 20°C: > 85%
- Pixel/Zeile: 768
- Zahl der abgetasteten Zeilen pro Halbbild: 288
- Öffnungszahl: 1.5
- Spektralbereich: (7,45...7,75) um bis (10...10,5) um

5 Bedienkonzept

Das Bedienkonzept OPHELIOS geht von den normalerweise in Fahrzeugsystemen für die Bedienung von WBGs geforderten Bedienelementen aus.

Um eine möglichst einfache Bedienung, besonders unter den Gesichtspunkten von schlecht oder gar nicht ausgebildetem Bedienungspersonal, zu ermöglichen, wird eine geringe Zahl von Bedienelementen angestrebt, die in Kapitel 5.1 beschrieben werden.

Die OPHELIOS-Systemelektronik verfügt über eine Reihe von Optionen (Kap. 5.2), mit denen weitere Funktionen angesteuert werden können. Die Nutzung dieser Optionen muß abhängig vom Einsatz des Gerätes individuell entschieden werden.

Die in Kapitel 5.3 beschriebenen Einstellungen können nicht vom Bediener beeinflußt werden, sondern werden durch Software- oder Jumperpositionen auf der SE-Leiterplatte eingestellt und können genutzt werden, um die Integration in verschiedene Systeme zu ermöglichen.

5.7 Ständige Bedienfunktionen

| | | |
|----------------|---------|---|
| AUS/BEREIT/EIN | AUS: | Gesamte OPHELIOS-Elektronik ist stromlos |
| | BEREIT: | Versorgung für Interface und Digitalelektronik sowie Kühler |
| | EIN: | Gesamtes OPHELIOS-WBG ist versorgt |

NFOV/WFOV Die Elektronik steuert die Motoren der Sehfeldumschaltung entsprechend der gewählten Position an. Bei Verwendung eines Zoom-Teleskops wird dieses in das entsprechende Sehfeld bewegt.

Polarität Weiß/schwarz Heiße Ziele werden weiß oder schwarz dargestellt.

Fokus nah/fern Der Motor des Fokusantriebs wird entsprechend der Schalterstellung angesteuert. Der Motor läuft auf die vorgegebene Position ein.

Kontrast Mit dem Regler wird die Breite des Temperaturfensters für die gesamte Grauwertskala eingestellt.

Helligkeit Mit dem Regler wird die Lage des Temperaturfensters festgelegt.

5.2 Optionale Bedienfunktionen

Autofokus EIN/AUS Mit dieser Funktion kann ein Autofokus aktiviert werden. Die Funktion des Fokuseinstellers bleibt erhalten. Jegliche manuelle Fokussierung schaltet den Autofokus ab.

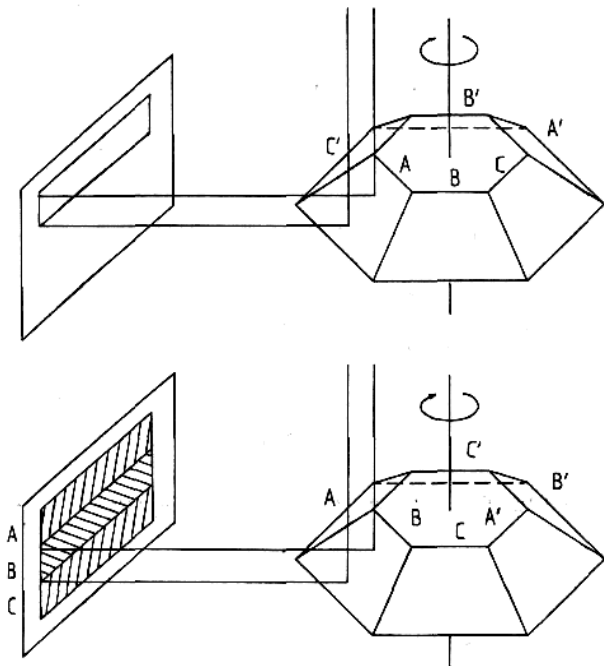


Bild 8. Scanverfahren

| | |
|---|--|
| Zielmarken- helligkeit | Der Regler regelt die Zielmarkenhelligkeit und/oder andere eingeblendete Grafik. |
| Zielmarken- Justierung rechts/links | Bewegt die Zielmarke pixelweise nach links oder rechts |
| Zielmarke hoch/tief | Bewegt die Zielmarke pixelweise nach oben oder unten |
| Zielmarkenoffset | Die Zielmarke kann mit Vorhaltewerten aus dem FLT-Rechner gesteuert werden. |
| Zoom elektr. | Die Bildmitte wird zweimal so groß auf dem Monitor dargestellt. |
| Frame Integr. | Zur Rauschunterdrückung werden zwei Vollbilder gleichzeitig dargestellt. |
| Frame Freeze | Standbild |
| Testbild | Es wird ein Balkenmuster dargestellt. |
| Systemtest | Durch Einstellung von verschiedenen Helligkeitswerten entsteht eine Grautreppe auf dem Bildschirm. |

5.3 Nicht vom Bediener beeinflussbare Einstellungen und Optionen

| | |
|------------------------|--|
| Detektortyp | Per Software ist der DSC auf folgende Detektortypen einstellbar: — 96 x 4 — 288 x 4 (für zukünftige Erweiterungen) |
| Grafik- einblendung | Über den CAN-Bus kann beliebige Grafik auf den Bildschirm eingeblendet werden. Zielmarken werden in der SE abgelegt. |

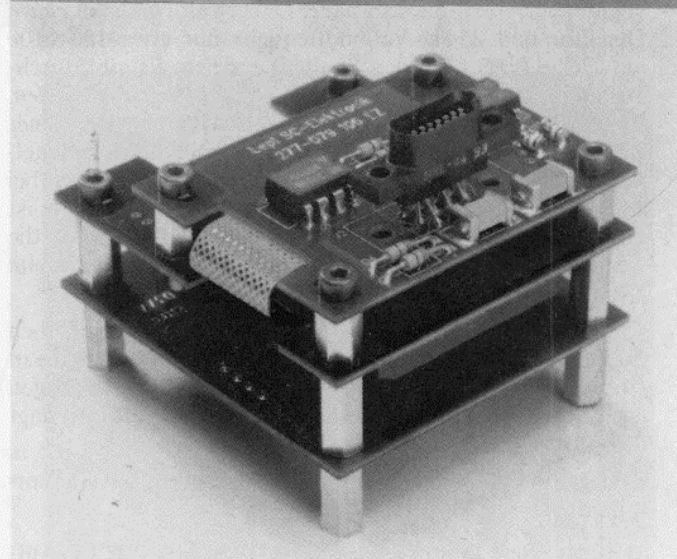
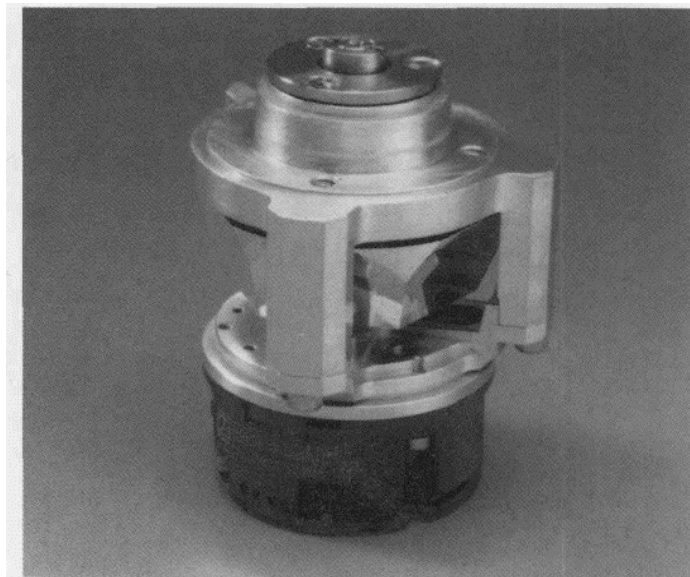


Bild 9. Modul Polygon-Scanner

| | |
|---------------------------|---|
| Bildseiten vertauschen | Das Bild wird seitenverkehrt dargestellt. |
| Bildlagen vertauschen | Das Bild wird um 180° gedreht dargestellt. Diese Funktion führt zu einer zusätzlichen Totzeit des DSC von 20ms. |

6 Prüfbarkeit

Das OPHELIOS-WBG enthält zur Sicherstellung einer optimalen Prüfbarkeit eine BITE-Funktion. Dieses BITE liefert eine GO/NOGO-Aussage für das Gesamtgerät. Überwacht werden die Versorgungsspannungen, die Videosignalschnittstelle und der CAN-Bus.

Zusätzlich wird jeweils beim ersten Einschalten von „BEREIT“ auf „EIN“ ein Testmodus gestartet, bei dem Grautreppe durch Umprogrammierung der Skimming-Werte vom Detektor generiert werden. Darüber hinaus sind weitere Testbilder möglich, die von den Modulen MUX/ADC und Systemelektronik erzeugt werden und eine Fehlereingrenzung erleichtern.