

Verifizierung der Fokalebenen (FPA) von Sentinel-4

**RÜDIGER HOHN¹, CHRISTIAN WILLIGES², MAX HARLANDER¹,
JÜRGEN HINGER¹, HANNES ROSSMANN² & RALF REULKE³**

Zusammenfassung: Das Instrument Sentinel-4 ist Teil des Copernicus-Programms und soll erstmalig von einem geostationären Orbit aus Daten zur Überwachung der atmosphärischen Zusammensetzung mit dem Fokus auf Luftqualität und Klima liefern. Sentinel 4 wird auf dem MTG (Meteosat Third Generation) Sounder fliegen.

Ein wesentliches Subsystem sind die zwei Fokalebenen (FPAs) mit den entsprechenden Spektrometern, die die Wellenlängenbereiche 305nm - 500nm (ultraviolett und sichtbares Spektrum) und 750nm – 775nm (nahes Infrarot) abdecken. Da die Systeme bei ca. 215K betrieben werden, müssen die Messungen in einer Thermal Vakuum Kammer erfolgen.

Beide Fokalebenen wurden im Auftrag von Airbus (Airbus Defense and Space GmbH) am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin Adlershof vermessen.

1 Einleitung

Dieser Beitrag beschreibt die Sentinel-4 Verifikationskampagne des Qualification Models (QM) der Focal Plane Systems (FPS).

In Kapitel 2 wird das System beschrieben. Dieses besteht neben den beiden Focal Plane Arrays (FPAs) aus jeweils einer Front End Electronic (FEEs) und insgesamt einer Front End Support Electronic (FSE). In Kapitel 3 wird auf den Testaufbau eingegangen. Es werden die Parameter der Tests angegeben und der daraus abgeleitete Aufbau in einer Thermal-Vakuum-Kammer beschrieben, sowie die verwendeten Lichtquellen erläutert. Kapitel 4 befasst sich mit der Analyse der Testergebnisse. Es werden die Testergebnisse für ausgesuchte Tests präsentiert. In Kapitel 5 werden Fazit und Ausblick auf die Verifikationskampagne der beiden Flugmuster (FM1 und FM2) gegeben.

2 Detektoren, Fokalebenen und Elektronik

Das Sentinel 4 Instrument verfügt über zwei Fokalebenen. Die NIR Fokalebene umfasst den Wellenlängenbereich von 750 nm bis 775 nm, die UVVIS Fokalebene den Bereich 305 nm bis 500 nm. Die Detektoren (CCDs) sind auf jeweils einer „Optischen Bank“ montiert. Diese Optische Bank wird als „Focal Plane Assembly“ bezeichnet. Das Instrument verfügt über zwei FPAs. Um die Empfindlichkeit der Detektoren zu erhöhen und parasitäre Signale zu minimieren werden die Detektoren bei 215 K betrieben. Diese Temperatur wird während des Betriebs über „Heat-Pipes“

¹ Airbus Defense and Space, 88039 Friedrichshafen, Deutschland,
E-Mail: [ruediger.hohn, maximilian.harlander, juergen.hinger]@airbus.com

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institute für Optische Sensorsysteme,
12489 Berlin, Deutschland, E-Mail: [Christian.Williges, Hannes.Rossmann]@dlr.de

³ Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, 10099 Berlin, Deutschland,
E-Mail: reulke@informatik.hu-berlin.de

und Radiatoren erreicht. Die elektrische Versorgung der Detektoren und das Auslesen der Detektorsignale erfolgt über eine analoge und eine digitale Elektronik. Einen Überblick über die Fokalebene und der Elektronik zeigt die Abb. 1.

2.1 S4 UVN Detektoren

Bei dem UVVIS Detektor handelt es sich um einen sogenannten Split Frame Transfer CCD mit zwei Image und Memory Zonen. Der gesamte Spektralbereich ist auf dem UVVIS Detektor in zwei Bereiche, 305 nm bis 343 nm (UVVIS I) und 343 nm bis 500 nm (UVVIS II) unterteilt. Beide Bereiche können mit unterschiedlichen Integrationszeiten betrieben werden. Dies führt zu einer Erhöhung der Empfindlichkeit im UV Bereich. Zusätzlich verfügt der UVVIS I Detektorbereich über zwei Ausgänge, die die Möglichkeit bieten, mit verschiedenen Verstärkungsfaktoren zu arbeiten.

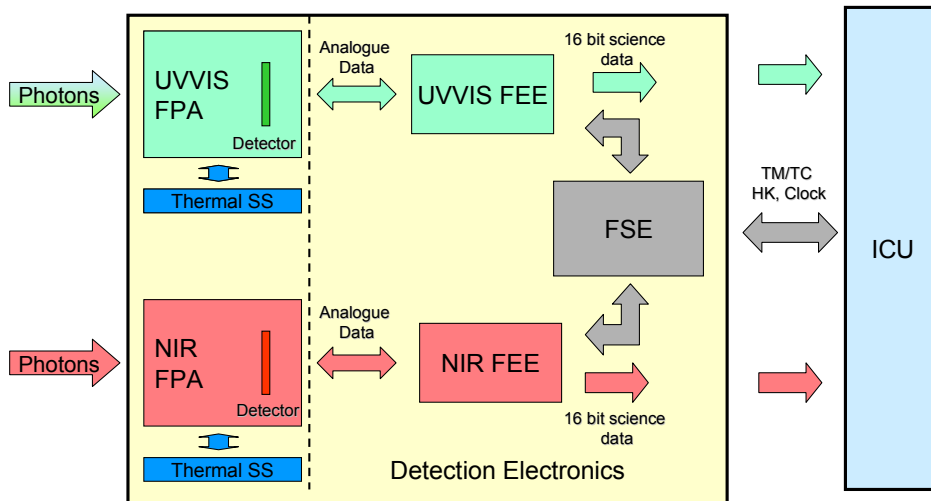


Abb. 1: FPS Block Diagramm

Bei dem NIR Detektor handelt es sich um eine Standard Frame Transfer CCD mit einer Image- und einer Memory Zone. Beide Detektoren werden bei einer Temperatur von 215 K betrieben. Die Temperaturen werden durch passive Kühlung über Heat-Pipes und Radiatoren erreicht. Zur Minimierung der parasitären externen Wärmelasten wurde eine spezielle Halterung für die Detektoren entwickelt. Zusätzlich sorgt diese Halterung für eine möglichst homogene Temperaturverteilung über den Detektor. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen QM Detektor vorintegriert auf der Optischen Bank (FPA).

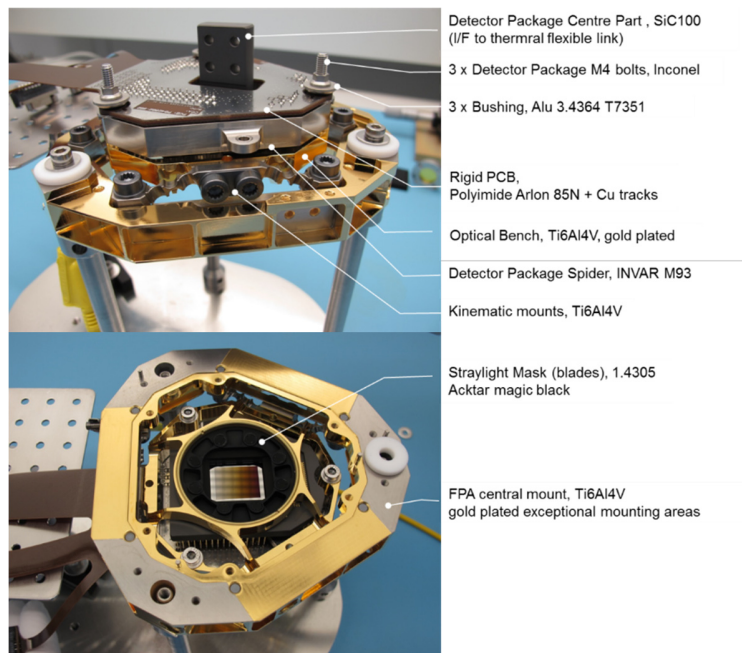


Abb. 2: QM Detektor vor-integriert auf der Optischen Bank (FPA)

2.2 S4 UVN Fokalebenen (FPA)

Das Struktur –und Thermal Design ist für beide FPAs identisch. Minimale Unterschiede liegen aufgrund unterschiedlicher Detektorgrößen im Bereich von Streulichtunterdrückungsblenden. Im Gegensatz zur nominalen Detektortemperatur von 215 K, bleibt die FPA während des Betriebes bei Raumtemperatur. Zentrale Elemente bestehen aus Titan zur Minimierung von Gewicht und zur Minimierung von parasitären Wärmelasten.

Die von den Detektoren produzierte Wärme sowie die parasitären Wärmelasten werden über einen „Kaltfinger“ aus SiC und eine gut wärmeleitende flexible Verbindung zur Heat-Pipe geleitet. Aufgrund unterschiedlicher thermischer Bedingungen im Weltraum, muß die Detektortemperatur aktiv kontrolliert, bzw stabilisiert werden. Dazu dient ein Heizer, der am Übergang Heat-Pipe /Flexible Verbindung angebracht ist.

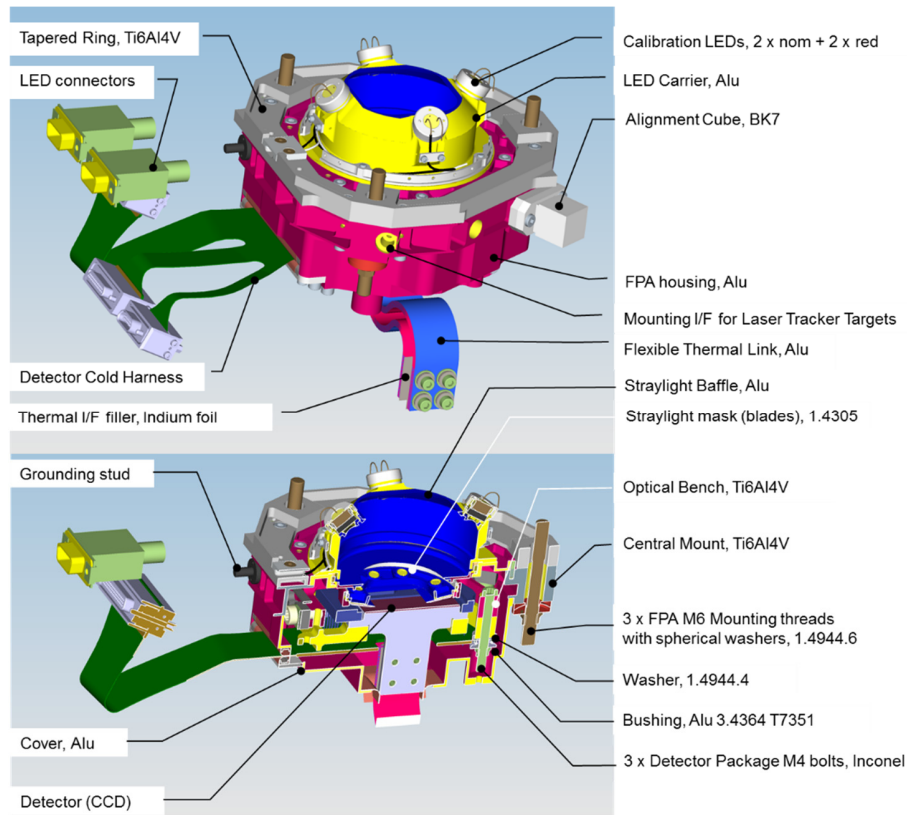


Abb. 3: UVVIS FPA design

2.3 S4 UVN Elektronik

Das Fokalebene System verfügt über einen analogen (FEE) und einen digitalen (FSE) Teil. Jeder Detektor verfügt über eine eigene individuelle FEE (siehe auch Abb. 1).

Die FSE stellt alle elektrischen Versorgungen für die beiden FEEs zur Verfügung. Die FEE verarbeitet die analogen Detektorsignale und muss damit in unmittelbarer Nähe der Detektoren platziert werden um mögliche Verluste über Leitungen zu minimieren.

Ferner sorgt die FEE für die direkte Übertragung der wissenschaftlichen Daten an die Instrument Kontrolleinheit (ICU).

3 Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Abteilung Optik, Kalibrierung, Verifizierung (OCV) im Institut für Optische Sensorsysteme (OS) des DLR am Standort Berlin Adlershof führte in der zweiten Jahreshälfte 2016 die Validierung der Fokalebene (FPAs, Focal Plane Assemblies) des Sentinel-4 Qualifizierungsmodells (QM) durch. Nach erfolgreichem Abschluss und Auswertung der QM Testergebnisse wird OCV auch für die Verifizierung der beiden Flugmodelle (FM) verantwortlich sein.

Die Verifizierungskampagne besteht zu einem Großteil aus radiometrischen Tests, bei der eine homogene Lichtquelle (bzw. Dunkelheit) zum Einsatz kommt. Als homogene Lichtquelle dient eine Ulbrichtkugel. Zusätzlich werden ein Cross-Talk-Test mit einem 635 nm Dioden-Laser, die Kalibrierung der internen FPA-LEDs, sowie eine MTF Messung durchgeführt. Letztere findet an den baugleichen EM (Engineering Models) statt.

Tab. 1: Zusammenfassung der Messungen

Durchgeführter Test	Abgeleitete Analyse	Verwendete Lichtquelle
Linearity	Linearity	Ulbrichtkugel + Spektralfilter
	FPS gain / conversion factor	
	Full Well Capacity (linear)	
	Full Well Capacity (absolut)	
	Signal to Noise Ratio	
	Charge Transfer Efficiency (Serial)	
	Charge Transfer Efficiency (Parallel)	
Average Dark Signal	Average Dark Signal	Keine (Dunkelheit)
	Dark Signal Non-Uniformity	
	Read-out Noise	
	Dynamic Range	
Photo Response Defects	Photo Response Defects	Ulbrichtkugel + Spektralfilter
	Photo Response Non-Uniformity	
Memory Effect	Memory Effect	Ulbrichtkugel
Cross –Talk	Channel to Channel Cross Talk	635 nm Dioden-Laser
Stability over 24 h	Stability over 24 h	Keine (Dunkelheit)
Random Telegraph Signal	RTS and pixels with high dark noise	Keine (Dunkelheit)
FPA LED Calibration	FPA LED Calibration	Intrinsische LEDs der FPAs
Quanteneffizienz	QE	Ulbrichtkugel + Spektralfilter
Modulations Transfer Funktion (Durchführung am baugleichen EM)	MTF	Kollimator, Filter, Fokussieroptik

3.1 Aufbau

Zur Durchführung der radiometrischen Tests wurde eine räumlich homogene und zeitlich hochstabile Strahlungsquelle, in diesem Fall eine Ulbrichtkugel, verwendet.

Für den Cross-Talk-Test wird ein 635 nm Dioden-Laser verwendet.

3.2 Randbedingungen

Wie in der Einleitung erwähnt, sollen die Detektoren unter Einsatzbedingung untersucht werden. Dafür müssen sie, je nach Test, auf 210 K, 215 K, und 220 K temperiert und im Vakuum betrieben werden. Diese Randbedingung erfordert den Einsatz einer Thermal-Vakuum-Kammer (TVK). In der beim DLR vorhandenen TVK kann ein Druck von $5 \cdot 10^{-6}$ mbar mit Hilfe eines dreistufigen Pumpensystems erzeugt werden. Die Temperatur wird über externe Thermostate geregelt. Druck und Temperatur sind langzeitstabil über mehrere Tage.

3.3 Optischer Aufbau

Die Verwendung einer Ulbrichtkugel erfordert im Allgemeinen die Positionierung des zu vermessenden Detektors direkt in der Austrittsapertur der Kugel. Die beim DLR verwendeten Ulbrichtkugeln sind für den Einsatz unter Normalatmosphäre vorgesehen. Diese Randbedingung verhindert eine Positionierung der Detektoren direkt in der Austrittsapertur, da sie in der TVK betrieben werden müssen.

Um dennoch eine gleichmäßige Beleuchtung zu erzielen, wird auf eine Auswirkung des \cos^4 -Gesetzes zurückgegriffen: Bei hinreichend großem Abstand und entsprechendem Größenverhältnis von Detektor zu Austrittsapertur der Ulbrichtkugel wird eine homogene Beleuchtung auch von einer entfernt stehenden Ulbrichtkugel erreicht, da der IFOV (Instantaneous Field Of View) und somit der Betrachtungswinkel für sämtliche Pixel praktisch gleich ist. Das heißt, dass die Ulbrichtkugel als Quasi-Punktlichtquelle für den Detektor fungiert.

Um eine Bestrahlung mit diversen Wellenlängen zu realisieren und die Bestrahlung regeln zu können, werden zwei Filtrerräder in den Strahlengang integriert, jeweils mit acht Spektral- bzw. Neutraldichtefiltern (siehe Abb. 4).

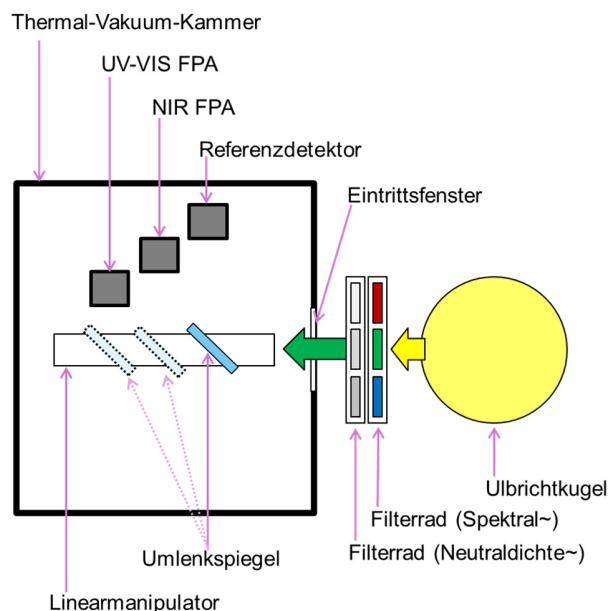


Abb. 4: Prinzipskizze des opto-mechanischen Testaufbaus: Das Licht der Ulbrichtkugel wird mit Hilfe von Filtern manipuliert, bevor es in die Thermal-Vakuum-Kammer eintritt. Über einen linear verstellbaren Umlenkspiegel erreicht das Licht mit gleicher optischer Pfadlänge den jeweiligen Detektor.

Um eine gleichmäßige Bestrahlung aller drei Detektoren zu realisieren, wird der opto-mechanische Aufbau so konzipiert, dass er das Prinzip gleicher optischer Pfadlängen ausnutzt: Über einen linear verstellbaren 90°-Umlenkspiegel werden die Detektoren abwechselnd bestrahlt. Durch räumlich versetzt angeordnete Detektoren ist die Entfernung zwischen Ulbrichtkugel und Detektor für alle drei Detektoren gleich (siehe Abb. 4).

Für den Cross-Talk-Test werden die Filterräder und die Ulbrichtkugel aus dem Strahlengang entfernt und durch einen 635 nm- Laser ersetzt. Dieser wird per Faser in einen Kollimator eingekoppelt, der den Strahl parallelisiert, über ein Teleskop wird der Strahl auf einen Durchmesser von ca. 24 mm aufgeweitet.

Durch eine Kombination zweier Linsen wird der kollimierte Strahl über eine Entfernung von ca. 70 cm auf die Detektoren fokussiert. Die Linsen sind in z-Richtung justierbar, sodass eine Fokussierung möglich ist. Der gesamte optische Aufbau des Lasermessplatzes ist auf einem x-y - Linearmanipulator montiert, der eine Positionierung auf verschiedenen Abschnitten der Detektoren zulässt.

Die theoretische Spotgröße des fokussierten Lasers ist $< 25 \mu\text{m}$. Dieser Wert wird unter realen Bedingungen aufgrund der langen optischen Pfadlänge, diversen optischer Elemente im Strahlengang, sowie thermischer und mechanischer Drifts jedoch überschritten.

3.4 Mechanischer Aufbau

Die FPAs und die zugehörige FEE besitzen eine bestimmte, nicht rechtwinklige und nicht parallele, Ausrichtung zueinander (s. Abb. 5, Position 3.1 und 3.2). Die Flexharnesse, die die Detektoren mit ihrer jeweiligen Elektronik verbinden, haben eine der Instrumentengeometrie angepasste Form und Länge. Um diese auch während der Tests in der TVK verwenden zu können, wird die Geometrie der mechanischen Halter der Satellitengeometrie nachempfunden. Dieser Aufbau ermöglicht es, verlässliche Testergebnisse zu erhalten, die unter anderem die speziellen Widerstände in den verwendeten Kabelbäumen mit berücksichtigen.

3.4.1 Kühlung

Wie oben bereits erwähnt werden die Tests an den FPAs bei Betriebstemperatur durchgeführt. Die Vorgabe ist die FPAs – je nach Test – auf 210 K, 215K sowie 220 K zu temperieren; die FEEs und FSE (front end support electronic) soll auf 293 K stabilisiert sein. Die Vorgabe war eine Stabilität von $< +/- 50 \text{ mK}$. Dafür werden zwei Kühlkreisläufe aufgebaut, deren Thermostate getrennt voneinander die FPAs und die Elektronik (FEEs und FSE) versorgen.

Die FPAs werden über Kronsteine stabilisiert, die in Reihe geschaltet sind. Aufgrund der größeren thermischen Last wird zuerst die UVVIS-FPA versorgt und anschließend die NIR-FPA (Abb. 5, Position 2.3, 3.3, 4). So können beide FPAs stabil auf der gleichen Temperatur gehalten werden. Die FEEs und die FSE sind ebenfalls über Kronsteine an eine Temperaturregelung angeschlossen und auch in Reihe geschaltet: UVVIS-FEE, NIR-FEE, FSE.

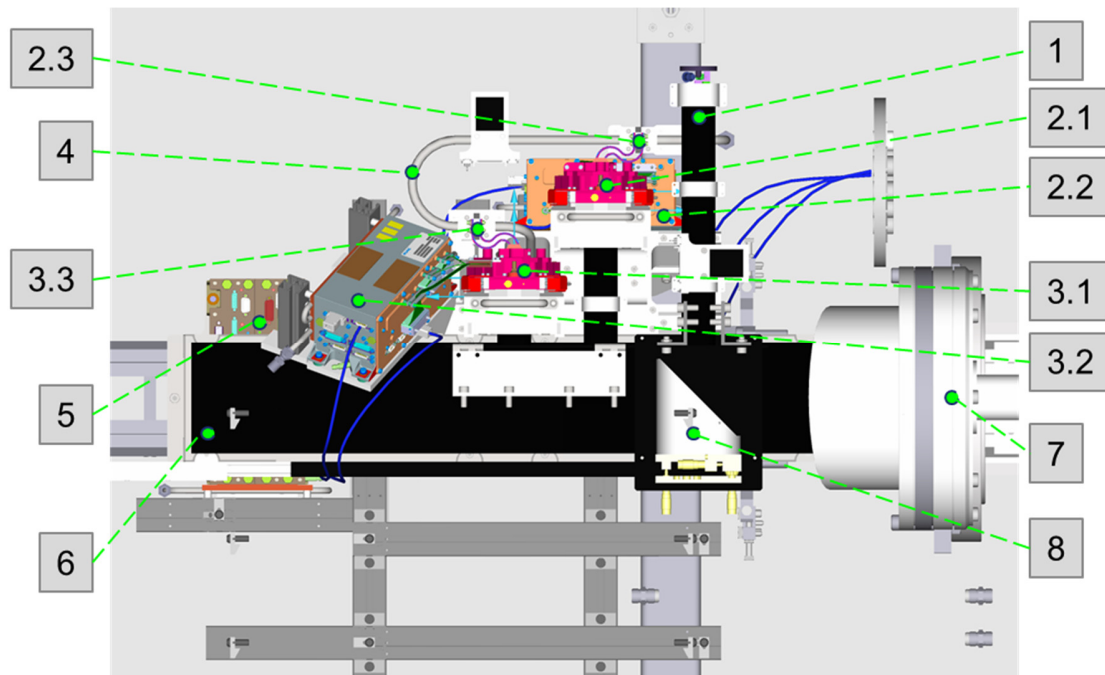


Abb. 5 Aufsicht auf eine Konstruktionszeichnung des Versuchsaufbaus.

- | | | | |
|------|---------------------|-----|---------------------------|
| 1. | Referenzdetektor | 3.3 | NIR Kühlanschluss |
| 2. | UVVIS FPA | 4. | FPA Kühlkreislauf |
| 2.2. | UVVIS FEE | 5. | FSE |
| 2.3. | UVVIS Kühlanschluss | 6. | Linearmanipulator |
| 3.1. | NIR FPA | 7. | Optischer Eingang der TVK |
| 3.2. | NIR FEE | 8. | Umlenkspiegel |

3.5 Durchführung

Um die Vielzahl der Tests möglichst schnell durchführen zu können, ist eine weitgehende Automatisierung der Testabläufe notwendig. Dies wird über das Programm AutoIt® realisiert, mit dem die zur Verfügung stehende Matlab®-Oberfläche autonom gesteuert werden kann.

Auf diese Weise können Einstellungen am Sentinel-4-Testequipment (Integrationszeit, Anzahl der Frames, Aufnahmemodi, etc.), als auch an der GSE (Spiegelposition, Temperatur, etc.) vorgenommen werden.

4 Datenauswertung und erste Ergebnisse

Im Folgenden sollen einzelne Messungen genauer beschrieben werden:

- PRNU und Shade
- Linearität & Nichtlinearität
- Overall system gain aus der Analyse der PTC (Photon Transfer Curve)

4.1 Signalerzeugung

Eine Übersicht zu diesem Thema findet man in KOPEIKA (1998) und JANESICK (2001). Demnach lässt sich das erwartete Signal \hat{S} in DN (Digital Numbers) folgendermaßen bestimmen:

$$\hat{S}[\text{DN}] = \eta_{\text{SG}}^{\text{Det}} \left[\frac{\text{DN}}{e^-} \right] \cdot \eta_{\text{QE}}(\lambda) \left[\frac{e^-}{\text{photon}} \right] \cdot \tau_{\text{int}} [\text{s}] \cdot A_{\text{Det}} [\text{m}^2] \cdot \frac{\lambda}{hc} \left[\frac{\text{m}}{\text{Ws}^2 \text{ m/s}} \right] \cdot E \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] + \text{DS} \quad (1)$$

Tab. 2: Einflussgrößen zur Signalberechnung

$\eta_{\text{QE}}(\lambda)$	Quanteneffizienz	$[e^-/\text{photon}]$
$\eta_{\text{SG}}^{\text{Det}}$	Overall system gain	$[\text{DN}/e^-]$
A_{Det}	Detektorfläche	$[\text{m}^2]$
τ_{int}	Integrationszeit	$[\text{s}]$
E	Bestrahlungsstärke	$[\text{W}/\text{m}^2]$
DS	Temperaturabhängiges Dunkelsignal	$[\text{DN}]$
λ	Wellenlänge	$[m]$

Wir erwarten mindestens drei Rauschkomponenten: Photonenrauschen, Dunkelstrom und das Lese- oder Ausleserauschen (read noise). Während Dunkelstrom- und Photonenrauschen Poisson verteilt sind, wird der read-noise durch eine Normalverteilung beschrieben. Durch die Poissonverteilung des Signals und des Dunkelstroms ergibt sich für das Rauschen die folgende Relation:

$$\sigma_s^2 = \eta_{\text{SG}}^2 \cdot \hat{S} + \sigma_k^2 \quad (2)$$

Diese Gleichung wird hier zur Bestimmung des Overall System Gains genutzt (JANESICK 2007).

4.2 PRNU und Shade

Die Strahlungsverteilung vor dem Detektorchip (Abb. 6) war inhomogen (ca. 20% PV). Dieser Shade und die PRNU wurden vor der Auswertung bestimmt und korrigiert. Die Korrektur beruht auf der folgenden Überlegung:

Wir erwarten einen linearen Zusammenhang zwischen Signal \hat{S}_{ij}^k und Exposer (Bestrahlungsstärke \times Integrationszeit) $\hat{S}_{ij}^k \approx a_{ij} \cdot E_{ij}^k + b_{ij}$ bezogen auf die Pixelposition (ij) und der k -ten Messung (z.B. durch Variation der Integrationszeit). Durch den Shade bei der Bestrahlung wird Exposer orts-, bzw. pixelabhängig. Die Korrektur von PRNU und Shade können nicht unabhängig voneinander vorgenommen werden. Die Korrektur bewirkt einen Ausgleich des Anstiegs für jedes Pixels ohne Offset, bezogen auf eine homogene Referenzbestrahlung \bar{E}^k , die durch einem mittleren Anstieg c beschrieben wird:

$$c = \text{mean}(a_{ij}) \quad c_{ij} = \frac{c}{a_{ij}} \quad \tilde{S}_{ij}^k = c_{ij} \cdot (\hat{S}_{ij}^k - b_{ij}) \quad (3)$$

In den folgenden Auswertungen wird mit den korrigierten Signalwerten \tilde{S}_{ij}^k gearbeitet. Für die Charakterisierung der PRNU wurde eine medianbasierte Analyse des Anstiegs verwendet:

$$d_{ij} = \text{median}(c_{ij}) \quad \text{PRNU} = \text{stddev}(\text{abs}(d_{ij} - c_{ij})) \quad (4)$$

Bezieht man die Standardabweichung auf die maximale Dynamik des gemessenen Signals erhält man für die PRNU < 1% für alle Detektoren (Forderung war maximal 4%).

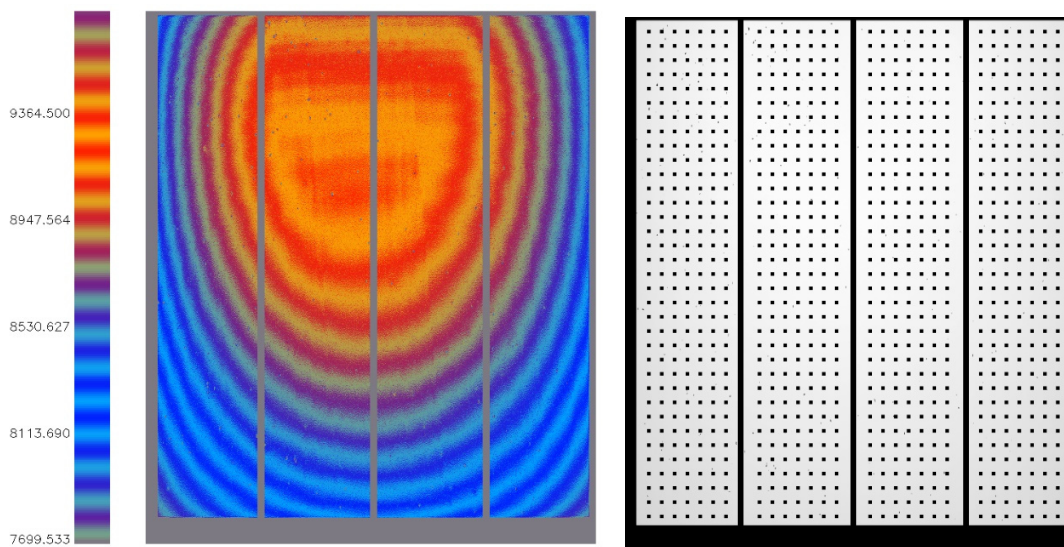


Abb. 6: VIS2 Detektor mit Shade und Referenzpunkten, für die Abhängigkeiten von der Integrationszeit separat untersucht wurden

Den Unterschied zwischen der Analyse der Linearität an den Referenzpunkten ohne und mit Korrektur ist in der Abb. 7 zu sehen. Auf Grund des Shades gehen die Signale für die einzelnen Pixel unterschiedlich in die Sättigung.

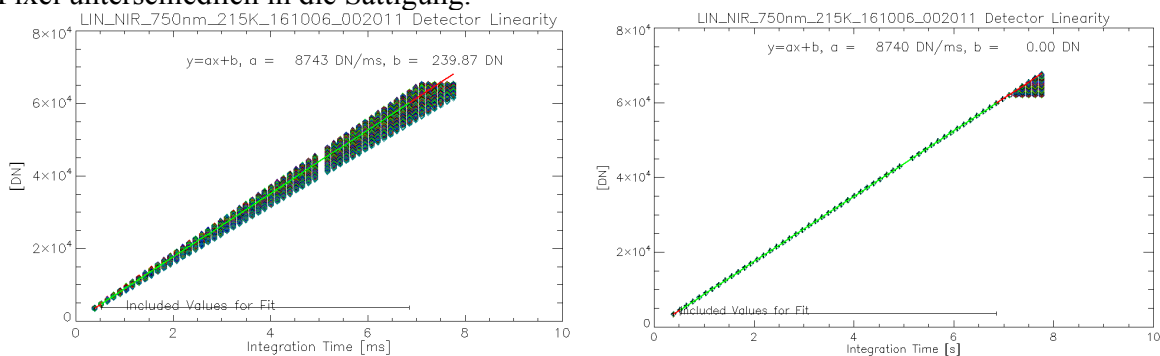


Abb. 7: Linearität an den Referenzpunkten (siehe Abb. 7). Original (links) und PRNU-korrigiert (rechts)

4.3 Nichtlinearität und Korrektur der Nichtlinearität

Der beschriebene Ansatz erlaubt gleichzeitig eine Analyse der Nichtlinearität. Hier wurde in dem interessierenden Bereich die maximale Abweichung von der Linearität analysiert. In der Abb. 8 ist die räumliche Abhängigkeit zu sehen. Die Abweichung korreliert offensichtlich mit dem Shade, größere Signale erzeugen größere Abweichungen. Aus dem Histogramm lässt sich ablesen, dass die Abweichung absolut für den hier betrachteten Detektor 40-50 DN oder relativ $< 0.1\%$ ist.

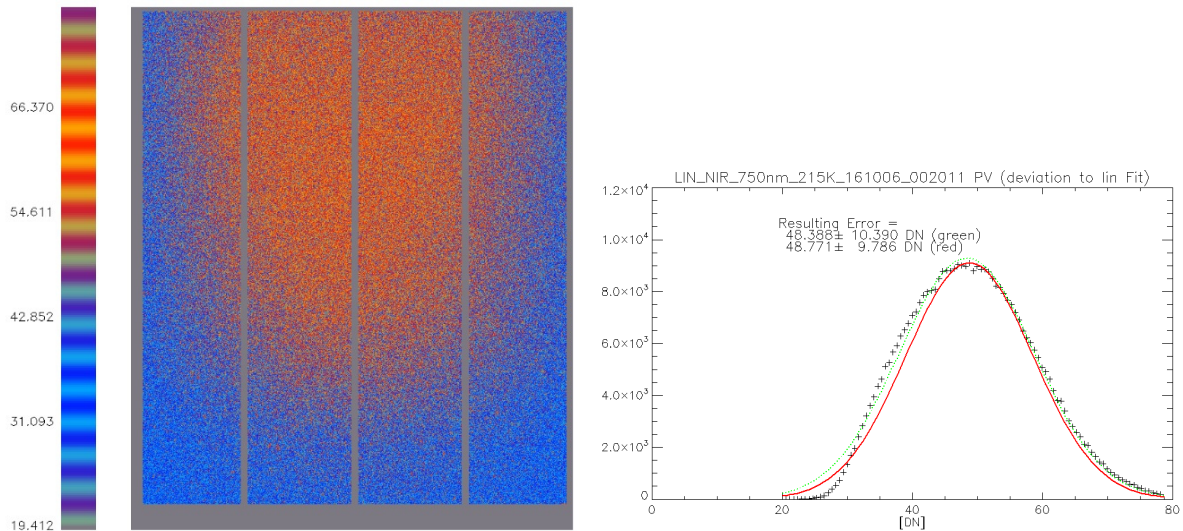


Abb. 8: Abweichung von der Linearität (PV)

In der Abb. 9 (links) ist die Abweichung von der Linearität für die Referenzpixel als Funktion der Intensität aufgetragen. Die Abweichungen sind vergleichsweise gering und lassen sich durch ein Polynom höherer Ordnung gut korrigieren (Abb. 9, rechts).

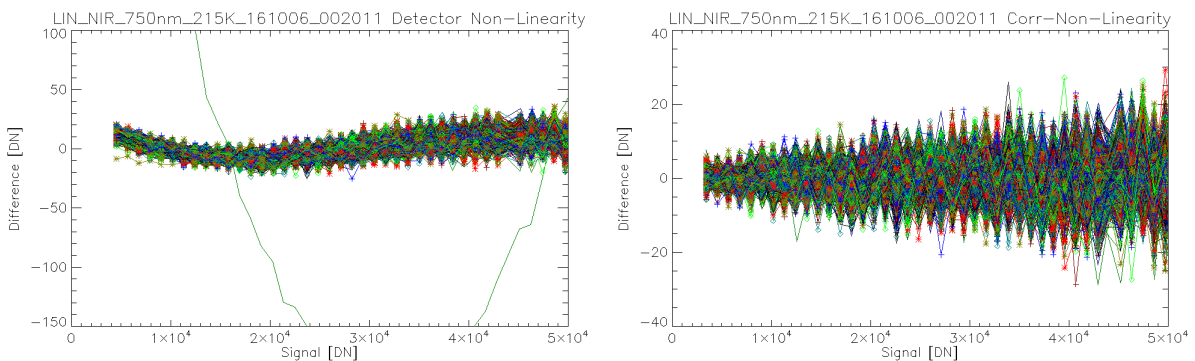


Abb. 9: Abweichung von der Linearität für die Referenzpixel (links) und Korrektur der Nichtlinearität (rechts)

4.4 Bestimmung des System Gain

Mit dem Overall System Gain η_{SG} lässt sich die erzeugte Anzahl von Ladungen in digitale Werte ohne Kenntnis der Quanteneffizienz umrechnen. Dazu wird die Photon-Transfer Methode (Janesick 2007) verwendet. Diese nutzt die Poissoneigenschaften der einfallenden Strahlung und

des Dunkelstroms. Es kann gezeigt werden, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen Varianz und Signal gibt. Der Anstieg der Geraden ist η_{SG}^{Det} . Beispielhaft soll auf Abb. 10 verwiesen werden. Für den NIR-Detektor erhält man 0,084 DN/e oder 12 e pro DN.

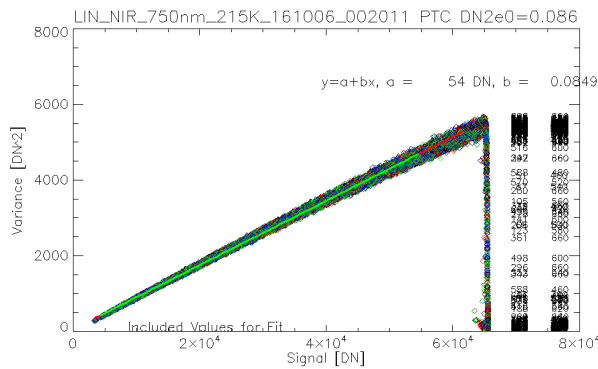


Abb. 10: Varianz als Funktion des Signals für die Referenzpixel

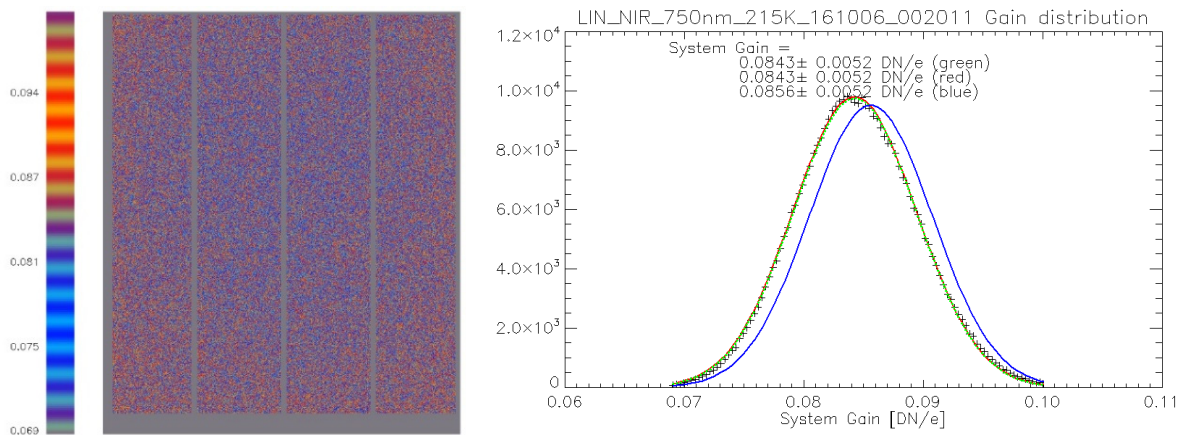


Abb. 11: Räumliche Abhängigkeit von η_{SG}^{Det} (links) und Histogramm (rechts)

5 Fazit & Ausblick

Die Sentinel-4-QM-Verifikationskampagne am DLR Institut für Optische Sensorsysteme (OS) wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Untersuchungen ergeben, dass die Detektoren und die zugehörige Elektronik unter den spezifizierten Bedingungen hervorragend arbeiten. So sind z.B. die gemessenen Werte der PRNU deutlich unterhalb der erlaubten Obergrenzen (vgl. Tab. 3). Auch die Nichtlinearität kann sehr gut korrigiert werden und weist nach einer Korrektur Abweichungen $< 0,1\%$ auf. In Anbetracht der erhaltenen Ergebnisse wird eine Optimierung der FM-Detektoren als nicht erforderlich betrachtet.

Während der Verifikationsphase ist eine Anomalie aufgetreten: Die geplante räumlich-homogene Ausleuchtung der Detektoren weist ein deutliches Shading von ca. 20 % ... 30 % auf (Abb. 6). Eine Analyse des Versuchsaufbaus deutet darauf hin, dass eine nicht korrekt justierte Blende im Strahlengang für diese Vignettierung verantwortlich ist. Durch Anpassung des Aufbaus wird diese Anomalie bei den Flugmodellen vermieden.

Tab. 3: PRNU Vergleich der beim DLR erhobenen Daten zu den geforderten Spezifikationen der ESA

	Detektor		
	UVVIS 1	UVVIS 2	NIR
Resultat DLR: Standardabweichung (%)	0.288	0.187	0.18
Resultat DLR: Anzahl der Pixel außerhalb von 3σ (%)	0.035	0.011	0.47
Spezifizierte Obergrenze (%)	4.0	2.0 ... 1.0 (in Abhängigkeit der Wellenlänge)	4.0

6 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Auftrag und mit Unterstützung der ESA durchgeführt. Die Autoren möchten allen Kollegen von Airbus Defence and Space, ESA und EUMETSAT, sowie allen Partnerfirmen innerhalb des Sentinel-4 Industriekonsortiums danken. Sie alle haben einen sehr wertvollen Beitrag zu diesem herausfordernden Programm geleistet.

Dieser Artikel wurde mit finanzieller Hilfe der EU produziert. Die hierin geäußerten Ansichten spiegeln nicht die offizielle Haltung der EU wieder.

7 Literaturverzeichnis

JANESICK, J.R., 2001: Scientific Charge-Coupled Devices, SPIE Press Book.

JANESICK, J.R., 2007: Photon Transfer. SPIE Press Book.

KOPEIKA, N.S., 1998: A System Engineering Approach to Imaging, SPIE Press Book.