

Luftfahrtforschungsprogramm VI  
Erster Aufruf 2020-2023(LuFo VI-1)  
Programmlinie "Technologie"

## Schlussbericht zum Vorhaben KAmuK (20D1905D)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

<b>Kappa optronics GmbH</b> Kleines Feld 6 37130 Gleichen	<b>Förderkennzeichen:</b>  20D1905D
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> KAmuK: Konzeption und Aufbau eines multispektralen Kamerasystems	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2020 bis 31.05.2025	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.05.2025	
<b>Kontakt:</b>  Dr. Niclas Mrotzek E-Mail: <a href="mailto:n.mrotzek@kappa-optronics.com">n.mrotzek@kappa-optronics.com</a>	

1	Inhaltsverzeichnis	
1.1	Abkürzungen und Definitionen	3
2	Einleitung	4
2.1	Inhalt dieses Dokuments	4
2.2	Zielsetzung des Vorhabens	4
2.3	Der Master360 Verbund	5
2.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
2.5	Technischer und wissenschaftlicher Rahmen	8
3	Ergebnisse des KAmuK Vorhabens	11
3.1	Design des Kamerademonstrators	11
3.1.1	Primäre Anforderungen an das Kamerasystem	12
3.1.2	Hauptmerkmale des Kameradesigns	14
3.2	Optimierung der Bildqualität	19
3.3	Ergebnisse aus den Testflügen	23

## 1.1 Abkürzungen und Definitionen

<b>Abkürzung</b>	
<b>ABS</b>	Acrylnitril-Butadien-Styrol
<b>AHD</b>	Airbus Helicopters Deutschland
<b>ASICs</b>	ASICs
<b>ASIL</b>	Automotive Safety Integrity Level
<b>ATOL</b>	Automatic Take Off and Landing
<b>BS</b>	Below the H/C Sector
<b>CL</b>	Camera Link
<b>CMS</b>	Camera Mirror System
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>DAA</b>	Detect and Avoid / Erkennung von nicht-kooperativen Luftverkehrsteilnehmenden
<b>DAL</b>	Design Assurance Level
<b>EASA</b>	European Union Aviation Safety Agency
<b>EUROCAE</b>	European Organisation for Civil Aviation Equipment
<b>FOR</b>	Field of Regard
<b>FOV</b>	Field of View
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array
<b>FS</b>	Front Sector
<b>FW</b>	Firmware
<b>HAP</b>	Hauptarbeitspakete
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>IR</b>	Infrarot
<b>ISP</b>	Image Signal Processor
<b>KAmuK</b>	Kamerasystem zur autonomen und multispektralen Kollisionsvermeidung
<b>LOS</b>	Line of Sight
<b>LWIR</b>	Long Wave Infrared Cameras
<b>Master360</b>	Verbundvorhaben im Kontext des Projektes
<b>NIR</b>	nahes IR
<b>SDI</b>	Serial Data Interface
<b>SESAR-JU</b>	Single European Sky ATM Research Joint Undertaking
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localization and Mapping
<b>SW</b>	Software
<b>UAM</b>	Urban Air Mobility (Lufttaxis)
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle (unbemanntes Luftfahrzeug)
<b>VIS</b>	visual
<b>VTOL</b>	Vertical Take Off and Landing

## 2 Einleitung

### 2.1 Inhalt dieses Dokuments

Dieses Dokument fasst die gesammelten Ergebnisse des KAmuK Projektes im Kontext des Master360 Verbundvorhabens zusammen. Innerhalb des Verbundes hat die Kappa optronics GmbH ein multispektralen Kamerademonstrator entwickelt und an einem Versuchsträger, dem Pioneerlab von AHD, erprobt. Das neue Kamerasichtsystem besteht aus mehreren optronischen Tag- und Nachtsichtkanälen, welche in Kombination mit weiteren Radarsystemen der Partner, autonomen Flugpfadplanungen und Algorithmen zur Hinderniserkennung den H145 zu komplexen ATOL und Cruise Manövern befähigen sollen.

Im Folgenden werden die Zielsetzungen des Verbundes und die technischen Lösungsansätze aus der Sicht der Kameraentwicklung im Detail diskutiert. Weiterhin wird die Projektplanung dem Projektablauf gegenübergestellt, sowie auf interne und externe Einflüsse auf die Projektplanung eingegangen. Abschließend werden die Wiederverwendung und die wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens dargelegt.

### 2.2 Zielsetzung des Vorhabens

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines Funktionsdemonstrators zur sicheren Einbindung von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs), auch umgangssprachlich als Drohen bezeichnet, in das Luftverkehrstransportsystem über die Kombination verschiedener komplementärer Systeme zur Kollisionsvermeidung. Das Vorhaben umfasst dazu auch die Weiterentwicklung der Zulassungsvoraussetzungen für solche Systeme, wobei der Hauptfokus auf die Möglichkeit der Zulassung der Systeme für den „non-segregated“ Luftraum gerichtet ist unter Einbeziehung der Zulassungsorganisation EASA und den Entwicklungen im europäischen Rahmen von EUROCAE und SESAR-JU. Das Vorhaben soll dazu beitragen, die Gesamtsystemfähigkeit von Airbus mit seinen Divisionen Helikopter und Defence and Space zur Entwicklung von innovativen Luftfahrtsystemen in Deutschland zu festigen, eine Zulieferkette aus deutschen Mittelstandsunternehmen für wichtige Systemkomponenten aufzubauen und die Wissenschaftslandschaft für Nachwuchskräfte der Luftfahrtindustrie zu stärken. Technisch fachliches Ziel dieses Vorhabens ist die sichere Integration von unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) und Lufttaxis (UAM) in das Luftverkehrstransportsystem. Es sind Technologieentwicklungen und Demonstrationen für miniaturisierte Informationsaustausch und Erkennungstechnologien für andere nichtkooperative Luftverkehrsteilnehmer (DAA) als derzeit größte technische Herausforderungen zur Luftraumintegration von UAV und UAM geplant.

Zur Erhöhung der Luftraumverkehrskapazität sind Untersuchungen von kombinierten horizontalen und vertikalen Ausweichmanövern, sowie die Entwicklung und Erweiterung von Technologiekomponenten dafür geplant. Die technologischen Risiken sollen im Bereich Selbstseparation und Kollisionsvermeidung von UAVs und der (teil-) automatisierten Landeunterstützung für Helikopter und Lufttaxis bezüglich der für eine Zulassung nachzuweisenden Lufttüchtigkeit (Airworthiness) so weit reduziert werden, dass in unmittelbarem Anschluss die Produktentwicklung für die Systemkomponenten gestartet werden kann und diese dann in die Produktentwicklung der Luftfahrzeuge einfließen werden.

Im Kontext der Kameraentwicklung bedeutet dies die Entwicklung eines multispektralen Kamerasystems. Multispektral bedeutet dabei, dass das Kamerasystem über mehrere optischen Kanäle verfügt die ein gemeinsames Field of Regard (FOR) abdecken und dabei in unterschiedlichen Wellenlängen im optischen Spektrum operieren. Klassisch ist dies für die Tagsicht ein visueller (VIS) Kanal basierend auf CMOS-Bildsensoren im Spektralbereich 400 bis ca. 650 nm. Dieser kann je nach geforderter Sensitivität in dunklen Szenen oder für die Dämmerung um den Nah-Infrarotbereich (NIR) bis zu 1200 nm erweitert werden. Für die Nachtsicht werden thermische Detektoren verwendet. In diesem Fall ein Long-Wave-IR (LWIR) Kanal, welcher im Spektralbereich 8 bis 14µm operiert und auf ein ungekühltes Mikrobolometer beruht.

Dieses Kamerasystem wurde als Stand-alone Sensorsuite konzipiert, um einen latenzarmen Bilddatenstrom zur Fusionierung mit Radardaten zu liefern. Dies kombiniert für den ATOL-Anwendungsfall die Stärken beider Technologien: Hochaufgelöste Bilddaten mit lang-reichweitigen Radardaten.

Die Entwicklung des Kamerasystems begann dabei bei der Anforderungsbeschreibung für die Systemkomponenten mit Hinblick auf die Grundlegende Aufgabenstellung der Kamera im Gesamtsystem und Integration an den Versuchsträger. Dabei wurden die Kamerabilder direkt für das Pilotendisplay zur direkten visuellen Kontrolle aufbereitet und zusätzlich dem Missionscomputer für die ATOL-Berechnungen und Hinderniserkennung in Verbindung mit den Radardateten bereitgestellt. Erstmals wurde im Vorfeld eine Simulationsumgebung erarbeitet, welche die verschiedenen Sensordaten simulierte, um die Entwicklung der automatischen Flugsysteme frühzeitig zu starten.

Im Zuge der Evaluierung des Gebrauchs von automotive Komponenten, wurde ein grundlegendes Sicherheitskonzept zur späteren kommerziellen Verwertung dieser Komponenten in der Luftfahrtindustrie erarbeitet.

Die finale Erprobung des Kamerasystem wurde über mehrere Testflug-Kampagnen an einem H145, dem PioneerLab von AHD, durchgeführt.

## 2.3 Der Master360 Verbund

Das Master360 Konsortium setzt sich aus den folgenden Projekt-Partnern zusammen:

KONSORTIALFÜHRUNG	AIRBUS DEFENCE AND SPACE GMBH	ADS
<b>PARTNER</b>	Airbus Helicopters Deutschland GmbH	AHD
	BIT Technology Solutions GmbH	BIT
	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel	CAU
	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	DLR
	Deutsche Flugsicherung GmbH	DFS
	Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik	FHR
	f.u.n.k.e. Avionics GmbH	FAV
	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg	HAW
	Kappa OPTRONICS GmbH	KOP
	Leibniz Universität Hannover	LUH

Zum Erreichen der Ziele brachten die Partner ihre individuellen Kompetenzen in das Vorhaben ein. Für neuartige Verkehrsszenarien wurden beim **DLR** in umfangreichen Verkehrssimulationen Konzepte zur Luftraumintegration und operationelle Anforderungen erarbeitet. Dazu steuerte die **DFS** ihre Erfahrungen aus dem Luftverkehrsmanagement, der Mitarbeit in internationalen Normungsgremien

und auch das UTM-System der Tochter DonIQ bei. **Airbus Defence and Space (ADS)** wird mit maßgeblicher Unterstützung des DLR die europäische und internationale Regulierung und Zulassung für die erarbeiteten Konzepte unterstützen. Zur Unterstützung der Entwicklung der Sensorik wurde eine virtuelle Entwicklung- und Testumgebung von der **BIT Technology Solutions (BIT)** erarbeitet. Die komplexe Aufgabe der Entwicklung des Radarsensors führte die darauf spezialisierte Forschungseinrichtung **Fraunhofer FHR** durch. Zudem untersuchte die **Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)** die Koexistenz des Radarsensors mit den anderen RF-Systemen unter den räumlich engen Einbauverhältnissen eines UAV durchführen. Für den Technologiebereich der automatisierten Flugführung im ersten und letzten Flugsegment hatet **AHD** in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Partnern eine zentrale Rolle bei der Definition der Systemanforderungen und den daraus resultierenden Architektur- und Integrationskonzepten inne. Dabei wurden das Kamerasystem von **Kappa optronics(KAP)** und die Punktwolkenabbildung von Splinlab, im Unterauftrag von AHD, in den Veruschsträger eingebunden. Neben dem Radar stehen hier die kooperativen Systeme im Mittelpunkt der Arbeiten. **f.u.n.k.e AVIONICS (FAV)** hat hier den MMT aus MasterUAS durch eine Funktion Ermittlung der Signalempfangsrichtung erweitert, während die **Christian-Albrechts-Universität (CAU)** ein Konzept für platzoptimierte richtungsselektive Multimodeantennen entwickelte. Die hardwaretechnische Auslegung und Umsetzung erfolgte durch die **Leibniz Universität (LUH)** erfolgen.

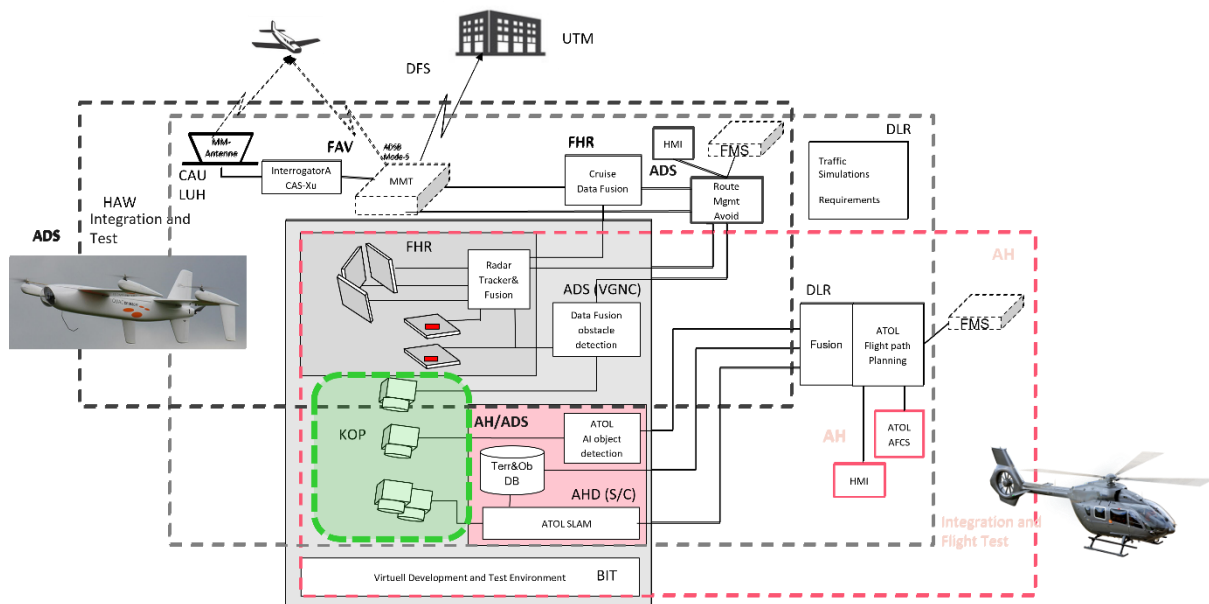


Abbildung 1: Übersicht der Aufgaben aller Partner im Verbund.

## 2.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur technischen Bearbeitung des Verbundvorhabens Master360 wurde der Verbund in sieben Hauptarbeitspakete (HAP) unterteilt, die wegen ihrer Größe und Komplexität wie Teilprojekte aufgebaut sind.

In der nachfolgenden Abbildung 2 ist die ursprüngliche Planung ohne die durch Covid19 und den Ukraine Konflikt bedingte Verzögerung aufgezeigt. Das Projekt Kick-off Meeting konnte so erst am 25.8.2020 durchgeführt werden. Somit hatte der verzögerte Projektstart und die teilweise durch COVID19 Maßnahmen beeinflussten Arbeitsrandbedingungen zu einer Verzögerung von 3 bis 6 Monaten im Zeitplan und bei den Ergebnisterminen geführt. Weiterhin kamen im Laufe des Projektes Probleme in der Verfügbarkeit des Versuchsträger auf, wodurch das Projekt kostenneutral verlängert wurde um die Flugtestkampagnen wie geplant im Projekt durchzuführen. Insgesamt wurde das Projekt bis zum 30.5.25 verlängert.

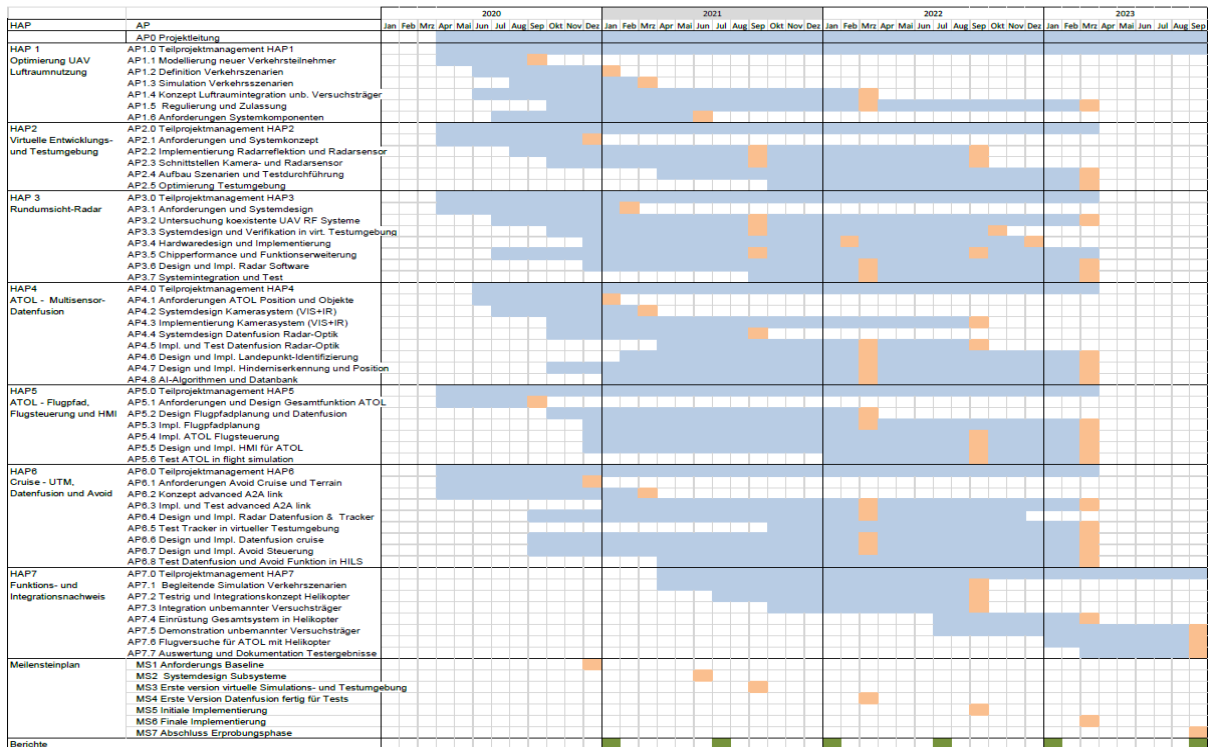


Abbildung 2: Ursprüngliche Planung vor Corona bedingter Verzögerung.

### Beschreibung des Arbeitsplans

Im HAP 1 werden abgeleitet aus Einsatzszenarien und Verkehrssimulationen die Anforderungen an die Systeme und deren Komponenten definiert. Eine virtuelle Entwicklungs- und Testumgebung wird in HAP 2 implementiert, um damit die Entwicklung der Sensorkomponenten in HAP 3 und HAP 4 zu unterstützen. In HAP 3 wurde das Rundumsicht-Radar entwickelt, wobei die Arbeitspakete bis zur Entwicklung von speziellen Halbleiter Chips reichen. In HAP4 wurde mit der multispektralen Kameraentwicklung die Sensorsuite ergänzt, an der ATOL-Datenfusion gearbeitet und so eine Umfeld Abbildung geschaffen, welche die Voraussetzung für eine Landeflugpfadsteuerung bildet. Die Arbeiten zur Implementierung der Landeflugpfadsteuerung erfolgte in HAP 5. Die Flugführung von UAVs im

Reiseflug mit den dafür notwendigen Komponenten und die Entwicklung von Ausweichmanövern auf Basis von fusionierten Daten des Radars und den kooperativen Systemen erfolgte im HAP 6. Das Ziel von HAP 7 war der Funktionsnachweis der Systeme in exemplarischen Einsatzbedingungen, es erfolgt eine Demonstration und die Ergebnisse werden dokumentiert.

KAmuK hat seinen Schwerpunkt im HAP 4 mit der Konzeption und Umsetzung des Kamerasystems. Zuvor beteiligte sich Kappa bereits im HAP 1 und HAP 6 an der Benennung und Abgrenzung der Anforderungen. In HAP 2 wurde das zu entwickelnde Kamerasystem als Modell für eine virtuelle Entwicklungs- und Testumgebung definiert. Dabei wurden die Hauptkomponenten der unterschiedlichen Kamerakanäle mit ihren physikalischen Eigenschaften in eine Simulationsumgebung eingebunden. Eine detaillierte Übersicht, bei welchen Arbeitspaketen die Kappa optronics GmbH im Master360 Projekt mitwirkt, wird in der nachfolgenden Abbildung 3 durch die roten Markierungen ersichtlich.

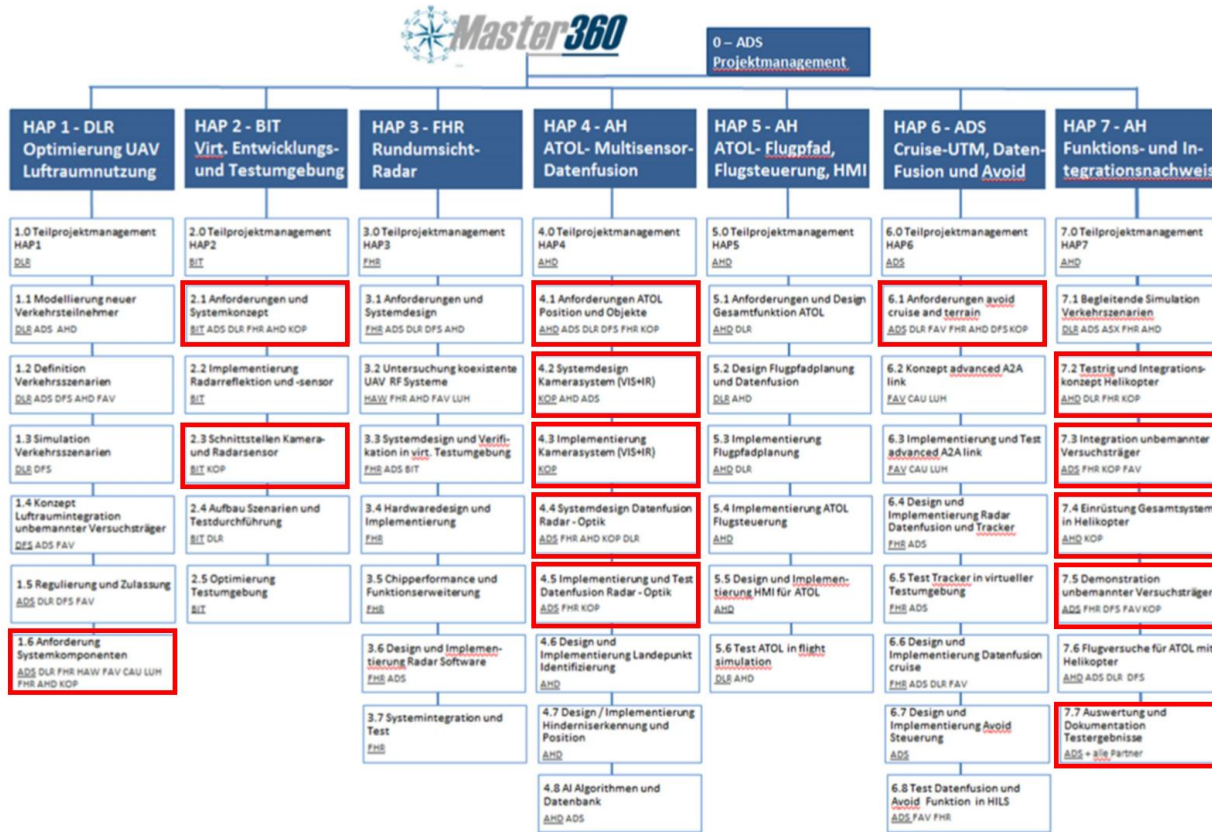


Abbildung 3: Master360: Arbeitspakete des KAmuK-Projektes von Kappa optronics im Master360 Verbundvorhaben. Während die Entwicklung des Kamerademonstrators maßgeblich in HAP 4 stattfand, unterstützte Kappa in mehreren Arbeitspaketen zur Definition der Anforderungen und Simulation der Kameradaten.

2.5 Technischer und wissenschaftlicher Rahmen

Das KAmuK Kamerasystem wurde von Kappa auf Basis der hauseigenen multispektralen Kameraentwicklungen designed. Diese beruhen vor allem auf dem Luft-zu-Luft-Betankungssystem an

Bord des MRTT von Airbus Defence Space, welches in mehreren Generationen bei Kappa bereits weiterentwickelt wurde. Um dieses massige und voluminöse Kamerasystem für kleinere Flugzeuge, Helikopter und UAVs passend in Größe und Gewicht zu skalieren, sowie gleichzeitig die notwendige Performance zu garantieren, wurden verschiedene neue Technologien innerhalb des Master360 Projektes evaluiert. Diese lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- **Verwendung von automotive Komponenten:**

Der automotive Bereich hat die Entwicklung bezüglich SWaP-C optimierter Bauteile für dedizierte VIS-Kameratechnologien in den letzten Jahren stark vorangetrieben. Gleichzeitig fordert dieser Industriezweig, ähnlich der Flugindustrie, hohe Sicherheitsstandards. So sind die Anforderungen an die ASIL-Sicherheitslevel in Teilen gut mit denen der DAL vergleichbar. Dies betrifft vor allem SW und FW zur Bildverarbeitung in einer Kamera. Hier ist das klassische Beispiel die Detektion eines eingefrorenen Bilddatenstroms. Daher hat Kappa sich entschieden die visuellen Kanäle des KAmuK Systems auf Basis des eigenen automotive Camera-Mirror-Systems (CMS) zu entwickeln. Dies betrifft vor allem die Verwendung eines automotive Image Signal Processor (ISP) für die Bildverarbeitung. Dieser bietet neben einer nahezu latenzfreien Bildverarbeitung, durch die Verwendung von ASICs, auch eine sehr geringe Leistungsaufnahme und bereits integrierte Sicherheitsfunktionalitäten. Weiterhin wurden automotive Qualitätsoptiken im S-Mount Format für die visuellen Kanäle evaluiert und im Demonstrator verbaut. Diese bieten einen guten Kompromiss aus optischer Qualität, Härting gegen extreme Umweltaforderungen (Vibration, Schock und Temperatur) und Baugröße. So wiegt eine vergleichbare S-Mount Optik zu einem konventionellen C-Mount Objektiv weniger als 15 % und liefert somit eine signifikante Gewichtseinsparung.

- **Reduzierung des Pixelpitches:**

Eine maßgeblich die Kameragröße bestimmender Parameter ist die Größe der Sensorpixel, der so genannte Pixelpitch. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 4 skizziert. Um das multispektrale Tag- und Nachtsichtsystem zu miniaturisieren, muss vor allem der LWIR-Kanal im Volumen reduziert werden. Dies wurde durch die Verwendung des zu Projektbeginn neu auf dem Markt eingeführten 12µm Pixelpitch bei Mikrobolometern realisiert. Die verwendete ATTO Detektor Generation hat einen um knapp 30% geringere Pixelgröße als die vorherige PICO Sensor Generation. Diese setzt Kappa bereits erfolgreich in etablierten Produkten ein, so dass für das Design des thermischen Kanals im KAmuK-System auf dem Design der älteren Generation aufgebaut werden konnte.

Ebenfalls in den VIS-Kanälen des Systems kommen kleinere Pixel auf dem CMOS-Sensor zum Einsatz. Der verwendete Pixelpitch beträgt 3 µm im Vergleich zu den bisher kleinsten bei Kappa verwendeten Pixelpitch von 3,5 µm. Dies ist eine Reduktion um 15%. Um den Verlust der sensitiven, Licht sammelnden, Fläche zu kompensieren, wurde ein hoch sensitiver HDR CMOS-Sensor aus der automotive Industrie ausgewählt und die Apertur der Optik möglichst groß gewählt.

- **Miniaturisierung mechanischer Konzepte**

Auf Grundlage der Jahrzehntelangen Erfahrung mit den MRTT-Kamerasystemen wurden bewährte Designs wie z.B. die beheizten Schutzfenster wieder verwendet. An anderen Stellen mussten neue mechanische Konzepte und Designs erarbeitet werden, um die Funktionalitäten der Kameras zu gewährleisten und zeitlich Volumen und Gewicht einzusparen. Hier wurden zur Kanalausrichtung neue Mechaniken designend, welche gleichzeitig die Präzision der Ausrichtung wie auch die Fertigungszeit verbessern sollten.

Ein wesentlicher Bestandteil jedes Kamerasystems ist neben der Optik und dem Bildsensor, die Bildverarbeitungskette. Im Falle der VIS-Kanäle wurde die integrierte Bildverarbeitung des ISPs verwendet und die Parametrisierung der Algorithmik an den spezifischen Sensor und den Luftfahrt-Anwendungsfall angepasst. Dies ist anders für den thermischen Kanal. Die LWIR-Bildverarbeitung basiert auf der Kappa eigenen Bildverarbeitungskette. Im Rahmen des Projektes konnten neue Module entwickelt werden und im Zuge der Flugtests direkt in der Luft getestet werden. Ein wesentliches Modul hierbei ist die neue Rauschunterdrückung, welche das zeitliche Rauschen und somit die NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) wesentlich reduziert, ohne signifikante negative Einflüsse auf die Bildschärfe zu erzeugen. Auch wurden neue Module zur Kontrastregelung des LWIR-Bildes entwickelt. Hier wurden mehrere Ansätze verfolgt. Zum einen wurde ein Modul zur aktiven Sensorregelung implementiert, welches temperaturabhängig den Sensor auf seine optimalen Betriebsparameter regelt. Weiterhin wurde nachgelagert ein Modul zum Tonemapping, speziell auf die Eigenschaften von thermischen Kameras implementiert.

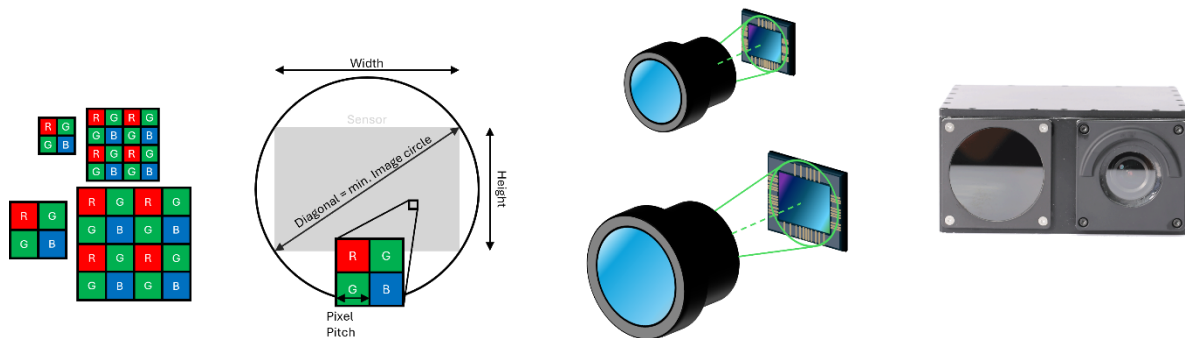


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Kameragröße von der Pixelgröße. Größere Pixel haben bei derselben Sensorauflösung einen größeren Sensor zu Folge. Damit dieser voll von der verwendeten Optik ausgeleuchtet wird, muss der Bildkreis der Optik ebenfalls größer werden. Dies hat meist ein größeres Objektiv mit mehr Einzelementen zur Folge. Dies wiederum verlangt größere haltende Mechaniken und Sicherheitsfaktoren gegen Vibrationen und Schock. Final muss auch das Kameragehäuse anwachsen.

### 3 Ergebnisse des KAmuK Vorhabens

#### 3.1 Design des Kamerademonstrators

Der finale Kamerademonstrator ist in Abbildung 5 mit allen seinen Kameraboxen und am Versuchsträger montiert in Abbildung 6 zu sehen. Die Anforderungen wurden in den Arbeitspaketen 1.6, 2.1, 2.3 und 4.1 erstellt, während das Systemdesign des Kamerasystem in AP 4.2 und der Aufbau des Kamerasystem in AP 4.3 durchgeführt wurde. Arbeitspaket 4.2 und 4.3 waren damit die größten Aufwände für Kappa im Master360 Verbundvorhaben. Das finale System besteht aus 2 Front Sector Kameras mit je einem visuellen und einem LWIR-Kanal. Zur Abdeckung des gesamten Field of Regards (FOR), wurde eine weitere Bottom Sector Kamerabox mit einem visuellen und eine nahinfrarot (NIR) Kanal entwickelt. Dies gewährleistet die Tag- und Nachfunktionalität des Systems. Um die Anforderungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit zu erfüllen ist die Datenübertragung der Kameras in den Helikopter auf optischen Signalen basiert. Um das optische Signal wieder in ein elektrisches um zu wandeln und die 6 Bilddatenströme mehreren Subsystemen zugänglich zu machen, wurde eine interne Wandler- und Splittereinheit entwickelt. Dieser Optosplitter befindet sich innerhalb des Versuchsträgers.

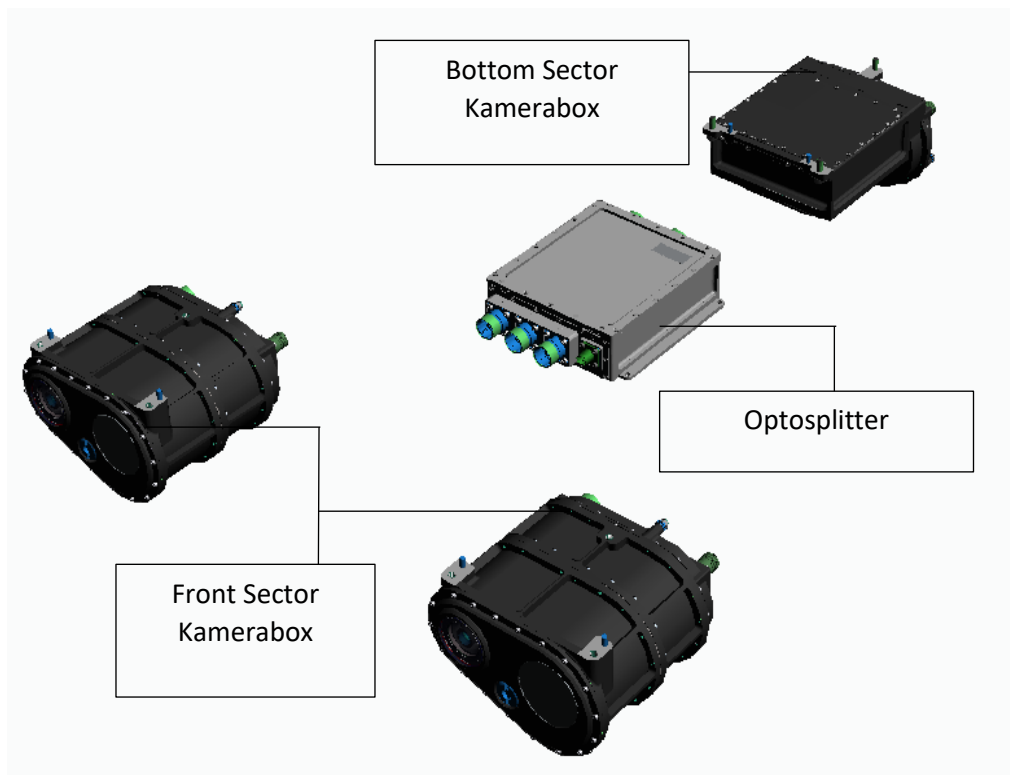


Abbildung 5: Da KAmuK Kamerasystem. Das System besteht aus 2 Front sector Kameraboxen mit je einem visuellen (VIS) und thermischen (LWIR) Kanal. Der untere Sichtbereich wird von der Bottom Sector Kamerabox durch einen VIS und einen nahinfrarot (NIR) Kanal abgedeckt. Die Konvertierung des optischen Bildsignals zu einem elektrischen sowie die Verdoppelung der Ausgangssignale für mehrere Empfänger passiert im Optosplitter.

### 3.1.1 Primäre Anforderungen an das Kamerasystem

Die wichtigsten Anforderungen an den Demonstrator, welche das Design maßgeblich bestimmt haben, sind in folgenden aufgelistet:

- **Separate VIS- und LWIR-Kanäle:**

Um die Tag- und Nachtsicht des Systems zu gewährleisten, sollte der Front Sector über separate VIS und LWIR-Kanäle verfügen. Diese sollen in den Spektralbereichen 400 bis 800 nm und 8 bis 14  $\mu\text{m}$  sensitiv sein.



*Abbildung 6: Eine montierte Front Sector Kamerabox am Landegestell des H145 PioneerLab Versuchsträgers des Partners AHD.*

- **Ausrichtung der einzelnen Kanäle**

Die einzelnen Kamerakanäle innerhalb einer Kamerabox sollen zueinander ausgerichtet sein und die Line of Sight (LOS) mit einer Präzision von 2 iFOV (internal FOV) bekannt sein.

- **Field of Regard:**

Die Gesamtabdeckung des Kamerasystem ist in Abbildung 7 dargestellt. Zusätzlich zu der geforderten Abdeckung war auch eine Überlappung der einzelnen Sektoren gefordert. Damit sollte eine kontinuierliche Abbildung von Hindernissen oder Landeflächen vom Wechsel des Flugmodus Cruise zu Landing gewährleistet werden. Diese Anforderung konnte durch die unterschiedlichen Seitenverhältnisse der Sensoren und die am Markt verfügbaren Optiken nicht erfüllt werden. Da die einzelnen Gesichtsfelder allerdings aneinandergrenzen, wurde keine Funktionalität beeinträchtigt und dieser Defekt konnte akzeptiert werden.

- **Anti-Beschlag und Enteisung:**

Das Kamerasystem soll die Fähigkeit besitzen die Schutzfenster zu enteisen und Feuchtigkeitsbeschlag zu entfernen. Dies erfordert für jedes Fenster eine eigene Fensterheizung mit einer eigenen Temperaturregelung. Folglich musste der Strombedarf in die Leistungselektronik mit eingeplant werden.

- **Detektion, Erkennung und Identifikation:** Das optronische System muss definierte Detektions-, Erkennungs- und Identifikationskriterien erfüllen, um die Erkennung von Hindernissen und Landefelder frühzeitig für die Flugpfadplanung möglich zu machen. Dies bestimmt zusammen mit den geforderten FOR das Auflösungsvermögen der einzelnen Kanäle und Sektoren. Im Detail musste das Helipad, das H-Zeichen des Helipads und definierte Hindernisse in unterschiedlichen Entfernungen aufgelöst werden.
- **Überbrückung von Stromausfällen:**  
Das Kamerasystem sollte die Fähigkeit besitzen, kurze Ausfälle des Bordnetzes zu kompensieren. Dazu wurden Leistungskondensatoren in jede Kamerabox eingebaut, die die nötige Leistung den einzelnen Verbrauchern für die Zeit des Ausfalles bereitstellen.

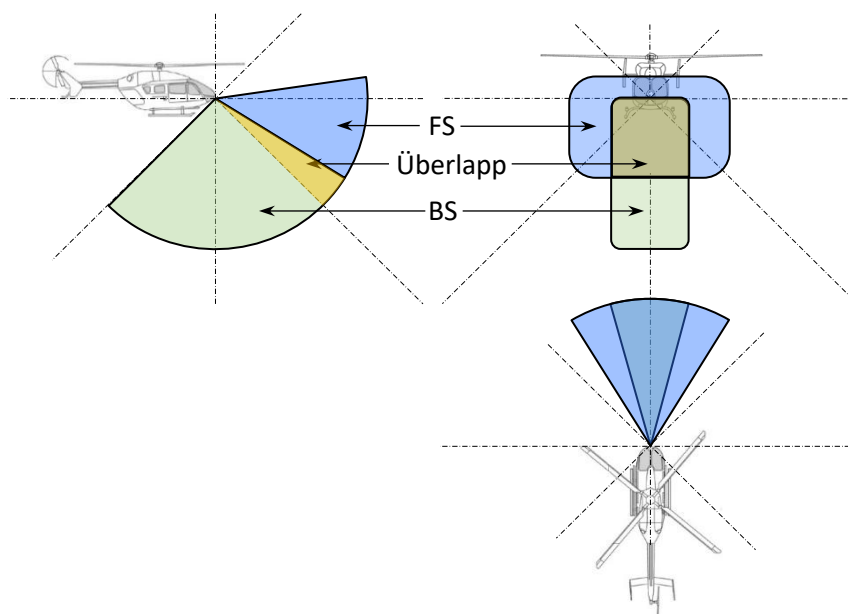


Abbildung 7 Links: Vertikale FOVs des FS (blau und gelb) mit 45° und BS (grün) mit 90°. Der gelbe Bereich markiert die 15° Überlappung der FS und BS FOVs. Rechts: Horizontale FOVs des FS (blau) und BS (grün) in Grad. Die Koordinatensysteme der Abbildung sind nicht repräsentativ für die definierten Koordinatensysteme des Helikopters.

- **Flight clearance:**  
Das Kamerasystem muss definierte Anforderungen zum Umwelt- und elektromagnetischen Verträglichkeit erfüllen. Diese sollten in eine Safety of Flight Qualifikation in Prüflaboren getestet werden. Diese Qualifikation ist grundlegend notwendig zur Durchführung von Flugtests mit dem Kamerasystem.

Zusätzlich zu diesen Anforderungen, wurden weiterhin funktionale Anforderungen definiert. Im Falle des Kamerasystem sind dies insbesondere das Ausgabeformat der Bilddaten sowie die Verarbeitungsschritte der Sensorrohdaten und das Einbinden wichtiger Metadaten für das übergeordnete System. Im Sinne der Risiko-Mitigation und um eventuelle Anpassungsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Flugtest-Kampagnen möglich zu machen, wurde die Leistungsfähigkeit der Chipsätze im Vergleich zu den Anforderungskatalog größer dimensioniert als notwendig. Dies erlaubte auf etwaige Beobachtungen aus den ersten Testflügen zu reagieren, ohne ein Risiko bezüglich

Hardware-Änderungen vornehmen zu müssen und somit die Safety-of-Flight Qualifikation wiederholen zu müssen. Insbesondere die LWIR-Bildverarbeitung konnte so zwischen den beiden Testflug-Kampagnen überarbeitet werden und eine neue Version der Kontrastspreizung integriert werden.

### 3.1.2 Hauptmerkmale des Kameradesigns

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind schematisch die Hauptkomponenten der einzelnen Kameraboxen dargestellt. Da Kappa kein Portfolioprodukt für das Vorhaben, welches den Anforderungskatalog erfüllte, bereitstellen konnte, bot die Designphase des Projektes an neue Konzepte und Komponenten in den Testflügen und der Safety-of-Flight Qualifikation zu erproben. Ein Designhighlight ist das Gewicht und Volumen optimierte Kameragehäuse.

Zur Optimierung des Kamerasystems hinsichtlich Gesamtvolumen und Masse im Einsatzbereich der VTOL-Vehikel wurden gezielte Maßnahmen ergriffen. Die maßgebliche formbestimmende Komponente ist der LWIR-Kanal innerhalb der FS-Kamerabox. Aufgrund der geforderten Auflösung und der aktuellen Mikrobolometer-Pixelgröße von  $12\ \mu\text{m}$  werden für Master360 im Vergleich zu den visuellen Kanälen größere Germaniumoptiken benötigt. Die Auswahl der Optiken war aufgrund der hohen Anforderungen an die optische Leistung – insbesondere für die autonome Hinderniserkennung – eingeschränkt. Um Gewicht und Kosten zu reduzieren, können einzelne optische Elemente durch leichtere und einfache zu verarbeitende Materialien ersetzt werden. Im visuellen Bereich ersetzen Plastiklinsen oft Glaslinsen, während im LWIR-Bereich Germaniumlinsen zunehmend gegen Linsen aus Calgonit getauscht werden. In der Luftfahrtindustrie werden jedoch Betriebstemperaturbereiche von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+70^\circ\text{C}$  vorausgesetzt. Eine konstant hohe Bildqualität über diesen großen Temperaturbereich hinweg erfordert ein athermales Design der optischen Kanäle. Dies kann nur gewährleistet werden, wenn sämtliche Linsenelemente eines Objektivs aus demselben Material mit ähnlichem Temperaturverhalten bestehen. Da sich eine Fokusverschiebung dennoch nicht vollständig vermeiden lässt, müssen mechanische Komponenten der Kanäle so ausgelegt werden, dass deren Temperaturverhalten das des Objektivs kompensiert.

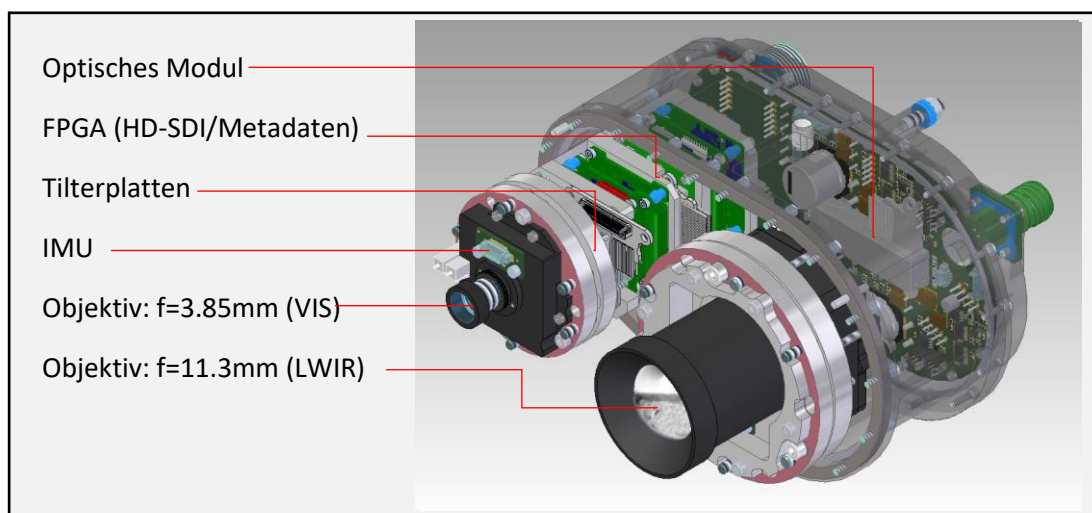


Abbildung 8: Schematischer Aufbau der FS-Kamerabox mit allen benannten Subsystemen.

Aus diesen Überlegungen resultierte die Wahl einer asymmetrischen Bauform der FS-Box, die den unterschiedlichen Platzbedarf der Objektive berücksichtigt (siehe Abbildung 8). Weiterhin spielt die thermische Isolierung des LWIR-Kanals gegenüber anderen wärmeerzeugenden Komponenten eine zentrale Rolle im mechanischen Design. Da das Mikrobolometer des LWIR-Kanals Wärmestrahlung detektiert, wirken interne Temperaturquellen analog zu Streulicht im sichtbaren Bereich als Störfaktoren. Daher wurde das Gehäuse der FS-Kamera in zwei thermisch voneinander isolierte Hauptkomponenten unterteilt. Wie in Abbildung 8 dargestellt, sind die elektronischen Komponenten zur Wärmeentwicklung maximal vom LWIR-Modul entfernt und thermisch entkoppelt positioniert.

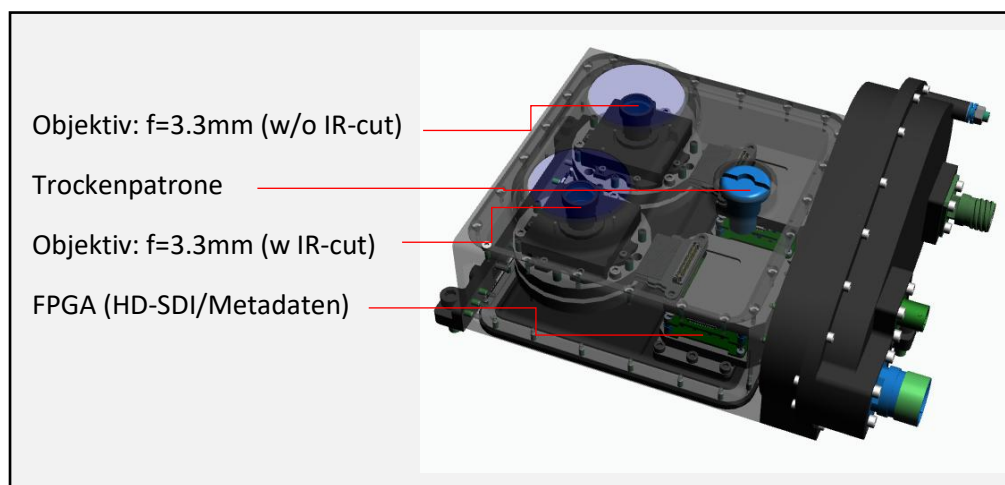


Abbildung 9: Darstellung der Hauptkomponenten in der BS-Box.

Eine weitere Innovation betrifft das Tilter-System zur präzisen Ausrichtung der optischen Kanäle. Der Aufbau, die Funktion und der Einbaustand dieses Systems sind in den Abbildung 10 und Abbildung 11 dokumentiert. Im Verlauf der Designphase wurde ein Prototyp gefertigt und eingehend getestet. Die Stabilität des Systems wurde auf einem Shaker nach MIL-STD-810G geprüft. Hierzu erfolgte eine Voreinstellung am LWIR-Kollimator, wie in Abbildung 12 ersichtlich. Die Mechanik gestattet eine Feineinstellung über drei Schraubenpaare, die über definierte Drehpunkte eine präzise Ebene aufspannen (siehe Abbildung 10). Dies gewährleistet das die Line of Sight beider Kanäle auf einen gemeinsamen Konvergenzpunkt ausgerichtet werden kann und somit die Bildmitten im Konvergenzpunkt übereinstimmen. Damit liefern beide Kanäle einer Kamerabox, bis auf die leicht unterschiedlichen Gesichtsfelder, ein identisches Bild für einen Piloten bzw. die Weiterverarbeitung im Missionscomputer und es kann ohne Änderungen zwischen den Kanälen umgeschaltet werden. Durch das System konnte eine hohe Positionsgenauigkeit realisiert und die Justagezeit im Vergleich zu etablierten Lösungen signifikant reduziert werden. Um die Teileanzahl weiter zu verringern, wurde das Carrierboard des optischen Moduls der FS-Box (siehe PCB in Abbildung 8) auch in der BS-Box verwendet. Dies reduzierte sowohl die Systemkomplexität als auch das zeitliche Risiko bei der Beschaffung eines weiteren PCBs. Die Struktur der BS-Box sowie ihre Hauptkomponenten sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt.

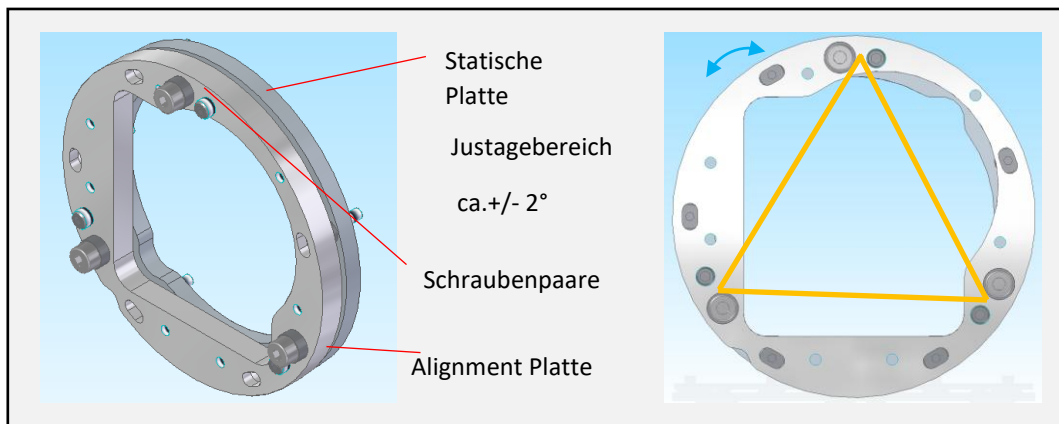


Abbildung 10: Funktionsprinzip der Tiltermechaniken

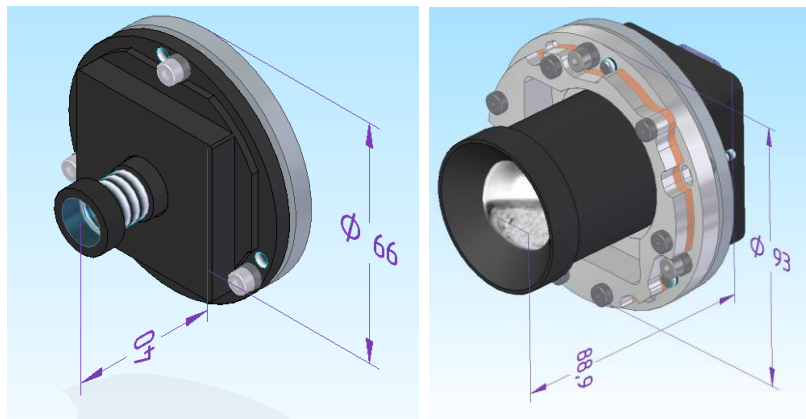


Abbildung 11: Tiltermechaniken für den VIS/VIS-NIR Kanal und den LWIR-Kanal

Die Front Sector Kameraboxen als schwerstes Subsystem des Kamerademonstrators liegen bei 2,7 kg und messen 18 x 18 x 11,4 cm. Die Bottom Sector Kamerabox misst 18 x 22 x 11,5 cm und wiegt unter 2,5 kg.

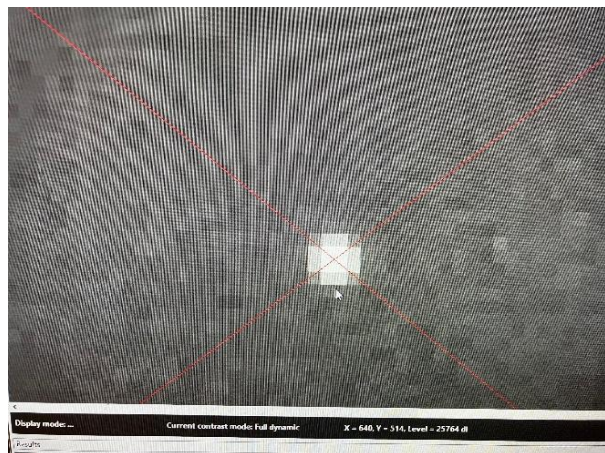
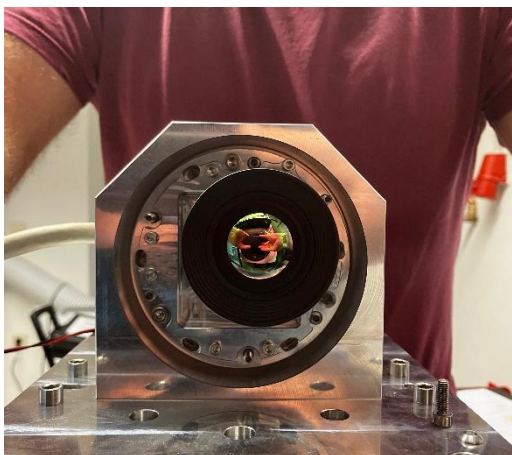


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Prüfung und Validierung der Tiltermechaniken. Links: LWIR-Modul und Optik montiert in der Testbench und ausgerichtet auf die optische Achse des Kollimators. Rechts: Bild des LWIR-Moduls mit perfekt zentrierter Punktquelle.



Abbildung 13: Selbe Versuchsreihe wie in Abbildung 14 allerdings mit komplexer Szene statt homogen temperierter Fläche.

Ursprünglich war der Einsatz eines shutterlosen LWIR-Moduls vorgesehen, das eine softwarebasierte Korrektur des temperaturabhängigen Festmusterrauschens des Mikrobolometers mittels gespeicherter Laborkalibrierung durchführt. Dieses Verfahren wird üblicherweise verwendet, um das der Szene überlagerte Festmusterrauschen (engl. non-uniformity) der Detektoren in der thermischen Bildgebung zu kompensieren. Ein shutterloses LWIR-Modul ermöglicht einen kontinuierlichen Bilddatenstrom, jedoch bestehen zwischen den Betriebsbedingungen und der Laborkalibrierung stets Abweichungen. Die Korrektur arbeitet im Temperaturbereich der Kalibrierung zuverlässig. Außerhalb dieses Bereichs treten verstärkt Residuen des Festmusterrauschens auf, bis hin zu sichtbaren Streifenmustern. Aus diesem Grund fiel die Entscheidung zugunsten eines geschutterten Moduls im Master360, um die Fortschritte der letzten Jahre gemeinsam mit der neuen Sensorgeneration im Hinblick auf die Flugtauglichkeit zu prüfen. Die geschutterte Version des LWIR-Moduls integriert einen mechanischen Shutter, der abhängig von verschiedenen Regelalgorithmen eine zeitnahe Kalibrierung an die aktuelle Detektortemperatur ermöglicht. Die Kalibrierzeit beträgt weniger als 0,5 s, während der keine neuen Bildinformationen aufgezeichnet werden. Während dies in älteren geschutterten Modulen insbesondere bei kritischen Manövern problematisch war, wird die Kalibrierzeit in der aktuellen Generation von den Partnern als unkritisch für den Flugbetrieb bewertet. Dadurch ist eine verbesserte Bildqualität für Master360 realisierbar. Für die Auswertelgorithmen der Partner sind verschiedene Indikatoren für den Shutterprozess implementiert worden. Im ATOL-Anwendungsfall besteht die Herausforderung darin, den Kalibrierprozess unterschiedlichen Empfängern der Bilddaten kenntlich zu machen. Während Softwarelösungen durch geeignete Markierungen auf plötzliche Bildunterbrechungen reagieren können, muss die Integration der Bilddaten beim Piloten ergonomisch gestaltet sein. Daher wurden zwei Methoden umgesetzt, um den Kalibrierprozess und das damit verbundene Zeitintervall ohne neue Bilddaten zu kennzeichnen: Entweder wird ein schwarzes Bild übertragen oder das zuletzt aufgenommene Bild während des Kalibrierprozesses erneut gezeigt. Bei einer Auflösung des LWIR-Kanals von 1280 x 1024 Pixel, während der HD-SDI-Standard 1920 x 1080 Pixel vorsieht, werden die Bilddaten des LWIR-Kanals in einen schwarzen Rahmen eingebettet. Während der Kalibrierung wechselt die Rahmenfarbe ursprünglich zu Rot, sodass dieser Farbwechsel sowohl maschinell als auch visuell unmittelbar erfasst werden kann. Nach der ersten Testflug-Kampagne wurde durch das Feedback der Piloten die Farbe auf ein neutrales grau geändert, um keine übliche Signalfarbe zu verwenden. Hierfür wurde eine timeout-basierte Shutter-Erkennung entwickelt, da der Datenbus den Ausfall valider Bilddaten nicht explizit signalisiert.

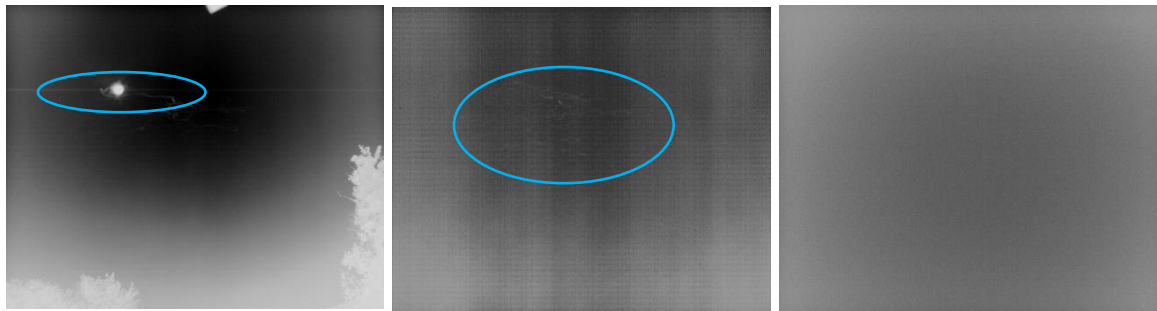


Abbildung 14: Versuchsreihe zur Kompensation der vorübergehenden Pixelsättigung durch fokussierte hoch intensive IR-Strahlung. Links: Aufgenommenes LWIR-Bild mit der Sonne in der Szene. Die Kamera wurde mehrfach in unterschiedliche Richtungen bewegt, wodurch sich ein Streifenmuster auf den Sensor „eingebrennt“ hat. Mitte: LWIR-Bild einer homogen temperierten Fläche nach der Sonnenbelichtung. Deutlich sind noch die Streifen der Sonne im Bild zu erkennen. Rechts: LWIR-Bild der homogen temperierten Fläche nach der Sonnenbelichtung und eines durchgeführten Kalibrierprozesses. Die Sonnenlinien wurden zusammen mit dem Festmusterrauschen korrigiert.

Das geschutterte LWIR-Modul erlaubt zudem den Einsatz als redundanter Tagkanal zum VIS-Kanal. Dies ist mit der vorherigen 17 $\mu$ m-Mikrobolometer-Generation und besonders bei shutterlosen Modulen nicht störungsfrei möglich. Wenn Sonnenlicht in das Sichtfeld des LWIR-Kanals gelangt und auf den Detektor fokussiert wird, erreicht eine erhebliche Menge an IR-Strahlung das Mikrobolometer, was eine Sättigung bestimmter Pixel zur Folge hat. Diese Sättigung kann beim Bewegen der Kamera aufgrund der scheinbaren Bewegung der Sonne über den Detektor zu Streifenbildungen führen. Solche Muster könnten in Algorithmen zur automatischen Flugführung fälschlich als Hindernisse interpretiert werden. Da sich dieser Effekt ähnlich dem bereits beschriebenen Festmusterrauschen verhält, kann er ebenfalls durch den Shutterprozess korrigiert werden. Versuchsreihen belegen, dass nach einem vollständigen Shutterprozess diese „eingebrennten“ Muster durch Sonneneinstrahlung behoben werden (siehe Abbildung 14 und Abbildung 13). Die Übersättigung der Sensorpixel nimmt mit der Zeit wieder ab, sodass langfristig keine Beeinträchtigung des Bildes verbleibt.

Im ursprünglichen Konzept des KAmuK-Systems war vorgesehen, sämtliche individuellen Kamerakanäle in eine einzige Mechanik zu integrieren. Diese Entscheidung beruhte auf der Notwendigkeit stereoskopischer Sicht für die nach vorn gerichteten Kanäle sowie einer festen Ausrichtung aller optischen Achsen zueinander. Im Verlauf des Projekts wurde das ursprüngliche Monoboxdesign zugunsten einer Optimierung hinsichtlich Masse und Integrationskonzept des Projektpartners geändert, sodass nun drei separate Kameraboxen zum Einsatz kommen. Dadurch ist es erforderlich, die Position jeder einzelnen Kamerabox im Bezugssystem des Helikopters zu bestimmen. Nur durch diese extrinsische Kalibrierung des KAmuK-Systems können die Bilddaten eindeutig einer Raumrichtung zugeordnet werden. Ist die inertielle Ausrichtung am Boden korrekt eingemessen und während der Flugversuche stabil, sind die jeweiligen Sichtlinien bekannt. Insbesondere für die 3D-Rekonstruktion aus den Kameradaten durch die Partner im ATOL-System ist die eindeutige Orientierung der Daten relativ zum Helikopter von Bedeutung, etwa bei der Hinderniserkennung und der Flugfadberechnung. Während der Integrationsplanung der einzelnen Subsysteme im Master360-Projekt wurde festgestellt, dass die Montage der Front Sector Boxen an der Helikopterkabine bestehende Flugsysteme beeinträchtigen kann und eine direkte Anbringung im unteren Kabinenbereich erhebliche Umbaumaßnahmen am Versuchsträger erfordern würde. Als alternative Lösung wurde daher die Befestigung der Front Sector Kameraboxen am Landewerk identifiziert. Diese Option bietet eine größere stereoskopische Basis und damit Vorteile für die Stereoskopie, bringt jedoch einen höheren Aufwand während der Justage mit sich. Da Form und

Position des Landewerks sich beim Abheben des Helikopters verändern, ändern sich auch die Sichtlinien der Kameras. Zur Minimierung dieses Effekts wurde erwogen, den Helikopter für die Montage des KAmuK-Systems aufzuhängen bzw. anzuheben. Dennoch lassen sich geringfügige Strukturveränderungen des Landewerks und damit Lageänderungen der FS-Kameraboxen während des Flugbetriebs nicht ausschließen, weshalb das KAmuK-System zusätzliche Sensoren zur Messung der Orientierung der Kameraboxen erhalten hat. Hierbei handelt es sich um sogenannte Inertial Measurement Units (IMUs), die aus einem Beschleunigungssensor und einem Gyroskop bestehen. Die IMU misst Beschleunigungen und Drehraten in allen Raumrichtungen; mithilfe dieser Daten kann im SLAM-Algorithmus des Partners die extrinsische Kalibrierung der Kameras aktualisiert werden. IMU-Sensoren sind kommerziell verfügbare Produkte („Commercial off the Shelf“) und werden in unterschiedlichen Branchen, beispielsweise in Smartphones, der Automobilindustrie und im Luftfahrtbereich, eingesetzt. Die Anforderungen an Messauflösung, Präzision und Kalibrierfähigkeit variieren, wodurch große Preisspannen entstehen. Ein erweitertes Ziel der Integration einer IMU im KAmuK-System besteht darin, die erforderliche Messpräzision für den VTOL-Anwendungsfall zu definieren. Die im KAmuK-System verwendeten IMUs sind Komponenten mit Automotive-Qualität und stellen einen Kompromiss zwischen Kosten und Genauigkeit dar. Die ausgewählte IMU erfüllt die Anforderungen bezüglich Integrationsdichte, Messbereich und Umwelтанforderungen des Master360-Projekts. Somit trägt die Erweiterung des Systems dazu bei, die Verwertungsmöglichkeiten zu optimieren und einen zusätzlichen Mehrwert zu schaffen.

### 3.2 Optimierung der Bildqualität

Im Rahmen des Aufbaus der KAmuK FS Boxen wurden gezielte Tests des LWIR-Kanals unter Verwendung der finalen mechanischen Komponenten durchgeführt, um die thermischen Eigenschaften detailliert zu analysieren. Da ein thermischer Imager wie der eingesetzte LWIR-Sensor Wärmestrahlung detektiert, beeinflussen sowohl die Eigenabwärme als auch die thermische Emission des gesamten Kamerasystems maßgeblich die Bildqualität des LWIR-Kanals.

Der Einsatz eines geschutterten LWIR-Moduls ermöglicht es zudem, mithilfe elektronischer Sensorsettings die Bildqualität entsprechend der jeweiligen thermischen Umgebung zu steuern – eine Flexibilität, die bei einer shutterlosen Kalibrierung nicht gegeben wäre. Zur Ermittlung optimaler Einstellungen für die geplanten Flugversuche wurden in einer Klimakammer gezielte Testreihen simuliert. Hierbei konnten unterschiedliche, durch die Projektpartner spezifizierte thermische Umgebungen realitätsnah nachgestellt werden.

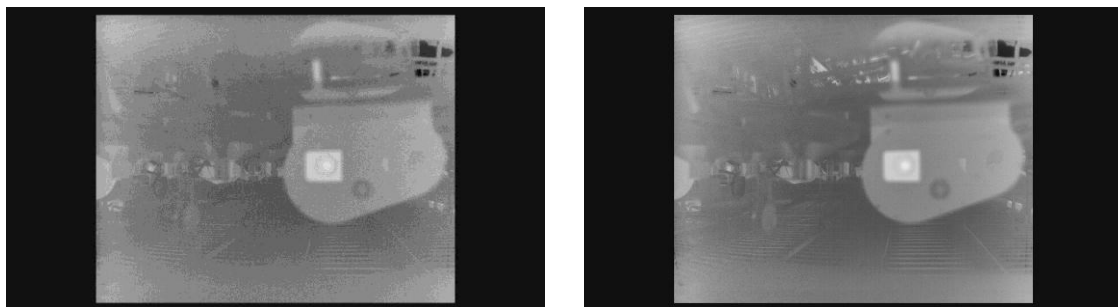


Abbildung 15: Testbilder des LWIR Kanals einer KAmuK FS Kamerabox in einer Klimakammer. Links: Aufnahme mit einer Integrationszeit von  $30\mu\text{s}$ . Rechts: Aufnahme mit einer Integrationszeit von  $60\mu\text{s}$ .

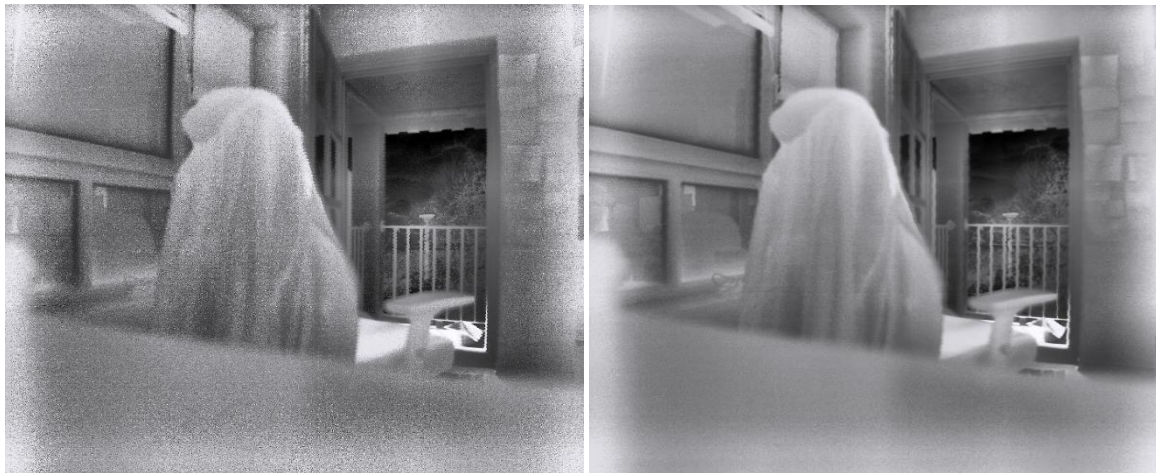


Abbildung 16: Vergleich der Bildqualität vor und nach der Parameteroptimierung

Diese Versuche erfolgten für verschiedene elektronische Sensoreinstellungen nach Durchführung einer shutter-Kalibrierung. Ein exemplarisches Bild, aufgenommen mit dem LWIR-Kanal einer KAmuK Front Sector Kamerabox, ist in Abbildung 15 dargestellt. Im Zuge dieser Experimente wurden verschiedene Integrationszeiten des Mikrobolometers getestet und deren Einfluss auf das Rauschverhalten des Sensors bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Im Gegensatz zu CMOS-Sensoren entspricht die Integrationszeit beim Mikrobolometer nicht direkt der Belichtungszeit einzelner Pixel, sondern steht vielmehr für die Integration mehrerer Messwerte über einen bestimmten Zeitraum – der Effekt ähnelt jedoch dem konventionellen Verständnis. Zwischen Integrationszeit und temporärem Rauschen besteht eine inverse Proportionalität, messbar über die sogenannte Noise Equivalent Temperature Difference (NETD). Diese ist, neben der Parametrierung des Sensors, insbesondere von der Sensor- sowie der Szenentemperatur abhängig.

Zur Optimierung der Sensorparametrisierung in Abhängigkeit von der Sensortemperatur wurde eine umfangreiche NETD-Karte hinsichtlich Integrationszeit, Verstärkung (Gain) und Temperatur erstellt (siehe Abbildung 18). Da die Sensortemperatur des LWIR-Kanals nicht konstant gehalten wird, sondern Umwelteinflüssen, Flughöhe und Systemabwärme unterliegt, wurden im nächsten Schritt Parameter identifiziert, die temperaturabhängig mittels automatisierter Kontrollschleifen angepasst werden können. Ziel ist es, das Sensorsignalrauschen bei aktueller Temperatur möglichst zu minimieren und

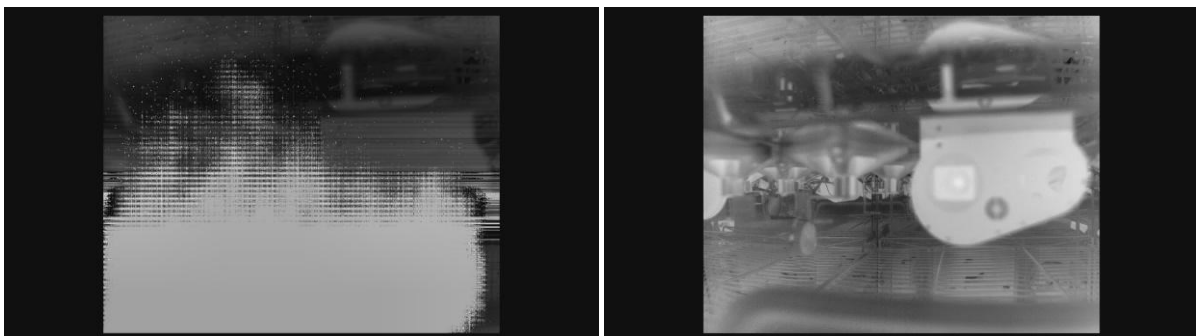


Abbildung 17: Versuch, um die optimalen Sensorparameter für unterschiedliche Sensortemperaturen zu finden. Links: Ein Gain von 2 und eine Integrationszeit mit  $30\mu\text{s}$  führen zu einer großflächigen Übersteuerung des Sensors bei einer Temperatur von  $60^\circ\text{C}$ , so dass das Bild nicht mehr frei von Artefakten aufgenommen wird. Rechts: Ein gain von 4 und eine Integrationszeit von  $45\mu\text{s}$  führen zu einem optimalen Bildergebnis bei einer Temperatur von  $60^\circ\text{C}$ .

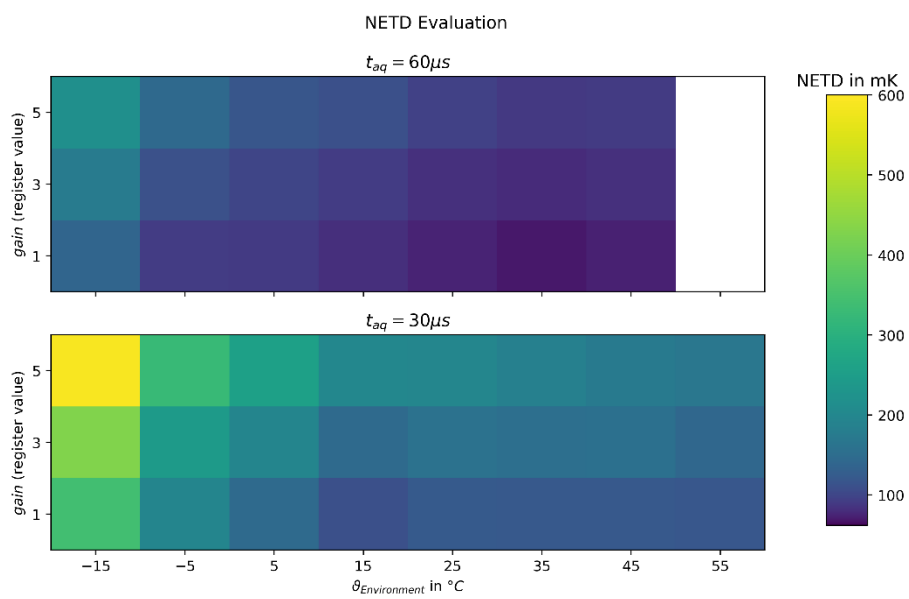


Abbildung 18: NETD-Karte für verschiedene Sensorparameter und Sensortemperaturen. Das niedrigste Rauschverhalten wird mit dem geringsten gain, einer langen Integrationszeit von  $60\mu\text{s}$  und einer Sensortemperatur um  $30^\circ\text{C}$  erreicht.

gleichzeitig Bildartefakte, verursacht durch fehlerhafte Pixelansteuerung, zu vermeiden. Ein weiteres Beispielbild hierzu ist in Abbildung 17 abgebildet.

Nach Abschluss der Testreihe über den gesamten relevanten Temperaturbereich wurde eine temperaturabhängige Parametrisierung des Sensors implementiert. Der Vergleich der Bildqualitäten zwischen den Standardeinstellungen und den optimierten Parametern kann in Abbildung 16 eingesehen werden.

Eine wesentliche Abweichung gegenüber der ursprünglichen Planung betrifft die Platzierung der FS-Kameraboxen am Helikopter. Die endgültige Montage an der Außenseite des Landewerks führt dazu, dass die Kamerabox erheblich stärkeren Vibrationen ausgesetzt ist. Aufgrund des Einsatzes eines HDR-Rolling-Shutter-Sensors im visuellen Kanal können übermäßige Vibrationen sowohl in Translationsbewegungen als auch bei schnellen Rotationen nicht nur Bewegungsunschärfe verursachen, sondern auch Rolling-Shutter-Artefakte wie den sogenannten Jello-Effekt hervorrufen. Da der Sensor zeilenweise ausliest, entstehen zeitliche Differenzen zwischen den einzelnen Zeilen. Im High Dynamic Range (HDR) Modus nimmt der Sensor zusätzlich zwei Bilder mit unterschiedlichen Belichtungszeiten auf, die zu einem HDR-Bild verrechnet werden. Während einer Bewegung kann dies zu Verzerrungen von Objekten führen.

Im Rahmen einer Risikoanalyse wurde die visuelle Kamera unter Laborbedingungen mittels eines Shakers hinsichtlich der Auswirkungen von Vibration untersucht. Hierbei wurden Frequenzen im Bereich von 1 bis 100 Hz abgetastet und Testsequenzen aufgezeichnet. Sowohl das Nah- als auch das Fernfeld wurden mit der Kamera erfasst (siehe Abbildung 19). Aufgrund des großen Gesichtsfeldes und der relativ niedrigen Auflösung des Kanals können signifikante Effekte nur im Nahbereich festgestellt werden; im Fernfeld sind keine Beeinträchtigungen erkennbar.

Um möglichen Verzerrungen durch den HDR-Modus entgegenzuwirken, wurde die maximale Belichtungszeit deutlich reduziert. Darüber hinaus erfolgte eine Erhöhung der Bildwiederholrate auf 60 Bilder pro Sekunde, wodurch die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Zeilen verringert und

negative Einflüsse schneller Rotationen minimiert werden. Da der visuelle Kanal primär für Tageslichtflüge vorgesehen ist und eine hohe Sensitivität aufweist, sind keine relevanten Leistungsverluste bei der Bildqualität zu erwarten.

Diese Mitigationsstrategie dient dazu, die Genauigkeit der Hindernis- und Mapping-Algorithmen der Projektpartner zu optimieren und potenzielle Fehldetektionen zu verhindern.

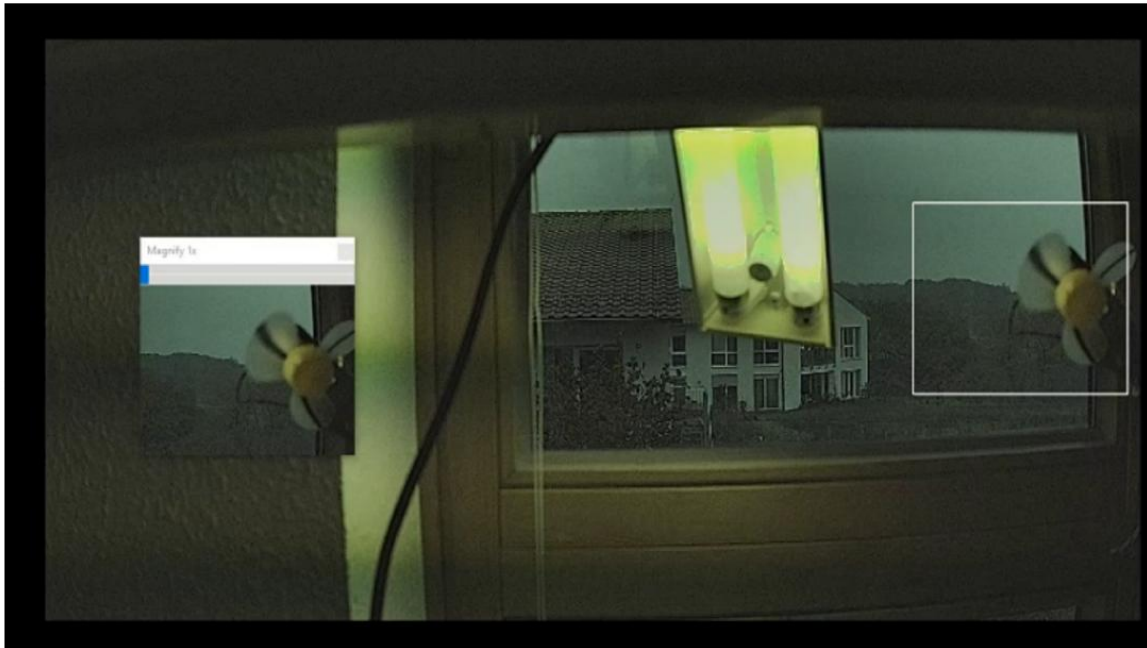


Abbildung 19: Aufnahme des VIS-Kanals während eines Shakersversuchs zur Analyse der Auswirkungen des Rolling-Shutters während starker Vibrationen.

### 3.3 Ergebnisse aus den Testflügen

#### 3.3.1 Ergebnisse aus der 1. Testflug-Kampagne

Das KAmuK System wurde zu Jahresbeginn 2024 von AHD in Betrieb genommen und in das Demonstratorsystem integriert. Nach Abschluss der ILA 2024 (5.–9. Juni) traten bei den Boreighting-Flügen Feuchtigkeitsprobleme auf: Auf den Innenseiten der beiden Scheiben der Front Sector Kamerabox bildete sich Beschlag (siehe Abbildung 20). Zusätzlich kam es zu Ausfällen der IMUs und der LWIR-Kanal der rechten Front Sector Kamerabox zeigte Unregelmäßigkeiten während der Non-Uniformity-Kalibrierung. Während der Shutter-Kalibrierung bewegte sich der Shutter unterschiedlich schnell, sodass die Kalibrierung teilweise mit unvollständig geschlossenem Shutter erfolgte.



Abbildung 20: Beispielbild aus den Boreighting-Flug. Der Beschlag am Schutzfenster des VIS-Kanals ist deutlich im linken Bereich durch die Bildunschärfe zu sehen.

Die Analyse dieser Fehlerbilder legte nahe, dass Undichtigkeiten an den Kameras vorlagen, wodurch Feuchtigkeit nicht nur an den Scheiben, sondern auch an der Elektronik kondensierte. Der Versuchsträger war während der Messe durchgehend im Freien stationiert und somit über einen längeren Zeitraum Regen und stehendem Wasser ausgesetzt. Hierbei drang Feuchtigkeit in die Kameragehäuse ein. Darüber hinaus wurde Korrosion an den Passstiften zur Kamera-Positionierung festgestellt, wohingegen die Bottom Sector Kamerabox hiervon nicht betroffen war, da sie am Bauch des Helikopters montiert war.

Kappa behob die Problematik durch einen Serviceeinsatz um die Testflüge ohne Einschränkungen durchführen zu können. Die Kameras wurden vor Ort mit Stickstoff gespült und die Scheibenheizungen für dreißig Minuten im Dauerbetrieb verwendet. Zusätzlich erfolgte der Austausch der Trockenpatronen. Um ein erneutes Beschlagen oder fehlerhaftes Shutterverhalten vorübergehend zu verhindern, wurden die Aktivierungsgrenzwerte der Scheibenheizungen angehoben. Dadurch blieben

sie während der Testflüge permanent aktiv, was zu einer effektiven Reduktion der Feuchtigkeitsansammlung führte.

### 3.3.2 Ergebnisse aus der 2. Testflug-Kampagne

Im Rahmen einer umfassenden Überarbeitung im September 2024 wurden sämtliche Dichtungen ersetzt. Die Inspektion ergab, dass einige Dichtungen außerhalb ihrer Nuten lagen und abgequetscht waren – vermutlich eine Folge wiederholter Öffnungs- und Schließvorgänge während der Entwicklungsphase mit daraus resultierender Materialermüdung. Die Korrosion der Passstifte resultierte aus einem Zulieferungsfehler: Anstelle geplanter Edelstahlstifte wurden reguläre Stahlstifte verbaut. In Abstimmung mit AHD wurde auf deren Austausch verzichtet, da dies eine vollständige Demontage der Kameras sowie eine thermische Entfernung ( $\sim 200\text{ °C}$ ) der Stifte erfordert hätte.

Anfänglich konnten infolge parametrischer Schwierigkeiten der Aufnahmehardware der Partner lediglich stark komprimierte Videodaten erzeugt werden, was die Bewertung der Bildqualität einschränkte. Insgesamt wurden im Sommer 2024 und Frühjahr 2025 mehrere Testflüge unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen durchgeführt. Beispielhafte Aufnahmen bei gutem Wetter sind in Abbildung 21 bis Abbildung 25 dargestellt. Trotz hoher Komprimierung überzeugen die visuellen Kanäle durch hohe Auflösung und Farbtreue. Besonders der große Dynamikumfang des CMOS-Sensors zeigt sich deutlich in Wolkenstrukturen, mit gut differenzierten Details in hellen und dunklen Bildbereichen. Dies bietet signifikante Vorteile sowohl für Piloten als auch das ATOL-System. Übersättigungen treten nicht auf, wodurch die Bildverarbeitungsalgorithmen unbeeinträchtigt bleiben. Details gehen nicht verloren und es entstehen keine abrupten Helligkeitsänderungen oder Blendungen während der Videoübertragung.



Abbildung 21: Beispielbild des VIS-Kanals der Front Sector Kamerabox.

Die Bildqualität der LWIR-Kamera erfüllte die an sie gestellten Anforderungen und übertraf die bisherigen Erwartungen. Die Testflüge wurden unter optimalen Tageslichtbedingungen durchgeführt; dabei blieb der Detailgrad durchgehend hoch und die Schärfe konstant über das gesamte Sichtfeld

hinweg erhalten. Repräsentative Aufnahmen aus den Testflügen sind in Abbildung 23 zu sehen. Der hohe Detailgrad durch die gute Kontrastabdeckung, welcher für kleinste Temperaturdifferenzen steht, ist gut zu erkennen. Für Kappa markierte der Einsatz einer shutter-kalibrierten LWIR-Kamera in der Luftfahrt einen bedeutenden Meilenstein. In zahlreichen Anwendungen wird auf einen Shutter verzichtet, da kurze Unterbrechungen des Bildstroms auftreten können. Der positive Einfluss des neuen thermischen Kameradesigns auf die Häufigkeit notwendiger Shutter-Kalibrierungen war während der Testflüge besonders gut zu sehen. Während eines rund einstündigen Testflugs lag die Anzahl der Shutter-Events bei unter 20 und nahm mit fortschreitender thermischer Sättigung weiter ab. Diese Ergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Produktentwicklung.



Abbildung 22: Beispielbild des LWIR-Kanals der Front Sector Kamerabox



Abbildung 23: Verschiedene Beispielbilder aus unterschiedlichen Testflügen des LWIR-Kanals der Front Sector Kamerabox.



Abbildung 24: **Links:** Beispielbild des VIS-Kanal der Front Sector Kamerabox. **Rechts:** Beispielbild und LWIR-Kanals der Front Sector Kamerabox.

Die Bilddaten der Bottom Sector Kamerabox weisen erwartungsgemäß eine deutliche geometrische Verzerrung auf, die auf die eingesetzte Optik zurückzuführen ist. Da diese Kamera primär für Machine-Vision-Anwendungen ausgelegt ist, kann die Verzeichnung in diesem Kontext vernachlässigt werden. Allerdings zeigte die Analyse der Daten, dass die erhebliche Verzeichnung in bewegten Bildern die menschliche Wahrnehmung negativ beeinflusst. Für eine potenzielle Nutzung des Designs im Bereich Human-Vision muss daher zwingend eine Verzeichnungskorrektur aktiviert werden, um die visuelle Wahrnehmung zu optimieren.

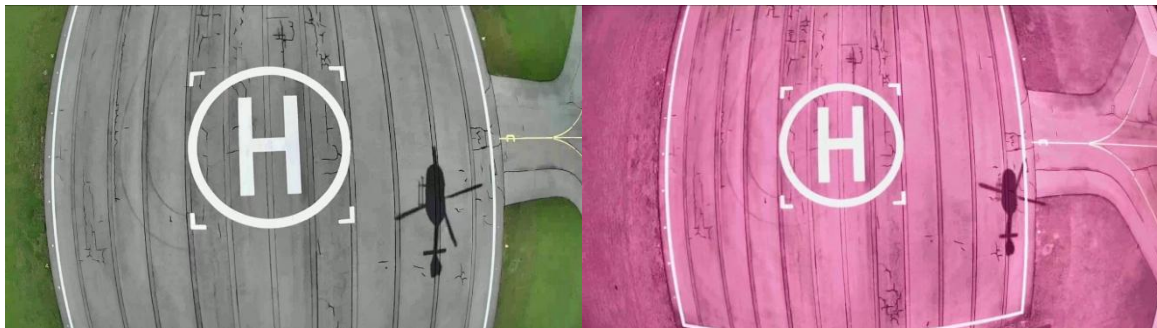


Abbildung 25: **Links:** Beispielbild des VIS-Kanals der Bottom Sector Kamerabox. **Rechts:** Beispielbild des NIR-Kanals der Bottom Sector Kamerabox

Ein unter regnerischen Wetterbedingungen durchgeführter Testflug ergab, dass sowohl VIS- als auch NIR-Kanäle uneingeschränkt funktionsfähig waren. Der LWIR-Kanal hingegen wurde deutlich durch Wassertropfen auf dem Germanium-Schutzglas beeinträchtigt. Diese Tropfen bildeten großflächig anhaftende Bereiche. Im LWIR-Bereich sind Wassertropfen nicht transparent und emittieren eigene Wärmestrahlung, wodurch es zu einer Überblendung des Kanals und einer Beeinträchtigung des Tonemappings kam. Ein entsprechendes Beispielbild ist in Abbildung 26 dargestellt.



*Abbildung 26: Aufnahme des LWIR-Kanals der Front Sector Kamerabox während eines Durchfluges eines Regengebietes. Der Kanal ist durch Wassertropfen auf den Germanium-Schutzglas stark beeinträchtigt.*

## 4 Interpretation der Ergebnisse

Die durchgeführten Testflüge und Analysen verdeutlichen die hohe Leistungsfähigkeit des Kamerademonstratorsystems in mehreren zentralen Aspekten. Bemerkenswert ist die exzellente Bildschärfe, die von allen sechs optronischen Kanälen erzielt wurde. Dies gilt selbst unter anspruchsvollen Bedingungen, wie wechselnder Beleuchtung und unterschiedlichen Wetterverhältnissen. Besonders die hohe Auflösung und detailgetreue Farbdarstellung eröffnen neue Möglichkeiten für die Bildauswertung und unterstützen sowohl Piloten als auch automatisierte Systeme wie ATOL.

Das neu entwickelte Konzept der Tilterplatten hat sich als wegweisend für die präzise Justage der einzelnen Kanäle innerhalb einer Kamerabox erwiesen. Die pixelgenaue Ausrichtung der Kanäle zueinander konnte nicht nur die Bildüberlagerung und die räumliche Koordination deutlich verbessern, sondern auch den zeitlichen Aufwand dieses Arbeitsschrittes signifikant reduzieren. Dies schlägt sich direkt in einer gesteigerten Effizienz bei der Systemintegration nieder.

Ein besonderer Meilenstein ist der Einsatz des geschutterten LWIR-Moduls, das sich im Rahmen der Testreihen als voller Erfolg erwiesen hat. Die Qualität der Non-Uniformity-Kalibrierung (NUC) konnte im Vergleich zu herkömmlichen shutterless-Verfahren um den Faktor 4 bis 10 verbessert werden. Dies resultiert in einer außergewöhnlichen Homogenität und Stabilität der Thermaldaten, wodurch der Informationsgehalt der Aufnahmen erheblich gesteigert wurde.

Die Verwendung von Automotive-Komponenten in den VIS-Kanälen hat sich als äußerst vorteilhaft für die Kosten- und Gewichtsoptimierung des Gesamtdesigns erwiesen, ohne dabei Kompromisse bei der Bildqualität einzugehen. Dadurch konnte eine performante und zugleich wirtschaftliche Kameralösung realisiert werden, die konsequent auf den Einsatz im anspruchsvollen Flugumfeld zugeschnitten ist.

Auch der HDR-CMOS-Sensor überzeugte mit ausgezeichneter Bildqualität selbst unter wechselnden Lichtbedingungen während des Flugs. Der große Dynamikumfang erlaubt eine präzise Differenzierung von Details in hellen und dunklen Bildbereichen. Allerdings zeigten sich im Multi-Exposure-Modus Artefakte, insbesondere in stark kontrastierenden Szenen wie Gebäudeübergängen oder bei verstärkten Vibrationen. Hier besteht Optimierungsbedarf in der Entwicklung neuer Algorithmen, um diese Bildfehler zu reduzieren.

Ein auffälliges Ergebnis betrifft den NIR-Kanal der Bottom Sector Kamerabox. Die erzeugten Bilder führten zu erheblichen Wahrnehmungsproblemen bei Piloten, was eine Einschränkung der Nutzbarkeit für Human-Vision-Anwendungen bedeutet. Für die Produktentwicklung sollte daher eine Konvertierung zu reinen Schwarz-Weiß-Bildern implementiert werden, um die visuelle Klarheit und Akzeptanz zu steigern.

Im LWIR-Kanal wurde bei Frontalflügen durch Regen eine deutliche Beeinträchtigung beobachtet. Wassertropfen auf dem Germanium-Schutzglas führten zu großflächigen Überlagerungen und Emissionsartefakten, was die Bildverarbeitung und das Tonemapping deutlich störte. Hier ist eine Überarbeitung des Designs der Frontscheibe erforderlich. Besonders denkbar sind zusätzliche hydrophobe Beschichtungen, welche den Kontaktwinkel erhöhen und somit das Tropfenverhalten entscheidend verbessern.

Insgesamt zeigen die Resultate, dass das Kamerademonstratorsystem in vielen Punkten neue Maßstäbe setzt und wertvolle Impulse für die künftige Entwicklung von Luftfahrtkameras liefert.

Gleichzeitig wurden Schwachstellen identifiziert, deren gezielte Optimierung das Potenzial der Plattform weiter steigern wird.

## 5 Verwertung der Ergebnisse

Die wirtschaftliche Verwertung des im Dokument betrachteten Forschungsvorhabens lässt sich in mehreren differenzierten Dimensionen darstellen und verdeutlicht den nachhaltigen Mehrwert für Kappa und den Industriestandort Deutschland.

Ein zentraler Aspekt ist die umfassende Evaluierung von Automotive-Komponenten für die VIS-Kanäle, die wegweisend für die Entwicklung der neuesten CMS-Generation bei Kappa war. Durch die konsequente Analyse und erprobte Integration dieser Komponenten im Rahmen intensiver Testflüge und detaillierter, entwicklungsbegleitender Messungen konnten entscheidende Vorteile im Hinblick auf Kostenstruktur und Gewichtsreduktion erzielt werden, ohne Abstriche bei der Bildqualität hinzunehmen. Dies zeigt sich insbesondere in der exzellenten Bildschärfe und Farbdarstellung, selbst unter anspruchsvollen Bedingungen wie wechselnder Beleuchtung und schwierigen Wetterverhältnissen. Die gesammelten Erkenntnisse bildeten die Basis für die Integration performanter ISP-Chips in neue Kamerasysteme, die nun explizit auf die Anforderungen moderner Aviation-Projekte ausgelegt sind. Durch diese gründliche Erprobung und die nachgewiesene Verlässlichkeit der Systeme wurde das Entwicklungsrisiko in neuen Kundenprojekten signifikant reduziert.

Die anschauliche Dokumentation dieser Risikoreduktion, etwa durch die präzise Ausrichtung mittels Tilterplatten und die effiziente Kanaljustage, erwies sich als ausschlaggebend für die Gewinnung neuer Aviation-Kunden. Kappa konnte gegenüber potenziellen Auftraggebern überzeugend darlegen, dass innovative Lösungen nicht nur technologisch fortschrittlich, sondern auch wirtschaftlich tragfähig sind. Im Ergebnis wurden durch dieses Expertenwissen und die belegten Systemvorteile erfolgreich neue Projekte akquiriert und die Position von Kappa als Innovationspartner im Luftfahrtbereich gestärkt.

Auch im Bereich der thermischen Bildgebung setzte das Forschungsvorhaben neue Maßstäbe für die interne Entwicklung bei Kappa. Das neu entwickelte thermische Design und die Erkenntnisse aus der Entwicklung des geschutterten LWIR-Kanals waren der Ausgangspunkt für einen grundlegend neuen LWIR-Plattformansatz bei Kappa. Die signifikante Verbesserung der Non-Uniformity-Kalibrierung, sichtbar mit einer Steigerung der Homogenität und Stabilität der Thermaldaten um den Faktor vier bis zehn gegenüber bisherigen shutterless-Lösungen, führte dazu, dass Demonstratorsysteme bereits auf Kundenfahrzeugen im operativen Einsatz sind. Die Überführung in die Serienproduktion ist bereits angelaufen, sowohl in den Business Units Aviation als auch Defence Land von Kappa. Die Ergebnisse im Umgang mit Wettereinflüssen zeigen, dass die Entwicklung zusätzlicher hydrophober Beschichtungen für Schutzscheiben und eine Überarbeitung des mechanischen Designs der Frontscheiben notwendig sind, um das System resilienter gegen Regen zu machen.

Im Zuge des Aufbaus des Advanced Air Mobility-Sektors bei Kappa erwiesen sich die Forschungsergebnisse zudem als elementare Grundlage für die strategische Weiterentwicklung des Unternehmens. Die im Rahmen der Testflüge identifizierten und gezielt adressierten Entwicklungsrisiken – etwa im Bereich der Algorithmen Entwicklung für HDR-CMOS-Sensoren oder die Evaluierung eines geschutterten LWIR-Kanals – wurden durch die praxisnahen Erprobungen und die intensive Zusammenarbeit mit Entwicklungspartnern umfassend mitigiert. Dies hat nicht nur die

Innovationskraft von Kappa unterstrichen, sondern auch die klare Definition von Anforderungen für UAV-Kamerasichtsysteme ermöglicht, die Funktionen wie ATOL oder RPAS unterstützen. Dadurch entfällt in vielen Fällen der kostenintensive und zeitaufwändige Bedarf an umfangreichen Machbarkeitsstudien, was die Markteinführung beschleunigt und die Beratungs- sowie Umsetzungskompetenz von Kappa gegenüber internationalen Wettbewerbern erheblich stärkt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse auf fundierten technologischen Innovationen, nachvollziehbarer Risikoreduzierung und einer engen Verzahnung von Entwicklung, Test und Kundenanforderungen basiert. Die Implementierung der Erkenntnisse in Serienprodukte, der Zugewinn an neuen Projekten und die strategische Positionierung im Wachstumsfeld Advanced Air Mobility verdeutlichen den nachhaltigen Beitrag des Forschungsvorhabens zur Wettbewerbsfähigkeit von Kappa und dem Hightech-Standort Deutschland.