

Der Tragschrauber als Sensorplattform für die Fernerkundung

ALEXANDER JENAL¹, IMMANUEL WEBER¹, CASPAR KNEER² & JENS BONGARTZ¹

Zusammenfassung: Lange Zeit zu Unrecht in Vergessenheit geraten (LEISHMAN 2004), erlebt der Tragschrauber aktuell eine regelrechte Renaissance in der deutschen Luftfahrt (SACHS 2013). Aus dem anfänglichen Flugsportgerät hat sich binnen weniger Jahre ein Experimental-Fluggerät für die verschiedensten Einsatzzwecke etabliert (DLR 2012). Ein weites Arbeitsfeld stellt hier die luftgestützte Fernerkundung dar. Dabei soll der Tragschrauber weder bestehende noch neue Trends (RPAS) in diesem Bereich ersetzen, sondern vielmehr die Angebotspalette sinnvoll ergänzen. Durch einen von der DFG begutachteten und befürworteten Förderantrag des Konjunkturpaketes II wurden 2011 der Hochschule Koblenz Mittel für den Kauf und die Erlangung eines Flugscheins für ein solches, auch als Gyrokoopter bezeichnetes, Ultraleicht-Fluggerät (UL) zugesprochen. Mit der Gründung des sogenannten Anwendungszentrums für multimodale und luftgestützte Sensorik (AMLS) des Fraunhofer-Instituts für Hochfrequenzphysik und Radartechnik im Jahr 2013 konnte zudem eine einzigartige Kooperation zwischen den beiden Institutionen etabliert werden. Diese hat das Ziel, eine flexible und kosteneffiziente luftgestützte Sensorplattform für Anwendungen in der Fernerkundung zu entwickeln. In einer zweijährigen Aufbau- und Integrationsphase wurden verschiedene Sensormodalitäten in den Tragschrauber des AMLS integriert und schrittweise zu einem modularen System weiterentwickelt. Es werden Überlegungen vorgestellt, die zu der Anschaffung eines Tragschraubers bewogen haben. Zudem werden die bislang verwendeten Bildsensoren aus den Bereichen des sichtbaren Lichtes (VIS), sowohl multi- (RGB) als auch hyperspektral, des thermalen Infrarot (TIR) sowie das entwickelte Gesamtsystem beschrieben. Anhand von Beispieldaten, die bei Projekt- und Testbefliegungen gesammelt wurden, werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Sensoren aufgezeigt.

1 Einleitung

In der luftgestützten Fernerkundung werden traditionell bemannte Fluggeräte, vor allem Flugzeuge und Hubschrauber, eingesetzt, die aufwendige Sensorsysteme über ausgedehnte Areale tragen können. Der dabei notwendige finanzielle Aufwand ist allerdings recht hoch und somit für viele potentielle Anwender nicht wirtschaftlich. In den letzten Jahren drängen vermehrt RPAS (remotely piloted aerial systems) in die Fernerkundung, deren Vorteile im niedrigen Einstiegspreis, den geringen Unterhaltskosten und der einfachen Bedienung liegen und somit viele Anwendungen erst ermöglichen. Nachteilig bei diesen Systemen ist jedoch, dass es in vielen Ländern Flugeinschränkungen gibt und für jeden Einsatz eine Aufstiegs Genehmigung eingeholt werden muss. Das Fluggerät muss sich dabei ständig im Sichtfeld des Piloten befinden, wodurch der Operationsradius stark eingeschränkt wird. Weiterhin können RPAS in der Regel nur eingeschränkt Nutzlast bei geringen Flugzeiten transportieren. Zwischen diesen beiden Systemgruppen sind UL-Flugzeuge und im Besonderen der hier vorgestellte Tragschrauber angesiedelt. Im Gegensatz zu den RPAS sind diese vollwertigen Teilnehmer im öffentlichen

¹ Fraunhofer FHR, Anwendungszentrum für Multimodale und luftgestützte Sensorik, Joseph-Rovan-Allee 2, 53424 Remagen; E-Mail: [alexander.jenal, immanuel.weber, jens.bongartz]@fhr.fraunhofer.de

² Hochschule Koblenz, Joseph-Rovan-Allee 2, 53424 Remagen; E-Mail: kneer@hs-koblenz.de

Luftverkehr und können sich uneingeschränkt im Luftraum als gleichberechtigter Partner bewegen. Sie können Nutzlasten bis zu 100 kg für mehrere Stunden in der Luft tragen und ähneln somit den traditionellen bemannten Fluggeräten. Sie grenzen sich aber von diesen durch ihre niedrigen Anschaffungs- und Unterhaltskosten sowie einer einfacheren Zulassung von Modifikationen ab. Die gute Flugstabilität in Verbindung mit einer geringen Windanfälligkeit des Tragschraubers ermöglichen, Sichtflugverhältnisse vorausgesetzt, auch Flüge bei Windverhältnissen, bei denen UL-Flächenflieger nicht mehr problemlos eingesetzt werden können.



Abb.1: CloudDancer II (D-MRLP) des AMLS, stationiert auf dem Flugplatz Dahlemer Binz (Eifel).

Der hier vorgestellte Tragschrauber vom Typ Cloud Dancer II (CD2, Abb.1) des Herstellers Rotortec³ wird am AMLS zu einer Experimental-Plattform für Befliegungsszenarien in der Fernerkundung umgebaut, von der konkrete Sensorsysteme für verschiedene Trägerplattformen und Einsatzzwecke abgeleitet werden. Zudem bringt der Einsatz nicht-scannender Bildgebungsverfahren eine Kostenersparnis, sodass nicht nur wissenschaftliche Einrichtungen, sondern auch KMUs oder industrielle Auftraggeber von diesem gleichermaßen flexiblen wie präzisen Messwerkzeug profitieren. Dies kann jedoch nur durch tiefgehende Eingriffsmöglichkeiten in das System mit dem expliziten Verständnis der einzelnen Parameter umgesetzt werden. Daher wurden im Verlauf der Aufbauarbeit schon frühzeitig enge Kontakte⁴ zu den einzelnen Sensorherstellern geknüpft, um auf mögliche Probleme im Experimentalbetrieb reagieren zu können. Ebenso bestehen solche Kontakte zu Herstellern von weiteren relevanten Systemkomponenten. Die Flugplattform besitzt eine Mindestgeschwindigkeit von 30 km/h, ist sehr wendig und kann bis zu 5 Stunden in der Luft bleiben. Die typische Flächenerfassung liegt, je nach verwendeter Sensorik, mindestens zwischen 5 und 40 km² pro Stunde. Die nebeneinander angeordneten Sitze ermöglichen es zudem, einen großen Teil des Systems im Blickfeld des Piloten zu positionieren. Dies ist vor allem im Testbetrieb von Vorteil. In der finalen Ausbaustufe ist das System hingegen voll automatisiert und gibt aktuelle Zustandsinformationen über einen Statusmonitor wieder. Dies ermöglicht es dem Piloten, sich vollständig auf seine Flugtätigkeit konzentrieren zu können.

2 Methoden

Aufbauend auf dem Tragschrauber teilt sich das entwickelte System im Wesentlichen in zwei Komponenten auf. Die erste Komponente bildet die hard- und softwareseitige Infrastruktur, die

³ <http://www.rotortec.com/cloud%20dancer%20.htm>

⁴ <http://www.alliedvisiontec.com/emea/news/news-display/article/allied-vision-customers-showcase-their-applications-at-vision-2014.htm>

zwingend für den Betrieb der zweiten Komponente, der eigentlichen Sensoren, notwendig ist. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass der Tragschrauber und das Messsystem nur ein Teil der Gesamtanwendung sind. Ebenso wichtig ist die Schaffung nötiger Schnittstellen, um Befliegungen mit den eigentlichen Anwendern abzustimmen, die entsprechende Flugplanung durchzuführen und die gewonnenen Daten gemäß den im Vorfeld festgelegten Vorgaben aufzubereiten.

2.1 Infrastruktur

Zu der implementierten Grundausstattung gehört ein leistungsstarkes Dualantennen-GNS-System. Die beiden installierten Antennen ermöglichen neben der Positionsbestimmung auch die exakte Bestimmung der Orientierung (heading). Dieser Vektor kann in der späteren Bildzusammenführung genutzt werden, da wegen der Flugeigenschaften des Tragschraubers auch die Lage der Kamerasysteme um einen Gierwinkel von der Flugrichtung abweichen kann. Darüber hinaus besteht jederzeit die Möglichkeit über optionale Zusatzdienste wie OmniSTAR® oder RTK eine weitere Verbesserung der Verortung im Flug zu erreichen. Die über den GNS-Empfänger ermittelten Positionsdaten werden vom Flug-Management-System (FMS) genutzt, um den Piloten zu einem vorab geplanten Befliegungsareal zu führen und dieses nach den Sensor- und Zielvorgaben abfliegen zu lassen. Dazu sendet das FMS bei Erreichen der Auslösepunkte ein Signal an das nachfolgende Sensor-Management-System (SMS). Dieses leitet das Triggersignal über spezielle Hardware an die einzelnen Sensoren, um eine gleichzeitige Auslösung aller am System angeschlossener Komponenten zu gewährleisten. Das SMS besteht aus einem leistungsfähigen Embedded-PC für die industrielle Bildverarbeitung sowie aus Applikationen, die vom AMLS gezielt für die einzelnen Sensorsysteme entwickelt wurden. Diese Applikationen können für die flexible Anpassung an wechselnde Projektanforderungen anwendungsspezifisch aus einem eigens entwickelten Software-Framework (AWS) modular zusammengestellt werden.

2.2 Sensormodalitäten

Die im Folgenden beschriebenen Kamerasysteme sind so angeordnet, dass diese gleichzeitig im Tragschrauber geflogen werden können. Da von der Ideallage abweichende Flugbewegungen immer möglich sind, müssen diese ausgeglichen werden. Daher werden die Kamerasysteme – der hyperspektrale Imager steht noch aus – über elektro-mechanische Gimbal-Aufhängungen aktiv in ihrer vorgegebenen Fluglage (nadir) sowohl in der Nick- als auch in der Roll-Achse stabilisiert.

2.2.1 VIS-RGB-Kamera

Zur bisher ausrüstbaren Sensorausstattung gehört eine Spiegelreflexkamera (Nikon D800e, Abb. 2Abb. , links), die VIS-RGB-Aufnahmen erzeugt. Der Vollformatsensor besitzt eine Auflösung von mehr als 36 Megapixel. Die Kamera ist über eine speziell entwickelte Hardware sowohl mit dem GNS-Empfänger als auch mit dem FMS sowie dem SMS verbunden. Somit ist eine gezielte Bildaufnahme über ein externes Auslösesignal möglich. Die gewonnenen Bilddaten werden direkt in den Metadaten georeferenziert und auf den in der Kamera vorhandenen Speichermedien abgelegt. Zukünftig ist eine Speicheranbindung an das SMS geplant. Ein lichtstarkes Weitwinkelobjektiv (AF-S NIKKOR 35 mm 1:1,4G) mit 35 mm Festbrennweite kann bei einer üblichen Flughöhe von 400 m ü.G. eine Schwadbreite von 411 m mit einer Bodenauflösung von 0,06 m erreichen.

2.2.2 Hyperspektraler Sensor

Weiterhin kann eine Hyperspektralkamera (Abb. 2, mittig) der Firma Cubert⁵ ausgerüstet werden. Diese kann im Gegensatz zu traditionellen hyperspektralen Zeilenscannern flächige Bildinformationen aufzeichnen (MICHELS et al. 2012). Somit kann auf ein teures Inertialsystem verzichtet werden, wie es bei der Verwendung von Zeilenscannern zur Bildrekonstruktion im Postprocessing zwingend notwendig ist. Für die Verwendung bei großflächigen Bildflügen ist eine Hardware-Triggerung der Kamera notwendig. Daher wurde von der Firma Cubert freundlicherweise ein Hardware-Triggereingang integriert, sodass die Kamera an das FMS angebunden werden konnte. In Abstimmung mit der Cubert GmbH wurde auch eine eigene Software-Schnittstelle für das System entwickelt, sodass eine Steuerung der Kamera möglich ist und darüber hinaus die gewonnenen spektralen Bilddaten direkt von dem SMS über die GigE-Verbindungen empfangen und abgespeichert werden können. Ebenso werden zu den einzelnen Aufnahmezeitpunkten die Positionsdaten für eine spätere Verortung aufgezeichnet.



Abb. 2: Im Tragschrauber eingebaute Bildsensoren: Nikon D800e (links); Cubert UHD 285 Hyperspektralkamera (mittig); PANTIR Thermal Imager (rechts).

2.2.3 Thermaler Sensor (PANTIR)

Als dritte Modalität wurde ein thermaler Sensor (Abb. 2, rechts) aus einer Kombination zweier Einzelkameras entwickelt. Aufnahmen im langwelligen Infrarot⁶ werden durch eine LWIR-Kamera⁷ (TIR) ermöglicht. Eine panchromatische Kamera⁸ (PAN) liefert zu den örtlich niedrig aufgelösten, thermalen Bilddaten des Mikrobolometers die hoch aufgelöste strukturelle Information einer aufgenommenen Szene. Durch eine eigens konstruierte Halterung werden die beiden Kameras nebeneinander angeordnet und deren Bildsensoren exakt parallel zueinander ausgerichtet. Bedingt durch die Flughöhe von mehreren hundert Metern und der geringen Entfernung der optischen Achsen voneinander nehmen die Kameras nahezu die identische Bodenszenarie auf. Dabei ist die Brennweite der PAN-Kamera so gewählt, dass ihr Sichtfeld mit dem der LWIR-Kamera übereinstimmt. Auch hier sorgt eine Anbindung an die Triggerleitung für ein synchronisiertes Auslösen der beiden Kameras mit den übrigen Sensoren. Für ein Triggerereignis des FMS werden dann jeweils eine LWIR- und eine PAN-Aufnahme über die

⁵ <http://cubert-gmbh.de/>

⁶ long-wavelength infrared (LWIR)

⁷ Allied Vision Pearleye P-030

⁸ Allied Vision Mako G-419b

GigE-Verbindung an das SMS weitergeleitet und zusammen mit den dazugehörigen Positionsdaten abgespeichert.

2.3 Datenaufbereitung

Die erfassten Bilddaten werden, sofern nicht schon im Flug geschehen, nach der Befliegung georeferenziert. Enthält ein Sensormodul mehrere Bildsensoren so werden die Einzelbilder einer aufgenommenen Bodenszene mit den unterschiedlichen Informationen zu einem mehrkanaligen bzw. einem mehrdimensionalen Informationsträger fusioniert. Anschließend werden die so aufbereiteten Bilddaten eines Befliegungsareals, falls gefordert, über photogrammetrische Software-Tools georektifiziert und zu Orthomosaiken verrechnet. Dazu wurden im Vorfeld verschiedene photogrammetrische Softwarelösungen⁹ mit Testdatensätzen evaluiert. Dabei fiel die Wahl im ersten Ansatz auf das Produkt PhotoScan der Firma Agisoft. Diese Software nutzt das Structure-from-Motion (SfM) Verfahren (WESTOBY et al. 2012) und umfasst, neben einem guten Preis-Leistungs-Verhältnis, alle nötigen Verarbeitungsschritte und ermöglicht dadurch einen einfachen, zentralen Umgang mit den Daten. Es besteht die Möglichkeit, an vielen Stellen in die Prozesskette eingreifen zu können. Die erstellten Mosaikdateien können dann in üblichen GIS-Formaten von Projektpartnern weiterverarbeitet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Befliegungen mit VIS-RGB-Kamera

Die VIS-RGB-Kamera wurde als erstes in den Tragschrauber integriert. Nach mehreren Testdurchläufen konnte das System erfolgreich dazu genutzt werden, Gebiete anhand eines vorher erstellten Flugplans an den festgelegten Auslösepunkten bildhaft zu erfassen. Die Technik wurde erstmals produktiv eingesetzt, um das Naturschutzgroßprojekt Obere Ahr-Hocheifel¹⁰ mit Luftbildaufnahmen¹¹ zu unterstützen. Dazu wurden einige der ab 2012 durchgeführten Maßnahmen gemeinsam mit den Verantwortlichen ausgewählt und über einen gewissen Zeitraum mehrfach überflogen. Aus den Einzelaufnahmen wurden dann über das SfM-Tool PhotoScan georeferenzierte Orthomosaikdateien erstellt und diese der Kreisverwaltung Ahrweiler zu Präsentations- und Dokumentationszwecken über ein GIS zur Verfügung gestellt. Abb. 3 zeigt dabei einen aufgeforsteten Fichtenriegel in der Nähe der Ortsgemeinde Dankerath (Kreis Ahrweiler, Eifel), der im Zuge der Renaturierungsmaßnahmen gerodet wurde, um zwei künstlich voneinander getrennte Lebensräume wieder zu vereinen.

⁹ Folgende Softwareprodukte wurden evaluiert: VisualSFM (Wu, 2013), SURE (IPF Stuttgart) (ROTHERMEL ET AL., 2012), PhotoSan Pro V1.0 (<http://www.agisoft.com>), Pix4DMapper (<http://pix4d.com/>), UASMaster (<http://www.trimble.com/Geospatial/Inpho-UASMaster.aspx>)

¹⁰ http://www.bfn.de/0304_obere-ahr-hocheifel-pdm.html

¹¹ <http://www.kreis-ahrweiler.de/naturschutz/Broschuere.pdf>



Abb. 3: Erstellung von vorher-nachher Orthophotos zur Dokumentation ausgewählter Renaturierungsmaßnahmen des Naturschutzgroßprojektes Obere Ahr-Hocheifel; Fichtenriegel vor der Rodung im September 2013 (links); Gerodeter Bereich zur Verbindung künstlich getrennter Lebensräume im Mai 2014 (rechts).

3.2 Testbefliegung mit der Hyperspektralkamera UHD 285

Die Hyperspektralkamera UHD 285 der Firma Cubert wurde als zweite Sensormodalität in den CD2 integriert. Abb. 4 zeigt eine Bildaufnahme der ersten Testbefliegungen mit dem VIS-RGB und dem hyperspektralen Kamerasystem. Dabei wurde mit den Bilddaten der VIS-RGB-Kamera ein Orthomosaik erstellt und die gewonnenen spektralen Bildserien auf dieses Referenzbild gematcht. Aus den aufgenommenen hyperspektralen Daten wurden zwei 10 nm breite Bänder bei 670 und 800 nm Zentralwellenlänge entnommen und der NDVI (PRASAD 2002) berechnet. Bei dieser Testbefliegung wurden sowohl der aktuelle Sonnenstand als auch die Lage des Sensors im Tragschrauber vernachlässigt. Zudem sind die Aufnahmen ohne zuvor definierte GPS-Auslösepunkte erstellt worden. Abb. zeigt vier Streifen dieser Testbefliegung in einem GIS.

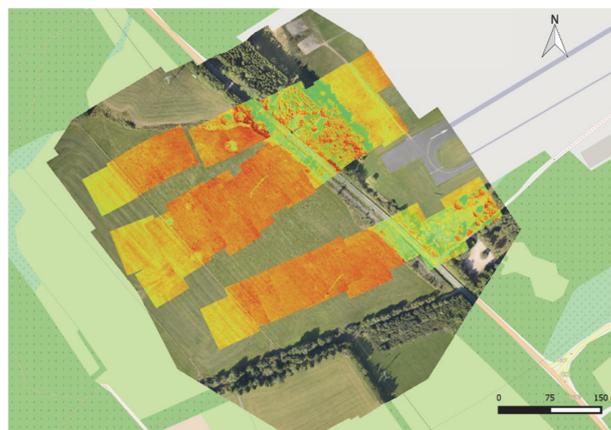


Abb. 4: Matching von hyperspektralen Einzelaufnahmen auf einem VIS-RGB-Orthomosaik in dem Geoinformationssystem QGIS (<http://www.qgis.org>).

3.3 Testbefliegung mit thermalem Kamerasystem (PANTIR)

In Vorbereitung auf eine größere Befliegungskampagne im Bereich Gewässerkunde wurden mehrere Testflüge mit dem PANTIR Kamerasystem durchgeführt. Die Flugplanung wurde mit einer Flughöhe von 3000 ft ü.G. berechnet, welche durch die spätere Befliegungskampagne vorgegeben ist. Abb. 5 (links) zeigt die Flugplanung für ein willkürlich gewähltes Areal um einen Steinbruch in der Nähe des Flugplatzes Dahlemer Binz (Eifel), welches zu Testzwecken ausgewählt wurde. Entlang der berechneten Fluglinien wurden mit den PANTIR-Parametern 93 Auslösepunkte errechnet. Die berechnete Fläche von 6,5 km² wurde innerhalb von 12 Minuten abgeflogen, was einer Flächenleistung von 32,5 km² pro Stunde entspricht. Die fusionierten Einzelbilder wurden nach der Befliegung mit PhotoScan georeferenziert und zu Orthomosaiken verrechnet (Abb. 5, rechts). Bei den Daten wurde keine Atmosphärenkorrektur durchgeführt.

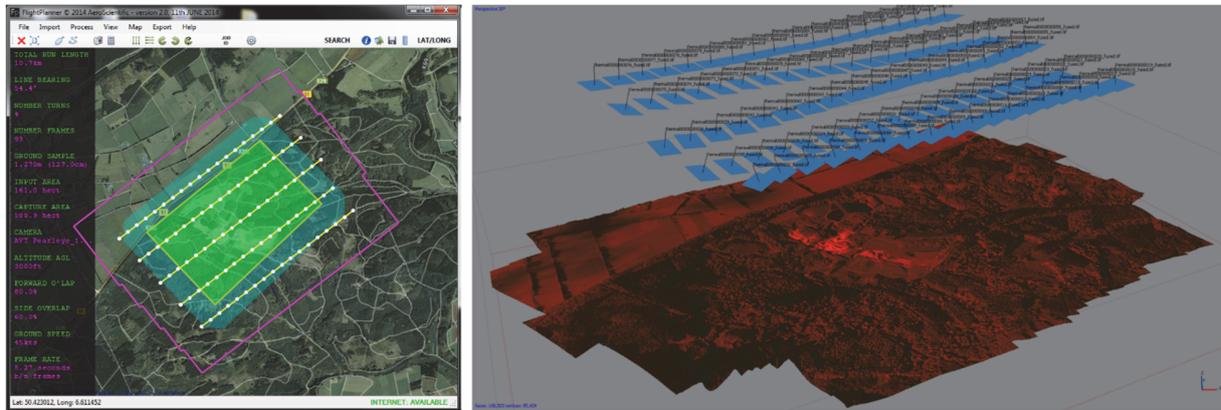


Abb. 5: Thermale Testbefliegung: Gebiet um einen Steinbruch bei Dahlem; Flugplanung (links); Berechnung des Orthomosaik mit PhotoScan (rechts).

Abb. 6 zeigt neben dem bereits erwähnten Steinbruch (links) ein zweites Befliegungsareal (rechts), welches zu Testzwecken befliegen wurde. Hierbei handelte es sich um ein Waldgebiet mit einem Nasslager. Dieses Gebiet umfasst 3 km². Die 89 Einzelaufnahmen wurden innerhalb von 6 Minuten aufgenommen, was wiederum einer Flächenleistung von 30 km² pro Stunde entspricht.

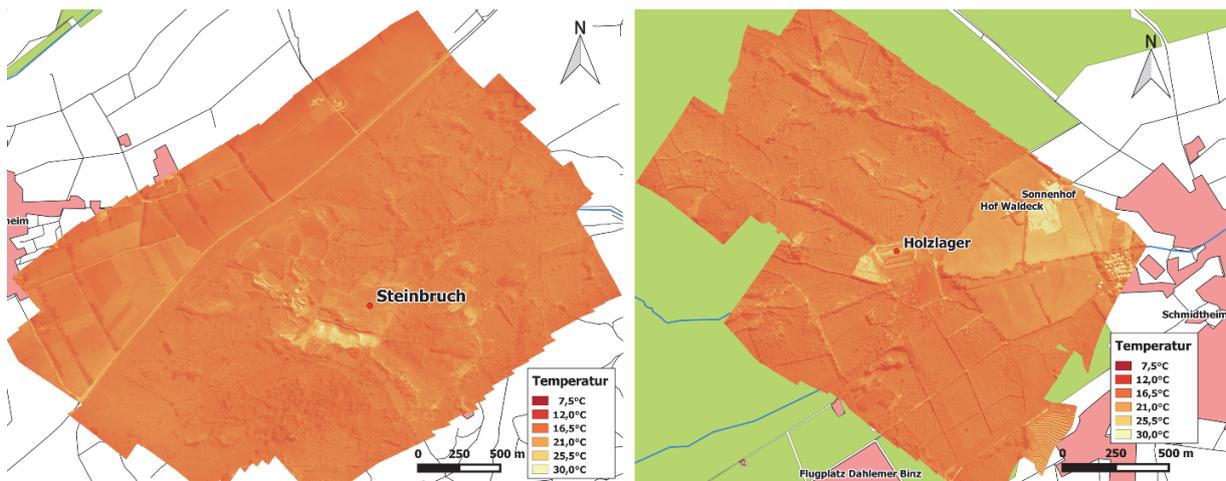


Abb. 6: Thermale Testbefliegung: Gebiet um einen Steinbruch (93 Einzelbilder, links) und ein Waldgebiet mit Nasslager (89 Einzelbilder, rechts) bei Schmidtheim (Eifel).

4 Zusammenfassung

Die Testbefliegungen zeigen, dass sich der zur Sensorplattform aufgebaute Tragschrauber und die verwendeten Sensoren für Anwendungen in der luftgestützten Fernerkundung eignen. Die beflogenen Areale wären mit RPAS nur mit extrem großem Aufwand zu befliegen gewesen. Mit herkömmlichen Fluggeräten ist der Einsatz bei Flächen dieser Größe kaum rentabel. Betriebskosten zwischen 150 und 200 Euro pro Flugstunde inklusive Pilot machen den Tragschrauber zu einem vergleichsweise kostengünstigen Fluggerät. Durch seine Nutzlast, Reichweite und Wendigkeit kann dieser für viele Anwendungsbereiche den Weg in die luftgestützte Fernerkundung, wie z.B. Projekte von wissenschaftlichen Einrichtungen, erschließen. Des Weiteren wurde auch gezeigt, dass die Plattform für die Erarbeitung neuer Sensorkonzepte oder -modalitäten die nötige Flexibilität in puncto Verfügbarkeit, Platzangebot und zulässiger Nutzlast bietet.

Es ist geplant, die Plattform kontinuierlich um weitere Sensormodalitäten zu erweitern und das Sensorsystem so zu modularisieren, dass dieses leicht auf anderen Trägerplattformen eingesetzt werden kann.

5 Literaturverzeichnis

- DEUTSCHE ZENTRUM FÜR LUFT- RAUMFAHRT DLR, 2012: Tragschrauber für Katastrophenschutz und Rettungseinsätze untersucht. DULV Info **31** (6), S.6-7.
- LEISHMAN, G. J., 2004: The Development of the Autogiro: A Technical Perspective. Journal of Aircraft **41** (4), S. 765-781.
- MICHELS, R., LIEBSCH, S. & GRASER, R., 2014: Snapshot-Hyperspektroskopie. Photonik **1**, S. 36-38.
- PRASAD S. T., SMITH, R. B. & DE PAUW, E., 2002: Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **68** (6), S. 607-622.
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D. & HAALA, N., 2012: SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. Proceedings LC3D Workshop, Berlin.
- SACHS, F.; 2013: Untersuchung der Flugdynamik eines Tragschraubers im Seitengleitflug. Diplomarbeit. DLR-Interner Bericht. DLR-IB 111-2013/59.
- WESTOBY M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J. & REYNOLDS, J. M., 2012: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology **179**, S. 300-314.
- WU, C.; 2013: Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion. IEEE International Conference on 3D Vision-3DV 2013, S. 127-134.