

Rehkitzrettung

Einsatz eines UAV mit Thermalkamera zur Ortung von Wildtieren



Verfasser

Daniel Bäni
Kornfeldweg 1
5400 Baden
baenid@ethz.ch

Leitung

Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand

Betreuung

Pascal Theiler
Dr. Henri Eisenbeiss

Dankeswort

Allen, die zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben, möchte ich herzlich danken:

- Pascal Theiler und Dr. Henri Eisenbeiss für die unkonventionelle und herausfordernde Aufgabenstellung, die unkomplizierte, flexible Betreuung sowie die gewährten Freiheiten bei der Realisierung der vorliegenden Masterarbeit,
- den Mitarbeitern von Ascending Technologies, allen voran Daniel Gurdan, für die geduldige Unterstützung bei technischen Detailfragen sowie die rasche und kooperative Umsetzung von gewünschten Softwareanpassungen,
- meinen Mitstudenten der Geomatik und Planung für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei Feldeinsätzen und anregende Diskussionen fachlichen wie auch sozialen Inhaltes,
- meinem privaten Umfeld für die Unterstützung während des gesamten Studiums sowie für Verständnis und aufmunternde Worte in Zeiten erhöhter Arbeitsbelastung.

Zusammenfassung

Jährlich werden in der Schweiz ca. 2'000 Rehkitze durch Mähmaschinen getötet. Bisherige Methoden der Rehkitzrettung sind ineffizient und werden nicht flächendeckend angewandt. In einem neuen Ansatz werden im hohen Gras verborgene Rehkitze mittels eines Unmanned Aerial Vehicle (UAV) mit daran montierter Thermalkamera aus der Luft detektiert. Aus Bildkoordinaten des Rehkitzes und Positions- sowie Lagedaten des autonom gesteuerten UAVs werden unter Verwendung eines Geländemodells die übergeordneten Koordinaten des detektierten Punktes bestimmt. Die Auswertung der während des Fluges aufgenommenen Bildfolge ergibt eine dreidimensionale Punktwolke aller als mögliche Rehkitze klassifizierter Punkte. Mittels Verfahren der Clusteranalyse werden Fehldetektionen aus der Punktwolke entfernt und Punktansammlungen, die jeweils ein Rehkitz repräsentieren, zusammengefasst. Die Mediankoordinaten aller Cluster werden für die Suche und Bergung im Feld auf ein GNSS-Handgerät übertragen. Durch die Aufnahme eines Passpunktfeldes und einen Vergleich mit Sollkoordinaten konnte für die berechneten Positionen eine mittlere Lageabweichung (Root Mean Square Error) von 1.81 m ermittelt werden.

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Ziele und Vorgehen	1
1.3 Aufbau des Berichts	2
2 Ausgangslage	3
2.1 Rehkitzrettung	3
2.2 Thermalbilder	7
2.3 Unmanned Aerial Vehicles	12
3 Entwicklung eines Systems zur Rehkitzortung	17
3.1 Grundidee und Datenfluss	17
3.2 Videodigitalisierung	20
3.3 Synchronisierung von Bild- und Lagedaten	26
3.4 Detektion von Rehkitzen in Thermalbildern	30
3.5 Positionsbestimmung	33
3.6 Clusteranalyse und Datenexport	38
3.7 Genauigkeitsbetrachtungen	40
4 Resultate	43
4.1 Matlabanwendungen	43
4.2 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen	50
5 Fazit	57
5.1 Zusammenfassung	57
5.2 Diskussion der Resultate und des entwickelten Systems	58
5.3 Ausblick	60
Literatur und Quellen	61
Inhaltsübersicht CD	64

Abbildungen

Abbildung 1: Rehkitz in Drückstellung [Torsten Rempt / pixelio.de]	3
Abbildung 2: Infrarot-Wildretter im Einsatz [Nicole Berger]	6
Abbildung 3: Plancksche Strahlungsspektren für verschiedene Temperaturen	8
Abbildung 4: Beispiele von Thermalbildern	10
Abbildung 5: FLIR Tau 640 mit VPC Modul	11
Abbildung 6: AscTec Falcon 8 mit FLIR Tau 640	13
Abbildung 7: Mobile Bodenstation	13
Abbildung 8: Kamerahalterung des Falcon 8 mit FLIR Tau 640 und beschrifteten Drehachsen	15
Abbildung 9: Flugplanung mit Wegpunktmatrix in AscTec AutoPilot [Orthofoto: Google Earth]	16
Abbildung 10: Ablauf der Rehkitzrettung	17
Abbildung 11: Sichtstrahl und Geländemodell	17
Abbildung 12: Datenfluss der Bilddaten	18
Abbildung 13: Kameraschwenk in Videobild und Posellog	27
Abbildung 14: Erkennung von Dropped Frames	29
Abbildung 15: Schritte des Detektionsalgorithmus für Rehkitze	32
Abbildung 16: Körpersystem des Oktokopters und Eulerwinkel	34
Abbildung 17: Kamerasystem und Bildsystem	35
Abbildung 18: Übersicht Koordinatensysteme und Transformationsfunktionen	36
Abbildung 19: Beispiel Clusteranalyse mit DBSCAN ($k=5$, $\epsilon=10$)	39
Abbildung 20: Rehkitzrettung - Videoaufzeichnung	44
Abbildung 21: Rehkitzrettung - Hauptprogramm nach Programmstart	45
Abbildung 22: Rehkitzrettung - Hauptprogramm nach Durchführung sämtlicher Arbeitsschritte ..	45
Abbildung 23: Rehkitzrettung - Geländeapproximation	46
Abbildung 24: Rehkitzrettung - Synchronisierung	47
Abbildung 25: Rehkitzrettung - Video und Detektion	48
Abbildung 26: Wartebalken zu GUI Clusteranalyse und Wegpunktexport	49
Abbildung 27: Rehkitzrettung - Clusteranalyse und Wegpunktexport	49
Abbildung 28: Geländepunkte im Testgebiet	51
Abbildung 29: Testgebiet, Aluplatten und Flugpfad [Orthofoto: Google Earth]	51
Abbildung 30: Cluster der Rehkitzkandidaten, Mediankoordinaten und Flugpfad	54
Abbildung 31: Vergleich der Koordinaten aus GPS 1200, Flug 1 und Flug 2	55

Tabellen

Tabelle 1: Zusammenstellung technischer Daten FLIR Tau 640 [Tau 640 Manual, 2010]	11
Tabelle 2: Zusammenstellung technischer Daten AscTec Falcon 8 [Falcon 8 Flyer, 2010]	13
Tabelle 3: Übersicht Framegrabber	21
Tabelle 4: Übersicht verwendeter Koordinatensysteme	33
Tabelle 5: Root Mean Square Error der approximierten Geländeoberflächen	52
Tabelle 6: Genauigkeit der Positionsbestimmung in der Lage	56
Tabelle 7: Potentielle Genauigkeit der Positionsbestimmung ohne systematische Fehler	56

Abkürzungen

AscTec	<i>Ascending Technologies GmbH</i> . Hersteller des Oktokopters Falcon 8
AVI	<i>Audio Video Interleave</i> . Video-Containerformat
BAFU	<i>Bundesamt für Umwelt</i>
BFH-TI	<i>Berner Fachhochschule Departement Technik und Informatik</i>
CEP	<i>Circular Error Probable</i> . Radius eines Kreises, in dem 50 % der Messwerte einer zweidimensional normalverteilten Grösse liegen
CSV	<i>Comma Separated Values</i> oder <i>Character Seperated Values</i> . Dateiformat zur Speicherung einfach strukturierter Daten als Textdatei
DBSCAN	<i>Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise</i> . Data Mining-Algorithmus zur Clusteranalyse
DTM-AV	<i>Digitales Terrainmodell Amtliche Vermessung</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i> . Europäischer SBAS-Service
ETH	<i>Eidgenössische Technische Hochschule</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i> . Amerikanisches Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)
GPX	<i>GPS Exchange Format</i> . XML-basiertes Dateiformat zur Speicherung von Geodaten
GNSS	<i>Globales Navigationssatellitensystem</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> . Trägheitsnavigationssensor. Synonym verwendet: INS
INS	<i>Inertiales Navigationssystem</i> . Trägheitsnavigationssystem. Synonym verwendet: IMU
Lidar	<i>Light detection and ranging</i> . Methode zur optischen Distanzmessung mittels Laser.
MCX	<i>Miniature CoaX</i> . Minikoaxialstecker. Koaxialer Steckverbinder

NTSC	<i>National Television Systems Committee</i> . Als Abkürzung vor allem verwendet für das durch diese Institution definierte amerikanische Farbübertragungssystem für analoge Fernsehsignale
PAL	<i>Phase Alternating Line</i> . Farbübertragungssystem für analoge Fernsehsignale
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> . Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i> . Ergänzendes Satellitennavigationssystem. Sendet Korrekturdaten für andere Globale Navigationssatellitensysteme
SD	<i>Secure Digital Memory Card</i> . Digitale Flash-Speicherkarte
SHL	<i>Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> . Unbemanntes Flugobjekt. Oft synonym verwendet: Drohne
USB	<i>Universal Serial Bus</i> . Serielles Bussystem zur Verbindung von Computer und Peripheriegeräten
URL	<i>Uniform Resource Locator</i> . Internetadresse
VOx	<i>Vanadium Oxid</i> . Detektormaterial für Mikrobolometerarrays von Thermalbildsensoren
VPC	<i>Video, Power, Communication</i>
WGS 84	<i>World Geodetic System 1984</i> . Weltumspannendes Geodätisches Referenzsystem, definiert im Jahr 1984
YUV	Farbmodell für analoges Farbfernsehen. Verwendet einen Kanal für Luminanz (Y) sowie zwei Unterkanäle für Chrominanz (U und V). Bezeichnung der Kanäle ist willkürlich, keine Abkürzung

1 Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund

Rehkitze werden von ihren Muttertieren in den ersten Lebenswochen mit Vorliebe in hohem Gras abgesetzt. Sie verstecken sich selbständig und sind gegen Raubtiere durch die natürliche Tarnung ihres Fells sowie den fehlenden Eigengeruch bestens geschützt. Die Geburtszeit im Frühsommer ist aber auch die Zeit der ersten Grasernte, und das fehlende Fluchtverhalten kann den Rehkitzen schnell zum Verhängnis werden. Jährlich werden in der Schweiz ungefähr 2'000 Rehkitze bei der Grasernte durch Mähmaschinen verstümmelt und verenden auf grausame Weise.

Die bisher praktizierten Methoden zum Vertreiben oder Aufspüren und Retten von Wildtieren sind für die moderne, auf hohe Arbeitsgeschwindigkeit ausgelegte Landwirtschaft zu wenig effizient. In Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) und der Berner Fachhochschule Departement Technik und Informatik (BFH-TI) sollen in einer Machbarkeitsstudie Wege aufgezeigt werden, die Effizienz der Rehkitzrettung zu erhöhen. Das Projekt wird vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterstützt. Die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) ist für das Teilprojekt «Ortung im Feld» verantwortlich.

1.2 Ziele und Vorgehen

Erste Untersuchungen haben ergeben, dass die Ortung von Rehkitzen aus der Luft unter Einsatz einer Thermalkamera vielversprechende Ergebnisse liefert. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Masterarbeit weiterverfolgt. Ziel ist die Entwicklung und Umsetzung eines Arbeitsablaufs bzw. Systems zur Rehkitzortung mittels Unmanned Aerial Vehicle (UAV) und daran montierter Thermal-kamera.

Das zu erarbeitende System soll folgende Aspekte und Arbeitsschritte berücksichtigen:

- Datenaufnahme: Erfassung von Thermalbildern aus der Luft
- Datenauswertung: Erkennung des Rehkitzes in Thermalbildern
- Lokalisierung: Positionsbestimmung des Rehkitzes in übergeordneten Koordinaten
- Positionsübertragung: Übertragung der Positionsdaten auf GNSS-Handgerät

Die praktische Umsetzung dieser Arbeitsschritte erfolgt mittels neu zu erstellender Matlabprogramme. Deren Funktionstüchtigkeit wie auch die letztlich erreichte Positionsgenauigkeit wird in praxisnahen Tests auf die Probe gestellt. Angestrebt wird eine Ortungsgenauigkeit im Feld von 2m (1σ). Fehldetektionen müssen weitgehend ausgeschlossen werden.

1.3 Aufbau des Berichts

In Kapitel 2 des vorliegenden Berichts wird die thematische und technische Ausgangslage dieser stark interdisziplinär geprägten Arbeit erläutert. Zum einen wird auf die Problematik der Rehkitzrettung und die heute dabei eingesetzten Methoden eingegangen, andererseits werden die technischen Hintergründe und Eigenschaften des verwendeten Materials – Thermalkamera und UAV – beschrieben.

In Kapitel 3 wird vorgestellt, wie ein System zur Rehkitzrettung mittels UAV und Thermalkamera aufgebaut werden kann, wie sich die notwendigen Arbeitsschritte auf Basis der erwähnten Instrumente konkret umsetzen lassen, welche technischen Schwierigkeiten dabei ausgemacht wurden und wie diese gelöst werden können. Ferner werden die zu erwartenden, teilweise korrigierten oder auch unberücksichtigten Fehlereinflüsse auf die Rehkitzkoordinaten aufgezeigt.

Kapitel 4 präsentiert als Resultate der Arbeit einerseits die in Matlab programmierten Benutzeroberflächen und dokumentiert andererseits einen Testflug zur Bestimmung der Genauigkeit des Gesamtsystems sowie eine kurze Untersuchung zur Genauigkeit der verwendeten Geländemodelle.

Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse dieses Berichtes kompakt zusammen, beurteilt die erzielten Resultate und bietet einen Ausblick auf noch zu lösende Probleme sowie die weitere Entwicklung auf dem Weg hin zum «Einsatz eines UAV mit Thermalkamera zur Ortung von Wildtieren.»

Alle im vorliegenden Bericht erwähnten, *kursivgedruckten* Matlabfunktionen und -programme wurden vollumfänglich für die vorliegende Arbeit neu erstellt.

2 Ausgangslage

2.1 Rehkitzrettung

2.1.1 Verhaltensweise von Rehkitzen und Problematik der Grasernte

Das Europäische Reh (*Capreolus capreolus*) gilt als sehr anpassungsfähig und wird aufgrund seiner Fähigkeit, in einer landwirtschaftlich geprägten Kulturlandschaft erfolgreich zu bestehen, als Kulturfolger bezeichnet. Seine geringe Scheu vor menschlichen Aktivitäten und die Überschneidung seines Lebensraums mit landwirtschaftlichen Nutzflächen führt indes zu Problemen. Schonungslos aufgezeigt wird dies etwa bei der frühlommerlichen Grasernte, die alljährlich zum tragischen Tod zahlreicher Jungtiere durch Mähmaschinen führt.

Die Jungtiere – bis zur Vollendung des ersten Lebensjahres als Kitze bezeichnet – werden von ihren Müttern – den Rehgeissen oder Ricken – nach ungefähr 41 Wochen Tragzeit grösstenteils zwischen Mitte Mai und Mitte Juni zur Welt gebracht. Aufgrund klimatischer Bedingungen sind in einzelnen Fällen Abweichungen des Setzzeitpunktes von mehreren Wochen möglich. Meist setzt eine Rehgeiss ein oder zwei, seltener bis zu vier Kitze mit einem Geburtsgewicht zwischen 1'200 und 2'300g. In der sieben- bis zehnwöchigen Säugezeit beträgt die tägliche Gewichtszunahme zwischen 75 und 200g.



Abbildung 1: Rehkitz in Drückstellung [Torsten Rempt / pixelio.de]

Obschon Rehkitze bereits wenige Stunden nach der Geburt gehen können, verbringen sie die ersten Lebenswochen meist getrennt von ihrer Mutter, wie in Abbildung 1 gezeigt, in eingerollter Bauchlage versteckt am Boden liegend. Die Rehgeiss bringt ihre Kitze dazu in ein Gebiet mit ausreichender Deckung, etwa eine hohe Wiese, und hält sich selbst stets in Rufdistanz zu ihren versteckten Jungen auf. Sechs- bis siebenmal täglich verlangen die durstigen Kitze mit leisen Fieplauten nach der Rehgeiss. Diese sucht ihre Jungen, säugt und säubert sie. Anschliessend verstecken sich die Rehkitze selbständig wieder im hohen Gras. Hat eine Rehgeiss mehrere Kitze, suchen sich diese getrennt voneinander in mehreren Dutzend Metern Distanz eine Liegestelle. Das Aufsuchen von Deckung und Niederlegen nach dem Säugen beherrschen Rehkitze instinktiv ab ihrem ersten Lebenstag.

Die beschriebenen Verhaltensweisen dienen der effizienten Feindvermeidung und schützen gleichzeitig vor unnötigen Energieverlusten durch Fluchten. Da Rehkitze in den ersten Lebenswochen so gut wie keinen Eigengeruch haben und zudem durch ihr bräunliches Fell mit weissen Tupfern optisch bestens getarnt sind, bleiben sie im hohen Gras gut vor Fressfeinden geschützt. Bei Gefahr – wahrgenommen in Form von Bewegungen, Lärm oder fremden Gerüchen – zeigen Rehkitze bis zu einem Alter von drei bis acht Wochen entsprechend kein Fluchtverhalten, sondern das sogenannte Drückverhalten. Sie bleiben selbst vor herannahenden Mähmaschinen regungslos und geduckt in Deckung liegen. Erst bei grösster Gefahr wie der Berührung durch Menschen oder Verletzung durch Maschinen reagieren Kitze mit schrillen, über 100 m weit hörbaren Fieplauten und alarmieren so ihre Mutter. [Kurt, 1991]

Für die Fahrer moderner Mähmaschinen mit Fahrgeschwindigkeiten bis zu 20 km/h sind Rehkitze unter den gegebenen Voraussetzungen in aller Regel unsichtbar. Selbst das Vermähen eines Rehkitzes ist für den Landmaschinenführer kaum vom belanglosen Durchfahren eines Maulwurfshügels zu unterscheiden.

Im vergangenen Jahrzehnt wurden gemäss Eidgenössischer Jagdstatistik [URL: Jagdstatistik] in der Schweiz jährlich 1'000 bis 3'000 Rehe durch landwirtschaftliche Maschinen getötet – die Dunkelziffer dürfte höher liegen. Obwohl diese Verluste bei einem Gesamtbestand um 120'000 Rehen und jährlich etwa 40'000 Jagdabschüssen sowie 8'000 im Strassenverkehr getöteten Tieren geringfügig ins Gewicht fallen, sind sie doch ein ernstzunehmendes Problem. Einerseits sollte aus moralischen Gründen das bei Mensch und Tier durch das Vermähen eines Kitzes verursachte Leid verhindert werden. Andererseits stellen die Überreste vermählter Kitze eine gewisse wirtschaftliche Gefahr dar, sofern sie unbemerkt ins Viehfutter gelangen. Der im Kadaver von Bakterien gebildete Stoff Botulinumtoxin kann bei Kühen zu einer Vergiftung – Botulismus genannt – führen, deren Folge ein schleichender Leistungsabfall oder letztlich gar der Tod ganzer Herden sein kann [Israel, 2010].

2.1.2 Bestehende Ansätze zur Rehkitzrettung

Die Verordnung über den Wildtierschutz des Kantons Bern [WTSchV, 2003] besagt in Art. 1 Abs. 1: «Bei Arbeiten, Freizeitaktivitäten und Veranstaltungen sowie bei der Planung, der Errichtung oder dem Betrieb von Bauten und Anlagen ist jedermann verpflichtet, auf die Bedürfnisse der betroffenen Wildtiere gebührend Rücksicht zu nehmen und sie vor vermeidbaren Störungen, vor Verletzung oder vor Tötung zu bewahren.» Ähnliche Artikel sind in zahlreichen kantonalen Gesetzen zu finden. Aus ihnen lässt sich ableiten, dass zum Schutz der Rehkitze vor dem Mähtod geeignete, verhältnismässige Massnahmen getroffen werden müssen. Heute sind folgende Massnahmen oder Verfahren gängig, die hier kurz vorgestellt werden sollen [Schneider, 2007]:

- Verblenden mit Wildscheuchen
- Manuelle Suche und Rettung
- Suche mit Infrarot-Wildretter und Rettung

Beim sogenannten Verblenden werden am Vortag der Grasernte diverse Objekte im Feld platziert, die Rehgeissen stören und mitsamt dem Nachwuchs vertreiben sollen. Zum Einsatz kommen etwa blinkende Baustellenlampen, piepsende Lärmquellen, Radiogeräte, Fahnen aus Bettlaken oder Müllsäcken, Luftballons, abschreckende Duftstoffe oder klimpernde und glänzende Metallstreifen an langen Stangen. Die Installation dieser Objekte wird meist von Jägern vorgenommen, die von den Landwirten spätestens einen Tag vor dem Mähen aufgeboten werden müssen. Das längerfristige Verblenden eines Feldes ist nicht möglich, da sich die anpassungsfähigen Rehe schnell an die fremden Objekte gewöhnen. [Riedel, 2004]

Ist das Verblenden aus zeitlichen oder organisatorischen Gründen nicht möglich, kann das Feld unmittelbar vor dem Mähen manuell abgesucht werden. Dazu sind entweder speziell ausgebildete Jagdhunde oder aber eine grössere Personengruppe notwendig, die das Feld in dichten Reihen abschreitet und nach Kitzen Ausschau hält. Gefundene Kitze müssen in Sicherheit gebracht werden. Die Meinungen darüber, wie dies zu erfolgen hat, gehen auseinander. Möglich ist ein Festhalten der Rehkitze in Holzkisten an Ort und Stelle unter Aussparung einer Grasinsel bei der Mahd, ein Transport an den Feldrand oder zu einer geschützten Stelle im Wald. Auf jeden Fall muss sichergestellt werden, dass die Rehkitze während des Mähens nicht zurück aufs Feld laufen können und während einer allfälligen «Schutzhaft» in einer Holzkiste vor Fressfeinden geschützt sind [Schneider, 2007]. Alternativ besteht nach dem Abtransport der Rehkitze aus dem Feld die Möglichkeit, deren Mutter durch imitierte Alarmrufe anzulocken, damit sie sich ihres Nachwuchses annimmt. Zu beachten ist beim Kontakt mit Rehkitzen ferner, dass diese insbesondere in den ersten Lebenstagen keine Fremdgerüche annehmen dürfen, da sie ansonsten von ihrer Mutter nicht mehr angenommen werden könnten [Riedel, 2004].

Der manuellen Suche ähnlich ist die Suche mittels Infrarot-Wildretter. Die Spürnase der Jagdhunde oder die Augen eines menschlichen Suchtrupps werden dabei durch zehn Infrarotdetektoren ersetzt. Diese sind an einem fünfeinhalb Meter langen, horizontalen Teleskopbalken aus Aluminium montiert. Das Gerät mit einem Gesamtgewicht von 5kg wird – befestigt an einem Schulterriemen – wie in Abbildung 2 gezeigt von einer Person über das Feld getragen. Die batteriebetriebenen Infrarotsensoren registrieren die gegenüber dem Untergrund erhöhte Wärmestrahlung eines Rehkitzes und alarmieren den Träger akustisch. Entdeckte Rehkitze werden wie bereits bei der manuellen Suche erläutert behandelt. [URL: Wildretter]



Abbildung 2: Infrarot-Wildretter im Einsatz [Nicole Berger]

2.1.3 Schwachpunkte bestehender Ansätze

Alle vorgestellten Ansätze zur Rehkitzrettung werden in der Praxis mehr oder weniger erfolgreich eingesetzt. Systematisch erfasste Zahlen zu Erfolgsraten aller Methoden liegen indes nicht vor, weshalb an dieser Stelle nur auf Schwachpunkte technischer und organisatorischer Art eingegangen werden kann.

Wesentliche Kritikpunkte an der Verblendungsmethode sind die mangelnde Flexibilität und der grosse Aufwand. Der stark vom Wetter und der Auslastung der Mähmaschinen abhängige Mähzeitpunkt muss bereits am Vortag bekannt sein und später eingehalten werden, um die Verblendungsmassnahmen erfolgreich umsetzen zu können. Kontrovers diskutiert wird auch, ob die Tiere durch Verblendungsmassnahmen nicht bloss von einem Feld ins nächste – nicht verblendete – Feld getrieben werden, wo sie bei der Mahd letztlich dasselbe tödliche Schicksal ereilt.

Die Effektivität des Einsatzes von Jagdhunden ist angesichts der fehlenden Eigenwitterung der Rehkitze umstritten. Eine Personengruppe auf der Suche nach Rehkitzen kann die bestens getarnten Tiere übersehen. Zudem wird von manchen Landwirten äusserst ungern gesehen, dass

eine grössere Personengruppe das zu mähende Gras niedertrampelt, obschon moderne Mähmaschinen liegendes Gras ohne grössere Verluste ernten können. Vor allem aber ist das rasche Aufbieten einer grösseren Suchtruppe oder der Einsatz von Jägern mit dafür ausgebildeten Hunden eine logistische Herausforderung, die nur in Einzelfällen und bei grossem persönlichem Einsatz der Beteiligten zu meistern ist. [Riedel, 2004] [Schneider, 2007]

Der rund 2'500 Franken teure Infrarot-Wildretter versucht, die Nachteile der manuellen Suche durch Technologie aufzuwiegen. Diese ist keineswegs unfehlbar. Probleme bestehen insbesondere an sonnigen Tagen ab den späteren Morgenstunden, wenn durch die Sonneneinstrahlung grössere Blätter, Steine, Maulwurfshügel, kahle Stellen und totes Pflanzenmaterial aufgeheizt werden und zu zeitraubenden Fehlalarmen führen. Dieses Problem kann durch geschickte manuelle Regelung der Detektionsempfindlichkeit reduziert werden – was aber einiges an Übung erfordert. Die Suchleistung eines Infrarot-Wildretters ist mit 3 ha/h höher als bei der manuellen Suche, steht aber nach wie vor in keinem Verhältnis zur heutig verfügbaren Mähleistung und entspricht damit nicht den Praxisanforderungen. [Israel, 2010]

Eine logische Weiterentwicklung des Infrarot-Wildretters wäre dessen Befestigung direkt am Mähwerk, um während des Mähens den jeweils nächsten Streifen nach Kitzen absuchen zu können. Die grosse Zahl von Fehlalarmen verhindert aber einen solchen Einsatz – würde doch der auf Effizienz ausgerichtete Mähvorgang bei jedem (Fehl-)Alarm unterbrochen. Im Rahmen eines Verbundprojekts [Verbundprojekt, 2010] versuchen Wissenschaftler und Ingenieure verschiedener deutscher Institutionen, die Zuverlässigkeit eines solchen Systems durch Hinzunahme weiterer Sensoren zu erhöhen. Dabei hat sich bereits ergeben, dass bildgebende Verfahren für ein solches System kaum in Frage kommen. Die hohen Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitig geringer Montagehöhe der Sensoren sowie die Vibrationen des Auslegerarms verursachen unscharfe Bilder. Versuche mit mechanischen Kameranachführungssystemen zur Behebung dieses Defizits lieferten zu wenig erfolgversprechende Resultate. Weiterverfolgt werden soll der Einsatz von Einzelsensoren (Infrarotdetektoren, Laserdistanzmesser und Mikrowellensensoren) an einem Auslegerarm. [Israel, 2010]

2.2 Thermalbilder

2.2.1 Strahlungsgesetz und Interpretation von Thermalbildern

Ein schwarzer Körper ist in der Physik ein idealisiertes Objekt, das auftreffende Strahlung jeglicher Wellenlänge vollständig absorbiert und gleichzeitig elektromagnetische Strahlung in einem charakteristischen, nur von seiner Temperatur abhängigen Spektrum aussendet. Die Form dieses Spektrums ist durch das Plancksche Strahlungsgesetz gegeben. Abbildung 3 zeigt eine Auswahl von

Strahlungsspektren von 293°K (20°C, Raumtemperatur) bis 5800°K (Temperatur der Sonne) in doppellogarithmischer Darstellung. Das jeweilige Maximum der Strahlungsspektren verschiebt sich mit höheren Temperaturen zu kürzeren Wellenlängen. Seine Lage kann aus dem Planckschen Strahlungsgesetz abgeleitet oder durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben werden. Im Fall der Sonne liegt das Strahlungsmaximum im Bereich des sichtbaren Lichts – für einen Körper mit Raumtemperatur dagegen bei etwa 10 μm , im Bereich des langwelligen Infrarots. Die spektrale Empfindlichkeit eines Sensors zur Erfassung thermischer Emissionen muss an den zu erfassenden Temperaturbereich angepasst sein. Idealerweise nimmt ein Sensor Strahlung im Wellenlängenbereich des für die zu messende Temperatur maximalen Emissionsvermögens auf.

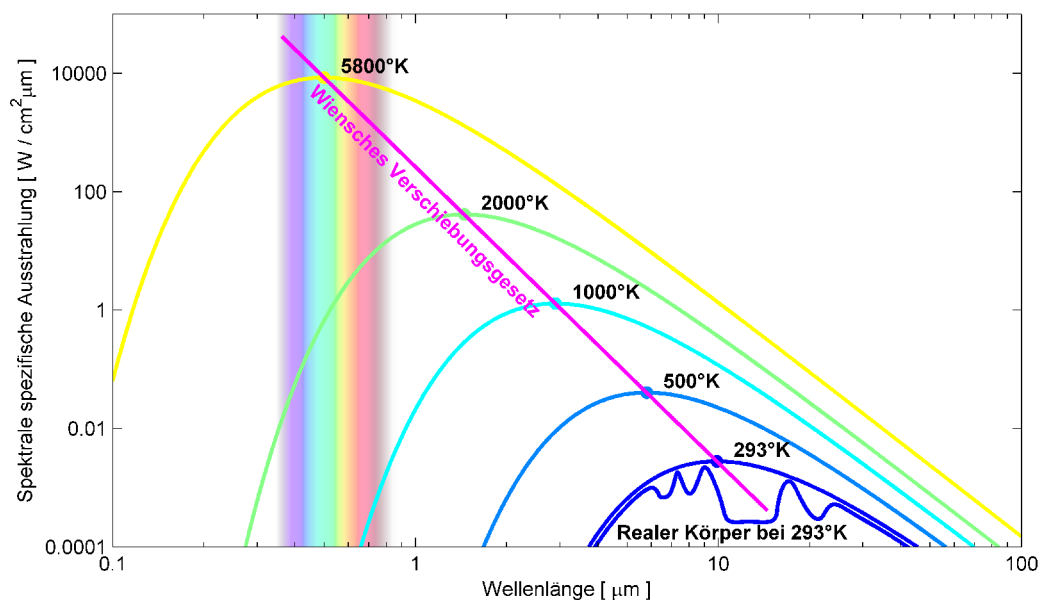


Abbildung 3: Plancksche Strahlungsspektren für verschiedene Temperaturen

Nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz ist das wellenlängenabhängige Emissionsvermögen eines Körpers für thermische Strahlung proportional zu dessen Absorptionsvermögen. Das Absorptionsvermögen eines schwarzen Körpers nimmt bei jeder Wellenlänge den grösstmöglichen Wert an. Daher kann ein realer Körper bei keiner Wellenlänge mehr thermische Strahlung aussenden als ein schwarzer Körper, jedoch, wie in Abbildung 3 unten rechts beispielhaft eingezeichnet, durchaus weniger. Reale Körper sind in aller Regel selektive Strahler – ihre Ausstrahlung bei einer gewissen Wellenlänge beträgt einen Bruchteil des Wertes eines schwarzen Körpers. Das wellenlängenabhängige Verhältnis der Ausstrahlung eines realen Körpers zur theoretischen Ausstrahlung eines schwarzen Körpers wird Emissionsgrad $\epsilon(\lambda)$ genannt und ist gemäss Kirchhoffschem Strahlungsgesetz im Fall des thermischen Gleichgewichts, wenn sich also Einstrahlung und Abstrahlung die Waage halten, gleich dem Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$.

Während ein schwarzer Körper sämtliche auftreffende Strahlung absorbiert, kann ein realer Körper einen Teil der auf ihn wirkenden Strahlung reflektieren oder transmittieren. Wird der Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ als Verhältnis der reflektierten Strahlung zur Einstrahlung einer bestimmten Wellenlänge und der Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ als Verhältnis der transmittierten Strahlung zur Einstrahlung einer bestimmten Wellenlänge definiert, muss gelten:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Mit $\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$ folgt daraus im Fall des thermischen Gleichgewichts :

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Die meisten natürlich vorkommenden Materialien sind thermal opak. Für sie gilt vereinfacht:

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

Daraus lässt sich schliessen, dass der Emissionsgrad eines Objektes bekannt sein muss, um aus der von ihm empfangenen Strahlung tatsächlich seine Temperatur ableiten zu können und dass es äusserst schwierig ist, die Temperatur eines thermal stark reflektierenden Körpers durch Strahlungsmessungen zu bestimmen. [Lillesand et al., 2008]

Abbildung 4 zeigt Beispiele von Thermalbildern, anhand derer die eben diskutierten Eigenschaften eindrücklich demonstriert werden können:

- Abbildung 4 o.l.: Blick auf die Stadt Zürich und den Üetliberg. Sonnenbeschienene Fassadenteile erscheinen heller, bzw. wärmer. «Schatten» von Bäumen sind im Thermalbild als kühlere Stellen am Boden auszumachen. Der kalte Himmel erscheint schwarz.
- Abbildung 4 o.r.: Kuhherde und Kuhfladen. Tiere und ihre frischen Ausscheidungen heben sich bei nasskaltem Wetter deutlich vom kühleren Wiesenuntergrund ab.
- Abbildung 4 u.l.: Runde Aluplatte mit aufgeklebtem Ring aus (optisch) schwarzer Klebefolie und Bettflasche in Wiese. Die Aluminiumoberfläche am Rand und im Zentrum der Platte hat einen sehr tiefen Emissionsgrad und reflektiert hauptsächlich den kalten Himmel, erscheint also schwarz. Die restlichen Objekte im Bild, inklusive Klebefolie, haben hohe Emissionsgrade – von ihnen wird hauptsächlich emittierte Strahlung erfasst. Verglichen mit dem grossen Temperaturunterschied zum kalten Himmel weisen die restlichen Objekte untereinander geringe Temperaturdifferenzen aus und erscheinen deshalb in einem einheitlichen Grau. Die etwas wärmere Bettflasche hebt sich schwach vom Untergrund ab.
- Abbildung 4 u.r.: Kunststoffplane auf Wiese. Die im optischen Spektralbereich opake, für das menschliche Auge blaue Plane ist im langwelligen Infrarotbereich durchsichtig – das darunterliegende Gras ist zu erkennen.

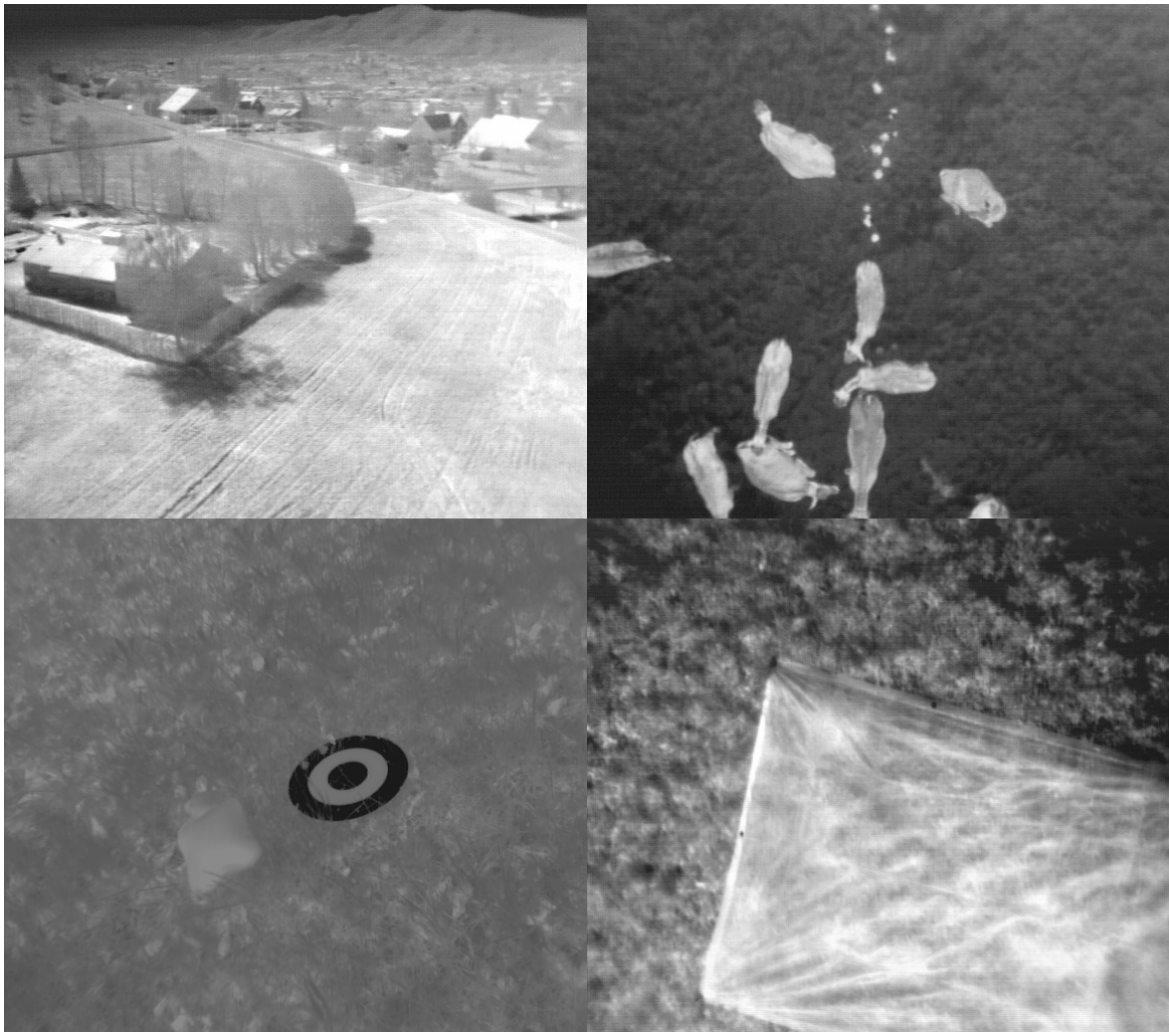


Abbildung 4: Beispiele von Thermalbildern

2.2.2 Thermalkamera «FLIR Tau 640»

In der vorliegenden Arbeit wird eine Thermalkamera vom Typ «Tau 640» des amerikanischen Herstellers «FLIR» verwendet. Hierbei handelt es sich nicht – wie etwa bei Endbenutzer-Thermalkamera üblich – um ein Gerät für den Hand- oder Stativbetrieb mit integrierter Bedieneinheit, Speichermöglichkeit und Stromversorgung, sondern um einen sogenannten «Kamerakern». Dieser ist nicht für die autonome Anwendung, sondern zur Integration in grössere Systeme wie Maschinen, Fahr- und Flugzeuge oder Handgeräte aller Art vorgesehen. Durch die Reduktion der Kamera auf den eigentlichen, für Thermalaufnahmen notwendigen Kamerakern, ergeben sich Gewichtseinsparungen sowie grösstmögliche Freiheiten für die Gestaltung eigener Systeme. Im Gegenzug müssen Stromversorgung, Datenspeicherung und Steuerung der Kamera zwingend durch kameraexterne Komponenten realisiert werden. Abbildung 5 zeigt die Tau 640 in Front- und Rückansicht.



Abbildung 5: FLIR Tau 640 mit VPC Modul

In Tabelle 1 sind alle relevanten technischen Daten der FLIR Tau 640 zusammengestellt. Zu beachten ist, dass die Kamera alleine keine herkömmlichen Schnittstellen besitzt. Sie kann durch verschiedene Zusatzmodule ergänzt werden, die standardisierte Schnittstellen bereitstellen. Sämtliche Angaben in Tabelle 1 beziehen sich auf die Verwendung der Thermalkamera zusammen mit dem in dieser Arbeit genutzten, einfachsten und preiswertesten Zusatzmodul, dem sogenannten «VPC-Breakout-Module» (VPC = Video, Power, Communication). Die Kamera ist nach Anlegen der Versorgungsspannung innert drei Sekunden betriebsbereit und liefert Videodaten, bis die Stromversorgung wieder unterbrochen wird.

Obschon die Kamera digitale Bildinformationen mit 14 bit Farbtiefe erzeugt und über digitale Schnittstellen auf Zusatzmodulen ausgeben könnte, sind in dieser Konfiguration nur Analogvideos mit 8 bit Farbtiefe abgreifbar. Über die USB-Schnittstelle kann die Kamera mit dem Programm «Camera Controller GUI» angesteuert werden, um alle veränderbaren Kameraparameter zu manipulieren. Zudem können über dieses Programm einzelne digitale Schnappschüsse auf den Computer übertragen werden, was pro Bild etwa zwei Minuten dauert und deshalb für praktische Anwendungen nicht in Frage kommt.

Sensortyp:	Ungekühltes VOx Microbolometerarray mit 640 x 512 Pixel à 17 µm
Lintentyp:	Germaniumlinse, Brennweite 13 mm, Blendenzahl 1.25
Spektralbereich:	7.5 - 13.5 µm (langwelliges Infrarot)
Bildrate (PAL):	Theoretisch 25 Hz, Exportversion limitiert auf 8⅓ Hz
Schnittstellen:	Analogvideo (PAL oder NTSC) über Minikoaxialstecker (MCX) Kommunikation über USB-Mini-B-Stecker (emulierte serielle Schnittstelle)
Stromversorgung:	4.4 - 6.0 V über USB-Mini-B-Stecker, ca. 1W Leistungsaufnahme
Grösse, Gewicht:	49 x 38 x 38 mm (L x B x H), 79 g (ohne VPC Modul)

Tabelle 1: Zusammenstellung technischer Daten FLIR Tau 640 [Tau 640 Manual, 2010]

Kritisch erwähnt werden muss an dieser Stelle, dass nicht dokumentiert ist, wie selbst aus der digitalen 14 bit Bildinformation physikalische Grössen wie Ausstrahlung oder kinematische Temperatur hergeleitet werden können. Durch die Reduzierung der Farbtiefe mit verschiedenen Histogrammoperationen wird eine Ableitung physikalischer Grössen weiter verunmöglicht. Anhand des 8 bit Bildes alleine sind nur qualitative Aussagen (Objekt A hat eine grössere Ausstrahlung als Objekt B), nie aber exakte quantitative Angaben (Objekt A hat eine Temperatur von 20°C) möglich.

2.3 Unmanned Aerial Vehicles

2.3.1 Begriffsdefinition und Eigenschaften

Gemäss [van Blyenburgh, 1999] bezeichnet der Begriff «Unmanned Aerial Vehicle» oder kurz «UAV» ein nicht bemanntes, wiederverwendbares und motorisiertes Luftfahrzeug. Dieses kann durch eine Fernsteuerung gelenkt werden oder autonom navigieren und trägt Nutzlasten zur Erfüllung bestimmter Aufgaben in der Erdatmosphäre oder darüber hinaus. In dieser sehr weiten Definition sind sowohl militärische wie auch zivile Flugobjekte enthalten, die sich durch zahllose Eigenschaften wie Gewicht, Flughöhe, Flugdauer, Geschwindigkeit, Antriebstechnik, Navigationstechnik, Kommunikationstechnik, Start- und Landeverfahren sowie Nutzlast und Einsatzzweck stark unterscheiden. Der Begriff Drohne wird teilweise als allgemeines Synonym für UAVs verwendet, bezeichnet oft aber auch nur militärische Flugobjekte. In zivilen Anwendungen sind UAVs meist mit Sensoren zur Erfüllung einer Fernerkundungsaufgabe ausgerüstet.

Gegenüber bemannten Flugsystemen haben zivile UAV-Systeme meist den Vorteil, dass sie wesentlich günstiger und mit weniger Aufwand betrieben werden können. Zudem können sie sich näher an den zu erkundenden Objekten bewegen und müssen nicht zwingend von professionellen Piloten gesteuert werden. Als Nachteile sind dagegen die meist stark eingeschränkte Flugzeit und Nutzlast von UAVs zu nennen. Als Folge der nötigen Gewichtsreduktion resultiert oft eine geringere Präzision der Navigationslösungen sowie eine schlechtere geometrische Stabilität der eingesetzten Sensoren. [Eisenbeiss, 2009]

2.3.2 Oktokopter «Falcon 8»

Das UAV-System «Falcon 8» des deutschen Herstellers «Ascending Technologies» besteht aus dem gleichnamigen Flugobjekt (siehe Abbildung 6), in der Folge auch als «Falcon» oder «Oktokopter» bezeichnet, der mobilen Bodenstation auf Basis der Fernbedienung «Futaba FX-30» (siehe Abbildung 7) sowie der Steuersoftware «AscTec AutoPilot». Auf letztere beiden wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.



Abbildung 6: AscTec Falcon 8 mit FLIR Tau 640



Abbildung 7: Mobile Bodenstation

Beim Flugobjekt handelt es sich um ein Multirotorsystem mit acht elektrisch angetriebenen Rotoren, das wie ein Helikopter senkrecht startet und landet – einen sogenannten Oktokopter. Der Falcon 8 ist hauptsächlich für die Luftbildfotografie mit Kompaktkameras ausgelegt. Er ist mit einer neigungskompensierenden Kamerahalterung ausgerüstet und die V-artige Grundform gewährleistet, dass die Rotoren unabhängig von der Kamerablickrichtung nie ins Gesichtsfeld geraten. [Falcon 8 Flyer, 2010]. Eine Zusammenstellung technischer Daten ist in Tabelle 2 zu finden.

Abfluggewicht:	Maximal 1800 g, davon 200 g Kamerahalterung und 300 g freie Nutzlast
Flugdauer:	16 - 18 min bei maximaler Nutzlast
Akku:	Lithium-Polymer, 11.1 V, 8000 mAh
Operationsradius:	Empfohlen: 300 m, Höhe limitiert durch Akkukapazität
Datenaufzeichnung:	«Blackbox» auf einer SD-Karte, optionale GPS-Rohdatenaufzeichnung
Datenübertragung:	Digital, 2 getrennte Kanäle, 2.4 GHz
Videoübertragung:	Analogvideo, 5.8 GHz (Anzeige auf TFT-Monitor der mobilen Bodenstation)
Grösse:	73 x 60 x 16 cm (L x B x H)

Tabelle 2: Zusammenstellung technischer Daten AscTec Falcon 8 [Falcon 8 Flyer, 2010]

Die Zahl im Namen des Oktokopters bezieht sich auf den Rotordurchmesser von acht Zoll (20.3 cm). Je vier Rotoren sind an den zwei seitlichen Streben des Falcons montiert. Sämtliche Rotoren liegen in einer Ebene. Flugmanöver werden einzig durch die unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten der Rotoren gesteuert – Komponenten wie Leitwerke oder Heckrotoren besitzt der Falcon nicht. Dadurch ist das System mechanisch äusserst einfach aufgebaut, erfordert für die Fluglageregelung aber eine ausgeklügelte Steuerlogik, die aus der aktuellen Lage des Systems und den Steuerbefehlen des Piloten in rascher Abfolge die notwendige Geschwindigkeit für jeden einzelnen Motor errechnet. Horizontale Positionsänderungen werden durch eine gezielte Schrägstellung des

Oktokopters erreicht – die Horizontalkomponente des nach «oben» gerichteten Rotorschubs bewirkt die Bewegung in die gewünschte Horizontalrichtung. Die aktuelle Lage des Oktokopters wird durch verschiedenartige Sensoren ermittelt: [Falcon Training, 2011]

- 3 orthogonal angeordnete, lineare Beschleunigungssensoren
- 3 orthogonal angeordnete Drehratensensoren
- 3 orthogonal angeordnete Magnetfeldsensoren
- 1 barometrischer Höhensensor
- 1 GPS Empfänger (u-Blox LEA-5T)

Die Kombination aus linearen Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren wird als «Inertial Measuring Unit» (IMU) oder «Inertiales Navigationssystem» (INS) bezeichnet.

Die Messwerte dieser Sensoren werden auf dem Oktokopter selbst zusammengeführt. Die Datenfusion geschieht mit einer Updaterate von 1kHz – weiterführende Angaben zu den dabei durchgeführten Berechnungen und Filterungen werden von Ascending Technologies nicht veröffentlicht. Im Sinne einer «Blackbox» werden die aus der Datenfusion resultierenden Fluglagedaten zusammen mit weiteren Leistungsdaten des Systems, wie etwa Motordrehzahlen und Akkustand, laufend auf einer SD-Speicherkarte protokolliert.

Dem Piloten stehen drei unterschiedliche Flugmodi zur Verfügung, die sich darin unterscheiden, welche Sensordaten tatsächlich in die Datenfusion einfließen: [Falcon Training, 2011]

- GPS-Modus: Sämtliche Sensordaten werden verwendet. Der Falcon hält ohne Eingriffe des Piloten Position, Höhe und Orientierung. Windeinflüsse (bis 10 m/s) werden automatisch kompensiert.
- Höhen-Modus: GPS Position wird nicht verwendet. Der Falcon hält ohne Eingriffe des Piloten Höhe und Orientierung, nicht aber die Position. Wind lässt den Oktokopter abdriften und erfordert manuelles Gegensteuern.
- Manueller Modus: GPS Position und barometrische Höhe werden nicht verwendet. Der Falcon hält ohne Eingriffe des Piloten nur die Orientierung. Horizontalbewegungen nehmen einen Teil des Schubs in Anspruch – um die Höhe zu halten, muss der Schub in Abhängigkeit sonstiger Bewegungen manuell reguliert werden.

Der Falcon muss für horizontale Positionsänderungen oder um die Position bei Wind zu halten, wie bereits erläutert, geneigt werden. Die sich ständig ändernde Lage bzw. Neigung wäre für fotografische Aufnahmen äusserst unpraktisch. Deshalb wird die Kameranutzlast, wie in Abbildung 8

gezeigt, an einer zweiachsig neigungskompensierenden Kamerahalterung am Vorderende des Falcons befestigt. Diese gleicht mittels zweier Servomotoren kontinuierlich die Differenz zwischen der vom Piloten gewünschten Kamerablickrichtung (Roll- und Pitch-Winkel) und der aktuellen Lage des Oktokopters – ermittelt in der Sensordatenfusion – aus.

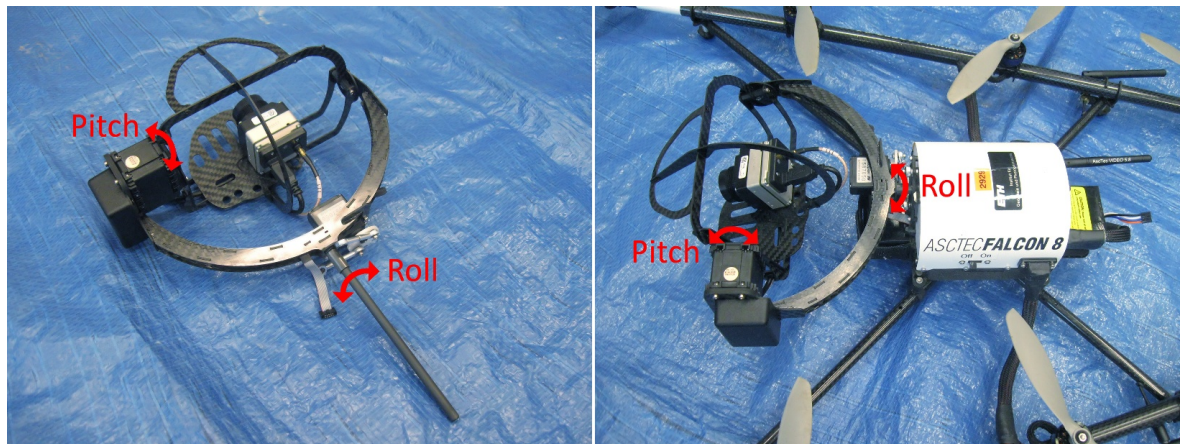


Abbildung 8: Kamerahalterung des Falcon 8 mit FLIR Tau 640 und beschrifteten Drehachsen

2.3.3 Mobile Bodenstation und Flugplanung mit «AscTec AutoPilot»

Die mobile Bodenstation (siehe Abbildung 7), erlaubt es, den Falcon 8 in einem der drei Flugmodi zu steuern und zeigt auf einem Zusatzdisplay (Kästchen oben rechts) Informationen zu Akkustand, Fluglage, Sensordaten und Winkelstellung der Kamerahalterung an. Ein von der restlichen Fernbedienung unabhängiger Analogvideoempfänger (Kästchen oben links) erlaubt den Empfang eines Analogvideosignals vom Oktokopter, das direkt auf einem TFT-Display (Monitor oben Mitte) angezeigt werden oder über eine RCA-Buchse unverändert analog ausgegeben werden kann. Videoaufzeichnungsmöglichkeiten bestehen weder auf dem Falcon selbst noch bei der mobilen Bodenstation.

Über ein USB-Kabel kann die mobile Bodenstation mit einem Laptop verbunden werden. Die Software «AscTec Autopilot» erlaubt sodann die vollständige Steuerung des fliegenden Oktokopters am Computer. Die mobile Bodenstation übernimmt die Datenübertragung per Funk. Der Pilot an der mobilen Bodenstation muss lediglich Start und Landung von Hand steuern, kann aber bei kritischen Situationen stets korrigierend eingreifen – die Steuerbefehle der Software werden in diesem Fall sofort unterbrochen.

Die Software AutoPilot bietet die Möglichkeit, ein Orthofoto als Hintergrund zu laden und auf diesem durch Klicks oder Koordinateneingabe eine Flugroute aus einzelnen Wegpunkten zusammenzustellen, die später autonom abgeflogen werden kann. Solchermassen können auch die bei fotogrammetrischen Befliegungen üblichen Streifenflugmuster definiert werden. Im Gegensatz zu einem Flächenflieger werden mit dem Oktokopter üblicherweise alle Streifen in derselben Orientierung abgeflogen. Der Falcon ist in alle Horizontalrichtungen gleichermassen manövrierfähig und kann Streifen problemlos rückwärts abfliegen – Wendemanöver an den Streifenenden entfallen. Ein zusätzlicher Editor in der Software AutoPilot erlaubt die direkte Angabe von Kameraparametern, Flughöhe sowie gewünschter Längs- und Querüberdeckung und errechnet daraus eine Wegpunktmatrix, wie sie in Abbildung 9 gezeigt wird. Einmal definierte Flugrouten können zur Speicherung als .csv-Tabelle exportiert und später wieder importiert werden. Für detailliertere Beschreibungen zu Bedienung und Möglichkeiten der Software wird auf die Bachelorarbeit von Ephraim Friedli [Friedli, 2010] verwiesen, in welcher der Falcon hinsichtlich eines fotogrammetrischen Einsatzes evaluiert wurde.

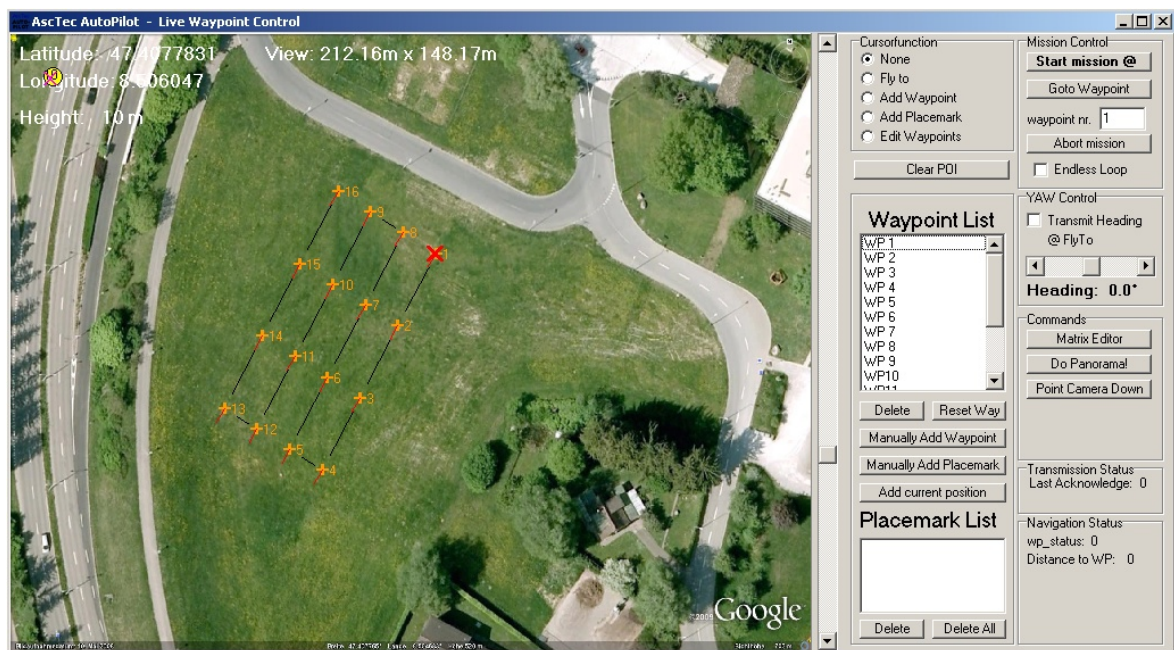


Abbildung 9: Flugplanung mit Wegpunktmatrix in AscTec AutoPilot [Orthofoto: Google Earth]

3 Entwicklung eines Systems zur Rehkitzortung

3.1 Grundidee und Datenfluss

3.1.1 Überblick

Die im vorangehenden Kapitel beschriebene Hard- und Software soll genutzt werden, um letztlich die Koordinaten eines Rehkitzes zu bestimmen. Der Weg zu diesem Ziel beginnt mit drei völlig unterschiedlichen Datensätzen, deren Informationen es korrekt zu verknüpfen gilt, um eine Koordinate in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmen zu können:

- Bilddaten: Video bzw. Bildsequenz von Thermalbildern der FLIR Tau 640
- Lagedaten: Fusionierte Sensordaten des Falcon 8
- Geländedaten: Geländerepräsentation durch einzelne Geländepunkte aus beliebiger Quelle

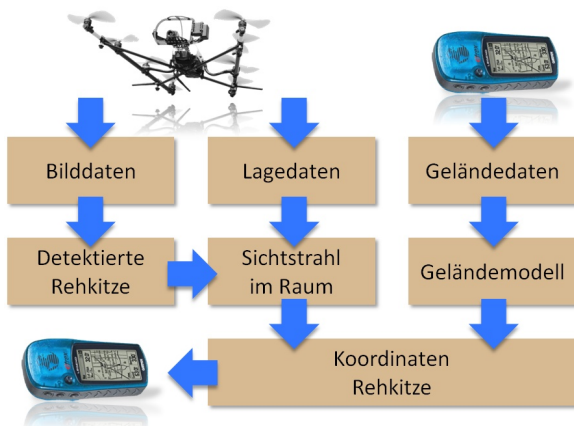


Abbildung 10: Ablauf der Rehkitzrettung

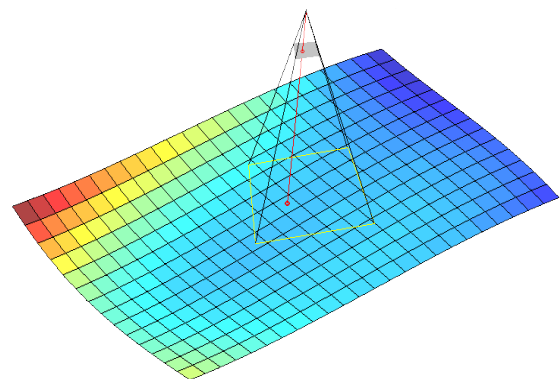


Abbildung 11: Sichtstrahl und Geländemodell

Wie diese Daten weiterverarbeitet werden, wird in Abbildung 10 stark vereinfacht und unter Auslassung aller Detailprobleme aufgezeigt. In den Bilddaten der Thermalkamera können mit einem geeigneten Algorithmus Rehkitze automatisch als helle Flecken erkannt werden. Zusammen mit den Lagedaten des Falcons definieren die Bildkoordinaten eines Rehkitzes einen Sichtstrahl im Raum. Dieser Strahl kann mit einem Geländemodell – einer digitalen Oberfläche, hergeleitet aus den Geländedaten – geschnitten werden. Dieser Vorgang – in der Fotogrammetrie als «Monoplotting» bezeichnet – wird in Abbildung 11 gezeigt. Es resultieren die dreidimensionalen Koordinaten des Rehkitzes, welche nunmehr für die Suche des Rehkitzes auf ein GNSS-Handgerät übertragen werden können. Der vorgestellte Ablauf verzichtet aus Gründen der Arbeitseffizienz auf die

Verwendung von Passpunkten zur Bestimmung der äusseren Kameraorientierung. Die Kameralage- und Ausrichtung wird lediglich aus den fusionierten Sensordaten des Oktokopters abgeleitet, was als «direkte Georeferenzierung» bezeichnet wird.

In den folgenden Abschnitten sollen die Ausgangsdaten genauer beschrieben sowie ihre Besonderheiten und Tücken aufgezeigt werden.

3.1.2 Bilddaten

Die Thermalkamera FLIR Tau 640 verfügt über keine interne Datenaufzeichnungsmöglichkeit. Das von der Kamera erzeugte digitale Videobild (640 x 512 Pixel, Framerate 8½ Hz, 14 bit Farbtiefe) wird lediglich – je nach installiertem Zusatzmodul digital oder analog (Farbtiefe reduziert auf 8 bit) – ausgegeben. Auch der Oktokopter Falcon 8 bietet keine Möglichkeit zur Bilddatenaufzeichnung. Somit müsste entweder auf dem Falcon ein zusätzliches Rechnerboard mit der Fähigkeit der analogen oder digitalen Videoaufzeichnung installiert werden, oder aber der bestehende, analoge «Videolink» des Oktokopters wird genutzt, um das Analogvideo unverändert zur mobilen Bodenstation zu senden. An der mobilen Bodenstation kann das analoge Videosignal über einen RCA-Stecker abgegriffen und z.B. auf dem TFT-Monitor der mobilen Bodenstation selbst dargestellt werden. Für die Detektion von Rehkitzen muss das Bild indes digital vorliegen und dazu in einem entsprechenden elektronischen Gerät, einem sogenannten «Framegrabber», eine Analog-Digital-Wandlung durchlaufen, bevor es schliesslich auf einem Laptop für die weitere Verwendung digital gespeichert werden kann. Der Datenfluss von der Aufnahme bis zum gespeicherten Bild ist in Abbildung 12 nochmals dargestellt. Eine direkte digitale Speicherung der Bilddaten wäre der hier vorgestellten Variante aus zahlreichen, später in diesem Bericht erläuterten Gründen vorzuziehen. Wieso trotzdem darauf verzichtet wurde, wird in Kapitel 5 diskutiert.



Abbildung 12: Datenfluss der Bilddaten

3.1.3 Lagedaten

Während des Fluges werden auf dem Falcon 8 die aus der Sensordatenfusion resultierenden Fluglagedaten in der «Blackbox» auf der SD-Karte gespeichert. Nach dem Flug kann die SD-Karte aus dem Falcon entnommen werden, um die Daten auf einen Laptop zu laden. Mittels eines kleinen Konvertierungsprogramms von Ascending Technologies namens «AscTec GPS Photo Tagger» wird

aus den binären, proprietären Blackboxdaten das sogenannte «Poselog», eine Tabelle im .csv-Format extrahiert. Diese enthält folgende Daten, aufgezeichnet mit einer Frequenz von 2 Hz vom Einschalten bis zum Ausschalten des Oktokopters:

- Flugzeit [s] Aufaddierte Motorlaufzeit
- GPS Zeit [ms] Zeitstempel des GPS-Empfängers (u-Blox LEA-5T)
- Pitch, Roll und Yaw [°] Lagewinkel des Oktokopters aus der Sensordatenfusion
- Länge, Breite [°] Geografische Länge und Breite aus der Sensordatenfusion
- Höhe barometrisch [m] Barometrische Höhe, gefiltert durch Sensordatenfusion mit IMU
- Höhe GPS [m] Ellipsoidische Höhe des GPS-Empfängers, keine Sensordatenfusion
- Kamerawinkel [°] Pitch-Winkel der Kamerahalterung
- Flugmodus [-] Kombination aus acht Flags (Bits) zur Definition des Systemzustands

Die barometrische Höhe entspricht nicht direkt den stark verrauschten und für die Fluglageregelung ungeeigneten Messungen des barometrischen Höhenmessers, sondern wird in der Sensordatenfusion mit IMU-Daten kombiniert. Anzumerken ist ferner, dass die barometrische Höhe insbesondere kurz nach Einschalten des Oktokopters einer erheblichen Drift unterworfen ist, die erfahrungsgemäss während eines Fluges Werte von bis zu fünf Metern annehmen kann. Bei jedem Motorenstart wird die barometrische Höhe deshalb auf Null zurückgesetzt. Bei autonomen Flügen ist die mögliche Höhendrift beim Setzen von Wegpunkten stets durch eine Sicherheitsmarge zu berücksichtigen.

Die GPS-Höhe fliesst niemals in die Sensordatenfusion mit ein, da sie – insbesondere wenn die Zahl der verwendeten Satelliten aufgrund der Konstellation ändert – grösseren Sprüngen unterworfen ist. Die im Poselog aufgeführte GPS-Höhe wird direkt vom GPS-Empfänger übernommen und weist teilweise über längere Zeit nicht erklärbare Positionsstillstände auf oder enthält Daten, deren Sinn sich dem Autoren nicht erschliessen. Sie wird in dieser Arbeit nicht verwendet.

Der Kamerawinkel repräsentiert den Sollwert für die Kamerastellung, der als Steuerbefehl an den Pitch-Achsen-Servomotor der Kamerahalterung geschickt wird. Ein Winkelabgriff zur Feststellung der tatsächlich erreichten Winkelstellung findet nur innerhalb des Regelkreises des Servos statt und wird nicht ausgelesen.

Ein Poselog kann mit der Funktion *readposelog* in Matlab eingelesen werden. Die Funktion liefert die Daten des Poselogs in Form verschiedener Matrizen für die Weiterverwendung in eigenen Programmen, korrigiert einen Fehler des Poselogs bei Yaw-Winkeln (Integer-Overflow) und formatiert die Flugmodusdaten in eine einfacher verständliche Form um. Für Informationen zum Flugmodus wird daher auf den Programmcode dieser Matlabfunktion verwiesen.

3.1.4 Geländedaten

Um im späteren Verlauf der Datenauswertung aus dem Sicht- bzw. Aufnahmestrahle durch ein bestimmtes Pixel auf eine Koordinate auf der Erdoberfläche schliessen zu können, muss eine dreidimensionale Repräsentation des Geländes, ein Geländemodell vorliegen. Ausgangslage für ein Geländemodell stellen stets einzelne Punkte dar, deren Lage und Höhe durch Messung im Gelände bestimmt wurden. Ein derartiger Datensatz kann aus unterschiedlichsten Quellen stammen, wovon jene genannt werden sollen, die für die vorliegende Arbeit in Frage kommen könnten:

- GNSS: Feldmessungen mit geodätischem Empfänger oder Low-Cost-Handgerät
- Lidar: Flugzeuggestützte Laserdistanzmessungen. In der Schweiz für Höhen bis 2000 m.ü.M. als Produkt «DTM-AV» der Swisstopo erhältlich. Rasterweite 2m, Höhengenaugigkeit 0.5m (1σ in offenem Gelände). [URL: DTM-AV]

3.2 Videodigitalisierung

3.2.1 Datenerfassung mit USB-Framegrabber

Die Redigitalisierung des von der mobilen Bodenstation empfangenen und ausgegebenen Analogvideos erfolgt mittels eines Framegrabbers, eines Analog-Digital-Wandlers für Videosignale. Während qualitativ hochwertige Framegrabber vor allem als Steckkarten für PCs angeboten werden, finden sich im Low-Cost-Segment Geräte mit USB-Anschluss, die den Betrieb an einem Laptop ermöglichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die drei in Tabelle 3 gezeigten Framegrabber getestet.



Produkt:	Grabby	USB-live-2	DFG/USB2-It
Hersteller:	Terratec	Hauppage	The Imaging Source
Preis:	ca. CHF 35.-	ca. CHF 50.-	ca. CHF 200.-

Tabelle 3: Übersicht Framegrabber

Für all diese Framegrabber stehen DirectShow Treiber zur Verfügung, so dass sie unter Windows mit einem beliebigen DirectShow-fähigen Aufnahmeprogramm betrieben werden können. Als schlanke frei verfügbare Softwarelösung sei zu Testzwecken an dieser Stelle das Videobearbeitungsprogramm «Virtual Dub» empfohlen. Mit der Image Acquisition Toolbox von Matlab lassen sich Geräte mit DirectShow wie etwa Webcams oder eben Framegrabber über den Standardadapter «winvideo» ansteuern. Der Vorteil der Videoaufnahme mit Matlab besteht darin, dass ein grösseres Mass an Kontrolle über den Aufnahmeprozess möglich ist. Beispielsweise können in selbst programmierten Applikationen Treibereinstellungen wie Helligkeit und Kontrast bereits festgelegt werden, ohne dass der Endnutzer diese Einstellungen vornehmen muss. Zusätzlich können Informationen wie etwa ein Zeitstempel zu jedem aufgenommenen Bild erfasst werden. Später in diesem Bericht wird aufgezeigt, dass dies von grösster Wichtigkeit ist. Die Matlabapplikation *capturegui* zur Aufnahme von Video und Zeitstempel wird in Kapitel 4 genauer vorgestellt.

Analoge PAL-Videosignale sind Farbvideosignale und nutzen das YUV-Farbmodell. Das von der Thermalkamera FLIR Tau 640 ausgegebene Signal hat eine Farbtiefe von 8 bit, ist aber grundsätzlich nicht an ein bestimmtes Farbmodell gebunden. Die $2^8 = 256$ möglichen Farbwerte sind indizierte Farbwerte. In welcher Farbe des YUV-Farbmodells ein bestimmter Index dargestellt wird, bestimmt eine in der Kamera wählbare Look-Up-Table, eine Farbtabelle, die jedem Indexwert eine YUV-Farbe zuordnet. Je nach gewählter Look-Up-Table kann das Bild als Graustufenbild oder als Farbbild beispielsweise in Regenbogenfärbung erscheinen – und abhängig von der Look-Up-Table ist die Bildinformation nur im Y-Kanal enthalten (dem Graustufenkanal des YUV-Farbmodells) oder über alle 3 Kanäle verteilt. Da für eine spätere automatische Auswertung die Helligkeitsinformation möglichst so vorliegen muss, wie sie aufgenommen wurde – nämlich in einem einzigen Kanal – wird die Kamera idealerweise so eingestellt, dass ein Graustufenbild ausgegeben wird. Der Treiber des Framegrabbers kann in Matlab so eingestellt werden, dass das empfangene Bild nicht im YUV-Farbmodell mit den nicht belegten und somit unnötigen Kanälen U und V, sondern direkt als Graustufen- bzw. Indexbild geliefert wird. Gegenüber der Aufzeichnung als Farbbild reduziert dies die Datenmenge um zwei Drittel.

Das PAL-Videosignal beinhaltet 25 Bilder pro Sekunde. Die Aufzeichnungsrate der Tau 640 ist aus Gründen des amerikanischen Exportrechts auf einen Drittel davon beschränkt. Um dennoch ein korrektes PAL-Signal ausgeben zu können, sendet die Kamera jeweils drei identische Bilder hintereinander. Um die vollständige Bildinformation zu gewinnen, muss nur jedes dritte Videobild aufgezeichnet werden.

Das vom Framegrabber gelieferte Bild wird nicht vollständig vom Thermalbild der Kamera ausgefüllt und weist rings um das eigentliche Bild schwarze Ränder auf. Diese aufzuzeichnen ist unnötig – bereits im Treiber kann die tatsächlich auszugebende Bildregion definiert werden.

3.2.2 Kameraeinstellungen FLIR Tau 640

Die Thermalkamera FLIR Tau 640 kann mittels USB-Kabel mit einem Computer verbunden werden, um in der Steuersoftware sämtliche veränderbaren Einstellungen der Kamera zu manipulieren. Die gewählten Einstellungen bleiben auf der Kamera bei unterbrochener Stromversorgung gespeichert. Eine Auswahl der für die vorliegende Arbeit besonders relevanten Einstellungen soll in diesem Abschnitt genauer vorgestellt werden. Für einen allgemeinen Überblick über sämtliche Kameraeinstellungen wird auf [Tau 640 Manual, 2010] verwiesen.

Die Tau 640 weist einen internen Mechanismus zur periodischen Verbesserung der Bildqualität auf, genannt Flat-Field-Correction (FFC). Während eines FFC-Vorgangs wird ein Schwarzkörper in Form einer Blende vor das Detektorarray geklappt, so dass jedes Detektorpixel derselben Temperatur ausgesetzt ist und dieselbe Ausgangsspannung liefern müsste. Damit ein tatsächlich uniformes Bild (Flat-Field) entsteht, werden bestehende Abweichungen rechnerisch korrigiert. Während des Vorgangs ist das Videobild für eine knappe halbe Sekunde bzw. ungefähr vier Bilder eingefroren. Wie oft die Flat-Field-Correction erfolgt, kann entweder manuell gewählt, durch ein externes Signal gesteuert oder von der Kamera selbst automatisch bestimmt werden. Um mit den ausgegebenen Videobildern automatische Auswertungen durchführen zu können, müsste bekannt sein, wann gerade eine Flat-Field-Correction durchgeführt wird. Da diese Information ohne externe Steuerung nicht trivial zu gewinnen ist, wird die Flat-Field-Correction im Rahmen dieser Arbeit ignoriert und die entsprechende Kameraeinstellung auf dem Wert «Auto» belassen. Dabei wird in Kauf genommen, dass während ungefähr vier Bildern veraltete Bildinformation mit aktuellen Lagedaten des Oktokopters verknüpft wird und falsche Objektpositionen bestimmt werden, ehe die Positionsbestimmung nach der FFC wieder korrekt arbeitet.

Wie im vorangehenden Abschnitt erklärt, kann die Einfärbung des Analogbildes durch eine Look-Up-Table (LUT) bestimmt werden. In dieser Arbeit wird die Graustufen-LUT «White Hot» verwendet, mit welcher kalte Objekte dunkel und heisse Objekte hell abgebildet werden. Dementsprechend kann die zusätzliche Einstellung «Video Color» ohne weitere Bedenken auf «Monochrom» gesetzt werden. [Tau 640 Manual, 2010]

Wie die digitalen Intensitätsbilder mit einer Farbtiefe von 14 bit zu analogen Bildern mit einer Farbtiefe von 8 bit umgewandelt werden – ein Vorgang der auch als «Histogram Mapping» bezeichnet wird – bestimmen die Einstellungen im Tab «Automatic-Gain-Control» (AGC). Die mathematische Funktion, die jedem Intensitätswert im Ursprungsbild einen Intensitätswert im Zielbild zuordnet, wird Transferfunktion genannt. Bei der Tau 640 kommt entweder eine Transferfunktion basierend auf einer Histogrammäqualisation (Einstellung «Automatic») oder eine lineare Transferfunktion (restliche Einstellungen) zum Einsatz.

Einstellungen mit linearer Transferfunktion wurden für die vorliegende Arbeit nicht in Betracht gezogen, da bei diesen das Vorhandensein von einzelnen Punkten mit extremen Temperaturen dazu führt, dass in weiten Teilen des Bildes keine Details mehr zu erkennen sind. Verglichen mit dem grossen Temperaturunterschied zu einem Störobjekt, das etwa den kühlen Himmel reflektiert, weisen die restlichen Objekte untereinander geringe Temperaturdifferenzen aus und erscheinen deshalb in einem einheitlichen Grau, von dem sich die eigentlich interessanten Objekte kaum mehr abheben (vergleiche dazu die Thermalaufnahme in Abbildung 4 unten links).

Bei der Histogrammäqualisation (Einstellung «Automatic») können als zusätzliche Parameter «Plateau Value», «ITT-Mean» und «Max Gain» gewählt werden. Der Plateau Value stellt einen Grenzwert dar, auf den alle grösseren Werte im ursprünglichen Histogramm reduziert werden, bevor die Histogrammäqualisation durchgeführt wird. Stark vertretene Helligkeitsbereiche werden dadurch im Histogramm nur begrenzt ausgedehnt. Es wird verhindert, dass schwach besetzte Helligkeitsbereiche, die allenfalls wichtige Bilddetails enthalten, im Histogramm zu stark gestaucht und von den stark besetzten Helligkeitsbereichen ohne relevante Informationen verdrängt werden. Wird der Plateau Value grösser als der Maximalwert im ursprünglichen Histogramm gewählt, so hat er keinen Effekt und eine gewöhnliche Histogrammäqualisation wird durchgeführt. Wird der Plateau Value auf eins gesetzt (was für die Kamera Tau 640 nicht möglich ist – der Minimalwert beträgt zehn), entspricht die resultierende Transferfunktion einer sogenannten Histogrammprojektion, in der jedem besetzten Helligkeitsniveau des Ursprungsbildes wieder genau ein Helligkeitsniveau des Zielbildes zugeordnet wird. Für weitere Ausführungen und mathematische Grundlagen zur Histogrammäqualisation mit Plateau Value wird auf [Vickers, 1996] verwiesen. Da für die vorliegende Arbeit Rehkitze – im Thermalbild kleine, helle Details – von Interesse sind, wird der Plateau Value auf den Minimalwert von zehn gesetzt. [FLIR AGC, 2011]

Der Parameter ITT-Mean steht für den Mittelwert der Image Transform Table - einer diskreten Formulierung der Transferfunktion. Er hat Einfluss auf die Gesamthelligkeit des erzeugten Bildes. Hohe Werte auf der Skala von 0 bis 255 verschieben das gesamte Histogramm nach der Äqualisation in Richtung heller Werte, tiefe Werte in die entgegengesetzte Richtung. Das Histogramm wird durch diese Verschiebung in aller Regel beschnitten. Die Einstellung 127 bewirkt als neutrale Stellung keine Veränderung. Wird das analoge Videosignal mittels Framegrabber wieder digitalisiert, so muss die Wahl des Parameters ITT-Mean im Zusammenspiel mit der Helligkeits- und Kontrasteinstellung des Framegrabbers betrachtet werden. Diese drei Parameter müssen als Gesamtheit derart gewählt werden, dass der interessante Helligkeitsbereich tatsächlich erfasst wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese Parameter empirisch bestimmt und der Parameter ITT-Mean auf 100 festgelegt. [FLIR AGC, 2011]

Der Parameter Max Gain begrenzt die maximale Streckung des Histogramms bzw. die Kontrasterhöhung durch die Histogrammäqualisation. Zu hohe Werte können im Fall von Szenen mit geringen Temperaturdifferenzen zu verrauschten Bildern führen. Bei Szenen im Freien tritt dieses Problem gemäss den Erfahrungen des Autors nie auf – die Temperaturdifferenzen sind stets um mehrere Grössenordnungen grösser als das Rauschen des Detektors. Der Parameter Max Gain kann ohne Bedenken auf den Maximalwert gesetzt werden. [FLIR AGC, 2011]

3.2.3 Interlace und Field Dominance

Ein Video im umgangssprachlich «PAL» genannten Videomodus 576i besteht aus einzelnen Bildern oder «Frames» mit 576 sichtbaren Bildzeilen. Jedes Frame wird im Zeilensprungverfahren (engl. Interlace) aus zwei Halbbildern oder «Fields» zusammengefügt. Diese enthalten jeweils jede zweite Zeile des Bildes und werden zur Darstellung abwechselungsweise erneuert, was bei gleicher Datenmenge eine höhere zeitliche Auflösung und damit ein flimmerfreies Bild ermöglicht. Das Halbbild mit ungeraden Zeilen wird «Top-Field» oder «Odd-Field» genannt, jenes mit geraden Zeilen «Bottom-Field» oder «Even-Field».

Stammt ein Videosignal aus einer Quelle, die die beiden Halbbilder eines Frames nicht gleichzeitig, sondern nacheinander erfasst, so spielt es für die Korrektheit eines Bildes keine Rolle, ob ein Halbbild mit dem vorangehenden oder dem nachfolgenden zu einem Vollbild zusammengefügt wird. Das Vollbild entspricht sowieso einer Mischung aus zwei Aufnahmezeitpunkten. Digitale Flächensensoren erfassen in aller Regel keine Halbbilder, sondern Vollbilder. Diese werden zur Übertragung in einem Interlace-Videomodus in Halbbilder zerlegt. Sollen diese Halbbilder später, etwa anlässlich einer Redigitalisierung, wieder zusammengefügt werden, so spielt es durchaus eine Rolle, welche Zweierpaare von aufeinanderfolgenden Fields zusammengefügt werden. Die «Field dominance» besagt, welches Field (Top/Odd oder Bottom/Even) zuerst übertragen wird und

mit dem Nachfolgenden zusammengesetzt werden muss. Verwendet ein Framegrabber eine andere Field Dominance als die Quelle, werden trotz Vollbilddaufnahme inkorrekte Frames mit Interlaceeffekten erzeugt. [URL: Video Fields]

Das beschriebene Problem der falschen Field Dominance ist beim Framegrabber DFG/USB2-It aufgetreten, während es bei den anderen beiden Geräten nicht beobachtet wurde. Eine Möglichkeit, die Field Dominance im Treiber zu beeinflussen, scheint nicht zu bestehen. Auf eine weitere Verwendung dieses Framegrabbers wurde deshalb verzichtet.

3.2.4 Aufbau des Analogvideosignals und nichtquadratische Pixel

Im analogen Videosignal eines Videos im Videomodus 576i ist die kleinste klar abgegrenzte Einheit die Bildzeile. Sämtliche Bildzeilen eines Halbbildes werden nacheinander übertragen, getrennt durch Synchronisationspulse, die dafür sorgen, dass alle Bildzeilen ohne Horizontalverschiebung untereinander angeordnet werden können. Aufeinanderfolgende Halbbilder sind ihrerseits durch eine längere Synchronisationssequenz voneinander getrennt. Eine einzelne Bildzeile wird durch ein kontinuierliches Spannungssignal repräsentiert. Eine Unterteilung in Pixel ist im Signal selbst nicht enthalten – das Analogsignal wie auch analoge Ausgabegeräte verwenden keine Pixel, sondern eindeutig voneinander getrennte Bildzeilen, die in sich kontinuierlich übertragen bzw. dargestellt werden. Wird ein Bild digitalisiert, muss zwangsläufig eine Abtastung der einzelnen Bildzeilen mit einer gewissen Frequenz erfolgen. Diese bestimmt die Dimension des Pixels – je tiefer die Frequenz, desto breiter ist das Pixel und desto weniger Pixel werden aus einer Zeile gebildet. Aus heutiger Sicht unglücklich festgelegt, definiert die Norm ITU-R BT.601 zur Digitalisierung von Analogvideosignalen eine Abtastrate, die zu nichtquadratischen Pixeln führt. Wird ein Videoframe gemäss dieser Norm digitalisiert, resultieren Pixel mit einem Höhen-Breiten-Verhältnis von 54 zu 59. Wird dieses Bild auf einem heute üblichen Bildschirm mit quadratischen Pixeln dargestellt, erscheint es horizontal gestaucht. [URL: Pixelaspect]

Ein Framegrabber, der die beschriebene, umstrittene Norm nicht anwendet und mit einer höheren Abtastrate quadratische Pixel generiert, ist daran zu erkennen, dass dies entweder ausdrücklich in den Spezifikationen aufgeführt wird oder die Horizontalauflösung mit 768 Pixel angegeben wird. Bei den Framegrabbern aus dem Consumerbereich, Grabby und USB-live-2, ist dies im Gegensatz zum DFG/USB2-It nicht der Fall – sie zeichnen nichtquadratische Pixel auf. Da der DFG/USB2-It aufgrund des im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Problems nicht eingesetzt werden kann, wird im Matlabprogramm *capturegui* das erzeugte Bild der anderen Framegrabber durch Resampling mit bikubischer Interpolation auf die korrekte Breite gestreckt. Dadurch kann zwar keineswegs verlorene Information wiederhergestellt werden, das Bild hat aber für die weitere Verwendung zumindest die korrekte Geometrie.

3.2.5 Dropped Frames

Aufeinanderfolgende Halbbilder sind, wie bereits erklärt, durch eine Synchronisationssequenz getrennt. Ohne diese Synchronisation fehlt die Information, wo im Bild eine einzelne Bildzeile hingehört. Wird das Videosignal während der Übertragung gestört – und dies ist bei der Funkübertragung vom Falcon zur Bodenstation öfters der Fall – kann die Synchronisationssequenz unter Umständen nicht mehr erkannt werden. In der Folge ist keine korrekte Digitalisierung möglich. Der Framegrabber liefert erst wieder ein digitales Bild, wenn die Synchronisation gewährleistet ist. Unvollständige Bildinformationen werden «fallengelassen», weshalb für fehlende Vollbilder in diesem Zusammenhang der Begriff «Dropped Frames» verwendet wird. Im fertigen Digitalvideo ist nicht mehr zu erkennen, wo Frames fehlen – höchstens kann der Betrachter bei bewegten Aufnahmen gewisse Sprünge ausmachen. Zudem machen es Dropped Frames unmöglich, anhand der Startzeit des Videos und der Nummer eines Bildes auf dessen Aufnahmezeitpunkt zu schliessen. Die Zahl fehlender Bilder kann bei Nutzung der Funkverbindung des Falcon beträchtliche Ausmasse annehmen – in einem praktischen Flugtest ohne besondere Störeinflüsse wurden bereits acht Prozent der Frames fallengelassen.

3.3 Synchronisierung von Bild- und Lagedaten

3.3.1 Synchronisierung mittels Kameraschwenks

Um aus einem bestimmten Pixel in einem Einzelbild den Aufnahmestrahl bzw. die räumliche Gerade vom Pixel durch das Projektionszentrum bis zum aufgenommenen Objekt berechnen zu können, muss die Position und Orientierung der Kamera bzw. der Trägerplattform Falcon 8 zum Aufnahmezeitpunkt bekannt sein. Die vom Oktokopter aufgezeichneten und im Poselog bereitgestellten Lagedaten stehen mit einer Aufzeichnungsrate von 2 Hz zur Verfügung – die Thermalvideobilder der Tau 640 mit einer Rate von $8\frac{1}{3}$ Hz. Lagedaten und Bilddaten werden selten bis nie exakt gleichzeitig erfasst. Ein zeitlicher Bezug zwischen den Aufzeichnungszeitpunkten besteht zunächst nicht, ist aber zwingend notwendig, um für jedes einzelne Bild durch Interpolation Lagedaten berechnen zu können, und muss durch das Aufzeichnen von Synchronisationssignalen hergestellt werden. Die Art des verwendeten Synchronisationssignals kann grundsätzlich beliebig gewählt werden. Einzige, dafür absolut zwingende Bedingung ist, dass das Signal sowohl im Poselog als auch in den Thermalbildern eindeutig und zeitscharf zu erkennen ist. Veränderungen der Lage des Oktokopters sind zwar in beiden Datensätzen erkennbar, jedoch durch den naturgemäss kontinuierlichen Beschleunigungsvorgang einer Bewegung nie auf einen genauen Zeitpunkt festzulegen. Externe Synchronisationsmassnahmen wie im Bild sichtbare Leuchtdioden wären eine mögliche Lösung, würden aber grössere Hard- und Softwaremodifikationen am Falcon bedingen.

Als einfachste und zugleich effektivste Lösung wurde die Synchronisierung mittels Kamaschwenks entwickelt. Die Pitch-Winkelstellung der Kamerahalterung wird nach einer kleinen Softwaremodifikation seitens Ascending Technologies im Poselog verzeichnet. Eine Änderung des Pitch-Winkels erfolgt zwar keineswegs instantan, zumindest der Beginn der Änderung bzw. Drehung erfolgt aber praktisch verzögerungsfrei. Steuerbefehle für die Kamerahalterung werden in der Sensordatenfusion auf dem Falcon mit einem Rate von 1kHz berechnet, im Poselog protokolliert und an die Motoren übermittelt. Im Thermalbild ist der Schwenkvorgang für den Menschen aufgrund der Bewegungsunschärfe während des Schwenks gut zu erkennen. Das erste Bild mit Bewegungsunschärfe (rot markiert in Abbildung 13) wird zeitlich der ersten Zeile mit verändertem Kamerawinkel im Poselog (ebenfalls rot markiert) zugeordnet. Damit der besondere Synchronisierungsschwenk im Poselog von allfälligen anderen Kamaschwenks zu unterscheiden ist, wird die Kamera bis in Zenitrichtung (-90° im Poselog) gedreht – eine Stellung die sonst nie erreicht wird.

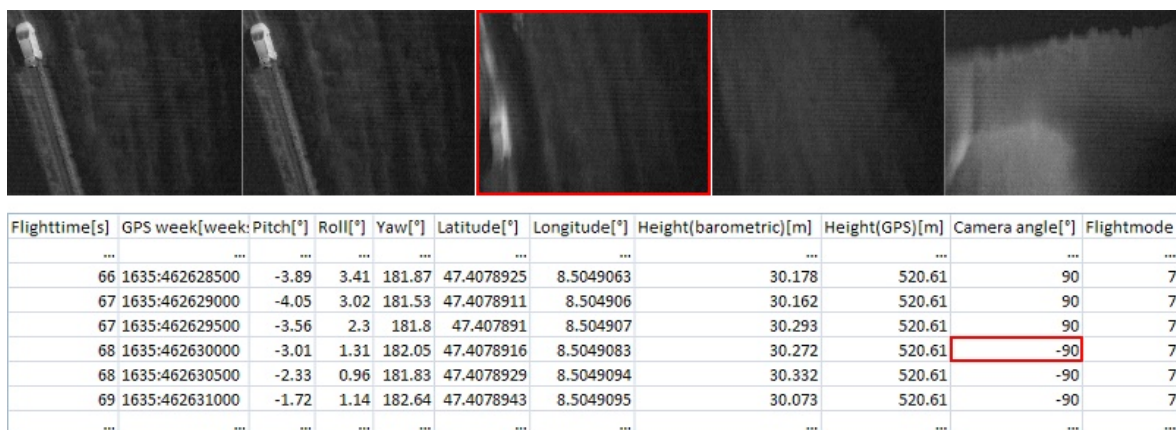


Abbildung 13: Kamaschwenk in Videobild und Poselog

Zu beachten ist ferner, dass die Informationen in Videobild und Poselog einen Kamaschwenk erst mit einer gewissen Verzögerung im nachfolgenden Aufzeichnungsschritt erfassen:

- Verzögerung im Poselog: maximal 1 / 2 Hz 0 bis 0.5 s
- Verzögerung im Video: maximal 1 / 8½ Hz 0 bis 0.12 s

Tatsächlich relevant ist nicht die absolute Grösse einer einzelnen dieser Verzögerungen, sondern die Differenz der beiden. Diese beträgt zwischen -0.12 s (Poselog mit minimaler Verzögerung, Video mit maximaler Verzögerung) und $+0.5$ s (Poselog mit maximaler Verzögerung, Video mit minimaler Verzögerung). Werden mehrere Kamaschwenks durchgeführt, ist der für die Synchronisierung bestgeeignete Schwenk jener, bei dem alle anderen Schwenks Abweichungen zwischen -0.12 und $+0.5$ s zeigen. Dies kann auf mehrere Kamaschwenks zutreffen. Eine aus sämtlichen

Kameraschwenks gemittelte Lösung oder gar eine zeitliche Streckung der Informationen in Poselogs zur Beseitigung der Verzögerungen empfiehlt sich nicht, da wie erläutert durchaus bekannt ist, wie die Verzögerungen entstehen und es unmöglich ist, einen solchen systematischen Fehler durch Mittelbildung zu eliminieren. Stattdessen sollte der bestgeeignete Kameraschwenk für die Berechnung verwendet und die restlichen als Kontrolle genutzt werden.

3.3.2 Erfassung und Korrektur von Dropped Frames

Dropped Frames, fehlende Einzelbilder, stellen für die Synchronisierung ein grösseres Problem dar, liegt dieser doch die Annahme einer konstanten Aufzeichnungsrate zugrunde. Fehlende Bilder können im Video nachträglich nicht erkannt werden. Während der Aufzeichnung ist ein Dropped Frame theoretisch daran zu erkennen, dass in jenem Moment, in dem der Framegrabber eigentlich ein Bild liefern müsste, keines beim Aufnahmeprogramm ankommt. Die Kommunikation zwischen Framegrabber und Aufnahmeprogramm erfolgt aber keineswegs regelmässig und sofort nach Erfassung eines Bildes. Je nach Auslastung des Rechners werden mehrer Bilder auf dem Framegrabber zwischengespeichert und erst später in schnellerer Folge ans Aufzeichnungsprogramm weitergegeben. Eine einfache Protokollierung der Aufzeichnungszeitpunkte weist selbst ohne Dropped Frames gewisse zeitliche Lücken auf und erlaubt erst durch geschickte Interpretation, Dropped Frames tatsächlich zu erkennen. Abbildung 14 zeigt diesen Vorgang grafisch auf. In der Grafik oben links sind die Aufzeichnungszeitpunkte jedes Frames. Die stark um den Sollwert von 0.12 s schwankende Zeitspanne zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Aufzeichnungszeitpunkten (entspricht der diskreten Ableitung der ersten Grafik) wird erst in der Grafik oben rechts sichtbar. Werden von den Aufzeichnungzeitpunkten der ersten Grafik die aufgrund der Aufzeichnungsrate von $8\frac{1}{3}$ Hz theoretisch resultierenden Aufzeichnungzeitpunkte subtrahiert, entsteht die Grafik unten links. Sie stellt die Verzögerung der tatsächlichen Aufzeichnungzeitpunkte gegenüber den theoretischen Zeitpunkten dar. Dropped Frames sind in dieser Darstellung als positive Sprünge, die die Kurve dauerhaft auf einen höheren Wert anheben, zu erkennen – Dropped Frames können im Gegensatz zu gepufferten und später noch übermittelten Frames nicht wieder «aufgeholt» werden. Um die Verzögerung wegen Pufferung zu eliminieren, muss in dieser Grafik jeder Wert durch das Minimum aller nachfolgenden (inkl. des Wertes selbst) ersetzt werden. Schliesslich werden sämtliche Werte auf Zeitschritte von 0.04 s (entspricht der Framerate des PAL-Videosignals von 25 Hz) gerundet und durch diesen Wert dividiert, wodurch die in der Grafik unten rechts dargestellte Kurve entsteht. Sie gibt für jedes Frame des Videos an, wie viele Frames ab Videostart bis zu diesem Zeitpunkt bereits fallengelassen wurden. Die Anzahl der Dropped Frames muss bei der Umsetzung der Synchronisierung durch Zeitkorrekturen berücksichtigt werden.

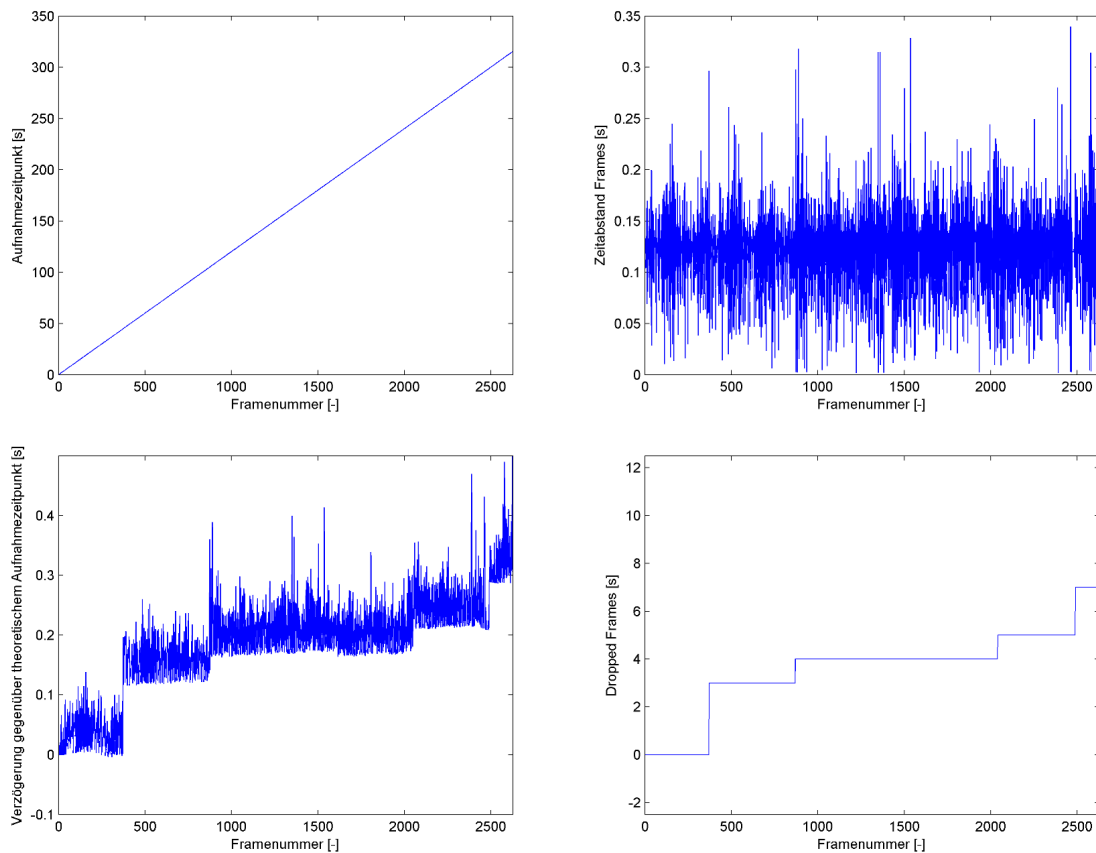


Abbildung 14: Erkennung von Dropped Frames

3.3.3 Umsetzung der Synchronisierung in Matlab

Die Matlabfunktion *syncvideo* setzt die beschriebenen Ideen zur Synchronisierung von Poselog und Videobildern praktisch um. Als Ausgangsdaten nimmt die Funktion die mittels *readposelog* eingelesenen Poselogdaten, einen Vektor mit Framenummern der Kameraschwenks sowie einen Vektor mit Aufzeichnungszeitpunkten der Einzelframes entgegen. Der Nullpunkt der Zeitskala für die Aufzeichnungszeitpunkte ist irrelevant. Die Framenummern der Kameraschwenks müssen manuell in einem Videobearbeitungsprogramm bestimmt werden. Sie sind für den Menschen leicht zu erkennen und können bei Kenntnis ihrer ungefähren Position im Video schnell gefunden werden. Eine automatische Erkennung wäre denkbar, in der Realisierung aber unverhältnismässig aufwändig.

Wie beschrieben werden in der Funktion *syncvideo* aus den Aufzeichnungszeitpunkten die Dropped Frames abgeleitet. Im Poselog werden die Kameraschwenks (Kamerawinkel -90°) gesucht und die entsprechenden Zeitpunkte aus den Poselogdaten extrahiert. Anschliessend wird durch eine Synchronisation mit dem ersten von beliebig vielen Kameraschwenks die Aufnahmezeit jedes Videoframes – also auch die der restlichen Frames mit Kameraschwenks – berechnet. Alle Kame-

raschwenkzeitpunkte aus dem Poselog und aus dem synchronisierten Video werden verglichen – es resultieren bei grundsätzlich korrekter Synchronisation die im vorletzten Abschnitt beschriebenen Verzögerungen zwischen genauem Zeitpunkt des Kameranachschwenks und dessen Aufzeichnung in Poselog und Video.

Als für die Synchronisierung idealer Kameranachschwenk wird jener ausgewählt, bei dem die frühestmöglichen Aufnahmezeitpunkte resultieren, da in diesem Fall die Aufzeichnung des Kameranachschwenks im Poselog minimal verzögert ist, während bei allen anderen Kameranachschwenks die Verzögerung grösser ist. Die Synchronisierung wird nunmehr mit dem ausgewählten Kameranachschwenk erneut und endgültig berechnet. Der verbleibende Synchronisationsfehler liegt wie im vorletzten Abschnitt beschrieben zwischen -0.12 und $+0.5$ s. Durch eine grössere Anzahl Kameranachschwenks wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass der Fehler in der Nähe von 0 liegt, eine Reduzierung des maximal möglichen Fehlers wäre einzig durch eine höhere Aufzeichnungsrate bei Poselog und Video möglich. Die Funktion *syncvideo* gibt die Differenz zwischen Aufnahmezeitpunkt nach Synchronisation und Aufnahmezeitpunkt gemäss Poselog für jedes Frame mit Kameranachschwenk aus und erlaubt so, grobe Fehler wie etwa falsche Framenummern bei einzelnen Kameranachschwenks zu entdecken.

Durch Interpolation werden aus den Poselogdaten neue Werte für den synchronisierten Zeitpunkt jedes Einzelframes berechnet. Bei geometrischen Informationen (Position und Orientierung) erfolgt die Interpolation für jede Dimension einzeln mittels kubischer Splines, bei logischen oder diskreten Informationen (Flugmodus, Flugzeit, Kamerawinkel) mittels Nearest Neighbour Interpolation. Da der Kamerawinkel vor allem für die Synchronisation genutzt wird, stellt er an dieser Stelle ebenfalls eine logische Information dar und darf durch die Interpolation nur bereits in den Daten vorhandene Werte zugewiesen erhalten.

3.4 Detektion von Rehkitzen in Thermalbildern

3.4.1 Erkennung von Rehkitzen in Thermalbildern

Nachdem für jedes einzelne Thermalbild des Videos Lagedaten vorliegen, muss in einem nächsten Schritt bestimmt werden, ob und wo in diesem Bild überhaupt ein Rehkitz zu sehen ist. Diese Aufgabe könnte von einem Menschen übernommen werden – ist aber eher repetitiv und ermüdend. Daher soll sie durch einen Detektionsalgorithmus automatisiert und beschleunigt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass Rehkitze mehr Wärmestrahlung emittieren als ihre Umgebung und deshalb in Thermalbildern als helle Flecken zu erkennen sind. Es stellt sich die Frage, inwiefern diese Flecken über Grösse, Form und Intensität charakterisiert werden können. Während die Grösse eines Rehkitzes abgeschätzt, mit einem Minimal- und Maximalwert ange-

geben und in Pixelwerte umgerechnet werden kann, ist es schon wesentlich schwieriger, Aussagen über die Form zu treffen. Rehkitze liegen in der Drückstellung mehr oder weniger eng zusammengerollt am Boden, so dass im Weiteren davon ausgegangen werden soll, dass sie ungefähr durch eine Ellipse charakterisiert werden können, die darüber hinaus nicht all zu langgestreckt sein darf. Details wie einzelne Gliedmassen können aufgrund der geringen Sensorauflösung bei realistischen Flughöhen ohnehin nicht erkannt werden.

Mangels Thermalaufnahmen echter Rehkitze konnten diese Thesen nie verifiziert werden – müssen aber, da keine Alternativen bestehen, für die vorliegende Arbeit trotzdem verwendet werden. Es ist denn auch in doppelter Hinsicht unmöglich, Aussagen über die Strahlungsintensität eines Rehkitzes zu machen. Zum einen stehen keine Referenzdaten zur Verfügung und zum anderen lassen sich aus den 8 bit Bilddaten keine genauen Aussagen über die Strahlungsintensität ableiten.

Abschliessend ist zu bemerken, dass im vorliegenden Fall selbst der beste Algorithmus zur Erkennung von Rehkitzen, abgesehen von der Arbeitsgeschwindigkeit, keine Vorteile gegenüber einem aufmerksam arbeitenden menschlichen Betrachter hat. Ist es dem Menschen unmöglich, ein Rehkitz auf Thermalbildern zu erkennen, wird ein Detektionsalgorithmus keine besseren Resultate liefern.

3.4.2 Detektionsalgorithmus

Ein Detektionsalgorithmus, der die oben beschriebenen Ideen aufnimmt, wurde in der Matlab-funktion *detect* umgesetzt. Diese nimmt ein Graustufenbild (Beispiel mit Wärmeflaschen in Abbildung 15 oben links) entgegen und entfernt von diesem in einem ersten Schritt den «Hintergrund». Als Hintergrund wird vom Originalbild eine mittels Gaussfilter weichgezeichnete Version (oben rechts) subtrahiert, ein Verfahren, das in der Fachliteratur unter dem Begriff «Difference of Gaussian» zu finden ist [Gonzalez et al., 2009]. Es resultiert ein Bild, in dem nur noch kleinere, gegenüber ihrer Umgebung hellere Objekte enthalten sind (mitte links). Dieses Bild wird unter Verwendung eines bestimmten, von der maximalen Fläche eines Rehkitzes abhängigen Helligkeitsgrenzwertes in ein Schwarz-Weiss-Bild (unten rechts) umgewandelt. Jeder Bereich zusammenhängender, weisser Pixel in diesem Bild wird als einzelne Region aufgefasst, die genau dann als Rehkitz klassifiziert wird, wenn sie folgende Bedingungen erfüllt:

- Die Fläche der Region in Pixel muss zwischen einem gegebenen Minimal- und Maximalwert liegen. Der Funktion *detect* werden Minimal- und Maximaldurchmesser eines zu suchenden Rehkitzes in Meter übergeben. Unter Berücksichtigung der Bodenpixelgrösse (engl. Ground Sample Distance) und unter Annahme einer kreisrunden Form der Rehkitze wird die minimal und maximal mögliche Fläche eines Rehkitzes in Pixel errechnet.

- Das Verhältnis der Halbachsenlängen einer Ellipse mit gleichem zweitem Zentralmoment wie die betrachtete Region darf einen der Funktion *detect* übergebenen Wert nicht übersteigen. Damit wird verhindert, dass unförmige, längliche Regionen als Rehkitze erfasst werden.
- Die durchschnittliche Helligkeit aller Pixel der Region im Originalbild muss einen der Funktion übergebenen Mindestwert erreichen. Damit wird verhindert, dass Objekte, die zwar relativ zu ihrer unmittelbaren Umgebung hell erscheinen, im Originalbild jedoch nicht besonders hell sind, fälschlicherweise als Rehkitze interpretiert werden.

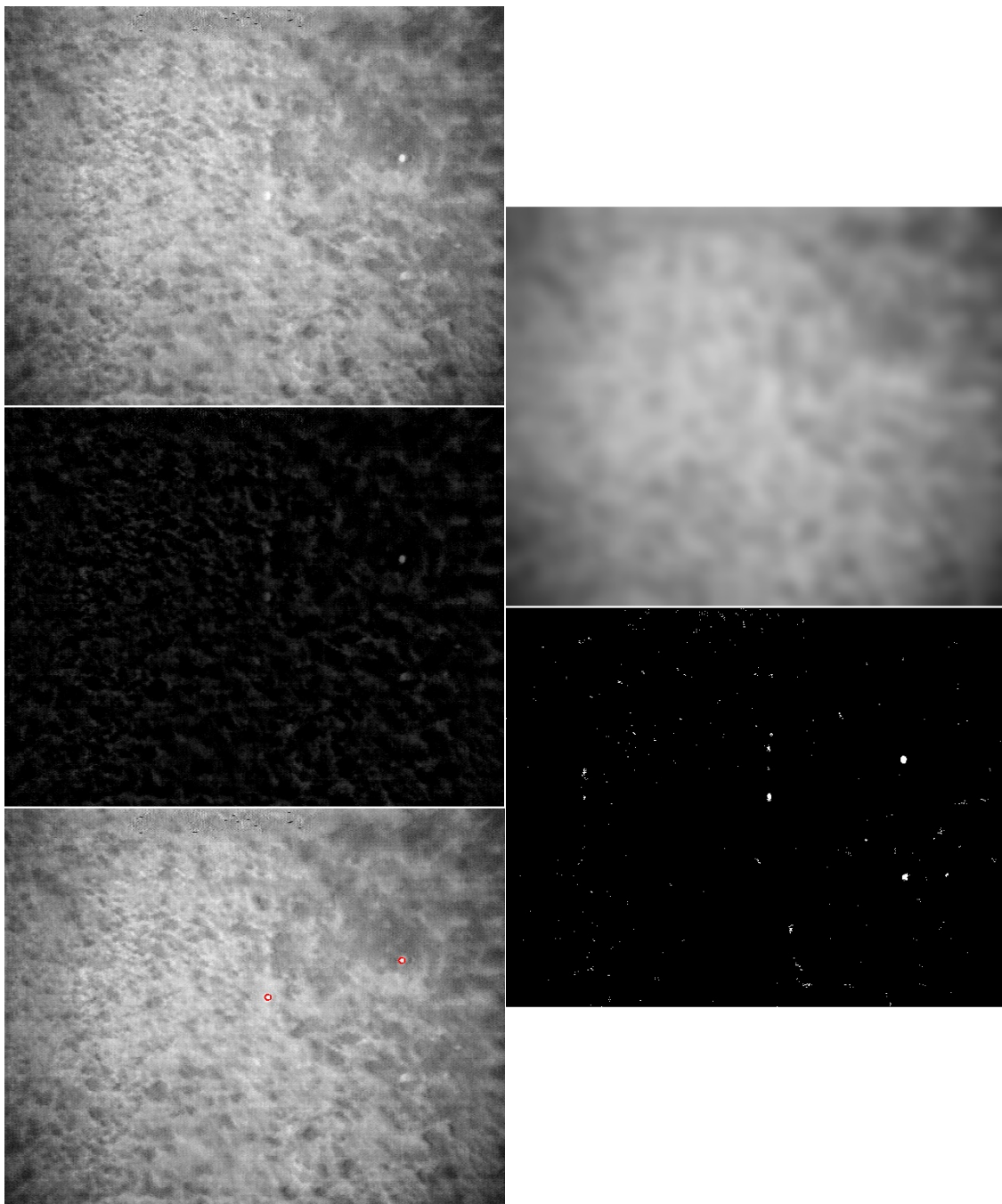


Abbildung 15: Schritte des Detektionsalgorithmus für Rehkitze

Die Funktion *detect* liefert als Rückgabewert die Schwerpunkte aller als Rehkitze klassifizierter Regionen in Pixelkoordinaten. In Abbildung 15 unten links sind die entsprechenden Regionen durch rote Kreise im Originalbild markiert.

3.5 Positionsbestimmung

3.5.1 Berechnung von Punktkoordinaten und verwendete Koordinatensysteme

Aus den Pixelkoordinaten eines Rehkitzes in einem Thermaleinzelbild und der Lage des Falcon im Moment der Bildaufnahme kann ein sowohl nach Lage wie auch Richtung bestimmter Sichtstrahl im dreidimensionalen Raum berechnet werden. Wird dieser Strahl mit einem Geländemodell geschnitten, entsteht ein Punkt, dessen dreidimensionale Koordinaten eindeutig bestimmt sind. Die verschiedenen Ausgangsdaten für diese Positionsbestimmung liegen allesamt in unterschiedlichen Referenzsystemen vor. Tabelle 4 beinhaltet eine Übersicht über sämtliche – teilweise nur für Zwischenschritte verwendeten – Koordinatensysteme und listet auf, welche Ausgangsdaten in welchem System vorliegen.

System	Koordinaten	Ursprung	Ausgangsdaten
Erdzentriertes, ellipsoidisches System (WGS84 Ellipsoid)	λ : geografische Länge ϕ : geografische Breite h : ellipsoidische Höhe	Erdschwerpunkt	- Geländemodell - Position Oktokopter
Erdzentriertes, kartesisches System	X, Y, Z: Kartesische Koordinaten	Erdschwerpunkt	-
Lokales, kartesisches, topozenrisches System	x, y, z: Kartesische Koordinaten	Beliebig, z.B. Schwerpunkt Geländemodell	-
Körpersystem Oktokopter	x_b, y_b, z_b : Kartesische Koordinaten	Durch GPS / IMU definiert	- Lagewinkel Oktokopter
Kamerasystem	x_c, y_c, z_c : Kartesische Koordinaten	Projektionszentrum	- Kamerawinkel - Parameter der Kamerakalibrierung
Bildsystem	X_i, y_i : Pixelkoordinaten bzw. 2D-Matrixindex	Obere linke Sensorecke	- Pixelkoordinaten Rehkitz

Tabelle 4: Übersicht verwendeter Koordinatensysteme

Das lokale, topozenrische Koordinatensystem ist – wie allgemein üblich – so definiert, dass die x-Achse nach Norden, die y-Achse nach Osten und die z-Achse in Richtung der Ellipsoidnormale des WGS-84 Ellipsoids durch den Ursprung nach oben zeigt. Als einziges der verwendeten Systeme

ist es damit ein Linkssystem. Der Ursprung des lokalen Systems kann grundsätzlich beliebig gewählt werden. Aus numerischen Gründen empfiehlt sich eine Wahl, bei der sämtliche Koordinaten möglichst klein sind und in einer ähnlichen Grössenordnung liegen. Dies ist der Fall, wenn der Schwerpunkt der Punkte des Geländemodells als Ursprung des lokalen Systems verwendet wird. In allen nicht auf der z-Achse liegenden Punkten weicht die Ellipsoidnormale von der z-Achse ab. Diese Abweichung liegt für Gebiete von wenigen hundert Metern Ausdehnung indes um mehrere Grössenordnungen tiefer als die Genauigkeit der Lagewinkel des Oktokopters und kann problemlos vernachlässigt werden.

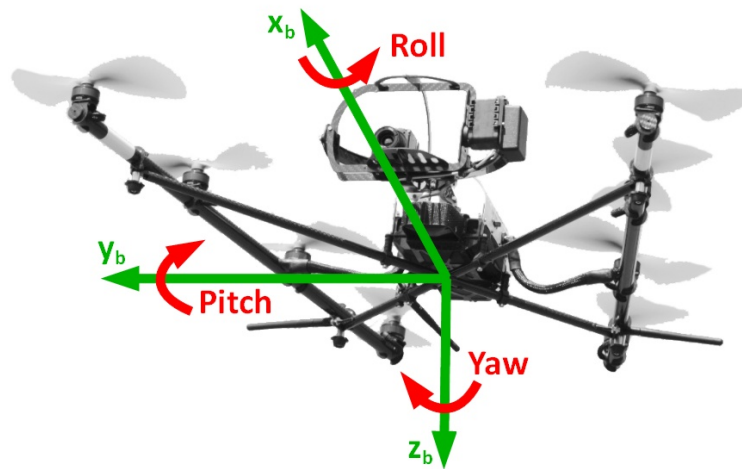


Abbildung 16: Körpersystem des Oktokopters und Eulerwinkel

Das Körpersystem des Oktokopters ist, wie in Abbildung 16 dargestellt, als kartesisches Rechtssystem definiert. Die x_b -Achse zeigt nach vorne (in Richtung der Kamerahalterung), die y_b -Achse von oben betrachtet nach rechts und die z_b -Achse nach unten. Die Lagewinkel Roll, Pitch und Yaw des Oktokopters beschreiben gemäss der «Luftfahrtnorm» [DIN 9300, 1990] als Eulerwinkel Drehungen um die besagten Achsen. Da durch jede Drehung die Achsen des Koordinatensystems ebenfalls ihre Lage ändern, ist die Drehreihenfolge relevant und muss festgelegt werden. Die Luftfahrtnorm schreibt für eine Transformation vom Körpersystem in ein topozentrisches System die Drehreihenfolge Roll → Pitch → Yaw vor. Bei aktivierter Neigungskompensation durch die Kamerahalterung muss im Fall des Oktokopters letztlich nur der Yaw-Winkel berücksichtigt werden – Roll und Pitchwinkel des Oktokopters werden bereits bei der Aufnahme durch die Kamerahalterung kompensiert.

Abbildung 17 stellt das Kamerasystem und das Bildsystem dar. Das Bildkoordinatensystem ist zweidimensional, verwendet als Einheit Pixel und wird derart ausgerichtet, dass die Pixelkoordinaten der Adressierung von Matrixelementen in Matlab entsprechen – das Element bzw. Pixel oben links hat die Koordinate (1,1). Das Kamerasystem verwendet dagegen metrische Einheiten und hat den Ursprung im senkrecht zur Sensorfläche über dem Bildhauptpunkt liegenden Projektionszentrum.

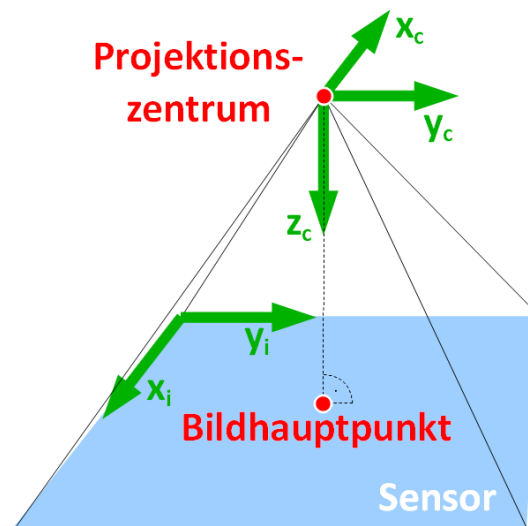


Abbildung 17: Kamerasystem und Bildsystem

Kamerasystem und Körpersystem des Oktokopters sind achsparallel, wenn die Kamera senkrecht nach unten gerichtet ist. Pitch und Roll-Winkel der Kamerahalterung sind in diesem Fall Null. Die im Poselog aufgezeichneten Kamerawinkel verwenden eine andere Definition (Zenit = -90° , Nadir = 90°) und müssen daher umgerechnet werden.

Das Schneiden von Sichtstrahl und Geländemodell könnte theoretisch in jedem der vorgestellten dreidimensionalen Koordinatensystemen durchgeführt werden - sinnvoll ist jedoch nur die Verwendung des lokalen topozentrischen Systems. Das Körpersystem des Oktokopters und das daran angehängte Kamerakoordinatensystem sind zeitlich bewegt und damit nicht für eine Auswertung über alle Zeitschritte bzw. Bilder hinweg geeignet. Die erdzentrierten Systeme wären eine auf den ersten Blick sinnvolle Wahl – werden doch letztlich ellipsoidische Koordinaten des Rehkitzes ausgegeben. Bereits die Approximation der Geländeoberfläche in erdzentrierten Koordinaten verursacht aber die erwähnten numerischen Probleme.

3.5.2 Transformationen und Kamerakalibrierung

Um Koordinaten aus einem der beschriebenen Systeme in ein anderes zu bringen, wurden diverse Transformationen in Matlab programmiert. Abbildung 18 bietet einen Überblick über diese Funktionen (Pfeile). Für mathematische Hintergründe zu allen Transformationen zwischen dem ellipsoi-

dischen, dem erdzentrierten kartesischen sowie dem topozenrischen System wird auf [Kahle, 2007] verwiesen. Die Transformationen zwischen Kamerasystem, Körpersystem des Oktokopters sowie topozenrischem System sind aus verschiedenen Rotationen und Translationen zusammengesetzt, die direkt im Quellcode nachvollzogen werden können.

Die Funktion *ind2cam* enthält nebst der eigentlichen Transformation vom Bildsystem ins Kamerasystem das Anbringen von Verzeichnungskorrekturen. Die dafür notwendigen Verzeichnungsparameter der FLIR Tau 640 wurden durch eine geometrische Kamerakalibrierung im Rahmen einer Masterprojektarbeit [Hartmann, 2011] bestimmt. Die dabei angewandte Vorgehensweise wird bereits in [Luhmann, 2010] beschrieben. Die verwendeten, weitgehend standardisierten Korrekturfunktionen wurden [Luhmann, 2003] entnommen. Sie kompensieren Effekte der radialsymmetrischen Verzeichnung, der tangentialen und asymmetrischen Verzeichnung sowie affine Abweichungen.

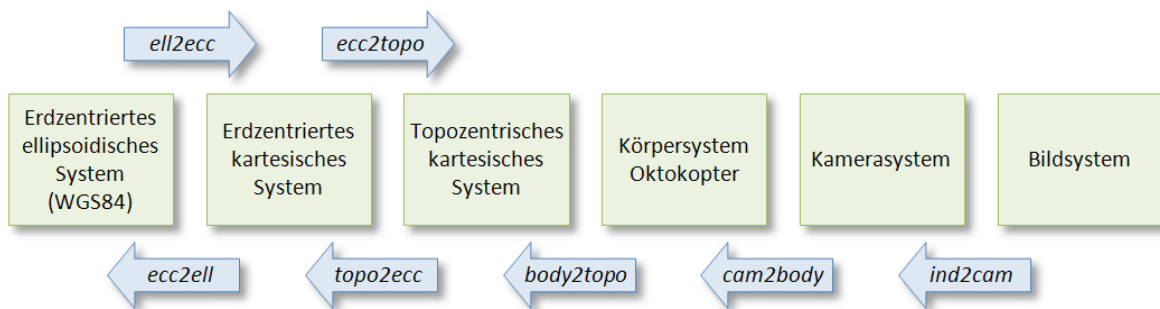


Abbildung 18: Übersicht Koordinatensysteme und Transformationsfunktionen

3.5.3 Approximation eines Geländemodells

Als Grundlage für das Geländemodell, das später mit dem Sichtstrahl durch einen als Rehkitz vermuteten Bildpunkt geschnitten werden soll, steht ein Datensatz mit einzelnen Geländepunkten zur Verfügung. Als Format für diesen Datensatz wurde das offene und lizenzfreie «GPS Exchange Format» (GPX) gewählt. Dateien im .gpx-Format sind XML-Dateien und dafür ausgelegt, die in GNSS-Empfängern für Navigationszwecke verwendeten Informationen wie Wegpunkte, Routen und Tracks zu speichern. Die meisten GNSS-Empfänger können .gpx-Dateien entweder ohne weitere Konvertierung verarbeiten oder zumindest über ein Datenaustauschprogramm lesen und schreiben. Stammen die Daten für ein Geländemodell aus einem GNSS-Empfänger, können sie als .gpx-Datei exportiert und mittels der Funktion *readgpx* in Matlab eingelesen werden. Die in der .gpx-Datei enthaltenen Punkte in ellipsoidischen Koordinaten stehen in einer Matrix für die weitere Verarbeitung zu Verfügung. Stammen die Daten für das Geländemodell aus einer belie-

bigen Quelle, können sie entweder mit einem Konvertierungsprogramm in eine .gpx-Datei umgewandelt oder manuell in Matlab importiert und mit der Funktion *writgpx* als .gpx-Datei abgespeichert werden.

Die Höhe von Punkten, die zwischen den Messpunkten des Datensatzes liegen, muss mit einem grundsätzlich frei wählbaren Interpolations- oder Approximationsverfahren abgeleitet werden. Je nach zu verwendendem Verfahren werden unterschiedliche Anforderungen an Verteilung und Anzahl der Punkte gestellt. In der vorliegenden Arbeit wird eine Ausgleichsfläche dritter Ordnung mit zehn Parametern verwendet, für deren Bestimmung mindestens zehn Punkte im Ausgangsdatsatz enthalten sein müssen:

$$z = f(x, y) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 y + c \cdot x y^2 + d \cdot y^3 + e \cdot x^2 + f \cdot x y + g \cdot y^2 + h \cdot x + i \cdot y + j$$

Eine solche Fläche, die jeder Lagekoordinate genau eine Höhe zuordnet, wird auch als 2.5-dimensionales Geländemodell bezeichnet. Die Parameter a bis j werden durch die Funktion *pts2surf* in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt, also so gewählt, dass die Quadrate der Höhenabweichung der Messpunkte von der ausgeglichenen Fläche minimiert werden:

$$\sum (f(x_{mess}, y_{mess}) - z_{mess})^2 = \min$$

Gleichzeitig gibt die Funktion *pts2surf* als Qualitätsmasse für die Angepasstheit der Oberfläche die Wurzel der mittleren quadratischen Höhenabweichung (Root Mean Square Error) aus.

3.5.4 Schnitt von Sichtstrahl und Geländemodell

Der Funktion *intersectsurf* müssen die zehn Parameter a bis j der approximierten Geländeoberfläche, das Projektionszentrum einer Einzelaufnahme (x_0, y_0, z_0) und der Richtungsvektor eines Sichtstrahls (d_x, d_y, d_z) in lokalen topozentrischen Koordinaten übergeben werden. Daraus errechnet sie den Schnittpunkt von Sichtstrahl und Gelände – die dreidimensionale Position eines vermuteten Rehkitzes.

Mathematisch entspricht das Schneiden von Geländeoberfläche und Sichtstrahl der Suche einer Nullstelle in folgender Funktion:

$$g(t) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 y + c \cdot x y^2 + d \cdot y^3 + e \cdot x^2 + f \cdot x y + g \cdot y^2 + h \cdot x + i \cdot y + j - z$$

Dabei gilt: $x = x_0 + t \cdot d_x$; $y = y_0 + t \cdot d_y$; $z = z_0 + t \cdot d_z$

Ist eine Nullstelle t_0 gefunden, gilt für die Position des Rehkitzes:

$$x_{Reh} = x_0 + t_0 \cdot d_x ; \quad y_{Reh} = y_0 + t_0 \cdot d_y ; \quad z_{Reh} = z_0 + t_0 \cdot d_z$$

3.6 Clusteranalyse und Datenexport

3.6.1 Clusteranalyse mit «DBSCAN»

Wird die Funktion *intersectsurf* für alle Einzelbilder, in denen Rehkitze detektiert wurden, aufgerufen und werden die ausgegebenen Punktkoordinaten gesammelt, entsteht eine dreidimensionale Punktwolke in lokalen, topozentrischen Koordinaten. Da Rehkitze über mehrere Bilder hinweg sichtbar sein müssten, wird ein Rehkitz innerhalb dieser Punktwolke durch mehrere, räumlich dicht beeinanderliegende Punkte – einen sogenannten Cluster – repräsentiert. Dasselbe gilt für Objekte, die einem Rehkitz im Thermalbild derart ähnlich sehen, dass sie ebenfalls in mehreren Bildern als Rehkitz eingestuft werden. Objekte dagegen, die einem Rehkitz sehr geringfügig ähneln, bilden weniger dichte Cluster oder einzelne, verstreute Punkte. Um aus dieser Punktwolke auf wenige, vielversprechende Kandidaten schliessen zu können, die später im Feld tatsächlich mittels GNSS-Handgerät aufgesucht werden sollen, muss eine sogenannte Clusteranalyse durchgeführt werden. Von zahlreichen möglichen Ansätzen wurde hierzu der bestehende Algorithmus «Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise» (DBSCAN) [Ester et al., 1996] – zu deutsch etwa «Dichtebasierte räumliche Clusteranalyse mit Rauschen» – ausgewählt und in der Matlabfunktion *dbscan* umgesetzt.

Der Algorithmus DBSCAN verwendet zwei Parameter: Die Nachbarschaftsdistanz ϵ und die Mindestpunktzahl k . Des weiteren werden drei Arten von Punkten unterschieden: «Dichte» Kernpunkte, «Dichte-erreichbare» Randpunkte sowie Rauschpunkte (Noise), die weder dicht noch Dichte-erreichbar sind. Ein Punkt ist genau dann Kernpunkt eines Clusters, wenn mindestens k andere Punkte innerhalb der Nachbarschaftsdistanz ϵ zu finden sind. Alle Nachbarn innerhalb der Nachbarschaftsdistanz gelten mindestens als Dichte-erreichbar und werden demselben Cluster zugeordnet. Erfüllen sie ihrerseits das Kriterium für einen Kernpunkt, gelten sie sogar als «Dichte-verbunden» und erweitern den Cluster um ihre eigene Nachbarschaft. Befindet sich ein Punkt innerhalb der Nachbarschaft eines Kernpunktes, der das Kriterium für einen Kernpunkt selbst nicht erfüllt, so ist dieser Punkt ein Dichte-erreichbarer Randpunkt. Randpunkte können von mehreren Clustern aus Dichte-erreichbar sein – ihre Zuordnung zu einem Cluster ist deshalb abhängig von der Reihenfolge, mit der der Algorithmus die Punkte durchläuft. Die Zuordnung der Kernpunkte zu Clustern sowie die Einordnung als Rauschpunkte sind exakt und unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge – der Algorithmus wird daher als «weitgehend deterministisch» eingestuft.

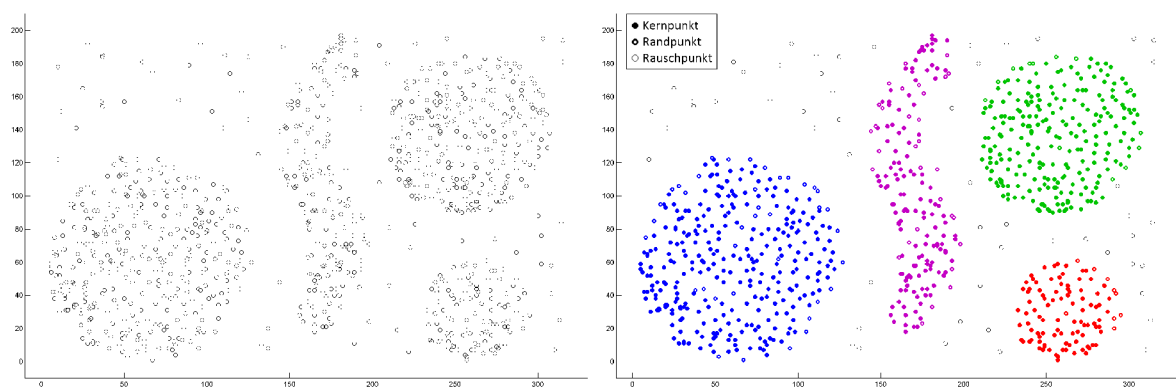


Abbildung 19: Beispiel Clusteranalyse mit DBSCAN ($k=5$, $\epsilon=10$)

Der beschriebene Algorithmus ist, wie in Abbildung 19 beispielhaft gezeigt wird, in der Lage, beliebig viele Cluster mit beliebigen Formen zu erkennen. Der verwendete zweidimensionale Testdatensatz wurde künstlich erzeugt und hat keine praktische Bedeutung. Das für die Nachbarschaftsdistanz verwendete Distanzmass kann beliebig gewählt werden und muss nicht der euklidischen Distanz entsprechen – was im Falle des Rehkitzclusters aber durchaus naheliegend und sinnvoll ist. Die Umsetzung des Algorithmus kann dem Programmcode und den Kommentaren der Matlabfunktion entnommen werden. Als Ausgabeparameter liefert die Funktion *dbscan* zwei Vektoren die für jeden Punkt die Clusternummer sowie die Information, ob es sich um einen Kern-, Rand-, oder Rauschpunkt handelt, beinhalten. Anwendungsbeispiele mit Punktdatensätzen aus Thermalaufnahmen des Oktokopters Falcon 8 werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

3.6.2 Medianbestimmung und Datenexport

Aus der Clusteranalyse resultiert eine Anzahl von Clustern, die zwischen Null und der Anzahl der überhaupt im Datensatz vorhandenen Punkte liegt. Innerhalb eines Clusters weisen die Punkte eine gewisse Streuung auf. Für die Rehkitzsuche mit GNSS-Handgerät soll je Cluster genau eine Koordinate bestimmt werden, die später im Feld aufgesucht werden kann. Diese Koordinate wird in jeder Dimension als Median aller Koordinatenwerte des Clusters bestimmt. Die Verwendung des Medians wird aufgrund der statistischen Robustheit etwa einer einfachen Mittelung vorgezogen.

Die Clustermediankoordinaten werden vom lokalen topozentrischen System ins erdzentrierte, ellipsoidische System (WGS84) transformiert und anschliessend mittels der Matlabfunktion *writgpx* als Wegpunkte – nicht zu verwechseln mit den in der Flugplanung verwendeten Wegpunkten – in eine .gpx-Datei geschrieben. Diese kann direkt oder mittels Übertragungssoftware auf ein GNSS-Handgerät geladen werden.

3.7 Genauigkeitsbetrachtungen

3.7.1 Genauigkeitsangaben

Da das vorgestellte System zur Rehkitzortung die Daten zahlreicher Sensoren nutzt, um letztlich die Position eines Rehkitzes zu ermitteln, sind die Fehlereinflüsse auf diese Position ebenso zahlreich. Der Versuch, die zu erwartende Genauigkeit des Gesamtsystems – also die Genauigkeit der Positionsangabe – aus den Genauigkeiten der Einzelsensoren abzuleiten, scheitert bereits daran, dass für die meisten Sensoren und Grössen gar keine Genauigkeitsangaben der Hersteller vorliegen. Die Sensordaten des Falcon 8 werden zudem in der Sensordatenfusion auf unbekannte Weise miteinander verrechnet, so dass selbst aus Herstellerangaben zu den Einzelsensoren keine Genauigkeiten der Ausgabegrössen abgeleitet werden könnten. Auf eine a-priori-Fehleranalyse wird daher in dieser Arbeit verzichtet. Die Genauigkeit des Gesamtsystems wird, wie in Kapitel 4 beschrieben, durch einen Testflug über Ziele mit bekannten Koordinaten empirisch ermittelt.

Um trotzdem aufzuzeigen, wo im umgesetzten Arbeitsablauf Potential für eine Genauigkeitssteigerung liegt, werden nachfolgend alle erkannten und vermuteten Fehlereinflüsse vorgestellt und, wo bekannt, ihre Grössenordnung angegeben. Zwecks besserer Übersicht werden die Fehlereinflüsse nach Lage, Höhe und Winkel gegliedert – wobei bedacht werden muss, dass Höhen- und Winkelabweichungen vor allem deshalb relevant sind, weil sie bei der Datenauswertung letztlich zu einem Lagefehler der Rehkitzkoordinaten führen. Die Höhenkomponente der Rehkitzkoordinate wird einzig und allein durch das Geländemodell bestimmt und ist für die spätere Suche im Feld unwichtig, da stets bekannt ist, dass die gesuchten Rehkitze am Boden liegen.

3.7.2 Fehlereinflüsse Lage

Die Lagegenauigkeit des vom Falcon 8 eingesetzten GPS-Empfängers LEA-5T wird durch den Hersteller u-Blox mit 2.5 m CEP angegeben [LEA-5T, 2009]. CEP steht für «Circular Error Probable» und beschreibt den Radius eines Kreises, in dem 50 % der Messwerte einer zweidimensional normalverteilten Grösse liegen. Bei Nutzung eines SBAS-Services wird die Genauigkeit mit 2.0 m CEP angegeben – allerdings ist diese Option auf dem Falcon aufgrund von Performanceproblemen des Empfängerchips deaktiviert.

Die im Poselog ausgegebene und in dieser Arbeit verwendete Position in ellipsoidischen Koordinaten (Länge und Breite) entspricht nicht direkt dem vom Empfänger gemessenen Wert, sondern wird bereits durch die Sensordatenfusion gefiltert. Durch die Verwendung der übrigen Sensordaten – insbesondere der von der IMU ermittelten Beschleunigungen – dürfte der im Poselog erfasste Wert genauer als die reine GPS-Messung sein.

Ein Lagefehler in ähnlicher Grössenordnung wie beim GPS-Empfänger des Falcon 8 ist beim GNSS-Handgerät für die Suche eines Rehkitzes im Feld zu erwarten. Der Hersteller Garmin etwa gibt für Handgeräte der aktuellen Baureihe an, dass bei Nutzung eines SBAS-Service in 95 % aller Messungen eine Lagegenauigkeit von unter 3 m erreicht wird [Garmin eTrex, 2007].

Zwischen Projektionszentrum der Thermalkamera und Ursprung des Körpersystems des Oktokopters besteht ein Abstand von ungefähr 20 cm, der zur Berechnung des Projektionszentrums aus Poselogdaten korrigiert werden muss. Dieser Versatz wird in den für diese Arbeit erstellten Programmen berücksichtigt, wurde selbst allerdings nie exakt bestimmt. Bei einer Grösse des Versatzes von ungefähr 20 cm wird der verbleibende Fehler auf unter 3 cm geschätzt. Angesichts der Grössenordnung übriger Abweichungen kann dieser Restfehler selbst bei einem weiterentwickelten System vernachlässigt werden. Aus diesem Grund wurden – obschon dies durchaus möglich wäre – keine weiteren Anstrengungen für eine präzisere Bestimmung des Versatzes unternommen. Der Restfehler hat auch eine Höhenkomponente und verursacht bei Schräglage des Oktokopters einen zusätzlichen Höhenfehler durch die Lagekomponente, die totale Höhenabweichung fällt aber für praktische Anwendungen noch weniger ins Gewicht als der Lagefehler.

In Lagefehlern resultieren auch alle Verzeichnungen der Thermalkamera. Durch die geometrische Kalibrierung der Kamera und rechnerische Berücksichtigung der ermittelten Korrekturen sollten diese Abweichungen weitgehend kompensiert werden. Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass die Kamera mit digital ausgelesenen Bildern kalibriert wurde – die Bilder auf dem Oktokopter aber analog ausgegeben und später mittels Framegrabber wieder digitalisiert werden. Dieser Vorgang kann die Bildgeometrie verändern – was am Beispiel der horizontalen Stauchung durch nicht quadratische Pixel augenscheinlich wird. Die Stauchung wird zwar rechnerisch korrigiert, es kann aber keineswegs ausgeschlossen werden, dass das Bild durch die analoge Übertragung und spätere Digitalisierung anderweitig verzerrt ist. Geometrisch kalibriert werden müsste eigentlich das «Gesamtsystem» aus Kamera, Übertragungsweg und Framegrabber.

3.7.3 Fehlereinflüsse Höhe

Die Flughöhe des Falcon ab Startpunkt wird aus Messungen des barometrischen Höhenmessers, kombiniert mit IMU-Daten, bestimmt. Der Hersteller Ascending Technologies macht keine Angaben zur Genauigkeit der resultierenden Höhe. Sie ist – gemäss Angaben der Entwickler und nach eigenen Erfahrungen – einer erheblichen Drift unterworfen, die während eines Fluges Werte von bis zu fünf Metern annehmen kann.

Die Genauigkeit des approximierten Geländemodells ist zum einen davon abhängig, wie genau die Höhen der als Ausgangsdaten verwendeten Geländepunkte bestimmt wurden – zum anderen ist entscheidend, wie genau die Ausgleichsfläche dritter Ordnung sich an diese Punkte anzupassen

vermag. Ersteres hängt von der Quelle der verwendeten Geländepunkte ab. Ein praktisches Beispiel mit Geländedaten aus verschiedenen Quellen wird im Rahmen des Testfluges in Kapitel 4 untersucht. Letzteres ist abhängig von der Rauheit des Geländes und kann durch die von der Funktion *pts2surf* ausgegebene mittlere Höhenabweichung (Root Mean Square Error) beurteilt werden.

Ob eine Höhenabweichung bei der Flughöhe oder beim Geländemodell entsteht, ist unerheblich – entscheidend ist die Abweichung der Höhendifferenz zwischen Oktokopter und Gelände vom korrekten Wert. Für Senkrechtaufnahmen über ebenem Gelände mit der Thermalkamera Tau 640 gilt aufgrund der Brennweite und der Sensorgrösse, dass ein Höhenfehler zu maximal 54 % in die Lage mit einfließt. Dieser Maximalwert wird für Pixel in den äussersten Ecken des Sensors erreicht, während im Nadir eine Höhenabweichung keinerlei Einfluss auf die Lage hat.

3.7.4 Fehlereinflüsse Winkel

Das Körperkoordinatensystem des Oktokopters und das Kamerakoordinatensystem können um Pitch- und Roll-Winkel der Kamerahalterung gegeneinander verkippt werden und liegen folglich grundsätzlich nicht achsparallel. Selbst wenn die Kamerahalterung in die Nullstellung (Pitch- und Roll-Winkel = 0°) gedreht wird und beide Koordinatensysteme den Messwerten zufolge achsparallel liegen sollten, verbleibt in der Realität ein gewisser Winkelversatz. Dieser ist auf die mechanische Bautoleranz des Oktokopters, der Kamerahalterung sowie der Servomotoren zurückzuführen – seine Grössenordnung wird vom Hersteller nicht angegeben und kann ohne den Aufbau einer geeigneten Kalibriervorrichtung nicht bestimmt werden.

In Frage gestellt werden muss sowohl die kurzfristige als auch die langfristige zeitliche Konstanz dieses Versatzes. Ist die aktive Neigungskompensation durch die Kamerahalterung in Betrieb, wird die aktuelle Neigung des Falcons ständig durch die Kamerahalterung kompensiert. Die dazu notwendigen Steuerbefehle werden nach Herstellerangaben in der Datenfusion mit einer Rate von 1kHz berechnet. Wie schnell und präzise die Servomotoren diese Befehle tatsächlich umsetzen können, ist nicht bekannt – zumindest ist von blossen Auge keine Verzögerung erkennbar. Längerfristig könnte der beschriebene Winkelversatz durch mechanische Veränderungen im Wert variieren.

Die Lagewinkel Pitch, Roll und Yaw des Falcon werden durch IMU und Magnetfeldsensoren bestimmt. Sie fliessen entweder direkt in die Transformation zwischen Körperkoordinatensystem und topozentrischem System ein oder werden bei aktiver Neigungskompensation durch die Kamerahalterung kompensiert (Pitch- und Roll-Winkel) und kommen indirekt in der Auswertung zum Tragen. Der Hersteller Ascending Technologies gibt für die selbstentwickelte IMU keine Genauigkeiten an und empfiehlt stattdessen, Testmessungen durchzuführen.

4 Resultate

4.1 Matlabanwendungen

4.1.1 Videoaufzeichnung

Die Matlabapplikation *capturegui*, zu sehen in Abbildung 20, ist eine Anwendung mit grafischer Benutzeroberfläche und dient der Aufnahme von Videobildern. Die Bilddaten werden vom Framegrabber mittels Directshow-Treiber geliefert, in einem Vorschaufenster angezeigt und auf Wunsch abgespeichert. Eine Statuszeile informiert über den aktuellen Zustand der Applikation (z.B. «Anwendung startet», «Vorschau läuft», etc.). Nebst Bilddaten erfasst die Anwendung Zeitstempel für die Aufzeichnungszeitpunkte jedes einzelnen Frames eines Videos. Ein Kontrollkästchen (rechts unterhalb des Vorschaufensters) lässt dem Benutzer die Wahl, ob das Videobild mit der vom Framegrabber gelieferten Auflösung von 720 x 576 Pixel aufgezeichnet oder auf das eigentliche Thermalbild ohne schwarze Ränder beschnitten sowie horizontal skaliert werden soll. Die Bilddimensionen entsprechen in diesem Fall der Kameraauflösung von 640 x 512 Pixel. Durch Druck auf den entsprechenden Knopf (unten links) wird ein Dateiname für die zu erstellende .avi-Videodatei abgefragt und nach erneuter Bestätigung durch den Benutzer die Aufzeichnung gestartet. Während der Aufzeichnung werden die anfallenden Bilddaten im Arbeitsspeicher zwischengelagert (siehe dazu Infocfeld mit aktueller Auslastung) und so schnell wie möglich auf die Harddisk geschrieben. Im Idealfall vermag der Schreibvorgang mit der Aufzeichnung Schritt zu halten, so dass keine Anhäufung von Bilddaten im Arbeitsspeicher entsteht. Unter schlechteren Bedingungen – etwa bei starker Auslastung des Computers oder Abschaltung der Harddisk aufgrund von Erschütterungen – verbleiben die Bilddaten im Arbeitsspeicher. Die Aufzeichnung wird abgebrochen, wenn der Arbeitsspeicher voll ist oder wenn der Benutzer die Aufzeichnung mit dem entsprechenden Knopf (unten rechts) beendet. Alle noch im Arbeitsspeicher wartenden Bilder werden in die Videodatei geschrieben, bevor die Benutzeroberfläche wieder für Eingaben freigegeben wird. Die aufgezeichneten Videos verwenden eine Framerate von $8\frac{1}{3}$ Hz und enthalten Graustufenbilder mit einer Farbtiefe von 8 bit. Die Zeitstempel werden in einer einzelnen .csv-Datei mit gleichem Pfad und Dateiname wie das erstellte Video abgelegt – in Anlehnung an das Poselog wird diese Datei nachfolgend als «Timelog» bezeichnet.



Abbildung 20: Rehkitzrettung - Videoaufzeichnung

4.1.2 Datenauswertung

Die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Funktionen erledigen jeweils einen Schritt auf dem Weg von den Ausgangsdaten zu den Rehkitzkoordinaten und müssen in einer sinnvollen Reihenfolge ausgeführt werden. Für sich alleine verfügen sie weder über eine Benutzeroberfläche, noch über eine grafische Ausgabe. Diese Funktionalität wird durch die vier Anwendungen *surfgui*, *syncgui*, *videogui* und *clustergui* bereitgestellt, die alleine nicht lauffähig sind und ihrerseits von der zentralen Anwendung *maingui* aus gestartet werden. Sie alle verfügen über eine grafische Benutzeroberfläche und bieten dem Anwender einen komfortablen Zugang zur Durchführung der Rehkitzortung, ohne dass er sich um einzelne Funktionen und Variablen kümmern müsste.

Das Hauptprogramm *maingui*, dargestellt in Abbildung 21, erlaubt dem Anwender, durch Druck auf die jeweiligen Knöpfe (aktive Knöpfe auf linker Seite) Dateien für Geländedaten (.gpx-Datei), Poselog (.csv-Datei), Timelog (.csv-Datei) und Video (.avi-Datei) anzugeben. Tatsächlich geladen werden die definierten Daten erst bei ihrer Verwendung in einem der Unterprogramme. In einem Textfeld muss zusätzlich ein Vektor mit Bildnummern aller Kameraschwenks eingetippt werden.

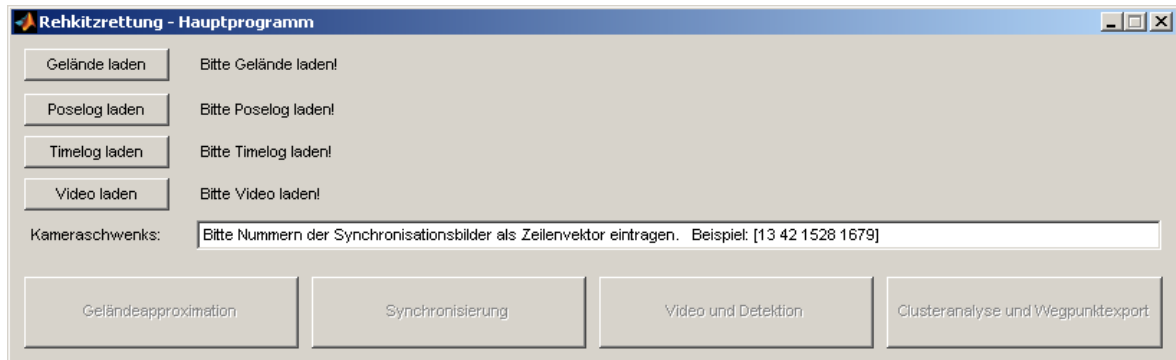


Abbildung 21: Rehkitzrettung - Hauptprogramm nach Programmstart

Abhängig davon, welche Ausgangsdateien vom Nutzer bereits festgelegt und welche Auswertungsschritte bereits durchgeführt wurden, werden die Knöpfe im unteren Teil des Fensters freigeschaltet und erlauben sequentiell den Zugriff auf die vier Unterprogramme. In Abbildung 22 wurden sämtliche Ausgangsdateien angegeben und alle Auswertungsschritte durchgeführt, so dass dem Anwender der Zugriff auf alle Unterprogramme gestattet ist.

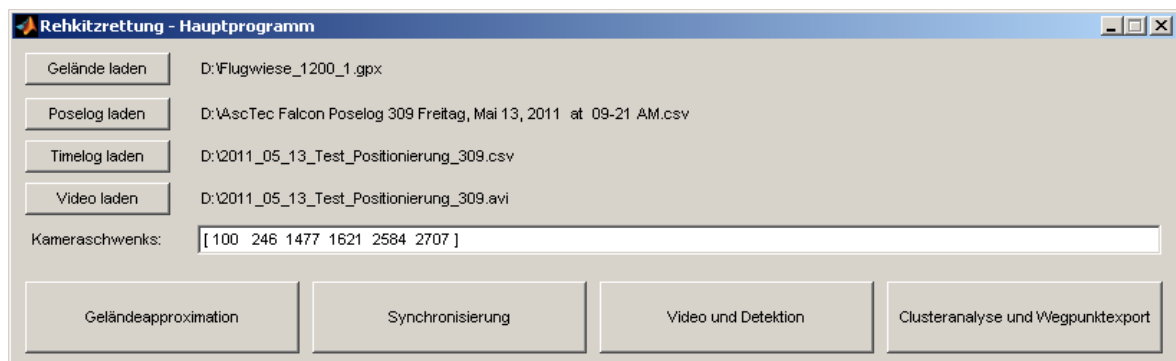


Abbildung 22: Rehkitzrettung - Hauptprogramm nach Durchführung sämtlicher Arbeitsschritte

4.1.3 Geländeapproximation

Über den Knopf «Geländeapproximation» wird das Unterprogramm *surfgui*, dargestellt in Abbildung 23, aufgerufen und in einem neuen Fenster geöffnet. Wahlweise können in diesem die approximierte Geländeoberfläche, die gemessenen Geländepunkte oder beides dargestellt werden. Die Ausgleichs- bzw. Approximationsfläche wird als Gittermodell gezeichnet und kann mit den herkömmlichen Grafikmanipulationswerkzeugen von Matlab (siehe Toolleiste) vergrößert, verkleinert, verschoben und gedreht werden. Mit dem Werkzeug «Data Cursor» lassen sich Koordinatenwerte einzelner Gitter- oder Geländepunkte abgreifen. Die Rasterweite des Gittermodells sowie dessen Überhöhung können vom Benutzer festgelegt werden – wobei diese Einstellungen nur Einfluss auf die Darstellung im aktuellen Fenster haben und das eigentliche Geländemodell nicht beeinflussen. Ein weiteres Textfeld präsentiert dem Anwender die von der eigentlichen Ausgleichsfunktion ermittelte Wurzel der mittleren quadratischen Höhenabweichung (Root Mean Square Error). Die gesamte grafische Ausgabe des Unterprogramms *surfgui* hat rein informativen Charakter. Für die weitere Auswertung notwendig ist lediglich die Berechnung der Parameter der Approximationsfläche, die bereits beim Aufruf des Unterprogramms erfolgt.

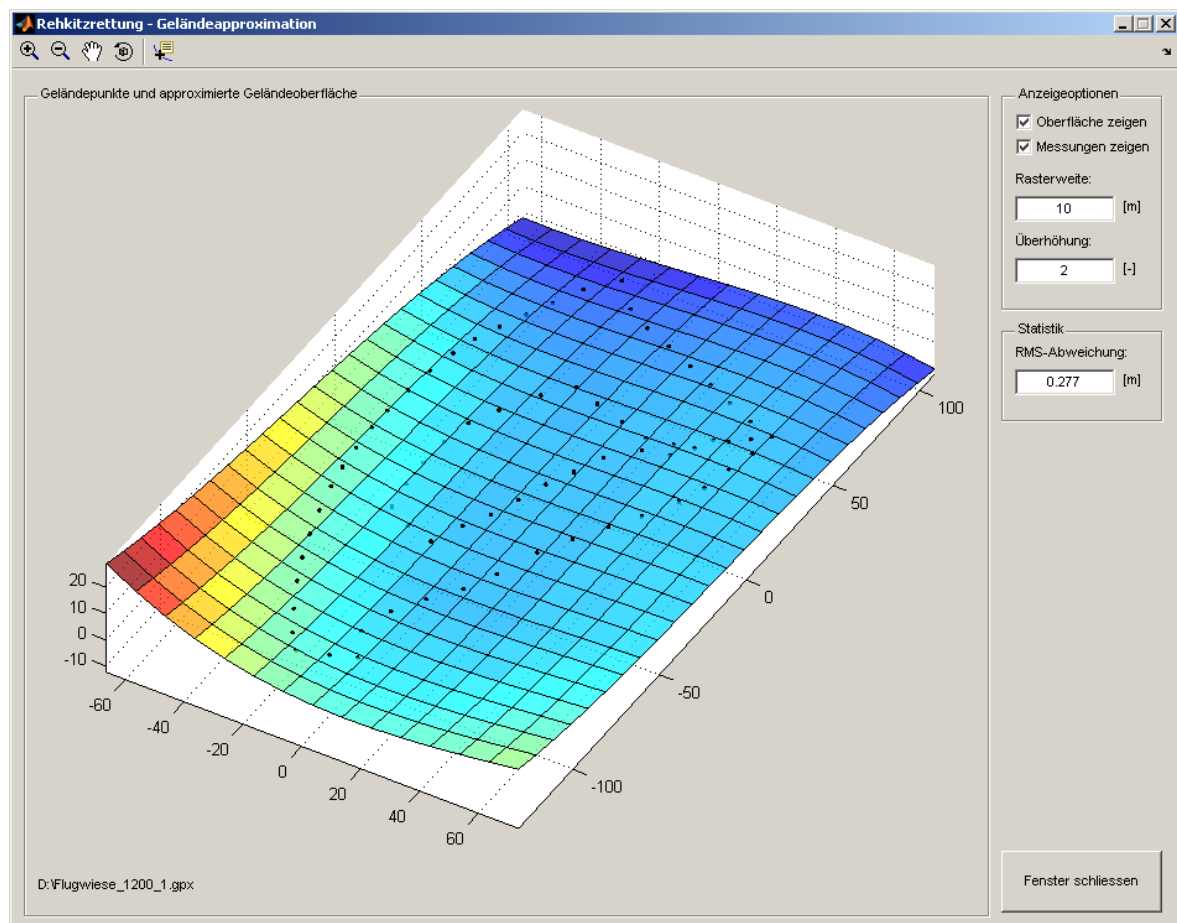


Abbildung 23: Rehkitzrettung - Geländeapproximation

4.1.4 Synchronisierung

Über den Knopf «Synchronisierung» im Hauptprogramm wird das nächste Unterprogramm *surfgui* gestartet. Wie bereits bei dem Unterprogramm zur Geländeapproximation werden die wesentlichen Berechnungen – nämlich die Synchronisierung von Poselog und Video unter Zuhilfenahme des Timelogs – bereits vor Darstellung des Fensters mit der Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 24) durchgeführt. Die Benutzeroberfläche hat wiederum rein informativen Charakter. Nebst der für die Synchronisierung verwendeten Dateien (Poselog und Timelog) werden die im vorangehenden Kapitel erläuterten Qualitätsmasse der Synchronisierung dargestellt. Sie ermöglichen ein Urteil darüber, ob die berechnete Synchronisation korrekt ist oder ob die Ausgangsdaten allenfalls Fehler enthalten, die eine korrekte Synchronisation verunmöglichen. Entdeckte Fehler müssen – falls überhaupt möglich – in den Ausgangsdaten korrigiert werden.

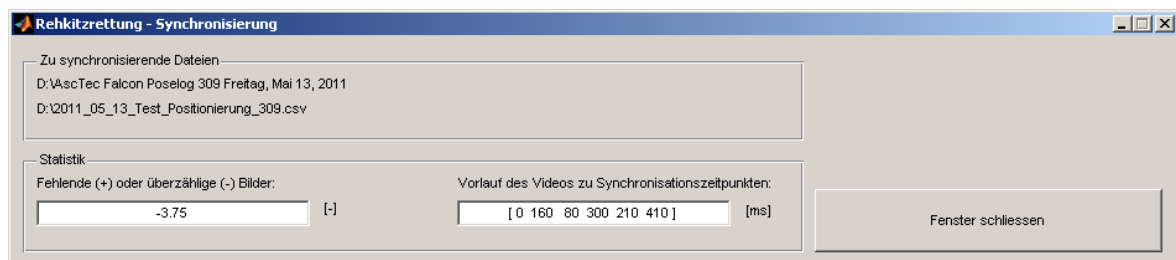


Abbildung 24: Rehkitzrettung - Synchronisierung

4.1.5 Video und Detektion

Mit dem Knopf «Video und Detektion» im Hauptprogramm wird das Unterprogramm *videogui* aufgerufen. Es dient der Betrachtung des Thermalvideos und der manuellen oder automatischen Detektion von Rehkitzen. Voraussetzung dafür ist, dass vorgängig eine korrekte Synchronisierung durchgeführt wurde. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, wird der Grossteil des Fensters durch das Thermalbild eingenommen. Ein darunterliegender Schieberegler bestimmt, welches Einzelbild des Videos angezeigt wird. Die aus dem Poselog interpolierten Lagedaten zum aktuell dargestellten Bild werden im Panel oben rechts angezeigt. Im darunterliegenden Panel können sämtliche Parameter der automatischen Suche vom Anwender festgelegt werden. Fehlerhafte bzw. nicht interpretierbare Eingaben werden hellrot hinterlegt und nicht akzeptiert. Zu Testzwecken kann die automatische Suche über ein Optionsfeld im Panel «Punktcharakteristik» so eingestellt werden, dass die Bilddaten vor der Detektion invertiert werden. Dadurch werden dunkle statt helle Objekte erkannt – etwa Zieltafeln in Form von Aluplatten wie sie im Beispiel in Abbildung 25 zu sehen sind. Über den Knopf «Automatische Detektion» kann die Suche gestartet werden. Ein Wartebalken zeigt den Fortschritt des Suchvorganges an. Detektierte Punkte werden in den Bildern durch rote Kreise markiert. Durch Linksklick können im Thermalbild weitere Punkte manuell hinzugefügt –

durch Rechtsklick bestehende, auch automatisch detektierte, entfernt werden. Mittels zweier Pfeilknöpfe (unten links) kann rasch zum nächsten oder vorangehenden Bild mit detektierten Punkten gesprungen werden. Sämtliche detektierten Punkte aller Bilder können als .mat-Datei (Matlab-Datenformat) exportiert und später wieder importiert werden. Um Mehrfachdetektionen zu vermeiden, werden zu Beginn eines Suchvorgangs oder vor dem Import früher detektierter Punkte die momentan detektierten Punkte gelöscht. Der Anwender wird vor der Löschung gefragt, ob er diesen Vorgang tatsächlich durchführen will.

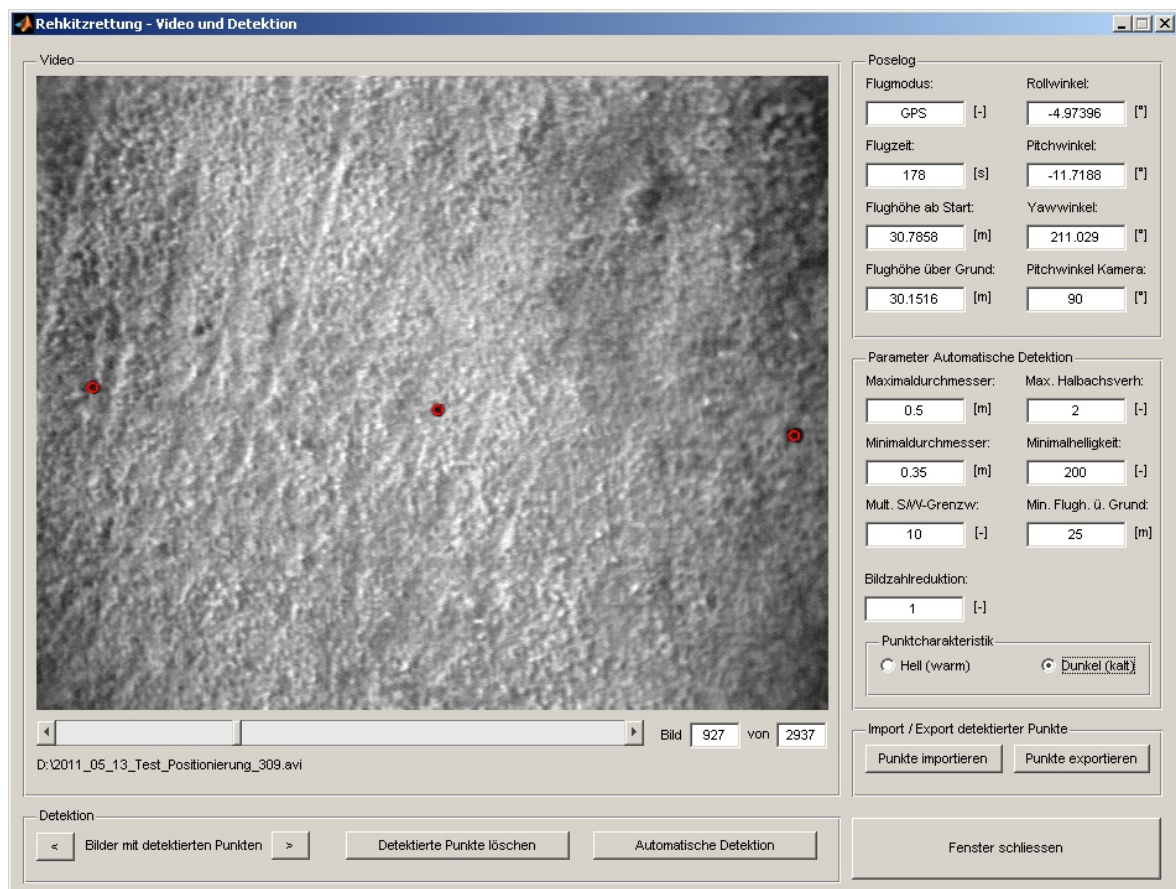


Abbildung 25: Rehkitzrettung - Video und Detektion

4.1.6 Clusteranalyse und Wegpunktexport

Durch Klick auf den Knopf «Clusteranalyse und Wegpunktexport» im Hauptprogramm wird das Unterprogramm *clustergui* gestartet. Der Knopf ist nur aktiv, wenn in den Thermalbildern mindestens ein Punkt als Rehkitz markiert wurde. Noch vor Anzeige der eigentlichen Benutzeroberfläche werden aus sämtlichen detektierten Bildpunkten dreidimensionale Koordinaten abgeleitet und in der dadurch entstehenden Punktwolke eine Clusteranalyse mit voreingestellten Parameterwerten durchgeführt. Da diese beide Vorgänge jeweils einige Sekunden dauern können, wird der Anwender mit den in Abbildung 26 gezeigten Wartebalken über den Fortschritt informiert.

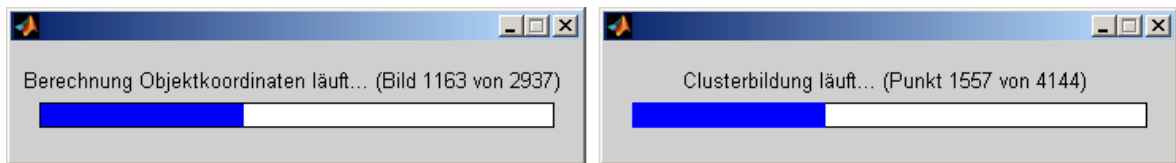


Abbildung 26: Wartebalken zu GUI Clusteranalyse und Wegpunktexport

Nach erfolgter Berechnung wird die Punktwolke, wie in Abbildung 27 zu sehen ist, in einem neuen Fenster als zweidimensionale Grafik dargestellt. Auf eine dreidimensionale Darstellung wurde verzichtet, da eine solche wesentlich schwieriger zu interpretieren wäre, ohne tatsächlich einen grösseren Informationsgehalt zu bieten – die Höhe sämtlicher Punkte der Punktwolke wird ohnehin durch die Geländeoberfläche bestimmt. Alle Clusterpunkte – im Beispiel in Abbildung 27 wurden zwei erkannt – werden in der beschriebenen Darstellung je Cluster einheitlich eingefärbt. Rauschpunkte werden schwarz dargestellt. Über zwei Kontrollkästchen (am rechten Rand) kann der Anwender zusätzlich die gemessenen Geländepunkte sowie den Flugpfad einblenden – beide werden in grauer Farbe dargestellt.

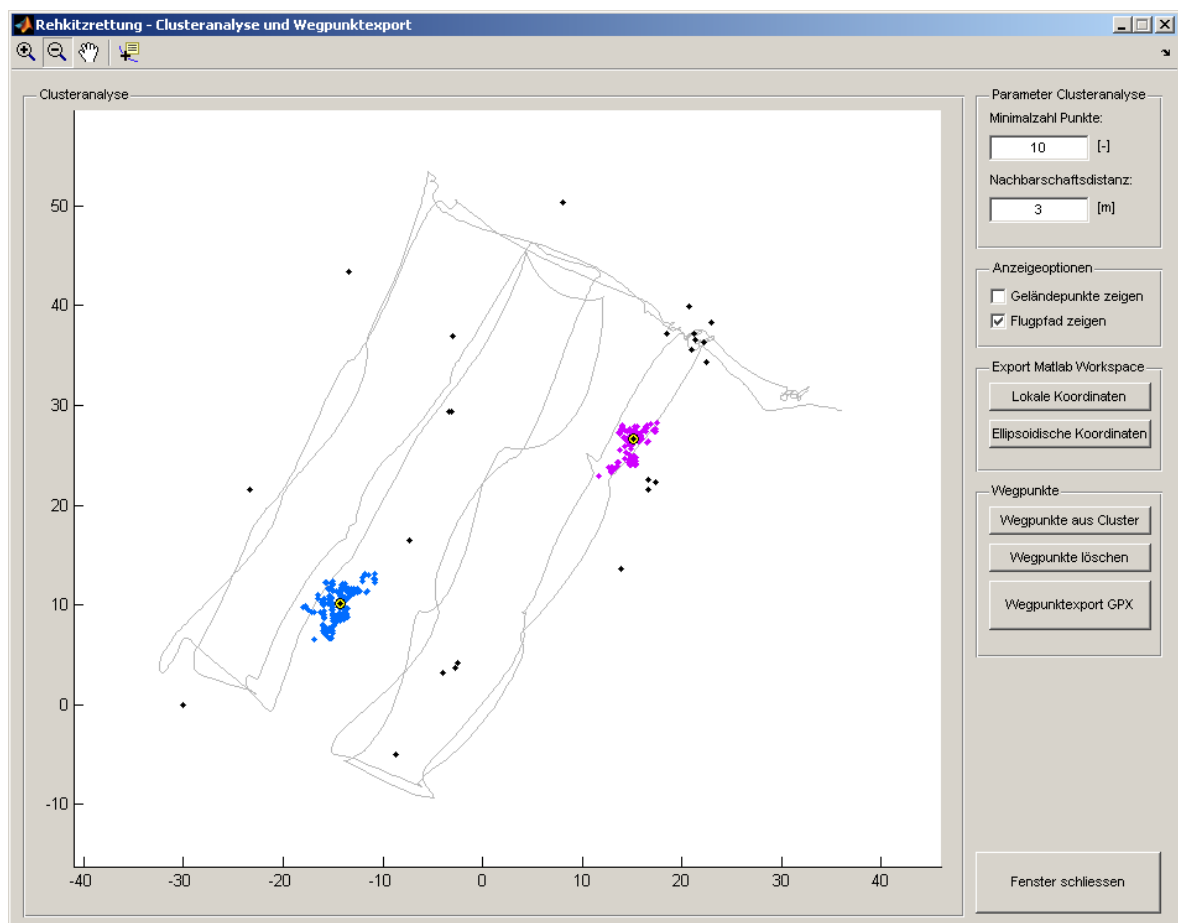


Abbildung 27: Rehkitzrettung - Clusteranalyse und Wegpunktexport

Die Grafik kann mit den herkömmlichen Grafikmanipulationswerkzeugen von Matlab (siehe Toolleiste) vergrößert, verkleinert und verschoben werden. Mit dem Werkzeug «Data Cursor» lassen sich Koordinatenwerte einzelner Punkte abgreifen – egal ob es sich um Clusterpunkte, Geländepunkte oder Punkte des Flugpfades handelt.

Die Parameter ε und k des Clusteralgorithmus DBSCAN können vom Nutzer frei gewählt werden (rechts oben) – die Clusterbildung wird nach jeder Änderung eines Parameters neu gestartet. Zu jedem Cluster wird automatisch ein zweidimensionaler Wegpunkt (gelb-schwarze Markierung) für die spätere Rehkitzsuche im Feld bzw. den Export auf ein GNSS-Handgerät erstellt. Die Koordinaten des Wegpunktes errechnen sich in jeder Dimension einzeln als Median aller Koordinatenwerte des Clusters. Durch Rechtsklick in der Grafik können unerwünschte Wegpunkte gelöscht – durch Linksklick manuell zusätzliche hinzugefügt werden. Über die entsprechenden Knöpfe können die Koordinaten aller Wegpunkte bzw. Rehkitze in den Matlabworkspace exportiert oder in eine .gpx-Datei (GPS Exchange Format) mit Dateiname nach Wahl des Anwenders geschrieben werden. Diese Datei kann anschliessend auf ein GNSS-Handgerät übertragen werden – wozu die Datei je nach verwendetem Gerät mittels eines Dateimanagers direkt auf das Gerät kopiert oder mit einem Übertragungsprogramm verschoben werden muss.

4.2 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen

4.2.1 Genauigkeit des Geländemodells

Die Ausgangsdaten für die Approximation eines Geländemodells – bestehend aus Einzelpunkten, deren Koordinaten im Feld durch Messung bestimmt wurden – können aus unterschiedlichen Quellen stammen. In der vorliegenden Arbeit werden Daten aus folgenden Quellen verwendet:

- GNSS-Messungen mit dem geodätischen Empfänger «GPS 1200» des Herstellers «Leica» unter Verwendung von Referenzdaten des Echtzeitpositionierungsdienstes swipos-GIS/GEO (kostenpflichtiger Service der Swisstopo [URL: swipos]).
- GNSS-Messungen mit dem Low-Cost-Handgerät «eTrex Legend» des Herstellers «Garmin» unter Verwendung von Referenzdaten des SBAS-Service «EGNOS» (kostenfrei).
- Lidar-Messungen. Ausschnitt aus Daten des digitalen Geländemodells «DTM-AV» (kostenpflichtiger Datensatz der Swisstopo [URL: DTM-AV]).

Anhand eines Testgebietes auf dem Gelände des ETH-Campus Höggerberg in Zürich, dargestellt in Abbildung 28, werden Messungen aus diesen drei Quellen verglichen. Mit dem GPS 1200 wurden 72 einzelne Geländepunkte am Rand sowie im Inneren des Gebietes aufgenommen (siehe Abbildung 29). Aufgrund ihrer Messgenauigkeit im Zentimeterbereich sind diese um mehrere Grössenordnungen genauer als die übrigen Messungen und werden für die weitere Auswertung als fehlerfrei betrachtet. Mit dem eTrex Legend wurden auf einem ähnlichen Pfad durch kontinuierliche Aufzeichnung 1641 Einzelmessungen getätigt. Aus den Daten des DTM-AV mit einer Rasterweite von 2 m wurde ein Bereich ausgeschitten, der dem zweidimensionalen, umhüllenden Polygon der GNSS-Messungen mit GPS 1200 entspricht und 3002 Höhenwerte enthält.



Abbildung 28: Testgebiet, Aluplatten und Flugpfad [Orthofoto: Google Earth]

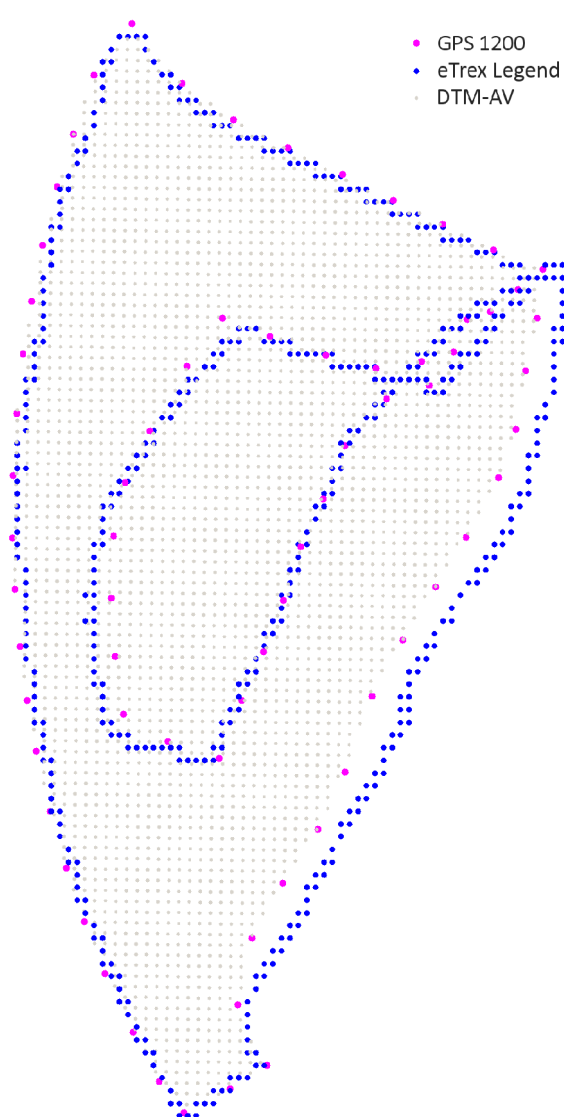


Abbildung 29: Geländepunkte im Testgebiet

Aus jedem Datensatz wird eine Ausgleichs bzw. Approximationfläche dritter Ordnung abgeleitet und mit den als fehlerfrei betrachteten Messungen des GPS 1200 verglichen. Als Qualitätsmass für die Angepasstheit der Oberfläche wird die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Error, RMSE) der Höhenwerte in allen Messpunkten des GPS 1200 Datensatzes berechnet. Die Resultate sind in Tabelle 5 aufgeführt.

	GPS 1200	eTrex Legend	DTM-AV
Root Mean Square Error	0.28 m	1.19 m	0.46 m

Tabelle 5: Root Mean Square Error der approximierten Geländeoberflächen

Die Resultate der an die Messungen des GPS 1200 angepassten Oberfläche zeigen, dass die verwendete Approximationsmethode für das vorliegende Gelände geeignet ist und dieses mit genügender Genauigkeit zu modellieren vermag. Der RMSE von 0.28 m liegt nicht erheblich über der natürlichen Rauheit des von zahlreichen Traktorspuren durchzogenen Geländes. Die aus Daten des DTM-AV approximierte Oberfläche weist mit 0.46 m einen RMSE auf, der trotz Annäherung durch die Fläche dritter Ordnung unter der von der Swisstopo angegebenen Höhengenaugkeit von 0.5 m (1σ) liegt. Das aus Messungen des eTrex Legend approximierte Modell ist mit einem RMSE von 1.19 m bedeutend ungenauer. Wird berücksichtigt, dass ein Höhenfehler zu maximal 54 % in einen allfälligen Lagefehler einfließt, können diese Messungen für das vorgestellte System zur Rehkitzrettung durchaus in Betracht gezogen werden. Anzustreben wäre aber eine Verwendung der genaueren DTM-AV Daten, da diese für das gesamte Mittelland vorliegen und es lediglich ein lizenzrechtliches oder finanzielles Problem darstellt, sie nutzen zu können. Eine Erfassung des Geländes mittels geodätischen Empfängern kommt aus Kostengründen für Praxiseinsätze ausserhalb der Forschung und Entwicklung nicht in Frage.

Die vorgestellten Resultate dürfen keineswegs verallgemeinert werden, hängt doch die Genauigkeit der GNSS-Messungen von der Satellitensichtbarkeit und die Angepasstheit der Ausgleichsfläche von der Geländebeschaffenheit ab. Sollten bei zukünftigen Entwicklungen ausschliesslich die regelmässigen Rasterdaten des DTM-AV für die Höhenmodellierung verwendet werden, könnten andere Approximations- oder Interpolationsmodelle verwendet werden.

4.2.2 Genauigkeit der Positionsbestimmung

Um eine Aussage über die Genauigkeit der vom vorgestellten System ermittelten Rehkitzkoordinaten machen zu können, wurde auf dem im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Testgelände ein Testflug mit über Zieltafeln mit bekannten Koordinaten durchgeführt.

Als Ziele wurden dazu 16 kreisrunde, blanke Aluminiumplatten mit einem Durchmesser von 30 cm verwendet. Diese reflektieren hauptsächlich den kalten Himmel und sind in Thermalbildern wie in Abbildung 25 als schwarze Punkte erkennbar. Die Platten wurden, wie in Abbildung 28 dargestellt, in einem regelmässigen Raster von vier mal vier Platten ausgelegt. Die Lagekoordinaten der Platten entsprechen den Lagekoordinaten der in der Flugplanung verwendeten Wegpunkte. Die Absteckung der Plattenpositionen erfolgte mit GPS 1200 unter Nutzung des Echtzeitpositionierungsdienstes swipos-GIS/GEO. Nach der Platzierung jeder Platte wurde ihre definitive Position ebenfalls mittels GPS 1200 nochmals erfasst. Die so ermittelten Koordinaten haben eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern und werden für die weitere Auswertung als fehlerfrei betrachtet. Sie bilden den wahren Wert oder die Sollkoordinate, mit der die später ermittelten «Rehkitzpositionen» verglichen werden.

Die Flugplanung erfolgte in der zum Falcon gehörenden Steuersoftware «AscTec AutoPilot Control». Definiert wurde – wie in der Fotogrammetrie üblich – ein Streifenflugmuster, das in diesem Fall vier Streifen umfasst (siehe Abbildung 28 oder Abbildung 9 in Kapitel 2). Die Flughöhe wurde auf 30 m, die Querüberdeckung auf 60 % festgelegt. Da die Koordinaten der Aluplatten wie erwähnt den Wegpunkten der Flugplanung entsprechen, ist sichergestellt, dass alle Platten im Bereich der doppelten Querüberdeckung zu liegen kommen. Die Längsüberdeckung wird durch Fluggeschwindigkeit des Falcon, Flughöhe und Aufzeichnungsrate der Kamera bestimmt. Da die windabhängige Fluggeschwindigkeit in der Flugplanungssoftware nicht angegeben werden kann, ist die Längsüberdeckung nicht vorgängig bekannt. In der Praxis ist sie jedoch – wie sich gezeigt hat – stets bei weitem ausreichend. Die Flughöhe und Querüberdeckung wurden in einer sinnvoll erscheinenden Grössenordnung gewählt, dabei aber keineswegs genauer evaluiert oder wissenschaftlich begründet. Eine Analyse des Einflusses der Flugplanungsparameter auf Zeitbedarf, Genauigkeit und Zuverlässigkeit wäre zu einem späteren Zeitpunkt ein wichtiger Schritt – momentan befindet sich das vorgestellte System dafür in einem zu frühen Entwicklungsstadium.

Das definierte Flugmuster mit vier Streifen wurde während eines Fluges zweimal abgeflogen. Jeder Streifenflug nahm dabei ungefähr 90 Sekunden in Anspruch – der gesamte Flug inklusive Start, Kameraschwenks vor, zwischen und nach den Streifenflügen sowie Landung dauerte acht Minuten. Die Auswertung erfolgte vollumfänglich mit den beschriebenen Matlabanwendungen. Die Aluplatten wurden zunächst mit dem automatischen Detektionsalgorithmus unter Verwendung der Einstellung «Punktcharakteristik: dunkel (kalt)» gesucht. Anschliessend wurden in sämtlichen Thermalbildern nicht detektierte Aluplatten manuell hinzugefügt und einige – spärlich vorhandene – falsch detektierte Punkte entfernt. Ebenfalls manuell vollständig gelöscht wurden Punkte in Bildern, die während des Flat-Field-Correction-Vorgangs der Thermalkamera entstanden waren. Die inaktuelle Bildinformation dieser Aufnahmen würde – kombiniert mit aktuellen Lagein-

formationen – zu falsch bestimmten Positionen führen. Durch die manuelle Kontrolle sämtlicher Bilder ist gewährleistet, dass mit dem hier vorgestellten Test tatsächlich die Genauigkeit der Positionsbestimmung und nicht etwa die Erfolgsrate der automatischen Detektion bewertet wird.

Die in den Abschnitten 4.1.2 bis 4.1.5 zur Illustration der Matlabanwendungen verwendeten Abbildungen zeigen Screenshots zu allen Teilschritten der Auswertung des Testfluges. Die dabei entstehende Punktwolke mit Rehkitzkandidaten, die Mediankoordinaten sowie der tatsächlich geflogene Flugpfad werden in Abbildung 30 präsentiert.

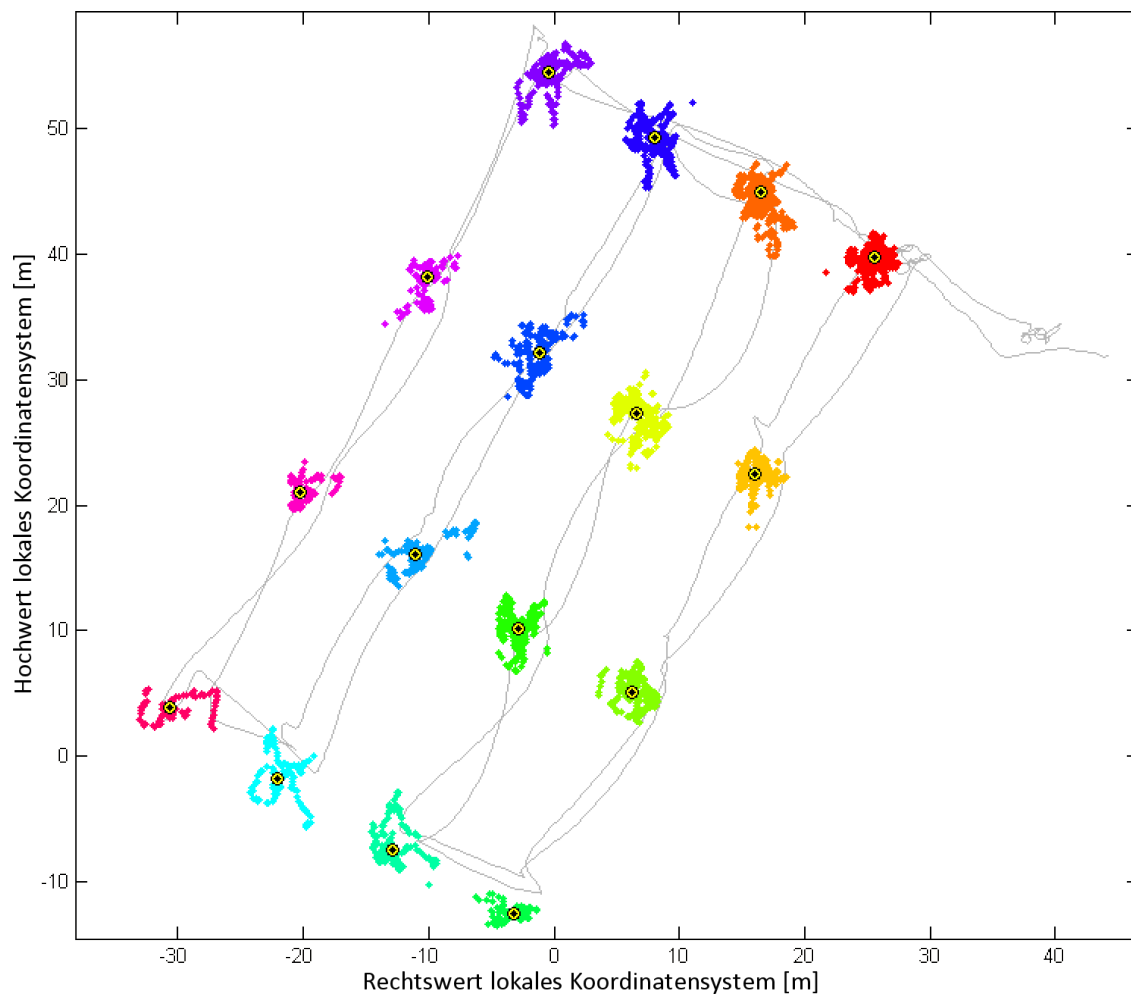


Abbildung 30: Cluster der Rehkitzkandidaten, Mediankoordinaten und Flugpfad

Das Endresultat der Auswertung – die in Abbildung 30 gelb-schwarz dargestellten Mediankoordinaten aller Cluster – wurde mit den Sollkoordinaten der Aluplatten verglichen. Dieser Auswertungsschritt wird in lokalen topozentrischen Koordinaten durchgeführt, ist aber grundsätzlich unabhängig vom verwendeten Koordinatensystem. Da die Höhenkomponenten der ermittelten Koordinaten bei der Suche von Rehkitzen belanglos sind, werden nachfolgend ausschliesslich zweidimensionale Qualitätsmasse präsentiert.

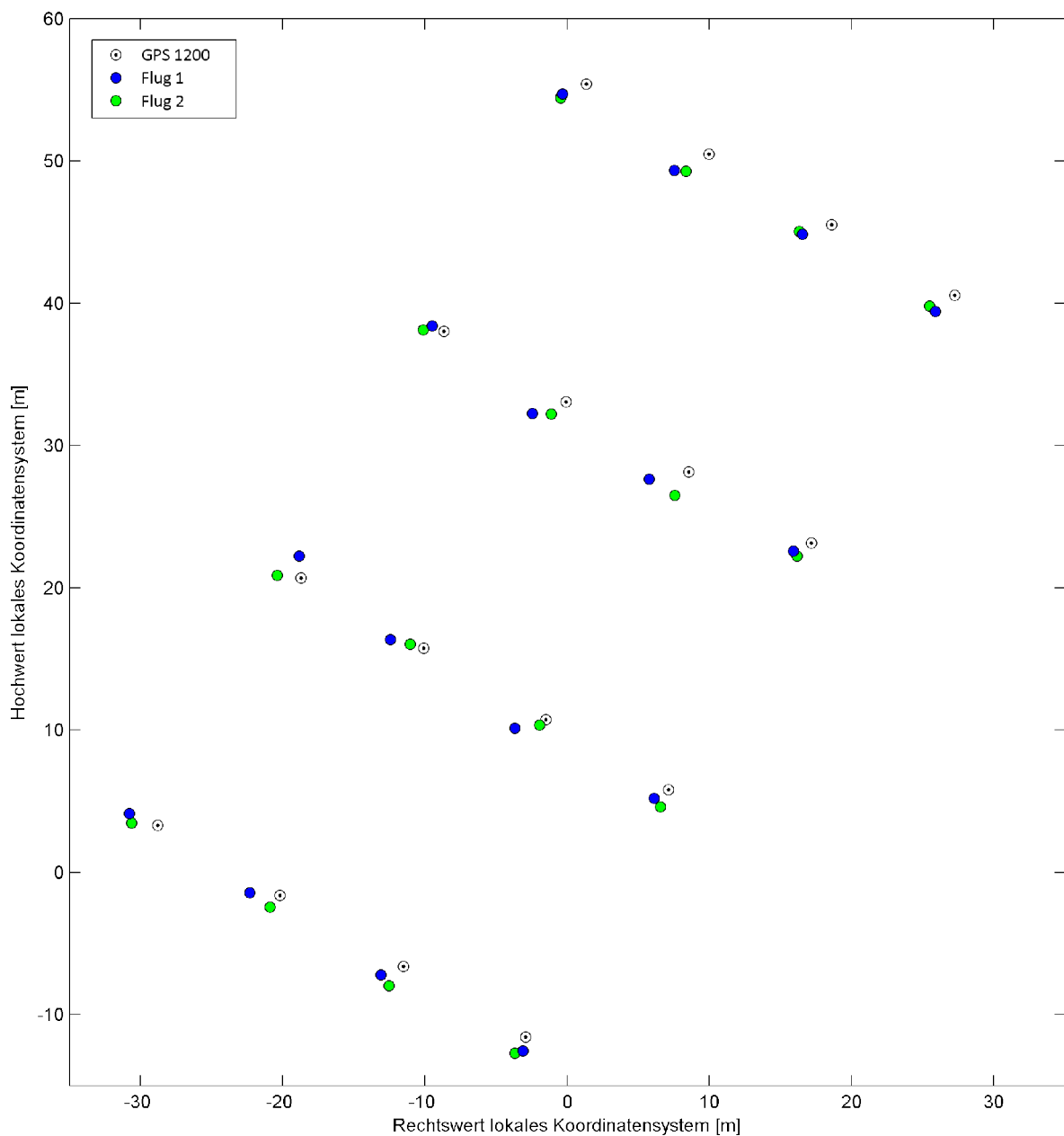


Abbildung 31: Vergleich der Koordinaten aus GPS 1200, Flug 1 und Flug 2

Abbildung 31 zeigt einen Vergleich der mit dem GPS 1200 ermittelten Sollkoordinaten und der aus der Auswertung des ersten und zweiten Testfluges gewonnenen zweidimensionalen Koordinaten. Auffällig ist in dieser Darstellung vor allem, dass beinahe alle mittels Oktokopter ermittelten Koordinaten in südlicher und westlicher Richtung von den Sollkoordinaten abweichen – ungefähr jener Richtung, die der Falcon während des gesamten Fluges als Orientierung inne hatte. Diese Abweichung ist eindeutig systematisch – was angesichts der grossen Zahl bislang unberücksichtigter Fehlereinflüsse keineswegs erstaunt. Welchem oder welchen Einflüssen diese Abweichung

tatsächlich zuzuordnen ist, kann ohne weitere Untersuchungen nicht festgestellt werden. Die erkennbaren Abweichungen werden in Tabelle 6 durch Root Mean Square Error sowie Maximale und Minimale Abweichung numerisch beschrieben.

	Flug 1	Flug 2	Flug 1 + 2
Root Mean Square Error	1.96 m	1.62 m	1.81 m
Maximale Abweichung	2.82 m	2.32 m	2.82 m
Minimale Abweichung	0.91 m	0.58 m	0.58 m

Tabelle 6: Genauigkeit der Positionsbestimmung in der Lage

Welche Genauigkeitssteigerung durch die Elimination sämtlicher systematischer Fehlereinflüsse möglicherweise erreicht werden könnte, soll eine einfache Abschätzung zeigen. Es wird angenommen, dass die Summe aller systematischen Fehlereinflüsse auf die Lage zeitlich konstant als Mittelwert (2D-Vektor) der oben beschriebenen Lageabweichungen modelliert werden kann. Nach Abzug dieses Vektors verbleiben die in Tabelle 7 aufgeführten Abweichungen. Der Root Mean Square Error wird um Faktor 1.8 von 1.81 m auf 0.98 m reduziert. Die verwendete Abschätzungsmethode berücksichtigt nicht die tatsächliche, komplexe Entstehungsweise der systematischen Fehler – dennoch wird das vorhandene Potential für Genauigkeitssteigerungen durch Elimination systematischer Fehlereinflüsse deutlich aufzeigt.

	Flug 1 + 2
Root Mean Square Error	0.98 m
Maximale Abweichung	2.42 m
Minimale Abweichung	0.18 m

Tabelle 7: Potentielle Genauigkeit der Positionsbestimmung ohne systematische Fehler

5 Fazit

5.1 Zusammenfassung

Jeden Frühsommer werden in der Schweiz ungefähr 2'000 Rehkitze durch Mähmaschinen getötet. Bisherige Methoden zum Vertreiben oder Aufspüren und Retten von Rehkitzen sind ineffizient und werden nicht flächendeckend angewandt. In einem neuen Ansatz werden im hohen Gras verborbene Rehkitze mittels des Unmanned Aerial Vehicle (UAV) «AscTec Falcon 8» mit daran montierter Thermalkamera «FLIR Tau 640» aus der Luft gesucht. Das von der Kamera ausgegebene, analoge Thermalvideo wird zur mobilen Bodenstation gefunkt, mit einem Framegrabber wieder digitalisiert und auf einem Laptop zusammen mit Zeitstempeln der Erfassungszeitpunkte aufgezeichnet. Die Positions- und Lagedaten des Falcons werden während des Fluges auf einer SD-Speicherkarte aufgezeichnet, anschliessend auf den Laptop geladen und für eine direkte Georeferenzierung der Bilddaten verwendet.

Um den zeitlichen Bezug zwischen Bild- und Lagedaten herstellen zu können, werden während des Fluges mehrere vertikale Schwenks mit der Kamerahalterung des Falcon ausgeführt. Dieses Signal ist sowohl im Thermalbild wie auch in den aufgezeichneten Lagedaten klar erkennbar und dient der zeitlichen Synchronisierung. Ausgehend von den Aufzeichnungszeitpunkten aller Einzelbilder wird das Fehlen von Bildern, die während der Übertragung durch Signalstörungen verloren gingen, erkannt und berücksichtigt. Nach erfolgreicher Synchronisierung stehen für jedes thermale Einzelbild Lageinformationen zur Verfügung.

In den Thermalbildern sind Rehkitze als helle Flecken zu erkennen – ein automatischer Suchalgorithmus durchläuft sämtliche Bilder, detektiert Rehkitzkandidaten und liefert deren Pixelkoordinaten. Die Pixelkoordinate eines Kandidaten definiert zusammen mit Position und Ausrichtung der Thermalkamera einen räumlichen Sichtstrahl. Dieser wird mit einem digitalen Geländemodell geschnitten und ergibt eine dreidimensionale Koordinate. Wird dieser Schritt für sämtliche detektierten Kandidaten durchgeführt, resultiert eine dreidimensionale Punktwolke, in der sich vielversprechende Rehkitzkoordinaten als dichtere Ansammlungen – sogenannte Cluster – manifestieren.

Ein Algorithmus zur Clusteranalyse erkennt und klassifiziert solche dichtere Ansammlungen. Aus den Koordinatenwerten aller Punkte eines Clusters werden Mediankoordinaten berechnet und als Wegpunkte im .gpx-Format (GPS Exchange Format) auf ein GNSS-Handgerät übertragen. Mittels Navigation zu den Wegpunktkoordinaten können die Rehkitze im Feld gezielt gesucht und geborgen werden.

Die in den ermittelten Rehkitzkoordinaten noch enthaltenen systematischen und zufälligen Fehlereinflüsse wurden aufgezählt und erläutert, konnten im Rahmen dieser Arbeit aber nicht genauer untersucht werden. Die Genauigkeit des Gesamtsystems wurde in einem praktischen Testflug über ein Feld mit 16 Aluminiumzieltafeln ermittelt. Der Vergleich der mittels UAV und Thermalkamera bestimmten Koordinaten und der am Boden mittels GNSS gemessenen präzisen Sollkoordinaten ergab Lageabweichungen zwischen 0.58 und 2.82 m und eine Wurzel der mittleren quadratischen Lageabweichung (Root Mean Square Error) von 1.81 m.

5.2 Diskussion der Resultate und des entwickelten Systems

In der Einleitung wurde als Zielsetzung für die Genauigkeit des zu entwickelnden Systems eine Ortungsgenauigkeit von 2 m genannt. Dabei wurde nicht exakt festgelegt, ob in diesem Wert die Ungenauigkeit des für die Rehkitzrettung am Boden verwendeten GNSS-Handgerätes zu berücksichtigen ist. Bleibt das GNSS-Handgerät unberücksichtigt, so wurde die gewünschte Genauigkeit trotz zahlreicher nicht korrigierter Fehlereinflüsse mit dem vorliegenden System erreicht. Das erwartete Genauigkeitspotential eines Systems aus UAV und Thermalkamera zur Ortung von Wildtieren konnte in diesem Sinne bestätigt werden.

Wird die genannte Zielsetzung dahingehend interpretiert, dass der Rehkitzretter per GNSS-Handgerät mit einer Genauigkeit von weniger als zwei Metern an das Rehkitz heranzuführen ist, müsste dieses Ziel grundsätzlich überdacht und – falls nicht wesentlich teure geodätische GNSS-Empfänger eingesetzt werden sollen – revidiert werden. Die Genauigkeit von Low-Cost-GNSS-Handgeräten liegt nämlich üblicherweise im Bereich von 3 m (Lagegenauigkeit von unter 3 m in 95 % aller Messungen bei Nutzung eines SBAS-Service [Garmin eTrex, 2007]) und könnte bei Nutzung eines Echtzeitkorrekturdienstes wie swipos-NAV auf bestenfalls 0.5 bis 2 m gesenkt werden [URL: swipos].

Grösster Stolperstein auf dem Weg zum bisher erreichten Resultat war die analoge Übertragung des Thermalvideos per Funk und die anschliessende Analog-Digital-Wandlung. Trotz intensiver Suche auch seitens des Herstellers Ascending Technologies konnte auf dem Markt keine Fertiglösung für die digitale Videoaufzeichnung auf dem Falcon selbst gefunden werden. Die Kenntnisse des Autors im Bereich der Elektrotechnik und Informatik wiederum waren für die zeitnahe Umsetzung einer Eigenbaulösung nicht hinreichend, so dass – trotz bekannter Mängel – auf die Funkübertragung zurückgegriffen werden musste. Dies bringt zahlreiche Nachteile mit sich, die nur teilweise durch geschickte Auswertung wieder kompensiert werden können:

- Verlust radiometrischer Bildinformation durch reduzierte Farbtiefe: Die ursprünglich aufgenommenen Digitalbilder haben eine Farbtiefe von 14 bit – die analog ausgegebenen Bilder 8 bit.

- Bildfehler und fehlende Bilder durch Funkübertragung: Bei tiefen Flughöhen und Entfernungen ab ca. 100 m verändert die analoge Funkübertragung das Signal stark und verursacht radiometrische sowie geometrische Bildfehler oder komplett fehlende Bilder. Letztere müssen aufwändig detektiert und bei der Synchronisierung von Bild- und Lagedaten berücksichtigt werden.
- Problematische Analog-Digital-Wandlung: Die Digitalisierung des Analogsignals mittels Framegrabber ist aufwändig und eine weitere Quelle möglicher technischer Probleme bei der Datenaufnahme. Es wird aufgrund der starken Systemauslastung durch die Videoaufzeichnung ein separates Laptop für die Bilderfassung benötigt, das per Kabel mit der mobilen Bodenstation verbunden sein muss. Die Digitalisierung im Framegrabber beeinflusst zusätzlich Radiometrie und Geometrie der Bilddaten und führt zu Phänomenen wie nichtquadratischen Pixeln.

Wie die Videoübertragung per Funk stellt auch die Synchronisierung von Bild- und Lagedaten mittels Kameraschwenks eine suboptimale Lösung dar. Die Thermalkamera FLIR Tau 640 könnte theoretisch mittels eines externen Signals vom Falcon getriggert werden. Die Auslösezeitpunkte würden zusammen mit den Lagedaten des Falcons erfasst – Bild und Lagedaten wären damit von allem Anfang an synchronisiert. Die praktische Umsetzung dieses Ansatzes würde grössere bauliche Anpassungen am Falcon bedingen, die nur durch den Hersteller vorgenommen werden können. Die Synchronisierung mittels Kameraschwenks stellt eine Umgehung des Problems dar und nimmt einen erhöhten Aufwand bei der Datenauswertung sowie ein ungenaueres Synchronisierungsergebnis in Kauf.

Die Leistungsfähigkeit der automatischen Detektion konnte in der vorliegenden Arbeit nicht getestet werden, da weder lebendige Rehkitze noch eine thermal realistische Rehkitzattrappe zur Verfügung standen. Die für die automatische Detektion verwendeten Parameter wie etwa Minimal- und Maximaldurchmesser eines Rehkitzes oder Helligkeitsgrenzwerte wurden aus demselben Grund nicht fixiert, sondern müssen vom Anwender der Matlabprogramme über die Benutzeroberfläche selbst definiert werden. Verschiedene qualitative Tests wurden mit Wärmeflaschen – gefüllt mit Wasser mit einer Temperatur von 37°C – durchgeführt. Sie legen den Schluss nahe, dass die Sichtbarkeit eines Rehkitzes in grossem Masse von den aktuell herrschenden Umgebungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur sowie Feuchtigkeit, Dichte und Beschaffenheit der Wiese abhängig sein dürfte. Auf eine genauere Würdigung dieser Tests wird im vorliegenden Bericht mangels präziser Erkenntnisse und aufgrund der nicht sichergestellten Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf echte Rehkitze verzichtet. Aussagen über das Potential des vorgestellten Systems hinsichtlich der Erkennung von Rehkitzen können deshalb noch keine gemacht werden.

5.3 Ausblick

Zur Zeit der Fertigstellung dieses Berichtes ist offen, in welcher Form die vorgestellte Arbeit fortgesetzt wird. Die Projektpartner der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft (SHL) arbeiten an einer beheizten Rehkitzattrappe, die eine Beurteilung der Erkennbarkeit von Rehkitzen in Thermalbildern ohne Tests mit echten Rehkitzen ermöglichen soll. Dieser Schritt ist auf dem Weg hin zu einem ausgereiften System zur Rehkitzrettung mittels UAV und Thermalkamera unverzichtbar. Das Potential der Idee – UAVs und Thermalkameras für die Rehkitzortung einzusetzen – konnte in der vorliegenden Arbeit erst hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit abgeschätzt werden und es ist nach wie vor möglich, dass sich die Detektierbarkeit von Rehkitzen in Thermalbildern als nicht genügend erweist.

Auf der technischen Seite ist eine stärkere Integrierung der Thermalkamera FLIR Tau 640 auf dem AscTec Falcon 8 mit digitaler Videoaufzeichnung und Triggerung der Kamera durch den Falcon anzustreben. Der Ablauf der Datenaufnahme kann so wesentlich effizienter und fehlerunanfälliger gestaltet werden, was wiederum die vorgängig genannten Tests zur Ermittlung der Detektierbarkeit von Rehkitzen begünstigen würde.

Um bei den ermittelten Rehkitzkoordinaten eine Genauigkeitssteigerung zu erzielen, müssen die noch vorhandenen systematischen Fehlereinflüsse zunächst durch geeignete Tests voneinander getrennt und quantifiziert werden. Eine solche Untersuchung würde erst die Beurteilung ermöglichen, wo und in welchem Umfang Genauigkeitssteigerungen realisierbar wären. Der Autor dieser Arbeit hält insbesondere die Einflüsse der barometrischen Höhe sowie der Winkelabweichung zwischen Körperkoordinatensystem des Falcon und Kamerakoordinatensystem für untersuchenswert.

Literatur und Quellen

Bücher, Abhandlungen und Artikel

- [Eisenbeiss, 2009] Eisenbeiss H. (2009): UAV Photogrammetry. IGP Mitteilungen Nr. 105. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 203 S.
- [Ester et al., 1996] Ester M., Kriegel H.-P., Sander J. und Xu X. (1996): A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, S. 226231.
- [Friedli, 2010] Friedli E. (2010): Evaluation des Oktokopters Falcon 8. Bachelorarbeit. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 70 S.
- [Gonzalez et al., 2009] Gonzalez R. C., Woods R. E. und Eddins S. L. (2009): Digital Image Processing using MATLAB. Gatesmark, 826 S.
- [Hartmann, 2011] Hartmann W. (2011): Untersuchung der Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeit von UAVs mit Hilfe einer Thermalkamera. Masterprojektarbeit. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- [Israel, 2010] Israel M., Schlagenhauf G., Fackelmeier A. und Haschberger P. (2010): Untersuchungen zur Wilderkennung beim Mähen. Beitrag zur 68. Internationalen Tagung Landtechnik, VDI Wissensforum, Braunschweig.
- [Kahle, 2007] Kahle H.-G. (2007): Einführung in die Höhere Geodäsie. Vorlesungsskript. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 217 S.
- [Kurt, 1991] Kurt F. (1991): Das Reh in der Kulturlandschaft: Sozialverhalten und Oekologie eines Anpassers. Hamburg: Parey, 284 S.
- [Lillesand et al., 2008] Lillesand T. M., Kiefer R. W. und Chipman J. W. (2008): Remote Sensing and Image Interpretation. Hoboken: Wiley, 756 S.
- [Luhmann, 2003] Luhmann T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Heidelberg: Wichmann, 586 S.

- [Luhmann, 2010] Luhmann T., Ohm J., Piechel J. und Roelfs T. (2010): Geometric Calibration of Thermographic Cameras. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, S. 411-416.
- [Riedel, 2004] Riedel S. (2004): Junge Rehe sterben oft einen qualvollen Tod. Zürcher Unterländer 15. Juni 2004, S. 3.
- [Schneider, 2007] Schneider L. (2007): Dem Mähtod Paroli bieten – Kitzrettung – Methoden und ihre Wirksamkeit. Unsere Jagd 6/2007, S. 32-34.
- [van Blyenburgh, 1999] Van Blyenburgh P. (1999): UAVs: an Overview. Air & Space Europe, Vol. I, No 5/6, S. 43-47.
- [Vickers, 1996] Vickers V. E. (1996): Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery. Optical Engineering, Vol. 35, No 7, S. 1921-1926.

Technische Dokumente und Informationsblätter

- [DIN 9300, 1990] Deutsches Institut für Normung e.V. (1990): DIN 9300 – Luft und Raumfahrt – Begriffe, Grössen und Formelzeichen der Flugmechanik – Bewegungen des Luftfahrzeuges gegenüber der Luft.
- [Falcon 8 Flyer, 2010] Ascending Technologies (2010): Lösungen für Luftbildfotografie – Inspektion – Dokumentation.
- [Falcon Training, 2011] Ascending Technologies (2011): Training für AscTec Falcon 8. Schulungsunterlagen.
- [FLIR AGC, 2011] FLIR Commercial Systems (2011): FLIR Camera Adjustments – Rev. C.
- [Garmin eTrex, 2007] Garmin (2007): Garmin eTrex H – Owner's Manual.
- [LEA-5T, 2009] u-Blox (2009): LEA-5T – u-blox 5 GPS receiver with Precision Timing – Product Summary.
- [Tau 640 Manual, 2010] FLIR Commercial Systems (2010): Tau 640 Slow Video Camera – User's Manual.

- [Verbundprojekt, 2010] Verein Deutscher Ingenieure VDI, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (2010): Projektinfo – Verbundprojekt: Entwicklung und Erprobung eines Trägersystems mit Sensortechniken zur Auffindung wild lebender Tiere beim Mähen landwirtschaftlicher Flächen – Wildretter.
- [WTSchV, 2003] Regierungsrat des Kantons Bern (2003): Verordnung über den Wildtierschutz (WTSchV) vom 26. Februar 2003.

Internet

- [URL: DTM-AV] Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2010): DOM / DTM-AV. Zugriff am 19. Mai 2011. «http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dom_dtm-av.html»
- [URL: Jagdstatistik] Bundesamt für Umwelt BAFU (2010): Eidgenössische Jagdstatistik. Zugriff am 3. Mai 2011. «<http://www.wild.uzh.ch/jagdst>»
- [URL: Wildretter] isa Industrieelektronik GmbH (2008): Infrarot-Wildretter. Zugriff am 3. Mai 2011. «<http://www.wildretter.de>»
- [URL: Pixelaspect] Chris Pirazzi (2008): The Lurkers Guide to Video – Square and Non-square Pixels. Zugriff am 6. Mai 2011. «<http://lurkertech.com/lg/pixelaspect>»
- [URL: swipos] Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2011): swipos-GIS/GEO. Zugriff am 31. Mai 2011. «<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/services/swipos/gis-geo.html>»
- [URL: Video Fields] Chris Pirazzi (2008): The Lurkers Guide to Video – All about Video Fields. Zugriff am 6. Mai 2011. «<http://lurkertech.com/lg/fields>»

Inhaltsübersicht CD

- 📁 Masterarbeit
 - 📁 1 Organisation
 - 📁 1 Aufgabenstellung
 - 📁 2 Tipps
 - 📁 3 Projekt Rehkitzrettung
 - 📁 4 Präsentationseinladung
 - 📁 2 Literatur
 - 📁 1 Alphabetisch geordnet
 - 📁 2 Thematisch geordnet
 - 📁 3 Software
 - 📁 1 AscTec AutoPilot Control
 - 📁 2 AscTec GPS Photo Tagger
 - 📁 3 AscTec Firmware Update
 - 📁 4 FLIR Tau 640
 - 📁 5 EasyGPS
 - 📁 4 Implementation
 - 📁 1 GUI
 - 📁 2 Videoaufnahme
 - 📁 3 Synchronisierung
 - 📁 4 Geländeinterpolation
 - 📁 5 Detektion
 - 📁 6 Clusteranalyse
 - 📁 7 Transformationen
 - 📁 5 Daten
 - 📁 1 Orthofotos
 - 📁 2 Flugplanung Passpunkte
 - 📁 3 Geländedaten
 - 📁 4 Blackbox
 - 📁 5 Videos
 - 📁 6 Synchronisierung
 - 📁 7 Detektierte Punkte
 - 📁 8 Kamerakalibrierung
 - 📁 6 Bericht
 - 📁 1 Text
 - 📁 2 Bilder
 - 📁 3 Vorlage
 - 📁 7 Poster
 - 📁 1 Poster
 - 📁 2 Bilder
 - 📁 3 Vorlage
 - 📁 4 Tipps
 - 📁 8 Präsentation
 - 📁 1 Folien
 - 📁 2 Bilder
 - 📁 9 Homepage