

# Integration eines Kamerasystems mit Wärmebild für FPV-Drohnen

Thomas Wallner, Bernhard Hollaus (Betreuer)

**Kurzfassung**—Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines serienfähigen Kamerasystems für den Einsatz mit FPV (First Person View)-Drohnen, welches mittels FPGA Sichtbilder mit Wärmebilder in Echtzeit mischt. Dazu muss das System hinreichend leicht, kompakt, robust und kosteneffizient sein.

Existierende Drohnen mit Wärmebildkameras können aufgrund hoher Kosten den Bedarf, von schätzungsweise mehr als 500 Drohnen, zur Rehkitzrettung allein in Tirol nicht decken. Im Rahmen seiner Bachelorarbeit hat der Autor einen funktionstüchtigen Prototypen für die Bildverarbeitung, bestehend aus Evaluierungs-Boards, entwickelt. Neben den Komponenten für die Bildverarbeitung, müssen Spannungsversorgungen, Schutzschaltungen und zusätzliche Schnittstellen für ein Embedded System realisiert werden. Die Umsetzung erfordert zudem einen 1-Achsen Gimbal mit mechanischer Befestigung und Ansteuerung. Um mit verschiedenen Akkus (2S-6S) kompatibel zu sein, wird eine Versorgungsspannung bis 28 V vorausgesetzt. Damit die Montage in gängige FPV-Rahmen möglich ist, muss der Formfaktor entsprechend gewählt werden.

Die Hard- und Software konnte als Produkt, in Form der IR-Cam, umgesetzt werden. Mithilfe eines Servomotors kann das Kamerasystem im Winkel verändert werden. Zudem sind der elektronische Verpolungsschutz und die eigens dafür entwickelte Schutzbeschaltung für den analogen Videoausgang funktionsfähig. Als serielle Schnittstelle zum Flugregler dient MSP (Multiwii Serial Protocol). Damit können Einstellungen mit einer Fernbedienung getätigt werden. Mithilfe einer Web-Anwendung kann die Firmware, ohne zusätzlicher Programmierertools, aktualisiert werden. Das 27,5 g schwere Kamerasystem konnte erfolgreich in eine FPV-Drohne

mit einer Flugzeit von bis zu 30 Minuten integriert werden. So konnten damit bereits Rehkitze gefunden und gerettet werden.

**Schlagwörter**—FPV-Drohne, Wärmebild, Sichtbild, Schutzschaltung, Rehkitzrettung

## I. EINLEITUNG

**R**EHKITZE haben in ihren ersten Lebenswochen noch keinen Fluchtinstinkt. Schätzungen zufolge sterben alleine in Österreich jährlich bis zu 25.000 Rehkitze aufgrund von Mäharbeiten. Das Absuchen der Felder mit Drohnen in Kombination mit Wärmebildkameras hat sich bereits bewährt. Das verfügbare Equipment ist teuer und noch nicht ausreichend, um den Bedarf zu decken. Aus diesem Grund wird eine kostengünstige Alternative in Kombination mit FPV-Drohnen angestrebt. [1] [2]

## II. VORANGEGANGENE ARBEITEN

In seiner Bachelorarbeit hat der Autor einen Prototypen konzipiert, um Bilder im Sichtbereich mit Wärmebilder für den Einsatz mit FPV-Drohnen zu mischen. Um mit FPV-Drohnen ohne Einschränkungen fliegen zu können, ist eine niedrige Latenz notwendig. Die Auflösung/Bildrate eines kleinen, kostengünstigen Wärmebildsensors reicht hierfür nicht aus. Um ein flugfähiges Kamerasystem realisieren zu können, wird nun das Wärmebild mit niedriger Auflösung und niedriger Bildrate in den Videostream der Sichtbild-Kamera mit höherer Auflösung und höherer Bildrate überlagert. [3]

Die Bearbeitung der Sichtbilder würde starke Technologien benötigen. Aus Optimierungsgründen

T. Wallner ist Student am MCI für Mechatronik und arbeitet bei Inntal Electronic Loecker GmbH, InEL, Kufstein, Österreich, E-Mail: thomas.wallner@inel.at.

B. Hollaus arbeitet am Studiengang Medizintechnik, MCI, Innsbruck, Österreich, E-Mail: bernhard.hollaus@mci.edu.

wird nur das Wärmebild verarbeitet und in Echtzeit in den Videostream eingefügt. Bereits beim Prototypen wurde der zu erreichende Formfaktor berücksichtigt und entsprechend kleine Bauteile ausgewählt: [3], [4]

- Wärmebildsensor: 10.50×12.70×7.14 mm, 0,9 g
- FPGA: 13×13×1.2 mm, 0,5g
- Mikrocontroller: 5×5×0.5 mm, 0,3 g

Abbildung 1 zeigt das Konzept der Bildverarbeitung. Zunächst wird das analoge Videosignal mit einem Video-Decoder digitalisiert und von einem FPGA verarbeitet. Parallel dazu liest der FPGA die Daten der Langwellen-Infrarot (LWIR)-Kamera mit Video over SPI ein und speichert diese im RAM. Der Mikrocontroller konfiguriert die LWIR-Kamera und setzt entsprechende Register im FPGA. Der FPGA tastet das digitalisierte Videosignal ab und fügt die Wärmebilddaten an den entsprechenden Pixelpositionen ein. Das Wärmebild kann dabei skaliert und positioniert werden. Mithilfe von Transparenz können die Pixeldaten auch mit den pseudokolorierten Temperaturdaten gemischt werden. Anschließend werden die verarbeiteten Videodaten durch einen Video-Encoder analog gewandelt. [3] [5]

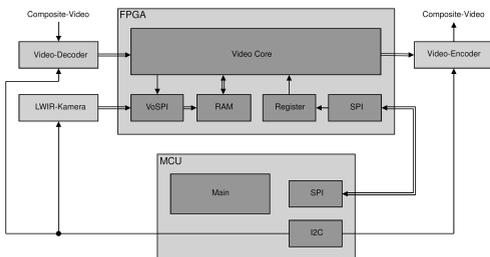


Abbildung 1. Konzept Bildverarbeitung [3]

Ein erster Prototyp ist mithilfe von Evaluierungsboards zusammengestellt worden. Durch eine eigens entwickelte Software können Wärmebilder in Echtzeit überlagert werden. Erste Ergebnisse werden in Abbildung 2 dargestellt. a) zeigt die Positionierungs-

und Skalierungsmöglichkeiten. In b) wird das teilweise Einblenden vom Wärmebild hervorgehoben. Außerdem kann zwischen verschiedenen Kolorierungen gewählt werden. [3]



(a) Positionierung und Skalierung



(b) Teilweises Einblenden

Abbildung 2. Bildverarbeitung [3]

### III. ZIELSETZUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, ein kommerzielles Kamerasystem für den Einsatz von FPV-Drohnen zu entwickeln. Um einen kleinen, kostengünstigen Wärmebildsensor einsetzen zu können, wird die vorangegangene Bildverarbeitung genutzt. Das finale Produkt muss einen kompakten Formfaktor besitzen, um in eine handelsübliche FPV-Drohne integriert werden zu können. Dank Ausnahmeregelungen dürfen auch nicht zertifizierte Drohnen bei verringerten

Mindestabständen zur Rehkitzrettung eingesetzt werden [6]. Während dem Flug sollen Einstellungen verändert werden können, wodurch eine Schnittstelle zum Flugregler notwendig ist. Um mit möglichst vielen Akkus (2S bis 6S) kompatibel zu sein, wird ein Spannungsbereich von 5 V bis 28 V angestrebt.

Abbildung 3 zeigt, wie das Kamerasystem in eine FPV-Drohne integriert werden soll. Die *IR-Cam* besteht aus *Module*, *Base* und *Servo*. Die Pfeile stellen die Einstellmöglichkeiten über die Funkfernbedienung dar. Aufgrund des analogen Videosenders können mehrere Geräte das Videosignal gleichzeitig empfangen.

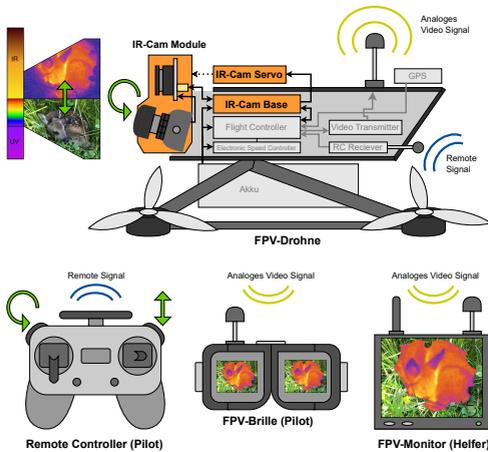


Abbildung 3. Zielsetzung [7][8]

Im *Module* befinden sich eine FPV-Kamera und der Wärmebildsensor. Die Breite des Gehäuses darf FPV-Kameras der Bauform "Micro" nicht überschreiten. Dies entspricht einer maximalen Breite von 19 mm. Die *Base* ist eine Leiterkarte, auf welcher sich analoge Videowandler, ein FPGA, ein Mikrocontroller, Spannungswandler und entsprechende Schutzschaltungen befinden. Diese soll möglichst kompakt sein. Für den Einsatz auf FPV-Drohnen müssen auch passende Montagelöcher berücksichtigt werden. *Module* und *Base* sollen möglichst leicht sein. Je

größer das Gewicht, desto geringer die Flugzeit.

Um von oben auf das hohe Gras schauen zu können, soll mithilfe eines Servos das *Module* geneigt werden. Der 1-achsige Gimbal besteht aus dem Servomotor und einem kollisionsfähigen Servoarm.

#### IV. KONZIPIERUNG UND PLANUNG

##### A. Spannungsversorgung und Schutzschaltungen

Die notwendige Leistung wird von den verwendeten Komponenten bestimmt. Abbildung 4 zeigt das Konzept der Spannungsversorgung. Darin sind die verwendeten Komponenten und die dazugehörigen Spannungen ersichtlich. Es kommen BUCK-Konverter und Linearregler zum Einsatz. Linearregler werden nur für Verlustleistungen bis 500mW eingesetzt, um die Hitzeentwicklung so gering wie möglich zu halten. BUCK-Konverter haben eine bessere Effizienz mit dem Nachteil einer größeren Ripplspannung. Um den Platzbedarf der Netzteile bei entsprechender Spannungsfestigkeit zu verringern, werden die BUCK-Konverter in Serie betrieben. [9] [10]

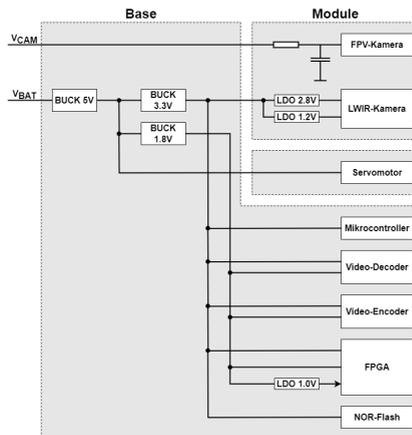


Abbildung 4. Konzept Spannungsversorgung

Für die bestmögliche Bildqualität, wird die Versorgungsspannung der FPV-Kamera von außen gespeist

und anschließend gefiltert. Die Spannungen, welche nur für die LWIR-Kamera notwendig sind, werden auf dem externen *Module* erzeugt. Der Eingang der Versorgungsspannung ist gegenüber Überspannung und Verpolung zu schützen. Aufgrund der Empfindlichkeit des analogen Videoausgangs gilt es eine spezielle Schutzbeschaltung zu entwickeln.

### B. Flugregler Integration

Mit einem Flugregler kann seriell mit dem Multiwii Serial Protocoll (MSP) kommuniziert werden [11]. Für die bestmögliche Integration sollen Standard Kommandos genutzt werden, um sowohl mit *Betaflight* als auch mit *INAV* kompatibel zu sein. Es sollen folgende Funktionalitäten umgesetzt werden:

- Benutzereingabe mit einer Funkfernbedienung
- Anpassung der Servo-Position anhand der momentanen Ausrichtung der Drohne
- Auswertung des aktuellen Flugmodus, um darauf reagieren zu können

### C. Firmware Update

Um in Zukunft auf bereits verkaufte Kamerasysteme, softwareseitig neue Funktionen hinzuzufügen zu können, muss die Hardware updatefähig sein. Das Firmwareupdate soll dabei intuitiv und ohne zusätzlicher Hardware erfolgen können. Das Update-Konzept wird in Abbildung 5 dargestellt. Der Flugregler verfügt bereits über eine USB-Schnittstelle und kann mit dem PC verbunden werden. Am PC gilt es eine Webanwendung basierend auf der "Web Serial API" umzusetzen. Der Flugregler wird als USB-Seriellwandler genutzt. Neben dem Mikrocontroller gilt es auch den FPGA zu updaten. [12]

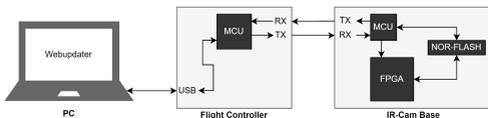


Abbildung 5. Konzept Firmware Update

## V. REALISIERUNG

### A. Auslegung Schutzschaltungen

Abbildung 6 zeigt die ausgelegte Eingangsschutzschaltung. Der Überspannungsschutz wird mithilfe einer TVS-Diode realisiert. Der Verpolungsschutz erfolgt mittels MOSFET-Schaltung. Dadurch werden im Vergleich zu einer Diode in Serie die Verluste möglichst klein gehalten. [13]

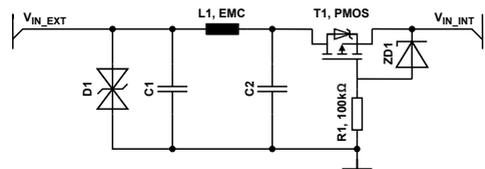


Abbildung 6. Schutzschaltung Eingang

Die nach außen empfindlichste Leitung ist der Videoausgang des Video-Encoders. Der spezifizierte Spannungsbereich liegt bei  $-0.3\text{ V}$  bis  $3.9\text{ V}$ . Die hierfür entwickelte Schutzschaltung kann Abbildung 7 entnommen werden. Die Dioden begrenzen die Spannung in der Anfangszeit, bis schließlich die Rückstellsicherung  $F1$  auslöst. Dadurch können die Dioden in möglichst kleiner Bauform gewählt werden.

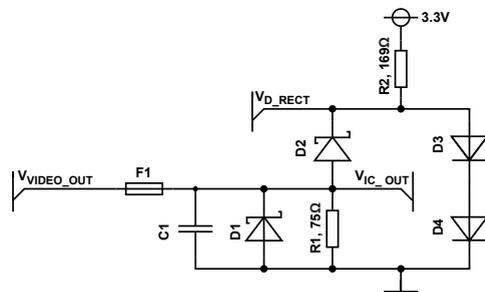


Abbildung 7. Schutzschaltung Videoausgang

### B. Implementierung Firmware

Die realisierte MSP-Kommunikation mit dem Flugregler kann Abbildung 8 entnommen werden.

Zunächst wird die Firmware-Variante und die Anordnung der Box-IDs ausgelesen. Ist dies erfolgreich können die RC-Daten, die aktuelle Ausrichtung der Drohne und die Flags der Box-IDs ausgelesen werden.

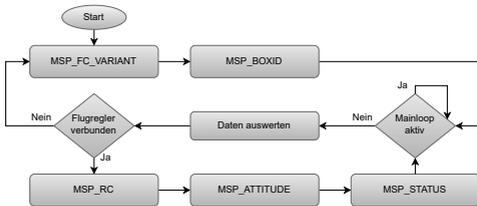


Abbildung 8. Realisierung MSP

Um möglichst viele Anforderungen zu erfüllen, kann zwischen verschiedenen "Wärmebildprofilen" gewählt werden. Diese lassen sich wie in Abbildung 9 in den Einstellungen personalisieren. Mögliche Anpassungen sind der Temperaturbereich, die Kolorierung, sowie verschiedene Modi der einzelnen Parameter. Außerdem lassen sich in den Einstellungen die Kanäle der Funkfernbedienung zuordnen und der Servomotor einrichten.

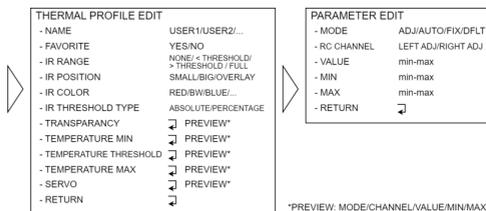


Abbildung 9. Personalisierbare Wärmebildprofile

### C. Aufbau einer FPV-Drohne zur Rehkitzrettung

Für den Einsatz zur Rehkitzrettung gilt es eine möglichst effiziente FPV-Drohne aufzubauen. Um die bestmögliche Flugzeit zu erreichen, werden effiziente 6-Zoll Propeller, 2850 KV BLDC Motoren und 4S Lithium-Ionen Akkus verwendet. Um stabilisierte Flugmodi verwenden zu können, wird ein GPS samt

Barometer verbaut. Die Verdrahtung der Drohne wird in Abbildung 10 dargestellt.

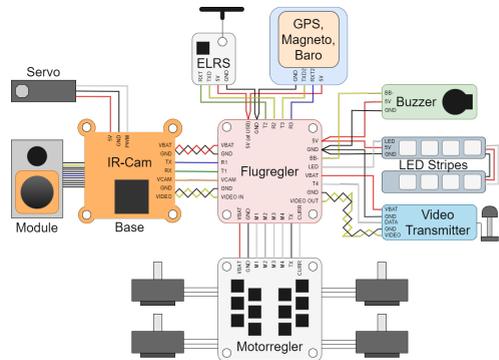


Abbildung 10. Verdrahtung FPV-Drohne

## VI. ERGEBNISSE

### A. Kamerasystem

Die Hard- und Software konnten erfolgreich umgesetzt werden. Die Abbildung 11 zeigt die finale *InEL IR-Cam*. Der Wärmebildsensor und die FPV-Kamera werden in einem eloxierten Aluminiumgehäuse geschützt. Die Größe vom *Module* beträgt 18.8x32.5x20.2 mm. Die Bildverarbeitung erfolgt auf einer ausgegliederten Leiterkarte, der *Base*, mit Außenabmessungen von 36.5x36.5x6.7 mm. Diese verfügt über Montagelöcher für klassische FPV-Rahmen. Gemeinsam wiegt das System 27.5g und kann noch mit einem Servomotor erweitert werden.



Abbildung 11. InEL IR-Cam (NTSC/PAL) [14]

Die Kommunikation zum Flugregler erfolgt über MSP. Dadurch ist es möglich Benutzereingaben über die Fernbedienung auszuwerten. Die grafische Oberfläche des Web-Updateers ist in Abbildung 12 ersichtlich. Neben der Firmware-Version, kann auch der serielle Port von der IR-Cam am Flugregler ausgewählt werden. Der Update-Vorgang dauert je nach Größe der Firmware 1 min bis 2 min.

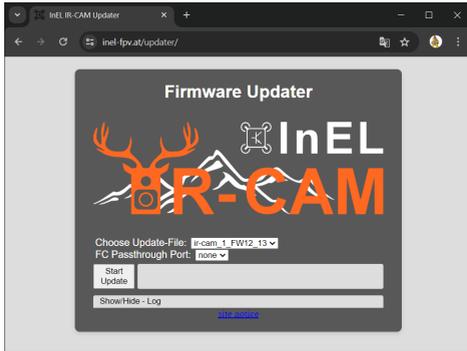


Abbildung 12. Web-Updater

### B. Messungen

Abbildung 13 zeigt das Einschaltverhalten an der Schutzschaltung am Eingang bei positiv anliegenden der Spannung. Aufgrund des geschalteten MOSFET kann der Spannungsabfall zwischen  $V_{IN\_EXT}$  und  $V_{IN\_INT}$  auf unter  $0.4\text{ V}$  reduziert werden.

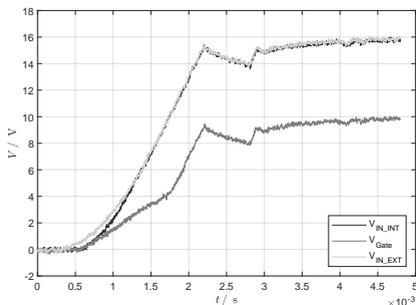


Abbildung 13. Einschaltverhalten,  $V_{IN\_EXT} = 16\text{ V}$

Legt man jedoch eine negative Spannung an, sperrt die intrinsische Diode vom MOSFET, wie in Abbildung 14 ersichtlich.

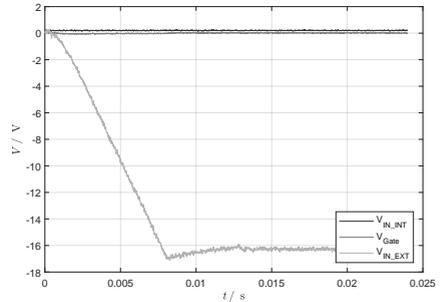


Abbildung 14. Einschaltverhalten,  $V_{IN\_EXT} = -16\text{ V}$

Abbildung 15 zeigt den zeitlichen Verlauf vom analogen Videosignal am Eingang in Richtung FPV-Kamera und am Ausgang in Richtung Flugregler beim Ende der vertikalen Austastlücke [15]. Es wird eine tatsächliche Latenz von  $72\text{ }\mu\text{s}$  ermittelt.

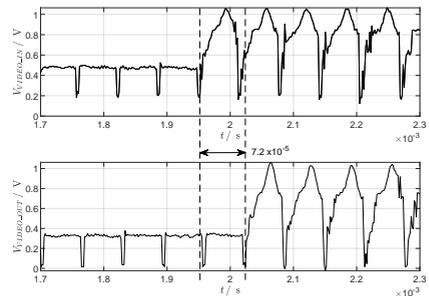


Abbildung 15. Zeitverlauf der analogen Videosignale

Legt man eine Spannung am Videoausgang an, kann dank der Schutzschaltung die Abbildung 16 gemessen werden. Trotz einer angelegten Spannung von  $16\text{ V}$ , wird die Spannung am Video-Encoder Ausgang  $V_{IC\_OUT}$  auf maximal  $2.4\text{ V}$  begrenzt und liegt somit im spezifizierten Bereich des Bauteils.

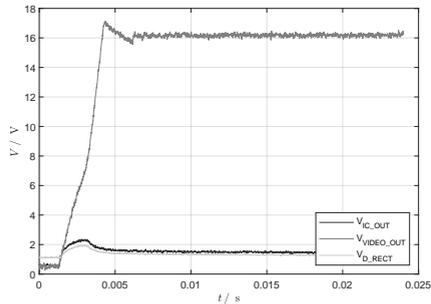


Abbildung 16. Zeitverlauf Schutzschaltung Videoausgang

### C. Integrierbarkeit auf eine FPV-Drohne

Die *IR-Cam* kann einfach in FPV-Drohnen integriert werden. In der Abbildung 17 ist die verbaute *IR-Cam* zu erkennen. Links ist der "Stack" bestehend aus Motorregler, Flugregler und *IR-Cam Base* zu sehen. Außerdem ist der Kippmechanismus zu erkennen. Die Aufhängung erfolgt flexibel mit einer Zugfeder.



Abbildung 17. Servo Kippmechanismus

Die vollständige Drohne kann in Abbildung 18 betrachtet werden. Bei einem Eigengewicht von 900 g, wovon die Hälfte dem Akku zuzuordnen ist, kommt die Drohne auf eine Flugzeit von bis zu 30 min. Als Flugregler-Firmware wird *INAV* verwendet. Diese verfügt über unterstützte Flugmodi, mit welcher die Drohne stabilisiert in der Luft die Position halten kann.



Abbildung 18. Integration in eine FPV-Drohne

### D. Einsatz zur Rehkitzrettung

Die Abbildung 19 zeigt einen erfolgreichen Einsatz der *InEL IR-Cam* bei der Rehkitzrettung. Neben der Ricke, ist ein kleiner Punkt zu erkennen. Das Rehkitz ist so klein, dass man es selbst aus einem Meter Entfernung ohne Wärmebildkamera kaum erkennen kann. Das Rehkitz wurde am Feldrand gesichert und nach dem Mähen wieder frei gelassen.

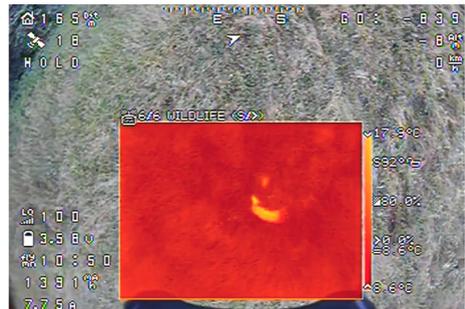


Abbildung 19. Rehkitzrettung mit der *InEL IR-Cam*

## VII. CONCLUSIO

Ziel dieser Arbeit war es die Bildverarbeitung aus [3], welche Realbilder mit Wärmebilder in Echtzeit überlagert, in eine FPV-Drohne zu integrieren. Mit der *InEL IR-Cam* ist aus einer Idee und einem ersten Prototypen, ein ausgereiftes Produkt entstanden. Durch die kompakte Bauform, wie in Abbildung 20 ersichtlich, lässt sich diese einfach in FPV-Drohnen integrieren. Der Kippmechanismus zur Anpassung des Kamerawinkels wurde bereits im Design der Kamera berücksichtigt.



Abbildung 20. InEL IR-Cam Module

Durch die Kommunikation mit dem Flugregler über MSP können auch während dem Flug Einstellungen getätigt werden. Die verschiedenen Modi lassen sich als Wärmebildprofile konfigurieren und speichern. In Zusammenarbeit mit lokalen Jägern und Bauern wurden erfolgreich Rehkitze mit dem System gerettet. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind neben der Wildtierbeobachtung, zur Feuerbekämpfung, sowie für Gebäude- und Photovoltaik-Inspektionen.

## DANKSAGUNG

Der Autor möchte sich bei seinem Betreuer Bernhard Hollaus für die gute Zusammenarbeit bedanken. Besonderer Dank geht an Jury Löcker dem Geschäftsführer von Inntal Electronic Loecker GmbH (InEL), welcher mit seiner Überzeugung die Umsetzung erst möglich gemacht hat. Ein weiterer Dank gilt den Jägern aus Kirchdorf in Tirol, besonders

Roman Salfenmoser für seine hervorragende Organisation und Unterstützung.

## LITERATUR

- [1] [Online]. <https://www.rehkitzrettung.at/>, Abruf am 23.06.2024.
- [2] M. Just, "JAGD IN TIROL 09—2023," Sep. 2023.
- [3] T. Wallner, "Mischung von Sicht- und Wärmebildern für den Einsatz mit FPV-Drohnen," Bachelorarbeit, Management Center Innsbruck, 2022.
- [4] FLIR Commercial Systems., *Lepton Engineering Datasheet*, 500th ed., Jun. 2018.
- [5] B. J. LaMeres, *Introduction to Logic Circuits and Logic Design with Verilog*. Springer International Publishing, Apr. 2019.
- [6] Austro Control, "Luft- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 03," Mai 2024.
- [7] [Online]. <https://lars-wildretter.de/wp-content/uploads/2021/05/Jungwildrettung.jpg>, Abruf am 05.03.2022.
- [8] [Online]. <https://www.bvaargau.ch/blog/rettet-die-rehkitze-0>, Abruf am 30.06.2024.
- [9] Jim Williams, *High Efficiency Linear Regulators*, an32-1 ed., März 1989.
- [10] Brigitte Hauke, *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*, slva477b ed., August 2015.
- [11] [Online]. [http://www.mutiwii.com/wiki/index.php?title=Main\\_Page](http://www.mutiwii.com/wiki/index.php?title=Main_Page), Abruf am 13.06.2024.
- [12] [Online]. <https://developer.chrome.com/docs/capabilities/serial?hl=de>, Abruf am 12.06.2024.
- [13] Z. Franz, *Leistungselektronik*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, März 2023.
- [14] "InEL IR-Cam (NTSC/PAL) user manual v0.8," Inntal Electronic Loecker GmbH, Kufstein, Austria, 2024.
- [15] U. Schmidt, *Professionelle Videotechnik*. Springer Berlin Heidelberg, Jul. 2021.



**Thomas Wallner** ist Student im Masterstudiengang Mechatronik am MCI Innsbruck. Bei der Firma Inntal Electronic Loecker GmbH in Kufstein ist er als Hard- & Softwareentwickler tätig.