



**Entwicklung eines UAV-basierten Systems
zur Rehkitzsuche
und
Methoden zur Detektion und Georeferenzierung
von Rehkitzen in Thermalbildern.**

Der Fliegende Wildretter

Dissertation

zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.),

eingereicht am Fachbereich für Mathematik/Informatik
der Universität Osnabrück

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Martin Israel

Oberpfaffenhofen, 2016

Gutachter:

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Peter Reinartz

Dr.-Ing. habil. Volker Tank

Mitglieder der Prüfungskommission:

Hon.-Prof. Dr.-Ing. Peter Reinartz

Dr.-Ing. habil. Volker Tank

Prof. Dr.-Ing. Manfred Ehlers

Dr. rer. nat. Thomas Jarmer

Tag der Disputation: 09. Dezember 2015

© 2016

Martin Israel

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Methodik der Fernerkundung

martin.israel@dlr.de



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines UAV-basierten Systems und der zugehörigen Methodenentwicklung zur automatisierten Rehkitzsuche in Feldern. Jedes Jahr sterben sehr viele Wildtiere – vor allem Rehkitze – während dem Mähen von landwirtschaftlich genutzten Wiesen. Mit herkömmlichen Methoden ist es unter vertretbarem Aufwand bisher nicht gelungen, die Zahl der Mähopfer auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Mit der Entwicklung des in dieser Arbeit beschriebenen „Fliegenden Wildretters“ könnte sich das in Zukunft ändern. Mit Hilfe einer Wärmebildkamera aus der Vogelperspektive lässt sich ein warmes Tier, wie ein Rehkitz, wesentlich leichter aufspüren, als mit herkömmlichen Methoden. Auslegung und Aufbau des Systems orientieren sich speziell an dem Aspekt, wie eine möglichst hohe Flächenleistung erreicht werden kann, ohne dabei Tiere zu übersehen. Drei Faktoren sind besonders wichtig, um dieses Ziel zu erreichen: Eine hohe Geschwindigkeit des gesamten Suchprozesses, eine zuverlässige Detektion und eine präzise Lokalisierung der Tiere. Durch Automatisierung lassen sich viele Teilaspekte dieser Aufgabe beschleunigen. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Methoden entwickelt und validiert, unter anderem zur Flugplanung, Flugsteuerung, Bilddaten-Auswertung, Objekt-Detektion und Georeferenzierung. Die Kenntnis der Rehkitz-Merkmale und der Einflussgrößen bei der Thermalbilderfassung helfen, die Qualität der Detektion zu erhöhen, weshalb sie in dieser Arbeit besondere Berücksichtigung finden. Auch die Präzision der Lokalisierung lässt sich durch Kenntnis der Einflussgrößen auf die Positions- und Lagemessung des UAVs erhöhen. Anhand von umfangreichen Messkampagnen wird die Funktion und Qualität des Systems unter realen Bedingungen belegt.

Abstract

This work presents a solution for the annually occurring problem during pasture mowing. Every year many wild animals, especially roe deer fawns, are killed during pasture mowing. Under reasonable effort until now no measure succeeded to reduce the amount of mowing victims to a tolerable level. With the development of the Flying Wildlife Finder this could change in future. The Flying Wildlife Finder is a **UAV**-based System to detect roe deer fawns. With the aid of a thermal camera from the bird's eye a warm animal like a roe deer fawn is much easier to detect than with traditional methods. This thesis treats especially the aspect, how such a system could reach high area performance without overlooking any animal. Three factors are of particular importance, to reach this goal: a high speed of the whole search process, a reliable detection and a precise localization of the animals. Automatization can accelerate many aspects of this mission. Therefore different software programs were developed for example for mission planning, flight control, image data evaluation, detection and georeferencing. The knowledge of the fawn features and the influences in the acquisition of thermal images helps to increase the quality of the detection. That's why this is particularly considered in the thesis. Also the precision of the localization can be increased with the knowledge of the influences in the position and pose measurement of the **UAV**. Based on extensive measurement campaigns the function and quality of the system is verified under real conditions.

Vorwort

Diese Arbeit ist am Institut für Methodik der Fernerkundung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen entstanden. Im Rahmen der beiden Wildretter-Verbundprojekte von 2008 bis 2011 und 2012 bis 2015 wurde sie durch das Bundesministerium für Forschung und Entwicklung und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft finanziert.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Peter Reinartz, für die Übernahme der Betreuung meiner Promotion. Er förderte meine wissenschaftliche Arbeitsweise und wirkte stets motivierend. Ich danke auch herzlich meinem ersten Betreuer und Zweitprüfer Herrn Dr. habil. Volker Tank. Er war der Initiator der infrarotbasierten Rehkitzrettung und unterstützte mich nicht nur in der fachlichen sondern auch in der persönlichen Entwicklung. Bester Dank gebührt auch meinem zweiten Betreuer und Abteilungsleiter Herrn Dr. Peter Haschberger für die vielen fruchtbaren Diskussionen und seine unermüdliche Geduld beim Korrekturlesen.

Herrn Dr. Ernst Moser, der Familie Janker sowie Herrn Peter Pelz und seinem Team danke ich für die schönen und lehrreichen Rehkitzrettungskampagnen und das zur Verfügung stellen ihrer Jagdreviere. Daniel Gurdan, Thorsten Hackbarth und das Asctec-Team danke ich für die ständige Unterstützung und den individuellen Firmware-Anpassungen. Dank geht außerdem an meine Kollegen im Erdbeobachtungszentrum für die vielen anregende Diskussionen, die gute Zusammenarbeit und das wundervolle Arbeitsklima. Auch den Kollegen bei den Projektpartnern der beiden Wildretter-Projekte (Fa. ISA Industrieelektronik, Bayerischer Jagdverband, Claas Saugau GmbH, Fachbereich Höchstfrequenztechnik der TU München, Zen-tec und Uni Hohenheim) möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für die gute Zusammenarbeit aussprechen.

Größter Dank gebührt meiner Familie, denn ohne deren Unterstützung wäre die Fertigstellung der Arbeit nicht möglich gewesen: Meine Frau Ute gab mir stets Raum für meine Arbeit und unterstütze mich mit allen Mitteln. Unser Sohn Valentin zeigte mir immer wieder aufs Neue, wo das Wesentliche im Leben liegt. Meine Mutter und meine Schwiegereltern kümmerten sich rührend um ihn, um mir die Arbeit an meiner Dissertation zu ermöglichen.

Geltendorf, den 15.10.2016

Martin Israel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Motivation	13
1.2	Aufbau der Arbeit	14
2	Grundlagen und Stand der Technik	16
2.1	Wildrettung	16
2.1.1	Wildverluste durch Landmaschinen	16
2.1.2	Wildrettungsstrategien	17
2.1.3	Verfahren ohne Sensortechnik	18
2.1.4	Infrarot-Systeme	20
2.1.5	UAV-basierte Systeme	25
2.1.6	Sonstige Verfahren	26
2.2	Thermografie	28
2.2.1	Elektromagnetische Wellen und ihr Spektrum	28
2.2.2	Schwarzkörperstrahlung	29
2.2.3	Emission, Absorption und Transmission von Infrarotstrahlung	31
2.2.4	Thermaldetektoren	32
2.2.5	Mikrobolometer	34
2.2.6	Radiometrische Eigenschaften einer Thermalkamera	35
2.3	Georeferenzierung	36
2.3.1	Optik	36
2.3.2	Modulationsübertragungsfunktion	38
2.3.3	Innere Orientierung	39
2.3.4	Äußere Orientierung	40
2.3.5	Geometrische Kalibrierung	41
2.3.6	Georeferenzierung bei unbemannten Flugsystemen	43
3	Das System Fliegender Wildretter	45
3.1	Konzept	46
3.1.1	Suchstrategien	46
3.1.2	Prozessschritte	47
3.1.3	Optimierungsziele	49
3.1.4	Ausbaustufen	50

3.2	Dimensionierung der Hardware	51
3.2.1	Flugplattform	51
3.2.2	Thermalkamera	53
3.2.3	Kameraobjektiv	54
3.2.4	Datenaufzeichnung	59
3.3	Wegpunktbasierte Navigation	60
3.3.1	Navigationsaspekte	62
3.3.2	Software zur Flugpfadplanung	66
3.4	Flugsteuerungssoftware	67
3.4.1	AutoPylot	67
3.4.2	UAV Remote Control	68
3.5	Thermalbildvisualisierung und Fundstellenmarkierung	72
3.6	Evaluierung	73
3.6.1	Wildretter-Datenbank	73
3.6.2	Beschleunigung der Vorbereitung	74
3.6.3	Flughöhenabhängige Flächenleistung	75
3.6.4	Aufnahmestrategie	76
3.6.5	Gegenüberstellung der Suchstrategien	77
3.7	Zusammenfassung	79
4	Rehkitz-Detektion in Thermalbildern	81
4.1	Klassifizierung von Rehkitzen	82
4.2	Rehkitzmerkmale	84
4.2.1	Temperaturdifferenz	84
4.2.2	Größe, Form und Verdeckung eines Rehkitzes	85
4.2.3	Indirekte Merkmale	89
4.3	Äußere Einflussgrößen auf die Detektion	92
4.3.1	Sonnenstrahlung	92
4.3.2	Flughöhe	96
4.3.3	Andere Strahlungsquellen und Reflexionen	99
4.4	Einflüsse der Kamera	100
4.4.1	Bildschärfe	100
4.4.2	Kameraelektronik	104
4.4.3	Radiometrische Einflüsse der Kamera	111
4.5	Bildverarbeitungssoftware	116
4.5.1	Vorverarbeitung	116
4.5.2	Automatischer Rehkitzdetektor	118
4.6	Evaluierung	123
4.6.1	Datensatz	123
4.6.2	Visuelle Detektion	124
4.6.3	Automatische Detektion	126

4.7	Zusammenfassung	128
5	Georeferenzierung	129
5.1	Direkte Georeferenzierung	130
5.1.1	Mathematisches Modell	130
5.1.2	Technische Umsetzung	132
5.2	Einflussgrößen auf die Georeferenzierung	135
5.2.1	Nick-Roll-Ausgleich	136
5.2.2	Messung der Erdbeschleunigung	138
5.2.3	Deviation des Kompasses	139
5.2.4	Messung der Flughöhe	141
5.3	Geometrische Kalibrierung der Thermalkamera	143
5.3.1	Testfeldkalibrierung	143
5.3.2	Laborkalibrierung	144
5.3.3	Ergebnisse und Vergleich der Kalibriermethoden	148
5.4	Boresight-Kalibrierung	152
5.5	Evaluierung	153
5.5.1	Fundstellen-Abweichungen	153
5.5.2	Suchdauer	154
5.6	Zusammenfassung	155
6	Diskussion und Ausblick	157
A	Anhang	160
A.1	Rotation im \mathbb{R}^3	160
A.2	Projektive Geometrie und homogene Koordinaten	161
A.3	Evaluationsmetriken für eine binäre Klassifikation	162
	Literaturverzeichnis	164
	Abbildungsverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	176
	Symbolverzeichnis	177
	Konstanten	183
	Abkürzungsverzeichnis	184

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den Monaten April bis Juni werden die landwirtschaftlich genutzten Grünflächen in ganz Mitteleuropa gemäht. Das gemähte Gras wird häufig zu Silage verarbeitet und dient damit als hochwertiges konserviertes Futtermittel den Stalltieren. Im gleichen Zeitraum werden die Kitze des europäischen Rehs (*Capreolus capreolus*) geboren. Die landwirtschaftlich genutzten Wiesen sind bei den Rehen beliebte Kinderstuben, da das Gras zu dieser Zeit bereits bis zu einem Meter hoch gewachsen ist und damit einen guten Sichtschutz darstellt. In den ersten drei Wochen ihres Lebens besitzen die Kitze einen angeborenen Drückinstinkt, der sie veranlasst sich bei Gefahr tot zu stellen und sich an den Boden zu drücken, anstatt davon zu laufen. Da die Kitze in dieser Zeit auch noch keinen Geruch abgeben, ist dieses Verhalten äußerst effektiv, um ihren Fressfeinden zu entkommen. Gegen die Mähmaschinen ist dieses Verhalten aber kein Schutz. Deshalb sterben laut Schätzungen des Deutschen Jagdverbandes allein in Deutschland ca. 100 000 Rehkitze bei der Frühjahrsmahd [Wie03].

Die Population des Rehwilds in Deutschland ist so hoch, dass nach dem Jagdabschussplan jährlich ca. 1 Mio. Rehe geschossen werden müssen, um den nachwachsenden Wald zu schützen. Dennoch ist es den Menschen wichtig, Tiere nicht ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden zuzufügen. Die Aufnahme des Tierschutzes als Staatsziel in das Grundgesetz (Art. 20a Abs. 1) untermauert diese gesellschaftliche Haltung. Wird ein Rehkitz bei der Mahd getötet nachdem keine vorherigen Maßnahmen zur Vermeidung des Mähtodes unternommen wurden, droht im Falle einer Anklage eine Strafe. Laut §17 des Tierschutzgesetzes wird das Töten eines Wirbeltieres ohne vernünftigen Grund mit einer Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit einer Geldstrafe bestraft. Bei dem Ziel der Vermeidung des Mähtodes geht es nicht allein um die Tiere, die aus- oder angemäht werden, sondern auch um den Landwirt, dem das Leid erspart werden soll mit ansehen zu müssen, wie er immer wieder versehentlich Tiere verletzt oder tötet.

Auch aus wirtschaftlichen Gründen macht es Sinn, die Rehkitze vor dem Mähtod zu retten, denn bei der Silage von mit Kadaverteilen kontaminiertem Mähgut kann

ein geruchloses Gift namens Botulinum Toxin entstehen, das bereits in geringen Mengen schadet. Im schlimmsten Fall sterben die damit gefütterten Rinder, was einen hohen wirtschaftlichen Schaden für den Landwirt bedeutet. In [Gal+00] wird über einen Fall berichtet, bei dem 427 von 441 ausgewachsenen Kühen einer amerikanischen Molkerei an Botulismus starben, weil die Leiche einer Katze das Futter kontaminierte.

Da das Reh überwiegend auf dem europäischen Kontinent vorkommt, sind vor allem europäische Landwirte mit diesem Problem konfrontiert. Andere Hirscharten wie Rothirsche oder Damhirsch sind weniger stark betroffen, da ihre Setzzeit einige Wochen später im Jahr liegt. Aber nicht nur Kitze, sondern auch Hasen, Rebhühner, Fasane und viele weitere Wildtiere werden jedes Jahr Opfer von Mähmaschinen. Bis heute existiert noch kein System, das unter zumutbarem Aufwand zuverlässig diese Mähopfer verhindern und zugleich mit der modernen Grünlandbearbeitung schritthalten kann.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systems, das die Rehkitzsuche stark erleichtert. Dabei soll es optimiert werden auf hohe Suchgeschwindigkeit und zuverlässige Detektion. Die Erfahrung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Infrarotsensoren in diesem Kontext zeigt, dass die thermische Strahlung geeignete Verfahren für die Rehkitzdetektion ermöglicht. Aus diesem Grund soll eine Thermalkamera für diese Aufgabe zum Einsatz kommen. Die rasche Entwicklung im Bereich der unbemannten Fluggeräte (UAVs, engl. *unmanned aerial vehicles*) führte zu der Idee ein UAV als Plattform für die gestellte Aufgabe einzusetzen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit deckt verschiedene Fachdisziplinen ab, unter anderem die Thermographie, Optik, Photogrammetrie, Bildverarbeitung, Informatik, Elektrotechnik und Biologie. Damit die Arbeit für eine möglichst breite Leserschaft zugänglich ist, wurde versucht die jeweiligen Details allgemeinverständlich darzustellen.

In Kapitel 2 werden zunächst die verschiedenen Methoden zur Wildrettung und aktuelle Konkurrenzsysteme vorgestellt. Es folgen die Grundlagen der Thermographie. Auf die Funktionsweise von ungekühlten Thermalkameras wird dabei besonders eingegangen. Beim Thema Georeferenzierung werden nur diejenigen Grundlagen behandelt, die für das Verständnis dieser Arbeit nötig sind. Aktuelle Arbeiten zur Georeferenzierung bei unbemannten Flugsystemen werden vorgestellt.

Das Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Aufbau des Systems Fliegender Wildretter. Als erstes wird das Konzept vorgestellt. Es werden vier Suchstrategien unterschied-

den. Der Prozess der UAV-basierten Rehkitzrettung wird in vier Prozessschritte eingeteilt. Die wichtigsten Optimierungsziele für die Entwicklung des Systems werden aufgezeigt und gewichtet. Auf diese Optimierungsziele hin wird das System schließlich dimensioniert und optimiert. Durch eine geeignete wegpunkt-basierte Navigation kann eine hohe Flächenleistung erreicht werden. Die entwickelte Flugpfadplanungssoftware berücksichtigt verschiedene Aspekte, um bei vollständiger Flächenabdeckung die Flächenleistung zu maximieren. Es werden außerdem noch weitere Softwareentwicklungen vorgestellt, die den Prozess der Rehkitzsuche stark beschleunigen. Die Geschwindigkeit und Flächenleistung des Systems wird anhand von realen Einsätzen evaluiert.

Im Kapitel 4 geht es um die Detektion der Rehkitze. Zunächst werden die direkten und indirekten Merkmale von Rehkitzen analysiert. Äußere Einflussgrößen wie die direkte Sonnenstrahlung können die Detektion auf Thermalbildern erheblich erschweren. Ihnen wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Aber auch die Kamera selbst verursacht Störungen, die für eine zuverlässige Detektion zuvor entfernt werden müssen. Neben dem erarbeiteten Verfahren zur Störungsreduktion und Kontrastverbesserung wird ein Mustererkennungsalgorithmus entwickelt und vorgestellt, der zur Unterstützung der visuellen Detektion geeignet ist. Unter günstigen Umgebungsbedingungen detektiert er Rehkitze automatisch. Abschließend wird auch die Detektion einer Evaluierung mit Datensätzen von realen Einsätzen unterworfen.

Das Kapitel 5 widmet sich der UAV-basierten direkten Georeferenzierung und der geometrischen Kalibrierung der verwendeten Thermalkamera. Das Ziel ist, eine präzise Lokalisierung der Fundstellen auf den Bildern zu erreichen, um damit Zeit bei der Suche im Feld einzusparen. Zunächst wird eine neue mathematische Formulierung der direkten Georeferenzierung vorgestellt. Danach wird sie am Beispiel des Fliegenden Wildretters angewendet. Das dynamische Flugverhalten des verwendeten UAVs verursacht große Abweichungen der Lagemessung, was eine Georeferenzierung schwierig macht. Die Einflussgrößen auf die Lagemessung werden deshalb genauer betrachtet. Mit der geometrischen Kalibrierung der Thermalkamera beschäftigt sich ein darauf folgender Abschnitt. Es wurden Verfahren entwickelt, die die Besonderheiten einer Thermalkamera berücksichtigen. Für die Bestimmung der Einbaulage der Thermalkamera wurde ebenfalls ein Verfahren entwickelt. Die erreichte Genauigkeit der Georeferenzierung wird wieder anhand von Datensätzen von realen Einsätzen evaluiert.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Ergebnisse nochmal zusammengefasst und diskutiert. Das Kapitel zeigt Optimierungspotential des Systems auf und bietet Lösungsansätze, die aus jetziger Perspektive erfolgversprechend scheinen. Es wird außerdem ein Ausblick gegeben, wie das System marktfähig gemacht werden kann. Ein weiteres Anwendungsgebiet für das System wird vorgestellt.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Wildrettung

2.1.1 Wildverluste durch Landmaschinen

Die häufig zitierte Zahl von 100.000 vermähnten Rehkitzen in Deutschland geht auf einen Eintrag im DJV-Handbuch aus dem Jahr 1978 zurück. Bereits damals hieß es, dass pro 100 ha Grünfläche ca. 2 Kitze durch Mähmaschinen ums Leben kommen. Es gab auch eine Untersuchung im Jahr 1979, bei der 36 Kreisgruppen des Landesjagdverbandes in Nordrhein-Westfalen nach den Wildverlusten durch landwirtschaftlichen Maschineneinsatz befragt wurden [Kit79]. Kittler rechnet die Mähverluste der 36 Kreisgruppen auf die ehemalige Bundesrepublik hoch und kam zu einer Zahl von 84.116 Rehverluste durch landwirtschaftlichen Maschineneinsatz. Die Kreisgruppen nannten durchschnittlich 1,2 Verluste pro 100 ha Grünfläche. In [Kit79] wurden auch 17 Landwirte persönlich nach den Mähverlusten befragt. Dabei kam eine weit höhere Zahl von 6,7 Verlusten pro 100 ha Grünfläche heraus. Allerdings scheint sich diese Zahl auf die tatsächlich gemähte Grünfläche zu beziehen.

Laut Bundesamt für Statistik werden im Jahr 2014 rund 4,6 Millionen Hektar in Deutschland als Dauergrünland genutzt. Aber nur 39 % des Dauergrünlandes (1,83 Mio ha) sind Wiesenflächen, die gemäht werden. Weideflächen und ertragsarme und aus der Erzeugung genommene Grünlandflächen sind darin nicht enthalten [Wie14]. Bei für Deutschland insgesamt angenommenen 100 000 vermähnten Rehkitzen pro Jahr liegt damit die durchschnittliche Anzahl pro 100 Hektar gemähter Grünfläche bei 5,46 Rehkitzen. Damit erscheint die Zahl von 6,7 Verlusten der 17 persönlich befragten Landwirte gar nicht so ungewöhnlich wie es Kittler in seiner Veröffentlichung darstellt. Aber nicht nur Wiesen stellen eine Gefahr für Rehkitze dar, sondern auch Flächen auf denen Grünroggen wächst [Ste10]. Dieser wird häufig zur Verwendung in Biogasanlagen angebaut und ebenfalls im Mai geerntet.

In Polen wurde 1982 ebenfalls eine Erhebung durchgeführt [Kal82]. Der Autor

rechnet in Verlusten pro 100 ha Gesamtfläche und kam dabei auf 1,3 Rehe. Er rechnet die Zahl der Verluste außerdem auf den prozentualen Anteil an jährlichen Neugeborenen um und kommt dabei auf 26 %.

Auf ein ähnliches Ergebnis kommt [Jar02] in Schweden. 1997 sind es bei ihm 44 % der Neugeborenen. 1998 und 1999 kommt er auf 25 %. Darüber hinaus wurden 50 % der Rehkitze durch Füchse getötet.

2.1.2 Wildrettungsstrategien

Der Wunsch nach einem Wildrettungssystem ist sehr alt. Seit es maschinelle Agrarlandbearbeitung gibt, versuchen die Menschen den Mähtod von Wildtieren zu vermeiden.

Es gibt unterschiedliche Ansätze Rehkitze vor dem Mähtod zu schützen:

- Mähstrategie
- Scheuchen
- Suchen und Bergen

Eine geeignete Mähstrategie ist die einfachste Methode um Wildtiere zu schützen. Das Mähen von Innen nach Außen erleichtert fluchtfähigen Tieren die Flucht. Frisch gesetzte Rehkitze profitieren von dieser Methode allerdings nicht. Ihnen würde jedoch ein früherer oder sehr viel späterer Mähtermin helfen. Am sichersten, aber für viele Landwirte nicht realisierbar, ist natürlich, auf das Mähen komplett zu verzichten und anstatt dessen die Rinder selbst das Gras ernten zu lassen.

Das Scheuchen ist geeignet, um fluchtfähige Tiere vor dem Mähtod zu bewahren. Rehkitze die jünger als drei Wochen sind, haben noch keinen ausgeprägten Fluchtinstinkt, obwohl sie bereits ab dem ersten Tag laufen können. Sie stellen sich bei Gefahr tot und ducken sich tief ins Gras. Die frisch gesetzten Kitze hätten bei der Flucht keine Chance einem Fuchs zu entkommen. Sie ignorieren jegliche Art von Scheuchen. Nur die Ricke kann ihre Kitze zur Bewegung veranlassen, weshalb eine Scheuche bei Kitzen nur indirekt über die Ricke angewendet werden kann, mit der Hoffnung, dass sie ihre Kitze aus der Wiese bringt.

Zuverlässiger – aber meist auch aufwendiger – ist die Strategie „Suchen und Bergen“. Dabei wird die zu mähende Fläche komplett abgesucht und die gefundenen Rehkitze herausgetragen oder vor Ort eingesperrt. Um keinen menschlichen Geruch am Kitz zu hinterlassen, werden üblicherweise Grasbüschel oder Handschuhe zum Heraustragen verwendet. Dass die Ricke das Kitz grundsätzlich nicht mehr annimmt, wenn man es mit der Hand berührt, ist ein Gerücht, das sich seit vielen

Jahrzehnten hält, obwohl seit 1965 in verschiedenen wissenschaftlichen Experimenten immer wieder das Gegenteil bewiesen wurde [Kur02].

In einer Bachelorarbeit wurden verschiedene Verfahren zur Wildrettung bei Erntearbeiten verglichen [Hel08]. Neben wissenschaftlichen Einrichtungen beschäftigen sich vor allem betroffene Landwirte, Jäger, Tierschutzorganisationen oder kleine Unternehmen mit der Suche nach geeigneten Systemen oder Verfahren, um den MähTod zu vermeiden. Wissenschaftlich zitierfähige Publikationen werden in diesem Rahmen selten veröffentlicht, weshalb in den folgenden Abschnitten häufig Tageszeitungen, Internetseiten oder Fernsehbeiträge zitiert werden.

2.1.3 Verfahren ohne Sensortechnik

Mähstrategie Bei der Mähstrategie gibt es einige Möglichkeiten, um Mähopfer zu vermeiden. Der effektivste Schutz ist ein geeigneter Mähzeitpunkt und eine geringe Schnitthäufigkeit. Ca. 96 % der Rehkitze werden in den Monaten Mai und Juni geboren [Rie55]. Wenn der erste Schnitt in den Monat April fällt und der zweite Schnitt erst spät im Juli stattfindet, dann werden viele Kitze verschont. Auch die Art des Mähwerks hat Auswirkungen auf die Zahl der Opfer. Es gibt heute bereits Mähmaschinen mit 14 m Arbeitsbreite und Arbeitsgeschwindigkeiten von bis zu 24 km/h [Dör09]. Ihnen können manchmal selbst ausgewachsene Rehe nicht rechtzeitig entkommen [Wil]. Mähbalken haben sich im Gegensatz zu Sensen und Kreiselmähern in zahlreichen Untersuchungen als für die Fauna schonendste Mahdvariante herausgestellt. Viele kleinere Tiere – unter anderem Feldhasen – werden verschont, wenn die Schnitthöhe mindestens 12 cm beträgt [PZ14]. Bei dem Befahrmuster werden die beiden in Abb. 2.1 gezeigten Varianten empfohlen, damit fluchtfähige Tiere eine Chance zur Flucht haben [Wil]. Kitzen in den ersten Lebenstagen hilft das aber nicht.

Scheuchen In Schweden wurde in den Jahren 1998 und 1999 eine Untersuchung über die Wirksamkeit von Plastik-Müllsäcken, die auf Holzpflocken als Scheuchen dienten, durchgeführt [Jar02]. Der korrekte Einsatz der Scheuchen führt laut Autor dazu, dass signifikant mehr Kitze aus der Wiese geführt werden als ohne Scheuchen. Bei dem Versuch holten die Ricken am ersten Tag nach dem Aufstellen der Scheuchen 18 von 22 Kitzen aus der Gefahrenfläche. Ein zu frühes Aufstellen verursacht eine Gewöhnung an die Scheuchen. Wenn die Scheuchen allerdings zu spät aufgestellt werden, kann es sein, dass die Ricke nicht mehr ausreichend Zeit hat, ihre Kitze in Sicherheit zu bringen. Deshalb sollten die Scheuchen 1 – 2 Tage vor der Mahd aufgestellt werden. Neben den einfachen Plastiksäcken gibt es

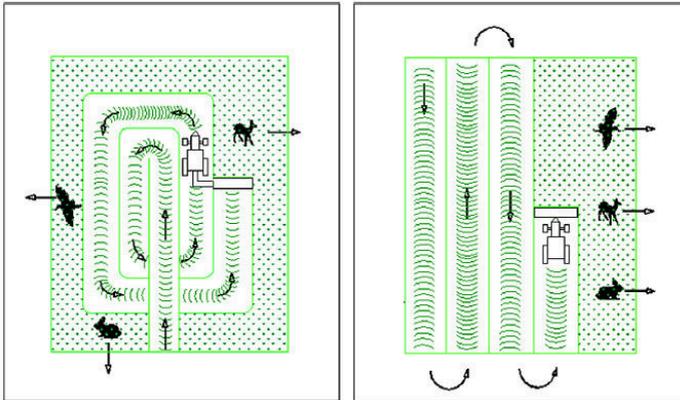


Abb. 2.1: Geeignete Mähstrategie, um fluchtfähige Tiere zu verschonen (aus [PZ14]).

eine Reihe an kommerziell erwerbbaeren Scheuchen, die optische, akustische oder olfaktorische Reize aussenden, um die Tiere zu vertreiben.



Abb. 2.2: Verschiedene Scheuchen: akustisch/optisch [KP09], olfaktorisch [Hag15], optisch [Vog15]

In Abbildung 2.2 sind verschiedene Scheuchen abgebildet. Die Reichweite einer optisch/akustischen Scheuche beträgt nach Angaben mehrerer Hersteller ca. 100 m [Kli07; Tho15]. Die olfaktorische Scheuche in Abb 2.2 hat eine Reichweite von 10 – 20 m. Einige Jäger schwören auf das "Verstärkern" durch ihren Jagdhund. Indem sie mit ihren Hunden durch die Wiese laufen, wird der Hundegeruch im

Feld verteilt, was ähnlich wie die oben genannten Scheuchen wirken soll. Auch das Anmähen einer Fläche am Abend vor der Mahd hat einen vergleichbaren Scheucheffekt. In jüngster Zeit wurden häufig verschiedene akustische Wildretter mit einem Geräuschpegel von bis zu 120 dB beworben, die man an das Mähwerk montieren kann [Wes15]. Rehkitze, die jünger als 3 Wochen sind, kann man damit allerdings nicht verscheuchen. Ebenso gibt es Schutzvorrichtungen für Mähwerke, die wie ein Kamm den Bereich vor dem Mähwerk durchkämmen. Rehkitze, die ca. 3–5 Wochen alt sind, schrecken auf, wenn sie von so einer Vorrichtung berührt werden. [Wag11].

Suche ohne technische Hilfsmittel Hunde können Kitze trotz ihrer geringen Witterung mit ihrer Nase finden. Solche Vorstehhunde können in speziellen Hundeschulen ausgebildet werden. Die Suche mit ihnen ist oft erfolgreicher als mit Menschenketten wie in Abb. 2.3. Mancherorts werden ganze Schulklassen dazu angeheuert, die Wiesen zu Fuß abzulaufen, um die darin versteckten Rehkitze zu finden.



Abb. 2.3: Rehkitz-Rettungsaktion mit freiwilligen Schülern im Odenwald.[ZDF15]

2.1.4 Infrarot-Systeme

IR-Wildretter Bereits im Jahr 1987 wurde vom DLR ein Patent angemeldet als Einrichtung zur Erkennung von Wild [DTT89]. Mit Hilfe von pyroelektrischen Infrarotdetektoren, die auf einer Stange montiert sind, können damit die Wiesen abgesucht werden [HBT96].

Mit einer durchschnittlichen Schrittgeschwindigkeit von ca. 5 km/h kann mit einem solchen Gerät eine ein Hektar große Wiese in ca. 30 Minuten abgesehen werden.



Abb. 2.4: Der tragbare Wildretter wird durch die Wiese getragen.

Abb. 2.4 zeigt den tragbaren Infrarot-Wildretter im Einsatz. Auf der bis zu 5 m ausziehbaren Aluminiumstange sind insgesamt 10 Sensormodule befestigt. Die pyroelektrischen Infrarotsensoren reagieren auf eine zeitabhängige Temperaturänderung. Das Gerät ist so ausgelegt, dass ein warmes Rehkitz sicher detektiert wird, wenn die Stange mit einer Geschwindigkeit von ca. 5 km/h in einem Abstand von bis zu ca. 1,5 m über das Kitz bewegt wird, und die Umgebungstemperatur mindestens 5 Kelvin kälter als das Kitz ist [Bun93]. An sonnigen Tagen detektiert das Gerät außer Rehkitze häufig auch Maulwurfshügel und Stellen mit vertrocknetem Gras, da diese von der Sonne stärker erwärmt werden als vitales Gras. Um diese Fehlalarme zu reduzieren, gibt es einen Regler, mit dem die Alarmschwelle der Temperaturdifferenz eingestellt wird.

Die Bedienung erscheint einigen Nutzern als kompliziert, da verschiedene Dinge gleichzeitig beachtet werden müssen. Die Gehgeschwindigkeit sollte etwa 4 – 5 km/h betragen. Eine langsamere Geschwindigkeit führt dazu, dass geringe Temperaturdifferenzen nicht mehr erkannt werden. Manche Gräser haben zur Erntezeit eine kolbenartige Blüte (z. B. Fuchsschwanzgräser oder Knäuelgräser), die sich stärker erwärmt als der Rest der Pflanze. Da die Sensoren des tragbaren Wildretters oft nur sehr knapp über diese Blüten hinweg bewegt werden, füllt eine solche Blüte – obwohl sie deutlich kleiner als ein Rehkitz ist – einen großen Teil des Sichtfeldes des Sensors aus und kann deshalb einen Fehlalarm auslösen. Der Nutzer muss während dem Gehen stets darauf achten, dass die Stange waagrecht und mit einem Mindestabstand von 15 cm zu allen Gräserkolben eingehalten wird. Der tragbare

Wildretter wiegt ca. 5 kg. Das Absuchen einer größeren Wiesenfläche wird deshalb mit dem tragbaren Wildretter schnell zu einer sportlichen Herausforderung.

Obwohl der tragbare Wildretter bei korrekter Bedienung das derzeit zuverlässigste technische Rehkitz-Suchgerät ist, das kommerziell erhältlich ist, blieb die Nachfrage in Deutschland bis heute gering.

Mähwerkgekoppelter Wildretter Es war das Ziel in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt unter der wissenschaftlichen Koordination des Autors, ein mähwerkgekoppeltes Wildrettungssystem zu entwickeln [Isr+10]. Damit genug Zeit zum Anhalten und Bergen bleibt, wurde ein Auslegerarm derart konzipiert, dass die Sensoren jeweils in die nächste Mähspur ragen (siehe Abb. 2.5 links). So kann die eine Spur gemäht werden, während die andere Spur abgesucht wird. Da die Rehkitze für gewöhnlich in ihrem Liegeplatz liegenbleiben, kann das System, sobald das Mähwerk an die Fundstelle kommt, den Fahrer rechtzeitig alarmieren.

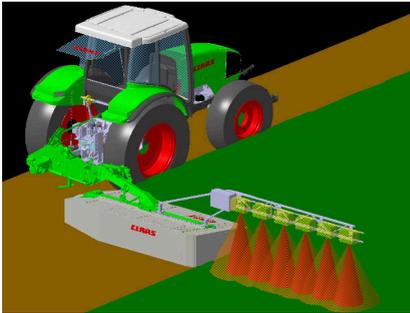


Abb. 2.5: Der mähwerkgekoppelte Wildretter. Die Sensoren sind so angeordnet, dass sie jeweils in die nächste Mähspur ragen, sodass gleichzeitig gesucht und gemäht werden kann (Quelle der Skizze links: Fa. Claas).

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden verschiedene Sensoren und Verfahren für die Detektion von Rehkitzen im hohen Gras untersucht [Fac12; Rei12; Men09]. Für einen Betrieb an der Landmaschine stellte sich heraus, dass ein multistatisches Radar in Kombination mit Thermalsensoren am geeignetsten ist [Isr+10]. Ein Radarsensor wird dabei so angeordnet, dass sowohl der Sende- als auch die Empfangskegel der Radarantennen um ca. 25° nach vorne geneigt sind (siehe Abb. 2.6) [FB09]. Multistatisch bedeutet, dass mehrere Empfangsantennen an verschiedenen Stellen ein reflektiertes Signal empfangen. Dadurch kann der Signal-Rausch-

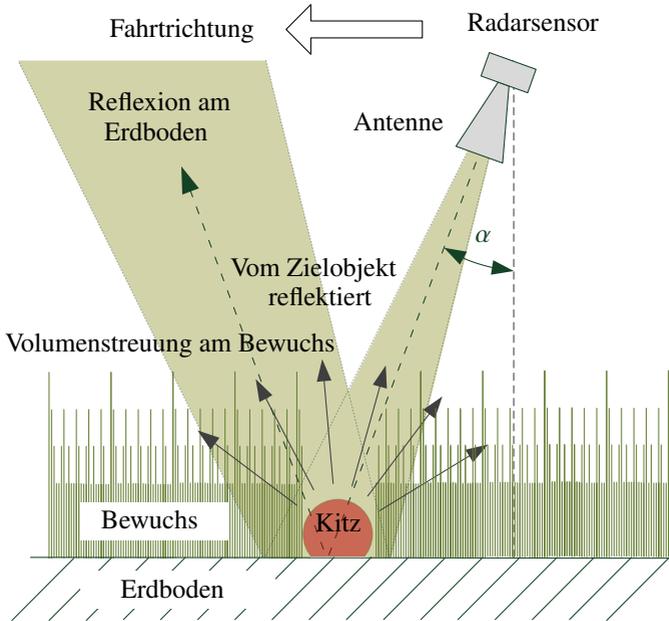


Abb. 2.6: Funktionsprinzip eines Radars zur Rehkitzdetektion. Bei schräg nach vorne gerichteten Sende- und Empfangsantennen werden die Mikrowellenstrahlen am Rehkitz auf Grund der reflektierenden Wirkung des hohen Wassergehalts im Körper und der Form des Rehkitzes reflektiert [FB09].

Abstand erhöht werden.

Die Fusion von Radar- und Thermalsensoren ermöglicht eine höhere Zuverlässigkeit, da nicht nur warme Stellen, sondern nur Objekte gefunden werden, die zugleich Mikrowellenstrahlung reflektieren. In Wiesenfeldern gibt es außer Rehkitzen nur wenige Objekte die beide Bedingungen erfüllen [Bie+03].

Die Funktion des mähwerkgekoppelten Wildretters auf Basis von Radar- und Infrarotsensoren wurde unter Laborbedingungen nachgewiesen. Ein praxistauglicher Prototyp konnte während der Laufzeit des Projektes aus zeitlichen Gründen nicht mehr hergestellt werden. Die Vermarktung als Produkt ist bisher nicht geplant.

Neben den Radar- und Infrarotsensoren wurden vor allem Thermal- und Farbkameras auf ihre Eignung zur Rehkitzdetektion untersucht. Sie sollten durch die Thermalsensoren getriggert werden [Isr+09]. Als Sensoren an der Mähmaschine sind sie aber aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeit, der rauen Umgebungsbedingungen und der hohen Rechenzeit weniger gut geeignet als die einfacher aufgebauten

Infrarotsensoren. Wenn die Kamera auf einen Auslegerarm montiert wird und aus 1,2 m senkrecht nach unten blickt, ist die Bildverschmierung bei Fahrgeschwindigkeiten > 10 km/h eine große Herausforderung. Durch eine geeignete mechanische Nachführung kann die Bewegung kompensiert werden [Sch09]. Für eine Mähbreite von 3 m sind 6 Sensoreinheiten nötig, da jede dieser Einheiten ca. einen halben Meter abdeckt. Mit Hilfe eines speziellen Schienensystems ließe sich die Anzahl der für eine Mähbreite benötigten Thermalkameras auf eine Kamera reduzieren [IS11]. Bereits während den Arbeiten am mähwerkgekoppelten Wildretter wurden verschiedene Detektionsalgorithmen zur automatischen Detektion von Rehkitzen untersucht. Der Fast Compression Distance Algorithmus erwies sich bei Nahaufnahmen der Kitze als sehr zuverlässig [CID09; IE11]. In einer Masterarbeit [Eve11] wurde dieser Algorithmus in der Programmiersprache Python implementiert und mit den Thermalbildern von Rehkitzen und Wiesen, die aus einer Höhe von 1,2 m aufgenommen wurden, getestet.

Life-Finder Ein in den USA entwickeltes Gerät [gam15] verspricht laut eines Artikels in der Jägerzeitschrift Pirsch [Pir00] anhand der aufsteigenden warmen Luft (Wärmesäule) die von einem Rehkitz ausgeht, diese im hohen Gras zu detektieren. Man muss dazu angeblich nur das Handgerät in einer Entfernung von bis zu 100 m horizontal über die Wiese schwenken. Wissenschaftlich ist dieses Verfahren allerdings nicht belegt und nach Auffassung des Autors mit dem heutigen Stand der Technik gar nicht realisierbar.

HTL Wildretter An der Höheren Technischen Lehranstalt (HTL) in Waidhofen an der Ybbs (Österreich) wird seit 2009 ebenfalls ein Wildrettungssystem auf Basis von Infrarotsensoren entwickelt [Wag11]. Anstatt der pyroelektrischen Infrarotdetektoren kommen allerdings Thermopile-Detektoren zum Einsatz, mit denen nicht eine Temperaturdifferenz wie beim IR-Wildretter, sondern die Strahlungstemperatur gemessen wird. Es existiert mittlerweile ein Traktorgerät (siehe Abb. 2.7) und ein Handgerät, das ähnlich aussieht wie der IR-Wildretter. Beim Traktorgerät sind 30 Sensoren auf einem Spritzgestänge mit 15 m Arbeitsbreite verbaut. Das 7 m lange Aluminiumgestänge des Handgeräts ist mit 12 Sensoren bestückt. Das System enthält einen GPS-Empfänger, mit dessen Hilfe eine Temperaturkarte der abgesuchten Fläche erzeugt werden kann. Ein automatischer Bilderkennungsalgorithmus zur Rehkitzdetektion wurde ebenfalls entwickelt. Eingesetzt wird das Gerät üblicherweise vor dem Sonnenaufgang. Sobald die Sonne aufgeht, beginnt sich das Feld unregelmäßig zu erwärmen. Dann liefert der Rehkitzdetektor häufige Fehlalarme. Die theoretische Flächenleistung liegt bei maximal 15 ha/Std. Mit den Stehzeiten und dem Kitze einsammeln kann von einer tatsächlichen Flächenleistung von 6 – 8 ha/Std ausgegangen werden [Wag11]. Das Gerät existiert lediglich



Abb. 2.7: Der HTL Wildretter im Einsatz [Wag11].

als prototypischer Aufbau.

2.1.5 UAV-basierte Systeme

UAVs werden zunehmend für die Detektion von Tieren oder für das Lokalisieren von mit Transpondern ausgestatteten Tieren verwendet. Beispielsweise können damit Delfine, Schildkröten und andere Meeresbewohner detektiert werden [HKP13]. Aber auch um mit Transpondern versehene Fische zu orten, werden UAVs eingesetzt [Leo+]. Ein UAV-basiertes System zum Schutz von Nashörnern vor Wilderern wird in Südafrika eingesetzt [Mul+14]. In Mitteleuropa scheint allerdings die Rehkitzsuche unter den UAV-Anwendungen mit Tierbezug die weiteste Verbreitung zu haben.

Den ersten Versuch Rehkitze mit einer Wärmebildkamera von einem UAV aus zu finden, unternahm der Schweizer Tierschutz (STS) am 20.8.2008. Mit einem Quadroptor wurde eine mit warmen Wasser befüllte PET-Flasche als Kitzatrappe im hohen Gras gesucht. Auf einem Monitor wurde das Videobild der Wärmebildkamera übertragen. Die PET-Flasche konnte auf dem Bild als heller Fleck erkannt werden. Im Schweizer Fernsehen wurde darüber berichtet [SF08].

Unabhängig davon kam beim DLR-Projektteam im Rahmen der Entwicklung des mähwerkgekoppelten Wildretters ebenfalls die Erkenntnis auf, dass die verwendete Wärmebildkamera aufgrund der hohen Pixelanzahl und der rauen Umgebungsbedingungen besser an einer vom Mähprozess entkoppelten Plattform, mit größerem Abstand zum Boden, eingesetzt wird. Die Idee, die Thermalkamera zur Rehkitz-

suche auf einem **UAV** zu betreiben, wurde vom Autor in dem Patent [ITH09] festgehalten, das außerdem ein transponderbasiertes mehrstufiges System zur Rehkitzrettung beschreibt. In einer weiteren Patentanmeldung [Isr12] des Autors ist ein **UAV**-basiertes System zur Rehkitzdetektion beschrieben, das neben der Thermalkamera auch eine Farbkamera nutzt, die überbelichtete Bilder erzeugt, um speziell in den Schattenbereichen der Kitzlager mehr Details von den möglicherweise darin liegenden Rehkitzen zu erhalten.

Seit 2010 ist auch ein Team der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften in Zollikofen (**HAFL**) aktiv bei der Rehkitzsuche aus der Luft. Der dort eingesetzte Bambikopter besteht aus einem selbst aufgebauten Mikrokopter-System mit einer Wärmebildkamera [SRF13; Ber15]. Sobald eine auffällig warme Stelle gefunden wird, läuft eine Person zu dieser Stelle hin, und überprüft die Fundstelle. Auf einem mobilen Monitor kann die Person das Kamerabild des über der Fundstelle schwebenden Kopters stets mitverfolgen. In diesem Zusammenhang entstand zudem in Kooperation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (**ETH**) eine Masterarbeit, bei der unter anderem die Georeferenzierung für solch ein System untersucht wurde [Ban11].

In Mecklenburg Vorpommern engagiert sich seit 2012 der Tierschutzverein Wildtierhilfe MV bei der Wildtierrettung aus der Luft [Dem15]. Es wird ein vergleichbares System wie das des **HAFL**-Teams eingesetzt. Anstatt eines Monitors kommt eine Videobrille zum Einsatz. Das Rettungsverfahren unterscheidet sich allerdings. Die Kitz werden nicht aus der Wiese herausgetragen, sondern mit einem Windschutz-Zaun an Ort und Stelle eingesperrt.

In Dänemark beschäftigt sich ein Forscherteam mit Bildverarbeitungsalgorithmen auf Wärmebildern, um die Detektion von Wildtieren zu automatisieren [Ste+12]. Neben Rehkitzen liegt ihr Augenmerk auf Bodenbrütern, die ebenfalls durch die Mahd gefährdet sind. Zwar setzen sie noch kein **UAV** ein, entwickeln aber Algorithmen dafür. Als **UAV**-Simulator kommt ein Kranwagen zum Einsatz [Chr+14].

Vor allem deutsche **UAV**-Systemintegratoren, aber auch **UAV**-Erstausrüster werben zunehmend damit, dass man mit ihren Systemen auch Rehkitze detektieren kann [Sch15; Blu15; Mic15]. Ähnlich wie beim Versuch des **STS** wurde in den Medien bisher allerdings höchstens in Form einer einmaligen Aktion, meist mit gestelltem Szenario, berichtet.

2.1.6 Sonstige Verfahren

Akustik Kamera Eine Forschergruppe versuchte Rehkitze zu finden mit einer Art Akustik Kamera mit synthetischer Apertur [HP15]. Das System funktioniert

ähnlich wie ein Synthetic Aperture Radar, nur dass Schallwellen anstatt elektromagnetischen Wellen ausgesendet werden. Die reflektierten Wellen werden mit einem Mikrofonarray empfangen. Es handelt sich dabei um ein Bildgebendes Verfahren für den Nahbereich. Nach Laborversuchen zeigte sich, dass aufgrund von Phasenverzerrungen der Reflexionen das System doch nicht für die Rehkitzdetektion geeignet sei [HP15].

Distanz Sensor Bei einem weiteren Verfahren, das vom Autor während der Arbeit am mähwerkgekoppelten Wildretters entwickelt und in einem Patent [IT10] beschrieben wurde, möchte man anhand des Höhenprofils der Wiese die Lagerstellen der Kitzte oder auch die Kitzte selbst finden. Das Höhenprofil wird mit einem Distanzsensor, der aus 1 – 2 m Entfernung auf den Boden blickt und in konstanter Höhe über die Wiese geführt wird, aufgenommen. In einer Diplomarbeit wurde ein Laboraufbau dafür entwickelt [See08]. Auch dieses Verfahren eignet sich nicht als alleiniger Sensor zur Rehkitzdetektion. In Kombination mit anderen Sensoren könnte es bei optimal senkrecht stehendem dichten Bestand hilfreich sein.

Multispektral Sensor In einem weiteren Patent [Tan07] wird vorgeschlagen, Rehkitze von anderen Objekten anhand eines Quotienten aus zwei verschiedenen Wellenlängen im Spektralbereich von 350 nm bis 2500 nm zu unterscheiden. Vorgeschlagen wird beispielsweise ein Quotient aus den Reflexionsgraden der Spektralbereich rot (um 680 nm) zu grün (um 550 nm). Wenn dieser den Wert 1,5 überschreitet, deutet dies auf ein Kitz. Unter Laborbedingungen bei gleicher Beleuchtung kann dieses Verfahren funktionieren. Bei Messungen des Autors im Feld hat sich gezeigt, dass dieses Verfahren im praktischen Einsatz, bei dem die Rehkitze manchmal im Schatten und manchmal in der Sonne liegen, schwer realisierbar ist. Für dieses Verfahren ist eine gleichbleibende Bestrahlungsstärke gefordert. In [Tan07] wird vorgeschlagen eine künstliche Beleuchtung zu verwenden. Damit das System bei Sonnenschein eingesetzt werden kann, müsste die Bestrahlungsstärke der künstlichen Beleuchtung im untersuchten Bereich größer als die der Sonne sein. Aufgrund der oft ungleichmäßig wachsenden Gräser ist die gleichmäßige Abschattung des untersuchten Bereichs äußerst schwierig. Eine zu geringe Beleuchtung in den Schattenbereichen führt dazu, dass ein Kitz nicht mehr von einem Erdhügel unterschieden werden kann.

2.2 Thermografie

Die Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren zur Messung und Anzeige von Strahlungstemperaturen. Dabei wird mit Hilfe einer Wärmebildkamera (auch Thermal- oder Infrarotkamera genannt) die Infrarotstrahlung gemessen, die von einer Oberfläche ausgeht. Aus der Infrarotstrahlung lässt sich die Temperatur (Strahlungstemperatur) einer Oberfläche berechnen. Die zivile Anwendung der Thermografie hat in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erfahren. Heutzutage wird die Thermografie sowohl in der Forschung und Entwicklung eingesetzt als auch in verschiedenen Bereichen der Industrie als nicht-destruktives Testverfahren, als Monitoringinstrument, zur Erkennung von Isolationsschwachstellen an Häusern und für viele weitere Anwendungen [VM10].

2.2.1 Elektromagnetische Wellen und ihr Spektrum

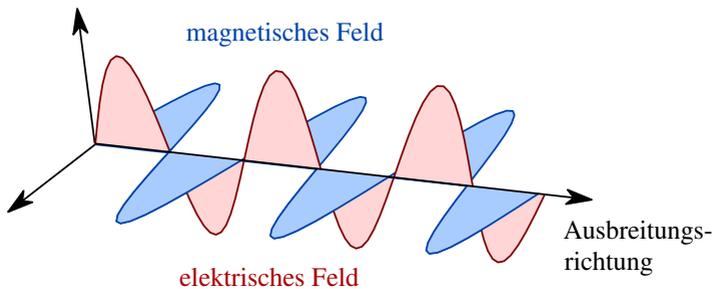


Abb. 2.8: Elektromagnetische Welle.

Infrarotstrahlung besteht wie sichtbares Licht, Radiowellen-, Mikrowellen-, Röntgenstrahlung und weitere Ausprägungen aus elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Frequenz. Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern, die orthogonal zueinander stehen (siehe Abb. 2.8).

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt, emittiert Strahlung. Ein Teil dieser Strahlung ist im infraroten Spektralbereich, der im elektromagnetischen Spektrum zwischen dem sichtbaren Licht und der Mikrowellenstrahlung im Bereich von $0,7$ bis $1000 \mu\text{m}$ liegt [GM13]. Abb. 2.9 zeigt die Unterteilungen des elektromagnetischen Spektrums in seine Teilbereiche. Der thermale Infrarotbereich ist zusätzlich vergrößert dargestellt. Neben dem sichtbaren Spektrum folgt das kurzwellige bzw. nahe Infrarot (von ca. $0,8$ bis ca. $3 \mu\text{m}$), danach das mittlere

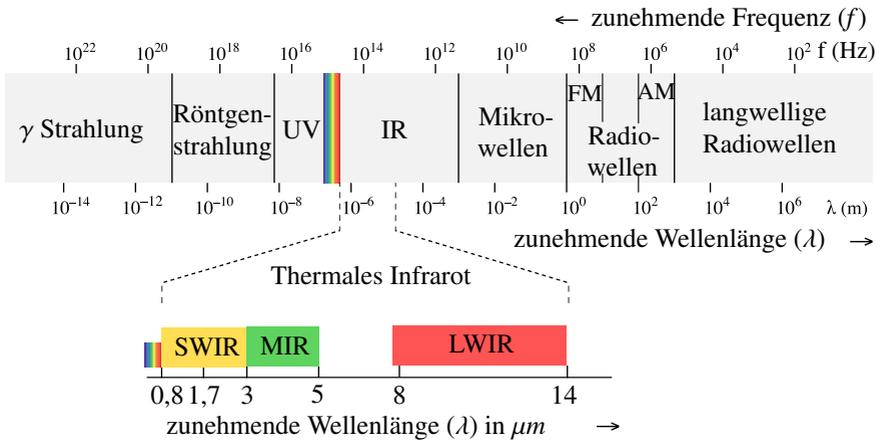


Abb. 2.9: Der infrarote und seine benachbarten Spektralbereiche. Die erweiterte Ansicht des Thermalen Infrarot Spektrums zeigt kurzwelliges (engl: *short wave infrared*, SWIR), mittleres (MIR) und langwelliges (engl: *long wave infrared*, LWIR) Infrarot. Für diese Bereiche existieren kommerzielle Kameras (aus [VM10]).

Infrarot (von 3 bis 5 µm) und schließlich das langwellige Infrarot (von ca. 7,5 bis 14 µm). Im Anschluss folgt das ferne Infrarot (bis 1000 µm).

2.2.2 Schwarzkörperstrahlung

Ein idealer Strahler von Infrarotstrahlung wird Schwarzkörper genannt. Es handelt sich dabei um eine Idealisierung, die in der realen Welt nicht existiert. Nicht ideale Strahler werden graue Strahler genannt. Der Schwarzkörper hat eine Oberfläche mit der Eigenschaft, dass einfallende Strahlung vollständig absorbiert wird, unabhängig von Wellenlänge und Richtung.

Das Planck'sche Strahlungsgesetz gibt die spektrale Verteilung der elektromagnetischen Leistung eines solchen schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung und der Temperatur des Schwarzkörpers an. Sie wird angegeben als spektrale spezifische Ausstrahlung

$$M_\lambda(T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda. \tag{2.1}$$

T ist hierbei die Temperatur des Schwarzkörpers in Kelvin, h das Planck'sche

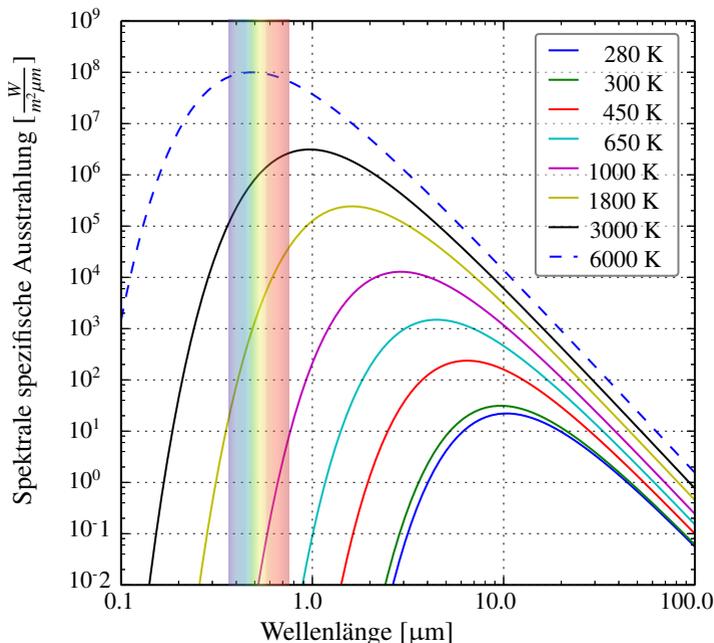


Abb. 2.10: Planck'sche Strahlungsspektren für verschiedene Temperaturen.

Wirkungsquantum mit $6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum mit $2,998 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$, k_B die Boltzmann-Konstante mit $1,3806488 \cdot 10^{-13} \text{J/K}$ und λ ist die Wellenlänge der Strahlung in Mikrometer.

Abb. 2.10 zeigt Spektren von Schwarzkörpern mit verschiedenen Temperaturen. Das Maximum der Schwarzkörperstrahlung verschiebt sich abhängig von dessen Temperatur. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschreibt diesen Zusammenhang mit

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T}. \quad (2.2)$$

Mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz kann die Strahlungsleistung P eines schwarzen Körpers, die allein von der Temperatur T abhängt, als Integral über alle Wellenlängen berechnet werden. Es lautet

$$P(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma \cdot T^4, \quad (2.3)$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

2.2.3 Emission, Absorption und Transmission von Infrarotstrahlung

Trifft die Strahlung Φ auf einen Körper, kann sie absorbiert (Anteil Φ_a), reflektiert (Anteil Φ_r) und transmittiert (Anteil Φ_t) werden (siehe Abbildung 2.11). Der Absorptionsgrad α , der Reflexionsgrad ρ und der Transmissionsgrad τ sind wie folgt definiert:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi}; \quad \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi}; \quad \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi}. \quad (2.4)$$

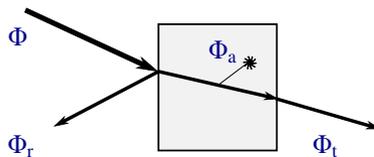


Abb. 2.11: Absorption, Reflexion und Transmission an einem Körper.

Der Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsgrad eines Körpers hängt u. a. von der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung, der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers und der Polarisation der Strahlung ab und kann in den verschiedenen Wellenlängenbereichen stark unterschiedlich sein. Aus dem Energieerhaltungssatz folgt:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.5)$$

Nach Kirchhoffs Strahlungsgesetz ist der Absorptionsgrad α gleich dem Emissionsgrad ϵ , also:

$$\epsilon = \alpha. \quad (2.6)$$

Die Atmosphäre besteht aus verschiedenen natürlichen Gasen, welche die elektromagnetische Strahlung in bestimmten Spektralbereichen auf Grund ihrer Molekülstruktur absorbieren. Abb. 2.12 zeigt den Transmissionsgrad der Atmosphäre in Mitteleuropa für eine Übertragungsstrecke von 10 bzw. 100 m. Die Absorption vor allem von Wasserdampf und Kohlendioxid aber auch anderen Gasen verursacht, dass die Transmission im thermalen Spektralbereich teilweise stark gedämpft wird [BG10]. Für die meisten Thermografieanwendungen ist die Atmosphäre die

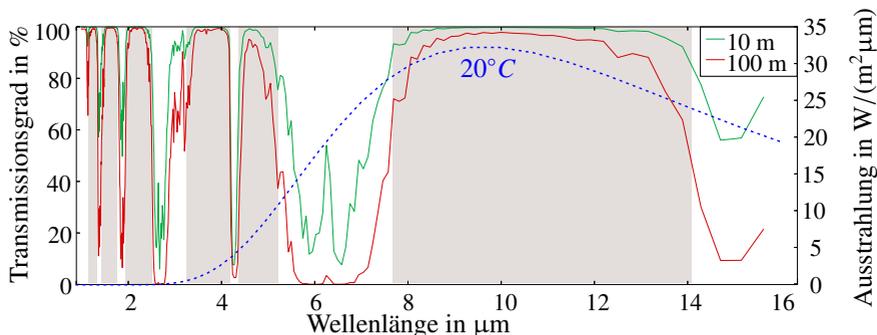


Abb. 2.12: Die Transmission der Atmosphäre. Die grüne und rote Kennlinie zeigen die prozentuale Durchlässigkeit der Atmosphäre im infraroten Spektralbereich für eine Übertragungsstrecke von 10 m und 100 m durch eine mitteleuropäische Atmosphäre im Sommer in Erdoberflächennähe. Die blaue Kurve zeigt die Ausstrahlung eines Schwarzkörpers mit 20 °C.

natürliche Übertragungsstrecke. In diesen Fällen kann nur in ausgewählten Wellenlängenbereichen, den atmosphärischen Fenstern, gearbeitet werden (grau gezeichnete Bereiche in Abb. 2.12). Im Wellenlängenbereich zwischen 5 und 8 μm befindet sich der Bereich bei dem der Wasserdampf einen Großteil der Strahlung absorbiert. In Abb. 2.12 erkennt man bei diesem Bereich deutlich, dass die Transmission bei 10 m Übertragungsstrecke weniger gedämpft ist als bei 100 m. In der Abbildung ist außerdem in blau gestrichelt die Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers mit 20 °C eingezeichnet. Das Maximum dieser Kurve befindet sich im langwelligen atmosphärischen Fenster.

2.2.4 Thermaldetektoren

Ein Thermaldetektor wandelt Infrarotstrahlung in elektrische Signale um und stellt damit die Kernkomponente eines bildgebenden Infrarotsystems dar. Thermaldetektoren können in zwei Gruppen eingeteilt werden: photoelektrische bzw. Quantendetektoren und thermoelektrische Detektoren. Sie unterscheiden sich in ihrem Wirkprinzip [BG10] (siehe Abb. 2.13). Bei einem thermoelektrischen Strahlungsdetektor wird auftreffende Strahlung absorbiert, was zu einer Temperaturänderung führt. Diese bewirkt die Änderung einer elektrischen Größe (z. B. Leitfähigkeit), die dann an einem Detektorelement (DE) gemessen wird. Beim photoelektrischen Strahlungsdetektor löst die auftreffende Strahlung direkt Elektronen aus dem Valenzband des Halbleiterdetektors und erzeugen dadurch elektrische Ladungsträger. Dieser Effekt wird innerer Fotoeffekt genannt.

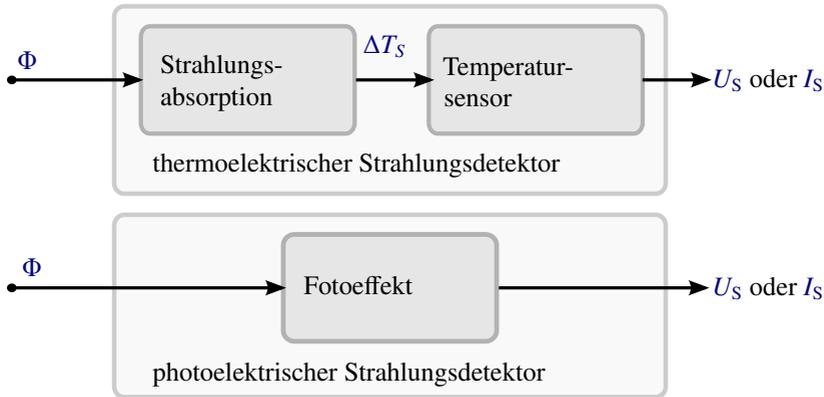


Abb. 2.13: Wirkprinzip von thermoelektrischen und photoelektrischen Strahlungsdetektoren [BG10].

Die Empfindlichkeit von photoelektrischen Detektoren ist stark wellenlängenabhängig. Thermalkameras mit dieser Art von Detektoren sind normalerweise gekühlt, da dadurch die Empfindlichkeit deutlich erhöht wird. Diese Kameras können für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen verwendet werden, da der Fotoeffekt unmittelbar bei Strahlungsempfang eine erhöhte Leitfähigkeit verursacht. Im Vergleich zu ungekühlten Kameras sind sie deutlich teurer und schwerer.

Thermoelektrische Strahlungsdetektoren können bei Raumtemperatur betrieben werden. Die bekanntesten Vertreter der thermoelektrischen Strahlungssensoren sind Thermopiles, pyroelektrische Sensoren und Mikrobolometer. Thermopiles bestehen aus mehreren Thermoelementen, die den Seebeck-Effekt nutzen. Eine bekannte Anwendung sind Ohrthermometer. Die pyroelektrischen Sensoren detektieren ausschließlich zeitlich sich ändernde Signale, weshalb sie auch häufig in Bewegungsmeldern Anwendung finden. Mikrobolometer sind miniaturisierte temperaturempfindliche Widerstände, die als zweidimensionales Array in der Fokalebene einer Thermalkamera angebracht sind.

Da ungekühlte Thermalkameras heutzutage fast ausschließlich auf Mikrobolometer Focal Plane Arrays (FPA) basieren, wird im Folgenden nur noch auf die Mikrobolometer-Technologie eingegangen.

2.2.5 Mikrobolometer

Abb. 2.14 zeigt den schematischen Aufbau eines Elementes von einem Mikrobolometer Focal Plane Array. Das Element besteht aus einem sehr dünnen Material mit stark temperaturabhängigem Widerstand. In der Regel handelt es sich dabei um amorphes Silizium ($a\text{-Si}$) oder Vanadiumoxid (VO_x). Um die notwendige thermische Isolation zu erreichen, befindet sich dieses Material im Vakuum und wird als Mikrobrücke gefertigt. Typischerweise liegt die Abmessung der Fläche eines solchen Elements zwischen $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ und $55 \times 55 \mu\text{m}^2$.

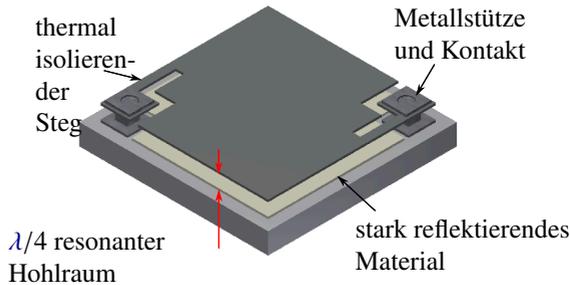


Abb. 2.14: Schematischer Aufbau eines Mikrobolometer Pixels.

Der Bolometerwiderstand wird beim Fertigungsprozess auf eine Membran abgeschieden, die als Trägerschicht dient. Zur thermischen Isolierung gegenüber der Umgebung wird die Membran durch zwei Stützen gehalten, die außerdem den elektrischen Kontakt zwischen Bolometer und Auswertelektronik herstellen. Die Dicke der Brücke liegt bei einigen 100 nm. Die Stege, die die Stützen mit der Widerstandsfläche verbinden, tragen ebenfalls zur thermischen Isolation bei. Der Abstand der Brücke zur Chipoberfläche bzw. zur Reflektorschicht beträgt ca. $2,5 \mu\text{m}$. Damit wird ein optischer Resonator ($\lambda/4$ -Absorber) erzeugt, der die IR-Strahlung bei $10 \mu\text{m}$ absorbiert. Im Siliziumschaltkreis unter der Brücke befindet sich die Ausleseelektronik [BG10].

Mit Hilfe von Kenngrößen können die Eigenschaften von Thermalkameras beschrieben werden. Man kann sie in drei Kategorien einteilen. Sie beschreiben entweder die zeitliche, die thermische oder die geometrische Auflösung. Die zeitliche Auflösung wird von der thermalen Zeitkonstante τ_{th} begrenzt. Eine sprunghafte Änderung des einfallenden Strahlungsflusses erzeugt eine exponentielle Temperaturänderung beim Mikrobolometer, die von der thermalen Zeitkonstante τ_{th} abhängt. Sie ist gegeben durch:

$$\tau_{\text{th}} = \frac{C_{\text{th}}}{G_{\text{th}}}. \quad (2.7)$$

C_{th} ist dabei die thermale Masse und G_{th} die thermale Leitfähigkeit. Die hängen wiederum vom Aufbau und dem Material des Bolometers ab. Die Integrationszeit einer Mikrobolometer-basierten Thermalkamera wird maßgeblich von der thermalen Zeitkonstante τ_{th} bestimmt. Typische Werte für die Integrationszeit sind ca. 15 ms für ein Vanadiumoxid-FPA und ca. 7 ms für ein FPA aus amorphem Silizium.

Die Spannungsempfindlichkeit R_V ist eine thermische Kenngröße. Sie beschreibt die Änderung der Mikrobolometer-Ausgangsspannung U_{MB} infolge einer Änderung des eintreffenden Strahlungsflusses Φ :

$$R_V = \frac{\Delta U_{MB}}{\Delta \Phi}. \tag{2.8}$$

Aufgrund des Umfangs und ihrer Bedeutung werden die geometrischen Kenngrößen in einem eigenen Kapitel (2.3) behandelt.

2.2.6 Radiometrische Eigenschaften einer Thermalkamera

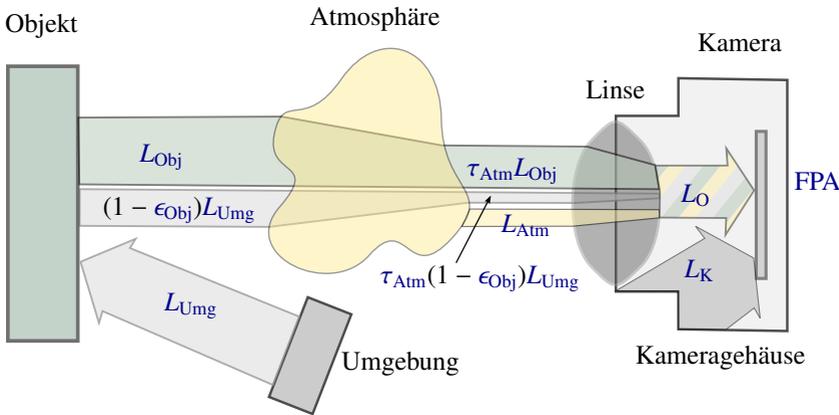


Abb. 2.15: Strahlungsanteile, die auf das FPA der Thermalkamera treffen.

Die Abb. 2.15 zeigt schematisch, welche Strahlungsanteile auf das FPA der Kamera treffen. Den größten Anteil hat das Kameragehäuse. Die Strahldichte L_O ist das Äquivalent aller vom FPA durch die Linse „gesehenen“ Strahldichten, und setzt sich wie folgt zusammen:

$$L_O = \tau_{Lin} \tau_{Atm} L_{Obj} + \tau_{Lin} \tau_{Atm} (1 - \epsilon_{Obj}) L_{Umg} + \tau_{Lin} L_{Atm}, \tag{2.9}$$

mit τ_{Lin} und τ_{Atm} als Transmissionsgrade der Linse und der Atmosphäre, dem Emissionsgrad ϵ_{Obj} des Objekts und den Strahldichten L_{Obj} des Objekts, L_{Umg} der Umgebung und L_{Atm} der Atmosphäre.

Bei Mikrobolometer-basierten Thermalkameras verursacht die Änderung der Kameragehäusetemperatur einen besonders großen radiometrischen Fehler [BG10].

2.3 Georeferenzierung

Die Georeferenzierung versucht, den Raumbezug zwischen den erfassten Bilddaten einer Kamera und der Szene wieder herzustellen. Eine geeignete Transformation muss gefunden werden, die die Bildkoordinaten in das übergeordnete Weltkoordinatensystem überführt. Mit Hilfe der Georeferenzierung wird die Position und Lage der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt.

Das klassische Verfahren in der Photogrammetrie versucht auf indirektem Weg durch Passpunkte, die Lage und Position der Kamera nachträglich zu schätzen. Durch die Aerotriangulation können auch Bilder in einem Bildverbund georeferenziert werden, die keine Passpunkte enthalten. Es können dadurch Strecken von mehreren Kilometern ohne Passpunkte überbrückt werden. Das Standardverfahren der Aerotriangulation ist die sogenannte Bündelblockausgleichung. Mit ihr kann die betrachtete Szene dreidimensional rekonstruiert werden. Darüber hinaus wird die äußere und auch die innere Orientierung der Kamera geschätzt. Die äußere Orientierung beschreibt die Lage und Position der Kamera während der Aufnahme bezogen auf den Aufnahmegegenstand selbst. Die innere Orientierung beschreibt die Position des Projektionszentrums der Kamera bezogen auf die Bildebene. Die äußere und innere Orientierung der Kamera sind nötig, um den Raumbezug eines Bildes wieder herzustellen. Wenn die äußere Orientierung nicht indirekt über ein Verfahren wie der Aerotriangulation, sondern durch Lage-, Positionsmessung der Kamera bestimmt wird, spricht man von der direkten Georeferenzierung [Cra01].

2.3.1 Optik

Das Blickfeld (engl.: Field of View, **FOV**) einer Kamera wird durch ihre Optik und das Detektorarray bestimmt. Das Blickfeld eines Detektorelements wird als **IFOV** (instantaneous Field of View) bezeichnet. Bei einer kollinearen Abbildung ist das gegenstandsseitige **IFOV** α_{IFOV} identisch zum bildseitigen Winkel α_s . Im Paraxialgebiet (in der Nähe der optischen Achse) kann näherungsweise eine kollineare Abbildung angenommen werden. Gewöhnlich ist die Höhe des Detektorarrays ungleich der Breite des Detektorarrays. Dies führt dazu, dass das horizontale **FOV**

auch ungleich dem vertikalen FOV ist. Abb. 2.16 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Sensorhöhe h_s , Kamerakonstante c_k und vertikalen Bildwinkel α_v .

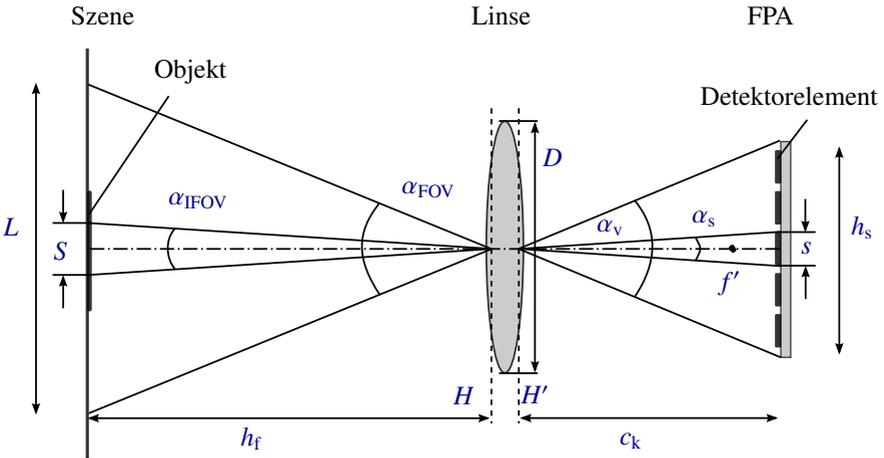


Abb. 2.16: Optisch-geometrische Beziehungen einer Kamera.

- α_{FOV} : Kameraöffnungswinkel
- α_{IFOV} : Pixelöffnungswinkel
- c_k : Kamerakonstante (Bildweite)
- D : Durchmesser der Blende
- f' : Bildseitiger Brennpunkt
- h_f : Abstand Szene-Optik
- h_s : Seitenlänge des Sensors
- H, H' : Hauptebenen
- L : Größe der Szene
- s : Seitenlänge eines Detektorelements
- S : Abdeckung eines Pixels am Objekt (Bodenauflösung)

Tabelle 2.1: Bezeichnungen der Optik-Komponenten.

Die Kamerakonstante c_k entspricht bei Einstellung des Objektivs auf „unendlich“ der Brennweite f . Die Brennweite

$$f \approx \frac{r}{\tan(\frac{\alpha}{2})} \tag{2.10}$$

mit $r = h_s/2$ und $\alpha = \alpha_v$.

Die Blendenzahl

$$k = \frac{f}{D}. \quad (2.11)$$

Der Kehrwert der Blendenzahl $1/k$ beschreibt die Lichtstärke des Objektivs. Der **IFOV** des Zentralpixels ist gegeben durch:

$$\alpha_{\text{IFOV}} = 2 \arctan\left(\frac{s}{2c_k}\right) \quad (2.12)$$

mit der Pixelseitenlänge s . Wenn der Boden die Szene darstellt und das **FPA** parallel dazu angeordnet ist, dann gilt unter Vernachlässigung der Abbildungsfehler für die Bodenauflösung eines Pixels

$$S = \frac{h_f \cdot s}{c_k}. \quad (2.13)$$

Für das Blickfeld α_{FOV} der Kamera gilt in grober Näherung

$$\alpha_{\text{FOV}} \approx 2 \arctan\left(\frac{h_s}{2c_k}\right) \quad (2.14)$$

2.3.2 Modulationsübertragungsfunktion

Die Modulationsübertragungsfunktion (engl. *Modulation Transfer Function*, **MTF**) ist eine geometrische Kenngröße von optisch abbildenden Systemen. Sie ist die normierte ortsfrequenzabhängige Empfindlichkeit und beschreibt quantitativ die Abbildungsqualität. Einfluss auf die **MTF** haben beispielsweise die Bildfeldwölbung, sphärische Aberration, eine beugungsbegrenzte Optik, die geometrische Ausdehnung der Detektorelemente, und das thermische Übersprechen des Signals eines Pixels auf das Nachbarpixel [BG10].

Die **MTF** ist der Betrag der Fouriertransformierten der Linienbildfunktion **LSF** (engl.: *Line Spread Function*):

$$\text{MTF}(f) := |\mathcal{F}\{\text{LSF}(\dot{x})\}| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \text{LSF}(\dot{x}) e^{-i2\pi f \dot{x}} d\dot{x} \right|, \quad (2.15)$$

mit \dot{x} als Horizontalposition auf dem Sensor und f als dessen Ortsfrequenz [WB89]. Die **LSF** ist die Abbildung eines unendlich schmalen Spaltes auf dem Sensorarray einer Kamera. Aufgrund des diskreten Pixelabstandes von digitalen Sensorarrays kann die **LSF** mit einer einzigen Abbildung nicht ausreichend gut gemessen werden. Deshalb wird üblicherweise zur Messung der **LSF** ein schmaler Spalt in sehr kleinen Schritten über ein Pixel hinweg bewegt und jeweils die Intensität des Pixels gemessen. Dadurch kann die **LSF** in hoher Auflösung gemessen werden [Fuj+92].

2.3.3 Innere Orientierung

Das Bild einer Kamera ist die Zentralprojektion vom dreidimensionalen Raum auf eine zweidimensionale Ebene (den Sensorchip). Bei einer Thermalkamera ist diese das **FPA**.

Verzeichnungsfreies Kameramodell

Das einfachste Modell für die Transformation vom dreidimensionalen Raum auf das zweidimensionale Bild ist die Lochkamera. Sie besteht aus einem lichtdichten Hohlkörper mit einer sehr kleinen Öffnung (der Lochblende) und einem lichtempfindlichen Film oder einem Bildsensor. Das Besondere an ihr ist, dass sie keine Linse besitzt und deshalb auch keine linsenbedingten Abbildungsfehler entstehen.

Die Projektion eines 3D-Punktes $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^3$ auf ein Bild einer Lochkamera kann mit den homogenen Koordinaten $\bar{\mathbf{X}} = [X, Y, Z, W]^T \in \mathbb{P}^3$ mit der Gleichung

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\bar{\mathbf{X}} \quad (2.16)$$

beschrieben werden, wobei der Bildpunkt $\bar{\mathbf{x}}$ die projektiven Koordinaten $[x, y, w]^T \in \mathbb{P}^2$ besitzt. \mathbf{P} ist die 3×4 Kameraprojektionsmatrix mit

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R}^T | -\mathbf{R}^T\bar{\mathbf{C}}]. \quad (2.17)$$

Die Rotationsmatrix \mathbf{R} und der Vektor $\bar{\mathbf{C}} \in \mathbb{R}^3$ stellen die euklidische Transformation zwischen der Kamera und dem übergeordneten Koordinatensystem dar. Diese Parameter werden extrinsische Kameraparameter genannt. Die Kamerakalibriermatrix

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s_{xy} & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

enthält die intrinsischen Parameter der Kamera. Dabei sind f_x und f_y die Bildweiten in x- bzw. y-Richtung, angegeben in Pixeleinheiten. s_{xy} ist ein Scherungsparameter, der den Winkel zwischen den Zeilen und Spalten des Kamerasensorarrays modelliert. Der Zentralpunkt der Kamera liegt bei $[c_x, c_y]^T$ (in Pixelkoordinaten).

Das Modell der Lochkamera kann nur bei abbildungsfehlerfreien Linsen verwendet werden. Reale Linsen weisen üblicherweise verschiedene Abbildungsfehler auf, wobei die radiale Verzeichnung die größte Rolle spielt [HZ03].

Kameramodell mit Verzeichnung

Das meist verwendete Kameramodell mit Linse, das sowohl radiale als auch tangentiale Verzeichnungen berücksichtigt stammt von Duane C. Brown [Bro71]. Die Projektion eines 3D-Punktes $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ auf das Bild einer Kamera kann mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$x' = \hat{x}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2\hat{x}^2) + 2p_1 \hat{x} \hat{y} \quad (2.19)$$

$$y' = \hat{y}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2\hat{y}^2) + 2p_2 \hat{x} \hat{y} \quad (2.20)$$

$$x = c_x + x' f_x + y' s_{xy} \quad (2.21)$$

$$y = c_y + y' f_y \quad (2.22)$$

mit $\hat{x} = X/Z$, $\hat{y} = Y/Z$ und $r = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2}$ [Bro71]. Dabei sind X, Y und Z die Punktkoordinaten im lokalen Kamerakoordinatensystem, x und y die projizierten Punktkoordinaten auf dem Bildkoordinatensystem (in Pixel), k_1 , k_2 und k_3 die radialen Verzeichnungskoeffizienten, p_1 und p_2 die tangentialen Verzeichnungskoeffizienten und s der schiefsymmetrische Koeffizient zwischen der x- und y-Achse.

2.3.4 Äußere Orientierung

In der klassischen Photogrammetrie findet man die folgende Grundgleichung zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Objektraum und Bildraum [Kra04].

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\mathbf{w}} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\mathbf{w}} + \bar{\lambda} \mathbf{R}_{\mathbf{k}}^{\mathbf{w}}(\omega, \varphi, \kappa) \begin{pmatrix} (x - c_x) \\ (y - c_y) \\ -c_k \end{pmatrix}_{\mathbf{k}}, \quad (2.23)$$

mit dem Maßstabsfaktor $\bar{\lambda}$ und der Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{\mathbf{k}}^{\mathbf{w}}$, die vom Kamera- (Index \mathbf{k}) in das Weltkoordinatensystem (Index \mathbf{w}) transformiert. Der Index 0 steht für den Ursprung des Koordinatensystems.

Durch Umformung erhält man die bekannte Form der sogenannten Kollinearitätsgleichung (2.24). Die Division der Gleichungen für X und Y in 2.23 mit der Gleichung für Z führt dazu, dass der Maßstabsfaktor $\bar{\lambda}$ entfällt.

$$x = c_x - c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}, \quad (2.24)$$

$$y = c_y - c_k \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Unter Berücksichtigung der Einbauposition und -winkel der Kamera und der Sensoren zur Positions- und Lagemessung kann nach [Cra01] mit folgender Gleichung die direkte Georeferenzierung von Kamerabildern beschrieben werden.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_w = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_w + \mathbf{R}_u^w \left(\bar{\lambda} \cdot \mathbf{R}_k^u \begin{pmatrix} x - c_x \\ y - c_y \\ -c_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X_C \\ \Delta Y_C \\ \Delta Z_C \end{pmatrix}_u - \begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix}_u \right), \quad (2.25)$$

dabei bedeuten die noch unbeschriebenen Terme Folgendes:

$\begin{pmatrix} \Delta X_C \\ \Delta Y_C \\ \Delta Z_C \end{pmatrix}_u$ Räumliche Verschiebung zwischen dem Ursprung des Koordinatensystem **u** der Flugplattform und dem Projektionszentrum der Kamera, bezogen auf das Koordinatensystem der Flugplattform (Index **u**).

$\begin{pmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{pmatrix}_u$ Räumliche Verschiebung zwischen dem Ursprung des Koordinatensystems **u** und der GPS-Antenne, bezogen auf das Koordinatensystem **u**.

\mathbf{R}_u^w Rotation vom Koordinatensystem **u** in das übergeordnete Weltkoordinatensystem **w**

\mathbf{R}_k^u Rotation vom Koordinatensystem **k** der Kamera in das Koordinatensystem **u** der Flugplattform

2.3.5 Geometrische Kalibrierung

Jede Kamera besitzt systembedingte und fertigungsbedingte Abbildungsfehler. Für eine geometrische Vermessung von Objekten auf den Bildern verursachen Lagefehler wie die Verzeichnung in der Regel die größten Fehler. Die optische Achse verläuft selten durch den Bildmittelpunkt der Kamera. Solche Lagefehler sind oft fertigungsbedingt für jede Kamera unterschiedlich. Diese kamerainterne Lageabweichung wird innere Orientierung genannt. Die äußere Orientierung hingegen bezeichnet die Lage und Ausrichtung der gesamten Kamera im absoluten Koordinatensystem. Mit einer geometrischen Kalibrierung können die individuellen Abweichungen einer Kamera ermittelt und berücksichtigt werden. Damit kann die Genauigkeit einer geometrischen Vermessung von Objekten auf den Bildern erhöht werden.

Die geometrische Kalibrierung kann man in folgende drei Fälle unterscheiden:

- Laborkalibrierung, bei der bestimmte Detektorelemente einzeln angestrahlt werden. Es wird dabei jeweils der Einfallswinkel in horizontaler und vertikaler Richtung gemessen. Eine Laborkalibrierung ist nur mit speziellem Equipment durchführbar. Man benötigt eine Strahlungsquelle, die im Abstand der fokussierten Gegenstandsweite aufgestellt ist, oder einen Kollimator für eine auf unendlich fokussierte Optik, und ein zweiachsiges Goniometer, mit dem Winkel in hoher Präzision gemessen werden können.
- Testfeldkalibrierung. Auf einem Testfeld befinden sich Passpunkte mit bekannten Ortskoordinaten (X , Y und Z). Nach Ermittlung der x,y -Bildkoordinaten kann über die Gleichungen der Zentralprojektion die äußere und innere Orientierung der Kamera ermittelt werden [Kra04].
- Selbstkalibrierung. Hierbei werden die Parameter der inneren Orientierung während der Messaufgabe ermittelt. Dies geschieht in der Regel über einen Bündelblockausgleich.

Testfeldkalibrierung Die Testfeldkalibrierung ist aufgrund ihrer Einfachheit und der geringen Investitionskosten gegenüber der Laborkalibrierung das bevorzugte Verfahren. In diesem Abschnitt wird die Testfeldkalibrierung für Thermalkameras vorgestellt. Zwei unterschiedlich große Testfelder wurden für den Einsatz des fliegenden Wildretters untersucht.

Damit die Kalibrierung mit einem Testfeld erfolgreich verläuft, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Das Testmuster muss auf dem Bild scharfe Kanten aufweisen, damit die Passpunkte geometrisch eindeutig sind [OH04].
- die exakt relative Position der Passpunkte in allen drei Raumrichtungen muss bekannt sein. Im Falle eines auf Papier gedruckten Testfeldes muss das Papier eben sein. Selbst kleine Abweichungen machen sich bemerkbar [Zha99].
- Der Blickwinkel muss variieren. Es gibt kritische Kamerablickwinkel, bei denen eine Kalibrierung unmöglich ist [Stu97].

Die Testfeldkalibrierung ist für Farbkameras auch ohne spezielles Equipment möglich. Ein Schachbrettmuster, das mit einem Laserdrucker ausgedruckt wurde, ist ausreichend genau. Es gibt außerdem Kalibriersoftware [Agi], bei der ein Kalibriermuster auf dem Bildschirm angezeigt wird. Im Gegensatz zu früheren Röhrenmonitoren weisen die heutigen LCD-Monitore keine Verzeichnung auf und eignen sich deshalb ebenso gut zur Darstellung eines Kalibrierfeldes wie ein Ausdruck. Für Thermalkameras kann das Bildschirmverfahren nicht angewendet werden, da

beim Bildschirm zwischen den schwarzen und weißen Kacheln kein Wärmeunterschied entsteht. Ein ausgedrucktes Schachbrettmuster kann allerdings verwendet werden, wenn es durch Infrarotstrahlung erwärmt wird. Die Autoren in [CPT05] und [Pra+06] verwenden dazu einen Flutlichtstrahler. Unbefriedigende Ergebnisse erhielten die Autoren in [VL12] mit dieser Methode, weshalb sie ein alternatives Testfeld für eine Thermalkamerakalibrierung entworfen haben. Auch in [KD13] wird ein eigenes Testfeld für eine Thermalkamerakalibrierung vorgestellt. Beide wurden nicht maschinell, sondern von Hand gefertigt. Bei der geometrischen Kalibrierung mit einem planen Testfeld dürfen die Passpunkte ihren Abstand zueinander nicht verändern. Die gängigen Algorithmen zur Passpunktfindung nehmen keine Unterscheidung der Messpunkte vor, da man davon ausgeht, dass bei dem Muster die Passpunkte äquidistant verteilt sind. Es kann leicht passieren, dass ein Passpunkt auf einem Bild einem anderen Passpunkt auf dem nächsten Bild zugeordnet wird. Wenn die Abstände aller Passpunkte zueinander nicht identisch sind, kann das zu Kalibrierfehlern führen. Man kann davon ausgehen, dass die Passpunktabstandsabweichungen bei einem maschinell gefertigten Testfeld um eine Größenordnung kleiner sind als bei einem von Hand gefertigten Testfeld.

2.3.6 Georeferenzierung bei unbemannten Flugsystemen

Heutzutage werden UAVs immer häufiger für Vermessungsaufgaben eingesetzt [CM14]. Gemeinsam mit der Sensor- oder Kameranutzlast samt Aufzeichnungselektronik werden diese UAVs auch unbemannten Flugsysteme (UAS, engl. *unmanned aerial systems*) genannt. Für eine genaue Vermessung werden die Bilder mit einer Photogrammetriesoftware prozessiert [Eis09]. Auf Basis einer Bündelblockausgleichung können so aus den Daten Orthophotos, Höhenmodelle oder dreidimensionale Rekonstruktionen der Szene erzeugt werden. Die Berechnung einer Szene, die mit dem UAS aufgenommen wurde, kann mit einem modernen PC mehrere Stunden dauern.

Die direkte Georeferenzierung kommt für viele Photogrammetrieanwendungen aufgrund der geringen Positions- und Lagegenauigkeit von UAS nicht in Frage. In [Blá+11] wird die Positioniergenauigkeit eines UAVs ermittelt, indem mit einem stationären Vermessungssystem die Position des UAVs mittels direkter Georeferenzierung vermessen wird. Die gemessenen Daten wurden mit den intern aufgezeichneten Daten des UAVs verglichen.

In einer Diplomarbeit [Gli12] wurde an der direkten Georeferenzierung von Bildern eines UAVs gearbeitet. Es wurde die verwendete Kamera mit einem Testfeld geometrisch kalibriert und Untersuchungen zu den vom System gemessenen Lagewinkeln unternommen.

Es gibt eine Veröffentlichung über die indirekte Georeferenzierung von Thermalbildern von einem UAV [Har+12]. Die verwendete Thermalkamera wurde mit einem Aluminium-Testfeld geometrisch kalibriert. Es konnte gezeigt werden, dass die indirekte Georeferenzierung mittels einer Bündelblockausgleichung bei Thermalbildern funktioniert.

3 Das System Fliegender Wildretter

Fliegender Wildretter ist der Name des entwickelten **UAV**-basierten Systems zur Rehkitzsuche. Es besteht aus einem Multikopter samt Bedieneinheit, einer Thermalkamera mit Datenerfassungselektronik und mehreren Softwarekomponenten. Abb. 3.1 zeigt eine Version des Fliegenden Wildretters aus dem Jahr 2012.



Abb. 3.1: Der Fliegende Wildretter mit einer Thermalkamera und drei **CMOS**-Kameras.

In diesem Kapitel wird zunächst das erarbeitete Konzept vorgestellt, wie man mit einem **UAV**-basierten System möglichst effizient Rehkitze finden kann. Mehrere Suchstrategien werden aufgezeigt. Jede Strategie hat ihre Stärken und Schwächen. Es werden Optimierungsziele erarbeitet und dabei jene identifiziert, die für das System aus Anwendersicht am wichtigsten sind. Auf diese Ziele wird schließlich

das System hin optimiert. Rehkitze werden fast ausschließlich zwischen Mitte Mai und Mitte Juni geboren. Nur in dieser Zeit kann das System unter realen Bedingungen getestet werden. Damit das System in jedem Jahr eingesetzt werden kann, wird es vom einfachen aber wenig effizienten zu einem präzisen System mit hoher Flächenleistung stufenweise ausgebaut. Es folgt ein Abschnitt über die verwendete Hardware. Neben dem Fluggerät und der Kamera spielt speziell das Kameraobjektiv eine wichtige Rolle für die Effizienz des Systems. Die Art und Weise, wie das Fluggerät über die Fläche geführt wird hat ebenfalls großen Einfluss auf die Effizienz des Systems, deshalb wird erläutert, was bei der wegpunktbasierten Navigation zu berücksichtigen ist. Danach folgen mehrere Abschnitte über die entwickelten Softwarepakete zur Flugplanung, Flugsteuerung und Auswertung der Bild- und Metadaten. Anhand verschiedener Datensätze wird das System evaluiert. Viele Entscheidungen bei der Optimierung des Systems bedingen sich gegenseitig, deshalb werden bei der Evaluation einige Ergebnisse aus späteren Kapiteln vorgegriffen.

3.1 Konzept

3.1.1 Suchstrategien

Es gibt mehrere Möglichkeiten, eine Wiesenfläche mit einem Thermalkamera-bestückten Multikopter systematisch nach Kitzen abzusuchen. Vier Varianten werden hier genauer betrachtet.

Die erste und einfachste ist **Suchstrategie I**: Das Fluggerät fliegt auf einer Flughöhe, bei der der Pilot oder eine andere Person Rehkitze auf einem Live-Video-Monitor detektieren kann. Bei jeder Fundstelle wird das Fluggerät abgesenkt, um diese genauer zu betrachten. Falls es sich tatsächlich um ein Kitz handelt, geht unmittelbar jemand zu der Stelle, über der der Kopter schwebt und nimmt das Kitz in Gewahrsam. Diese Suchstrategie stellt die geringsten Anforderungen an die Hardware. Es wird lediglich ein Multikopter, eine Wärmebildkamera und ein Videodownloadlink benötigt. Allerdings ist dieses Verfahren sehr zeitaufwändig.

Die **Suchstrategie II** ähnelt der ersten. Das Fluggerät fliegt so hoch, dass die Kitze auf dem Videomonitor detektiert werden können. Die **GPS**-Positionen der Fundstellen werden gespeichert und können nach dem Flug per **Handheld-GPS**-Gerät wieder aufgesucht werden. Die benötigte Flugdauer ist wesentlich geringer als bei Suchstrategie I. Das Wiederfinden mit dem **Handheld-GPS**-Gerät dauert in der Regel länger, als die Suchstrategie I, bei der der Kopter über der Fundstelle schwebt. Wenn das Kitz zwischenzeitlich die Position wechselt, kann es vorkommen, dass es nicht mehr gefunden wird. Bei dieser Suchstrategie wird zusätzlich ein Hand-

held-GPS-Gerät und die Möglichkeit der Speicherung von Fluggerätespositionen benötigt. Bei Benutzung einer Wegpunkt-Software ist dieses Feature in der Regel integriert.

Die **Suchstrategie III** besteht darin, die Fläche aus einer Flughöhe zu beobachten, in der auf den Rohbildern der Thermalkamera die Kitze gerade noch detektiert werden können, aber noch keines übersehen wird. Nach dem Überflug werden die Bilder analysiert und die Fundstellen georeferenziert. Die Fundstellen werden dann alle mit Hilfe eines Handheld-GPS-Gerätes zu Fuß aufgesucht. Hierfür ist ein spezielles Rechnersystem an Bord des UAVs nötig, das die Fluglage- und Positionsdaten zusammen mit den Rohbildern der Thermalkamera abspeichert. Das Fluggerät muss die Lage- und Positionsdaten auf der Nutzlast bereitstellen. Für die Auswertung der Daten nach dem Flug ist eine spezielle Software nötig.

Die **Suchstrategie IV** besteht darin, auf der selben Flughöhe zu fliegen wie bei der Suchstrategie III, jedoch die Fundstellen während dem Flug automatisch auszuwerten. Die Fundstellen werden bei Bedarf auf niedrigerer Flughöhe erneut angefliegen und analysiert. Durch den kürzeren Abstand erhöht sich die Detektionszuverlässigkeit und auch die Genauigkeit der Georeferenzierung. Allerdings benötigt die Suchstrategie IV bei erneutem Fundstellenanflug erheblich mehr Flugzeit und ein integriertes Auswertesystem an Bord des Fluggerätes. Dafür dauert das Aufsuchen der Fundstellen zu Fuß weniger lang, da die Fehlalarmrate geringer ist und der benötigte Suchradius um die Fundstellen kleiner ist. Diese Suchstrategie stellt die größten Anforderungen an die Hard- und Software. Es muss wie bei Suchstrategie III ein Rechnersystem an Bord des UAVs die Fluglage- und Positionsdaten gemeinsam mit den Rohbildern abspeichern. Zusätzlich müssen diese Daten in Echtzeit automatisch analysiert werden. Es müssen daraufhin Wegpunkte generiert werden, die das Fluggerät dann selbstständig anfliegt um wieder Bilder – diesmal auf niedrigerer Flughöhe – aufzunehmen, zu analysieren und erneut entscheiden, ob dies eine relevante Fundstelle ist. Das Fluggerät muss zusätzlich eine Schnittstelle bereitstellen, über die Wegpunktkommandos von der Nutzlast aus abgesetzt werden können.

3.1.2 Prozessschritte

Bei allen vier Suchstrategievarianten kann man den gesamten Prozess des Rehkitz Rettens in folgende vier Prozessschritte unterteilen:

1. **Vorbereitung.** Dazu zählt die Flugplanung, die Inbetriebnahme des Fluggeräts und der Software und sonstige Maßnahmen die vor dem Einsatz erfolgen müssen.

2. **Flug.** Vom Start bis zur Landung des Fluggeräts.
3. **Detektion und Verortung.** Automatische oder visuelle Detektion (durch den Benutzer) und die Positionsschätzung der Fundstelle.
4. **Fundstelle aufsuchen.** Da im Anschluss gemäht wird, muss das Kitz in Sicherheit gebracht werden. Dazu muss jemand zur Fundstelle gehen. Eine falsch positive Fundstelle kann hiermit gefunden werden.

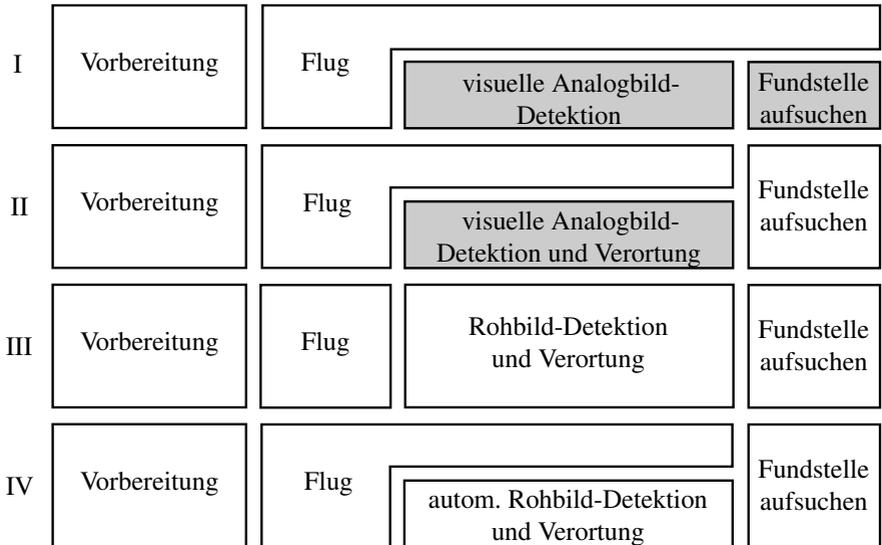


Abb. 3.2: Die vier unterschiedlichen Suchstrategien.

Abb. 3.2 zeigt ein Diagramm mit den Prozessschritten der vier Suchstrategien. Bei Suchstrategie I ganz oben bleibt das Fluggerät während der Detektion und dem Aufsuchen der Fundstelle in der Luft. Darunter (ab Suchstrategie II) wird durch eine Verortung erreicht, dass das Aufsuchen der Fundstelle nach dem Flug stattfinden kann. Die Suchstrategie III minimiert die Flugphase. Dadurch wird die Flächenleistung pro Akkuladung maximiert. Ganz unten ist die Suchstrategie IV dargestellt. Die Komplexität und die Automatisierung nimmt bei den Suchstrategien von oben nach unten zu. Die ersten beiden Suchstrategien erfordern mindestens eine weitere Person (grau markiert in Abb. 3.2). Die letzten beiden Suchstrategien kann eine Person alleine durchführen. Suchstrategie III ermöglicht durch die kürzeste Flugphase die größte Fläche pro Akkuladung abzufliegen.

3.1.3 Optimierungsziele

Ein System zur Rehkitz-Rettung kann in verschiedene Richtungen hin optimiert werden. Das Diagramm in Abb. 3.3 zeigt einige Optimierungsziele, die nach den Kategorien Benutzerfreundlichkeit, Zuverlässigkeit, Leistung und Kosten sortiert sind. Das wichtigste Optimierungsziel ist ein hoher *Recall*-Wert. Er gibt Auskunft

Benutzerfreundlichkeit	Zuverlässigkeit	Leistung	Kosten
Einlernzeit	<i>Precision</i> (Relevanz)	Modularität (verschiedene UAVs)	Kaufpreis
Benutzeroberfläche	<i>Recall</i> (Empfindlichkeit)	Flächenleistung	Personalzeit
Automatisierungsgrad		Georeferenzierungspräzision	

Abb. 3.3: Auswahl an Optimierungszielen für das System Fliegender Wildretter.

über das Verhältnis gefundener Kitzte zu übersehenen Kitzen. Erst danach ordnen sich alle anderen Optimierungsziele ein. Die *Precision* gibt Auskunft über das Verhältnis der tatsächlichen Kitzte zu Fehlalarmen unter den ausgewählten Fundstellen. Der Flächenleistung kann eine besondere Rolle zugesprochen werden. Sie bezieht sich nicht nur auf die Flugzeit, sondern auf den Gesamtprozess der Rehkitz-Rettung. Sie vereint viele der genannten Optimierungsziele in einer Kennzahl. Beispielsweise führt eine Erhöhung der *Precision* automatisch zu einer höheren Flächenleistung. Ebenso ist es mit der Georeferenzierungspräzision. Je höher diese ist, um so weniger Zeit muss eine Person in der Wiese mit dem Aufsuchen der Fundstelle verbringen und damit erhöht sich die Flächenleistung. Umgekehrt bedeutet eine höhere Flächenleistung eine geringere Personalzeit pro Fläche.

Für einen UAV-Dienstleister, der die Anwendung Fliegender Wildretter in sein Portfolio aufnehmen möchte, ist die Flächenleistung der wichtigste Parameter. Er wird seine Dienstleistung entweder nach Zeit oder nach Fläche abrechnen. Beides sind Größen die sich in der Flächenleistung wiederfinden. Je höher sie ist, umso mehr ist ein Kunde bereit für die Leistung zu zahlen. Die Personalkosten, die unabhängig von der Flächenleistung sind, definieren das untere Limit des Preises. Mit einer hohen Flächenleistung hat ein UAV-Dienstleister mehr Spielraum für die Preisgestaltung. Hohe Anschaffungskosten können z. B. schneller amortisiert werden.

Für die Entwicklung des Fliegenden Wildretters ist die Optimierung der einzelnen

Parameter mit unterschiedlich großem Aufwand verbunden. Deshalb ist die Orientierung an einer übergeordneten Größe – wie der Flächenleistung – eine gute Strategie, um in möglichst kurzer Zeit ein hochwertiges Produkt zu entwickeln. Die Optimierungsaufgabe lautet dann: **Maximiere die Flächenleistung unter der Nebenbedingung, dass gerade kein Kitz übersehen wird.**

Hohe Flächenleistung kann im Prozessschritt **Flug** erreicht werden, wenn das System hoch fliegt (auf Grund des größeren Schwadbreite) und mit hoher Geschwindigkeit die Fläche abfliegt. Durch Automatisierung lassen sich die Prozessschritte **Vorbereitung, Flug und Detektion und Verortung** sehr stark beschleunigen, was für den Gesamtprozess wiederum zu einer höheren Flächenleistung führt. Eine optimierte Flugwegplanung kann im Prozessschritt **Vorbereitung** direkt die Flächenleistung beeinflussen. Der Prozessschritt **Fundstelle aufsuchen** ist sehr zeitaufwendig, weshalb er die Flächenleistung stark beeinflusst. Je höher der *Precision*-Wert des Systems ist, desto weniger Fundstellen müssen aufgesucht werden und je präziser die geschätzte Position der Fundstelle ist, umso weniger Zeit wird für die Suche im hohen Gras benötigt. Beides sind Parameter, die im Prozessschritt **Detektion und Verortung** gewonnen werden.

3.1.4 Ausbaustufen

Da es bisher keine Datenbasis für eine thermalbildbasierte Rehkitz-Detektion in Wiesen gab, war auch nicht bekannt, woran man Rehkitze von anderen warmen Objekten unterscheiden kann. Es kann somit auch kein Mustererkennungsalgorithmus trainiert werden. Die Zeit, in der Rehkitze gefunden werden können, beschränkt sich auf ca. vier Wochen im Jahr. Vor Mitte Mai sind die Kitze noch nicht geboren und nach Mitte Juni gibt es fast keine ungemähten Wiesen mehr, in denen sich die Tiere verstecken können. Aus diesem Grund ist eine effiziente Herangehensweise gefordert. Die verfolgte Strategie ist folgende:

- Als erstes muss ein Werkzeug geschaffen werden, mit dem es möglich ist, überhaupt Kitze zu finden, damit eine Datenbasis aufgebaut werden kann, anhand derer die relevanten Merkmale für Rehkitze auf Thermalbildern gefunden werden können. Alle Daten werden von einer Person visuell auf dem analogen Videosignal ausgewertet. Primäres Ziel dieser ersten Phase ist die analoge Thermalbildaufnahme von Rehkitzen in Wiesen aus verschiedenen Flughöhen und die Evaluierung der analogen Kameraparameter (siehe Kap. 4.4.2). Verwendet wird dafür die Suchstrategie I. Gesucht wird vorwiegend bei günstigen Suchbedingungen.
- In der zweiten Phase steht die Beschleunigung der Prozessschritte Vorbereitung, Flug und Detektion im Vordergrund. Denn je schneller das Absu-

chen einer Wiesenfläche vonstatten geht, umso mehr Rehkitze können in einer Saison gefunden werden. Mehr Rehkitzbilder bedeutet mehr Trainingsdaten, was wiederum eine zuverlässigere Detektion bedeutet. Der Prozessschritt Fundstelle aufsuchen wird vom Prozessschritt Flug entkoppelt durch Speicherung der **UAV**-Positionsdaten. Angewendet wird die Suchstrategie II. Parallel wird an einer Rohbilderfassung gearbeitet, um in Zukunft aus den Thermalbildern mehr Information zu gewinnen, um auch bei Sonnenschein Rehkitze zu finden.

- Die dritte Phase bringt einerseits einen ersten Mustererkennungsalgorithmus, der auf dem analogen Videosignal angewendet wird. Die Basis hierfür sind die Erkenntnisse der beiden Phasen zuvor. Hiermit kann die Suche noch effizienter gestaltet werden. Andererseits steht in dieser Phase erstmals die Rohbilderfassung zur Verfügung (siehe Kap. 3.2.4). Ziel dieser Phase ist die Evaluierung der Parameter für die Rohbilderfassung. Suchstrategie III wird verwendet, um maximale Flächenleistung pro Akkuladung zu erbringen.
- In der vierten Phase wird vor allem die Georeferenzierung optimiert, sodass der Prozessschritt Fundstelle aufsuchen beschleunigt werden kann. Suchstrategie III wird solange verwendet, bis der automatische Mustererkenner, der jetzt auf den Rohbildern angewendet und weiterentwickelt wird, selbst bei schwierigen Verhältnissen keine Rehkitze mehr übersieht und die Relevanz der Funde so hoch ist, dass die unsicheren Fundstellen zur Verifizierung noch mit der selben Akkuladung abgeflogen werden können. Erst dann wird auf Suchstrategie IV gesetzt.

3.2 Dimensionierung der Hardware

3.2.1 Flugplattform

Im Prinzip kann jedes Fluggerät zur Rehkitzsuche verwendet werden, das eine senkrecht nach unten gerichtete Thermalkamera samt Aufzeichnungselektronik tragen kann und die von der Thermalkamera verlangten Randbedingungen für die Flughöhe und die Fluggeschwindigkeit einhalten kann. Wenn das **UAV** eine **GPS**-Wegpunkt-Navigation beherrscht, ist die vollständige Thermalbilderfassung bei hoher Flächenleistung gewährleistet.

Bei der Rehkitzsuche müssen spontan und wetterabhängig kurz vor der Mahd verschiedene Wiesen überflogen werden. Da die Landwirte selten zwei Wochen vorher wissen, wann sie ihre Wiesen mähen werden, kommt die Einzelanfluggenehmigung, die für **UAV**s mit einem Abfluggewicht größer 5 kg nötig ist, nicht in Frage.

Wenn das Abfluggewicht des Fluggeräts allerdings unter 5 kg ist, kann eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung vom zuständigen Luftamt erteilt werden, mit der zu jeder Zeit innerhalb eines Bundeslandes ohne vorherige Anmeldung geflogen werden darf.

Der FALCON 8 ist eine kommerzielle Kameradrohne für den zivilen Einsatz, hergestellt von der Firma Ascending Technologies GmbH (Asctec) mit Sitz in Krailling bei München. Er ist $77 \times 82 \times 12,5$ cm groß, besitzt acht 8-Zoll-Rotoren und kann ca. 500 g Nutzlast tragen. Die patentierte V-Form ermöglicht für die auf dem Nutzlasthalter montierten Kameras eine uneingeschränkte Sicht in alle Richtungen. Der Nutzlasthalter gleicht die Nick- und Roll-Bewegungen des Fluggeräts aus¹, und ermöglicht somit ein stabiles Kamerabild, welches per Funk an die Bodenstation geschickt wird. Abb. 3.4 zeigt den FALCON 8 im Flug.



Abb. 3.4: Links: Der FALCON 8 von Ascending Technologies mit einer Lumix LX-3 Kamera aus dem Jahr 2011. Rechts: Die zugehörige mobile Bodenstation.

Der FALCON 8 besitzt einen Beschleunigungssensor, ein Gyroskop und einen elektronischen Kompass für jeweils alle drei Raumachsen, einen barometrischen Höhensensor und einen GPS-Empfänger. Diese Sensoren ermöglichen ein stabiles ortsfestes Schweben.

Die Bodenstation verfügt neben den Steuerknüppeln über einen Videoempfänger mit Monitor zur Anzeige des Livestreams der Kamera, die auf dem Nutzlasthalter montiert ist. An die Bodenstation kann ein Computer angeschlossen werden, der beispielsweise das Fluggerät mittels einer Autopilotsoftware fernsteuert.

Beim FALCON 8 kann der Nutzlasthalter sehr komfortabel ausgetauscht werden. Dies ermöglicht den Einsatz von verschiedenen Sensorkonfigurationen während

¹Da sich die Anstellwinkel der Rotorblätter bei einem Multikopter – anders als bei einem Hubschrauber – nicht verändern lassen, muss sich das gesamte Fluggerät in die Richtung neigen, in die es fliegen soll.

einer Messkampagne. Der Nutzlasthalter aus dem Jahr 2011 wiegt ohne Kamera ca. 180 g. Damit die zulässige Nutzlast von 500 g (inklusive Nutzlasthalter) laut Hersteller nicht überschritten wird, darf die Sensorkonfiguration nicht mehr als 320 g wiegen. Der Nutzlasthalter besitzt einen Nick-Roll-Ausgleich, der über zwei Servos² geregelt wird. Da sich der Rollservo nur bis maximal $\pm 30^\circ$ auslenken lässt, kann es bei starken seitlichen Windböen vorkommen, dass die Ausrichtung der Kamera nicht mehr vollständig ausgeglichen wird.

Die Flugdauer des FALCON 8, wie auch vieler anderer Multikopter in dieser Gewichtsklasse, ist auf ca. 15 min. begrenzt. Die maximale Fluggeschwindigkeit beträgt 10 m/s bei Windstille.

3.2.2 Thermalkamera

Die TAU640 der Firma FLIR Systems Inc. war mit 72 g zum Zeitpunkt der Anschaffung (2010) die weltweit leichteste Thermalkamera. Darüber hinaus hatte sie die zu diesem Zeitpunkt größtmögliche kommerziell erwerbbar Auflösung (640×512 Pixel). Bei der TAU640 handelt es sich um einen Camera-Core (ein Kameramodul ohne Aufzeichnungsmöglichkeit). Sie basiert auf der Mikrobolometer-Technologie und besitzt einen Vanadium Oxid Focal Plane Array. Diese Kamera wird ungekühlt betrieben. Die Tabelle 3.5 zeigt die wichtigsten Parameter der Kamera. Neben der Stromversorgung, dem analogen Videosignal und einer seriellen Schnittstelle zur Konfiguration der Kamera kann an einem 50-poligen Stecker auch das digitale Videosignal abgegriffen werden. Es steht als 8-Bit BT.656⁴, 8- oder 14-Bit LVDS⁵ oder als 8- oder 14-Bit CMOS⁶ Signal zur Verfügung. Anders als bei LVDS ist das CMOS-Signal nicht gegen elektromagnetische Störungen bei der Datenübertragung geschützt. Die Kamera wird mit einem fest montierten Objektiv ausgeliefert. Es stehen unterschiedliche Objektive zur Auswahl. Im folgenden Abschnitt wird erarbeitet, welches Objektiv für die Anwendung der Rehkitzsuche geeignet ist.

²Elektromotor mit Steuerelektronik und Getriebe.

³NTSC und PAL sind Farbkodierverfahren mit unterschiedlichen Frameraten und Auflösungen in *Standard Definition*.

⁴digitales Videoprotokoll zur Übertragung von unkomprimierten PAL oder NTSC Videosignalen.

⁵Schnittstellen-Standard für Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung.

⁶Mit CMOS meint der Hersteller den reinen Datenstrom, der aus der in CMOS-Technologie gefertigten Ausleseelektronik der Mikrobolometer kommt.



Hersteller	FLIR
Bezeichnung	TAU640
Technologie	Mikrobolometer
Sensormaterial	Vanadium Oxid
Pixelauflösung	640 × 512
Pixelgröße	17 μm × 17 μm
Spektralbereich	7,5 – 13,5 μm
NETD	< 50 mK für f/1.0
messb. Temp.-Bereich	-25 °C – 135 °C
analog. Videoformat	NTSC/PAL ³
Bittiefe dig. Video	14-Bit
Framerate	7,5 bzw. 8,3 Hz
Eingangsspannung	4,0 – 6,0 V
Leistungsaufnahme	< 1,2 W
Abmessungen	1,75'' × 1,75'' × 1,18''
Gewicht	72 g
Arbeitstemp.-Bereich	-40 – +80 °C
Schockresistenz	bis 200 g

Abb. 3.5: Thermalkamera TAU640 von FLIR und ihre wichtigsten Eigenschaften

3.2.3 Kameraobjektiv

Elektromagnetische Wellen im sichtbaren und auch im infraroten Spektralbereich durchdringen kein Gras. Deshalb muss die Kamera so angeordnet werden, dass ein in der Wiese verstecktes Rehkitz im unverdeckten Blickfeld der Kamera liegt. Die geringste Verdeckung durch Gras wird erreicht, wenn sich die Kamera genau senkrecht über dem Kitz befindet und in Nadir-Richtung senkrecht nach unten blickt, da das Gras bei Bewuchshöhen von mehr als 30 cm in der Regel in Lotrichtung wächst. Dicht gewachsenes Gras verdeckt die Sicht auf ein Kitz vollständig, wenn der Winkel

$$w = \arctan\left(\frac{D_k}{h_w}\right) \quad (3.1)$$

ist, wobei D_k der Durchmesser des Kitzes und h_w die Bewuchshöhe des Grasses ist.

Bei einer angenommenen maximalen Bewuchshöhe h_w von einem Meter und einer angenommenen Kitzgröße D_k von 30 cm ergibt sich aus der Gleichung 3.1 ein maximaler Winkel w mit ca. 16,7° zum Lot. Der Schwinkel der Kamera beträgt $w' = w$, weil die Kamera senkrecht nach unten blickt. Abb. 3.6 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

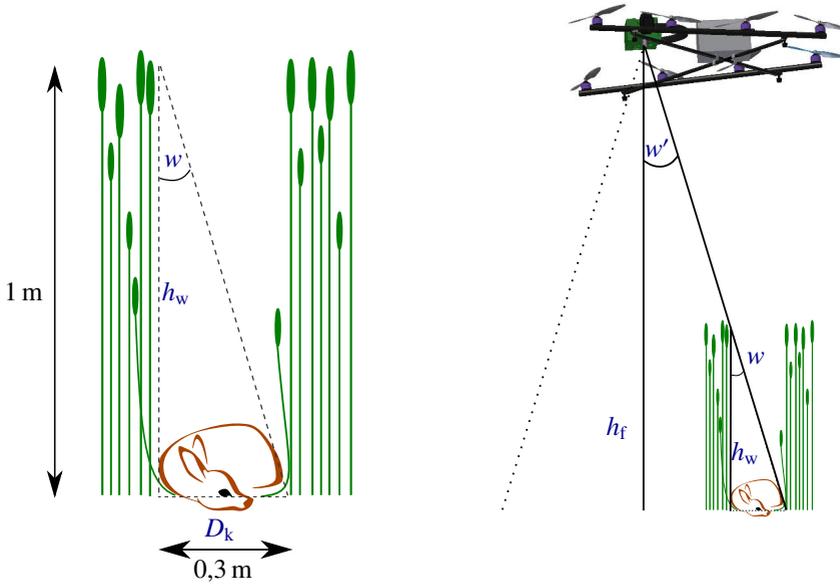


Abb. 3.6: Geometrische Randbedingungen bei der Sicht auf ein Kitz in der Wiese

Mit dem Wissen des maximalen Sehwinkels lässt sich ein geeignetes Kameraobjektiv finden, sodass gilt:

$$\alpha_{\text{FOV}} \approx 2w \tag{3.2}$$

Es gibt zwei Grenzwerte für ein optimales Objektiv. Entweder wird das Objektiv so dimensioniert, dass der Bereich B vollständig auf dem FPA abgebildet wird (siehe Abb. 3.7 links). Dann gibt es Bereiche auf dem FPA , wo es keine Abbildung eines Kitzes geben kann. Das ist der Fall des maximalen FOV . Bei diesem Grenzwert wird bei fester Flughöhe der Abstand der Flugbahnen maximiert, was zu einer Minimierung der Flugzeit führt. Beim anderen Grenzwert wird das Objektiv so dimensioniert, dass das Kamerabild vollständig vom Bereich B eingeschlossen wird – also jede Abbildung auf dem gesamten FPA ein Kitz sein kann (siehe Abb. 3.7 rechts). Dies ist das minimale FOV . In diesem Fall wird die nutzbare Anzahl an Detektorelementen maximiert. Der Bereich von B , der nicht auf dem Sensorchip abgebildet wird, muss ein zweites Mal überflogen werden. Beim ersten Grenzwert wird das System auf Geschwindigkeit optimiert, beim zweiten Grenzwert werden die Kosten des Systems minimiert, denn eine sehr teure Komponente ist die Thermalkamera. Ihr Preis ist in erster Linie Abhängig von der Anzahl der Detektorelementen. Sowohl das Objektiv als auch die Kameraauflösung bzw. die Anzahl der

Detektorelementen ist nicht beliebig wählbar, sondern nur in sehr groben Quantisierungsstufen verfügbar. Detektorelemente, die aufgrund des Sehwinkels kein Kitz erfassen können verteuern also das System. Wie bereits in Abschnitt 3.1.3 festgestellt, ist das wichtigste Optimierungsziel die Flächenleistung. Da aber auch der Anschaffungspreis nicht zu vernachlässigen ist, sollte das Objektiv so dimensioniert sein, dass es zwischen beiden Grenzwerten liegt.

Beim ersten Grenzwert muss der kleinere – also der vertikale – Bildwinkel

$$\alpha_v = 2 \cdot w \quad (3.3)$$

sein. Der Sensorchip der Kamera hat eine vorgegebene Größe: $17 \mu\text{m}$ pro Pixel in beide Richtungen. Bei 640 Pixeln in horizontaler und 512 Pixeln in vertikaler Richtung errechnet sich die Sensorbreite b_s zu 10,88 mm und die Sensorhöhe h_s zu 8,70 mm. Eingesetzt in die Gleichung 2.10 mit $r = h_s/2$ und $\alpha = \alpha_v$ ergibt sich mit dem vertikalen Bildwinkel $\alpha_v = 33,4^\circ$ die Brennweite

$$f_1 \approx 18,13 \text{ mm} \quad (3.4)$$

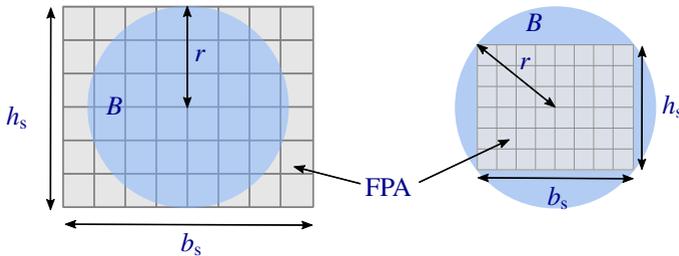


Abb. 3.7: Der blaue Bereich B markiert jenen Bereich auf dem Sensorchip, auf dem ein Kitz bei senkrecht stehenden Bewuchs durch das Gras unverdeckt bleibt, sofern die Kamera senkrecht nach unten blickt. Links ist der Fall dargestellt, bei dem der vollständige Bereich B auf dem Sensorchip liegt. Rechts ist der Fall dargestellt, bei dem alle Pixel vollständig von dem Bereich B abgedeckt sind.

Beim zweiten Grenzwert (siehe Abb. 3.7 rechts), muss anstatt des vertikalen der diagonale Kamera-Bildwinkel

$$\alpha_d = 2 \cdot w \quad (3.5)$$

sein. Dann kann auf jedem Detektorelement auch ein Teil eines Kitzes abgebildet

werden. Zur Berechnung der Brennweite wird Gleichung 2.10 mit

$$r = \frac{\sqrt{h_s^2 + b_s^2}}{2} \tag{3.6}$$

und $\alpha = \alpha_d$ verwendet. Es ergibt sich dann die Brennweite

$$f_2 \approx 23,22 \text{ mm} \tag{3.7}$$

	9 mm f/1,4	13 mm f/1,25	19 mm f/1,25	25 mm f/1,1	35 mm f/1,2	50 mm f/1,2
FOV (in °)	69 × 56	45 × 37	32 × 26	25 × 20	18 × 14	12 × 10
min. Fokus Distanz	3,2 cm	7,6 cm	15,3 cm	30 cm	60 cm	1,5 m
hyperfokale Distanz	2,1 m	4,4 m	9,5 m	21 m	35 m	71 m
hyperfokale Schärfentiefe	1,1 m	2,2 m	4,8 m	11 m	18 m	36 m
Länge	9 mm	13 mm	19 mm	25 mm	35 mm	50 mm
Durchmesser	29 mm	29 mm	29 mm	42 mm	42 mm	58 mm
Gewicht	72 g	< 70 g	< 70 g	112 g	150 g	280 g

Tabelle 3.1: Auswahl an Linsen für die Thermalkamera TAU640 (Angaben des Herstellers).

In der Tabelle 3.1 sind die verfügbaren Objektive für die Thermalkamera TAU640 aufgelistet. Außer den dort aufgeführten Objektive gibt es noch ein 7,5 mm, ein 60 mm und ein 100 mm Objektiv. Ersteres ist ein sehr weitwinkliges Objektiv und die anderen beiden kommen auf Grund ihres Gewichtes für einen Betrieb auf einem MAV nicht in Frage. Die verfügbaren Objektive sind Germaniumlinsen mit Festbrennweiten. Die Brennweite und auch die Fokussierung wird fest eingestellt. Aus diesem Grund kann der Mindestabstand während dem Flug nicht variiert werden. Die maximale Schärfentiefe liegt vor, wenn der Fokus auf die hyperfokale Distanz eingestellt ist. Dann werden Objekte, die im Unendlichen liegen gerade noch ausreichend scharf abgebildet. Die hyperfokale Distanz d_h hängt von der Brennweite f , der Blendenzahl k und dem Zerstreuungskreisdurchmesser Z wie folgt ab:

$$d_h = \frac{f^2}{k \cdot Z} + f \tag{3.8}$$

Bei einer unscharfen Abbildung eines Punktes entsteht ein sog. Zerstreuungskreis. Der Hersteller hat bei seiner Berechnung der hyperfokalen Distanz einen tolerierbaren Zerstreuungskreisdurchmesser von 30,4 µm angenommen. Das entspricht etwas weniger als dem Abstand von zwei Detektorelementen.

Die Objektive mit den Brennweiten 7,5 mm, 9 mm und 13 mm bilden den Bereich B nur auf ca. 17 %, 24 % bzw. 50 % der Sensorfläche ab. Das Objektiv mit der Brennweite 19 mm liegt als einzige innerhalb des errechneten Optimalbereichs zwischen 18,13 mm und 23,22 mm. Bei ihr ist auf ca. 92 % der Sensorfläche eine Projektion eines Kitzes möglich. Das 25 mm-Objektiv liegt etwas oberhalb des errechneten Optimums. Die Projektion eines Kitzes ist auf 100 % der Sensorfläche möglich, allerdings füllt die Sensorfläche nur ca. 27 % dieses Bereichs aus. Die geringe Blendenzahl von 1,1 ermöglicht eine größere Bestrahlungsstärke und damit eine niedrigere rauschäquivalente Temperaturdifferenz als bei dem 19 mm-Objektiv. Das Gewicht liegt allerdings um 42 g über dem von dem 19 mm-Objektiv und auch die hyperfokale Distanz ist mit 21 m etwa doppelt so groß. Da der kürzeste Abstand einer ausreichend scharfen Abbildung bei der halben hyperfokalen Distanz liegt, beträgt die minimale Flughöhe 10,5 m. Mit dem 19 mm-Objektiv beträgt die minimale Flughöhe 4,75 m. Gerade zur Validierung einer Kitz-Fundstelle ist ein niedriger Flug vorteilhaft.

Die Vorteile der 19 mm-Objektiv überwiegen eindeutig. Deshalb wurde sie für den Einsatz beim fliegenden Wildretter ausgewählt.

Nicht nur die Anzahl der Detektorelemente kann die Auflösung eines Bildes begrenzen, sondern auch die Beugung der thermalen Strahlung an der Blende. Diese sog. optische Auflösungsgrenze wird definiert als minimaler Winkel unter dem zwei Punkte noch getrennt wahrgenommen werden können. Das Rayleigh-Kriterium definiert die Unterscheidbarkeit zweier Punktquellen wie folgt: Zwei Punktquellen sind noch unterscheidbar, wenn das Maximum der einen Punktquelle in das erste Minimum der anderen Punktquelle fällt. Bei einer Abbildung aus dem Unendlichen gilt:

$$\sin(\delta_\varphi) \approx 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (3.9)$$

mit dem minimalen Winkel δ_φ , der Wellenlänge der beobachteten Strahlung λ und dem Blendenöffnungsdurchmesser D . Der minimale Winkel muss für die längste Wellenlänge (13,5 μm) berechnet werden. Mit

$$D_{19\text{mm}} = 0,0165 \text{ m} \quad \text{und} \quad \lambda = 13,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (3.10)$$

eingesetzt in Gleichung 3.9 und nach dem Winkel aufgelöst ergibt sich dieser zu

$$\delta_\varphi \approx \arcsin\left(1,22 \frac{\lambda}{D_{19\text{mm}}}\right) \approx 0,0572^\circ \quad (3.11)$$

Wenn der Winkelabstand zweier benachbarter Detektorelemente kleiner als der minimale Winkel δ_φ ist, dann begrenzt nicht die Anzahl der Detektorelemente die

Auflösung der Kamera, sondern die optische Auflösung. Der Winkelabstand entspricht dem **IFOV** eines Detektorelements. Mit der Gleichung 2.12 und den Werten für die Brennweite $f = 19\text{mm}$ und den Detektorelementabstand $s = 17\mu\text{m}$ kann das **IFOV** des zentralen Detektorelements berechnet werden.

$$\alpha_{\text{IFOV}} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{0,017 \text{ mm}}{2 \cdot 19 \text{ mm}}\right) \approx 0,0513^\circ \quad (3.12)$$

Zur einfacheren Berechnung wird ein konstantes **IFOV** für alle Detektorelemente angenommen. Damit ist die optische Auflösungsgrenze und nicht die digitale Auflösung das begrenzende Kriterium. Bei gleichgroßer Apertur würde eine Kamera mit einem Bildsensor mit höherer Auflösung nicht mehr Details abbilden können. Umgekehrt heißt das, dass eine Kamera mit größerer Pixelauflösung eine Optik mit größerer Apertur benötigt, um auch mehr Details darstellen zu können.

3.2.4 Datenaufzeichnung

Wenn die Kamera auf dem Flugsystem montiert ist gibt es prinzipiell die Möglichkeit, die Daten an Bord zu speichern, oder sie per Funk zur Bodenstation zu senden. Die Übertragung der Daten hat den Vorteil, dass die Daten während des Fluges gesichtet werden können und das Fluggerät bei Bedarf zu einer genaueren Inspektion auf niedrigerer Flughöhe fliegt. Die Übertragung der Daten birgt die Herausforderung einer persistenten störungsfreien Funkübertragungsstrecke. Vor allem die Brushlessmotoren des Fluggerätes senden starke elektromagnetische Störungen aus, die eine Funkübertragung erschweren. Eine Speicherung auf dem Fluggerät umgeht zwar die Schwierigkeit der störungsfreien Funkübertragungsstrecke, erzeugt allerdings durch die Aufzeichnungselektronik zusätzliches Gewicht, was bei vielen Fluggeräten sehr begrenzt ist. Alle Thermalkamera-Kerne der Firma FLIR Inc.– zu denen auch die TAU640 gehört – bieten mehrere verschiedene Ausgabeformate an (siehe Kapitel 4.4.2). Das 14-Bit-Rohformat ist aus Sicht des Informationsgehaltes das Beste, da hier noch keine Bildverarbeitung eingegriffen hat, die Informationen herausfiltern konnte. Bis 2013 gab es nach eigenen Recherchen mit kommerziellen Komponenten noch keine Möglichkeit, dieses Format zu lesen. Es gab allerdings die Möglichkeit das gefilterte 14-Bit Videosignal über **LVDS** mit einer **PCI-Express-Einschubkarte** abzugreifen. Ein Computer mit **PCI-Express-Steckplätzen** ist für die Montage auf einer **MAV-Plattform** wie dem **FALCON 8** viel zu schwer, deshalb kam diese Variante nicht in Frage. Zunächst wurde nur das analoge Videobild direkt an Bord auf einem Miniaturrechner gespeichert, da es hierfür leichte **USB-Framegrabber** kommerziell verfügbar gab. An einer eigenen Rohbild-Aufzeichnungshardware sowie einem zugehörigen Treiber für die Kamera wurde im Rahmen von zwei Masterarbeiten [Neu11; Bal12] gearbeitet. Auch die Firma

Asctec hat an der Entwicklung eines Rohbild-Datenloggers gearbeitet und diesen aber schneller fertig gestellt, sodass die eigene Entwicklung aufgegeben wurde.



Abb. 3.8: Datenlogger FlirSD der Firma Asctec.

Mit diesem $4,5 \times 4,5 \times 0,5$ cm kleinen FlirSD-Datenlogger (siehe Abb. 3.8) konnten die 14-Bit-Rohdaten an Bord des Fluggerätes auf einer MikroSD-Karte aufgezeichnet werden. Da das Protokoll des Vorgängermodells (PHOTON) und des Nachfolgermodells (QUARK) identisch zur TAU640 ist, kann mit Hilfe eines Adapters der Datenlogger auch für diese Kameras verwendet werden. Die Platine wurde so entworfen, dass sie genau auf die Rückseite der TAU640 passt und die gleichen Abmessungen besitzt. Ein Prozessor verarbeitet den Datenstrom. Auf der Platine ist ein 6-poliger Steckverbinder an dem neben der Spannungsversorgung das analoge Videosignal und eine serielle Schnittstelle ausgeführt sind. Über die serielle Schnittstelle können Positions- und Lagedaten und weitere Metainformationen übertragen werden, damit diese zugeordnet zu jedem Bild im Header abgespeichert werden. Der Datenlogger kann im Sekundentakt oder getriggert – über die serielle Schnittstelle – ein Bild abspeichern. Im 100 ms-Takt wird die aktuelle Uhrzeit aus dem GPS-Signal und die Lage- und Positionsdaten vom Fluggerät an den Datenlogger geschickt. Dadurch minimiert sich der Versatz aus Bild- und Metadaten.

3.3 Wegpunktbasierte Navigation

Um keine Rehkitze zu übersehen, ist es wichtig, dass die Wiesen flächendeckend abgesucht werden. Üblicherweise wird eine Fläche streifenweise durch parallele Bahnen abgescannt. Flächendeckung wird gewährleistet, wenn die Bahnen so nah beieinander liegen, dass der Randbereich von einem Flugstreifen beim nächsten Flugstreifen erneut abgedeckt wird.

Es ist sehr schwierig mittels manueller Flugführung (d.h. Steuerung durch die

Steuerknüppel auf der Fernbedienung) eine solche Fläche systematisch abzufliegen, sodass die Wiese flächendeckend auf den Thermalbildern erfasst wird. Da der Pilot am Feldrand steht, anstatt im Fluggerät zu sitzen, wird mit zunehmender Entfernung die Navigation schwieriger. Aufgrund der homogenen Struktur von Wiesenflächen bietet auch das Kamerabild keine Unterstützung zur Orientierung. Aus diesem Grund entstand im Rahmen der Arbeiten am Fliegenden Wildretter bereits sehr früh eine Software für den wegpunktbasierten Flug.

Abbildung 3.9 links zeigt den GPS-Track eines Fluges, bei dem die Software für den wegpunktbasierten Flug nicht verfügbar war. Es wurde mit größter Sorgfalt versucht die Szene systematisch in Streifen abzufliegen. Als Hilfsmittel diente das Livebild der Kamera, die senkrecht nach unten blickte. Am Wegrand gelang es, das Fluggerät immer wieder auszurichten. In der Mitte des Feldes war die Orientierung nicht mehr möglich. Dies führte dazu, dass manche Bereiche mehrfach und andere Bereiche gar nicht abgeflogen wurden. In grau gestrichelt ist der gewünschte Flugpfad dargestellt. Im Vergleich dazu ist rechts in Abb. 3.9 der Flugpfad eines GPS-gesteuerten Fluges zu sehen.



Abb. 3.9: Links: UAV Positionen eines manuellen Fluges beim Versuch systematisch Streifen zu fliegen. Rechts: wegpunktbasierter Flug. Quelle Luftbilder: DOP 200, Bayerische Vermessungsverwaltung.

Die wegpunktbasierte Navigation ermöglicht eine vollständige Abdeckung bei hoher Flächenleistung. Je weniger die Bilder überlappen umso mehr Flächenleistung kann erzielt werden. Das Fluggerät kann aufgrund verschiedener Einflüsse nicht immer exakt die Spur halten und die Kamera korrekt ausrichten. Diese Toleranzen müssen berücksichtigt werden, sodass trotzdem immer vollständige Abdeckung gewährleistet wird. Die wichtigsten Einflussparameter werden in den folgenden Unterabschnitten diskutiert.

3.3.1 Navigationsaspekte

Flugpfad Eine Fläche systematisch abzusuchen kann als das mathematische Problem des Handlungsreisenden (engl. *Travelling Salesman Problem*, **TSP**) formuliert werden. Dieses Problem tritt in vielen anderen Anwendungen auch auf, beispielsweise in der Tourenplanung, in der Logistik oder im Design von Mikrochips. Es existiert eine exakte Lösung. Allerdings nimmt die algorithmische Komplexität überexponentiell mit der Anzahl der anzufliegenden Wegpunkte n zu. Bei der einfachsten Variante werden alle Möglichkeiten durchprobiert und diejenige mit der kürzesten Wegstrecke ausgewählt. Bei n Wegpunkten gibt es $(n - 1)!/2$ verschiedene Möglichkeiten. Das sind bei 18 Wegpunkten (wie in dem Beispiel in Abb. 3.10) bereits $1,78 \cdot 10^{14}$ Möglichkeiten. In vielen Anwendungen wird aufgrund der begrenzten Rechenzeit bei dem **TSP** anstatt der exakten eine heuristische Lösung bevorzugt.

Bei dieser Anwendung bedeutet eine kurze Strecke nicht unbedingt eine kurze Flugdauer. Das folgende Beispiel soll dies veranschaulichen: Eine abzusuchende rechteckige Wiesenflächen beträgt 2 ha und hat die Form wie in Abb. 3.10. Wenn

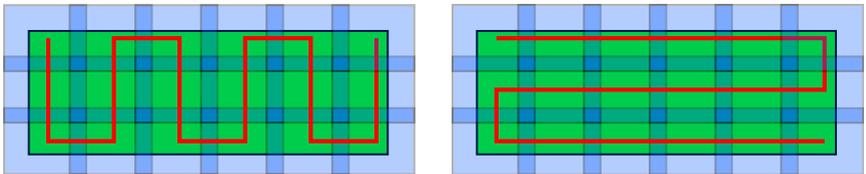


Abb. 3.10: Eine Fläche kann mit verschiedenen Flugpfaden abgesucht werden. Bei der Bildaufnahme im Schwebeflug ist die linke Variante schneller. Bei der Bildaufnahme im Überflug ist die rechte Variante schneller.

der Flugpfad in Bahnen parallel zur kurzen Kante verläuft (Abb. 3.10 links) beträgt die Flugpfadlänge 730 m. Der Flugpfad wie in Abb. 3.10 rechts hat eine Länge von 830 m. Wenn das Fluggerät bei jeder der 18 Parzellen abbremst, um im Schwebeflug ein Bild aufzunehmen, wie es für die Anwendung ursprünglich geplant war, ist der streckenmäßig kürzere Flugpfad (Abb. 3.10 links) auch der schnellere. Diese Variante wird im Folgenden **WP-Modus** (engl. *Waypoint*) genannt. Wenn das Fluggerät aber nur an den Wendepunkten anhält und die Bilder im Überflug Zeitintervall-getriggert aufnimmt, ist der längere Flugpfad (Abb. 3.10 rechts) aufgrund der geringeren Anzahl an Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen der schnellere. Dieser Modus wird im Folgenden **TL-Modus** (engl. *Timelapse*) genannt.

Die maximale Flächenleistung bei der reinen Bilderfassung wird dann erzielt, wenn

das Fluggerät konstant mit derjenigen Geschwindigkeit, bei der die Bilder gerade noch scharf abgebildet werden, über die Fläche fliegt. Dies hat den Nachteil, dass die Georeferenzierung der Fundstellen unpräziser wird, als wenn das Fluggerät die Bilder nur im Schwebeflug aufnimmt. Eine unpräzise Georeferenzierung bewirkt, dass die Fundstellen in einem größeren Radius abgesucht werden müssen, was mehr Zeit kostet. Welche der beiden Aufnahmestrategien (WP- oder TL-Modus) letztendlich die schnellere Variante ist, wird am Ende dieses Kapitels evaluiert.

Da das Fluggerät zwischen den Wegpunkten die Spur nicht vorhersagbar halten kann, und je nach Stärke der Windböen dadurch verschieden große Lücken in der Abdeckung entstehen können, muss eine lange Strecke mit Stützwegpunkten in kleinere Teilstrecken unterteilt werden, was die Flugzeit verlängert. Eine in der Praxis bewährte maximale Teilstreckenlänge liegt bei etwa 100 m. Der günstigste Flugpfad ist dann derjenige, bei dem die gesamte Fläche abgedeckt wird mit der geringsten Anzahl an Wegpunkten n .

Flugstreifen-Überlappung Die minimal benötigte Flugstreifenüberlappung hängt von dem Verfahren ab, wie die Kitze in den Bildern erkannt werden. Der im Kapitel 4 vorgestellte automatische Kitzdetektor benötigt ein Überlappung vom zweifachen Kitzdurchmesser. In diesem Grenzfall liegt das Kitz am Rand innerhalb des einen Streifens, und zwar so, dass im Bild nicht erkannt wird, ob das Objekt aus dem Streifen herausragt, oder nicht. Mit einer Überlappung vom zweifachen Kitzdurchmesser wird das Kitz auf einem Bild des Nachbarstreifens so zu erkennen sein, dass auch noch die Wiese dahinter für eine Kitzbreite zu sehen ist (siehe Abb. 3.11). Da das Fluggerät die Kamera nie ganz exakt still halten kann, hängt die

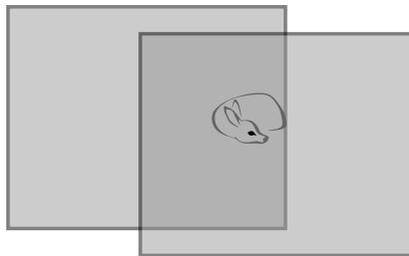


Abb. 3.11: Der minimal vorausgesetzte Überlappungsbereich zweier Bilder: doppelter Kitzdurchmesser (ca. 60 cm)

benötigte Überlappung in der Praxis zusätzlich vom Flugverhalten des Fluggeräts ab. Je besser das Fluggerät die Spur halten kann und je ruhiger die Kamera gehalten werden kann, umso geringer ist die benötigte Überlappung und umso kürzer

dauert es, eine Fläche abzufliegen. In der Praxis hat sich bei 80 m Flughöhe eine Überlappung von 30 % bewährt.

Hanglagen Eine gängige Methode, einen ebenen Bereich flächendeckend mit einer Kamera zu erfassen, ist: das Fluggerät auf äquidistanten Bahnen mit konstanter Flughöhe über dem Startpunkt zu halten und in gleichen Abständen Bilder aufzunehmen. Bei Hanglagen können dabei Lücken in der Abdeckung entstehen (siehe Abb. 3.12). Gerade die Wiesen an Südhängen sind beliebte Plätze für die

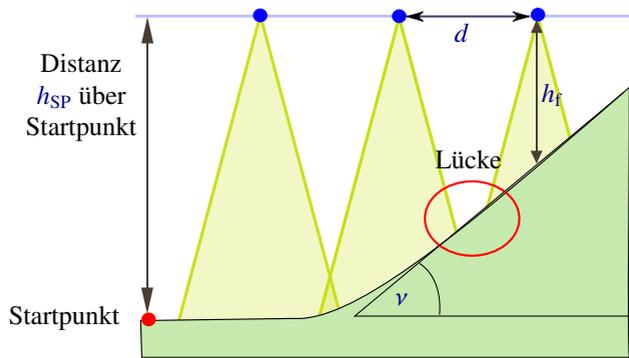


Abb. 3.12: Das Hanglagenproblem. Bei konstanter Flughöhe kann bei Hanglagen die Überlappung der Bildstreifen nicht immer gewährleistet werden

Aufzucht von Rehkitze. Um die Lücken bei Hanglagen zu vermeiden, kann entweder der Abstand h_f zum Boden für alle Wegpunkte konstant gehalten werden, oder der Flugbahn-Abstand d variiert entsprechend des Abstandes zum Boden. In beiden Fällen wird entweder ein Höhenmodell des überflogenen Gebiets oder ein Sensor zur Distanzmessung benötigt. Da das Gras in Lotrichtung wächst, muss die Kamera Richtung Nadir blicken, sonst besteht die Gefahr der Verdeckung durch die Vegetation (siehe Kapitel 4.2.2). Das bedeutet aber bei Hanglagen, dass nicht jeder abgebildete Bereich auf dem Bild den gleichen Abstand zur Kamera besitzt. Die voreingestellte Sink- und Steiggeschwindigkeit des FALCON 8 liegt mit 2 m/s bei 40 % der Horizontalgeschwindigkeit. Bei äquidistantem Bodenabstand und diesen Einstellungen führt eine Flugstrecke entlang des Hangs zu höherer Flächenleistung als ein Flug quer zum Hang. Auch für die Variante konstante Flughöhe (über dem Startpunkt) bei variablem Flugstreifenabstand wird die Flächenleistung maximiert, wenn entlang des Hangs geflogen wird. Bei bekannter Hangneigung γ (in Grad) kann der Abstand d zum nächsten Flugstreifen hangaufwärts über folgender

Gleichung berechnet werden:

$$d = (2 - p) \frac{\tan(w') \cdot \tan(90^\circ - \nu) \cdot h_f}{\tan(w') + \tan(90^\circ - \nu)}, \tag{3.13}$$

mit der Flugstreifenüberlappung $p \in [0,1]$. Die visuelle Detektion der Rehkitze fällt leichter, bei äquidistantem Bodenabstand. In der Flugplanungssoftware des Fliegenden Wildretters wird deshalb diese Variante bevorzugt. Da geeignete Distanzsensoren mit einer Reichweite über 10 m sehr teuer sind, kommt außerdem ein Höhenmodell anstatt eines Distanzsensors zum Einsatz.

Akkuwechsel Da die Wiesenflächen oft keine quadratische Form besitzen, ist die Varianz der benötigten Flugdauer je nach Wahl des Flugpfades sehr hoch. Wenn durch eine geeignete Flugpfadplanung erreicht werden kann, dass die gesamte Wiesenfläche mit nur einer anstatt mit zwei Akkuladungen abgeflogen werden kann, führt das außer der reinen Zeitersparnis durch den schnelleren Flugpfad außerdem zu einer starken Beschleunigung des gesamten Suchprozesses, weil gerade das Starten, Landen, Akku wechseln und der Reboot des Fluggeräts viel Zeit in Anspruch nehmen.

Orientierung des Fluggeräts Ein Multikopter kann sich, anders als ein Flugzeug, unabhängig von der Flugrichtung in alle Himmelsrichtungen frei orientieren. Die Richtcharakteristika der Antennen zur Flugsteuerung und zur Videoübertragung sind allerdings nicht isotrop. Die Reichweite der Video- und Datenübertragung hängt deshalb von der Orientierung des Fluggeräts ab. Der beste Empfang und damit die größte Reichweite wird beim FALCON 8 erreicht, wenn das Heck des Fluggeräts zum Piloten zeigt. Um maximale Flächenleistung zu erreichen, muss die Überlappung der Bilder minimiert werden. Da das Bild der Kamera rechteckig ist, kann eine minimale Überlappung nur erreicht werden, wenn das Fluggerät 0° , 90° , 180° oder 270° zur Flugrichtung orientiert ist.

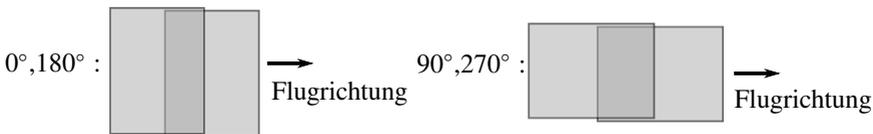


Abb. 3.13: Orientierung des Fluggeräts. Sinnvoll sind nur diese vier Orientierungen.

Kurzer Rückflug Es spielt eine wichtige Rolle, wo der Flugpfad bei einem Multikopter mit Elektromotoren endet. Da die Akkus mit der Zeit an Kapazität verlieren und die Restkapazität eines Akkus schwer vorhersagbar ist, kann es vorkommen, dass ein Flug vorzeitig beendet werden muss. Wenn dann der Kopter gerade den letzten Wegpunkt anfliegt und dieser beispielsweise 200 m vom Startpunkt entfernt ist, hat der Pilot einerseits die Schwierigkeit das UAV in der Ferne an einem sicheren Ort zu landen und andererseits verliert er viel Zeit, um den Kopter zu Fuß zurückzuholen. Deshalb sollte der Rückflug zum Startplatz eine kurze Strecke aufweisen.

3.3.2 Software zur Flugfadplanung

Der UAV-Hersteller Asctec hat zwar für seine Fluggeräte die Software **AUTOPILOT CONTROL** (siehe Abb. 3.14 rechts) zur wegpunkt-basierten Flugwegplanung, allerdings muss hierbei ein Hintergrund-Satellitenbild von Hand georeferenziert und die Position der Wegpunkte ausgerechnet und einzeln gesetzt werden⁷. Deshalb ist schon sehr früh der überwiegend in Javascript programmierte webbasierte **WAYPOINT-EDITOR** entstanden, mit dem man schnell eine Flugroute auf einer Google-Maps-Karte planen und in die Asctec Software Autopilot Control als georeferenziertes Satellitenbild und Wegpunktliste importieren kann. Abb. 3.14 links zeigt einen Screenshot der Bedienoberfläche. Zur Planung ist eine Internetverbindung

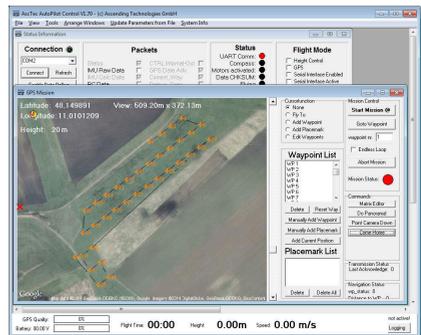
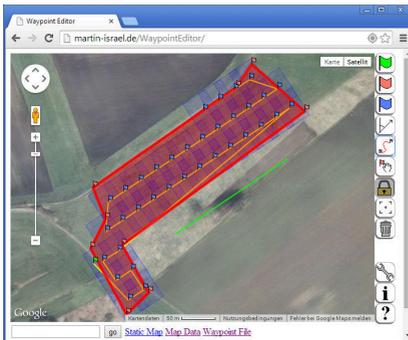


Abb. 3.14: Die webbasierte Flugwegplanungssoftware **WAYPOINTEDITOR** (links) und die Asctec Fluggerät-Steuersoftware **Autopilot Control** (rechts). Quelle Hintergrundluftbilder: Google Maps, GeoBasis-DE/BKG, DigitalGlobe

⁷Mittlerweile existiert die komfortablere Software **ASCTEC NAVIGATOR** zur Flugplanung, bei der dies nicht mehr nötig ist.

ist erforderlich. In einem Browser wird die Webseite des `WAYPOINTEDITORS` geladen. Die Startposition des `UAVs` wird mit einer grünen Fahne markiert. Um die gewünschte Wiesenfläche wird ein Polygon aufgespannt. Die Software berechnet beim Schließen des Polygons selbstständig einen günstigen Flugpfad, der einen Großteil der oben genannten Aspekte berücksichtigt. Ursprünglich wurde die Software für den `WP-Modus` entwickelt. Jeder Wegpunkt (blaue Fahnen) wird von einem blauen Viereck umgeben, das die Bodenabdeckung eines Bildes aus dieser Position anzeigt. Ein günstigerer Flugpfad lässt sich oft erreichen, indem das vorgegebene Polygon geringfügig verändert wird. Dies ist durch manuelle Korrekturen möglich. Die Bildüberlappung beträgt standardmäßig 30 %, kann aber wie viele weitere Parameter konfiguriert werden. Diese Software konnte den Planungszeit-aufwand von ca. 20 Minuten pro Flug auf ca. 1,5 Minuten reduzieren.

3.4 Flugsteuerungssoftware

3.4.1 AutoPylot

Die Prozessbeschleunigungsmöglichkeiten bei der Flugassistenzsoftware sind begrenzt, solange die Flugplanung und die Flugführung getrennte Softwarepakete sind. Zum Einen kann bei der Planung beispielsweise nicht auf die `GPS`-Position des Fluggerätes zurückgegriffen werden, um die aktuelle Position des Kopters auf einem geeigneten Kartenausschnitt automatisch anzuzeigen. Zum Anderen erfordert das Exportieren der Flugroute aus dem `WAYPOINTEDITOR` und das Importieren in die `Asctec`-Software eine besondere Aufmerksamkeit des Nutzers, da es einige Handgriffe benötigt um einen Flugpfad korrekt einzupflegen. Durch die Programmierung der Flugassistenzsoftware `AUTOPYLOT`, die sowohl die Flugplanung als auch die Flugführung vereint, konnte ein deutlicher Beschleunigung des Gesamtprozesses Rehkitzrettung erzeugt werden. Die erste Version der Software wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit erstellt [Gra11]. Die Software ist in der Programmiersprache Python geschrieben. Zur Programmierung der grafischen Benutzeroberfläche wurde die in `C++` geschriebene `Qt4`-Bibliothek verwendet, zu der es auch von Python aus eine Anbindung gibt. Der `WAYPOINTEDITOR` ist ein Bestandteil des `AUTOPYLOTS`. Zur Flugplanung benötigt die Software deshalb eine Internetverbindung. Der `AUTOPYLOT` ist während der zweiten Ausbaustufe entstanden. Er eignet sich besonders gut um Rehkitze mit den Suchstrategien I und II zu finden. Zur Erleichterung des Suchprozesses wurde eine erste Version des `SIMPLEFAWNDETECTORS` (siehe Kap. 4.5.2) im `AUTOPYLOT` integriert. Bei günstigen Umgebungsbedingungen detektiert er Rehkitze auf den analogen Thermalbildern. Diese werden auch als Videostream auf der Bedienoberfläche angezeigt (siehe Abb.

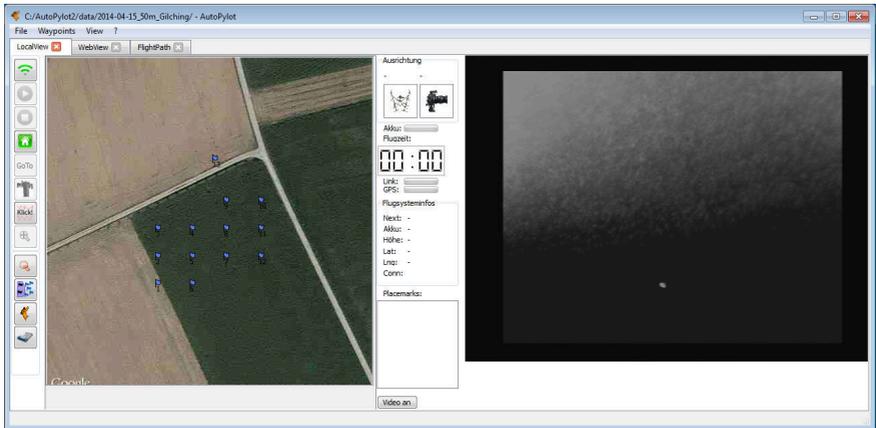


Abb. 3.15: Die Flugassistenzsoftware AutoPilot. Quelle Hintergrundluftbild: Google Maps, GeoBasis-DE/BKG, DigitalGlobe

3.15 rechts). Die Georeferenzierung beschränkt sich auf die Markierung der aktuellen UAV-Position. Fundstellen können manuell gesetzt werden. Eine präzise Georeferenzierung lässt sich erzielen, wenn das Fluggerät auf niedriger Flughöhe mittig über der Fundstelle schwebt. Die Liste der Fundstellen lässt sich auf ein Handheld-GPS-Gerät exportieren. Die Vereinigung aller EDV-basierten Prozessschritte in der AUTOPILOT-Software führt zu einer weiteren Beschleunigung des Gesamtprozesses.

3.4.2 UAV Remote Control

Der folgende Abschnitt enthält viele IT-spezifische Fachbegriffe, die bewusst nicht näher erläutert sind, da sie nur an dieser Stelle benötigt werden. Sie zu erklären, würde den Rahmen dieses Abschnitts sprengen. Die Erfahrungen mit dem AUTOPILOT und der praktischen Einsatz bei der Rehkitzsuche weckten den Bedarf für eine Flugplanungs- und Flugsteuerungssoftware, die so noch nicht verfügbar war. Deshalb entstand die Software UAV-RC (RC steht für Remote Control), deren Besonderheiten im Folgenden näher erklärt werden.

Ein Nachteil des AUTOPILOTS ist die Abhängigkeit einer Internetverbindung zur Flugplanung. Für die meisten Gebiete ist dies zwar unproblematisch, da in Deutschland mittlerweile fast flächendeckend mobiles Internet verfügbar ist. Es gibt aber gerade in hügeliger Landschaft entlegene Stellen, wo zur Datenübertragung nur eine sehr geringe Bandbreite zur Verfügung steht. Die Wartezeiten für den Aufbau

der Webseite des `WAYPOINTEDITORS` übersteigen dann oft 10 Minuten, bevor andere Maßnahmen ergriffen werden, wie zum Beispiel die Flugplanung an einem Ort durchzuführen, an dem eine Internetverbindung mit höherer Bandbreite zur Verfügung steht. Gerade diese Wartezeiten bei der Vorbereitung führen zu einer geringen Flächenleistung des Gesamtsystems. Dieser Grund führte dazu, das Konzept des `AUTOPYLOTS` zu überarbeiten und eine neue Flugassistenzsoftware zu erstellen.

Die neue Flugassistenz-Software trägt den Namen UAV-RC. Da zum Zeitpunkt der Entwicklung dieser Software bereits die dritte Ausbaustufe erreicht war, spielt die analoge Videoübertragung keine Rolle mehr für die Detektion. Anders als der `AUTOPYLOT` ist UAV-RC eine reine Flugplanungs- und Flugsteuerungssoftware. Sie ist deshalb nicht für die Suchstrategie II optimiert, bei der während dem Überflug das analoge Videobild ausgewertet und die Fundstellen markiert werden.

Besonderer Wert wurde auf den generischen Ansatz gelegt, dass sowohl `UAVs` von verschiedenen Herstellern als auch verschiedenes Kartenmaterial (auch Offline-Material) zur Flugplanung verwendbar sind. Es handelt sich bei der Software um ein verteiltes System, bei dem die Module auf mehreren Rechnern verteilt und in unterschiedlichen Programmiersprachen vorliegen können. Die Erfahrung mit dem `AUTOPYLOT` hat gezeigt, dass an sonnigen Tagen nur ein Outdoor-tauglicher Laptop ausreichend Kontrast für die Durchführung eines computergesteuerten Fluges bietet. Das Konzept von UAV-RC erlaubt auch die Verwendung eines Smartphones oder eines Tablets als Benutzerschnittstelle. Diese sind von Haus aus lichtstärker als gewöhnliche Laptops. Dadurch kann auf einen speziell Outdoor-tauglichen Laptop verzichtet werden. Abb. 3.16 zeigt das Komponentendiagramm der UAV-RC Software.

In einer Bachelorarbeit [Men14] wurde neben der Entwicklung wichtiger Kernkomponenten dieser Software auch das Zeitverhalten der Kommunikation zwischen den Modulen untersucht. Es zeigte sich, dass bei einer Aktualisierungsrate von 1 Hz Nachrichten selbst bei 100 angeschlossenen Modulen durchschnittlich nach 25 ms ankamen. Mit dieser Software ist es deshalb möglich, mehrere `UAVs` parallel zu betreiben. Zur Kommunikation über die Netzwerkschnittstelle werden die zwei Mechanismen Publish/Subscribe (`Pub/Sub`) [Tar12] und Remote Procedure Calls (`RPC`) [BN84] verwendet. Die Module kommunizieren mittels dieser beiden Mechanismen über ein wohldefiniertes Kommunikationsprotokoll das die JavaScript Object Notation (`JSON`) [Bra14] nutzt. `JSON` ist wesentlich kompakter als das vergleichbare `XML`-Format, weshalb es weniger Bandbreite zur Übertragung benötigt.

Die Software kann dank der intensiven Nutzung des Publish/Subscribe-Patterns leicht erweitert werden. Sicherheitsaspekte wie z. B. ein Kollisionsschutz können auch in einem nachträglich implementierten Modul Berücksichtigung finden. Die-

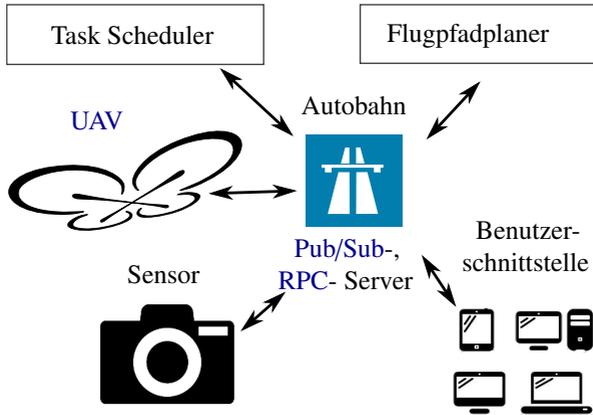


Abb. 3.16: Komponentendiagramm der Flugassistenzsoftware UAV-RC.

ses Modul kann dann die **UAV**-Positions-Nachrichten abhören und dann einschreiten, wenn beispielsweise eine Kollision droht. Die Architektur erlaubt eine Fokussierung auf die Entwicklung von Basisfunktionen. Sie zwingt aber auch zur Separierung von logischen Komponenten in unterschiedliche Module. Die Publish/Subscribe Kommunikation und die Remote Procedure Calls werden über einen zentralen Router registriert und geroutet. Dafür wird **CROSSBAR** und **AUTOBAHN** [Tav14b; Tav14a] verwendet. Die gesamte Hardware kann z. B. aus einem Laptop oder alternativ aus einem Einplatinencomputer (z. B. Raspberry Pi), einem **WLAN**-Router und einem Tablet bestehen.

Die Bedienoberfläche (siehe Abb. 3.17) ist mit Webtechnologien (**HTML5**, **CSS3** und **JavaScript**) entwickelt worden. Sie nutzt eine Karten-Visualisierungsbibliothek, die von vielen Browsern auf verschiedenen Bediengeräten (Tablet, Smartphone, PC) unterstützt wird. Der Nutzer kann damit verschiedene **UAVs** manuell oder automatisiert steuern. Das Hintergrundbild, das wichtig für die Flugplanung – aber auch zur Orientierung des Piloten – ist, kann aus verschiedenen **OGC**-konformen **WMS** (Web Mapping Servern) oder **TMS** (Tile Mapping Server) als Kartenquelle geladen werden. Man kann aber auch ein lokal gespeichertes Orthophoto als Hintergrundbild verwenden. Dadurch ist eine Internetverbindung nicht mehr zwingend nötig [IMK15].

Ein **UAV** Treiber für Asctec-**UAVs** ist bereits in Python implementiert. Mit ihm ist es möglich, das **UAV** von einem Computer aus fernzusteuern. Durch den modularen Aufbau kann die Software auf **UAVs** von anderen Herstellern erweitert werden. Der Task Scheduler steuert automatisierte Flüge. Ein zuvor angelegter Flugpfad wird

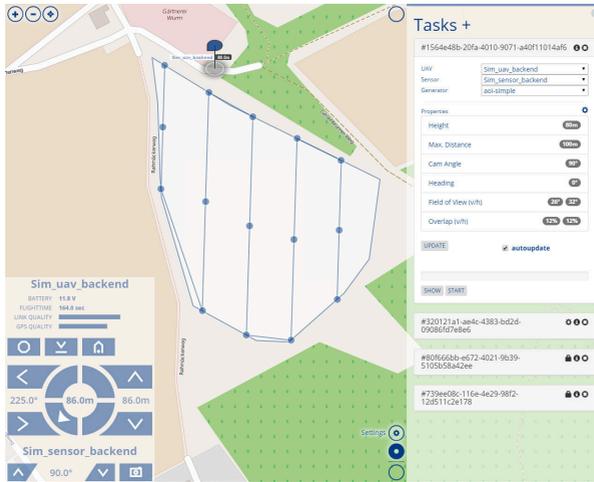


Abb. 3.17: Browserbasierte Benutzeroberfläche des UAV-RC [IMK15]. Quelle Hintergrundkarte: OpenStreetMap

durch ihn abgearbeitet. Eine erste Version eines Flächen-Flugpfadplaners existiert bereits. Aus einem auf einer Karte eingezeichneten Polygon stellt dieser einen Flugpfad her. Er berücksichtigt das Kamera-FOV, die gewünschte Flughöhe über Grund, die prozentuale Überlappung der Bildstreifen und die Orientierung des Fluggeräts für seine Berechnungen. Auch für dieses Modul gilt der generische Ansatz. Die Software ist als Baukastensystem konzipiert, sodass die verschiedenen Module austauschbar sind. Weitere Details zu dieser Software sind in [IMK15] zu finden.

Mit dieser Software ist es nun möglich, in noch kürzerer Zeit den Prozessschritt **Vorbereitung** durchzuführen. Zudem ermöglicht sie einerseits auf einen Laptop und andererseits auf eine Internetverbindung im Feld zu verzichten. Für den praktischen Einsatz sind diese beiden Merkmale eine große Erleichterung. Ohne Laptop entfallen Vorbereitungen wie z. B. Klappstisch im Feld aufbauen und Computer anschließen und hochfahren. Insgesamt bedeutet dies aufgrund der Zeitersparnis eine Erhöhung der Flächenleistung.

3.5 Thermalbildvisualisierung und Fundstellenmarkierung

Bei der Suchstrategie III müssen die erfassten Daten nach dem Flug ausgewertet werden. Hierzu ist eine eigene Software namens **POITAGGER2** entstanden. Abb. 3.18 zeigt die Bedienoberfläche des **POITAGGER2**. Python wurde als Program-

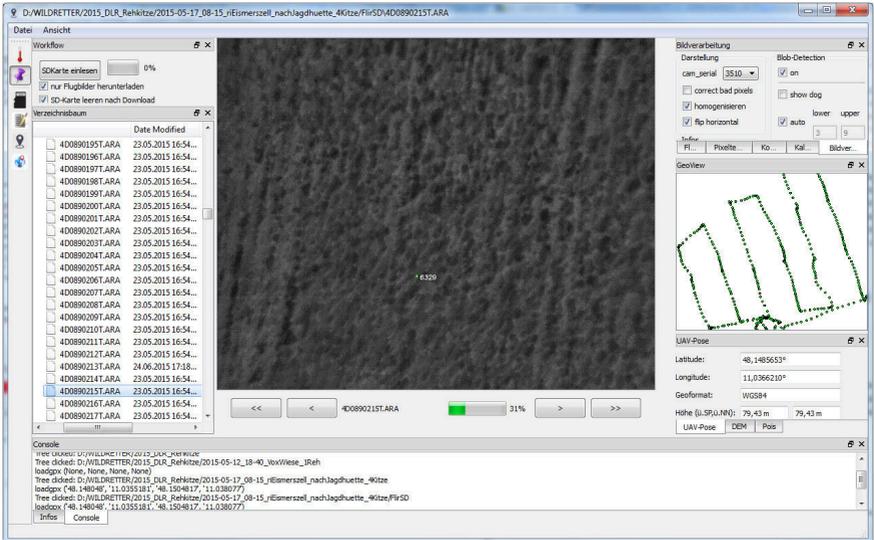


Abb. 3.18: Auswertesoftware **POITAGGER2**

miersprache, **Qt4** als Bibliothek für die grafische Benutzeroberfläche und **OpenCV** als Bibliothek zur Bildverarbeitung verwendet. Die Software verwendet die beiden **GIS**-Bibliotheken **GDAL** und **Proj4**. Damit werden alle gängigen räumlichen Rasterdatenformate und Kartenprojektionen unterstützt. Die Softwarearchitektur hält sich streng an das **Model View Controller** Paradigma. Die vielen optionalen Einstellungen und Informationen können mittels sogenannter **Dockwidgets** ein und ausgeblendet oder in einer selbst definierten Anordnung dargestellt werden.

Der Datenlogger speichert im Sekundentakt Thermalbilder mit den zugehörigen Metadaten ab. Diese können mit der Software eingelesen und vorverarbeitet werden. Alle zu einem Flug gehörenden Daten werden dabei in einem Ordner im Dateisystem abgelegt. Im Vorverarbeitungsschritt werden fehlerhafte Sensordaten korrigiert. Danach können die Bilder entweder visuell oder mit dem eingebauten **SIMPLEFAWNDETECTOR** (aus Kapitel 4.5.2) nach Rehkitzen durchsucht werden.

Die Fundstellen werden mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren georeferenziert. Die Fundstellen speichert die Software in einer **GPX**-Datei. Damit wird der Export auf ein Handheld-**GPS**-Gerät direkt aus dem **POITAGGER2** heraus ermöglicht. Alle **EDV**-basierten Schritte der Prozesskette zur Rehkitzrettung sind damit vollständig abgedeckt. Es ist nun möglich, mit einer der beiden Flugassistenzsoftware-Lösungen (**UAV-RC** oder **AUTOPYLOT**) und dem **POITAGGER2** Rehkitze nach der Suchstrategie III zu finden.

Wenn die Thermalkamera radiometrisch kalibriert ist, kann mit dieser Software auch für jedes Pixel die Temperatur des abbildenden Objektes bestimmt werden. Alle Metadaten eines Bildes sind ersichtlich in dem **UAV-Pose-Dock**widget. Ein Höhenmodell kann aus verschiedenen Quellen geladen werden. Das **GeoView-Dock**widget zeigt den vollständigen Flugpfad in einer Kartenansicht dar. Die Position des aktuellen Bildes wird mit einem roten Punkt dargestellt. Die Kalibrierparameter (geometrisch und radiometrisch) können eingesehen und verändert werden.

3.6 Evaluierung

3.6.1 Wildretter-Datenbank

Der folgende Abschnitt soll einen kurzen Einblick in die Struktur der Datenbasis zur Evaluierung geben. Es wird aber bewusst nicht auf Einzelheiten eingegangen, da das sonst den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Räumliche Daten können in einem Geoinformationssystem (**GIS**) analysiert werden. Um auch sämtliche räumliche Daten, die beim Fliegenden Wildretter erfasst wurden, in eine raumbezogene Analyse einzubeziehen, entstand die Wildretter-Datenbank. Abb. 3.19 zeigt das Datenbankdiagramm der Wildretter-Datenbank. Sie enthält sowohl alle aufgezeichneten Daten des Fluggeräts, als auch sämtliche Metadaten zu den einzelnen Bildern und alle Fundstellen. Implementiert wurde die Datenbank in dem Datenbank Management System PostgreSQL mit der Erweiterung PostGIS (für geografische Objekte und Funktionen). Gemeinsam bilden sie eine Geodatenbank, die in einer **GIS**-Software wie beispielsweise **QGIS** eingebunden werden kann.

Es gibt fünf Haupt-Datenquellen für diese Datenbank: Die Log-Dateien des Fluggeräts, die Thermalbilder und ihre Metadaten, die Ergebnisse der Datenauswertung, manuelle Eingaben und Daten aus **GPS**-Handgeräten. Für alle Datenquellen (außer den manuellen Eingaben) gibt es automatisierte Einleseskripte. Die nachfolgenden zeit- und raumbezogenen Evaluierungen basieren größtenteils auf der Auswertung dieser Wildretter-Datenbank.

Flugplanung lediglich das Fluggerät ausgeladen, die Bodenstation mit dem Laptop verbunden und der Akku des Fluggeräts gewechselt werden. Alles zusammen lässt sich innerhalb von drei Minuten erledigen. Damit liegt die Dauer der Vorbereitung unter 5 Minuten.

3.6.3 Flughöhenabhängige Flächenleistung

Die Flächenleistung eines Fluges hängt von mehreren Faktoren ab. Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.3.1 behandelten Aspekten ist da noch die Flughöhe. Bei gleichem FOV ergibt eine höhere Flughöhe eine größere Schwadbreite und damit eine größere Flächenleistung, weil weniger Bahnen abgeflogen werden müssen. Die maximale Flughöhe wird von den Anforderungen der Detektion bestimmt.

Es wurde an einem relativ windstillen Tag für die Flughöhen 30 m, 50 m und 100 m jeweils eine rechteckige Fläche bei Aufnahmen im WP-Modus abgeflogen. Die Bilder, die jeweils bei den Wegpunkten (WP) aufgenommen wurden, weisen eine Überlappung von 30 % in beiden Richtungen auf. Tabelle 3.2 zeigt die erreichte Flächenleistung bei Aufnahmen im WP-Modus bei den drei verschiedenen Flughöhen jeweils mit einer Akkuladung.

Flughöhe	30 m	50 m	100 m
Uhrzeit	12:00	7:14	11:23
Anzahl Wegpunkte (WP)	73	37	38
Fläche (ha)	1,4	1,8	8,0
Wegpunktflugdauer (min)	10,1	5,4	11,4
Hin- und Rückflug (min)	0,6	1,7	2,2
Flugdauer ges. (min:sec)	10:43	07:08	11:27
WP/min	7,3	6,8	3,3
ha/h	8,4	19,8	42,0
ha/Akku (Flugzeit: 12 min)	1,6	3,6	7,0

Tabelle 3.2: Flächenleistung bei Aufnahmen im WP-Modus bei verschiedenen Höhen (16.5.2013).

Da die Akkus nicht immer die gleiche Kapazität aufweisen, haben die Flüge unterschiedlich lange gedauert. Der Zeitintervall für Hin- und Rückflug kann stark variieren, je nach dem wie weit der erste und letzte Wegpunkt vom Start- bzw. Landeplatz entfernt sind. Deshalb muss für eine Abschätzung der Flächenleistung der Zeitintervall für Hin- und Rückflug gesondert betrachtet werden. Da die Flugzeitintervalle zwischen den Wegpunkten eines Fluges nur eine geringe Varianz aufweisen,

ist es möglich die Flüge trotz unterschiedlicher Dauer bezüglich der Flächenleistung miteinander zu vergleichen. Die Wegpunktflugdauer gibt den Zeitintervall ab dem Erreichen des ersten Wegpunktes bis zum Erreichen des letzten Wegpunktes an und stellt damit die Summe aller Zeitintervalle zwischen den Wegpunkten dar.

Je größer die Flughöhe, umso länger dauert natürlich auch der Auf- und Abstieg. In der Zeile „Hin- und Rückflug“ der Tabelle 3.2 macht sich dieser Einfluss stark bemerkbar. Um eine Flächenleistung auch für Akkus anderer Kapazität abschätzen zu können, wird die Flächenleistung pro Wegpunktflugdauer in der Zeile „ha/h“ angegeben. Bei der Zeile „ha/Akku“ wird eine Flugdauer von 12 Minuten angenommen. Diese Zeile berücksichtigt auch die benötigte Zeit für Auf- und Abstieg. Durchschnittlich beträgt die Steiggeschwindigkeit 2,0 m/s und die Sinkgeschwindigkeit 1,5 m/s.

3.6.4 Aufnahmestrategie

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Flächenleistung hat auch die Aufnahmestrategie. Beim **WP**-Modus muss das Fluggerät an mehr Wegpunkten anhalten, als beim **TL**-Modus. Bei 80 m Flughöhe und einem maximalen Stützstellen-Wegpunkt-Abstand von 100 m sind es etwa doppelt so viele. Beim **TL**-Modus nimmt die Kamera im Sekundentakt Bilder auf, ohne darauf zu warten, dass das Fluggerät auf der Stelle schwebt. Die Tabelle 3.3 zeigt einen Vergleich von zwei Flügen auf 80 m Höhe. Beim einen wurde der **WP**-Modus und beim anderen der **TL**-Modus verwendet. Auf dieser Flughöhe ist die Flächenleistung beim **TL**-Modus

Aufnahmestrategie	WP-Modus	TL-Modus
Datum Uhrzeit	25.5.2013 14:56	20.5.2014 11:39
Anzahl Wegpunkte (WP)	28	29
Fläche (ha)	4,0	11,7
Wegpunktflugdauer (min)	5,5	10,6
Hin- und Rückflug (min)	3,9	2,1
Flugdauer ges. (min:sec)	9:24	12:40
Erzeugte Bilder	28	760
WP/min	5,1	2,7
ha/Akku (Flugzeit: 12 min)	7,6	11,4

Tabelle 3.3: Flächenleistung bei 80 m Flughöhe und unterschiedlichen Aufnahmestrategien.

um 50 % größer als beim **WP**-Modus. Auf niedrigerer Flughöhe ist der Unterschied

noch größer, weil der **WP**-Modus mehr Wegpunkte benötigt, der **TL**-Modus aber nicht. Mit der aktuellen Version des **FALCON 8** könnte man den **TL**-Modus ohne Stützstellen-Wegpunkte bei maximaler Geschwindigkeit fliegen, da er zusätzlich zur Wegpunkt-Flugführung eine Trajektorien-Flugführung unterstützt. Mit dieser sind laut Hersteller die Abweichung deutlich geringer als bei der alten Version mit Wegpunktflug. Dadurch kann die Flächenleistung nochmal deutlich erhöht werden.

Der Flug alleine sagt noch nichts über die tatsächliche Flächenleistung des gesamten Rettungsprozesses aus. Ein ganz wichtiger Aspekt für die Geschwindigkeit des gesamten Suchprozesses ist die benötigte Zeit im Feld, um das Kitz an der besagten Fundstelle zu finden. Bei einer im Überflug über einer Szene entstandenen Aufnahme ist die Georeferenzierung schwieriger als beim Schwebeflug. Es ist aber möglich, trotzdem die Abweichung gering zu halten. Damit beschäftigt sich das Kapitel 5.

Ein besonders wichtiger Aspekt für eine hohe Flächenleistung ist die Präzision der Detektion. Je geringer die Anzahl der Fehlalarme ist, umso weniger Stellen müssen aufgesucht werden. Das Kapitel 4 beschäftigt sich damit, wie bei möglichst großer Flughöhe die Anzahl der Fehlalarme unter der Voraussetzung, dass kein Kitz übersehen wird, minimiert werden kann.

3.6.5 Gegenüberstellung der Suchstrategien

Die Suchstrategie I, wie sie von vielen engagierten Rehkitzsuchern bereits eingesetzt wird [Dem15; Ber15; Blu15] stellt die geringste Anforderung an das System, bietet aber auch die geringste Flächenleistung. Eine sinnvolle Flughöhe bei dieser Strategie liegt bei maximal 50 m. Mit dem **WP**-Modus ist damit theoretisch eine maximale Flächenleistung von 3,6 ha pro Akkuladung bei 12 Minuten Flugdauer möglich. Jede Fundstelle, die genauer betrachtet werden muss, kostet ca. 1 Minute bei einer Sink- und Steiggeschwindigkeit von 1,5 und 2 m/s. Bei sechs Fundstellen reduziert sich die Flächenleistung um die Hälfte. Wenn eine Fundstelle als relevant erachtet wird, läuft bei dieser Strategie eine Person ins Feld an die Stelle, über der das **UAV** schwebt. Bei zügigem Schritt erreicht man eine hundert Meter entfernte Fundstelle nach ca. einer Minute. Mit Hilfe eines Monitors im Feld lässt sich die Fundstelle sehr schnell finden. Allerdings sind auf dem Monitor nur bei Abwesenheit von direkter Sonnenstrahlung die Fundstellen gut erkennbar. Deshalb eignet sich dieses Verfahren am Besten in den frühen Morgenstunden. Wenn die Flugdauer des **UAVs** wie beim **FALCON 8** unter 15 Minuten liegt, ist die Suchstrategie I weniger gut geeignet. Nach eigener Erfahrung passiert es dann häufig, dass zwar eine relevante Fundstelle gefunden wurde, diese aber nicht durch eine Person im Feld aufgesucht werden konnte, weil das **UAV** wegen aufgebrauchter

Akkukapazität landen musste.

Die Suchstrategie II wurde nicht nur vom Autor eingesetzt, sondern auch in [Ban11] favorisiert. Für Fluggeräte mit geringer Flugdauer führt diese Variante zu einer starken Beschleunigung, weil das Aufsuchen der Fundstellen nicht mehr von der Akkukapazität abhängig ist. Allerdings kann die Suche im Feld wieder länger dauern, wenn das Kitz gut versteckt ist, weil keine Wärmebildkamera die Szene zum Suchzeitpunkt von oben betrachtet. Es passiert selten, dass ein Kitz sein Lager verlässt, bevor man sich ihm genähert hat. In der Regel findet man es nur nicht. Gegenüber Strategie III hat diese den Vorteil, dass die Georeferenzierung der Fundstellen sehr zuverlässig ist, wenn das UAV zur näheren Betrachtung auf einer Flughöhe von 10 m schwebt. Durch die geringe Qualität des analogen Videobildes ist man ebenso wie bei der Suchstrategie I auf die Abwesenheit von direkter Sonnenstrahlung angewiesen.

Die Suchstrategie III ist die vom Autor favorisierte Methode. Mit dieser Strategie und der entwickelten Bildvorverarbeitung (wird in Kapitel 4 vorgestellt) ist es möglich Kitze aus 80 m Höhe bei jeder Tageszeit mit einer durchschnittlichen Trefferquote von 91 % zu finden. Bei Abwesenheit der Sonne findet der SIMPLEFAWNBDETECTOR die Kitze zuverlässig. Bei stärkerer direkter Sonnenstrahlung kann die automatische Detektion nicht mehr verwendet werden, da sie dann zu viele Kitze übersieht. Mittels visueller Detektion ist aber auf den vorverarbeiteten Rohbildern eine Detektion selbst bei Mittagssonne und 36 °C im Schatten möglich. Die Einlernzeit, um Rehkitze selbst bei schwierigen Verhältnissen auf den Thermalbildern zu erkennen, beträgt ca. 4 Stunden unter realen Einsatzbedingungen im Feld. Die Suchstrategie III ermöglicht unter allen Suchstrategien die mit Abstand höchste Flächenleistung. Da die Wiesenflächen in der eingesetzten Region durchschnittlich ca. 3 ha groß sind, kann mit dieser Strategie selbst ein UAV mit geringer Flugdauer nahezu jede Wiese mit einer Akkuladung abfliegen. In der Rehkitzsaison 2015 konnten mit dieser Strategie nahezu alle Wiesen in zwei benachbarten Jagdrevieren direkt vor der Mahd mit nur einem Fluggerät abgesucht werden. Die beiden Reviere haben eine Gesamtfläche von ca. 1700 ha, wovon ca. 10 % Wiesenflächen waren, die zur Mahd anstanden. Die Wiesen konnten im Halbstundentakt abgesucht werden. Sobald die Koordinaten auf ein Handheld-GPS-Gerät übertragen wurden konnte der Pilot die nächste Wiese absuchen, während eine weitere Person die Fundstellen aufgesucht und die Rehkitze aus der Wiese getragen hat. Das bedeutet, die Prozessschritte Vorbereitung, Flug und Auswertung der Daten konnten dank der entwickelten Softwareprogramme für eine Wiese in der Regel innerhalb von 30 Minuten durchgeführt werden.

Die Suchstrategie IV ist ohne eine hohe Trefferquote eines automatischen Mustererkenners nur bei Abwesenheit der Sonne einsetzbar. Solange es noch keinen Mustererkenner gibt, der selbst bei schwierigsten Bedingungen keine Kitze mehr

übersieht, ist diese Methode stets der Suchstrategie III hinsichtlich der Trefferquote aber auch hinsichtlich der Flächenleistung unterlegen. Der hohe Entwicklungsaufwand, der für die Suchstrategie IV nötig ist, lässt sich dann nicht rechtfertigen.

Jahr	Suchstrategie	Flughöhe	Modus	Kitze ⁸	Fläche A (ha)	Flugzeit t	A/t (ha/h)
2012	II	50 m	WP	7 (?)	25	5,5 h	4,5
2013	II, III	50/80 m	WP	21 (?)	89	8,5 h	10
2014	III	80 m	TL	30 (3)	230	10,5 h	22
2015	III	80 m	TL	39 (3)	171	8,5 h	20

Tabelle 3.4: Statistik über die Rehkitzfunde und die Flächenleistung des Prozessschrittes **Flug**.

Da das System in mehreren Ausbaustufen entwickelt wurde, können die Strategien anhand der Kampagneneinsätze verglichen werden. Im ersten Jahr, als die Suchstrategie I angewendet wurde, gab es zu wenige Einsätze und das Team war noch nicht eingespielt, weshalb keine belastbare Statistik erzeugt werden kann. Für die anderen Strategien gibt die Tabelle 3.4 einen guten Überblick über die Leistung der jeweiligen Strategie. In den Jahren 2012 und 2013 wurden die Wiesen noch nicht im Anschluss gemäht, deshalb gibt es keine Zahlen für die Mähopfer. Die letzte Spalte gibt die Flächenleistung nur bezogen auf die aus dem Flugschreiber entnommene vollständige Flugzeit der jeweiligen Saison an.

3.7 Zusammenfassung

Verschiedene Suchstrategien, um Rehkitze in Wiesen mit einem UAV mit Thermalkamera zu finden, wurden entwickelt und anhand von Kampagneneinsätzen validiert. Die höchste Flächenleistung wurde bei der Suchstrategie III erreicht, bei der das System auf einer Flughöhe von 80 m vollautomatisch gesteuert von der entwickelten Flugsoftware UAV-RC bzw. AUTOPILOT die Wiese abfliegt und im Sekundentakt 14-Bit-Rohbilder aufnimmt. Eine semiautomatische Auswertung findet nach dem Flug mit der entwickelten Software POITAGGER bzw. POITAGGER2 statt. Der darin integrierte SIMPLEFAWNDETECTOR, der noch in Kapitel 4 vorgestellt wird, findet bei Abwesenheit von direkter Sonnenstrahlung die Kitze vollautomatisch. Bei stärkerer Sonnenstrahlung muss auf den SIMPLEFAWNDETECTOR verzichtet werden. Es können aber dank der entwickelten Bildvorverarbeitung (ebenfalls Kapitel 4), visuell selbst bei Mittagssonne mit wolkenlosem

⁸ gefundene Kitze, vermähete Kitze stehen in Klammern

Himmel und 36 °C im Schatten Kitze gefunden werden. Die maximal erzielte Flug-Flächenleistung beträgt 11,4 ha pro Akkuladung bei einer Flugdauer von 12 Minuten.

In der Rehkitzsaison 2015 wurden mit dem entwickelten Fliegenden Wildretter in zwei benachbarten Jagdrevieren mit einer Gesamtfläche von 1700 ha nahezu alle Wiesen vor der Mahd abgesucht. Dabei konnten 39 Kitze vor dem Mähtod bewahrt werden. Die drei vermähnten Kitze konnten alle auf den Thermalbildern nachträglich auch entdeckt werden. Damit erzielt das System im Vergleich zu allen in dieser Dissertation genannten Verfahren zur Rehkitzsuche die mit Abstand größte Flächenleistung und die höchste Detektionssicherheit bei Sonnenschein.

4 Rehkitz-Detektion in Thermalbildern

Ein Rehkitz in der Wiese mit dem bloßen Auge zu finden, ist keine einfache Aufgabe. Im Spektralbereich des sichtbaren Lichts ist es sehr gut getarnt. Wesentlich leichter fällt die Detektion im Spektralbereich des thermalen Infrarots. Die beiden Bilder in Abbildung 4.1 zeigen die gleiche Szene – ein Getreidefeld in dem sich ein Rehkitz befindet – aufgenommen von einem UAV aus 10 m Flughöhe. Links ist das Bild einer Farbkamera und rechts das Bild einer Thermalkamera zu sehen. Der helle Fleck auf dem Thermalbild ist ein sehr sicheres Indiz für ein Rehkitz. Löcher im homogenen Bestand dagegen, wie in dem Farbbild zu sehen, existieren sehr häufig und haben oft auch andere Ursachen.

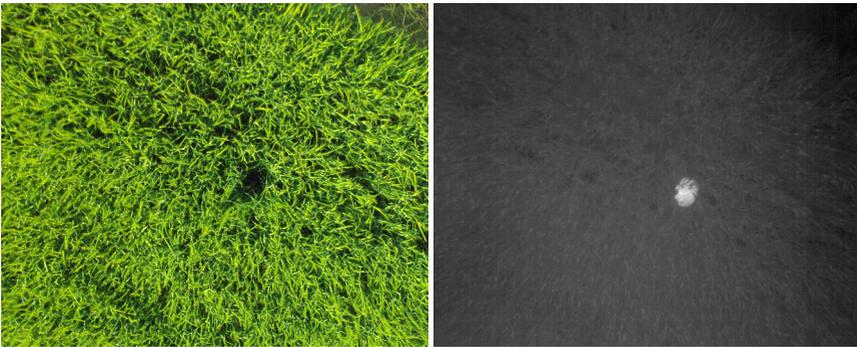


Abb. 4.1: Gegenüberstellung eines Farbbildes zu einem Thermalbild (Spektralbereich 8 - 14 μm) von einem Getreidefeld, in dem ein Rehkitz liegt. Aufnahmehöhe: ca. 10 m

Rehkitze emittieren Infrarotstrahlung mit einer höheren Temperatur als ihre direkte Umgebung. Bei Abwesenheit der Sonne gibt es nur sehr wenige warme Objekte mit der Größe eines Rehkitzes in einer Wiese. Beispiele hierfür sind andere Tiere wie Hasen und Katzen. Nachts oder bei bedecktem Himmel ist es deshalb besonders einfach, diese zu finden. Eine große Herausforderung ist es dagegen tagsüber, wenn

die Sonne auch Maulwurfhügel, kahle Stellen oder andere Objekte in der Wiese erwärmt.

Dieses Kapitel stellt zunächst die Besonderheiten bei der Klassifizierung von Rehkitzen vor. Danach werden alle relevanten Merkmale analysiert, die auf das Vorhandensein von Rehkitzen deuten. Bei der Thermalbilderaufnahme spielen darüber hinaus äußere Faktoren wie beispielsweise die Sonnenstrahlung oder die Temperatur von anderen Objekten im Bild eine wichtige Rolle. Diese Einflussgrößen wurden anhand von Kampagnendaten analysiert. Es folgt ein Unterkapitel, das die kamerainternen Einflussgrößen auf die Detektion behandelt. Am Ende werden die entwickelten Verfahren zur Bildvorverarbeitung und ein entwickelter Algorithmus zur automatischen Detektion vorgestellt und evaluiert.

4.1 Klassifizierung von Rehkitzen

Rehkitze in der Wiese zu finden, kann vereinfacht als binäre Klassifizierungsaufgabe mit den zwei Klassen „Rehkitz vorhanden“ und „Rehkitz nicht vorhanden“ dargestellt werden. Allerdings muss man bei der Klassifizierung noch einige Besonderheiten berücksichtigen. Obwohl man in erster Linie Rehkitze sucht, darf der Fund anderer Tiere nicht als Fehlalarm gewertet werden. Sie können ebenfalls durch die Mähmaschinen verunglücken. Zwar haben sie nicht den angeborenen Drückinstinkt, sind aber manchmal auch nicht schnell genug, der Mähmaschine zu entkommen. Außerdem gibt es Fälle, bei denen eine Ricke die Sicht auf ihr Kitz verdeckt, während dieses gerade gesäugt wird. Schließt man adulte Rehe auf Grund ihrer Größe von der Detektion aus, werden diese Kitze übersehen. Wenn aber umgekehrt ein adultes Reh übersehen wird, stört es weniger, denn diese laufen vor dem Mähwerk davon. Ebenso ist es mit den Hasen. Es muss also bei der Beurteilung des Klassifikators zwischen den Tieren unterschieden werden.

In der Konfusionsmatrix (Tabelle 4.1) lässt sich die unterschiedliche Behandlung der Funde leicht veranschaulichen. Gefundene Rehkitze, ausgewachsene Rehe und Hasen gelten als richtig positiv. Nur übersehene Kitze zählen als falsch negativ. Vermeintliche Rehkitze wie beispielsweise Erdhügel oder kahle Stellen im Gras zählen als falsch positiv.

Bei der Detektion eines jungen Rehkitzes, kann meistens überprüft werden, ob das Kitz tatsächlich an der besagten Stelle liegt. Sofern es jünger als 3 Wochen ist, verharrt es bei Gefahr an seiner Position. Deshalb ist der Fall richtig positiv – nach Überwindung des Lokalisierungsproblems (Kapitel 5) – leicht zu überprüfen. Schwieriger ist es bei Hasen und adulten Rehen. Da die in Frage kommenden falsch positiven Alternativen (Erdhügel und sonstige warme Stellen) allerdings ortsfest

	vorhanden	nicht vorhanden
detektiert	richtig positiv Kitz, Reh, Hase	falsch positiv (Erdhuegel, ...)
nicht detektiert	falsch negativ Kitz	richtig negativ

Tabelle 4.1: Die Behandlung der Funde, dargestellt in einer Konfusionsmatrix.

sind, können auch diese Fälle überprüft werden. Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Überprüfung des falsch negativ Falls. Da es bisher für den Menschen auch bei größter Sorgfalt sehr schwierig ist, die versteckten Kitze in einer hohen Wiese zu finden, können die falsch negativ Fälle nur sicher ausgeschlossen werden, wenn die Wiese tatsächlich im Anschluss an die Suche gemäht wird. Das kann allerdings in der kritischen Zeit zwischen Mai und Juni pro Wiese höchstens einmal geschehen, weshalb die Trainingsmenge mit bestätigten falsch negativ Fällen sehr gering ausfällt. Der richtig negativ Fall ist bei dieser Klassifizierungsaufgabe nicht zählbar, denn alles, was kein Kitz ist, gehört dazu.

Es gibt noch eine weitere Besonderheit bei der Bewertung des Klassifikators in diesem Kontext. Der Fliegende Wildretter nimmt von der gleichen Szene mehrere Bilder aus unterschiedlichen Positionen auf. Es ist zu erwarten, dass ein Kitz nicht auf allen Bildern der Szene zu erkennen ist. Es reicht aber auch aus, wenn nur auf einem einzigen Bild das Kitz gefunden wurde. Eine Stichprobe ist demzufolge nicht das einzelne Bild, sondern immer eine Serie von Bildern, mit variabler Länge. Abhängig vom Flugpfad und der Lage im Bild wird das Kitz auf unterschiedlich vielen weiteren Bildern zu sehen sein.

Da jedes übersehene Kitz möglicherweise vermäht wird, ist die Trefferquote bzw. die Sensitivität oder der *Recall* (siehe im Anhang A.3) für die Rehkitzdetektion der wichtigste Parameter. Er stellt die Anzahl der gefundenen Kitze allen vorhandenen Kitzen gegenüber, dabei sind alle Kitze: die gefundenen plus die übersehenen. Die Relevanz bzw. *Precision* gibt das Verhältnis von richtig erkannten Kitzen zu allen als Rehkitz detektierten an. Das sind vorhandene Kitze plus Fehlalarme.

In einem Precision-Recall-Diagramm liegt der gewünschte Arbeitsbereich ganz rechts. Die Höhe des *Precision*-Wertes ist hier zweitrangig. Bei der Optimierung des Klassifikators muss die *Precision* maximiert werden unter der Voraussetzung,

dass der *Recall*-Wert nahe eins liegt (siehe Abb. A.2 im Anhang).

4.2 Rehkitzmerkmale

Die wichtigsten Merkmale, die auf das Vorhandensein eines Rehkitzes hindeuten, werden im folgenden Abschnitt analysiert. Auf die Merkmale, die auf Thermalbildern ersichtlich sind, wird besonders eingegangen. Die Klassifizierung lässt sich durch das hinzu ziehen weiterer Merkmale verbessern. In diesem Abschnitt finden deshalb indirekte Merkmale die in Zukunft möglicherweise mit zusätzlichen Verfahren erfasst werden können, ebenfalls Berücksichtigung.

4.2.1 Temperaturdifferenz

Normalerweise sind Rehkitze wärmer als ihre Umgebung. Es ist naheliegend anzunehmen, dass die absolute Strahlungstemperatur ein geeignetes Merkmal sein könnte. Um diese von lebendigen Rehkitzen zu bestimmen, wurden Bilder von zehn verschiedenen Rehkitzen aus kurzer Entfernung bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen an ihrem Fundort aufgenommen. Dazu wurde eine radiometrisch kalibrierte Thermalkamera verwendet. Der Emissionsgrad der Kitze und dessen Umgebung wurde auf 0,95 geschätzt. Drei der Bilder sind in Abb. 4.2 zu sehen. Die Temperatur der Rehkitze wurde grob bestimmt, indem auf jedem Thermalbild ein elliptischer Messbereich ausgewählt wurde, der das unverdeckte Rehkitz zeigt. Für die Wiesenumgebungstemperatur wurde ebenfalls ein repräsentativer Bereich ausgewählt. Die Minimal-, Maximal- und die Durchschnittstemperatur der beiden Bereiche wird in jedem Thermalbild angezeigt. Die Grashalme, die in den Kitzbereich hineinragen, verfälschen den Minimalwert der Rehkitztemperatur. Der Durchschnittswert wird aufgrund der wenigen betroffenen Pixel nur geringfügig verfälscht. Die Messungen aller zehn Rehkitzbilder sind in dem Diagramm 4.3 zusammengefasst.

Die Strahlungstemperatur variiert sehr stark mit der Strahlung der Sonne. Rehkitze liegen manchmal im Schatten und manchmal in der prallen Sonne. So kommt es, dass die Strahlungstemperatur eines lebendigen Rehkitzes zwischen 19 °C und 53 °C sein kann. Auch die Umgebung des Rehkitzes variiert mit der Strahlung der Sonne. Vitale Vegetation kann allerdings einen Teil der Strahlung durch Photosynthese in chemische Energie umwandeln. Die Pflanzen heizen sich deswegen und wegen ihrer Fähigkeit der Transpiration weniger stark auf als das Fell eines Rehkitzes. Auf den drei Beispielbildern liegt der Durchschnitt der Wiesenumgebung zwischen 11 °C und 27 °C. Ein fester Temperatur-Schwellwert trennt deshalb

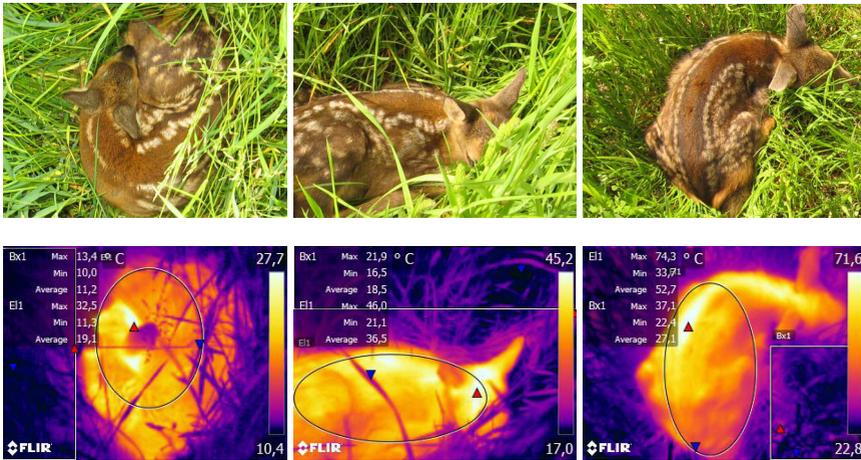


Abb. 4.2: Farb- und Thermalbilder von Rehkitzten aus 1,2 m Distanz. Die Oberflächentemperatur eines in der Wiese liegenden Rehkitzes kann stark variieren. Das linke Bild wurde früh am Morgen aufgenommen. Die Wiese hatte eine Strahlungstemperatur von ca. 11 °C, die Temperatur des Kitzes war im Durchschnitt 19 °C. Das Bild in der Mitte wurde an einem leicht bewölkten Tag um 14 Uhr aufgenommen. Die Strahlungstemperatur des Kitzes erreichte bis zu 46 °C. Das Bild ganz rechts wurde an einem sonnigen Tag um 12 Uhr Mittags aufgenommen. Das Fell des Kitzes, das in der prallen Sonne lag, war an manchen Stellen 74 °C heiß.

Rehkitze nicht eindeutig von ihrer Umgebung. Die Temperaturdifferenz zwischen einem Rehkitz und seiner direkten Umgebung ist hingegen ein gutes Merkmal. Sie variiert weniger stark als die Absoluttemperatur und ergab bei den zehn Messungen mindestens 7 °C. Um ein Rehkitz nicht zu übersehen, reicht es in der Regel aus, diejenigen warmen Stellen in der Größe eines Rehkitzes zu finden, die einige Grad wärmer als ihre direkte Umgebung sind.

4.2.2 Größe, Form und Verdeckung eines Rehkitzes

Fluchtfähige Rehkitze findet man oft alleine eingerollt wie in Abb. 4.1 oder 4.2 links. Der Durchmesser eines eingerollten Rehkitzes beträgt etwa 30 cm. Wenn die intrinsischen und extrinsischen Parameter der Kamera und das Höhenmodell der Wiese bekannt sind, kann die erwartete Kitzgröße für jedes Pixel auf dem Bild errechnet werden. Der einfachste Fall liegt vor, wenn die optische Achse der Kamera

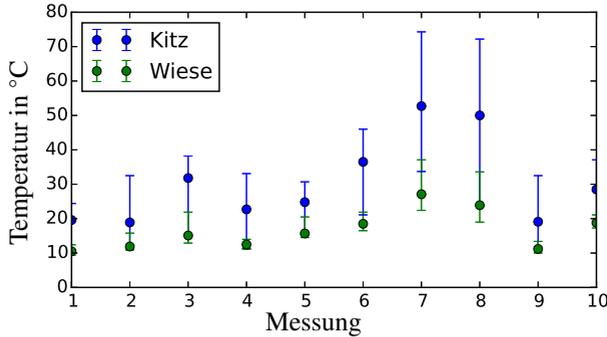


Abb. 4.3: Durchschnittsstrahlungstemperaturen der zehn Rehkitze und ihrer Wiesenumgebung. Die Fehlerbalken markieren die Mindest- und Maximaltemperatur der Pixel in der jeweiligen Messfläche.

Richtung Nadir ausgerichtet ist, die Wiese mit einer waagrechten Ebene modelliert werden kann und das vollständig unverdeckte Kitz in der Nähe des Zentralpixels zu sehen ist. Dann wird das Kitz der Größe D_k auf dem Bild näherungsweise folgenden Durchmesser in Pixeln besitzen:

$$d_k = \frac{D_k \cdot c_k}{h_f \cdot s}, \quad (4.1)$$

mit der Kamerakonstante c_k und der Detektorelementseitenlänge s . In diesem Fall kann für h_f direkt die Flughöhe des UAVs verwendet werden. Bei Wiesen in Hanglagen liegt die betrachtete Szene oft nicht auf gleicher Höhe wie der Startpunkt des UAVs. Dann wird ein aufwendigeres Höhenmodell benötigt, um die tatsächliche Distanz zwischen Kamera und Objekt (Berechnung siehe Kap. 3.3.1) und damit die erwartete Kitzgröße auf dem Bild zu errechnen. Mit

$$A_k = \pi \cdot \left(\frac{d_k}{2}\right)^2 \quad (4.2)$$

und Gleichung 4.1 errechnet sich die Fläche A_k eines kreisförmig eingerollten Kitzes mit 30 cm Durchmesser aus 80 m Flughöhe, mit einer Brennweite von 19 mm und einer Pixelseitenlänge von $17 \mu\text{m}$ aufgerundet zu 14 Pixeln.

In Abb. 4.4 sind zwölf Ausschnitte aus Thermalbildern der Messkampagne 2015 mit 14 der 44 Kitzte und einem Hasen aus dieser Flughöhe zu sehen. Die obere Reihe zeigt die einfacheren Fälle mit starkem Kontrast. Beim dritten Bild war das Kitz etwas älter, es lag nicht in der klassischen eingerollten Pose da, sondern ausgestreckt. Auf dem vierten Bild in der oberen Reihe sind zwei Kitzte zu sehen. Der

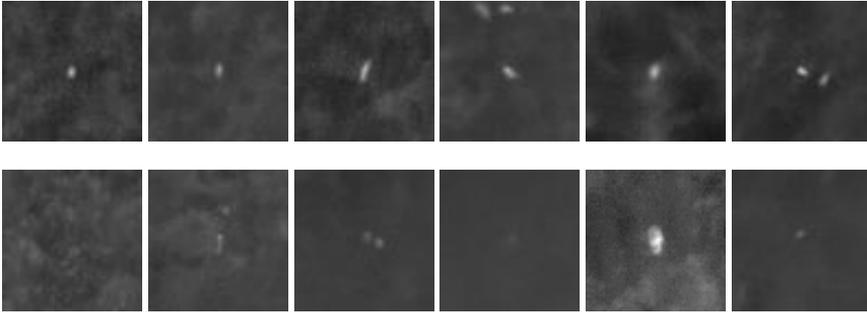


Abb. 4.4: Thermalbildausschnitte mit 64×64 Pixeln. Hier sind 14 der 44 Rehkitze und ein Hase zu sehen, die bei der Kampagne 2015 in den überflogenen Wiesen lagen. Die Bilder wurden aus 80 m Flughöhe aufgenommen.

weiße Fleck oben links ist ein Lager. Das letzte Bild in der oberen Reihe zeigt den Hasen links und seine Sasse – der Platz an dem er lange Zeit saß – rechts. Lager oder Sassen sind normalerweise etwas kälter als die Tiere und erscheinen deshalb etwas weniger hell auf den Thermalbildern. Einen ausgewachsenen Hasen von einem Reh zu unterscheiden ist äußerst schwierig. Einziges Unterscheidungsmerkmal ist, dass Hasen sich nicht einrollen und deshalb auf den Bildern etwas länglich erscheinen. Ein Hase flieht sobald man sich auf eine Distanz von 5 – 10 m nähert, aber trotzdem gelingt es den Hasen manchmal nicht der Mähmaschine zu entkommen, deshalb sollte auch ein Hase vor der Mahd verjagt werden.

Die untere Reihe in Abb. 4.4 zeigt die schwierigeren Fälle. Beim ganz linken Bild war das Kitz vollständig von den Blättern eines Sauerampfers verdeckt. Das zweite Bild zeigt ein laufendes Kitz (länglicher Strich) und ein eingerolltes (kleiner Punkt etwas oberhalb). Der geringe Kontrast ist bei diesem Bild auf die hohe Umgebungstemperatur zurückzuführen. Beim dritten Bild sind wieder zwei Kitze zu sehen. Der Kontrast im vierten Bild ist sehr gering, weil der Shutter der Kamera bei der Gleichförmigkeitskorrektur (siehe Abschnitt 4.4.2) hängen geblieben ist. Das fünfte Bild zeigt eine Ricke liegend. Direkt unterhalb ist ein Kitz zu sehen, das gerade den Kopf zu seiner Mutter hin reckt. An den Thermalbildausschnitten erkennt man die Variation der Form eines Rehkitzes und die damit verbundene Schwierigkeit der Detektion.

Bei Aufnahmen, bei denen das Kitz nicht im Zentrum des Bildes, sondern im Randbereich abgebildet wird, kommt erschwerend die Verdeckung durch die Vegetation hinzu (siehe Kap. 3.2.3). Das Problem der Verdeckung wird minimiert, wenn die Kamera beim Überflug mehrmals auslöst. Durch die Positionsänderung der Kame-

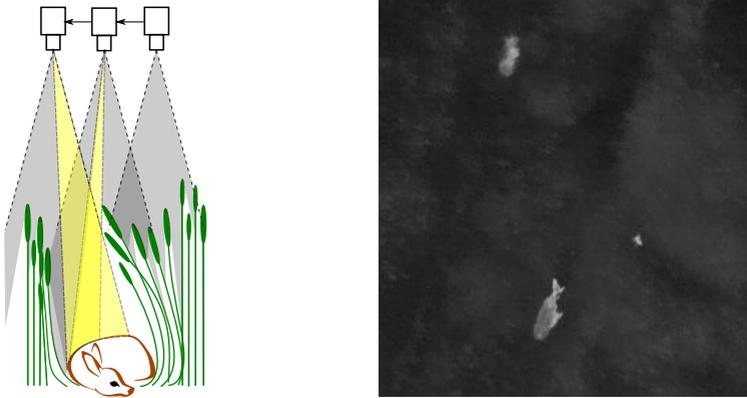


Abb. 4.5: Verdeckung eines Rehkitzes. Links: Durch die rein translatorische Positionsänderung der Kamera verändert sich der Blickwinkel auf das Kitz und auch der Grad der Verdeckung durch das Gras. In gelb ist jeweils der Bereich des FOV der Kameras markiert, der das Rehkitz erfasst. Rechts: Ricke, die gerade ein Kitz säugt. Die beiden Hinterläufe und der Körper des Kitzes luken rechts unter der Ricke als hellerer Fleck hervor. Das warme Lager der Ricke (etwas oberhalb) und des Kitzes (rechts) ist noch zu sehen. Dieses Bild wurde aus einer Flughöhe von ca. 20 m aufgenommen.

ra verändert sich der Blickwinkel auf das Kitz (siehe Abb. 4.5 links). Der Grad der Verdeckung variiert dadurch. Die überlappenden Bilder ermöglichen somit auch, ein einseitig stark verdecktes Kitz zu detektieren. Es passiert selten, dass ein Kitz aus allen Richtungen vollständig von der Vegetation derart verdeckt wird, dass auf allen von dieser Szene aufgenommenen Thermalbildern kein warmer Fleck zu sehen ist. Bei der Kampagne 2015 gab es einen solchen Fall (siehe Abb. 4.4 unten ganz links). Das Rehkitz, das gut versteckt im Schatten eines großen Sauerampfers lag, wurde von einem Vorstehhund entdeckt. Mit Hilfe der GPS-Position konnte der Bereich auf den Thermalbildern eingegrenzt werden. In diesem Bereich war allerdings die Temperatur sehr homogen und kein Anzeichen für eine warme Stelle.

Manchmal wird das Kitz gerade von seiner Mutter gesäugt (siehe Abb. 4.5). Dann verschmilzt die Silhouette des Kitzes mit der des Muttertiers. Damit auch diese Kitze nicht übersehen werden, darf nicht nur nach warmen Objekten mit der Größe eines Kitzes gesucht werden, sondern es muss auch nach warmen Objekten mit der Größe eines ausgewachsenen Rehs gesucht werden.

4.2.3 Indirekte Merkmale

Die Anzahl der Rehkitze, die sich in einer Wiese aufhalten, hängt von vielen Faktoren ab. Einerseits von der Rehwildpopulation, andererseits von der Attraktivität der Fläche für die Ricke. Dabei geht es hauptsächlich darum, die Überlebenschance ihrer Kitze zu maximieren. Die Bewuchsart und -höhe ist beispielsweise entscheidend für die Tarnung und die Fluchtmöglichkeit vor Fressfeinden. Kitze in Wiesen an Südhängen erfrieren weniger leicht [Kur02]. Es gibt noch viele weitere Faktoren, die die Attraktivität einer Fläche beeinflussen. Das Territorialverhalten der Ricken verursacht allerdings, dass die Anzahl der Kitze auf einer Fläche nach oben hin begrenzt wird.

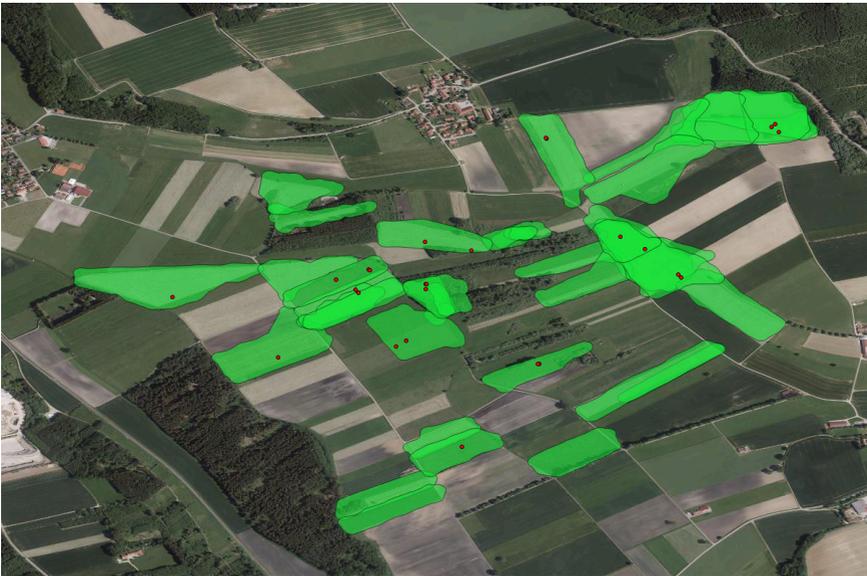


Abb. 4.6: Rehkitzpositionen (rote Punkte) auf den mit dem Fliegenden Wildretter abgesuchten Flächen (hellgrün) bei der Kitzkampagne 2015. Dargestellt ist ca. 50 % der abgesuchten Fläche. Der Ausschnitt zeigt einen Bereich der beiden Jagdreviere Hausen und Walleshausen. Die Wiesen wurden im Anschluss an die Suche gemäht. Übersehene Kitze wurden bei der Mahd entdeckt. Dadurch können falsch negativ Fehler ausgeschlossen werden. Quelle Luftbild: DOP 200, Bayerische Vermessungsverwaltung.

Um einen Anhaltswert für die Kitzhäufigkeit pro Wiesenfläche zu erhalten, wird die Kampagne 2015 als Vergleich herangezogen. Bei dieser Kampagne wurden

ca. 90 % der Wiesenflächen, die in den Jagdrevieren Walleshausen und Hausen bei Geltendorf zur Mahd anstanden, zuvor mit dem Fliegenden Wildretter abgesucht und alle Rehkitzfunde dokumentiert.

Es wurden 57 Wiesenflächen mit insgesamt 171 ha abgesucht. Eine Wiese hat damit durchschnittlich 3 ha. Es wurden 43 Kitze gefunden und zwei übersehen. Manche der Kitze wurden mehrmals gefunden. Zum Einen, weil die Rehkitze in eine neue Fläche umziehen mussten, wenn die alte bereits abgemäht wurde und zum Anderen, weil ca. 10 ha der Wiesenflächen zweimal überflogen wurden. Für die Berechnung der Fundhäufigkeit spielt dies allerdings keine Rolle, denn auch wenn ein Rehkitz mehrmals gefunden wird, so muss es doch vor jeder Mahd erneut gerettet werden. Auf 23 der 57 Wiesenflächen, also bei 40 % der Wiesen wurden Kitze gefunden. Pro Hektar lag der Durchschnitt bei 0,26 Rehkitzen. Bei gleich verteilter Rehkitzpopulation würde man auf ca. zwei Drittel der Wiesen ein Rehkitz vermuten. Ricken gebären meistens zwei Kitze [Mue99] und diese liegen normalerweise innerhalb einer Distanz von ca. 100 m zueinander. Dies erklärt die lokale Anhäufung der Rehkitze auf nur 41 % der Wiesenflächen. Die Karte in Abb. 4.6 zeigt einen Ausschnitt der in 2015 überflogenen Wiesen (hellgrüne Flächen). Die roten Punkte stellen die Positionen der gefundenen Rehkitze dar. Die lokale Anhäufungen sind hier gut ersichtlich. Es gab acht Wiesen, auf denen genau ein Rehkitz und 15 Wiesen auf denen mehr als ein Rehkitz gefunden wurde. Wenn bei der Suche auf einer Wiese bereits ein Kitz gefunden wurde, ist es also nicht unwahrscheinlich, noch ein weiteres zu finden.

Ein Kitzlager wie das in Abb. 4.7 ist ein weiterer Hinweis auf das Vorhandensein von Rehkitzen. In solchen Lagern liegen die Rehkitze für ein paar Stunden, dann



Abb. 4.7: Ein verlassenes Rehkitzlager deutet darauf hin, dass in der Wiese Rehkitze liegen könnten.

werden sie gesäugt und legen sich an eine andere Stelle in einem Umkreis von

einigen Metern. So entstehen die auffälligen Unregelmäßigkeiten in der sonst oft homogenen Wiese. Die Lager bleiben einige Tage erkennbar, aber leider nur aus nächster Nähe. Im Thermalbild sind die Lager nur bei Sonnenschein erkennbar, wenn das Gras trocken oder am Boden die Erde sichtbar ist. Im Jahr 2013 wurde eine Erhebung bei 102 abgesuchten Wiesen durchgeführt. Es wurden neben der Anzahl gefundener und vermählter Kitz dabei auch einige Parameter über die Wiesenbeschaffenheit erfasst. Die gefundenen Lager wurden ebenfalls dokumentiert. Dabei gab es drei Einteilungen: Keine, wenige ($< 5/\text{ha}$) und viele ($5/\text{ha}$ und mehr) Lager. Die Tabelle 4.2 zeigt die Anzahl der Wiesen und der darauf entdeckten Rehkitze sortiert nach der Häufigkeit der gefundenen Lager auf den jeweiligen Wiesen.

Lager	0/ha	$< 5/\text{ha}$	$\geq 5/\text{ha}$
Anzahl der Wiesen	26	38	38
Kitzfunde	17	36	54
Wiesen mit Kitzen	38 %	61 %	66 %

Tabelle 4.2: Rehkitzfunde aus dem Jahr 2013 in Bezug gesetzt mit der Anzahl an Lagern in der jeweiligen Wiese.

Die letzte Zeile der Tabelle setzt diejenigen Wiesen einer Spalte, auf denen Kitz gefunden wurden in Relation mit der Gesamtanzahl an Wiesen dieser Spalte. Wenn eine Wiese mehrere Kitz beheimatet, wird diese nur einfach gezählt. Dadurch sind trotz unterschiedlicher Stichprobenanzahl die Werte vergleichbar. Wenn keine Lager gefunden wurden, so lagen in 38 % der Wiesen trotzdem Kitz darin. Wenn viele Lager gefunden wurden, lag in 66 % der Wiesen auch mindestens ein Kitz darin.

Bei dieser Erhebung wurde auch die Bewuchshöhe jeder abgesuchten Wiese dokumentiert. Die Tabelle 4.3 zeigt die Anzahl der Wiesen und Kitzfunde sortiert nach der Bewuchshöhe der jeweiligen Wiese. Die Erhebung deutet darauf hin, dass eine

Bewuchshöhe	30 cm	50 cm	70 cm	$> 80 \text{ cm}$
Anzahl der Wiesen	9	32	40	21
Kitzfunde	5	39	43	20
Wiesen mit Kitzen	44 %	63 %	55 %	57 %

Tabelle 4.3: Rehkitzfunde aus dem Jahr 2013 in Bezug gesetzt mit der Bewuchshöhe der jeweiligen Wiese.

Bewuchshöhe von 50 cm von den Rehen favorisiert wird, denn anteilig lagen die

meisten Kitze in Wiesen mit einer Bewuchshöhe von ca. 50 cm. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass sich in Wiesen mit geringer Bewuchshöhe durchaus Kitze befinden können. Immerhin in 44 % der Wiesen mit ca. 30 cm Bewuchshöhe wurden Kitze gefunden. Aufgrund der geringen Stichprobenzahl sollte diese Untersuchung nur als grobe Orientierung dienen. Insgesamt wurde im Jahr 2013 bei 57 % der abgesuchten Wiesen mindestens ein Kitz gefunden. Im Jahr 2013 wurden allerdings in erster Linie Wiesen abgesucht, bei denen der zuständige Jäger Kitze vermutete. Es ist also anzunehmen, dass die Fundhäufigkeit pro Wiese niedriger sein müsste. Bei der Kampagne aus dem Jahr 2015 bei der ca. 90 % der zu mähenden Wiesen abgesucht wurde, erscheint die Fundhäufigkeit von 40 % der Wiesen realistischer.

4.3 Äußere Einflussgrößen auf die Detektion

Die spezifischen Rehkitzmerkmale sind nur unter bestimmten Voraussetzungen leicht von anderen Merkmalen separierbar. Einflussgrößen wie die Sonnenstrahlung und die Flughöhe sind die entscheidenden Parameter für diese Separierbarkeit. Diese werden anhand von ausgewählten Datensätzen der Messkampagne 2015 analysiert. Da die Kamera selbst das Thermalbild und damit die Separierbarkeit der Rehkitzmerkmale ebenfalls stark beeinflusst, werden die entwickelten Korrekturverfahren aus den darauffolgenden Abschnitten bereits hier angewendet.

4.3.1 Sonnenstrahlung

Nicht nur Rehe, sondern auch Maulwurfhügel und großblättrige oder abgestorbene Pflanzen, die von der Sonne aufgeheizt wurden, erscheinen als warme Objekte auf den Thermalbildern. Abb. 4.8 zeigt drei ausgewählte Objekte. Der kurze Abstand von 1,2 m ermöglicht es, dass die drei Objekte eindeutig als etwas anderes als ein Rehkitz identifiziert werden. Aus weiterer Entfernung wird dies zunehmend schwieriger. Die Größen und die Silhouetten stimmen gut mit denen eines Rehkitzes überein. Die Temperaturen der Objekte liegen ebenfalls im erwarteten Temperaturbereich für ein Rehkitz und auch die Differenz zwischen dem warmen Objekt und seiner direkten Umgebung liegt in allen drei Fällen oberhalb von 5 °C. Lediglich die Textur und der Temperaturgradient vom Zentrum des Objekts zur Umgebung unterscheiden sich von einem Rehkitz.

Die Anzahl der Fehlalarme bzw. die falsch positiven Funde korrelieren mit der Strahlungsintensität der Sonne. Die Kitzsuchkampagne 2015 eignet sich hervorragend, um den Einfluss der Sonnenstrahlung auf die Anzahl der Fehlalarme darzustellen. Bei 53 der insgesamt 57 Flüge, die an neun Tagen zu unterschiedlichen

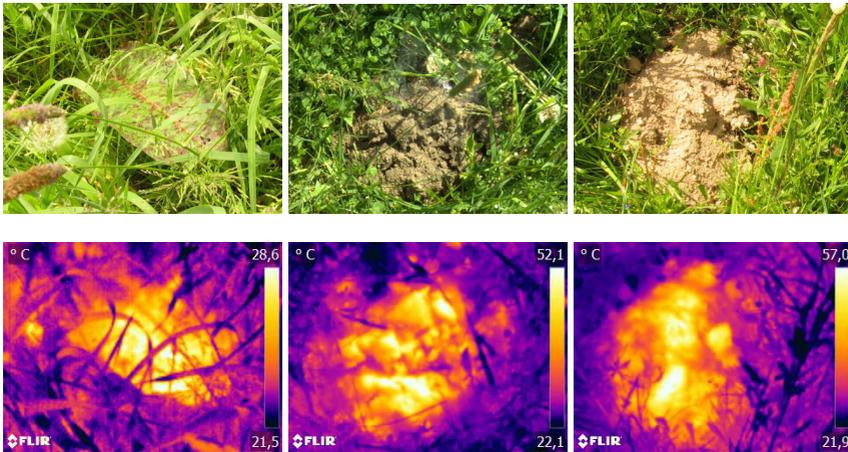


Abb. 4.8: Farb- und Thermalbilder von vermeintlichen Rehkitzen. Die Strahlungstemperatur eines Erdhügels oder eines Sauerampferblattes kann im selben Temperaturbereich liegen wie die eines Rehkitzes.

Tageszeiten durchgeführt wurden, konnten jeweils alle Fehlalarme bestimmt werden. Für die Auswertung des Einflusses der Sonnenstrahlung auf die Anzahl der Fehlalarme standen damit 168 von 171 ha Wiesenfläche, die auf 80 m Flughöhe abgeflogen wurden, zur Verfügung. Während der Kampagne wurde kein Bestrahlungsstärkemessgerät mitgeführt, deshalb kann die Korrelation zwischen der falschpositiv-Rate und der Bestrahlungsstärke nur indirekt gezeigt werden. Es wird angenommen, dass die Sonne an sonnigen Tagen während der Kampagne zur gleichen Uhrzeit etwa die gleiche Bestrahlungsstärke verursacht. Die Uhrzeit kann dann als Referenz verwendet werden. Es wurden die Bilder und Messungen von sieben überwiegend sonnigen Tage ausgewählt und in Uhrzeitintervalle von einer Stunde unterteilt. Ein Flug bzw. eine Wiese wird dabei als Einheit betrachtet. Die Stunde des Landezeitpunkt des Fluggerätes dient als Unterteilungsmerkmal. Die Summen der Wiesen, der Suchflächen und der Fehlalarme jeweils eines Zeitintervalls ist in der Tabelle 4.4 angegeben. Fehlalarme sind Fundstellen, bei denen anstatt eines lebendigen Tieres ein Erdhügel, ein Lager oder eine warme Stellen im Gras gefunden wurde. Angewendet wurde die Suchstrategie III (siehe Kapitel 3.1.1). Die Fundstellen wurden visuell auf vorprozessierten Thermalbildern ausgewählt. Die Rohdaten der Thermalkamera wurden hierfür mit Algorithmen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, so prozessiert, dass eine hohe Präzision und zugleich eine hohe Sensitivität (*Recall*) bei der Detektion von Rehkitzen ermöglicht wurde. Die blaue Kurve in dem Diagramm in Abbildung 4.9 zeigt die Fehlalarme pro

Uhrzeit	8	9	10	11	12	13	14	15
Fläche (ha)	12	20	17	11	2,3	2,0	2,0	24
Wiesen	4	7	5	3	1	1	1	5
Fehlalarme	0	9	7	11	6	7	6	27

Uhrzeit	16	17	18	19	20	21	22
Fläche (ha)	1,8	20	15	11	13	9,8	1,6
Wiesen	1	7	5	4	5	3	1
Fehlalarme	1	8	7	3	0	1	0

Tabelle 4.4: Fehlalarme pro Hektar.

1 Hektar Suchfläche über der Uhrzeit (von 8:00 – 22:00 Uhr). In dem Diagramm

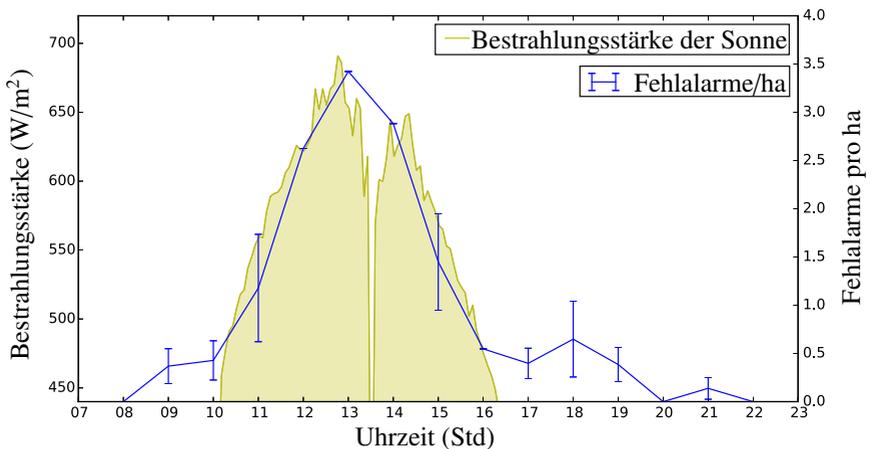


Abb. 4.9: Korrelation von Sonnenstrahlung und Fehlalarmen. Die blaue Kurve stellt die Fehlalarme pro Hektar bezogen auf die Uhrzeit dar. In gelb ist die Bestrahlungsstärke der Sonne im Bereich zwischen 450 und 700 W/m^2 unterlegt. Ab einem Bestrahlungsstärke-Schwellwert scheint der Einfluss der Sonnenstrahlung auf die Anzahl der Fehlalarme zu dominieren.

ist auch die Bestrahlungsstärke der Sonne vom 18.5.2015 – einem der Kampagnentage – dargestellt. In den frühen Morgenstunden bis 10 Uhr liegt die Anzahl der Fehlalarme pro Hektar noch unter 0,5. Zwischen 10:00 und 11:00 Uhr nimmt die Anzahl der Fehlalarme deutlich zu. Die Bestrahlungsstärke liegt laut Wetterstation hier zwischen 450 und 550 W/m^2 . Dann dominiert der Einfluss der Sonnenstrahlung

auf die Anzahl der Fehlalarme. Der Verlauf der Fehlalarmkurve nimmt ab dann proportional zur Bestrahlungsstärke zu, bis das Maximum mit 3,4 Fehlalarmen pro Hektar um 13:00 Uhr erreicht wird. In diesem Bereich liegt auch das Maximum der Bestrahlungsstärke mit 691 W/m^2 . Danach fällt die Fehlalarmkurve gleichermaßen wie die Bestrahlungsstärke ab. Wenn die Bestrahlungsstärke wieder im Bereich zwischen 450 und 550 W/m^2 liegt (ab ca. 16 Uhr), scheint der Einfluss der Sonnenstrahlung nicht mehr zu überwiegen und die Anzahl der Fehlalarme pro Hektar nimmt wieder Werte von ca. 0,5 und darunter an.

Die Fehlerbalken der Fehlalarmkurve zeigen den Standardfehler des arithmetischen Mittels $\sigma(\bar{X})$, der sich errechnet aus

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (4.3)$$

mit der Standardabweichung σ und dem Stichprobenumfang n . In diesem Fall ist n die Anzahl der Wiesen pro Zeitintervall. Der Standardabweichung wurde die unkorrigierte Stichprobenvarianz

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (4.4)$$

mit dem arithmetischen Mittelwert \bar{x} und den Stichproben x_i , zugrunde gelegt. Der Standardfehler ist dadurch verzerrt. Gerade bei Messungen mit wenigen Stichproben kann der tatsächliche Fehler stark abweichen. Dies erklärt, warum für die Werte bei 12:00, 13:00, 14:00 und 16:00 Uhr keine Fehlerbalken zu sehen sind, obwohl gerade hier eine große Streubreite erwartet wird. Während diesen Zeiten wurde jeweils nur eine Wiese abgesucht.

Die Bestrahlungsstärke-Messwerte stammen von einer Wetterstation in 7 km Entfernung des Kampagnenorts. Über das Internet sind ihre Daten öffentlich zugänglich. Möglicherweise sind sie nicht kalibriert. Eine andere Wetterstation aus der Gegend liefert für die Bestrahlungsstärke dieses Tages einen Maximalwert von 990 W/m^2 . Der Maximalwert der verwendeten Daten liegt bei 691 W/m^2 .

Wenn man die Zahl der Rehkitzfunde von 0,26 pro Hektar aus dem Abschnitt 4.2.3 zum Vergleich heranzieht, sieht man, dass die maximale Anzahl der Fehlalarme pro Hektar mit dem Wert 3,4 zur Mittagszeit um den Faktor 13 größer ist. Zu den Zeiten, wo die Sonne keinen Einfluss auf die Anzahl der Fehlalarme hat liegt der Faktor in der Regel unter zwei.

4.3.2 Flughöhe

Die Flughöhe ist ein Schlüsselparameter des Systems Fliegender Wildretter. Bei niedriger Flughöhe ist die Distanz zwischen Kamera und Szene kürzer. Nähere Objekte werden auf dem Kamerabild größer und damit auf mehr Pixeln dargestellt als weiter entfernte. Details werden dadurch besser aufgelöst, was zu einer einfacheren Detektionsaufgabe führt. Nachteil einer kurzen Distanz ist der geringere Sichtbereich der Kamera, welcher zu einer verringerten Suchgeschwindigkeit führt. Aber auch die maximal mögliche Fluggeschwindigkeit hängt von der Flughöhe bzw. der Distanz zwischen Kamera und Szene ab. Technisch gibt es einen klar definierten Mindest- und einen Maximalabstand.

Den Mindestabstand legt die gerade noch akzeptierte brennweitenbedingte optische Abbildungsunschärfe fest, welche bei der halben hyperfokalen Distanz liegt (siehe Kap. 3.2.3).

Der Maximalabstand liegt dann vor, wenn ein sichtbares Rehkitz aufgrund der Distanz nicht mehr detektiert werden kann. Das wesentliche Merkmal der Rehkitzdetektion ist die Temperaturdifferenz zwischen Rehkitz und Wiese. Damit ein Pixel die durchschnittliche Strahlungstemperatur des Rehkitzes darstellt, darf außer dem Rehkitz nichts anderes auf dieses Pixel abgebildet werden, sonst entsteht ein Mischpixel, welches die Mischtemperatur zwischen Rehkitz und Umgebung darstellt. Der Radius der als kreisrund angenommenen Kitzabbildung auf dem FPA muss dazu mindestens so groß sein wie die Diagonale eines Detektorelements (siehe Abb. 4.10). Bei quadratischen Detektorelementen ergibt sich für die Seitenlänge

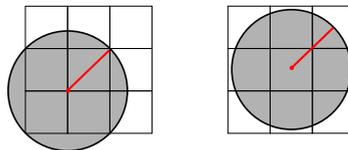


Abb. 4.10: Minimalgröße eines Kitzbildes. Der Radius eines kreisrund abgebildeten Kitzes muss mindestens so groß sein wie die Diagonale eines Detektorelements, damit in jedem Fall ein Detektorelement existiert, auf dem nur das Kitz abgebildet wird. Je nach Positionierung gibt es dann zwischen einem (rechtes Bild) und vier (linkes Bild) Pixel, auf denen nur das Kitz zu sehen ist.

des Detektorelements am Boden:

$$S = \frac{D_k}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

Setzt man S in die Gleichung 2.13 ein und formt sie nach h_f um, erhält man damit die maximale Flughöhe.

Die Kamerakonstante c_k entspricht näherungsweise der Brennweite. Bei der Thermalkamera TAU640 mit einem 19 mm Objektiv ergibt sich dann bei einem Kitzdurchmesser D_k von 30 cm für h_f eine maximale Flughöhe von 237 m.

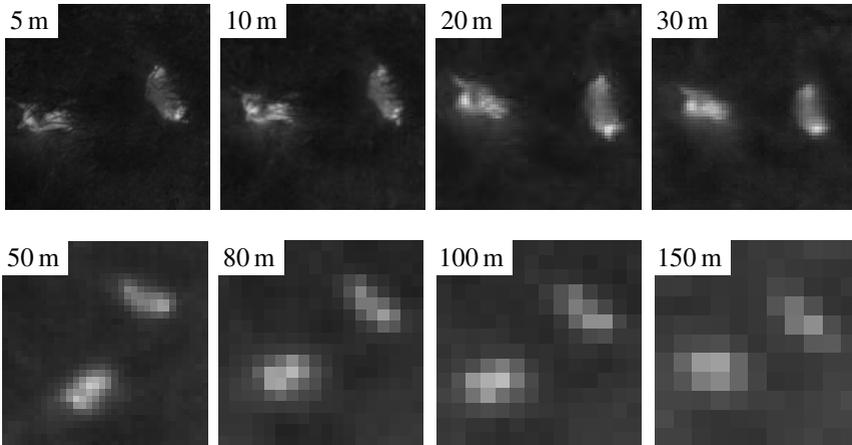


Abb. 4.11: Thermalbilder von Rehkitzten aus verschiedenen Flughöhen¹. Eine Szene mit zwei Rehkitzten, die etwa drei Wochen alt waren, aufgenommen an einem sonnigen Tag zur Mittagszeit. Die Szene wurde aus verschiedenen Flughöhen aufgenommen, oben: 5 m, 10 m, 20 m und 30 m, unten: 50 m, 80 m, 100 m und 150 m. Es ist nur jeweils der Bildausschnitt der beiden Rehkitze dargestellt.

Um einen Eindruck zu bekommen, wie sich die unterschiedlichen Flughöhen auf die Detektierbarkeit der Rehkitze auswirkt, sind in Abbildung 4.11 Thermalbildausschnitte aus acht verschiedenen Flughöhen von ein und der selben Szene abgebildet. Es sind zwei Rehkitze zu sehen. Bis zu einer Flughöhe von 30 m lassen sich die warmen Stellen auch von einem ungeübten Betrachter detektieren. An einem bedeckten Tag könnten die Kitzte auf Grund des hohen Kontrasts selbst aus 150 m Flughöhe sicher detektiert werden. An einem sonnigen Tag wie dem als die Bilder von Abb. 4.11 aufgenommen wurden, könnten die Stellen auch Maulwurfhügel oder eine andere warme Stelle im Gras sein. Abbildung 4.12 zeigt eine warme Stelle, die leicht mit einem Rehkitz verwechselt werden kann, aus verschiedenen

¹Das UAV hat sich ab 50 m etwas gedreht. Die Bilder wurden nachträglich nicht ausgerichtet, damit bei der niedrigen Auflösung keine weitere Information verloren geht.

Flughöhen.

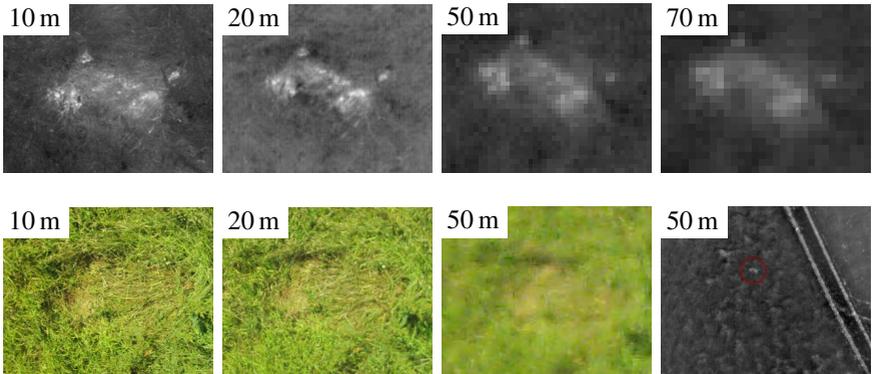


Abb. 4.12: Thermalbildausschnitte von einer warmen Stelle im Gras, aufgenommen aus verschiedenen Flughöhen. In der unteren Reihe sind die dazu passenden Bilder der Farbkamera für die Distanzen 10 m, 20 m und 50 m. Das letzte Bild unten rechts ist das Thermalbild aus 50 m in Vollformat.

Um eine warme Stelle sicher von einem Rehkitz zu unterscheiden, darf die Flughöhe maximal 10 m betragen. Bei größerem Abstand verschwimmen die Details, wie beispielsweise die Ohren oder der etwas wärmere Kopf. Eine Flughöhe von 10 m ist allerdings nicht praktikabel, weil das System dann nur eine sehr geringe Flächenleistung erreicht. Einerseits, weil das UAV langsamer fliegen muss, damit keine Bewegungsunschärfe entsteht, und andererseits, weil der Sichtbereich der Kamera kleiner ist, und deshalb das Fluggerät mehr Bahnen abfliegen muss. Näheres hierzu ist in Kapitel 3.3 beschrieben.

Betrachtet man die Fehlalarme pro Hektar (Abb. 4.9), macht es bei der Wahl der Flughöhe keinen Sinn, allzu viel Rücksicht auf die Unterscheidbarkeit zwischen Fehlalarm und Rehkitz zu nehmen. Denn selbst bei den schwierigsten Bedingungen und bei 80 m Flughöhe sind bei der Kampagne 2015 bei visueller Detektion nur maximal 3,43 Fehlalarme pro Hektar aufgetreten. Das Abfliegen dieser Fundstellen zu Fuß kostet weit weniger Zeit, als wenn die komplette Wiese auf 10 m anstatt auf 80 m Flughöhe abgeflogen wird (siehe Kapitel 3.3).

Eine Alternative, die bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt wurde, wäre noch: nur relevante Punkte auf niedriger Höhe erneut anzufliegen. Einen Vorteil bringt dieses Verfahren allerdings nur, wenn die Punkte sofort während dem Erstflug angefliegen werden können und die Auswahl der Punkte, die näher betrachtet werden sollen, wenige falsch-positive enthält. Mit den zur Verfügung stehenden technischen

Möglichkeiten der funkbasierten Bildübertragung würde eine von Menschen durchgeführte Auswahl zu viele falsch-positive enthalten (siehe hierzu Kapitel 4.4.2). Ein automatischer Detektionsalgorithmus könnte die Rohdaten an Bord des UAVs verarbeiten. Aber auch der Algorithmus, der im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist, weist eine zu hohe falsch-positiv-Rate auf. Deshalb ist im Moment dieses voll-automatische Verfahren im Bezug auf Flächenleistung dem visuellen Verfahren unterlegen.

4.3.3 Andere Strahlungsquellen und Reflexionen

Aufgrund der schwankenden Außentemperatur ist es nicht möglich, die Kamera auf einen festen Temperaturbereich einzustellen, weil sonst die Szene an sehr heißen oder sehr kalten Tagen lediglich als weiße oder als schwarze Pixel dargestellt wird. Deshalb muss der Dynamikbereich der Kamera für jedes Bild angepasst werden (siehe Abschnitt 4.4.2). Diese dynamische Anpassung hat aber folgenden Nachteil: Wenn beispielsweise eine von der Sonne aufgewärmte Straße oder abgeerntete Fläche ins Sichtfeld der Kamera gerät und einen größeren Teil des Bildes abdeckt, dann reduziert sich der Kontrast im dann dunkleren Wiesenbereich (siehe Abb. 4.13). Im nicht vorverarbeiteten Bild, das die Kamera an ihrem Analogausgang zur Verfügung stellt, macht sich dieser Effekt am stärksten bemerkbar.

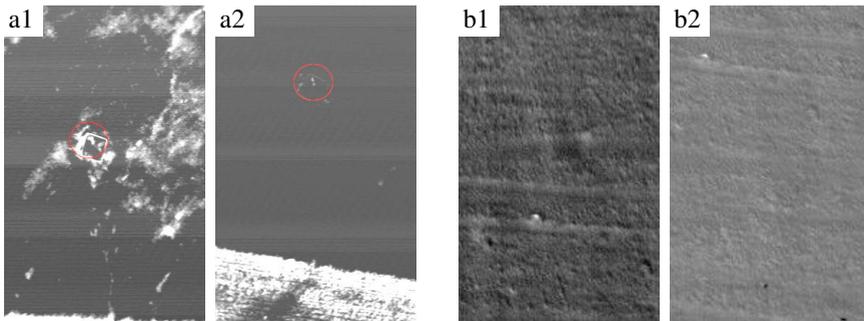


Abb. 4.13: Andere Wärmequellen im Bild. Bei Szene a kommt eine warme abgeerntete Fläche ins Bild (a2). Bei Szene b sind es kleine Aluminiumplatten (b2), die die Strahlung des kalten Himmels reflektieren [Isr11].

Aber nicht nur heiße, sondern auch kalte Objekte im Bild verschlechtern den Kontrast. In den Bildern b1 und b2 in Abb. 4.13 ist eine Kitzattrappe als kleiner heller Fleck zu sehen. In Bild b2 unten sind zwei unlackierte Aluplatten mit je 10 cm

Durchmesser zu sehen. Sie haben einen Emissionsgrad von ca. 0,1. Ihr Reflexionsgrad liegt bei ca. 0,9, deshalb reflektieren sie die vom wolkenlosen kalten Himmel einfallende Strahlung und verursachen so, dass alle anderen Pixel einen höheren Grauwert erhalten, als wenn sie nicht im Bild wären. Die Strahlungstemperatur des wolkenlosen Himmels liegt ca. 30 °C unter der der Wiese. Aluminiumplatten findet man zwar selten in einer Wiese, aber manchmal ist ein Bach im Bild zu sehen, der deutlich kälter als der Rest der Szene ist und deshalb ein ähnliches Resultat erzeugt.

4.4 Einflüsse der Kamera

Neben den eben behandelten äußeren Einflüssen spielen vor allem die Einflüsse der Kamera selbst eine große Rolle bei der Detektion der Rehkitze. Die Bildschärfe ist dabei die wichtigste Einflussgröße. Aber auch Temperaturschwankungen des Kameragehäuses und die Umwandlung der analogen Mikrobolometer-Spannung U_{MB} in ein handhabbares digitales Bildformat tragen stark zur Veränderung des aufgenommenen Thermalbilds bei. In diesem Abschnitt werden die für die Rehkitzdetektion relevanten Einflussgrößen der Thermalkamera vorgestellt und an einigen Stellen Möglichkeiten gezeigt, wie diese Einflüsse z. B. durch eine Kalibrierung minimiert werden können.

4.4.1 Bildschärfe

Unschärfe jeglicher Art verringert die Detektierbarkeit. Die Schärfe im Bild wird in der Optik durch die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) beschrieben. Es sind die Fokussierung und die Bewegungsunschärfe, die die MTF maßgeblich beeinflussen. Unschärfe Bilder enthalten weniger hohe Ortsfrequenzen als scharfe Bilder.

Bei der Anwendung des Fliegenden Wildretters blickt die Kamera aus max. 100 m über Grund auf den Boden. Zur Validierung eines Fundortes ist eine minimale Distanz von ca. 10 m ausreichend. Damit die Kamera stets scharfe Bilder liefert, wird der Fokus deshalb auf die hyperfokale Entfernung eingestellt. Das ist diejenige Gegenstandsweite, bei der Punkte, die im Unendlichen liegen, gerade noch ausreichend scharf abgebildet werden. Die Schärfentiefe reicht von der halben hyperfokalen Entfernung bis ins Unendliche. Beim 19 mm Objektiv der TAU640 gibt der Hersteller die hyperfokale Entfernung mit 9,5 m an. Eingesetzt in Gleichung 3.8 ergibt sich ein Zerstreuungskreisdurchmesser von 30,4 μm , was in etwa 1,8 Pixel ergibt. Für monochromatische Kameras wird üblicherweise ein Zerstreuungskreisdurchmesser von 1 Pixel gewählt. Da die Kamera die meiste Zeit Bilder aus einer

Entfernung von ca. 80 m und nur selten Nahaufnahmen aus ca. 10 m Entfernung macht, wird für die Fokuseinstellung ebenfalls ein Zerstreuungskreisdurchmesser von einem Pixel gewählt. Die hyperfokale Distanz berechnet sich mit Gleichung 3.8 dann zu 17 m.

Visuelle Fokusjustierung Es gibt verschiedene Testfelder, die bei der Fokusjustierung hilfreich sind. Gut geeignet ist nach eigener Erfahrung der sog. Siemensstern (siehe Abb. 4.14). Mit einem Laserdrucker ausgedruckt auf einem DIN A3 Papier eignet er sich recht gut zur Fokussierung an einem sonnigen Tag im Freien. Die schwarzen Bereiche absorbieren deutlich mehr Infrarotstrahlung als die weißen Bereiche. Dadurch erwärmen sie sich stärker und emittieren selbst wieder mehr Strahlungswärme ab als die weißen Bereiche. Mit der White-Hot-Farbtabelle erscheinen im Thermalbild die warmen schwarzen Bereiche als weiß und das weiße Papier als schwarz.



Abb. 4.14: Siemensstern zur Fokuseinstellung. Je besser der Fokus der Kamera eingestellt ist umso kleiner ist der unscharfe Bereich in der Mitte des Siemenssterns. Auf dem Bild in der Mitte ist der Fokus nicht so gut eingestellt wie auf dem Bild rechts.

Das analoge Videobild ist für eine Fokuseinstellung zu unscharf. Deshalb ist ein sinnvolles Vorgehen, den aktuellen Winkel des Fokusrings mit Hilfe eines Goniometers zu messen und zu notieren, ein Foto zu triggern und dann den Fokusring um ca. zwanzig Grad weiter zu drehen. Diese Schritte werden einige Male wiederholt bevor die SD-Karte mit den darauf gespeicherten Bildern ausgelesen, die Bilder verglichen und der schärfste Winkel eingestellt wird. Dieses Vorgehen wird mehrmals wiederholt und pro Durchgang wird jeweils ein kleineres Winkelintervall verwendet. Manuell lässt sich der Fokus auf ca. 2–3 Grad genau einstellen.

Fokusjustierung im Labor Der Fokus – oder anders gesagt: der Abstand zwischen Projektionsebene und Linse – lässt sich in einem Labor mit zwei Präzisionsdrehtischen und einer Strahlungsquelle wesentlich exakter justieren, als mit dem vorgestellten visuellen Verfahren. Abb. 4.15 links zeigt die Präzisionsdrehtischvorrichtung. Ein Fokuseinstellring ist konzentrisch zur Drehachse des vertikalen Drehtisches angeordnet und an den Drehteller geschraubt. Die Kamera wird über zwei stabile Aluwinkel ebenfalls konzentrisch zur Drehachse gehalten und ermöglichen, dass die Optik der Kamera passgenau in dem Fokuseinstellring sitzt, sodass der Fokus durch den Drehtisch justiert werden kann. Im Abstand der gewünschten Gegenstandsweite steht eine Wärmequelle (z. B. eine Halogenglühbirne) hinter einer vertikalen Schlitzblende. Die Lichtquelle erzeugt so viel Wärme, dass sie, auch ohne besondere Vorkehrungen zu treffen, an der maximalen Helligkeit in den Thermalbildern entdeckt werden kann. Mit einem zweiten Drehtisch kann die Kamera in ganz kleinen Schritten horizontal gedreht werden, sodass bildseitig der vertikale Schlitz in Subpixelschritten über ein Pixel hinweg geschwenkt wird. Die Intensität dieses Pixels jeder Einzelmessung kann in einem Diagramm über den abgefahrenen Motorschritten angetragen werden. Man erhält dadurch die Spaltbildfunktion **SSF** (Slit Spread Function). Die **SSF** ist die Faltung der Line Spread Funktion mit dem Spalt. Die Messwerte können in der Regel gut durch eine Normalverteilung angenähert werden. Ihre Varianz verringert sich bei Annäherung des Bildsensors an die korrekt fokussierte Bildweite. Das Optimum ist erreicht, wenn die Varianz minimal ist. Die Spaltbreite wird zur Fokusjustierung so breit gewählt, dass mindestens ein Pixel in der Breite vollständig beleuchtet wird. Eine geringere Spaltbreite führte in Versuchen stets dazu, dass die Funktion der Varianz über dem eingestellten Fokus mehrere Minima besaß.

Bedingt durch Abbildungsfehler wie der Bildfeldwölbung kann der Fokus immer nur für ein bestimmtes Pixel optimal eingestellt werden. Wenn beispielsweise das Zentrum des Bildes scharf gestellt wird sind die Ränder automatisch etwas unscharf. Deshalb muss ein Kompromiss gefunden werden, sodass der Fokusfehler insgesamt am geringsten ausfällt. Abb. 4.15 rechts zeigt zwei Messkurven mit gleichem Objektstand und unterschiedlich eingestelltem Fokus. Bei beiden Messkurven wurde die gleiche Wärmequelle über den gleichen Pixelbereich abgescannt. Beide Kurven können gut durch eine Normalverteilung angenähert werden. Sowohl an der Signalintensität als auch an der Varianz ($\sigma_{bl} = 24,5$; $\sigma_{gn} = 32,6$) kann man erkennen, dass bei der grünen Kurve auf die Wärmequelle schlechter fokussiert wurde als bei der blauen Kurve. Der eingestellte Abstand zwischen Linse und Projektionsebene, bei dem die Szene scharf abgebildet wird, entspricht der Kamerakonstanten c_k .

Signalverteilung bei versch. Fokuseinstellungen

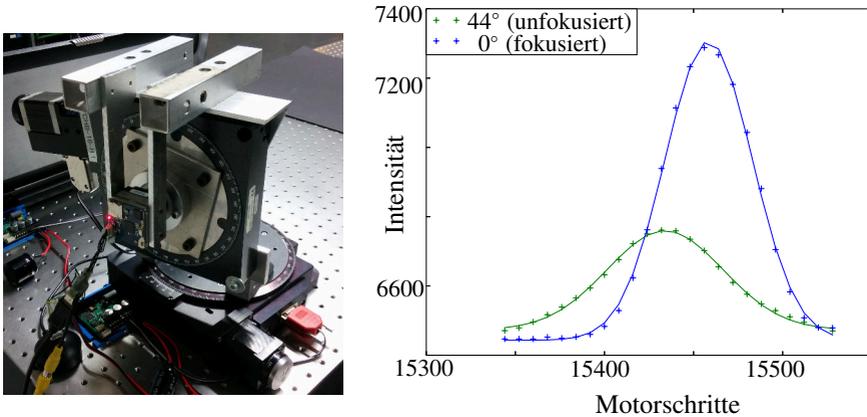


Abb. 4.15: Laboraufbau zur Fokusjustierung und Ergebniskurve. Links: Speziell für die TAU640 konzipierte Vorrichtung zur Justierung des Fokus mit zwei Präzisionsdrehtischen. Rechts: SSF für zwei unterschiedliche Fokuseinstellungen

Bewegungsunschärfe Bisher wurde der korrekten Einstellung des Fokus viel Aufmerksamkeit geschenkt. Aber nicht nur durch einen falsch justierten Fokus, sondern auch durch die Bewegung der Kamera während der Aufnahme entsteht eine Unschärfe. Bei einem Flächenscan hängt die Bewegungsunschärfe des Zentralpixels von der horizontalen Bewegungsgeschwindigkeit v_h , der Distanz h_f zur aufgenommenen Szene, der Integrationszeit t_i , der Seitenlänge s eines Pixels auf dem Sensorchip und der Kamerakonstante c_k ab.

Die gerade noch akzeptierte Bewegungsunschärfe liegt dann vor, wenn sich die Kamera während der Integrationszeit um die Länge S der Bodenauflösung des Pixels horizontal bewegt hat. Mit Gleichung 2.13 und der Durchschnittsgeschwindigkeit

$$v_h(S) = \frac{S}{t_i}, \tag{4.6}$$

ist

$$v_h(h_f) = \frac{h_f \cdot s}{t_i \cdot c_k}. \tag{4.7}$$

Abb. 4.16 zeigt den bewegungsunschärfefreien Bereich von Mikrobolometer-Thermalkameras auf Basis von Vanadiumoxid und amorphem Silizium in Abhängigkeit von Flughöhe und Fluggeschwindigkeit bei Nadirblickrichtung und einem Objektiv mit 30° FOV.

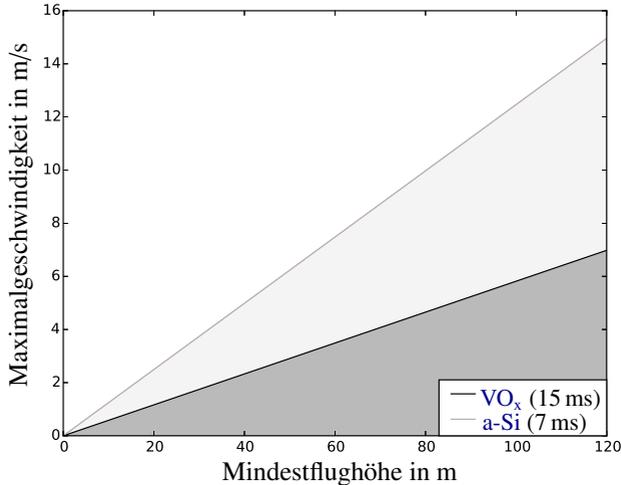


Abb. 4.16: Integrationszeitbegrenzte Horizontal-Fluggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Flughöhe für Kameras mit FPAs basierend auf amorphem Silizium bzw. Vanadiumoxid.

Um scharfe Bilder bei Nadirblickrichtung zu erzeugen, kann ein UAV, das mit einer Vanadiumoxid-Thermalkamera bestückt ist, bei gleicher Flughöhe demnach nicht so schnell fliegen wie ein UAV mit einer amorphen-Silizium-Thermalkamera. Da die TAU640 von FLIR eine Vanadiumoxid-basierte Kamera ist, resultiert aus Gleichung 4.7 bei 80 m Flughöhe eine maximale Fluggeschwindigkeit von 5 m/s.

Die translatorische Bewegung ist eine Ursache für Bewegungsunschärfe die gut kontrollierbar ist. Wesentlich schwieriger beherrschbar ist die Rotation. Ein Multikopter muss sich zur Fortbewegung nach vorne neigen. Windböen gleicht er aus, indem er sich zum Wind hin neigt. Diese ständigen Kippbewegungen muss ein Kameragimbal ausgleichen, damit ein ruhiges Videobild und scharfe Fotos entstehen. In Kapitel 5.2.1 wird der Einfluss des verwendeten Kameragimbals genauer untersucht.

4.4.2 Kameraelektronik

Auch die Kameraelektronik trägt zur Verfälschung der gemessenen Infrarotstrahlung bei. Der größte Verlust an Information findet im letzten Schritt, bei der Umwandlung in das analoge Videoausgangssignal statt. Aber auch schon vorher gehen Informationen verloren.

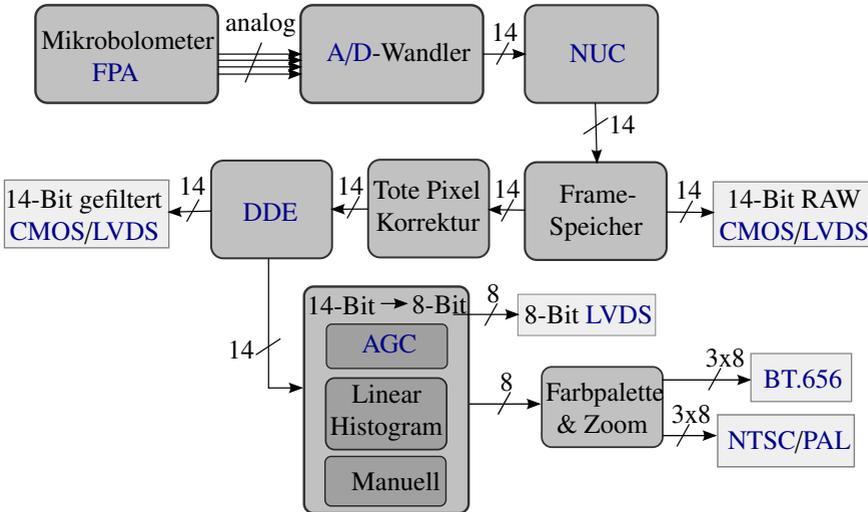


Abb. 4.17: Blockschaltbild des Video-Signalfades der TAU640. Die Zahlen über den Graphen geben die Anzahl der Signalleitungen bzw. die Bittiefe an.

In der Abbildung 4.17 ist der Video-Signalfad der TAU640 als Blockschaltbild dargestellt. Zunächst werden die einzelnen Pixel des Mikrobolometer Focal Plane Arrays ausgelesen und das analoge Signal in ein digitales 14-Bit Signal gewandelt. Nachdem im Anschluss die Nonuniformity Correction (NUC) angewendet wurde, liegt das jeweils aktuelle Bild im Framespeicher, von wo aus es direkt als 14-Bit Raw-Videostream als paralleles CMOS- oder als serielles LVDS-Signal abgegriffen werden kann. Für alle anderen Videoformate werden weitere Bildverarbeitungsschritte durchgeführt. Zunächst werden die in der Firmware als defekt maskierten Pixel durch eine Interpolation der Nachbarpixel ersetzt. Dann folgt eine Filterung durch das Dynamic Digital Detail Enhancement (DDE). Hierbei werden räumlich hochfrequente Details mit geringem Kontrast im Thermalbild verstärkt, um bei einer Bittiefen-Kompression gegenüber einem räumlich niederfrequentem Hintergrund mit hohem Kontrast nicht verloren zu gehen [HL10]. Das gefilterte Bild kann als 14-Bit Stream über den CMOS- oder LVDS-Ausgang übertragen werden. Für den analoge Videoausgang (NTSC/PAL) muss der 14-Bit Stream auf 8-Bit reduziert werden. Es stehen dabei mehrere Varianten zur Verfügung:

- Automatic Gain Control (AGC),
- Linear Histogram oder eine
- manuelle Einstellung der Helligkeit und des Kontrastes.

Nachdem das komprimierte 8-Bit Signal zur Verfügung steht, kann dieses über die serielle LVDS-Schnittstelle übertragen werden. Eine Falschfarbendarstellung mit verschiedenen Farbpaletten und ein elektronischer Zoom stehen als Zusatzoptionen nur für den BT.656 und den analogen Videoausgang zur Verfügung.

In der Thermografie ist die Falschfarbendarstellung weit verbreitet. Oft wird die Rainbow- oder die Ironbow-Farbpalette verwendet, bei der warme Objekte rot bis gelb und kalte Objekte blau oder lila erscheinen (bei Abb. 4.2 in Kapitel 4.2.1 wurde beispielsweise die Ironbow-Farbpalette verwendet). Die 256 Signalintensitätsstufen werden bei der Falschfarbendarstellung auf 256 24-Bit Farbwerte abgebildet. Die Signalintensitätsstufen können auch als Grauwerte dargestellt werden. Dann spricht man nicht mehr von einer Falschfarbendarstellung. Man unterscheidet zwischen Black-Hot und White-Hot. Bei der Farbpalette White-Hot sind die heißen Objekte weiß und die kalten Objekte schwarz dargestellt. Für die Palette Black-Hot gilt das Gegenteil. In dieser Arbeit wird die Darstellung White-Hot bevorzugt, da sie für eine computergestützte Bildanalyse direkt als relativer Temperaturwert verwendet werden kann.

Alle Einstellungen können über die frei verfügbare Kamerakonfigurationssoftware getätigt werden. Die Parameter werden dabei über eine serielle Schnittstelle an die Kamera übertragen. Die Konfiguration der Kamera kann alternativ auch direkt mittels Steuerbefehle, die im Benutzerhandbuch der Kamera enthalten sind, über ein Terminalprogramm oder von einem Mikrocontroller durchgeführt werden [FLI10].

Nonuniformity Correction Toleranzen bei der Fertigung von Focal Plane Arrays verursachen, dass die einzelnen Detektorelemente unterschiedliches Verhalten aufweisen (vor allem die radiometrische Empfindlichkeit und der Arbeitspunkt / Offset-Wert). Hinzu kommen Differenzen durch die optische Abbildung, insbesondere den unterschiedlichen Raumwinkelanteilen ω_{FOV} der einzelnen Detektorelemente (siehe Kapitel 4.4.3). Diese Empfindlichkeitsunterschiede müssen durch pixelspezifische Signalkorrekturen ausgeglichen werden, um bei homogener Bestrahlung des Sensorarrays ein gleichförmiges Ausgangssignal zu erhalten. Diese Korrektur wird im englischen als nonuniformity correction (NUC, dt.: Ungleichförmigkeitskorrektur) bezeichnet. Für die meisten kommerziellen Kameras werden die Parameter für die NUC während des Kamerakalibrierungsprozesses bei der Fabrikation bestimmt und in der Kamerafirmware abgespeichert. Die NUC beginnt in der Regel mit einer Signal-Offset-Korrektur, damit für einen gegebenen Objekttemperaturbereich die Signale aller Detektorelemente im Dynamikbereich der Elektronik liegen. Im nächsten Schritt wird die Signal-Empfindlichkeit aller Detektorelemente angeglichen. Im letzten Schritt wird nochmals eine Offsetkorrektur durchgeführt, um annähernd identische Responsekurven für alle Detektorelemente zu erhalten [VM10]. Diejenigen Detektorelemente, die keinen ausreichenden Dynamikumfang

aufweisen werden als tote Pixel maskiert. An diesen Pixelstellen muss das Signal der Nachbarpixel in einem späteren Prozessschritt interpoliert werden. Die Temperaturabweichung wird bei der TAU640 durchgeführt, sobald der mechanische Shutter vor das Detektorarray für einige 100 Millisekunden fährt. Er stellt einen grauen Strahler dar (mit einem Emissionsgrad $\epsilon > 0,9$) und ermöglicht, dass alle Detektorelemente gleichförmig bestrahlt werden. Das voreingestellte Shutterintervall ist 90 Sekunden. Während des Temperaturabgleichs ist das Kamerabild für ca. eine Sekunde eingefroren. Für die Anwendung bei der Rehkitzsuche bedeutet dies, dass dadurch Lücken in der Thermalbildabdeckung der Wiese entstehen können.

Die mechanischen Komponenten des Shutters nutzen sich mit der Zeit ab. Wenn der Shutter während der NUC nicht komplett geschlossen ist, führt dies zu einem Schattenbild, das dem Livebild überlagert ist. Das Schattenbild ist das Negativ der Szene, die die Kamera aufnahm, während die NUC durchgeführt wurde. Diese Überlagerung erschwert die Detektion.

Analoges Ausgangssignal Analoge Signale sind prinzipbedingt störanfälliger als digitale Signale. Diese oftmals geringen Störungen verursachen einen Informationsverlust. Der noch größere Informationsverlust findet aber bereits ein Schritt vorher statt, bei der Bittiefenkomprimierung von 14 auf 8 Bit. Wenn die Anzahl der unterschiedlichen Pixelwerte oder Signalintensitätsstufen den Wert 256 übersteigt, kann das Bild monochrom nicht verlustfrei dargestellt werden, da alle gängigen Ausgabegeräte über maximal 256 Grauwerte verfügen. Zur Darstellung muss das Bild deshalb auf 8 Bit – was 256 Stufen entspricht – reduziert werden. Mit

$$i_8 = m_{cp} \cdot i_{14} + b_{os} \quad (4.8)$$

wird die lineare Abbildung von 14-Bit auf 8-Bit beschrieben, mit dem Kompressionsfaktor m_{cp} , und dem Offsetwert b_{os} .

FLIR's Linear Histogram ist eine sehr einfache Bittiefenkompression, bei der die mittleren 90 % der Signalintensitätsstufen linear auf die 256 Grauwerte verteilt werden. Die unteren und oberen 5 % (auch Tailrejection genannt) werden jeweils zu Schwarz und zu Weiß zusammengefasst. Es gibt zwei Einstellparameter bei der 1. Version der TAU640: Der sog. Image Transform Table Midpoint P_{itt} und der Maximum Gain Parameter P_{gain} . Der Parameter P_{itt} setzt den Mittelpunkt des Histogramms im 8-Bit Bild und ermöglicht somit eine Helligkeits-Anpassung. Bei einem thermal breitbandigen Bild (heißes und kaltes Objekt im Bild) kann jedoch bei $P_{itt} \neq 128$ Information verloren gehen, da zu jedem Pixelwert ein Offset addiert wird, der zu einer Sättigung führen kann. Sättigung bedeutet in diesem Fall, dass ein Pixelwert durch den Offset größer 255 oder kleiner 0 sein müsste, auf Grund der Bittiefe von 8 aber den Wert 255 bzw. 0 annimmt. Der Parameter P_{gain} kann

ein schmalbandiges Signal auf einen größeren Grauwertbereich aufspreizen. Bei der Abbildung von 14-Bit auf 8-Bit werden mehrere nebeneinanderliegende 14-Bit-Intensitätsstufen in einer 8-Bit-Intensitätsstufe zusammengefasst. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem sog. Binning. Die Anzahl der maximal zusammengelegten Intensitätsstufen begrenzt der Parameter P_{gain} .

Bei der manuellen Einstellung der Helligkeit P_{H} und des Kontrasts P_{K} werden die 14-Bit Werte linear auf die 8-Bit Werte abgebildet. Es gilt Gleichung 4.8 mit

$$m_{\text{cp}} = \frac{P_{\text{K}}}{64} \quad \text{und} \quad b_{\text{os}} = 127 - P_{\text{H}} \cdot m_{\text{cp}} \quad (4.9)$$

Da eine Schwankung der Kameragehäusetemperatur einen großen Einfluss auf das Mikrobolometer-Signal hat, führt das bei einer manuellen Einstellung oft dazu, dass der interessante Temperaturbereich aus dem abgebildeten Arbeitsbereich hinaus driftet. Bei einem Einsatz im Freien macht deshalb die manuelle Einstellung nur Sinn, wenn der Helligkeitswert kontinuierlich nachgeregelt wird.

Der Modus Automatic Gain Control (**AGC**) erlaubt eine nichtlineare Bittiefenkompression. Zusätzlich zu den beiden Parametern P_{gain} und P_{itt} gibt es beim **AGC** noch den Plateau Parameter P_{plateau} , der einen stärkeren Kontrast der Szene ermöglicht. Er begrenzt die Anzahl der Pixel einer Signalintensitätsstufe. Wenn beispielsweise 200 Pixel im 14-Bit-Bild den Wert 6024 und 100 Pixel den Wert 6025 haben, würden bei einem Plateau Value von 300 alle 300 Pixel in eine 8-Bit-Intensitätsstufe fallen, bei einem Plateau Value von 200 würden daraus zwei Intensitätsstufen. Ein niedriger Plateau Value erzeugt eine gleichmäßige Verteilung über den gesamten Grauwertbereich. Ein hoher Plateau Value wirkt wie ein lineares Histogramm.

Von den zur Verfügung stehenden Anpassungsmöglichkeiten der 8-Bit-Darstellung ist keine für die Rehkitzdetektion optimal. Das Hauptproblem ist die nicht veränderbare Tailrejection² von 5%, die dazu führt, dass alle kleinen warmen Objekte – sofern sie nicht mehr als 5% des Bildes einnehmen – den Maximalwert erhalten. Dadurch können sie nicht mehr differenziert werden. Die Abb. 4.18 zeigt die Problematik an einem eindrucksvollen Beispiel. Es handelt sich um eine Szene mit einem Reh, die aus 80 m Höhe aufgenommen wurde. Beide Bilder zeigen die identische Szene. Im rechten Bild, das mit dem später beschriebenen **МБОПТ**-Algorithmus prozessiert wurde, ist das Reh eindeutig zu erkennen. Das linke Bild wurde am analogen Ausgang der Kamera abgegriffen. Obwohl das Reh deutlich wärmer als die gesamte Szene ist, kann man es auf dem analogen Bild kaum erkennen. Das liegt daran, dass es nur auf 33 von 327.680 Pixeln abgebildet wird, was etwa 0,1% des Bildes darstellt. Bei einer Tailrejection von 5% werden diese

²Im Gegensatz zur ersten Version der **TAU640** kann in den aktuelleren Versionen (> 2.7) der **IR-Kamera TAU2** die Tailrejection eingestellt werden.

33 Pixel zusammen mit weiteren 16.351 Pixeln, die nur homogene Wiese zeigen, zu Weiß zusammengefasst.

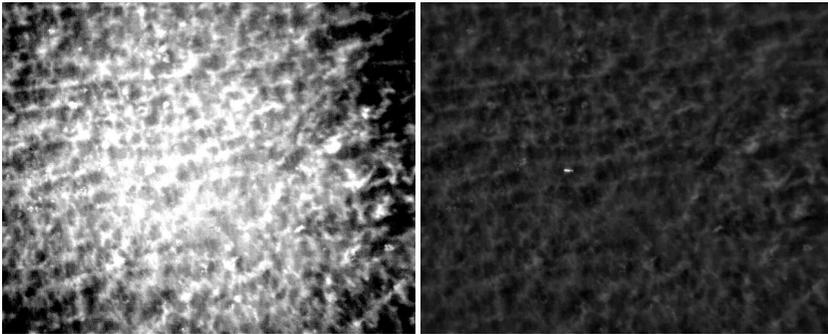


Abb. 4.18: Die Tailrejection-Problematik an einem Beispiel mit einem Reh aus 80 m Flughöhe. Links ist das Thermalbild zu sehen, wie es bei der TAU640 am analogen Ausgang zur Verfügung steht. Rechts ist das identische Bild dargestellt, nur diesmal als 14-Bit Rohbild abgegriffen und mit dem MbOpt-Algorithmus aus Kapitel 4.5.1 prozessiert.

Das Histogramm in Abb. 4.19 zeigt die Häufigkeitsverteilung der 14-Bit-Intensitätsstufen des Rohbildes zu Abb. 4.18. Die Reh-Pixel haben Intensitätswerte zwischen 6505 und 6895. Im dargestellten Histogramm sind sie aufgrund der geringen Anzahl bzw. des Maßstabs nicht erkennbar. Die weißen bzw. schwarzen Balken im Histogramm entsprechen im Analogbild den weißen bzw. schwarzen Pixeln. Die grauen Balken entsprechen den 254 restlichen Grauwerten im Analogbild.

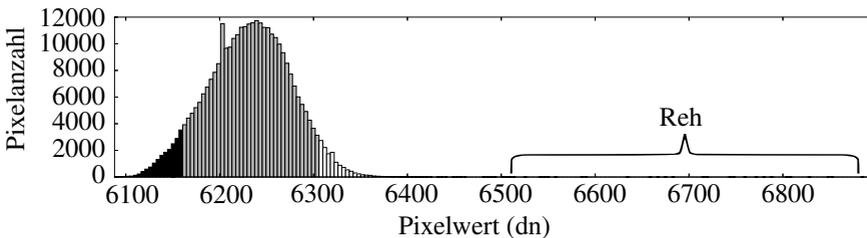


Abb. 4.19: Das Histogramm zu dem Rohbild aus Abb. 4.18. Die zusammengefassten Werte der Tailrejection sind jeweils als weiße und schwarze Balken dargestellt.

Ein weiteres Problem stellen die Lichtverhältnisse im Freien dar. Nach dem Weber’schen Gesetz [Web51] hängt die Wahrnehmung eines Reizunterschiedes ΔR_w

von der Reizintensität R_W wie folgt ab:

$$\frac{\Delta R_W}{R_W} = \text{const.} \quad (4.10)$$

Für die Wahrnehmung eines Helligkeitsunterschiedes auf einem Monitor bedeutet das folgendes: An einem sonnigen Tag kann die Beleuchtungsstärke der Sonne 100 000 lx betragen. Eine durchschnittliche Bürobeleuchtung beträgt ca. 500 lx. Um nun auf einem Computermonitor im Freien genauso viele Helligkeitsstufen wie im Büro erkennen zu können, müsste die Helligkeit des Monitors im Freien um den Faktor 2000 erhöht werden. Da selbst outdoortaugliche Monitore diesen Wert niemals erreichen können, wurde versucht den Kontrast im Bild soweit wie möglich zu erhöhen. Eine Verschiebung von P_{itt} auf 10 ermöglichte, dass nur noch deutlich warme Stellen als helle Flecken ausgegeben werden. Alle anderen Bereiche wurden dunkelgrau bis schwarz dargestellt.

Von den möglichen Einstellungen für das analoge Ausgangssignal der Kamera stellten folgende Einstellungen den besten Kompromiss dar: Automatic Gain Control

$$P_{\text{plateau}} = 1000$$

$$P_{\text{itt}} = 10$$

$$P_{\text{gain}} = 10$$

Allerdings konnte auch diese Einstellung nicht verhindern, dass die Fehlalarmquote an sonnigen Tagen besonders hoch war.

Digitales Ausgangssignal Den maximal möglichen Informationsgehalt enthalten die 14-Bit-Rawbilder. Selbst die kamerainterne tote Pixel Korrektur wird hier umgangen (siehe Abb. 4.17). Wenn dieses Signal verwendet wird, muss deshalb eine eigene tote Pixel Korrektur durchgeführt werden. Tote Pixel zeichnen sich dadurch aus, dass sie szenunenabhängig einen konstanten Grauwert besitzen. Eine Möglichkeit einer Tote Pixel Korrektur wird im Abschnitt 4.5.1 vorgestellt. Dort ist auch ein Beispielbild (Abb. 4.25 links), bei dem die toten Pixel als weiße Linien und Punkte zu sehen sind.

Um die Bilddaten auf einem Bildschirm anzeigen zu können, muss das Bild doch wieder auf 8-Bit komprimiert werden. Da aber voller Zugriff auf die Rawdaten vorhanden ist, kann ein eigener für die Anwendung optimierter Komprimierungsalgorithmus entworfen werden. Das Herausfiltern der Störungen der Kameragehäusetemperatur reduziert den Informationsgehalt im Bild. Bei Rawbildern kann diese Filterung vor der 8-Bit Komprimierung stattfinden. Zur Darstellung stehen dann die vollen 8-Bit zur Verfügung.

Nur mit Hilfe der 14-Bit Daten kann nach einer radiometrischen Kalibrierung der Kamera die tatsächlich gemessene absolute Strahlungstemperatur ermittelt werden.

4.4.3 Radiometrische Einflüsse der Kamera

Es hat sich zwar bereits in Abschnitt 4.2.1 gezeigt, dass die Strahlungstemperatur kein eindeutiges Merkmal zur Unterscheidung eines Rehkitzes von seiner Umgebung ist. Sie enthält jedoch trotzdem wertvolle Informationen. Bei zunehmender Strahlungstemperatur steigt zum Beispiel der Schwierigkeitsgrad der Detektion. Erst mit der Strahlungstemperatur kann auch die Temperaturdifferenz innerhalb eines Bildes in Kelvin anstatt nur in Grauwerten angegeben werden. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Störeinflüsse auf die gemessene Strahlungstemperatur behandelt. Der größte Messfehler besteht während der Aufwärmphase, in der die Kamera nicht betriebsbereit ist. Ändert sich die Gehäusetemperatur der Kamera z. B. weil die Sonne darauf scheint, können auch nach der Aufwärmphase noch große Messfehler entstehen. Mit Hilfe der Kerntemperatur des FPA können die Messfehler minimiert werden. Am Ende dieses Abschnitts wird die radiometrische Kalibrierung der Kamera vorgestellt.

Kameragehäusetemperatur Einen großen Einfluss auf das Thermalbild hat die Temperatur des Kameragehäuses (Abb. 2.15 in Kapitel 2.2.6 illustriert dies anschaulich). Je stärker sich die Gehäusetemperatur von der Temperatur der gemessenen Szene unterscheidet umso leichter ist ihr Einfluss auf die Messung erkennbar.

Mit Hilfe des reduzierten Raumwinkels lässt sich der Anteil der Kameragehäusestrahlung an der Gesamtstrahlung, die ein Detektorelement empfängt, leichter errechnen. Der reduzierte Raumwinkel ist die Projektion des Flächenintegrals der Hemisphäre auf die Detektorelementfläche. Für den gesamten Halbraum 2π ergibt sich laut [CW12] der reduzierte Raumwinkel zu

$$\omega_{\text{red}} = \pi. \quad (4.11)$$

Er teilt sich auf in den reduzierten Raumwinkelanteil ω_{FOV} , der Strahlung von außerhalb der Kamera empfängt, und dem reduzierten Raumwinkelanteil ω_{K} , der nur Kameragehäusestrahlung empfangen kann.

$$\omega_{\text{red}} = \omega_{\text{FOV}} + \omega_{\text{K}}. \quad (4.12)$$

Die Bestrahlungsstärke E_{pix} eines Detektorelements hängt von der äquivalenten Strahldichte L_{O} der Linse und der Strahldichte des Kameragehäuses L_{K} im Verhältnis der reduzierten Raumwinkel ω_{FOV} und ω_{K} wie folgt ab:

$$E_{\text{pix}} = L_{\text{O}} \cdot \omega_{\text{FOV}} + L_{\text{K}} \cdot \omega_{\text{K}}. \quad (4.13)$$

Gemäß [BG10] ist der reduzierte Raumwinkel

$$\omega_K = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{r_z^2 + f^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\sqrt{\left(r_z^2 + f^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2\right)^2 - 4\left(\frac{D}{2}\right)^2 r_z^2}} \right), \quad (4.14)$$

mit r_z als Abstand zum Zentralpixel, f als Brennweite bzw. Abstand des Sensorarrays zur Linse und D als Blendenöffnungsdurchmesser.

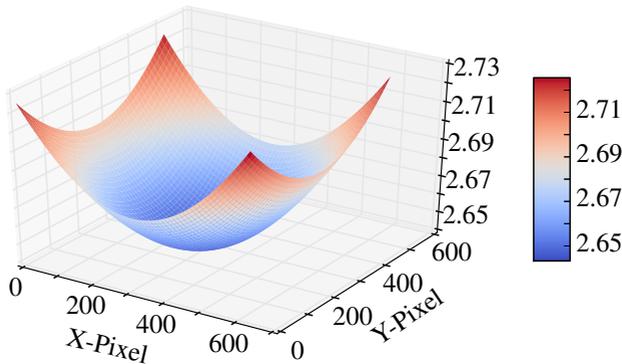


Abb. 4.20: Der reduzierte Raumwinkel ω_K , der nur Strahlung des Kameragehäuses empfängt, für alle Elemente des Sensorarrays, angegeben als prozentualen Anteil am gesamten Halbraum.

Für die Elemente des Sensorarrays der TAU640 mit dem 19 mm-Objektiv ergibt sich die prozentuale Verteilung des Raumwinkels ω_K am gesamten Halbraum wie in Abb. 4.20. Der reduzierte Raumwinkel der Kameragehäusestrahlung ist beim Zentralpixel 2,64 sr und beim äußersten Pixel 2,73 sr. Der reduzierte Raumwinkel ω_{FOV} hingegen ist maximal 0,50 sr. Damit beeinflusst eine Änderung der Kameragehäusetemperatur um 0,18 °C das Thermalbild genauso stark, wie wenn sich das betrachtete Objekt um 1 °C ändert.

Abb. 4.21 zeigt ein Beispielbild, bei dem trotz homogener Szene ein kreisförmiger Gradientenverlauf auf den Thermalbildern zu sehen ist.

In diesem Fall war die Temperatur des Kameragehäuses gleichmäßig, aber insgesamt geringer als die Szene auf dem Bild. Abb. 4.22 links zeigt ein Thermalbild mit einem linearen Gradientenverlauf von oben rechts nach unten links. In diesem Fall wurde die eine Seite des Kameragehäuses durch die Sonne stärker aufgewärmt als die gegenüberliegende Seite. Der Fliegende Wildretter war zum Zeitpunkt der Bildaufnahme nach Westen ausgerichtet, die Kamera zeigte nach unten. Die daraus

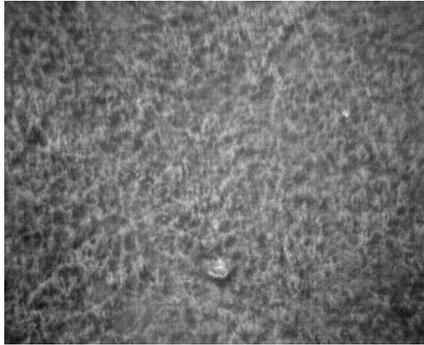


Abb. 4.21: Thermalbild einer homogenen Wiese aus 50 m Flughöhe, bei dem die geringere Temperatur des Kameragehäuses an den dunkleren Rändern des Bildes sichtbar ist.

resultierende Ausrichtung des Sensorchips der Kamera im Weltkoordinatensystem kann aus der Szenenrekonstruktion in Abb. 4.22 rechts entnommen werden. Die Sonne stand im Südosten, also dort wo das Bild dunkler ist. Durch die Projektion der Kamera wird das Bild punktspiegelt auf dem Sensorchip abgebildet. Der Sensorchipbereich, der den oberen rechten Teil des Bildes aufgenommen hat, war demnach der Strahlung der Sonne am stärksten ausgeliefert und stellt dadurch diesen Bereich im Bild wärmer dar.

Diese Störgröße kann theoretisch direkt bei der Aufnahme minimiert werden. Dazu muss das Kameragehäuse während der Aufnahme gleichmäßig auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden. Der pixelabhängige prozentuale Halbraumanteil dieses Temperaturwerts muss dann von jedem einzelnen Pixel auf dem resultierenden Thermalbild abgezogen werden. Die geringe Nutzlast des UAVs und der große Temperaturbereich, in dem das Gehäuse stabilisiert werden muss, stellen sehr hohe Anforderungen an solch ein System zur Temperaturstabilisierung.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, mit Bildverarbeitungsmethoden den Gradientenverlauf in den aufgenommenen Thermalbilddaten herauszufiltern. Vorteil dieser Methode ist, dass sie sehr einfach realisiert werden kann. Es muss keine spezielle Hardware entwickelt werden. Ein Nachteil dieser Methode ist die radiometrische Verfälschung der Messung. Da die Absoluttemperatur als Merkmal für die Detektion ungeeignet ist (siehe Kap. 4.2.1), ist dieser Nachteil allerdings vertretbar.

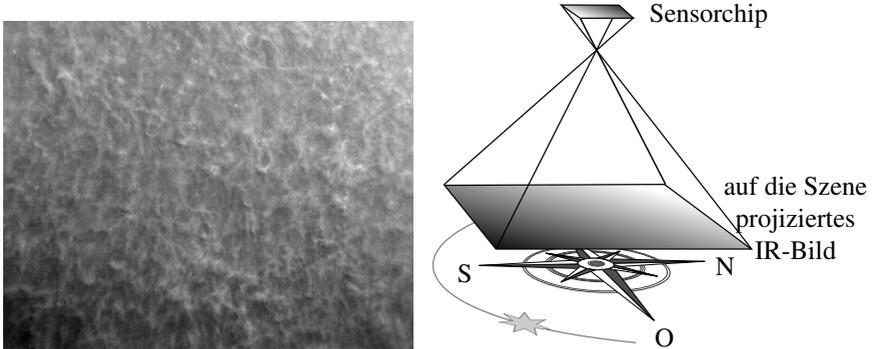


Abb. 4.22: Einseitig erwärmtes Kameragehäuse. Im Thermalbild (links), das eine Wiese aus 50 m Flughöhe zeigt, ist ein Gradientenverlauf sichtbar, der durch eine einseitige Kameragehäuserwärmung durch die Sonne verursacht wurde. Rechts ist eine schematische Rekonstruktion der Szene zum Zeitpunkt der Aufnahme dargestellt.

Aufwärmphase Während der Aufwärmphase – in den ersten zwei Minuten nach dem Anschalten der Kamera – ist die Messung der Strahlungstemperatur besonders stark fehlerbehaftet. Auch der Einfluss der Kameragehäusetemperatur macht sich in dieser Phase besonders stark bemerkbar. In erster Linie ist die Messung der Absoluttemperatur betroffen. Aufgrund der stärkeren Einflusses der Kameragehäusetemperatur an den Randpixeln ist aber auch eine relative Temperaturmessung (Temperaturunterschied zwischen verschiedenen Pixeln im Bild) fehlerbehaftet.

Wie Abb. 4.23 zeigt, nimmt die Amplitude des gemessenen Signals mit zunehmender Kerntemperatur ab. Das erklärt sich folgendermaßen: Das Mikrobolometer misst die Differenz zwischen seiner eigenen Temperatur und der Strahlungstemperatur des 25 °C warmen Schwarzkörpers. Wenn nun die eigene Temperatur während der Aufwärmphase zunimmt, wird die Differenz zur Strahlungstemperatur des 25 °C warmen Schwarzkörpers geringer. Dass die Amplitude des gemessenen Signals aber – unter Vernachlässigung des Rauschens – konstant bleibt, obwohl die Kerntemperatur der Kamera auch nach etwa 120 Sekunden noch weiter steigt, deutet darauf hin, dass die Mikrobolometer eine geringere thermische Masse besitzen, als das Bauteil, auf dem der Sensor zur Messung der Kerntemperatur sitzt³. Dieses Bauteil ist im Gegensatz zu den Mikrobolometern zu diesem Zeitpunkt noch nicht im thermischen Gleichgewicht. Das heißt, die Mikrobolometer haben nach ca. 120 Sekunden ihre Betriebstemperatur erreicht. Die gesamte Kamera ist nach

³Der Kerntemperatur-Sensor misst also nicht wirklich die Temperatur des FPA

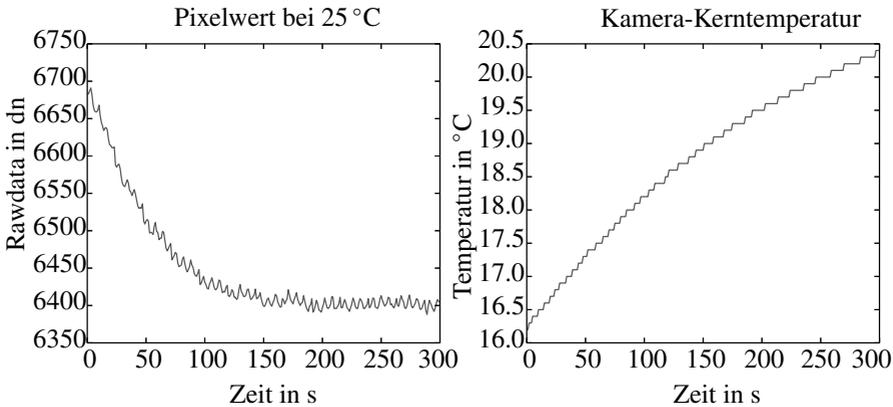


Abb. 4.23: Diagramme zur Kamera-Aufwärmphase. Während der Aufwärmphase in den ersten zwei Minuten verändern sich die Pixelwerte zeitlich sehr stark. Das linke Diagramm zeigt den durchschnittlichen Pixelwert eines 40×50 Pixel großen Bereichs im Zentrum der Kamera, der auf einen 25 °C warmen Schwarzkörper im Abstand von 1 m blickt. Das rechte Diagramm zeigt die Kerntemperatur der Kamera während der Aufwärmphase an.

ca. 10 Minuten im thermischen Gleichgewicht. Ab diesem Zeitpunkt stimmt die gemessene Kerntemperatur mit der tatsächlichen Temperatur des FPA überein.

Kalibrierung Zur radiometrischen Kalibrierung wird ein Schwarzkörper in einem halben Meter Abstand zur Kamera aufgestellt. Hierdurch wird der Einfluss der Atmosphäre reduziert. Es kann damit $\tau_{\text{Atm}} = 1$ angenommen werden. Es werden nacheinander verschiedene Temperaturen am Schwarzkörper eingestellt, und nachdem sich die Kamera und der Schwarzkörper jeweils im thermischen Gleichgewicht befindet, wird ein Bild erzeugt. Die Kalibrierkurve wird üblicherweise erzeugt, indem an die Messwerte $S_{\text{out}}(T_{\text{SK}})$ der unterschiedlichen Schwarzkörpertemperaturen T_{SK} folgender exponentiellen Fit-Funktion angenähert wird:

$$S_{\text{out}}(T_{\text{SK}}) = \frac{R}{e^{\frac{B}{T_{\text{SK}}}} - F}, \tag{4.15}$$

mit den Kalibrierparametern R als Response-Faktor, dem Spektral-Faktor B und dem Form-Faktor F [VM10],[MD09]. Nach eigenen Messungen ergab sich im Bereich zwischen $T_{\text{SK}} = 25\text{ °C}$ und $T_{\text{SK}} = 70\text{ °C}$ eine annähernd lineare Kurve mit einer Steigung von $37,6\text{ 1/k}$, solange die Kamerakerntemperatur konstant bei 23 °C

war. Eine gute Annäherung der Gleichung 4.15 an die Messwerte wurde mit den Parameterwerten $R = 12996$, $B = 333$ K und $F = 1$ erreicht. Die exponentielle Funktion verläuft dann im Bereich der Messungen annähernd linear. Um bei der Anwendung dann anstatt der Digital Numbers (dn) die Temperatur zu erhalten, wird die Gleichung 4.15 nach T_{SK} aufgelöst und T_{SK} durch T_{out} ersetzt:

$$T_{out} = \frac{B^c}{\log\left(\frac{R^c}{S_{out} + F^c}\right)}, \quad (4.16)$$

dabei sind B^c , R^c und F^c die Ergebnisse der Kalibrierung bei der konstanten Kerntemperatur T_{Core}^c . Nachdem die gesamte Kamera im thermischen Gleichgewicht ist, kann die Schwankung der Kerntemperatur dadurch korrigiert werden, indem die Differenz zur Kerntemperatur während der Kalibrierung von der resultierenden Messtemperatur abgezogen wird. Die kalibrierte Temperatur des gemessenen Objektes ergibt sich dann zu

$$T_{obj} = T_{out} - T_{Core}^c + T_{Core} \quad (4.17)$$

4.5 Bildverarbeitungssoftware

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit Bildverarbeitungsalgorithmen. Einerseits geht es darum, das Bild aufzubereiten, damit Rehkitze darauf visuell leichter entdeckt werden, und andererseits um eine Vorauswahl an relevanten Stellen im Bild zu treffen. Damit reduziert sich der Aufwand des visuellen Durchsuchens auf ein Minimum. Für die Bildaufbereitung bzw. Vorverarbeitung wurde der MBOPT-Algorithmus entwickelt (MBOPT steht für Mikrobolometer-Optimierung). Der vorgestellte SIMPLEFAWNDETECTOR kann bei günstigen Verhältnissen auch als automatischer Kitzdetektor verwendet werden.

4.5.1 Vorverarbeitung

Durch eine Vorverarbeitung wird das Eingangsbild so weit möglich von Störungen und Artefakten befreit, sodass die Detektion erleichtert wird.

Im folgenden Abschnitt wird der MBOPT-Algorithmus vorgestellt. Er stellt die gesamte Vorverarbeitung der 14-Bit-Rohbilder dar. Durch diesen Algorithmus können nun Rehkitze bei wesentlich schwierigeren Umgebungsbedingungen auf den Thermalbildern detektiert werden. Abb. 4.18 in Abschnitt 4.4.2 zeigt einen eindrucksvollen Vergleich.

Die tote Pixel Korrektur lässt sich durch eine Interpolation mit den Nachbarpixeln in einem ersten Vorverarbeitungsschritt leicht realisieren. Die einfachste Variante ist, dass für jede Kamera eine Lookup-Tabelle (LUT) erzeugt wird, in der die Koordinaten ihrer toten Pixel stehen, möglichst auch mit einer Vorzugsinterpolationsrichtung. Im Falle einer toten Pixel Linie (wie in Abb. 4.24 links) führt nur die Interpolation orthogonal zur Linie zu einer Verbesserung. Die Störung durch die Kameragehäusetemperatur lässt sich beispielsweise mit Hilfe eines Hochpassfilters heraus filtern. Dazu wird zuerst eine Maske erzeugt, bei der das Bild mit einem Gauß'schen Tiefpass gefiltert wird. Das resultierende Bild wird pixelweise von dem Originalbild abgezogen. Dieses Filter wird auch Unschärf Maskieren genannt. Es entspricht einem Hochpassfilter. Mathematisch lässt sich dieses Filter wie folgt beschreiben:

$$g(x, y) = f(x, y) - l(x, y, \sigma), \tag{4.18}$$

wobei $g(x, y)$ das gefilterte Ausgangsbild, $f(x, y)$ das Eingangsbild und $l(x, y, \sigma)$ das tiefpassgefilterte Bild mit der Kernelgröße σ ist. x und y sind jeweils die Pixelkoordinaten. Das tiefpassgefilterte Bild

$$l(x, y, \sigma) = f(x, y) * h(x, y, \sigma), \tag{4.19}$$

wird durch Faltung des Originalbildes $f(x, y)$ mit dem Gauß'schen Filter

$$h(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{4.20}$$

erzeugt. Die Filterkernelgröße σ bestimmt dabei die Ortsfrequenz des Tiefpassfilters. Für σ hat sich der Wert 127 bewährt. Damit verschwindet auf nahezu allen Bildern der Gradientenverlauf, der durch die Kameragehäusetemperatur entsteht.

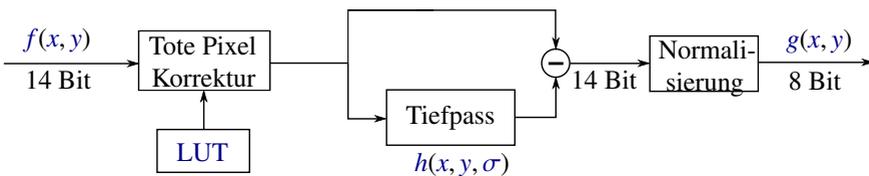


Abb. 4.24: Blockschaltbild des MBORT-Algorithmus.

Zur Darstellung von Bildern stehen auf sämtlichen Medien nur 8 Bit pro Kanal zur Verfügung. Die Konvertierung in ein darstellbares Bild muss der letzte Schritt in der Vorverarbeitungskette sein, um die maximale Information im Bild zu erhalten. Die Bilder werden auf 8-Bit normalisiert. Dazu wird der maximale und minimale Pixelwert im Bild gesucht und dieser Wertebereich linear den 256 Werte von 0 bis

255 zugeordnet. Spätestens an dieser Stelle gehen alle Informationen über die gemessene Temperatur verloren. Die relative Temperaturverteilung des resultierenden Bildes ist jedoch der Originalszene besser angenähert als die des Originalbilds.

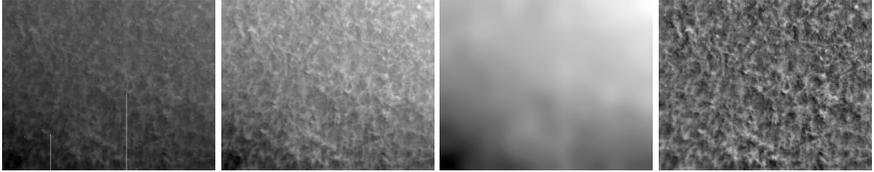


Abb. 4.25: Die Vorverarbeitung am Beispiel eines Thermalbildes einer Wiese aus ca. 50 m Flughöhe. Alle vier Abbildungen sind normalisiert, sodass der niedrigste Wert im Bild schwarz und der höchste Wert im Bild weiß dargestellt wird. Ganz links ist das unbearbeitete Thermalbild zu sehen, wie es aus dem 14-Bit-Raw Ausgang der Kamera kommt. Beim zweiten Bild wurden bereits die toten Pixel korrigiert. Daneben ist das tiefpassgefilterte Bild zu sehen, das die Störung des Kameragehäuses herausfiltert. Ganz rechts ist das fertig vorverarbeitete Bild zu sehen.

Die gesamte Vorverarbeitungskette ist als Blockschaltbild in Abb. 4.24 dargestellt. Abb. 4.25 zeigt die Bilder, die während der Prozessierung entstehen, an einem Beispiel.

4.5.2 Automatischer Rehkitzdetektor

23 000 Thermalbilder wurden in der Saison 2015 mit dem Fliegenden Wildretter erzeugt um Rehkitze in 171 ha Wiesenfläche aufzuspüren. Alle Bilder wurden visuell nach versteckten Kitzen untersucht. Pro Bild dauert das im Schnitt eine Sekunde. Insgesamt sind es für die 23 000 Bilder über 6 Stunden. Durch Automatisierung kann eine solche Aufgabe stark beschleunigt werden. Die Automatisierung bringt außerdem den Vorteil der gleichbleibenden Qualität, unabhängig von dem Benutzer und den Lichtverhältnissen beim Betrachten der Bilder. Die Interpretation der Thermalbilder ist nicht trivial. Die Benutzer des Systems müssen deshalb darauf geschult werden. Bei einem vollautomatischen System kann die Schulung entfallen. Die Qualität eines für diese Aufgabe gut trainierten Menschen erreicht ein automatischer Algorithmus nicht. Gerade wenn unerwartete Fehler auftreten und die Bilder nicht wie gewohnt aussehen, hat ein automatisches Verfahren große Schwächen. Für die Akzeptanz des Systems ist eine geringe falsch-negativ-Rate das wichtigste Kriterium beim Design des automatischen Rehkitzdetektors (siehe Kapitel 3.1.3).

Im folgenden Abschnitt wird der `SIMPLEFAWNDETECTOR` vorgestellt. Das ist ein einfacher Mustererkennungsalgorithmus, der bei nicht allzu schwierigen Wetterverhältnissen zuverlässige Ergebnisse liefert.

Der `SIMPLEFAWNDETECTOR` ist ein Mustererkennungsalgorithmus zur Detektion von lebendigen Tieren in der Größe eines Rehkitzes. Die Parameter wurden an Hand von Testdatensätzen evaluiert und geeignete Werte dafür empirisch ermittelt. In Abbildung 4.27 ist das Struktogramm zum `SIMPLEFAWNDETECTOR` abgebildet.

Um so wenig Information wie nötig zu verlieren, wird das 14-Bit Bild, bei dem noch keine Normalisierung durchgeführt wurde, als Eingangsbild verwendet. Der `SIMPLEFAWNDETECTOR` nutzt die zu jedem Bild bekannte Flughöhe als einen der wichtigsten Parameter. Mit ihr kann die Skalenvarianz der aufgenommenen Objekte grob herausgerechnet werden. Die Bodenauflösung S eines Pixel kann mit der Gleichung 2.13 berechnet werden⁴. Nachdem der Fokus der Kamera fest eingestellt wird, ist sie allein von der Flughöhe abhängig:

$$S(h_f) = \frac{h_f \cdot s}{c_k}, \quad (4.21)$$

Mit der bekannten Bodenauflösung können Größen und Abstände im Bild von Pixel in Meter umgerechnet werden.

Für den `SIMPLEFAWNDETECTOR` sind Objekte mit einem Durchmesser von 15 bis 60 cm interessant. Um die störenden Bildanteile herauszufiltern, wird auf das Eingangsbild ein Difference of Gaussians (`DoG`) Filter angewendet. Dieses Filter verhält sich wie ein Bandpass. Das Eingangsbild wird dazu einmal mit einem Gauß'schen Filter mit einer Kernelgröße von $\sigma_1 = \lceil d_{k,\min} \rceil$ bzw. $\lfloor d_{k,\min} \rfloor$ und einmal mit einer Kernelgröße von $\sigma_2 = \lceil d_{k,\max} \rceil$ bzw. $\lfloor d_{k,\max} \rfloor$ gefaltet (siehe Gleichung 4.19 und 4.20). Die beiden resultierenden Bilder werden voneinander abgezogen. Das Bandpass-gefilterte Bild ist dann:

$$g(x, y) = l(x, y, \sigma_1) - l(x, y, \sigma_2). \quad (4.22)$$

Mit der Gleichung 4.1 kann die Pixelanzahl d_k eines Objekts berechnet werden. Bei 80 m Flughöhe ergibt sich für die verwendete Kamera mit $D_{k,\min} = 0,15$ m für $d_{k,\min}$ der Wert 2,15 und mit $D_{k,\max} = 0,6$ m für $d_{k,\max}$ der Wert 8,59. Damit symmetrisch gefiltert wird, müssen die Kernelgrößen σ_1 und σ_2 ungerade sein. Aus diesem Grund wird hier jeweils auf die nächsthöhere ungerade Zahl aufgerundet. Damit ist bei diesem Beispiel $\sigma_1 = 3$ und $\sigma_2 = 9$. Das resultierende `DoG`-Bild enthält nur noch für die Detektion relevante Ortsfrequenzen. In [Ste+12] wurde anstatt eines `DoG`-Filter der Laplacian of Gaussians (`LoG`) Filter mit einer festen Kernelgröße

⁴Die Abweichung, die zu den Rändern hin entsteht, wird vernachlässigt

verwendet, um die Detektion von Wildtieren auf Thermalbildern zu erleichtern. Die Trennschärfe ist beim **LoG**-Filter höher als beim **DoG**-Filter. Allerdings ist auch der Rechenaufwand um ein Vielfaches höher.

Zusammenhängende helle Bereiche im Bild (im Folgenden als Blobs bezeichnet) werden mit Hilfe des Konturverfolgungsalgorithmus von Suzuki [Suz85] gefunden. Da dieser Algorithmus nur auf Binärbildern anwendbar ist, muss zuerst mit einer geeigneten Methode das **DoG**-Bild in ein Binärbild umgewandelt werden.

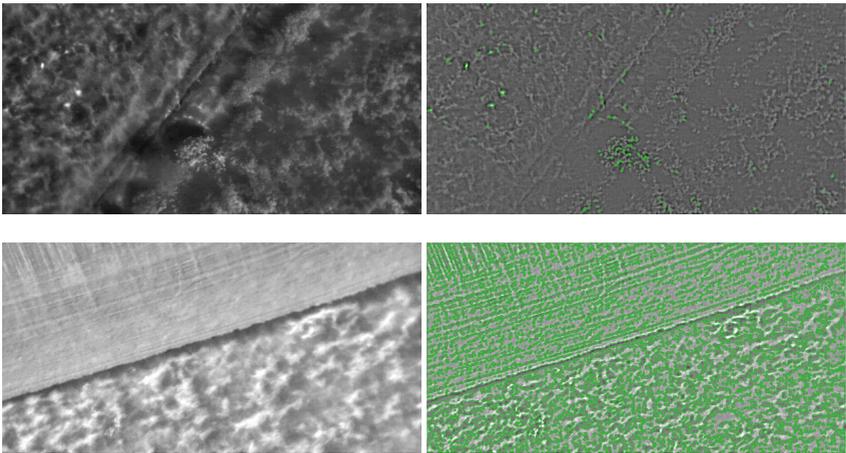


Abb. 4.26: Unterschiedliche Schwellwerte zur Blobdetektion auf **DoG**-gefilterten Bildern. Blobdetektion mit Hilfe des Difference of Gaussians Filters. Links ist jeweils ein Thermalbild abgebildet. Das obere Bild erscheint dunkler als das untere. Rechts daneben sind jeweils die zugehörigen **DoG**-Bilder zu sehen. In grün sind die Konturen der gefundenen Blobs bei festem Schwellwert von 90 dargestellt.

Die Bilder erscheinen durch die Normalisierung unterschiedlich hell (siehe Abschnitt 4.3.3). Der Durchschnittsgrauwert hängt davon ab, wie weit die Durchschnittstemperatur von der Maximal- bzw. Minimaltemperatur im Bild entfernt liegt. Abbildung 4.26 zeigt zwei Beispielbilder, die unterschiedlich hell erscheinen. Auf dem oberen Bild, in der Nähe des linken Randes, ist ein Rehkitz zu sehen. Auch die zugehörigen **DoG**-Bilder erscheinen unterschiedlich hell. Ein geeigneter Schwellwert t_{bin} zur Binarisierung des oberen **DoG**-Bildes liegt bei einem Grauwert von 93. Der Konturverfolgungsalgorithmus findet auf dem resultierenden Binärbild 175 Blobs. Wenn dieser Schwellwert zur Binarisierung des unteren **DoG**-Bildes verwendet wird, werden dort 4124 Blobs gefunden. Wie sich später noch zeigt, hat

die Anzahl der zu untersuchenden Blobs große Auswirkung auf die Auswertegeschwindigkeit des Systems, deshalb wird bereits bei der Binarisierung versucht, die Anzahl der Blobs klein zu halten.

Mit der Annahme, dass sich die relevanten Blobs unter den wärmsten befinden, wird die Binarisierung zufriedenstellend erreicht, wenn der Schwellwert

$$t_{\text{bin}} = \bar{B}_{\text{arithm}} \cdot \sigma_B \cdot \xi(\sigma_B), \quad (4.23)$$

mit \bar{B}_{arithm} als den arithmetischen Mittelwert aller Pixel im Bild, der zugehörigen Standardabweichung σ_B und einem empirisch ermittelten Faktor $\xi(\sigma_B)$, dessen von σ_B abhängigen Werte in der Tabelle 4.5 angegeben sind. Mit diesem dynamischen Schwellwert bleibt die Zahl der gefundenen Konturen in der Regel unter 500.

σ_B	0..5	5..7	7..9	9..12	12..15	15..22	22..30	30..255
$\xi(\sigma_B)$	6	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2

Tabelle 4.5: Wertetabelle für einen geeigneten Schwellwert-Faktor zur Binarisierung des DoG-Bildes

Das mit dem Schwellwert t_{bin} binarisierte DoG-Bild wird nun dem Konturverfolgungsalgorithmus übergeben, der eine Liste an Pixel-Positionen zurück liefert, die je einer zusammenhängende Kontur angehören. Aus den Konturen können Informationen für Merkmale des jeweiligen Blobs erzeugt werden. Beispiele hierfür sind der Umfang, die Fläche, der Durchschnittsgrauwert innerhalb des Blobs.

Die Fläche und der Umfang eines Blobs sind rotations- und translationsinvariante Merkmale. Gegenüber der Skalierung sind sie nicht invariant. Mit Hilfe der Distanzinformation zwischen Kamera und Objekt kann die Skalenvarianz ausgeglichen werden. Aus dem Umfang P und der Fläche A kann ein weiteres Merkmal – die Kreisförmigkeit C – gewonnen werden:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4.24)$$

Von den Konturen werden diejenigen in der Liste der relevanten Blobs gespeichert, deren Flächeninhalt zwischen A_{min} und A_{max} liegt.

Für jedes Blob der Liste wird der Durchschnittsgrauwert H_{blob} im normalisierten Originalbild berechnet. Da die Berechnung der Differenztemperatur zwischen einem Blob und seiner Umgebung sehr rechenaufwendig ist, wird zuvor überprüft, ob der Schwellwert t_{bin} kleiner als 110 ist. Bei allen Bildern, bei denen der Schwellwert größer ist, wird angenommen, dass dort kein Kitz vorhanden ist. Wenn außerdem

Bodenauflösung	$S = \frac{h_f \cdot s}{c_k}$	
Kitzradien	$r_{\min} = 0,02 \text{ m},$	$r_{\max} = 0,3 \text{ m}$
Kitzflächen	$A_{\min} = 2\pi \cdot (r_{\min}/S)^2, \quad A_{\max} = 2\pi \cdot (r_{\max}/S)^2$	
Maskenradien Umgeb.	$r_{\text{maskI}} = 1,5 \cdot r_{\max}/S,$	$r_{\text{maskA}} = 2,5 \cdot r_{\max}/S$
Erzeuge Difference of Gaussians Bild mit den Kernels σ_1 und σ_2		
Binarisiere DoG-Bild B mit dynamischem Schwellwert t_{bin}		
Finde alle zusammenhängenden Konturen mit Algorithmus von [Suz85] und speichere sie in Konturliste		
Für alle Konturen in Konturliste:		
Berechne die Konturfläche A		
Berechne den Konturumfang P		
Berechne die Kreisförmigkeit $C = \frac{4\pi A}{P}$		
Hänge neuen Blobeintrag an Blobliste an, wenn: $A_{\min} < A < A_{\max}$		
Speichere A, P, C und t_{bin} in dem Blobeintrag		
Für alle Blobs in Blobliste:		
Speichere zusätzliches Blob-Merkmal: $H_{blob} =$ Durchschnittsgrauwert des normalisierten Originalbildes im Bereich des Blobs		
$(H_{blob} > 100) \ \& \ (t_{bin} < 110) \ ?$		
Ja		Nein
Erzeuge torusförmige binäre Maske M mit den Radien r_{maskI} und r_{maskA} um das Blob		Blob ist nicht relevant
Multipliziere M mit B und erzeuge den Durchschnittsgrauwert H_{sur} von der Umgebung des Blobs		\emptyset
$\Delta H = H_{blob} - H_{\text{sur}}$		
$(C > 0,79) \ \& \ (\Delta H > 50) \ ?$		
Ja		Nein
Blob ist relevant	Blob ist nicht relevant	

Abb. 4.27: Struktogramm des SIMPLEFAWNDETECTORS

H_{blob} größer 100 ist, wird um das Zentrum des relevanten Blobs eine torusförmige binäre Maske erzeugt mit einem fest vorgegebenen Innen- und Außenradius von 45 cm und 75 cm. Durch Multiplikation dieser Maske mit dem normalisierten Ori-

ginalbild entsteht ein schwarzes Bild mit einem Ring. Der Mittelwert H_{sur} der Pixel dieses Rings ergibt einen Wert für die durchschnittliche Umgebungstemperatur im direkten Umfeld des gefundenen Blobs. Mit

$$\Delta H = H_{\text{blob}} - H_{\text{sur}} \quad (4.25)$$

ergibt sich ein Wert für die Differenztemperatur zwischen dem Blob und seiner Umgebung. Wenn

$$\Delta H > 50 \quad \text{und zugleich} \quad C > 0,79, \quad (4.26)$$

dann handelt es sich um ein relevantes Blob.

Dieser Algorithmus kann zur Vorauswahl von relevanten Blobs verwendet werden. Dadurch reduziert sich die Anzahl relevanter Bilder sehr stark. Bei schwierigen Bestrahlungsverhältnissen der Sonne können allerdings Kitze übersehen werden.

4.6 Evaluierung

In diesem Abschnitt werden die beiden Verfahren visuelle Detektion und automatische Detektion mit dem `SIMPLEFAWNDETECTOR` evaluiert. Dabei kommt stets die Suchstrategie III zum Einsatz. Die vorprozessierten Rohbilder, die erst ab der Suchstrategie III verfügbar sind, ermöglichen die maximal mögliche Detektion. Die höchste Qualität wird bei dem System Fliegender Wildretter erreicht, wenn die Bilder nicht vollautomatisch, sondern visuell untersucht werden. Die Fähigkeit des Menschen, Muster in Bildern zu erkennen, ist mit heutigen Bilderkennungsverfahren noch lange nicht erreicht.

4.6.1 Datensatz

Im Jahr 2015 wurden 57 Wiesen überflogen, um darin Kitze zu finden. Das System wird an Hand von 39 repräsentativen Datensätzen aus der 2015er Messkampagne evaluiert. Darin sind alle in 2015 gefundenen Kitze enthalten. Die einzelnen Datensätze enthalten zwischen 200 und 590 Thermalbilder jeweils eines Fluges aus 80 m Flughöhe über eine Wiese. Insgesamt sind es 15143 Bilder. In der Tabelle 4.6 sind neben der Anzahl der Individuen auch die Anzahl der Bilder aufgelistet, auf denen jeweils eine bestimmte Klasse an Tieren zu sehen sind. Auf 248 Bildern sind mehrere Tiere zu sehen.

Mit diesem Datensatz ist es nun möglich, Detektions-Algorithmen speziell zur Detektion von Rehkitzten gegeneinander zu evaluieren. Er enthält Daten von sehr einfachen bis zu sehr schwierigen Szenen.

	Individuen	Bilder (ges.)
Rehkitz	43	539
Kitzattrappe	1	89
Hase	23	311
adultes Reh	22	417
anderes Tier	2	25
kein Tier		14006
gesamt	91	15139

Tabelle 4.6: Der Evaluierungsdatensatz. Anzahl der Individuen und Bilder von Tieren, die auf dem Gesamtdatensatz zu sehen sind.

Der Evaluierungsdatensatz enthält Daten von 39 Flügen, die an 7 Tagen bei überwiegend sonnigem Wetter und einem Tag bei bedecktem Wetter aufgenommen wurden. Von den 57 tatsächlich durchgeführten Flügen wurden einige einfache, bei denen kein Kitz gefunden wurde, bewusst herausgelassen, um die Anzahl der Bilder bzw. die richtig negativ Fälle geringer zu halten. Bei der Darstellung im Precision Recall Diagramm haben die richtig negativ Fälle keine Auswirkung.

4.6.2 Visuelle Detektion

Da der Fliegende Wildretter immer mehrere Bilder von einer Fundstelle aufnimmt, und die Fundstelle nicht auf jedem Bild erkannt wird, muss es für die korrekte Bewertung der Klassifizierung ausreichen, wenn die Fundstelle nur auf einem Bild erkannt wurde. Ob nun eine Fundstelle auf dem einen Bild die selbe Fundstelle auf einem anderen Bild – dieser Punkt also homolog – ist, kann im Moment nur visuell überprüft werden. Denn obwohl die **GPS**- und Lagedaten zu jedem Bild gespeichert sind, können diese für eine automatische Bild zu Bild Projektion nicht verwendet werden. Sie sind dafür zu ungenau. Auch mit Hilfe von Stitching-Algorithmen wie z. B. **SIFT** (engl. *Scale-invariant feature transform*) ist nicht immer gewährleistet, dass die Fundstellen als homologe Punkte identifiziert werden. Auf 15143 Bildern die Fundstellen visuell zu durchsuchen, ist eine aufwendige Angelegenheit. Um die Arbeit zu erleichtern, wurde der Vorgänger (**POITAGGER**) der bereits vorgestellte Software **POITAGGER2** entwickelt. Während der Kampagne wurden damit die richtig positiven, wie auch die falsch positiven Fundstellen jeweils auf mindestens einem Bild markiert. Das Übertragen auf alle anderen Bilder in dem Datensatz war mit dieser Software innerhalb von 6 Stunden möglich.

In dem Precision Recall Diagramm (**PR**-Diagramm) in Abb. 4.28 ist das Ergebnis der visuellen Detektion abgebildet. Hier wird jede Fundstelle nur einmal berück-

sichtigt. Die blaue Kurve zeigt die Ergebnisse inklusive aller Rehe und Hasen. Die grüne Kurve zeigt die Ergebnisse alleine bezogen auf die Kitze. Zur Erstellung dieses Diagramms muss zu jeder detektierten Fundstelle die Trefferwahrscheinlichkeit angegeben werden. Die Trefferwahrscheinlichkeit wurde in Form von den fünf Schwierigkeitsstufen sehr leicht, leicht, mittel, schwierig und sehr schwierig angegeben. Da es zwei Entscheidungsmöglichkeiten gibt (eher ein Kitz und eher kein Kitz) sind damit insgesamt zehn Stufen für die Trefferwahrscheinlichkeit gegeben. Da der Mensch bei solchen Aufgaben nicht deterministisch entscheidet, muss angenommen werden, dass die errechnete Precision-Recall-Kurve nicht ganz exakt ist.

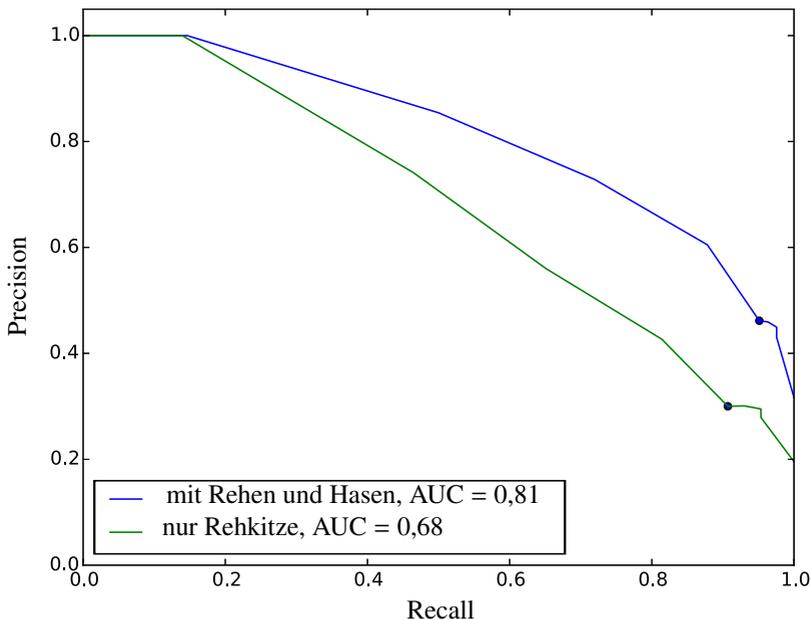


Abb. 4.28: Precision-Recall-Kurve für die visuelle Detektion

Die beiden Punkte rechts im Diagramm markieren die tatsächlichen Ergebnisse der Kampagne. Gefunden wurden genau 39 Kitze, 19 Hasen, 17 ausgewachsene Reh, ein Entengelege, ein Wildschwein und die Kitzattrappe. Diese Treffer zählen bei der blauen Kurve als richtig positiv. Bei der grünen Kurve zählen als Treffer nur die Kitze. Bei ihr werden alle anderen Tiere nicht mitgezählt. Die Klassifizierungsergebnisse sind in Tabelle 4.7 angegeben.

Die jeweilige Fläche unter der Kurve (*Area Under Curve*, **AUC**) ist eine Kennzahl,

um die Qualität eines binären Klassifikators einfach vergleichen zu können. Je näher der Wert bei 1 liegt, umso besser ist der Klassifikator.

	nur Kitze	alle Tiere
TP	39	78
FP	91	91
FN	4	4
<i>Precision</i>	0,23	0,46
<i>Recall</i>	0,91	0,95

Tabelle 4.7: Klassifizierungsergebnisse der visuellen Detektion für den kompletten Datensatz.

Vier Kitze wurden übersehen. Eines davon war nicht im Thermalbild sichtbar, weil es durch die Blätter eines Sauerampfers verdeckt war. Ein weiteres wäre auf dem Thermalbild leicht zu erkennen gewesen, wurde aber vom Nutzer übersehen. Die anderen beiden waren tatsächlich schwierig zu erkennen, aber dennoch auf dem Thermalbild sichtbar.

Das Ergebnis für „nur Kitze“ anders ausgedrückt bedeutet: Bei einer Trefferwahrscheinlichkeit (*Recall*) von 91 % – es wird also jedes zehnte Kitz übersehen –, ist jede vierte Fundstelle (*Precision*: 23 %) ein Kitz.

4.6.3 Automatische Detektion

Da das manuelle Markieren der homologen Punkte eine sehr mühsame und zeitaufwendige Aufgabe ist, wird sie für die automatische Detektion nicht durchgeführt. Deshalb wird für die folgenden Berechnungen das einzelne Bild anstatt dem Bildverbund einer Szene als Stichprobe verwendet. Damit kann die *Precision* sinken. Wenn man annimmt, dass pro Szene immer 10 Bilder aufgenommen wurden, kann die *Precision* im schlimmsten Fall ein Zehntel der möglichen *Precision* betragen. Es ist aber anzunehmen, dass der Fehler deutlich kleiner ist, denn nur bei den ganz schwierigen Fällen ist ein Kitz nur auf einem der aufgenommenen Bildern zu sehen.

Da die Trefferwahrscheinlichkeit des `SIMPLEFAWNDETECTORS` nicht automatisch erzeugt wird, müsste diese für jede Fundstelle manuell generiert werden, um ein PR-Diagramm zeichnen zu können. Da das sehr aufwendig ist, wird darauf verzichtet und anstatt dessen die Einzelergebnisse für verschiedene Datensätze angegeben.

In Tabelle 4.8 sind ausgewählte *Precision*- und *Recall*-Einzelergebnisse angegeben von jeweils einem Flug über eine Wiese bei unterschiedlich schwierigen Umgebungsbedingungen. Die Einstufung in die drei Schwierigkeitsgrade „einfach“,

„mittel“ und „schwierig“ wurde mit Hilfe der visuellen Detektion der jeweiligen Datensätze abgeschätzt.

Datensatz	1	2	3	4	5	6
Schwierigkeit	einfach	einfach	mittel	mittel	schwer	schwer
Bewölkung	8/8	8/8	4/8	2/8	2/8	0/8
Datum	17.5.15	17.5.15	28.6.15	31.5.15	2.6.15	28.5.15
Uhrzeit	10:57	10:15	09:38	10:04	11:08	11:37
TP	41	22	52	9	26	69
FP	13	33	146	94	217	379
FN	1	3	11	12	32	34
Precision	0,76	0,40	0,26	0,09	0,11	0,15
Recall	0,98	0,88	0,83	0,43	0,45	0,67

Tabelle 4.8: Klassifizierungsergebnisse des SIMPLEFAWNDETEKTORS für einzelne Flüge.

Die Ergebnisse beziehen sich auf alle Tiere, also vergleichbar mit der blauen Kurve in Abb. 4.28. Die ersten beiden Datensätze in Tabelle 4.8 ergaben bei visueller Detektion für *Precision* und *Recall* jeweils den Wert 1. Es wurde also kein Tier übersehen, es gab aber auch keine falsch positive Fundstelle. Der SIMPLEFAWNDETEKTOR hat bei diesen beiden Datensätzen auch alle Tiere mindestens auf einem Bild erkannt. Beim ersten Flug lagen vier Kitz in der Wiese, von diesen wurden insgesamt 42 Bilder aufgenommen. Nur auf einem Bild wurde das Kitz durch den Detektor nicht erkannt. Daran erkennt man, wie wichtig die Wahl der Stichprobe ist. In Wirklichkeit liegen die *Recall*-Werte für beide Datensätze bei 1. Die Positionen der Kitz zum ersten Datensatz sind übrigens im Georeferenzierungskapitel in Abb. 5.18 zu sehen.

Dass der *Precision*-Wert des zweiten Datensatzes beim SIMPLEFAWNDETEKTOR so niedrig ist, obwohl der Himmel vollständig bedeckt war, liegt daran, dass der Pilot häufig im Bild zu sehen war, und dieser ständig als relevante Fundstelle erachtet wurde.

Für einfache Umgebungsbedingungen ist daher der SIMPLEFAWNDETEKTOR als Vorselektion, wie er in dem Softwareprogramm POITAGGER bereits implementiert ist, eine gute Unterstützung. Offensichtliche falsch positiv Fundstellen können bei Durchsicht der vorselektierten Bilder ignoriert werden. Relevante Fundstellen werden als solche markiert. Dadurch entsteht ein Werkzeug, mit dem in kurzer Zeit zuverlässig Kitz gefunden werden können. Bei schwierigen Umgebungsbedingungen darf man sich aber nicht auf den SIMPLEFAWNDETEKTOR verlassen, denn dann werden mehr Kitz übersehen, als wenn man sich alle Bilder einzeln ansieht.

4.7 Zusammenfassung

Die wichtigsten Merkmale, um ein Rehkitz in der Wiese zu finden, sind: die Temperaturdifferenz zwischen Kitz und Umgebung und die Größe und Form des Kitzes. Eine Thermalkamera, die von einem Fluggerät senkrecht nach unten blickt, liefert unter allen in dieser Dissertation beschriebenen Verfahren den größten Informationsgehalt, um Rehkitze zu detektieren. Die größte Schwierigkeit besteht mit diesem Verfahren darin, bei Sonnenschein Kitze von erwärmten Erdhügeln oder anderen Objekten zu unterscheiden. Mit den entwickelten Bildvorverarbeitungsalgorithmen, angewendet auf die digitalen Rohbilder der verwendeten Thermalkamera, gelingt es, bei jeder Tageszeit und jedem Wetter selbst aus 80 m Flughöhe, Rehkitze mit einer durchschnittlichen Trefferquote von 91 % zu detektieren. Die Anzahl der Fehlalarme liegt unter schwierigsten Verhältnissen bei visueller Detektion durch einen geübten Benutzer bei maximal 3,5 pro Hektar.

Bei Abwesenheit der Sonne detektiert der entwickelte `SIMPLEFAWNDETECTOR` automatisch und zuverlässig alle sichtbaren Kitze. Für eine maximale Effizienz des gesamten Rettungsprozesses beschleunigt er als Vorselektor die visuelle Detektion. Unter schwierigen Umgebungsbedingungen sollte der `SIMPLEFAWNDETECTOR` nicht eingesetzt werden. Dann ist die alleinige visuelle Detektion die einzig zuverlässige Methode, um möglichst wenige Kitze zu übersehen.

5 Georeferenzierung

Die Aufgabe des Fliegenden Wildretters birgt zwei wesentliche Herausforderungen. Das Detektieren und das Lokalisieren von Rehkitzen. Das Detektieren wurde in Kapitel 4 behandelt. Dieses Kapitel beschäftigt sich ausschließlich mit dem Lokalisieren. Zur Lokalisierung stehen die indirekte und die direkte Georeferenzierung zur Auswahl. Aufgrund des hohen interaktiven Arbeits- und Zeitaufwandes, der mit der klassischen indirekten Georeferenzierung (Aerotriangulation) verbunden ist, kommt diese für die Anwendung bei der Rehkitzsuche, die besonders zeitkritisch ist, nicht in Frage. Zudem ist die Anforderung an die Genauigkeit bei der Rehkitzsuche wesentlich geringer als bei Vermessungsaufgaben. Deshalb wird für diese Anwendung die direkte Georeferenzierung bevorzugt. Die dafür benötigten GPS- und Inertialsystem-Sensoren (eng. *inertial measurement unit*, **IMU**) werden auch zur Flugstabilisierung eines UAVs benötigt, deshalb liegt es nahe, diese Daten für die Georeferenzierung gleich während dem Flug abzugreifen.

In diesem Kapitel wird zunächst auf eine neue mathematische Formulierung der direkten Georeferenzierung eingegangen, die dann am Beispiel des Fliegenden Wildretters angewendet wird. Danach werden die wichtigsten Einflussgrößen auf die Georeferenzierung behandelt. Speziell das dynamische Flugverhalten des UAVs stellt hier eine Herausforderung an die Lagemessung dar. Im darauffolgenden Abschnitt wird auf die geometrische Kalibrierung der Thermalkamera eingegangen. Thermalkameras werden bisher für Photogrammetrieaufgaben wenig eingesetzt, deshalb berücksichtigen die Standardverfahren zur geometrischen Kalibrierung diese oft unzureichend. Es wurden Verfahren entwickelt, die die Besonderheiten einer Thermalkamera berücksichtigen. Danach folgt ein kurzer Abschnitt über die Boresight-Kalibrierung¹. Im letzten Abschnitt wird anhand ausgewählter Datensätze aus der Messkampagne 2015 die Georeferenzierung evaluiert.

¹Damit wird die Einbaulage der Kamera zum Fluggerät bestimmt.

5.1 Direkte Georeferenzierung

5.1.1 Mathematisches Modell

Unter Vernachlässigung der Abbildungsfehler lassen sich die Raumkoordinaten $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ eines auf das Kamerabild projizierten Punktes $\mathbf{x} = [x, y]^T$ mit Hilfe eines Höhenmodells und der Gleichung 2.25 zurückrechnen. In diesem Abschnitt wird eine alternative Formulierung mit homogenen Koordinaten vorgestellt. Eine Erläuterung zur projektiven Geometrie und homogenen Koordinaten ist im Anhang A.2 zu finden. Diese alternative Formulierung ist wesentlich kompakter und eleganter als die üblicherweise verwendete Gleichung 2.25 zur direkten Georeferenzierung. Basierend auf dem in der Computer Vision Forschergemeinschaft verwendeten Kameramodell (siehe Kapitel 2.3.3) wurde eine Formulierung entwickelt, bei dem die Projektionsmatrix invertierbar ist. Die Projektionsmatrix des Kameramodells aus Kapitel 2.3.3 ist eine 3×4 Matrix und damit nicht invertierbar. Zunächst wird die Vorwärtsprojektion, also vom 3D-Objekt \mathbf{X} auf den Punkt \mathbf{x} im Kamerabild betrachtet.

Ein 3D-Punkt mit den homogenen Koordinaten $\tilde{\mathbf{X}} = [X, Y, Z, W]^T$ mit $W = 1$ wird zunächst durch das Projektionszentrum (die Linse) auf den homogenen Punkt $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{w}]^T$ abgebildet (siehe Abb. 5.1). Für $f \gg 1$ gibt es eine invertierbare

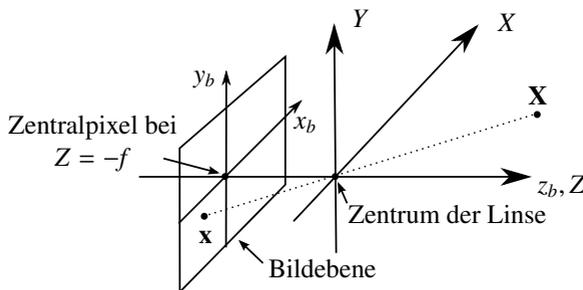


Abb. 5.1: Die Zentralprojektion eines Punktes \mathbf{X} auf den Punkt \mathbf{x} auf der Bildfläche.

Projektionsmatrix im \mathbb{P}^3 , die der Zentralprojektion mit der Bildweite f entspricht.

Sie und ihre Inverse ist gegeben durch:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{f} & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} + 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Eine ähnliche wie die empirisch gefundene Matrix \mathbf{P} ist in [Bis] veröffentlicht. Allerdings hat die dort veröffentlichte Matrix einen Fehler und ist deshalb nicht invertierbar.

Die Gleichung für die Zentralprojektion lautet:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{P} \cdot \bar{\mathbf{X}}, \quad (5.2)$$

Wenn nun der Punkt $\bar{\mathbf{X}}$ nicht im Kamera-, sondern in einem übergeordneten Koordinatensystem angegeben ist, kann eine Transformation ins Kamerakoordinatensystem von rechts an die Projektionsmatrix in Gleichung 5.2 angehängt werden. Bei einem UAS mit Nutzlasthalter muss ein Punkt, der in geografischen Koordinaten angegeben ist, zuerst in das UAV-Koordinatensystem und dann in das Kamerakoordinatensystem umgerechnet werden. Die gesamte Gleichung 5.2 wird dann durch Folgende ersetzt:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{PS}_w^k \cdot \bar{\mathbf{X}} \quad (5.3)$$

Die Koordinatentransformationsmatrix \mathbf{S}_w^k enthält sowohl alle Rotationen als auch die Translationen vom Welt- in das UAV-Koordinatensystem und auch alle Transformationen vom UAV- in das Kamerakoordinatensystem. Bei Rotationen ist die Reihenfolge nicht kommutativ. Die Matrizen werden der Reihe nach entsprechend der Drehung um eine bestimmte Achse links angehängt (siehe Anhang A.1).

Die Begrenzung der Projektion auf die Bildebene geschieht im letzten Schritt. Erst wenn alle Komponenten des Vektors $\bar{\mathbf{x}}$ durch seine eigene w -Komponente geteilt wurden, stellt der resultierende Vektor $\vec{\mathbf{x}}$ die Projektion auf die Bildebene dar. Die Normalisierung eines projektiven Vektors ist vergleichbar mit dem Erzeugen eines Schnittpunktes einer Geraden mit einer Ebene. Mit

$$\vec{\mathbf{x}} = \frac{1}{w} \bar{\mathbf{x}} \quad (5.4)$$

wird der projektive Vektor \mathbf{x} normalisiert. Die w -Komponente des Vektors $\vec{\mathbf{x}}$ hat dann den Wert 1 und die z -Komponente den Wert f . Gibt man f in Pixeleinheiten²

²Die Bildweite f wird dazu durch die Pixelseitenlänge s geteilt.

an, so resultiert auch für \vec{x} die Pixeleinheit mit dem Ursprung im Zentralpixel³.

Bisher sind noch keine Linsenverzeichnung und sonstige Abbildungsfehler berücksichtigt. Es gibt verschiedene Kameramodelle, die Abbildungsfehler berücksichtigen. Das bekannteste ist das von Duane C. Brown (siehe Abschnitt 2.3.3). Da dieses Modell nicht gut genug an die Messwerte der geometrischen Kalibrierung angenähert werden konnte (siehe Abschnitt 5.3.2), wird eine Lookup-Tabelle angelegt, die allen Pixeln der idealen Zentralprojektion eine Fließkomma-Pixelposition auf der realen Bildebene zuweist. Die Transformation mit Hilfe der Lookup-Tabelle kann als mathematische Funktion \mathbf{L} angegeben werden mit :

$$\mathbf{x} = \mathbf{L}(\vec{x}) \quad (5.5)$$

Für die direkte Georeferenzierung ist nicht die Projektion vom 3D-Objekt auf das Kamerabild von Interesse, sondern die inverse Projektion, also vom Kamerabild auf das 3D-Objekt. Anders als bei der üblichen Notation (siehe Abschnitt 2.3.3), lässt sich die Gleichung 5.3 aufgrund der durchgängig verwendeten homogenen Koordinatendarstellung komplett invertieren. Eine inverse Lookup-Tabelle \mathbf{L}^{-1} kann ebenso erzeugt werden. Damit stellt die folgende Gleichung den korrigierten Richtungsvektor des Punktes \mathbf{x} im Weltkoordinatensystem dar.

$$\vec{\mathbf{X}} = (\mathbf{S}_w^k)^{-1} \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{x}). \quad (5.6)$$

Mit Hilfe dieses Vektors kann eine Gerade formuliert werden.

$$g = \lambda \vec{\mathbf{X}} + \mathbf{X}_0 \quad (5.7)$$

Der Schnittpunkt dieser Geraden mit dem digitalen Geländemodell ergibt die prognostizierten 3D-Koordinaten des Punktes \mathbf{X} im Weltkoordinatensystem.

5.1.2 Technische Umsetzung

Die Abbildung 5.2 zeigt die Koordinatensysteme des Fliegenden Wildretters. Besonders zu berücksichtigen ist, dass das geodätische Koordinatensystem, sowie das des UAVs ein linksseitiges ist, wohingegen das Kamerakordinatensystem ein rechtsseitiges ist.

Üblicherweise hat das geodätische Koordinatensystem seinen Ursprung dort, wo der Nullmeridian den Äquator schneidet. Für die Georeferenzierung der Fundstellen beim Fliegenden Wildretter werden die geografischen Koordinaten (Längen-

³Das ist das Pixel, das von der optischen Achse durchstoßen wird.

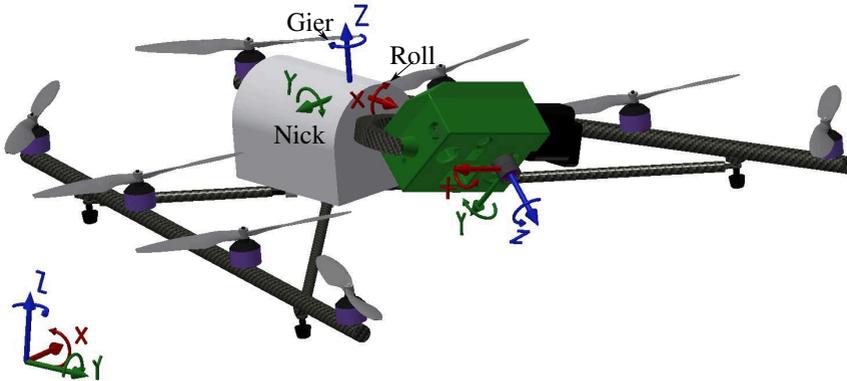


Abb. 5.2: Ein 3D-Modell des Fliegenden Wildretters mit den verschiedenen Koordinatensystemen.

und Breitengrade) mit dem Referenzellipsoid des World Geodetic Systems 1984 (WGS84) und das UTM-Koordinatensystem (engl. *Universal Transverse Mercator*) eingesetzt. UTM bezieht sich auf das selbe Referenzellipsoid, deshalb können die beiden Koordinatensysteme leicht ineinander umgerechnet werden. Da UTM im Gegensatz zur geogr. Länge und Breite ein orthogonales Koordinatensystem darstellt, wird dieses zur Berechnung verwendet. Im Gegensatz zu UTM, bei dem neben dem Wert für die Rechts- und die Hochachse auch immer eine Zone und eine Zonennummer angegeben werden muss, sind die Werte für Rechts- und Hochachse bei den geografischen Koordinaten eindeutig. Deshalb wird dieses Datum zur Übermittlung verwendet. Wenn im folgenden von Weltkoordinaten die Rede ist, dann ist das UTM-Koordinatensystem gemeint mit jenem Zonenfeld, in das der Abhebeort des Fluggeräts fällt.

Das Fluggerät misst seine eigene Position mit einem GPS-Empfänger und speichert die Koordinaten in geografischen Längen- und Breitengraden im 10 Hz-Takt ab. Das System orientiert sich im Bezug auf die Himmelsrichtung durch einen elektronischen Kompass. Die IMU verfügt über einen 3-achsigen elektronischen Beschleunigungssensor und einen ebenfalls 3-achsigen elektronischen Gyrosensor.

Da die X- und Y-Koordinaten vom UAV direkt in Längen- und Breitengraden abgespeichert werden, ist für diese beiden Achsen keine Umrechnung nötig.

Von den drei Rotationswinkeln interessiert für die Georeferenzierung vorerst nur der Gier-Winkel $\kappa_u = \kappa_k$. Denn die anderen beiden werden von dem Nutzlasthalter ausgeglichen. Der Rollwinkel ω_k wird dabei auf 0° und der Nickwinkel θ_k wird auf

90° (Nadir) nachgeregelt. Damit beschränkt sich die Umrechnung zwischen Welt- und UAV-Koordinatensystem auf die Flughöhe und den Gier-Winkel.

Die Transformation zwischen UAV und Kamera ist etwas aufwendiger. Die Reihenfolge der Rotationsachsen bei der Aufhängung des Nutzlasthalters folgt nicht wie üblich in der Luftfahrt der Z, Y', X'' -Konvention, sondern der Z, X', Y'' -Konvention. Das bedeutet, dass zuerst um die Z -Achse gedreht wird, danach um die gedrehte X -Achse und zuletzt um die nun zweifach verdrehte Y -Achse. Beim Versatz zwischen UAV- und Kamera-Koordinatensystem können alle Strecken bis auf die Strecke ΔX_b , die den Versatz zwischen der GPS-Antenne und der Kameralinse in X -Richtung beschreibt, vernachlässigt werden, da sie kleiner 2 cm sind und das weit unter der erreichbaren Genauigkeit der hier vorgestellten Georeferenzierung liegt. ΔX_b liegt beim Fliegenden Wildretter bei 22 cm. Der Versatz zwischen GPS und IMU kann ebenfalls vernachlässigt werden. Bei der Transformation vom Kamera- ins UAV-Koordinatensystem ändert sich neben der Orientierung der Achsen auch noch der Drehsinn. Dies berücksichtigt die Rotationsmatrix \mathbf{R}_k^u in Gleichung 5.9. Die Boresightwinkel (oder auch Kameraeinbaugewinkel) werden den Kamerawinkeln aufaddiert:

$$\omega = \omega_b + \omega_k, \quad \theta = \theta_b + \theta_k, \quad \kappa = \kappa_u + \kappa_b \quad (5.8)$$

Die Transformationsmatrix $\mathbf{S}_k^w = (\mathbf{S}_w^k)^{-1}$ lautet in Abhängigkeit der Winkel ω, θ, κ , der UAV-Position X_u, Y_u, Z_u und dem Versatz ΔX_b wie folgt:

$$\mathbf{S}_k^w = \mathbf{T}_w^u(X_u, Y_u, Z_u) \mathbf{R}_z(\kappa) \mathbf{T}_u^k(\Delta X_b) \mathbf{R}_x(\omega) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_k^u, \quad (5.9)$$

mit den eingesetzten Matrizen

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_w^u(X_u, Y_u, Z_u) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_u \\ 0 & 1 & 0 & Y_u \\ 0 & 0 & 1 & Z_u \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\kappa) &= \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{T}_u^k(\Delta X_b) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta X_b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.10)$$

und

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_x(\omega) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) & 0 \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{R}_y(\theta) &= \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 \mathbf{R}_k^u &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Für die performante Berechnung des Schnittpunkts mit dem Geländemodell wurde der Raymarchingalgorithmus [KV84] implementiert.

5.2 Einflussgrößen auf die Georeferenzierung

Die Messung der äußeren Orientierung der Kamera hat bei der direkten Georeferenzierung einen sehr großen Einfluss auf die Genauigkeit. Die äußere Orientierung ist einerseits abhängig von dem Einbauwinkel und den Abständen zur IMU des Flugsystems und andererseits von den gemessenen Lagewinkeln der IMU und den Positionen des GPS-Empfängers. Neben der später behandelten Boresight-Kalibrierung, mit der der Einbauwinkel der Kamera auf dem System festgestellt werden kann, spielen die Abweichungen bei der Lagewinkelmessung eine große Rolle. Diese Messungen sind auf einem UAV schwierig durchzuführen. Speziell das dynamische Flugverhalten, das nötig ist, um Windböen auszugleichen oder auch zur Fortbewegung, erschwert die Lagemessung.

Die Synchronisierung der Bild- und Lagedaten birgt eine weitere Unsicherheit bei der Georeferenzierung, die vor allem bei dynamischem Flugverhalten auffällt. Von den im $8\frac{1}{3}$ Hz-Takt zur Verfügung stehenden Bildern wird jede Sekunde ein Bild abgespeichert. Damit entsteht ein Jitter von 120 ms. Die Lagedaten stehen mit einer Aufzeichnungsrate von 10 Hz zur Verfügung. Im ungünstigsten Fall werden dann Bild- und Lagedaten mit einem Versatz von 220 ms zusammen abgespeichert.

Daneben sind vor allem die Messungen des Kompasses und des Beschleunigungssensors zeitweise stark fehlerbehaftet. Dies führt zu einer falsch geschätzten äußeren Orientierung der Kamera, was eine falsche Georeferenzierung zur Folge hat.

Obwohl die geografische Positionsbestimmung (X- und Y-Wert) der GPS-Messung ebenfalls fehlerbehaftet ist, reicht ihre Genauigkeit aus, um keine nennenswerte Beeinträchtigung für die Anwendung darzustellen. Die absolute Positionsbestimmung weicht in 95 % der Messungen maximal um 7,8 m ab. Das erscheint für die Anwendung der Rehkitzsuche auf den ersten Blick zu hoch. Bei dieser Anwendung wird eine erste Messung vom UAV durchgeführt. Sobald dieses gelandet ist und die Daten ausgewertet sind, wird mit einem Handheld-GPS die Fundstelle aufgesucht. Beim Fundort angelangt, wird die zweite Messung – diesmal nicht vom UAV, sondern vom Handheld-GPS aus – durchgeführt. Je geringer die Abweichung zur ersten Messung ist, umso schneller findet die Person das Kitz. Insofern verlangt die Anwendung nach einer hohen Präzision innerhalb eines Zeitraums von 0 bis 2 Stunden. Innerhalb dieses Zeitraums wird in der Regel die bereits abgeflogene Wiese zur Rettung der Kitze zu Fuß aufgesucht. Die absolute Genauigkeit spielt keine Rolle. In den folgenden Abschnitten wird speziell auf diejenigen Aspekte eingegangen, die einen besonders großen Einfluss auf die Präzision der Georeferenzierung haben.

5.2.1 Nick-Roll-Ausgleich

Der FALCON 8 besitzt zwar einen Nick-Roll-Ausgleich für die Nutzlast, allerdings benötigen die Nutzlast-Servos mehr Zeit für das Nachstellen der Nick- und Roll-Winkel als die Antriebsmotoren für die Flugstabilisierung. Neben einer möglichen Bewegungsunschärfe auf den Bildern führt dies dazu, dass die Kamera nicht immer in die gewünschte Richtung blickt. Die Abweichung des Kamera-Nickwinkels vom Sollzustand lässt sich messen, wenn die Kamera nach vorne gerichtet ist und im Sekundentakt Bilder aufgenommen werden. Bei einer Vorwärtsbewegung neigt sich ein Multikopter nach vorne. Der Nutzlasthalter muss dann den Nickwinkel nachregeln. Wenn dies nicht zeitgleich geschieht, lässt sich auf den Bildern ein wandernder Horizont erkennen wie in Abb. 5.3. Wenn die Kamera korrekt ausgerichtet ist, liegt der Horizont in der Mitte des Bildes.

Abb. 5.4 zeigt für einen Ausschnitt eines Fluges den Nickwinkel des UAVs, die y-Pixelposition eines festen Punktes am Horizont und die geflogene Strecke während dieser Zeit. Zu den Zeitpunkten, wo der Nickwinkel hohe Amplituden aufweist, liegt der Horizont weit weg von der Mitte des Bildes. Die hohen Amplituden treten primär beim Beschleunigen aus dem Schwebeflug auf. Aber auch zum Abbremsen muss der Multikopter den Lagewinkel anpassen. Man sieht an der Steigung in der untersten Kurve, die die abgeflogene Strecke visualisiert, dass der Abbremsvorgang sanfter vonstatten geht als der Beschleunigungsvorgang. Die Stellgeschwindigkeit des Nickservos liegt laut Datenblatt bei maximal $0,196 \frac{\text{s}}{60^\circ}$. Aus den Messungen in Abb. 5.4 geht hervor, dass die Nachstellzeit von 12° bei mindestens 2 Sekunden

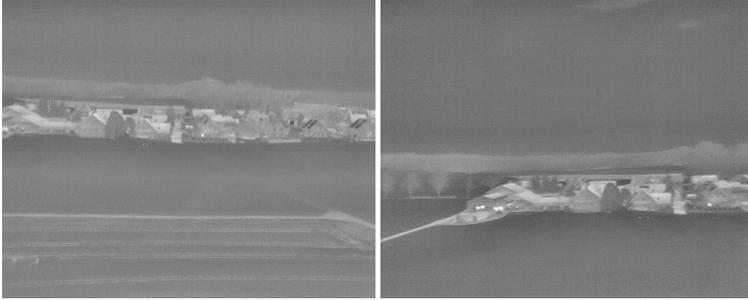


Abb. 5.3: Bilder der Lagestabilitätsanalyse. Sie wurden zu den Zeitpunkten 15:14:59 und 15:15:04 aufgenommen (rote Punkte in Abb. 5.4). Der Horizont „wandert“ um ca. 100 Pixel.

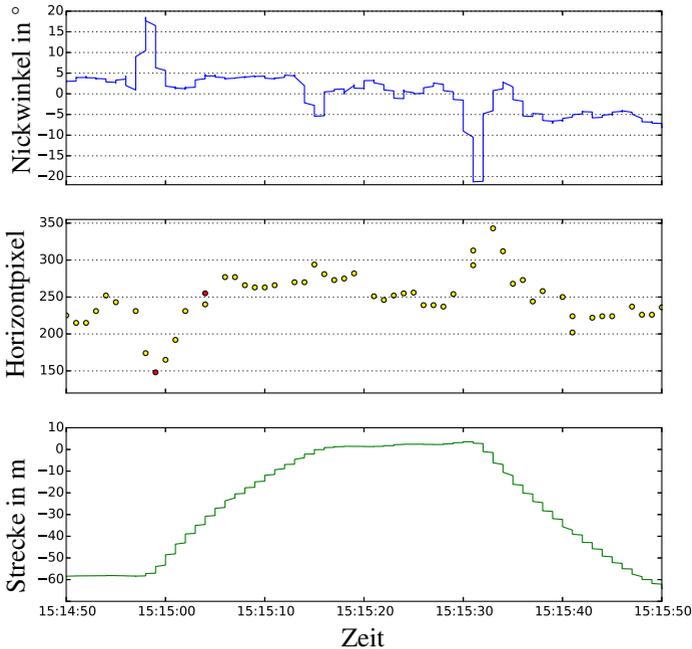


Abb. 5.4: Diagramm zur Nutzlasthalter-Lagestabilität im beschleunigten Horizontalflug.

liegt.

Die Aufhängung des Nutzlasthalters verursacht durch ihr mechanisches Spiel ebenfalls eine Abweichung der Ausrichtung. Das mechanische Spiel des Nickservos liegt bei ca. $1,4^\circ$. Bei der Mechanik für den Rollausgleich ist das Spiel ca. $2,3^\circ$.

5.2.2 Messung der Erdbeschleunigung

Eine horizontale Beschleunigung des UAVs verändert die angenommene Orientierung des Erdbeschleunigungsvektors. Die Regelungselektronik des Nutzlasthalters geht davon aus, dass die Beschleunigungssensoren alleine die Erdbeschleunigung messen. Bei konstanter Geschwindigkeit trifft dies auch zu. Da der gemessene Beschleunigungsvektor aber die Summe aller Beschleunigungsvektoren ist, verändert sich seine Richtung bei einer Horizontalbeschleunigung (siehe Abb. 5.5 zur Veranschaulichung). Der Winkel γ in Abb. 5.5 gibt die Abweichung des gemessenen

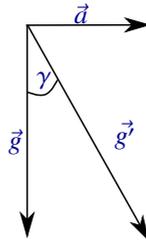


Abb. 5.5: Anteile des gemessenen Beschleunigungsvektors \vec{g}' . Er setzt sich aus der Erdbeschleunigung \vec{g} und der resultierenden Beschleunigung \vec{a} in Flugrichtung zusammen.

Vektors \vec{g}' zur Erdbeschleunigung \vec{g} an. Mit $\gamma = \arctan\left(\frac{a}{g}\right)$ ergibt sich bei einer angenommenen Horizontalbeschleunigung von $2\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und einer Erdbeschleunigung von $9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ eine Abweichung von $11,5^\circ$.

Für die Anwendung des Fliegenden Wildretters bedeutet dies, dass Bilder während des Beschleunigungsvorgangs für eine Georeferenzierung ungeeignet sind, sofern die Fehler nicht herausgerechnet werden. Durch zweifache Ableitung der GPS-Wegpunkte Messungen könnte die Beschleunigung errechnet werden. Das GPS-Modul gibt zwar im Zehntel Sekundentakt die aktuelle Position preis, allerdings wird nur jeweils im Sekundentakt diejenige GPS-Position zum Zeitpunkt der Aufnahme eines Bildes im Header der Bilddatei abgespeichert. Deshalb wird dieser Fehler in der Auswertesoftware noch nicht erkannt.

Eine weitere Fehlerquelle für eine falsche Ausrichtung des Nutzlasthalters des FALCON 8 ist die Kalibrierung beim Einschalten des Fluggeräts. Es wird dabei

die Horizontallage des UAVs kalibriert. Wenn das UAV innerhalb einer Toleranz von der Horizontallage abweicht, wird die Kalibrierung durchgeführt und diese Lage wird als horizontal abgespeichert. Die Kamerablickrichtung weicht für die Anwendung um den selben Winkel von Nadir ab.

5.2.3 Deviation des Kompasses

Die geographische Orientierung geschieht beim FALCON 8 mit einem elektronischen Kompass. Er misst wie ein mechanischer Kompass die Orientierung des Erdmagnetfeldes. Unregelmäßigkeiten des Erdmagnetfeldes und die unterschiedliche Lage von magnetischem und geographischem Pol führen zu einer Deklination (Missweisung) bei der Bestimmung der Nordrichtung. Eine weitere Ursache für Missweisungen ist bei magnetischen Kompassen die sog. Deviation. Sie wird durch Störfelder in der Nähe des Kompasses verursacht. Der elektronische Kompass des FALCON 8⁴ besitzt eine variable Deviation.

Anhand eines Fluges wird die Deviation des Kompasses analysiert. Abb. 5.6 zeigt

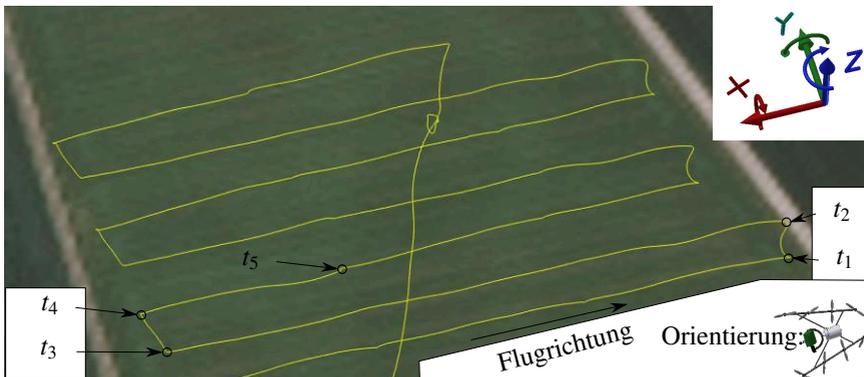


Abb. 5.6: Flugpfad, bei dem die Kompassfehler sichtbar sind. Quelle Hintergrundluftbild: DOP 200, Bayerische Vermessungsverwaltung.

den Flugpfad eines Fluges, bei dem man sehen kann, dass der Einfluss des Kompass nur einseitig ist. Das UAV flog den Flugpfad nach Westen ausgerichtet ab. Auf der westlichen⁵ Seite des Flugpfades sind die Flugbahnwechsel nahezu rechtwinklig. Auf der östlichen Seite hingegen sind sie S-förmig. Das UAV hat sich dort auffällig

⁴Der aktuelle FALCON 8 Trinity ist laut Hersteller wesentlich präziser als das alte Modell, das hier untersucht wurde.

⁵Die Karte ist genordet.

nach Norden gedreht, obwohl die geplante Flugroute vorsah, dass das UAV seine Orientierung nach Westen beibehalten sollte. In Abb. 5.6 ist die Flugrichtung, die Orientierung des UAVs und dessen Koordinatensystem zum leichteren Verständnis der nachfolgenden Analyse eingezeichnet.

Für die Deviationsanalyse wurde ein Acker ausgewählt, bei dem im Thermalbild die Zinkenspuren einer Egge⁶ leicht erkennbar sind. Da der Traktor die Egge über einen langen Weg parallel zum Feldrand gezogen hat, ist die Ausrichtung bekannt und es können die Spuren als parallele Geraden angenommen werden. Im Vergleich zur Kompassdeviation ist die Abweichungen der Spurführung vernachlässigbar. Auf allen Thermalbildern dieser Szene wurden jeweils zwei Punkte einer Spur markiert, um den tatsächlichen Orientierungswinkel des UAVs zu bestimmen. Die Deviationen ergeben sich aus der Differenz zwischen den gemessenen und den in den Bildern ermittelten Orientierungsrichtungen.

In dem Diagramm in Abb. 5.7 sind neben der Deviation der Nick- und der Rollwinkel des UAVs und der Längengrad gegenüber der Zeit aufgetragen. Der Längengrad ist hilfreich um einen Bezug zur Abbildung 5.6 herzustellen. Man erkennt hier die Flugbahnen. Es sind außerdem die fünf Zeitpunkte t_1 bis t_5 sowohl in der Karte als auch im Diagramm eingezeichnet. Die Kurve mit der Bezeichnung Deviation enthält alle Missweisungen des Kompasses. Sie enthält auch den Deklinationswinkel, der im eingesetzten Gebiet zu diesem Zeitpunkt laut [Kor] 2.39° betrug. Bei der Deviation handelt es sich um eine vorwiegend östliche⁷. Rechtweisend Nord liegt anfangs ca. 10° östlich vom missweisenden Kompass Nord.

Ab dem Zeitpunkt t_1 fällt die Deviation stark ab, kommt bei t_2 zu ihrem Minimum bei -20° und steigt dann wieder stark an. Diese starken Abfälle sind bei allen drei östlichen Flugbahnwechsel zu erkennen, nicht aber bei den westlichen (z. B. t_3 und t_4). Wenn man den Zeitpunkt t_2 genauer betrachtet stellt man fest, dass zu diesem Zeitpunkt sowohl der Nickwinkel als auch der Rollwinkel ein lokales Maximum aufweisen. Das bedeutet, dass sich das Fluggerät zu diesem Zeitpunkt nach vorne (die Kamera ist vorne) und links geneigt hat. Dies ist bei den anderen beiden östlichen Flugbahnwechsel ebenfalls zu beobachten. Bei den westlichen Flugbahnwechsel hat jeweils lediglich einer der beiden Winkel einen Extrempunkt. Der Zeitpunkt t_5 markiert einen der zwei Zwischenwegpunkte, die zur Kursstabilisierung angefliegen werden. An diesen Punkten ändert sich – wenn auch nicht so stark – die Deviation ebenfalls.

Abgesehen von den Ausreißern während der östlichen Flugbahnwechsel erkennt man bei den mittleren beiden Rückwärtsflügen (bei t_5 und bei Sekunde 200), dass

⁶Eine Egge ist ein landwirtschaftliches Bodenbearbeitungsgerät zum Auflockern der obersten Bodenschicht

⁷Der Kompass zeigte 250° an, in Wirklichkeit flog das UAV aber Kurs 240

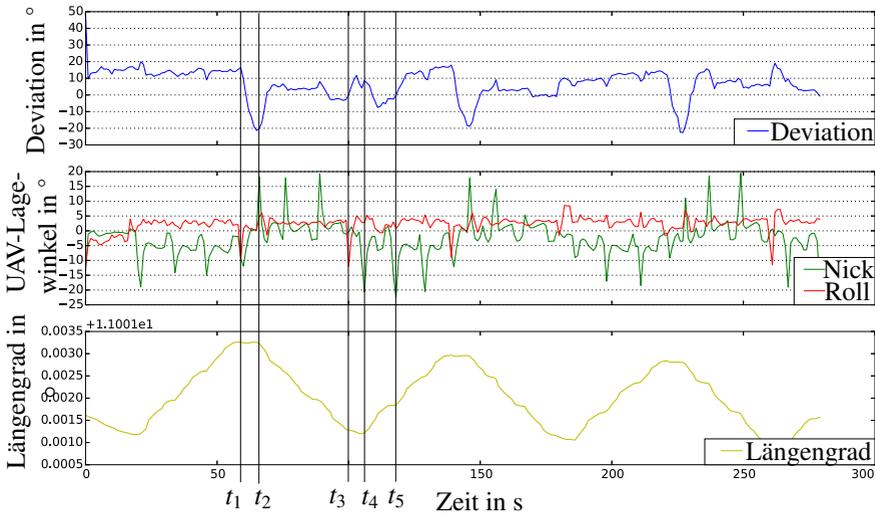


Abb. 5.7: Diagramm zur Kompassdeviation

die Deviation im Mittel kontinuierlich gleichermaßen ansteigt, wie der Nickwinkel im Mittel abfällt.

Zu erklären ist die unterschiedliche Deviation bei Vorwärts- und Rückwärtsbewegung mit der Bauform des FALCON 8. Wenn der Kopter nach vorne geneigt ist, drehen sich die hinteren vier Motoren schneller. Die Motoren der vorletzten Propellerreihe haben mit ca. 18 cm den kürzesten Abstand zum Kompass. Wenn sich die Rotoren schneller drehen erzeugen die Motoren ein stärkeres Magnetfeld. Das Magnetfeld nimmt quadratisch ab. Einen Einfluss auf die Deviation haben also vor allem Störquellen in kurzem Abstand.

Mit Hilfe des Roll- und Nickwinkels können die extremen Deviationen erkannt werden. Die Bilder, die aufgenommen wurden, während das UAV stark nach vorne geneigt war, können im einfachsten Fall für die Georeferenzierung ignoriert werden. Mit Kenntnis der Motordrehzahlen kann die Deviation herausgerechnet werden. In den Metadaten der Bilder werden diese aber nicht abgespeichert.

5.2.4 Messung der Flughöhe

Der GPS-Empfänger des UAVs gibt die Höhe bezogen auf das WGS84-Ellipsoid an, anstatt auf die Normalhöhe. Die Messung kann in Bodennähe meist aufgrund von Satelliten-Abschattung starken Schwankungen unterliegen (siehe Abb. 5.8).

Der ebenfalls im UAV integrierte barometrische Sensor ist hier deutlich stabiler. Das rechte Diagramm in Abb. 5.8 zeigt die Höhenmessungen eines Fluges bei 80 m Flughöhe. Die beiden Messmethoden weisen auf dieser Höhe eine Differenz von durchschnittlich 0,7 m auf. Der Barometer stellt Höhenänderungen schneller fest und ist nicht auf eine gute Abdeckung der Satelliten angewiesen. Die barometrische Messung hat aber den Nachteil, dass sie nur eine relative Messung, bezogen auf den Flugstartpunkt ist. Für eine zuverlässige Georeferenzierung ist deshalb ein Höhenmodell⁸ nötig, mit dem der Offset zur relativen Höhenmessung des Barometers gefunden werden kann.

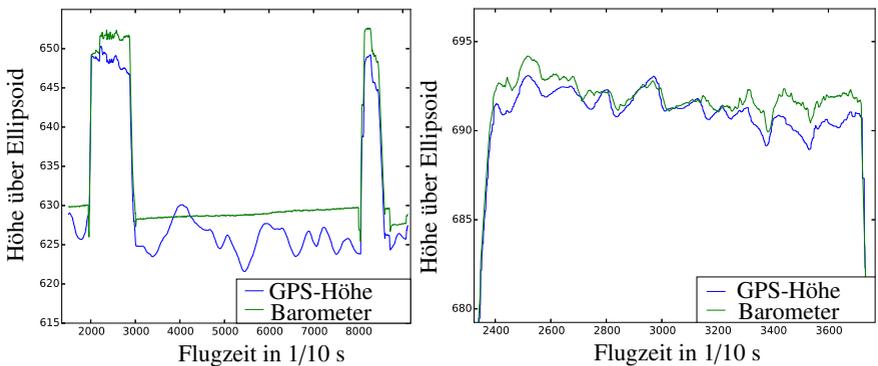


Abb. 5.8: Vergleich der Höhenmessung mit GPS und barometrischem Sensor. Die GPS-Messung unterliegt in Bodennähe starken Schwankungen. Das linke Diagramm zeigt zwei Flüge, dazwischen stand das UAV auf dem Boden. Das rechte Diagramm zeigt einen Flug auf 80 m über Grund.

Die barometrische Höhenmessung unterliegt Schwankungen bei Druckänderung, wie beispielsweise bei Windböen. Außerdem nimmt beim FALCON 8 aus nicht nachvollziehbaren Gründen die Aufzeichnung der barometrischen Höhe im Schnitt bei jedem Flug ca. drei Sekunden lang ungültige Werte an. Die Flughöhe muss für Bilder, die in diesem Zeitfenster aufgenommen wurden, interpoliert werden.

⁸Bei unebenem Gelände ist ein Höhenmodell für die Georeferenzierung aber sowieso nötig.

5.3 Geometrische Kalibrierung der Thermalkamera

Nachfolgend werden zwei unterschiedliche Methoden zur geometrischen Kalibrierung einer Thermalkamera untersucht: eine eigenentwickelte Laborkalibrierung und eine Testfeldkalibrierung mit einem gedruckten Schachbrettmuster. Für die Laborkalibrierung wurde eine automatisierte Steuer- und Auswertesoftware programmiert, die Hardware aus optischen und mechanischen Komponenten, zwei Präzisionsdrehtischen und Motorcontrollern wurde konstruiert und aufgebaut. Mehrere Kameras wurden bei unterschiedlichen Bildweiten mit diesem Aufbau kalibriert. Am Ende dieses Abschnitts werden die Ergebnisse der Laborkalibrierung mit denen der Testfeldkalibrierung verglichen.

5.3.1 Testfeldkalibrierung

Es wurden Kalibrierungen mit Schachbrett-Testfeldern in den Größen $0,84 \times 1,19$ m (DIN A0) und 5×5 m durchgeführt. Bei dem kleineren Testfeld handelte es sich um ein 150 g/m^2 schweres Papier, bei dem die ca. $6 \times 6 \text{ cm}^2$ großen schwarzen Kacheln mit einem Laserdrucker bedruckt wurden. Das größere Testfeld bestand aus einer 500 g/m^2 schweren PVC-Plane, bei der die $25 \times 25 \text{ cm}^2$ großen schwarzen Kacheln mit dem UV-Direktdruckverfahren aufgedruckt wurden. Anders als in [VL12] wurde die Kalibrierung unter freiem Himmel jeweils an einem warmen sonnigen Tag durchgeführt. Die Sonne erwärmte die schwarzen Kacheln deutlich stärker als die weißen, so dass das Schachbrettmuster auf den Thermalbildern mit der white-hot-Farbpalette invertiert erschien. Obwohl die Kacheln bei dem Papiertestfeld mehr als viermal so klein waren, konnte ein kontrastreiches Bild bei dem Papiertestfeld leichter hergestellt werden als bei dem PVC-Testfeld. Die Temperaturleitfähigkeit von Papier liegt mit $0,14 \text{ m}^2/\text{s}$ nur leicht über der von PVC mit $0,11 \text{ m}^2/\text{s}$. Der stärkere Kontrast bei dem Papiertestfeld kann deshalb nicht von der Temperaturleitfähigkeit des bedruckten Materials herrühren. Wahrscheinlicher ist, dass dieses Verhalten durch die unterschiedliche Druckfarbe verursacht wird.

Für die Kalibrierung mit dem DIN A0 Papiertestfeld musste bei dem verwendeten 19 mm Objektiv der Fokus zuvor auf einen Abstand von ca. 1,4 m eingestellt werden. Bei diesem Abstand kann das Testfeld selbst bei einem Neigungswinkel von ca. 45° noch vollständig auf dem FPA abgebildet werden. Da durch die Wärmeleitung des Papiers die Kanten zwischen den weißen und schwarzen Feldern bereits etwas verschwommen erscheinen, ist eine genaue Fokussierung gefordert, damit die Kachelecken des Schachbrettmusters korrekt als Passpunkte erkannt werden. Auch die Intensität der Infrarotstrahlung trägt zur schärferen Darstellung der



Abb. 5.9: Geometrische Kalibrierung der Thermalkamera mit einem 5 x 5 m großen Testfeld.

Kanten bei.

Mit mindestens 3 Bildern aus verschiedenen Winkeln kann mittels der freien Software Lens der Firma Agisoft die Passpunkte (Eckpunkte des Schachbrettmusters) und danach über einen Bündelblockausgleich die Parameter des Brown'schen Kameramodells [Bro71] (Gleichungen 2.19 - 2.22) gefunden werden.

5.3.2 Laborkalibrierung

Nachdem die Ergebnisse mehrerer Testfeldkalibrierungen stark voneinander abwichen und die Kanten des Schachfeldes stets leichte Unschärfe aufwiesen, wurde zusätzlich eine Messeinrichtung zur geometrischen Kamerakalibrierung aufgebaut. Der Aufbau ähnelt dem der Fokusjustierung (siehe Kap. 4.4.1). Er unterscheidet sich lediglich dadurch, dass der vertikale Drehtisch nicht zum Einstellen des Fo-

gesamte Sichtfeld der Kamera verteilt sind, sehr genau vermessen und zwischen ihnen interpoliert.

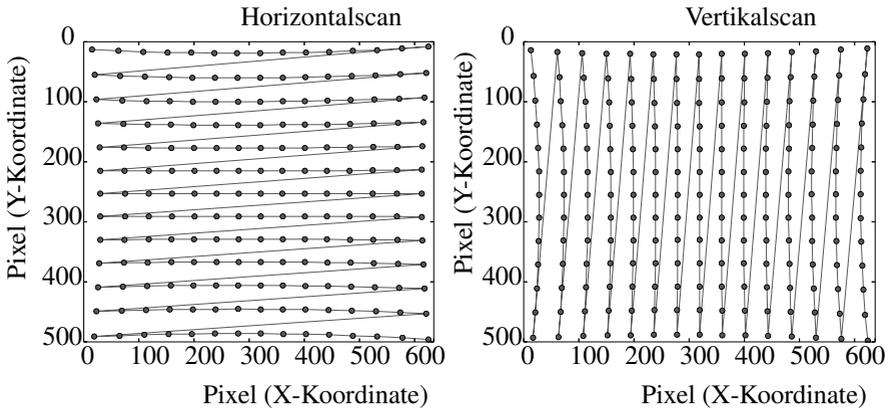


Abb. 5.11: Pixelpositionen der auf dem Sensorchip der Kamera abgebildeten Strahlungsquelle beim horizontalen und vertikalen Scan. Man erkennt bereits hier, dass die Linse eine leichte Kissenverzeichnung aufweist.

Zu jedem Messfoto wurde die aktuelle horizontale und vertikale Motorschrittposition abgespeichert. Dies geschah einmal in horizontaler und einmal in vertikaler Scanrichtung. Um den Positionierfehler des Umkehrspiels der Drehtische zu vermeiden, wurde immer nur in einer Richtung gescannt. Die beiden Diagramme in Abb. 5.11 zeigen die Pixelpositionen der auf dem Sensorchip der Kamera abgebildeten Strahlungsquelle. Die leichte kissenförmige Verzeichnung ist an den Rändern erkennbar. Eine gute Näherung an die exakt zentrierte Pixelposition kann durch eine Annäherung der Normalverteilung an die Messdaten gefunden werden. Beim Mittelwert der angenäherten Normalverteilung zu Messpunkt i der Zeile j befindet sich die Motorschrittposition $s_{h,j}(i)$ (für den vertikalen Scan zu Messpunkt j der Spalte i befindet sich die Motorschrittposition $s_{v,j}(j)$), bei der das Zentrum des gewählten Pixels durch die Strahlungsquelle maximal angestrahlt wird. Die Verhältnisse von Drehwinkeldifferenz zu Pixeldifferenz ergeben das jeweilige **IFOV**. Zwischen den horizontalen Messpunkten i einer Zeile j ist es gegeben durch

$$q_{h,j}(i) = \frac{(s_{h,j}(i+1) - s_{h,j}(i)) \cdot a_{sw}}{x_{h,j}(i+1) - x_{h,j}(i)}. \quad (5.12)$$

a_{sw} ist dabei der Schrittwinkel zur Umrechnung von Motorschritten in Grad. $x_{h,j}(i)$ ist die x-Komponente des angestrahnten Detektorelements bei Messpunkt i der Zeile j . Die Quotienten $q_{h,j}(i)$ werden jeweils den Intervallmittelpunkt-detektorelementen

$P_{h,j}(i)$ zugeordnet mit

$$P_{h,j}(i) = \begin{pmatrix} x_{h,j}(i+1) - x_{h,j}(i) \\ y_{h,j}(i+1) - y_{h,j}(i) \end{pmatrix}. \tag{5.13}$$

Für die IFOVs $q_{v,i}(j)$ und den Intervallmittelpunktdetektorelementen $P_{v,i}(j)$ der vertikalen Messpunkte j einer Spalte i werden bei den Gleichungen 5.12 und 5.13 die Indizes h und j durch v und i und die Variable i mit j ersetzt.

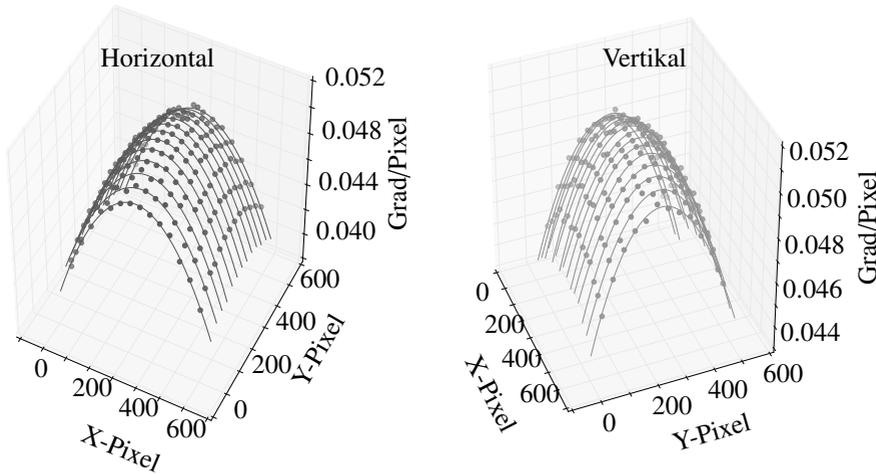


Abb. 5.12: Die IFOVs $q_{h,j}(i)$ und $q_{v,i}(j)$ mit den angenäherten Polynomfunktionen $Q_{h,j}(x)$ und $Q_{v,i}(y)$ der horizontalen und vertikalen Scans für das gesamte Sensorarray.

Abbildung 5.12 zeigt die IFOVs $q_{h,j}(i)$ und $q_{v,i}(j)$ für den gesamten Sensorchip in horizontaler und in vertikaler Richtung in je einem separaten Diagramm. Durch Ausgleichsrechnung mit der Methode der kleinsten Quadrate wurde für den horizontalen Scan numerisch die Polynomfunktionen $Q_{h,j}(x)$ (für den vertikalen Scan: die Polynomfunktion $Q_{v,i}(y)$) dritter Ordnung gefunden, welche eine gute Näherung an die Messwerte jeweils einer Zeile j mit den Messwerten i (für den vertikalen Scan: einer Spalte i mit den Messwerten j) in Scanrichtung darstellt. Die Anzahl der Interpolationspunkte x und y wurde entsprechend dem Pixelraster zu 640 und 512 Punkten gewählt. Die Zentralpunkt-Koordinaten c_x und c_y ergeben sich bei 15 Horizontalscan-Zeilen und 13 Vertikalscan-Spalten zu

$$c_x = \frac{1}{15} \sum_{j=0}^{14} \max(Q_{h,j}(x)); \quad c_y = \frac{1}{13} \sum_{i=0}^{12} \max(Q_{v,i}(y)); \tag{5.14}$$

Die optische Achse verläuft durch den Zentralpunkt (c_x, c_y) , wenn der Sensorchip orthogonal zur optischen Achse liegt.

Die Bildweite f_x aus der Horizontalmessung und f_y aus der Vertikalmessung können näherungsweise aus den **IFOVs** gewonnen werden:

$$f_x = \frac{1}{\tan(q_{h,6}(c_x))}; \quad f_y = \frac{1}{\tan(q_{v,7}(c_y))} \quad (5.15)$$

$q_{h,6}(c_x)$ ist hierbei das **IFOV** der Spalte des Zentralpixels bei der 7. (mittleren) Zeile des Horizontalscans. Das äquivalente gilt für den Vertikalscan.

Es kann schließlich auch ein Kameramodell an die Messwerte angenähert werden. Da durch die Annäherung allerdings weitere Unsicherheiten hinzukommen, ist die Erzeugung von Lookup-Tabellen für die Weiterverarbeitung sinnvoller. Es wird der horizontale und vertikale Winkel $T_{h,j}(x)$ und $T_{v,i}(y)$ eines Strahlungsbündels bezogen auf das Kamerakoordinatensystem für jedes einzelne Detektorelement berechnet und in zwei Tabellen (eine für den horizontalen und eine für den vertikalen Winkel) abgelegt. Dabei werden die **IFOVs** aus $Q_{h,j}(x)$ und $Q_{v,i}(y)$ vom Zentralpunkt ausgehend pixelweise aufsummiert.

$$T_{h,j}(x) = \begin{cases} \sum_x^{c_x-1} -Q_{h,j}(x), & \text{wenn } x < c_x \\ \sum_{c_x}^x Q_{h,j}(x), & \text{wenn } x \geq c_x \end{cases} \quad (5.16)$$

Zwischen den Zeilen des Horizontalscans wird numerisch mit einem Polynom dritter Ordnung interpoliert. Die Berechnung der vertikalen Lookup-Tabelle verläuft äquivalent.

5.3.3 Ergebnisse und Vergleich der Kalibriermethoden

Die Testfeldkalibrierung mit dem **DIN A0** Poster aus 1,4 m Abstand konnte nach mehrmaligen Wiederholungen stets reproduziert werden. Anders war es bei der Testfeldkalibrierung mit der 5 m **PVC**-Plane aus 9,5 m Abstand. Hier konnte keine eindeutige Kalibrierung erzeugt werden. Einerseits war es schwierig, immer ausreichend Kontrast auf dem Schachbrettmuster herzustellen. Zudem war es schwierig die Plane faltenfrei und exakt plan auszubreiten. Da die Plane auf dem Boden liegt und der eingestellte Fokus bei ca. 9,5 m liegt, kann die Bildaufnahme nur während dem Flug geschehen. Die servogeregelt Payloadhalterung ermöglicht zwar eine freie Einstellbarkeit des Nickwinkels, der Rollwinkel kann aber nur um wenige Grade variiert werden und dies nicht während dem Flug. Deshalb ist die Aufnahme aus nicht-kritischen Perspektiven wesentlich schwieriger herzustellen als bei dem **DIN A0** Poster, bei dem die Kamera in der Hand gehalten werden kann. Nach der

Auswahl der aufgenommenen Bilder des Testfelds, müssen vor der Kalibrierung die Parameter für die Ausgleichsrechnung des Kameramodells ausgewählt werden. Die beste Annäherung an die Laborkalibrierung hat sich ergeben, wenn nur die Parameter k_1 , k_2 und k_3 verwendet und die Parameter k_4 , p_1, p_2 und s_{xy} ignoriert werden (siehe Gleichungen 2.19 - 2.22). Es ergaben sich folgende Werte für die Kameraparameter bei der DIN A0 Testfeldkalibrierung:

	c_x	c_y	f_x	f_y	k_1	k_2	k_3
Wert	310,7	257,3	1140,0	1138,7	0,348	1,039	0,415
Std. Error	2,067	0,951	16,39	11,53	0,073	1,786	12,86

Tabelle 5.1: Kameraparameter der Testfeldkalibrierung aus 1,4 m Abstand.

Der Unterschied zwischen Labor- und Testfeldkalibrierung bei der Position des Zentralpunktes liegt bei nur 0,3 %, die Bildweite variiert allerdings um 1 % (siehe Tabelle 5.1 und 5.2).

	c_x	c_y	f_x	f_y
Wert	310,6	257,4	1129,1	1128,7

Tabelle 5.2: Kameraparameter der Laborkalibrierung aus 1,4 m Abstand.

Abb. 5.13 zeigt den Vergleich der DIN A0 Poster Testfeldkalibrierung (mit diesen Einstellungen) mit der Laborkalibrierung bei gleich eingestellter Brennweite (Abstand 1,4 m).

Die Testfeldkalibrierung zeigt lediglich an den Rändern große Abweichungen. Dieser Fehler macht sich umso stärker bemerkbar, je mehr Parameter des Kameramodells gefittet werden. Wenn bei der Aufnahme der Testfeldfotos darauf geachtet wird, dass die Passpunkte vor allem an den Rändern des Bildes gut sichtbar sind, kann eine bessere Kalibrierung erzielt werden.

Wenn die Thermalkamera auf 1,4 m fokussiert ist, werden selbst große Objekte aus 80 m Entfernung unscharf abgebildet. Die Linse muss also zwingend verstellt werden. Zur Fokuseinstellung bewegt sich die Linse auf den Sensor zu oder weg. Dies verursacht, dass sich das FOV der Kamera etwas ändert. Außerdem wird die Linse bei Fokusänderung zugleich rotiert. Deshalb passt die geometrische Kalibrierung nur zu jener Fokuseinstellung, die auch während dem Kalibriervorgang eingestellt war. Zwar verändert sich die Form der Verzeichnung bei Fokusveränderung in der Regel wenig, da die größte Komponente der Verzeichnung radialsymmetrisch ist. Allerdings liegt die optische Achse gewöhnlich nicht konzentrisch auf der Rotationsachse der Optik und deshalb durchstößt die optische Achse bei Fokusverstellung

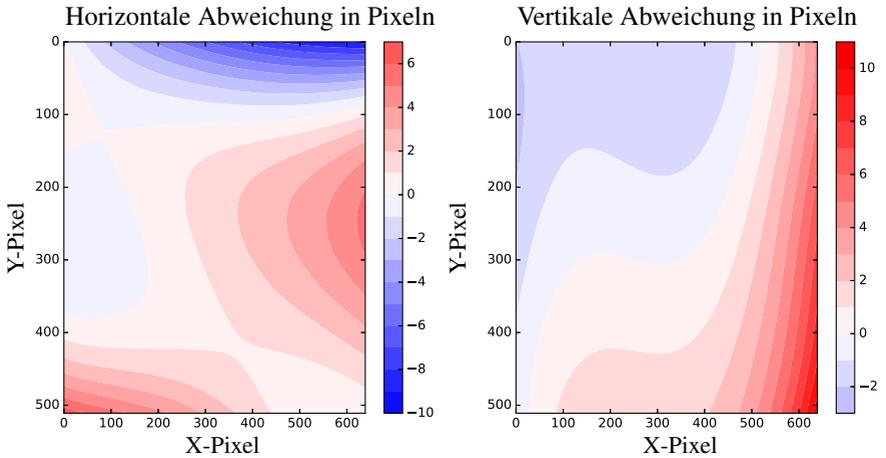


Abb. 5.13: Vergleich der Testfeldkalibrierung mit der Laborkalibrierung bei Fokussierung auf 1,4 m Distanz. Die Farbabstufung zeigt die Differenz zwischen den beiden Kalibrierungen in Pixeln. Zur Vereinfachung wurde diesem Pixelmaß ein konstanter Winkelabstand von $0,05^\circ$, unabhängig von der Position auf dem Sensorarray, zugeordnet. Dies entspricht in etwa dem durchschnittlichen IFOV eines Detektorelements.

lung dann ein anderes Detektorelement des Sensors. Abb. 5.14 zeigt, wie sich die optische Achse bei Fokusverstellung um die Drehachse bewegt. Ein nicht exakt orthogonal zur Drehachse verbauter Sensorchip verursacht zudem anstatt einer kreisförmigen eine elliptische Bewegung.

Abb. 5.15 zeigt den Vergleich der Laborkalibrierung bei Fokussierung auf 1,4 m mit der Laborkalibrierung bei Fokussierung auf 17 m. Die Abweichung ist vor allem wegen des verdrehten Zentralpunkts sehr viel größer als bei Abb. 5.13. Die Abweichung des horizontalen Winkels ist in großen Teilen des Sensorarrays größer als 10 Pixel. Für eine Positionsbestimmung aus 80 m Flughöhe bedeutet dies einen Fehler von ca. 72 cm. Am rechten Rand des Sensorarrays ist der Fehler in vertikaler Richtung sogar bis zu 35 Pixel groß, was aus 80 m Flughöhe einen Fehler von ca. 2,5 m ausmacht. Dies zeigt eindeutig, dass die Kalibrierung mit der tatsächlich verwendeten Linseneinstellung durchgeführt werden muss. Eine Fokusverstellung verändert die Geometrie des optischen Systems so stark, dass eine zuvor durchgeführte geometrische Kalibrierung nach der Fokusverstellung unbrauchbar wird. Eine Testfeldkalibrierung mit dem DIN A0 Kalibrierfeld für den fliegenden Wildretter ist daher ungeeignet.

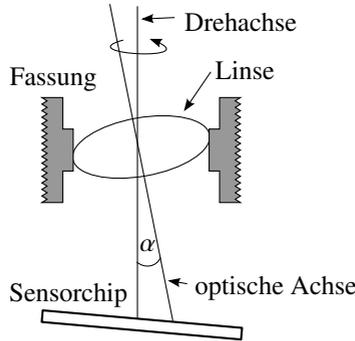


Abb. 5.14: Schematische Zeichnung zur Verkippung der Linse. Die Linse der Kamera ist in einer Fassung mit Außengewinde fixiert. Ihre optische Achse liegt fertigungsbedingt oft nicht exakt auf der Drehachse. Bei der Fokuseinstellung wird die Fassung samt Linse gedreht. Damit dreht sich auch die optische Achse um die Drehachse. Auf dem Sensorchip wandert der Zentralpunkt bei Fokusverstellung auf einer Spirale.

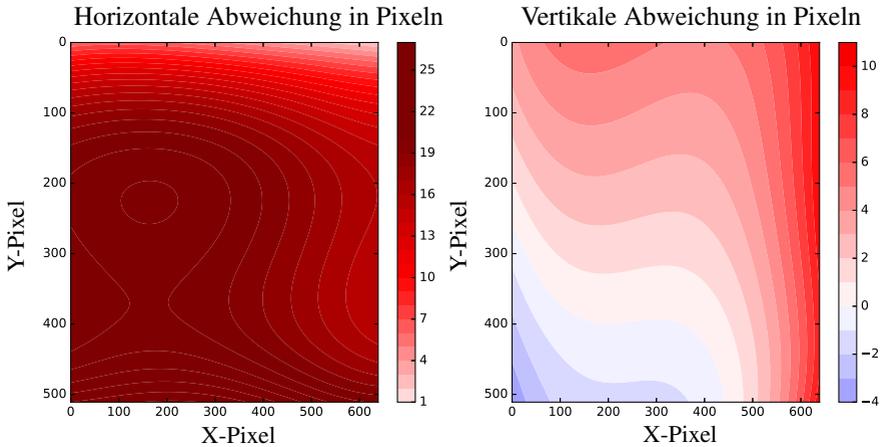


Abb. 5.15: Vergleich der Laborkalibrierung bei Fokussierung auf 1,4 m mit der Laborkalibrierung bei Fokussierung auf 17 m.

Da keine eindeutige Kalibrierung mit dem 5 m Testfeld erreicht werden konnte, bleibt lediglich die Laborkalibrierung als zuverlässige Kalibrieremethode für den fliegenden Wildretter. Die Fokussierung auf eine Entfernung von 17 m hat sich für das 19 mm Objektiv in der Praxis bewährt.

5.4 Boresight-Kalibrierung

Das Wissen über die exakte Lage und den Einbauwinkel der Kamera trägt maßgeblich zur Genauigkeit der Georeferenzierung bei. Um den Einfluss der Schwerkraft auf das mechanische Spiel zu minimieren, wird der Einbauwinkel der Kamera bei einer Nadirausrichtung bestimmt. Abb. 5.16 zeigt die angewendete Methode zur Boresight-Kalibrierung. Das Fluggerät wird auf ein – mit einer Wasserwaage aus-

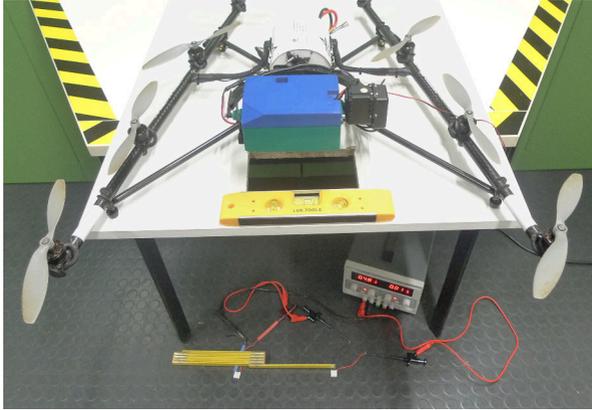


Abb. 5.16: Boresightkalibrierung

gerichtetes – Brett gestellt. Aufgrund der Geometrie der Standfüße des Fluggeräts hat das Brett eine Kameraluke, durch die die Kamera hindurch blickt, um in einer Distanz von ca. 10 m⁹ zwei Peltier-Elemente¹⁰ im Blickfeld zu haben. Die heiße Seite der 1 cm² großen Peltier-Elemente erscheinen auf dem Thermalbild bei der verwendeten Optik aus 10 m Distanz als zwei ein Pixel große weiße Punkte. Eines der beiden Peltier-Elemente wurde genau mittig unter die Kamera gelegt. Die exakte Lage wurde dazu mit einem Lot bestimmt. Anhand dieses Elements können die Einbauwinkel ω_b und θ_b bestimmt werden mit

$$\omega_b = \arctan\left(\frac{c_x - p_{1,x}}{c_k}\right) \quad \text{und} \quad \theta_b = \arctan\left(\frac{c_y - p_{1,y}}{c_k}\right), \quad (5.17)$$

mit der Pixelposition $(p_{1,x}, p_{1,y})^T$ des Peltier-Elementes auf dem Bild. Das zweite Peltier-Element dient der Bestimmung des Einbauwinkels κ_b . Es wird in zwei Metern Abstand zum ersten Peltier-Element so angeordnet, dass es gemeinsam mit

⁹Damit alle Komponenten auf einem Bild erkennbar sind, zeigt Abb. 5.16 den Aufbau auf einem Tisch mit nur 0,8 m anstatt der 10 m Distanz. Die Kalibrierung bei dieser Distanz wäre sehr ungenau.

¹⁰Ein Peltier-Element ist ein elektrothermischer Wandler, der basierend auf dem Peltier-Effekt (nach Jean Peltier, 1785 - 1845) bei Stromdurchfluss eine Temperaturdifferenz erzeugt.

diesem eine parallele Gerade zu den vorderen Standfüßen des Fluggeräts bildet. Der Gier-Einbauwinkel κ_b ist dann gegeben durch

$$\kappa_b = \arctan\left(\frac{p_{2,y} - p_{1,y}}{p_{2,x} - p_{1,x}}\right), \quad (5.18)$$

mit der Pixelposition $(p_{2,x}, p_{2,y})^T$ des zweiten Peltier-Elements auf dem Bild.

5.5 Evaluierung

5.5.1 Fundstellen-Abweichungen

Da die Bilder im Sekundentakt aufgenommen wurden, ist ein Kitz stets auf mehreren Bildern zu sehen. Durch die nicht exakte Georeferenzierung entsteht pro Fundstelle eine Anhäufung an Markierungen. Eine solche Anhäufung wird im folgenden Cluster genannt. Die Abb. 5.17 zeigt einen Ausschnitt eines Orthophotos.

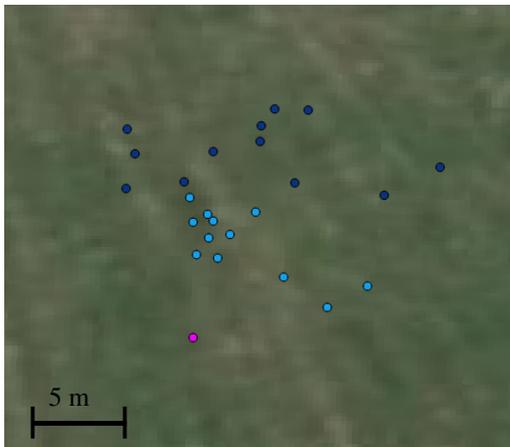


Abb. 5.17: Verbesserung der Georeferenzierung. Quelle Hintergrundluftbild: DOP 20, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

Darin ist als pinker Punkt der tatsächliche Fundort eines Kitzes eingezeichnet. Die hell- und dunkelblauen Punkte markieren jeweils den geschätzten Fundort des Kitzes aufgrund der direkten Georeferenzierung eines Bildes. Bei den dunkelblauen Punkten wurde keine Korrektur mit Hilfe der Kalibrierdaten durchgeführt, bei den hellblauen hingegen schon. Selbst nach der Korrektur liegen die Punkte nicht exakt

aufeinander. Dies ist nicht verwunderlich, da sich die Abweichungen vieler Parameter dynamisch verhalten und nur die statischen Abweichungen herausgerechnet wurden. Jedoch kann man eine deutliche Verbesserung erkennen. Im Durchschnitt konnten die Abweichungen um ca. 50 % verringert werden. Den größten Einfluss haben die Bore sightkalibrierung und die Deviation des Kompasses.

5.5.2 Suchdauer

Im Bezug auf die übergeordnete Systemauslegung ist das Ziel nicht, die präziseste Georeferenzierung zu erlangen, sondern es geht darum, die Suchdauer im Feld zu minimieren. Zwar führt eine präzise Georeferenzierung zu einer kurzen Suchdauer, aber ab einem gewissen Präzisionsgrad lohnt der Mehraufwand nicht mehr, um noch eine kürzere Suchdauer zu erreichen. Deshalb wird im folgenden Abschnitt die Suchdauer analysiert anhand der Trackaufzeichnungen der GPS-Geräte, die zur Kitz-Lokalisierung benutzt wurden. Die Abbildung 5.18 zeigt einen Ausschnitt eines Orthophotos. Darin ist der Track des Handheld-GPS-Geräts als grüne Linie



Abb. 5.18: Track eines Handheld-GPS-Geräts bei der Kitzsuche. In blau sind die geschätzten Kitzpositionen eingezeichnet. Die pinken Punkte markieren den Fundort der Kitz. Quelle Hintergrundluftbild: DOP 20, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

eingezeichnet. Die pinken Punkte markieren die tatsächlichen Kitzpositionen. Es lagen vier Kitz in dieser Wiese. Ein blauer Punkt markiert die geschätzte Position

eines Kitzes auf einem Bild¹¹.

Da die Abweichung der Georeferenzierung in diesem Beispiel bis zu 7,5 m für den nächstgelegenen Treffer in einem Cluster beträgt, ist die Suchperson gezwungen den umliegenden Bereich des Clusters systematisch abzusuchen. In der Abb. 5.18 erkennt man bei allen vier Kitzes dieses systematische Umkreisen der Fundstelle. Je größer die Abweichungen sind, desto mehr Fläche muss systematisch abgesucht werden und umso länger dauert die Suche. 33 der gefundenen Kitzes der Kampagne 2015 wurden mit einem Handheld-GPS-Gerät lokalisiert. An Hand der Trackpoints, die neben den Koordinaten auch die exakte Uhrzeit enthalten, kann die Suchdauer extrahiert werden. Sie beginnt 10 m vor dem zuerst erreichten Punkt des Clusters und endet, sobald das Kitz davongetragen oder verschweicht wird. In dem Histo-

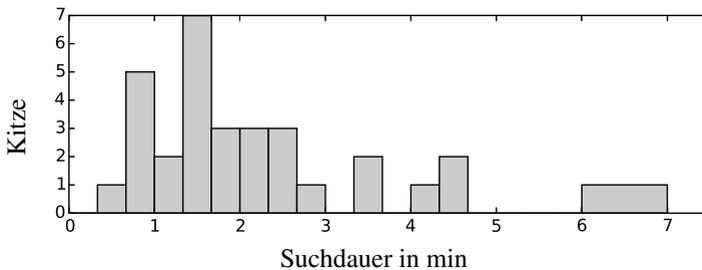


Abb. 5.19: Histogramm zur Suchdauer mit dem Handheld-GPS-Gerät

gramm in Abb. 5.19 sind die Suchzeiten von allen 33 Kitzefunden zusammengefasst. Obwohl die Georeferenzierung zum Zeitpunkt der Kampagne noch nicht so ausgereift war, betrug die durchschnittliche Suchdauer nur ca. 2,5 Minuten. Der Median liegt bei 113 Sekunden. Es macht aber trotzdem Sinn die Georeferenzierung noch weiter zu optimieren, da die Suchpersonen bei großen Abweichungen die Suche schneller aufgeben.

5.6 Zusammenfassung

Eine neue mathematische Formulierung für die direkte Georeferenzierung wurde vorgestellt. Sie wurde zur Georeferenzierung beim System Fliegender Wildretter erfolgreich angewendet. Speziell die Kompass-Messung und die Ausrichtung der Kamera durch den Nutzlasthalter sind durch das dynamische Flugverhalten des

¹¹Zu dem Zeitpunkt der Kampagne war die Georeferenzierung noch nicht so ausgereift. Die blauen Punkte zeigen die ungenauen Markierungen, die auch der Suchperson zur Verfügung stand.

UAVs stark fehlerbehaftet. Die Abweichungen konnten mit dem entwickelten Georeferenzierungsverfahren kompensiert werden.

Anders als die üblichen Testfeld-Kalibriermethoden kann die entwickelte Labormethode zur geometrischen Thermalkamera-Kalibrierung für beliebige Fokussierungen verwendet werden. Die Randbereiche des Objektivs können damit in der Regel besser kalibriert werden. Eine Methode der Boresightkalibrierung für Thermalkameras wurde vorgestellt. Die Korrektur der Boresightwinkel hat sich als wichtigste Maßnahme für die Verbesserung der Georeferenzierung herausgestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass durch die unternommenen Korrekturmaßnahmen die Georeferenzierung um ca. 50 % verbessert wurde. Anhand der Kampagneneinsätze zeigte sich, dass die Georeferenzierungsgenauigkeit ausreichend ist. Es konnten alle Kitze gefunden werden. Die Suche im Feld dauerte im Schnitt 2,5 Minuten.

6 Diskussion und Ausblick

Die Rehkitzsuche mit einem UAV mit Thermalkamera übertrifft alle alternativen Methoden bei der Flächenleistung, aber auch bei der Trefferquote (*Recall*). Das erklärt, warum immer mehr Tierschutzinitiativen [Dem15], Forschergruppen [Ban11; Ber15] und UAV-Firmen [Sch15] ebenfalls auf ein UAV-basiertes System zur Wildtierrettung setzen.

Da die Wiesen überwiegend tagsüber an sonnigen Tagen gemäht werden, ist der Bedarf, die Flächen auch während dieser Zeit abzusuchen besonders hoch. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, mit einem infrarotstrahlungsbasierten System die Wiesen bei Abwesenheit der Sonne abzusuchen und die Kitze dann mit einer Ohrmarke mit einem Transponder zu versehen. Ein Lesegerät, das der Landwirt in der Mähmaschine mitführt, kann diesen Transponder detektieren. Dadurch können die Kitze auch bei Sonnenschein gefunden und vor dem Mähtod bewahrt werden. Dieses Verfahren wurde vom Autor in einem Patent veröffentlicht [ITH09]. Transponder und Lesereinheit wurden bereits von Projektpartnern an der Technischen Universität München entwickelt [Asc+15].

Mit dem Fliegenden Wildretter ist jetzt ein alternatives Verfahren entstanden, mit dem ebenfalls während der sonnigen Zeit zuverlässig Kitze gefunden werden können. Zwar kann dann der entwickelte automatische SIMPLEFAWNDETECTOR nicht mehr verwendet werden, weil er bei diesen Bedingungen Kitze übersieht. Die entwickelte Auswertesoftware POITAGGER2 und die Bildvorverarbeitung der Rohbilder konnte die Auswertung so stark beschleunigen, dass die visuelle Durchsicht der durchschnittlich 600 Bilder pro Flug selbst bei schwierigen Bedingungen in ca. 5 Minuten erledigt werden kann. Mit keinem anderen infrarotstrahlungsbasierten System ist es bisher gelungen, Rehkitze zuverlässig an heißen Tagen während der Mittagszeit bei direkter Sonneneinstrahlung zu finden. Der entwickelte Fliegende Wildretter übertrifft damit sowohl bei der Flächenleistung als auch bei der Detektion mit Abstand alle anderen UAV-basierten Systeme zur Rehkitzsuche.

Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen zur automatischen Wildtier-Detektion wie [Chr+14; Ban11] haben den Nachteil, dass keine oder zu wenige Daten von realen Szenarien zur Verfügung standen und deshalb ein künstliches Szenario modelliert wurde. Damit besteht die Gefahr einer Überanpassung des entwickelten Algorithmus an das modellierte Szenario. Die Ergebnisse dort zeigen eine Treffer-

quote von 100 %. Eine 100 %-ige Trefferquote ist beim `SIMPLEFAWNDERECTOR` auch möglich bei Abwesenheit der Sonne.

Mit den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Daten von insgesamt 217.800 Thermalbildern, davon ca. 3000 Bildern von über 200 verschiedenen Rehkitzten und vielen falsch positiven Fundstellen können nun noch bessere Algorithmen entwickelt werden, die die realen Herausforderungen berücksichtigen.

Die Beschleunigung des Prozessschrittes Detektion kann durch einen automatischen Algorithmus maximal 5 Minuten bei einer Wiesenfläche von 4 ha einsparen. Zudem sinkt dadurch bei schwierigen Bedingungen die Trefferquote. Im Vergleich zu den anderen Prozessschritten ist das Einsparpotential gering. Eine primäre Fokussierung auf die automatische Detektion führt deshalb aus Sicht des Autors nicht zur effizientesten Weiterentwicklung eines `UAV`-basierten Systems zur Rehkitzsuche.

Aus Sicht des Autors macht es mehr Sinn, die Georeferenzierung noch weiter zu verbessern, da bei einer großen Anzahl an Fundstellen das Aufsuchen die zeit- und aufwendigste Komponente des gesamten Suchprozesses ist. An der direkten Georeferenzierung lässt sich durch eine eigene `IMU` auf der Nutzlast und die Fusion mehrerer Sensoren die Präzision noch stark erhöhen. Aber auch ein indirekter Georeferenzierungsansatz auf Basis eines Bündelblockausgleichs bietet noch viel Potential für eine präzise Georeferenzierung auch ohne Passpunkte.

Für die Verbreitung eines Systems zur Rehkitzrettung sind die momentan aufzuwendenden Investitionskosten des Fliegenden Wildretters die größte Hürde. Da das System für die Rehkitzrettung nur ca. 3 Wochen im Jahr benötigt wird, stellen die Leerlaufzeiten das größte Potential für Verbesserungen dar. Ein System, das auch für andere Zwecke eingesetzt werden kann, lässt sich schneller amortisieren. Damit wird eine Investition attraktiver. Welche weiteren Anwendungen mit dem System abgedeckt werden können, sollte untersucht werden. Aus wirtschaftlicher Sicht muss dabei stets berücksichtigt werden, ob eine kostengünstigere Alternative für die Anwendung existiert. Eine Anwendung ist aus Sicht des Autors aber besonders attraktiv: Das Aufspüren von Bodenbrütern, denn diese sind durch die intensiv genutzte Landwirtschaft gefährdet.

Taxonomisch sehr unterschiedliche Vogelarten werden den Bodenbrütern zugeordnet. Unter ihnen sind einige auf der roten Liste der gefährdeten Tierarten, teilweise sind sie vom Aussterben bedroht. Zu den Bodenbrütern zählen z. B. der Große Brachvogel, der Kiebitz, die Wiesenweihe, der Fasan, das Rebhuhn oder die Feldlerche. Sie legen ihre Nester am Erdboden an. Die Eier weisen oft eine Tarnfärbung auf. In Mitteleuropa sind die meisten Bodenbrüter an landwirtschaftlich genutzte Flächen gebunden. Da die Nester gut getarnt sind, wird die Zerstörung dieser bei der landwirtschaftlichen Bearbeitung der Fläche meist nicht bemerkt. Mittlerwei-

le ist die Zahl vieler Bodenbrüterarten in Deutschland so stark zurück gegangen, dass der Staat viel Geld in Naturschutzprogramme investiert, um selbst die Brut einzelner Vögel durch hohen personellen Aufwand zu schützen.

An dieser Stelle könnte der Fliegende Wildretter helfen, den personellen Aufwand zu minimieren. Da viele dieser Vogelarten deutlich kleiner als Rehkitze sind, muss das Absuchen auf niedrigerer Flughöhe stattfinden. Durch den UAV-Überflug über ein Nest wird der brütende Vogel üblicherweise kurzzeitig verjagt. Dann lassen sich die Eier aufgrund des großen Temperaturunterschieds zur Umgebung zwar leicht detektieren, da sie aber auch schnell auskühlen, kann die Brut durch zu lange Störung gefährdet werden. Bisher werden geschützte Gelege mit für den Landwirt sichtbaren Markierungen versehen, damit dieser bei der Bearbeitung das Nest nicht zerstört. Die gute Tarnung der Gelege macht die schnelle Lokalisierung zur Anbringung einer solchen Markierung zu einer großen Herausforderung.

Um mit dem Fliegenden Wildretter Bodenbrüter effizient zu finden, muss vor allem die Georeferenzierung noch stark verbessert werden. Der gesamte Suchprozess muss auf die neue Aufgabe angepasst werden, damit die Suche mit dem Fliegenden Wildretter schneller und zuverlässiger als mit herkömmlichen Verfahren wird.

A Anhang

A.1 Rotation im \mathbb{R}^3

Die Rotation eines Vektors kann im \mathbb{R}^3 durch Multiplikation einer Rotationsmatrix durchgeführt werden. Der Vektor $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ lässt sich in den Vektor \mathbf{x}' durch Transformation mit der Rotationsmatrix \mathbf{R} wie folgt überführen:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} \quad (\text{A.1})$$

Eine Drehung um die drei Achsen des kartesischen Koordinatensystems im \mathbb{R}^3 lässt sich durch die drei Rotationsmatrizen

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{R}_y &= \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{R}_z &= \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

beschreiben. Rotationen können hintereinander ausgeführt werden, allerdings sind sie nicht kommutativ. Sie gelten in rechtsseitigen sowie in linksseitigen Koordinatensystemen. So bildet

$$\mathbf{p}' = \mathbf{R}_z(\kappa)\mathbf{p} \quad (\text{A.3})$$

auf den jeweils erwarteten Punkt ab (siehe Abb. A.1). Bei der Transformation von einem rechts- in ein linksseitiges Koordinatensystem oder umgekehrt, wird die negierte Matrix $-\mathbf{R}$ verwendet. Nach der Transformation zeigen dann aber die Koordinatenachsen in die jeweils entgegengesetzte Richtung. Neben der oben aufgeführten aktiven Drehung gibt es auch eine passive Drehung. Die aktive Drehung dreht den Vektor im selben Koordinatensystem, die passive dreht das Koordinatensystem. Dabei wird anstatt der Matrix \mathbf{R} die inverse Matrix \mathbf{R}^{-1} verwendet.

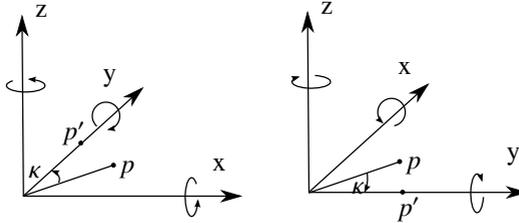


Abb. A.1: Rotation eines Punktes – beschrieben durch seinen Ortsvektor \mathbf{p} – um die z -Achse im rechts- und linksseitigen Koordinatensystem.

A.2 Projektive Geometrie und homogene Koordinaten

Eine Kamera kann abstrakt auch als zentralperspektivische Abbildungsfunktion gesehen werden. Diese lassen sich mit der euklidischen Geometrie¹ nicht ausreichend beschreiben. Die projektive Geometrie stellt eine Erweiterung der euklidischen – oder noch allgemeiner: der affinen – Geometrie dar. Anders als in der euklidischen gibt es in der projektiven Geometrie keine Parallelen. Wenn $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ einen Punkt im 3-dimensionalen euklidischen Raum \mathbb{R}^3 beschreibt, so kann der selbe Punkt mit homogenen Koordinaten $\tilde{\mathbf{X}} = [X, Y, Z, W]^T$ mit $W \neq 0$ im 3-dimensionalen projektiven Raum \mathbb{P}^3 dargestellt werden. Aus Sicht der projektiven Geometrie stellt \mathbf{X} inhomogene Koordinaten dar.

Anders als beim inhomogenen Modell, stellen Fernpunkte² im homogenen Modell keine Sonderrolle dar. Fernpunkte liegen im homogenen Modell des \mathbb{P}^3 auf der Ebene $W = 0$.

Ortsvektoren und Richtungsvektoren müssen bei homogenen Koordinaten nicht unterschiedlich behandelt werden. Bei Richtungsvektoren gilt $W = 0$. Somit können nicht nur Rotationen, sondern auch Translationen durch Matrizen beschrieben werden. Für Rotationsmatrizen gelten die selben Vorschriften wie im \mathbb{R}^3 . Sie werden um die zusätzliche Dimension in beiden Achsen erweitert und mit Nullen aufgefüllt, bis auf den letzten Eintrag, der anstatt dessen eine Eins erhält. Gleichung A.4 zeigt die Rotation des Vektors $\tilde{\mathbf{X}}$ mit homogenen Koordinaten um die z -Achse mit

¹ das ist die uns vertraute anschauliche Geometrie

² Punkte im Unendlichen

dem Winkel κ als Beispiel.

$$\bar{\mathbf{X}}' = \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Mit homogenen Koordinaten lassen sich nicht nur Rotationen, sondern auch Translationen als Matrixmultiplikation darstellen. Die Translation eines Punktes im \mathbb{P}^3 wird durch folgende Matrix beschrieben:

$$\mathbf{T}_h = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta X \\ 0 & 1 & 0 & \Delta Y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

A.3 Evaluationsmetriken für eine binäre Klassifikation

Das Ergebnis einer binären Klassifizierung kann in einer Konfusionsmatrix wie in Tabelle A.1 mit den vier Feldern richtig positiv (TP), richtig negativ (TN), falsch positiv (FP) und falsch negativ (FN) dargestellt werden.

	vorhanden	nicht vorhanden
detektiert	TP	FP
nicht detektiert	FN	TN

Tabelle A.1: Konfusionsmatrix für eine binäre Klassifizierung.

Für die Beurteilung eines Klassifikators wird häufig die Falsch Positiv Rate (FPR) herangezogen, die gegeben ist durch:

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (\text{A.6})$$

Bei einigen Klassifizierungsaufgaben, wie z. B. bei der Detektion von Objekten in Bildern oder bei der Dokumentensuche im Internet ist die Anzahl der korrekt als nicht relevant klassifizierten – also TN – Objekte oder Dokumente so hoch, dass

sie alle anderen Elemente der Konfusionsmatrix um mehrere Größenordnungen übersteigt. Der Wert der **FPR** wird dann primär von **TN** bestimmt. Die **FPR** ist damit nutzlos. Aber auch mit den verbleibenden drei Feldern der Konfusionsmatrix kann eine Qualitätsbeurteilung erfolgen.

Die Relevanz (engl.: *Precision*) gibt Auskunft über das Verhältnis der tatsächlichen Treffer gegenüber allen detektierten Objekten:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (A.7)$$

Die Sensitivität (engl. *Recall*) ist ein Maß für die Empfindlichkeit oder Trefferquote. Sie gibt an, wie viele der tatsächlich vorhandenen Objekte detektiert wurden.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (A.8)$$

Die Precision Recall Kurve setzt diese beiden Größen in Relation und veranschaulicht die Qualität des Klassifikators in vollem Umfang. Abb. A.2 zeigt ein Beispiel für ein Precision Recall Diagramm.

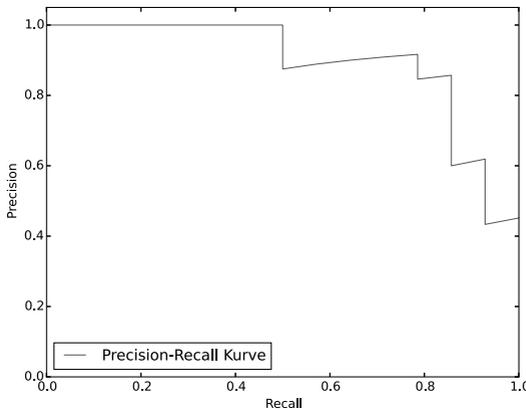


Abb. A.2: Ein Precision Recall Diagramm.

Literatur

Eigene Arbeiten

Veröffentlichungen

- [CID09] Daniele Cerra, Martin Israel und Mihai Datcu. “Parameter-free clustering: Application to fawns detection”. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*. Bd. 3. IEEE. 2009, S. 467–469.
- [IE11] Martin Israel und Stephan Evers. “Mustererkennung zur Detektion von Rehkitzen in Thermalbildern”. In: *Bornimer Agrartechnische Berichte* 17 und 18 (2011), S. 20–28.
- [IMK15] Martin Israel, Manuel Mende und Stefan Keim. “UAVRC, a generic MAV flight assistance software”. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4* (2015), S. 287–291.
- [Isr+10] Martin Israel u. a. “Study on wildlife detection during pasture mowing”. In: *68. Internationale Tagung LAND.TECHNIK, Braunschweig*. 2010.
- [Isr11] Martin Israel. “A UAV-based roe deer fawn detection system”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 38 (2011), S. 1–5.

Patente

- [IS11] Martin Israel und Thomas Schwarzmaier. “Verfahren und Vorrichtung zur Suche und Erkennung von in landwirtschaftlichen Feldern und Wiesen versteckten Tieren”. Deutsches Patent DE102009039602B3. erteilt 2011.
- [Isr+09] Martin Israel u. a. “Verfahren und Vorrichtung zur Suche und Erkennung von in landwirtschaftlichen Feldern und Wiesen versteckten Tieren.” Schweizer Patent CH701808. erteilt 2015, angemeldet 2009.

- [Isr12] Martin Israel. “Verfahren zum Auffinden von Lebewesen aus der Luft sowie Flugobjekte zum Auffinden von Lebewesen aus der Luft”. Deutsches Patent DE102012221580. angemeldet 2012.
- [IT10] Martin Israel und Volker Tank. “Einrichtung zum Detektieren von Objekten, wie Tieren und Vogelgelegen, im Acker und Pflanzenbau”. Deutsches Patent DE102008035888B4. erteilt 2010.
- [ITH09] Martin Israel, Volker Tank und Peter Haschberger. “Verfahren zur Erkennung von Tieren einschließlich Brutgelegen in landwirtschaftlich genutzten Feldern und Wiesen sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens”. Österreichisches Patent AT508514B1. erteilt 2014, angemeldet 2009.

betreute Studentenabschlussarbeiten

- [Bal12] Eva Ballesteros. “Linux-driver development for components of the UAV-based fawn detection system”. Masterarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [Eve11] Stephan Evers. “Implementierung eines Mustererkennungsalgorithmus für die Rehkitzrettung”. Diplomarbeit. Hochschule Augsburg, 2011.
- [Gra11] Lukas Graeser. “Entwicklung einer Autopilotsoftware zur Steuerung einer fliegenden Sensorplattform”. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden Württemberg, 2011.
- [Men14] Manuel Mende. “Flugassistenzsoftware für unbemannte Kleinfluggeräte”. Diplomarbeit. Duale Hochschule Baden Württemberg, 2014.
- [Neu11] Philipp Neugebauer. “Entwicklung eines Gumstix-Expansion-Boards für ein UAV-basiertes Rehkitzrettungssystem”. Masterarbeit. Hochschule Osnabrück, 2011.
- [Sch09] Thomas Schwarzmaier. “Konstruktion einer mechanischen Nachführung zur Bildstabilisierung einer Infrarotkamera”. Diplomarbeit. Hochschule München, 2009.
- [See08] Sigmar Seeger. “Laserdistanzsensor für den Wildretter”. Diplomarbeit. Hochschule München, 2008.

Wildrettung und Mähtod

wissenschaftliche Veröffentlichungen

- [Asc+15] Alois Ascher u. a. “A Switchable Dual Band Antenna for Smart Devices in the UHF RFID-and the GPS L1 Band using MEMS”. In: *ITG-Fachbericht-Smart SysTech 2015* (2015).
- [Ban11] Daniel Báni. “Einsatz eines UAV mit Thermalkamera zur Ortung von Wildtieren”. Masterarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2011.
- [Bie+03] Erwin Biebl u. a. “Verfahren zur Detektion von Tieren und/oder Gelegen von Bodenbrütern in deren natürlichem Lebensraum sowie Einrichtungen zur Durchführung”. Deutsches Patent DE000010016688C2. erteilt 2003.
- [Bun93] Michael Bundschuh. “Entwicklung und Aufbau eines Infrarotsensors zur Erkennung von Wild”. Diplom. Technische Universität München, 1993.
- [Chr+14] Peter Christiansen u. a. “Automated detection and recognition of wildlife using thermal cameras”. In: *Sensors* 14.8 (2014), S. 13778–13793.
- [Fac12] Andreas Fackelmeier. “Mikrowellengestützte Detektion von Wildtieren bei der Grünlandmäh”. Dissertation. Technische Universität München, 2012.
- [FB09] Andreas Fackelmeier und Erwin M Biebl. “A multistatic radar array for detecting wild animals during pasture mowing”. In: *Radar Conference, 2009. EuRAD 2009. European*. IEEE. 2009, S. 477–480.
- [HBT96] Peter Haschberger, Michael Bundschuh und Volker Tank. “Infrared sensor for the detection and protection of wildlife”. In: *Optical Engineering* 35.3 (1996), S. 882–889.
- [Hel08] Michael Hellermann. “Vergleich verschiedener Methoden zur Wildrettung bei Erntearbeiten”. Bachelorarbeit. Fachhochschule Südwestfalen, 2008.
- [HKP13] Amanda Hodgson, Natalie Kelly und David Peel. “Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying marine fauna: a dugong case study”. In: (2013).
- [HP15] Florian Hammer und Markus Pichler. “A Synthetic Aperture Acoustic Short-Range Imaging System in the Audible Domain”. In: *Acta Acustica united with Acustica* 101.1 (2015), S. 190–197.
- [Jar02] Anders Jarnemo. “Roe deer *Capreolus capreolus* fawns and mowing - mortality rates and countermeasures”. In: *Wildlife Biology* (2002), S. 211–218.

- [Kal82] Jan Kaluzinski. "Roe deer mortality due to mechanization of work in agrocenoses." In: *Acta theriologica* 27.30 (1982), S. 449–455.
- [Kit79] L Kittler. "Wildverluste durch den Einsatz landwirtschaftlicher Maschinen nach einer Erhebung aus dem Jagdjahr 1976/77 in Nordrhein-Westfalen". In: *Zeitschrift für Jagdwissenschaft* 25 (1979), S. 22–32.
- [Leo+] Miguel Leonardo u. a. "A miniature wildlife tracking UAV payload system using acoustic biotelemetry". In: *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* ().
- [Men09] Michael Menner. "Evaluierung und Implementierung eines Algorithmus zur Mustererkennung für ein Embedded System". In: *Hochschule Regensburg Diplomarbeit* (2009).
- [Mul+14] Margarita Mulero-Pázmány u. a. "Remotely piloted aircraft systems as a rhinoceros anti-poaching tool in Africa". In: (2014).
- [PZ14] Dennis van de Poel und Andreas Zehm. "Die Wirkung des Mähens auf die Fauna der Wiesen—Eine Literaturlauswertung für den Naturschutz". In: (2014).
- [Rei12] Thomas Reichthalhammer. *Ein Radar mit synthetischer Apertur für den Nahbereich*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [Ste+12] Kim Arild Steen u. a. "Automatic detection of animals in mowing operations using thermal cameras". In: *Sensors* 12.6 (2012), S. 7587–7597.
- [Wag11] Johann Wagner. "Schach dem Mähtod – Von traditionellen Methoden der Wildrettung zu modernen Techniken der Wildretter". Magisterarb. 2011.

nichtwissenschaftliche Veröffentlichungen

- [Ber15] Nicole Berger. *Rehkitzrettung*. abgerufen am 27.9.2015. URL: <http://www.bauernzeitung.ch/news-archiv/2015/rettung-fuer-rehkitze-kommt-aus-der-luft/>.
- [Blu15] Wolfgang Blumenthal. *Schutz vor Mähtod: Wie Drohnen Tierleben retten können*. abgerufen am 27.9.2015. URL: <http://www.shz.de/schleswig-holstein/panorama/schutz-vor-maehod-wie-drohnen-tierleben-retten-koennen-id9707311.html>.
- [Dem15] Frank Demke. *Rehkitzrettung*. 2015. URL: <http://www.wildtierhilfe-mv.de>.
- [DTT89] Helmut Dietl, Volker Tank und Annette Tank. "Einrichtung zur Erkennung von Wild". Deutsches Patent DE000003730449C2. 1989.
- [gam15] game-finder. *Life Finder*. abgerufen am 27.9.2015. URL: <http://www.game-finder.com/LF-6.htm>.

- [Hag15] Hagopur. *Hagopur Kitzrettung*. 2015. URL: <http://www.hagopur-shop.de>.
- [Kli07] Vivienne Klimke. "Wildrettung vor der Mahd". In: *Jagd in Bayern* 4 (2007).
- [KP09] Gerhard Kneißl und Gerhard Pumm. *LARS-Wildrettungssysteme*. 2009. URL: <http://www.lars-wildretter.de>.
- [Mic15] Microdrones. *RESCUE WILD ANIMALS WITH MICRODRONES*. abgerufen am 28.9.2015. URL: <https://www.microdrones.com/en/applications/growth-markets/microdrones-in-agriculture/>.
- [Pir00] Pirsch. "Infrarot gegen Mähtod – Der Life Finder im Praxistest". In: *Pirsch* 7 (2000).
- [Sch15] R Schmidkonz. *Rehkitzrettung*. abgerufen am 27.9.2015. URL: <http://www.pixelflieger.de/anwendungen/rehkitzrettung>.
- [SF08] SF. *Rehkitz-Drohnen*. abgerufen am 28.9.2015, 2008. URL: <http://www.srf.ch/play/tv/schweiz-aktuell/video/rehkitz-drohnen?id=4831e28a-8cc6-4835-aec2-f56cb81e12e5>.
- [SRF13] SRF. *Drohne soll Rehkitze retten*. abgerufen am 28.9.2015, 2013. URL: <http://www.srf.ch/play/tv/10vor10/video/drohne-soll-rehkitze-retten?id=c32a5062-1267-4e68-9554-1178e3a23aac>.
- [Ste10] Peter Stelzer. "Grünroggenmahd im Emsland – Untersuchungen zu Ausmaß und Möglichkeiten der Vermeidung des verstärkten Mähtodes von Wildtieren durch die Ernte von Grünroggen für Biogasanlagen im Mai". In: (2010).
- [Tan07] Volker Tank. "Verfahren zum Detektieren und Diskriminieren von Tieren in landwirtschaftlich genutzten Wiesenflächen". Deutsches Patent DE102005055919B4. erteilt 2007.
- [Tho15] Martin Thoma. *Rehkitz-Retter / Wildschreck KR01*. 2015. URL: <http://www.naturtech-oberland.de>.
- [Vog15] Vogelsberger. *Wildscheuchen mit Windrädchen*. abgerufen am 27.9.2015. URL: <http://forum.wildundhund.de/showthread.php?87421>.
- [Wes15] Landes Jagdverband Nordrhein Westfalen. *LJV Wildretter*. abgerufen am 27.9.2015. URL: http://www.reichelt.de/reicheltpedia/index.php5/Wildtiere%5C_rennen.
- [Wie03] M Wiese. "DJV-Handbuch". In: *Verlag Dieter Hoffmann, Mainz* (2003).
- [Wil] Deutsche Wildtierstiftung. "Stoppt den Mähtod, Praxisratgeber". In: ().
- [ZDF15] ZDF. *Rettet die Rehkitze*. abgerufen am 27.9.2015. URL: <http://www tivi.de/fernsehen/purplus/index/44565/index.html>.

Wildbiologie und Agrarwissenschaften

- [Dör09] Michael Dörflinger. *1000 Landmaschinen: [Mähdrescher, Ballenpressen, Erntemaschinen, Pflüge, Grubber, Häcksler und Eggen, Saat- und Pflagemaschinen, Traktoren und Wagen]*. NGV, Naumann & Göbel, 2009.
- [Gal+00] FD Galey u. a. “Type C botulism in dairy cattle from feed contaminated with a dead cat”. In: *Journal of veterinary diagnostic investigation* 12.3 (2000), S. 204–209.
- [Kur02] F Kurt. *Das Reh in der Kulturlandschaft.: Ökologie. Sozialverhalten. Jagd und Hege*. Kosmos, 2002. ISBN: 9783440093979.
- [Mue99] H Mueri. “Witterung, Fortpflanzungsgeschehen und Bestandesdichte beim Reh (*Capreolus capreolus* L.)”. In: *Zeitschrift für Jagdwissenschaft* 45.2 (1999), S. 88–95.
- [Rie55] W Rieck. “Die Setzzeit bei Reh-, Rot- und Damwild in Mitteleuropa”. In: *Zeitschrift für Jagdwissenschaft* 1.2 (1955), S. 69–75.
- [Wie14] Statistisches Bundesamt Wiesbaden. “Bodennutzung der Betriebe”. In: *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei* Fachserie 3 Reihe 3.1.2 (2014).

Thermografie

- [BG10] Helmut Budzier und Gerlach Gerald. *Thermische Infrarotsensoren*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010, S. 309. ISBN: 978-3-527-40960-0.
- [CPT05] SY Cheng, Sangho Park und MM Trivedi. “Multiperspective thermal ir and video arrays for 3d body tracking and driver activity analysis”. In: *Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on* (2005).
- [FLI10] FLIR. “Tau640 Slow Video Camera User’s Manual”. In: (Okt. 2010).
- [GM13] Rikke Gade und Thomas B. Moeslund. “Thermal cameras and applications: a survey”. In: *Machine Vision and Applications* 25.1 (Nov. 2013), S. 245–262. ISSN: 0932-8092.
- [HL10] Nicholas Högasten und Rene Lindner. *Digital Detail Enhancement (DDE)*. Techn. Ber. Flir, 2010.
- [KD13] Claudia Künzer und Stefan Dech. *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. Springer Science & Business Media, 2013. ISBN: 9789400766396.
- [MD09] Waldemar Minkina und Sebastian Dudzik. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. 2009. ISBN: 9780470747186.

- [VM10] Michael Vollmer und Klaus-Peter Moellmann. *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. 2010.

Photogrammetrie, Computer Vision, Georeferenzierung

- [Agi] Agisoft. *Agisoft Lens User Manual*. URL: <http://downloads.agisoft.ru/lens/doc/en/lens.pdf>.
- [Bis] P. K. Biswas. *wörtliches Protokoll der Vorlesung Digital Image Processing, Lecture - 7, Camera Model & Imaging Geometry*. abgerufen am 8.9.2015. URL: <http://textofvideo.nptel.iitm.ac.in/117105079/lec7.pdf>.
- [Blá+11] M Bláha u. a. “Direct georeferencing of UAVs”. In: *Proceedings of Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*. 2011.
- [Bro71] Duane C. Brown. “Close-range camera calibration”. In: *Photogrammetric Engineering* 37 (1971), S. 855–866.
- [CM14] I Colomina und P Molina. “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92 (2014), S. 79–97.
- [Cra01] Michael Cramer. “Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie”. Dissertation. Universität Stuttgart, 2001.
- [Eis09] Henri Eisenbeiß. “UAV photogrammetry”. Dissertation. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 2009.
- [Fuj+92] Hiroshi Fujita u. a. “A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography”. In: *Medical Imaging, IEEE Transactions on* 11.1 (1992), S. 34–39.
- [Gli12] Philipp Glira. “Direkte georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren”. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2012.
- [Har+12] Wilfried Hartmann u. a. “Determination of the UAV position by automatic processing of thermal images”. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 39 (2012), B6.
- [HZ03] R Hartley und A Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [Kor] Monika Korte. *Deklinationsrechner des Geoforschungszentrum Potsdam*. URL: <http://www.gfz-potsdam.de/deklinationsrechner/>.
- [Kra04] K Kraus. *Photogrammetrie*. De-Gruyter-Lehrbuch Bd. 1. Bod Third Party Titles, 2004. ISBN: 9783110177084.

- [OH04] Jean-nicolas Ouellet und P Hebert. “Developing assistant tools for geometric camera calibration: assessing the quality of input images”. In: *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on* 4 (2004).
- [Pra+06] S Prakash u. a. “Robust thermal camera calibration and 3D mapping of objects surface temperatures”. In: *SPIE Thermosense XXVIII*. 2006.
- [Stu97] Peter Sturm. “Critical motion sequences for monocular self-calibration and uncalibrated euclidean reconstruction”. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on* (1997), S. 1100–1105.
- [VL12] Stephen Vidas und Ruan Lakemond. “A mask-based approach for the geometric calibration of thermal-infrared cameras”. In: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 61.6 (2012), S. 1625–1635.
- [WB89] Charles Sumner Williams und Orville A Becklund. *Introduction to the optical transfer function*. Bd. 112. SPIE Press, 1989.
- [Zha99] Zhengyou Zhang. “Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations”. In: *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on* 1 (1999).

Informatik, Grundlagen

- [BN84] Andrew D Birrell und Bruce Jay Nelson. “Implementing remote procedure calls”. In: *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)* 2.1 (1984), S. 39–59.
- [Bra14] Tim Bray. “The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format”. In: (2014).
- [CW12] Michael F Cohen und John R Wallace. *Radiosity and realistic image synthesis*. Elsevier, 2012.
- [KV84] James T Kajiya und Brian P Von Herzen. “Ray tracing volume densities”. In: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. Bd. 18. 3. ACM. 1984, S. 165–174.
- [Suz85] S Suzuki. “Topological structural analysis of digitized binary images by border following”. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 46 (1985), S. 32–46.
- [Tar12] Sasu Tarkoma. *Publish/subscribe systems: design and principles*. John Wiley & Sons, 2012.
- [Tav14a] Tavendo. *autobahn project homepage*. 2014. URL: <http://autobahn.n.ws>.

- [Tav14b] Tavendo. *crossbar specification*. 2014. URL: <http://www.crossbar.io>.
- [Web51] Ernst Heinrich Weber. *Die Lehre vom Tastsinne und Gemeingefühle auf Versuche gegründet*. Friedrich Vieweg und Sohn, 1851.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Geeignete Mähstrategie, um fluchtfähige Tiere zu verschonen . . .	19
2.2	Verschiedene Scheuchen	19
2.3	Rehkitz-Rettungsaktion mit freiwilligen Schülern im Odenwald. . .	20
2.4	Der tragbare Wildretter wird durch die Wiese getragen.	21
2.5	Der mähwerkgekoppelte Wildretter.	22
2.6	Funktionsprinzip eines Radars zur Rehkitzdetektion.	23
2.7	Der HTL Wildretter im Einsatz	25
2.8	Elektromagnetische Welle.	28
2.9	Elektromagnetisches Spektrum.	29
2.10	Planck'sche Strahlungsspektren für verschiedene Temperaturen. . .	30
2.11	Absorption, Reflexion und Transmission an einem Körper.	31
2.12	Transmission der Atmosphäre.	32
2.13	Wirkprinzip von thermoelektrischen und photoelektrischen Strahlungsdetektoren	33
2.14	Schematischer Aufbau eines Mikrobolometer Pixels.	34
2.15	Strahlungsanteile, die auf das FPA der Thermalkamera treffen. . .	35
2.16	Optisch-geometrische Beziehungen einer Kamera.	37
3.1	Der Fliegende Wildretter mit einer Thermalkamera und drei CMOS-Kameras.	45
3.2	Die vier unterschiedlichen Suchstrategien.	48
3.3	Auswahl an Optimierungszielen für das System Fliegender Wildretter.	49
3.4	Der FALCON 8 und seine Mobile Bodenstation.	52
3.5	Thermalkamera TAU640 von FLIR und ihre wichtigsten Eigenschaften	54
3.6	Geometrische Randbedingungen bei der Sicht auf ein Kitz in der Wiese	55
3.7	Unverdeckter Sichtbereich auf dem Sensorchip.	56
3.8	Datenlogger FlirSD der Firma Asctec.	60
3.9	Manueller vs. wegpunktbasierter Flug.	61
3.10	Flugpfadvarianten	62
3.11	Bildüberlappung.	63

3.12	Das Hanglagenproblem.	64
3.13	Orientierung des Fluggeräts.	65
3.14	Flugplanungssoftware WAYPOINTEDITOR	66
3.15	Die Flugassistentensoftware AutoPylot. Quelle Hintergrundluftbild: Google Maps, GeoBasis-DE/BKG, DigitalGlobe	68
3.16	Komponentendiagramm der Flugassistentensoftware UAV-RC.	70
3.17	Browserbasierte Benutzeroberfläche des UAV-RC	71
3.18	Auswertesoftware PoITAGGER2	72
3.19	Wildretter-Datenbank	74
4.1	Farbbild vs. Thermalbild eines Rehkites im Getreidefeld.	81
4.2	Farb- und Thermalbilder von Rehkites aus 1,2 m Distanz.	85
4.3	Durchschnittsstrahlungstemperaturen der zehn Rehkite und ihrer Wiesenumgebung.	86
4.4	64×64 Pixel große Thermalbildausschnitte von Rehkites aus 80 m Flughöhe.	87
4.5	Verdeckung eines Rehkites.	88
4.6	Rehkitezfundstellen und abgeflogene Flächen.	89
4.7	Verlassenes Rehkitezlager.	90
4.8	Farb- und Thermalbilder von vermeintlichen Rehkites.	93
4.9	Korrelation von Sonnenstrahlung und Fehlalarmen.	94
4.10	Minimalgröße eines Kitzbildes.	96
4.11	Thermalbildausschnitte von Rehkites aus verschiedenen Flughöhen.	97
4.12	Thermalbildausschnitte von einer warmen Stelle aus verschiedenen Flughöhen.	98
4.13	Andere Wärmequellen im Bild.	99
4.14	Siemensstern zur Fokuseinstellung.	101
4.15	Labora Aufbau zur Fokusjustierung und Ergebniskurve.	103
4.16	Maximalgeschwindigkeit pro Flughöhe.	104
4.17	Blockschaltbild des Video-Signalfades der TAU640.	105
4.18	Vergleich von analogem Thermalbild zu vorverarbeitetem digitalen Rohbild	109
4.19	Histogramm zu Rohbild aus Abb. 4.18.	109
4.20	Halbraumanteil der Strahlung des Kameragehäuses.	112
4.21	Im Thermalbild sichtbarer Einfluss der Kameragehäusestrahlung.	113
4.22	Einseitig erwärmtes Kameragehäuse, sichtbar im Thermalbild.	114
4.23	Diagramme zur Kamera-Aufwärmphase.	115
4.24	Blockschaltbild des МВОПТ-Algorithmus.	117
4.25	Die Vorverarbeitung am Beispiel eines Thermalbildes.	118
4.26	Unterschiedliche Schwellwerte zur Blobdetektion auf DoG-gefil- terten Bildern.	120

4.27	Struktogramm des SIMPLEFAWNDETECTORS	122
4.28	Precision-Recall-Kurve für die visuelle Detektion	125
5.1	Die Zentralprojektion eines Punktes X auf den Punkt x auf der Bildfläche.	130
5.2	3D-Modell des Fliegenden Wildretters.	133
5.3	Bilder der Lagestabilitätsanalyse.	137
5.4	Diagramm zur Nutzlasthalter-Lagestabilität im beschleunigten Ho- rizontalflug.	137
5.5	Anteile des gemessenen Beschleunigungsvektors.	138
5.6	Flugpfad, bei dem die Kompassfehler sichtbar sind. Quelle Hinter- grundluftbild: DOP 200, Bayerische Vermessungsverwaltung. . .	139
5.7	Diagramm zur Kompassdeviation	141
5.8	GPS-Höhe vs. barometrische Höhe.	142
5.9	Geometrische Kalibrierung der Thermalkamera mit einem 5×5 m großen Testfeld.	144
5.10	Laboraufbau zur geometrischen Kalibrierung der Thermalkamera. . .	145
5.11	Raster der äquidistanten Strahlungsquellenpositionen auf dem Sen- sorchip.	146
5.12	IFOV pro Pixel bei einem horizontalen und vertikalen Scan. . . .	147
5.13	Testfeldkalibrierung vs. Laborkalibrierung bei Fokussierung auf 1,4 m Distanz.	150
5.14	Verkipfung der Linse.	151
5.15	Fokussierung auf 1,4 m im Vergleich zur Fokussierung auf 17 m. .	151
5.16	Boresightkalibrierung	152
5.17	Verbesserung der Georeferenzierung. Quelle Hintergrundluftbild: DOP 20, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.	153
5.18	Track eines Handheld-GPS-Geräts bei der Kitzsuche.	154
5.19	Histogramm zur Suchdauer mit dem Handheld-GPS-Gerät	155
A.1	Links- und rechtsseitiges Koordinatensystem.	161
A.2	Ein Precision Recall Diagramm.	163

Tabellenverzeichnis

2.1	Bezeichnungen der Optik-Komponenten.	37
3.1	Auswahl an Linsen für die Thermalkamera TAU640 (Angaben des Herstellers).	57
3.2	Flächenleistung bei verschiedenen Höhen	75
3.3	Flächenleistung bei verschiedenen Aufnahmestrategien	76
3.4	Statistik über die Rehkitzfunde und die Flächenleistung des Prozessschrittes Flug	79
4.1	Die Behandlung der Funde, dargestellt in einer Konfusionsmatrix.	83
4.2	Rehkitzfunde in Bezug gesetzt mit der Anzahl an Lagern.	91
4.3	Rehkitzfunde in Bezug gesetzt mit der Bewuchshöhe	91
4.4	Fehlalarme pro Hektar.	94
4.5	Wertetabelle für einen geeigneten Schwellwert-Faktor zur Binarisierung des DoG-Bildes	121
4.6	Der Evaluierungsdatensatz.	124
4.7	Klassifizierungsergebnisse der visuellen Detektion.	126
4.8	Klassifizierungsergebnisse des SIMPLEFAWNBETECTORS.	127
5.1	Kameraparameter der Testfeldkalibrierung aus 1,4 m Abstand.	149
5.2	Kameraparameter der Laborkalibrierung aus 1,4 m Abstand.	149
A.1	Konfusionsmatrix für eine binäre Klassifizierung.	162

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
α_{FOV}		Kameraöffnungswinkel 37, 38, 55
α_{IFOV}		Pixelöffnungswinkel 37, 38, 59
α_{d}		diagonaler Bildwinkel der Kamera 56, 57
α_{s}		vertikaler Bildwinkel des zentralen DE 37
α_{v}		vertikaler Bildwinkel der Kamera 37, 38, 56
α		Absorptionsgrad 31
δ_{φ}		minimaler Winkel nach Rayleigh-Kriterium 58
ϵ_{Obj}		Emmissionsgrad des Objekts 35, 36
ϵ		Emmissionsgrad 31, 107
γ		Abweichungswinkel 138
κ	°	Gierwinkel 133, 134, 152, 153, 160, 162
$\bar{\lambda}$		Maßstabsfaktor 40, 41, 132
λ_{max}	m^{-1}	λ mit max. Intensität pro Wellenlängenintervall 30
λ	m^{-1}	Wellenlänge der elektromagn. Strahlung 29, 30, 34, 58, 177
ν	°	Hangneigung 64, 65
ω_{FOV}		Schraumwinkelanteil des DE 106, 111, 112
ω_{K}		Kameragehäuse-Raumwinkelanteil des DE 111, 112
ω_{red}		reduzierter Raumwinkel eines DE 111
ω	°	Rollwinkel 133–135, 152, 160
Φ_{a}	W	absorbierter Strahlungsfluss 31
Φ_{r}	W	reflektierter Strahlungsfluss 31
Φ_{t}	W	transmittierter Strahlungsfluss 31
Φ	W	Strahlungsfluss 31, 33, 35
ρ		Reflektionsgrad 31
σ^2		Standardabweichung 95
σ_{B}		Standardabweichung vom Mittelwert \bar{B}_{arithm} 121
$\sigma(\bar{X})$		Standardfehler des arithm. Mittels 95
σ		Kernelgröße (Bildverarbeitungsfilter)) 117, 119
σ		Standardabweichung 95
τ_{Atm}		Transmissionsgrad der Atmosphäre 35, 36, 115
τ_{Lin}		Transmissionsgrad der Linse 35, 36

Symbol	Einheit	Beschreibung
τ_{th}	s	thermale Zeitkonstante 34, 35
τ		Transmissionsgrad 31
θ	°	Nickwinkel 133–135, 152, 160
ξ		Faktor zur Binarisierung eines DoG-Bildes 121
A	px ²	Fläche des Blobs auf dem Bild 121
A_{k}	px ²	Fläche des Kitzes auf dem Bild 86
a_{sw}	°/step	Schrittwinkel 146
\ddot{a}	m/s ²	Beschleunigung in Flugrichtung 138
B^{c}		kalibrierter Spektral-Faktor 116
\bar{B}_{arithm}		arithmetischer Mittelwert aller Pixel im Bild 121, 177
B		Spektral-Faktor (radiom. Kalibrierung) 115, 116
B		Bereich, in dem Kitzte vom Gras unverdeckt sind 55, 56, 58
b_{os}		Offsetwert 107, 108
b_{s}	m	Sensorbreite 56, 57
b		(als index) Boresight 134, 152, 153
\bar{C}		Translationsvektor für äußere Orientierung der Kamera 39
C	px ²	Kreisförmigkeit des Blobs auf dem Bild 121, 123
C_{th}	W/s/K	thermale Masse 34, 35
c_{k}	m	Kamerakonstante 37, 38, 40, 41, 86, 97, 102, 103, 119, 152
c_x	px	Zentralpunkt der Kamera (X-Koord.) 39–41, 147–149, 152
c_y	px	Zentralpunkt der Kamera (Y-Koord.) 39–41, 147–149, 152
D_{k}	m	Rehkitzdurchmesser 54, 55, 86, 96, 97, 119
D	m	Durchmesser der Blende 37, 38, 58, 112
d_{h}	m	hyperfokale Distanz 57
d_{k}	px	Rehkitzdurchmesser auf dem Bild 86, 119
d	m	Flugbahn-Abstand 64, 65
E_{pix}	W/m ²	Bestrahlungsstärke eines DE 111
F^{c}		kalibrierter Form-Faktor 116
F		Form-Faktor (radiom. Kalibrierung) 115, 116
f'	m	Bildseitige Brennweite der Kamera 37
\hat{f}		Ortsfrequenz der Horizontalposition \hat{x} auf dem DE 38
f		ungefiltertes Eingangsbild an der Pixelposition (x, y) 117
f_x	px	Brennweite bzw. Bildweite (X-Koord.) 39, 40, 148, 149
f_y	px	Brennweite bzw. Bildweite (Y-Koord.) 39, 40, 148, 149
f	m	Brennweite der Kamera 37, 38, 57, 112, 130, 131
G_{th}	W/K	thermale Leitfähigkeit 34, 35
g		Ausgangsbild des Unschärf Maskieren Filters 117, 119
g		Gerade 132

Symbol	Einheit	Beschreibung
h		Gauß'sches Filter 117
\vec{g}'	m/s^2	gemessener Beschleunigungsvektor 138
\vec{g}	m/s^2	Erdbeschleunigung 138
H_{blob}		Helligkeit des Blobs 121–123
H_{sur}		Helligkeit der Umgebung des Blobs 123
ΔH		Helligkeitsdifferenz zwischen Blob und Umgebung 123
H'		Lage der bildseitigen Hauptebene 37
H		Lage der objektseitigen Hauptebene 37
h_{SP}	m	Flughöhe über Startpunkt 64
h_f	m	Abstand Szene zu Kamera 37, 38, 55, 64, 65, 86, 97, 103, 119
h_s	m	Sensorhöhe 37, 38, 56, 57
h_w	m	Bewuchshöhe 54, 55
I_S	A	Detektor-Ausgangsstrom 33
i_{14}		14-Bit Wert 107
i_8		8-Bit Wert 107
i		Spaltenvariable 146, 147
j	A	Zeilenvariable 146, 147
K		Kamerakalibriermatrix 39
k		(als index) Kamerakoordinatensystem 40, 41, 131–135
k_1		erster radialer Verzeichnungskoeffizient 40, 149
k_2		zweiter radialer Verzeichnungskoeffizient 40, 149
k_3		dritter radialer Verzeichnungskoeffizient 40, 149
k_4		vierter radialer Verzeichnungskoeffizient 149
k		Blendenzahl 38, 57
L_{Atm}		Strahldichte der Atmosphäre 35, 36
L_K		Strahldichte des Kameragehäuses 35, 111
L_{Obj}		Strahldichte des Objekts 35, 36
L_O		Äquivalente Strahldichte der Linse 35, 111
L_{Umg}		Strahldichte der Umgebung 35, 36
L		Lookup-Tabelle 132
L	m	Größe der Szene 37
l		tiefpassgefiltertes Bild 117, 119
M_λ	W/m^2m	spektrale spezifische Ausstrahlung 29, 30
m_{cp}		Kompressionsfaktor 107, 108
n		Stichprobenumfang 95
\mathbb{P}^2		zweidimensionaler projektiver Vektorraum 39
\mathbb{P}^3		dreidimensionaler projektiver Vektorraum 39, 130, 161, 162
P_H		Helligkeitsparameter der Bittiefenkompression 108
P_K		Kontrastparameter der Bittiefenkompression 108

Symbol	Einheit	Beschreibung
P		Kameraprojektionsmatrix 39
P_{gain}		Gainwert der Bittiefenkompression 107, 108, 110
$P_{h,j}$	px	horizontales Intervallmittelpunkt-DE 147
P	px	Umfang des Blobs auf dem Bild 121
P_{itt}		Image Transform Table Midpoint 107, 108, 110
P_{plateau}		Plateauwert der Bittiefenkompression 108, 110
$P_{v,i}$	px	vertikales Intervallmittelpunkt-DE 147
P		Zentralprojektionsmatrix 131, 132
P	W	Strahlungsleistung 30
$p_1,$		Pixelposition des ersten Peltierelements 152, 153
$p_2,$		Pixelposition des zweiten Peltierelements 153
p_1		erster tangentialer Verzeichnungskoeffizient 40, 149
p_2		zweiter tangentialer Verzeichnungskoeffizient 40, 149
p		Flugstreifenüberlappung 65, 153
$Q_{h,j}$		Polynomfunktion für horiz. Scan 147, 148
$Q_{v,i}$		Polynomfunktion für vert. Scan 147, 148
$q_{h,j}$	°/px	Drehwinkel pro Pixel 146, 147
$q_{v,i}$	°/px	Drehwinkel pro Pixel 147
ΔR_W		Wahrnehmung des Reizunterschieds 109, 110
\mathbb{R}^3		dreidimensionaler euklidischer Vektorraum 39, 160, 161
R^c		kalibrierter Response-Faktor 116
R_V	A^{-1}	Spannungsempfindlichkeit 35
R_W		Reizintensität 110
\mathbf{R}_x		Matrix zur Rotation um die X-Achse 134, 135, 160
\mathbf{R}_y		Matrix zur Rotation um die Y-Achse 134, 135, 160
\mathbf{R}_z		Matrix zur Rotation um die Z-Achse 134, 160
R		Rotationsmatrix 39, 134, 135, 160
R		Response-Faktor (radiom. Kalibrierung) 115, 116
r_z	m	Abstand zum Zentralpixel 112
r	m	Radius 56, 57
S		Koordinationsstransformationsmatrix 131, 132, 134
S_{out}		Temperaturmesswert 115, 116
S	m	Bodenauflösung eines Pixels 37, 38, 96, 97, 103, 119
$s_{h,j}$		horizontale Motorschrittposition der Zeile j 146
$s_{v,i}$		vertikale Motorschrittposition der Spalte i 146
s_{xy}		Scherungsparameter zwischen X- und Y-Achse 39, 40, 149
s	m	Seitenlänge eines DE 37, 38, 40, 59, 86, 103, 119, 131
T_{Core}^c	K	kalibrierte Sensorkerntemperatur 116
T_{Core}	K	Sensorkerntemperatur 116

Symbol	Einheit	Beschreibung
T_{SK}	K	Schwarzkörpertemperatur 115, 116
\mathbf{T}		Translationsmatrix 134, 162
$T_{h,j}$	°	horizontaler Winkel des DE in Zeile j 148
T_{obj}	K	kalibrierte Temperatur des gemessenen Objekts 116
T_{out}	K	Temperaturmesswert 116
$T_{v,i}$	°	vertikaler Winkel des DE in Spalte i 148
T	K	Temperatur 29, 30
ΔT_S	K	Temperaturdifferenz 33
t_{bin}		Binarisierungsschwellwert 120, 121
t_i	s	Integrationszeit 103
U_{MB}	V	Mikrobolometer-Ausgangsspannung 35
U_S	V	Detektor-Ausgangsspannung 33
u		(als index) Koordinatensys. des UAVs 41, 133–135
v_h	m/s	horizontale Bewegungsgeschwindigkeit 103
W		homogen. Koordinate eines 3D-Punktes 39, 130, 161, 162
w		(als index) Weltkoordinatensystem 40, 41, 131, 132, 134
w'	°	Sehwinkel der Kamera 54, 55, 65
w	°	maximaler Sichtwinkel 54–56
w		homogen. W-Koordinate eines abgebild. Punktes 39, 131
ΔX_b		Versatz zw. Kamera- und UAV-Koordinatensystem 134
\mathbf{X}_0		Koordinatenursprung (Position der Kameralinse) 132
X_0		Koordinatenursprung (X-Komponente) 40, 41
$\bar{\mathbf{X}}$		3D-Punkt $(X, Y, Z, W)^T$ im \mathbb{P}^3 39, 130–132, 161, 162
\mathbf{X}		3D-Punkt $(X, Y, Z)^T$ im \mathbb{R}^3 39, 40, 130, 132, 161, 175
X		X-Koordinate des 3D-Punktes 39–42, 130, 134, 161, 162
\bar{x}		Bildpunkt $(x, y, w)^T$ im projektiven Raum \mathbb{P}^2 39, 130, 131
\bar{x}		arithmetischer Mittelwert 95
\mathbf{x}		2D-Punkt $(x, y)^T$ im \mathbb{R}^2 130–132, 175
\dot{x}		Horizontalposition auf dem DE 38
$x_{h,j}$	px	X-Komponente des DE beim Horizontalscan 146, 147
x_i		Stichprobe 95
\vec{x}		Projektionsvektor auf die Bildebene 131, 132
x		X-Koordinate auf dem DE 39–42, 117, 119, 130
Y_0		Koordinatenursprung (Y-Komponente) 40, 41
Y		Y-Koordinate des 3D-Punktes 39–42, 130, 134, 161, 162
$y_{h,j}$	px	Y-Komponente des DE beim Vertikalscan 147
y		Y-Koordinate auf dem DE 39–42, 117, 119, 130
Z_0		Koordinatenursprung (Z-Komponente) 40, 41
Z	m	Zerstreuungskreisdurchmesser 57

Symbol	Einheit	Beschreibung
Z		Z-Koord. eines 3D-Punktes 39–42 , 130 , 134 , 161 , 162
z		homogene z -Koordinate im Kamerakoordinatensystem 131

Konstanten

Symbol	Wert	Beschreibung
c	$2,998 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum 29, 30
e	2,718281...	Die eulersche Zahl 29, 38, 115, 117
h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$	Planck'sches Wirkungsquantum 29
i		imaginäre Zahl 38
k_B	$1,3806488 \cdot 10^{-13} \text{J/K}$	Boltzmann Konstante 29, 30
π	3,141592...	Die Kreiszahl 29, 38, 86, 111, 112, 117, 121
σ	$5,67 \cdot 10^{-12} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante 30, 31

Abkürzungsverzeichnis

a-Si	amorphes Silizium	34, 104
A/D	analog/digital	105
AGC	Automatic Gain Control	105, 108
AUC	Area Under Curve	125
BT.656	Digitales Videoprotokoll zur Übertragung von unkomprimierten PAL oder NTSC Videosignalen	53, 105, 106
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor	45, 53, 105, 173
CSS3	Cascading Style Sheet Version 3 – Stylesheet-Sprache	70
DDE	Dynamic Digital Detail Enhancement	105
DE	Detektorelement	32, 177, 178, 180, 181
DIN	Deutsches Institut für Normungen	101, 143, 148–150
DJV	Deutscher Jagdverband	16
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	14, 20, 25
DoG	Difference of Gaussian	119–121, 174, 176, 178
EDV	Elektronische Datenverarbeitung	68, 73
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule	26
FN	False Negative	162, 163
FOV	Field of View – Sichtfeld einer Kamera	36, 37, 55, 57, 71, 75, 88, 103, 149
FP	False Positive	162, 163
FPA	Focal Plane Array – Bildebene einer Thermal-kamera	33, 35, 38, 39, 55, 56, 96, 104, 105, 111, 114, 115, 143, 173
FPR	False Positive Rate	162, 163

GDAL	Geospatial Data Abstraction Library	72
GIS	Geoinformationssystem	72, 73
GPS	Global Positioning System	24, 41, 46, 47, 51, 52, 60, 61, 67, 68, 73, 74, 78, 88, 124, 129, 133–136, 138, 141, 142, 154, 155, 175
GPX	GPS Exchange Format	73
ha	Hektar (1 ha = 100 m ²)	62, 79
HAFL	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften	26
HTL	Höhere Technische Lehranstalt	24, 25, 173
HTML5	Hypertext Markup Language – Auszeichnungssprache	70
IFOV	Instantaneous Field of View – Sichtfeld eines Sensorelements	36, 38, 59, 146–148, 150, 175
IMU	Inertial Measurement Unit	129, 133–135, 158
IR	Infrarot	24, 34, 108
JSON	JavaScript Object Notation	69
LCD	Liquid Crystal Display	42
LoG	Laplacian of Gaussian	119, 120
LSF	Line Spread Function	38
LUT	Lookup Table	117
LVDS	Low Voltage Differential Signaling	53, 59, 105, 106
LWIR	Long Wave Infrared	29
MAV	Micro Aerial Vehicle	57, 59
MIR	Mittleres Infrarot	29
MTF	Modulation Transfer Function – Modulationsübertragungsfunktion	38, 100
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference – Rauschäquivalente Temperaturdifferenz	54
NTSC	National Television System Committee – Amerikanisches Pendant zu PAL	53, 54, 105, 184
NUC	Nonuniformity Correction	105–107

OGC	Open Geospatial Consortium – Konsortium, das Geodatenstandards entwickelt	70
OpenCV	Programmbibliothek für Bildverarbeitung	72
PAL	Phase Alternating Line – Verfahren zur Farbübertragung beim analogem Video	53, 54, 105, 184, 185
PCI	Peripheral Component Interconnect	59
PET	Polyethylenterephthalat	25
PR	Precision Recall	124
Proj4	Programmbibliothek für die Umrechnung von Kartenprojektionen	72
Pub/Sub	Publish/Subscribe	69, 70
PVC	Polyvinylchlorid	143, 148
QGIS	Freies GIS-Programm zum betrachten und bearbeiten von räumlichen Daten	73
Qt4	Programmbibliothek für die Programmierung grafischer Benutzeroberflächen	67, 72
RPC	Remote Procedure Calls	69, 70
SD	Secure Digital Memory Card	101
SIFT	Scale-invariant feature transform	124
SSF	Slit Spread Function	102, 103
STS	Schweizer Tierschutz	25, 26
SWIR	Short Wave Infrared	29
TL	Timelapse	62, 63, 76, 77, 79
TMS	Tile Mapping Service – bietet digitale Karten in Kacheln an	70
TN	True Negative	162, 163
TP	True Positive	162, 163
TSP	Travelling Salesman Problem	62
UAS	Unmanned Aerial System	43, 131

UAV	Unmanned Aerial Vehicle	5, 6, 14, 15, 25, 26, 43–45, 47, 49, 51, 61, 66–70, 77–79, 81, 86, 97–99, 104, 113, 129, 131–136, 138–142, 156–159, 181
USB	Universal Serial Bus	59
UTM	Universal Transverse Mercator	133
UV	Ultraviolettstrahlung	143
VO _x	Vanadiumoxid	34, 104
WGS84	World Geodetic Systems 1984	133, 141
WLAN	Wireless Local Area Network	70
WMS	Web Mapping Service – bietet digitale Karten an	70
WP	Waypoint	62, 63, 67, 75–77, 79
XML	Extensible Markup Language	69