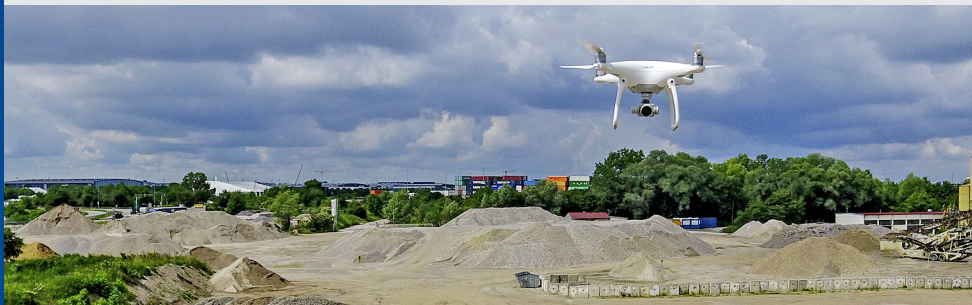


Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum

Beiträge zum 178. DVW-Seminar am
4. und 5. Februar 2019 in Berlin



Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum

Beiträge zum 178. DVW-Seminar am
4. und 5. Februar 2019 in Berlin

Redaktion:
Dirk Kowalewski

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e.V.



Schriftenreihe des DVW
Band 94
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e. V.

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 94

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des angewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum. DVW-Schriftenreihe,
Band 94, Augsburg, 2019, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-203-7
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2019
www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Rayc Beckmann

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen
bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------------	---

Session 1:

Recht, Flugsicherung und Kenntnismachweis

Elmar M. Giemulla	
Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Drohnen	9
Ralf Heidger	
UAS Traffic Management (UTM) aus Sicht der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH	21
Marten Krull	
NfL, SORA, Kenntnismachweis – „Wir wollen doch ›nur messen!‹“	49

Session 2:

UAV-Anwendungen im Kataster, ländliche Neuordnung und Stadtplanung

Johannes Schlesinger Steffen Vogt	
Drohneinsatz in Stadtplanung und Flurneuordnung – Praxisbeispiele aus Baden-Württemberg, Bayern und Hessen	63
Johannes Vieten Jörg Spitthöver	
Planungsgrundlagen im Städtebau am Beispiel der Nachnutzung von ehemaligen Bahnflächen	79
Werner Mayr	
FindMine – UAV im humanitären Einsatz	85

Session 3:

UAV-Anwendungen in der Ingenieurvermessung mit Praxisbeispielen

Stephan Fick

Sechs Jahre Drohnenerfahrung: Praktische Beispiele aus dem
Ingenieur- und Anlagenbau _____ 95

Udo Bertels

Bauvermessung mit unbemannten Flugsystemen: B 525n – Neubau
Ortsumgehung Nottuln _____ 103

Rayc Beckmann

Einsatz von UAV in der Ingenieurvermessung – Praxisanwendungen aus
dem Tiefbau _____ 123

Session 4:

Technische Neuentwicklungen und wissenschaftliche Anwendungen

Anass Dinia | Steffen Doerner | Viktoriia Federova | Arno Fischer |

Claudius Marx | Martin Schafföner

MIDRAS – Mikro-Drohnen Abwehr System _____ 135

Görres Grenzdörffer

Multispektrale Fernerkundung mit Drohnen _____ 143

Torsten Genz | Uwe Krause

Geo2VR – Sensorfusion im virtuellen Raum _____ 159

Vorwort

Unbemannte Luftfahrzeuge (engl. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) haben in den letzten Jahren zur Erweiterung des Aufgabenspektrums und einer effizienteren Erfüllung von geodätischen Aufgaben beigetragen. Eine Vielzahl an kommerziellen und forschungsnahen UAV-Systemen, mit LIDAR und optischen Sensoren zur Umgebungserfassung, ist heute verfügbar. UAV sind Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen, von Entwicklungen für geodätische Sonderaufgaben und werden bereits vielfach in der geodätischen Praxis erfolgreich eingesetzt. Durch einen hohen Automationsgrad in der Datenerfassung und in der Auswertung großer Datenmengen können die stetig steigenden Anforderungen an aktuelle Geodaten auch durch UAV effizient erfüllt werden. UAV stellen daher inzwischen eine attraktive Thematik auf zahlreichen nationalen und internationalen wissenschaftlichen Tagungen dar.

Das 178. DVW-Seminar „UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum“ hat zum Ziel, Forscher, Entwickler und Anwender über Trends, neue technische Entwicklungen und Anwendungen von UAVs bei Vermessungsprojekten zu informieren. In vier Sessions werden insgesamt 12 Vorträge während des Seminars angeboten. Davon sind 12 Beiträge in diesem Tagungsband enthalten.

Das Seminar wird im Rahmen der GEODÄSIE-AKADEMIE realisiert und fachlich neben dem hauptverantwortlichen DVW AK 3 „Messmethoden und Systeme“ vom DVW Berlin/Brandenburg e. V. und vom BILDUNGSWERK VDV FG 2 „Messverfahren“ betreut. Im nächsten Jahr ist auch wieder die Beteiligung der DGPF-Arbeitskreise „Sensoren und Plattformen“ und „Optische 3D-Messtechnik“ angestrebt.

Wir hoffen, dass das diesjährige Seminar einen ähnlich großen Erfolg erreichen wird wie die vorherigen Veranstaltungen. Wir wünschen Ihnen einen guten Verlauf des Seminars, interessante Vorträge und Diskussionen, nette Gespräche in den Pausen sowie einen hohen Erkenntnisgewinn sowohl für die Praxis als auch für die Forschung und Entwicklung.

Dirk Kowalewski, navXperience GmbH, DVW AK 3

Ingo Neumann, Leibniz Universität Hannover, Leiter des DVW AK 3

Session 1:

Recht, Flugsicherung und Kenntnissnachweis

Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Drohnen

Elmar M. Giemulla

1 Grundfragen des Drohnenrechts

Die deutsche „Drohnenverordnung“ vom April bzw. Oktober 2017 markiert einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg in die Eingliederung der unbemannten in die traditionelle Luftfahrt, auch wenn dieses Ziel noch lange nicht erreicht ist. Der Verordnungsgeber ist noch längst nicht so weit, dass er die Voraussetzungen für eine Verkehrszulassung von unbemanntem Fluggerät, die eine solche Eingliederung u. a. verlangen würde, formulieren könnte. Die Erreichung des hierfür erforderlichen „acceptable level of safety“ bedarf noch weiterer Erfahrungen mit einer Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Dies setzt naturgemäß eine Erweiterung des Rechtsrahmens im Vergleich zum bisherigen Rechtszustand voraus.

Der wichtige Schritt, den die „Drohnenverordnung“ im Vergleich zu dem im Jahre 2010 geschaffenen Rechtszustand wagt, ist der Wechsel von der bisherigen Aufstiegserlaubnis zur Betriebserlaubnis. Der Unterschied ist nicht nur semantischer Natur, sondern markiert einen Paradigmenwechsel: Die bisherige Aufstiegserlaubnis war dadurch gekennzeichnet, dass der Betrieb von UAS grundsätzlich nur an einer Stelle erlaubt werden konnte, die örtlich durch das Sichtweiterefordernis begrenzt war (Betriebsverbot mit engen Ausnahmemöglichkeiten). Diese „Käseglocke“ kann künftig durchstoßen werden, und zwar im Gewichtsbereich zwischen 5 und 25 kg Abfluggewicht im Rahmen der ohnehin erforderlichen Erlaubnis. Nur außerhalb dieser Gewichtsgrenzen bleibt es bei einem Betriebsverbot. Es handelt sich also künftig zumindest in dem genannten Gewichtsbereich nicht mehr um einen „Aufstieg“ an einem bestimmten Punkt, sondern um einen „Betrieb“, der allerdings den Zustand der Teilnahme am allgemeinen Verkehr, der eine „Verkehrszulassung“ voraussetzen würde, noch nicht erreicht hat. Es braucht nicht eigens hervorgehoben zu werden, dass diese Erlaubnisse sicherlich nicht leichtfertig erteilt werden können, sondern dass gewährleistet werden muss, dass eine Gefahr für die öffentliche Sicherheit und Ordnung nicht gegeben ist. Wann dies im Einzelnen der Fall – oder auch nicht der Fall – sein wird, entzieht sich wegen der Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten der Voraussesbarkeit und damit der Definitionsfähigkeit des Verordnungsgebers. Richtigerweise kann nach der „Drohnenverordnung“ hierfür

die Vorlage eines Sachverständigengutachtens verlangt werden. Hier wirft das SORA („Specific Operation Safety Assessment“) des künftigen EU-Rechts seine Schatten voraus.

Die „Drohnenverordnung“ besteht aus einem in sich verwobenen Netzwerk von Erlaubnismöglichkeiten und Einschränkungen mit Ausnahmemöglichkeiten. Herauszufinden, wie sich eine konkrete Nutzungsart in das Gewebe von grundsätzlicher Erlaubnisfreiheit mit Betriebsverboten und Ausnahmemöglichkeiten für bestimmte Betriebsarten in der Gewichtsklasse bis 5 kg, von grundsätzlicher Erlaubnispflicht mit Betriebsverboten und Ausnahmemöglichkeiten in der Gewichtsklasse zwischen 5 und 25 kg, und einem Betriebsverbot mit Ausnahmemöglichkeiten für bestimmte Betriebsarten jenseits der 25-kg-Grenze einfügt, stellt nicht nur die zuständigen Verwaltungen, sondern auch die Nutzer, die sich ja im Zweifel rechtstreu verhalten wollen, vor Herausforderungen.

2 Derzeitiges deutsches Recht

Das deutsche Recht befindet sich deshalb derzeit im Dreiklang „Aufstiegs-erlaubnis – Betriebserlaubnis – Verkehrszulassung“ mittlerweile auf der zweiten Stufe. Insofern kann tatsächlich von einem deutlichen Fortschritt geredet werden. Angesichts der Parallelentwicklung in der EU wird die letzte Stufe der Verkehrszulassung wohl mithilfe europäischer Rechtsgrundlagen erreicht werden. Die in den A-NPA der EASA festgelegte Kategorisierung von „open“, „specific operation“ und vor allem „certified category“ weisen deutlich in diese Richtung.

Die Sicherheitsanforderungen sind in der aktuellen LuftVO als „Erlaubnisfreier Betrieb“, als „Erlaubnispflichtiger Betrieb“ (sog. Präventives Verbot mit Erlaubnisvorbehalt) und in Form von „Betriebsverboten“ mit Ausnahmemöglichkeiten (sog. Repressives Verbot mit Befreiungsvorbehalt) ausgestaltet.

Man darf sich nicht dadurch irritieren lassen, dass zwischen diesen drei Kategorien in der aktuellen LuftVO nicht trennscharf unterschieden wird. So ist der Betrieb von UAS bis 5 kg erlaubnisfrei, es sei denn, er soll außerhalb der Sichtweite stattfinden. Für UAS mit einem Gewicht zwischen 5 und 25 kg ist der Betrieb generell erlaubnispflichtig, d. h. eventuelle Flüge außerhalb der Sichtweite werden dann von der – ohnehin notwendigen – Erlaubnis erfasst, allerdings – was den Aspekt „Sichtweite“ anlangt – als Ausnahme vom grundsätzlichen Betriebsverbot. Für Flüge jenseits der 25-kg-Grenze gilt ein generelles Betriebsverbot, von dem aber Ausnahmen möglich sind – auch die Ausnahme vom Sichtweiterefordernis. Es gibt aber auch andere Betriebsverbote, die für sämtliche Gewichtsklassen gelten, beispielsweise das Verbot, über Menschenansammlungen zu fliegen.

Der Unterschied zwischen „Erlaubnis“ und „Ausnahme vom Betriebsverbot“ mag für den juristischen Laien auf den ersten Blick nicht so recht plausibel erscheinen, werden ihm doch beide Tätigkeiten aufgrund Verwaltungsakts ermöglicht. Er liegt aber – und das kann im Einzelfall entscheidend sein – in der Zuweisung der Argumentationslast. Im Falle der „Erlaubnis“ liegt dem Verwaltungsakt lediglich ein präventives Verbot zugrunde, das heißt, der beantragte Betrieb wird vom Ordnungsgeber grundsätzlich als erwünscht angesehen. Will die Behörde ihn in Ausübung ihres Ermessens dennoch ablehnen, so liegt die Argumentationslast bei ihr. Bei einem grundsätzlichen Betriebsverbot (repressives Verbot) dagegen wird das beantragte Verhalten vom Ordnungsgeber grundsätzlich als unerwünscht angesehen. Es müssen schon harte Gründe vorliegen, um die grundsätzliche Haltung des Ordnungsgebers zu übersteuern. Die Argumentationslast liegt hier beim Antragsteller.

Für jede einzelne Nutzungsart ist deshalb zunächst von der Gewichtsklasse auszugehen. Sodann ist die Frage zu stellen, ob der beabsichtigte Betrieb erlaubt werden kann. Und schließlich sind Betriebsverbote zu prüfen, von denen ihrerseits aber auch durchaus Ausnahmen möglich sind.

3 Die derzeitigen und künftigen Anforderungen an den Betrieb von Drohnen

3.1 Die zurzeit noch bestehende deutsche Rechtslage

Die wesentlichen Neuregelungen für Flugmodelle und unbemannte Luftfahrtsysteme (unbemannte Fluggeräte) sind:

- Erlaubnisfreiheit für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten unterhalb einer Gesamtmasse von 5 kg;
- Erlaubnispflicht für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten über 5 kg und für den Betrieb bei Nacht;
- Betriebsverbot gilt für unbemannte Fluggeräte außerhalb der Sichtweite für Geräte unter 5 kg;
 - in und über sensiblen Bereichen, z. B. Einsatzorten von Polizei und Rettungskräften, Krankenhäusern, Menschenansammlungen, Anlagen und Einrichtungen wie JVA's oder Industrieanlagen, oberste und obere Bundes- oder Landesbehörden, Naturschutzgebieten;
 - über bestimmten Verkehrswegen;
 - in Kontrollzonen von Flugplätzen (auch An- und Abflugbereiche von Flughäfen);
 - in Flughöhen über 100 Metern über Grund, es sei denn, der Betrieb findet auf einem Gelände statt, für das eine allgemeine Erlaubnis zum Aufstieg

von Flugmodellen erteilt und für die eine Aufsichtsperson bestellt worden ist, oder, soweit es sich nicht um einen Multicopter handelt, der Steuerer ist Inhaber einer gültigen Erlaubnis als Luftfahrzeugführer oder verfügt über einen Kenntnissnachweis.

- über Wohngrundstücken, wenn die Startmasse des Geräts mehr als 0,25 kg beträgt oder das Gerät oder seine Ausrüstung in der Lage sind, optische, akustische oder Funksignale zu empfangen, zu übertragen oder aufzuzeichnen. Ausnahme: Der durch den Betrieb über dem jeweiligen Wohngrundstück in seinen Rechten Betroffene stimmt dem Überflug ausdrücklich zu;
- über 25 kg (gilt nur für „Unbemannte Luftfahrtsysteme“).

Die zuständige Behörde kann Ausnahmen von den Verboten zulassen:

- Ausweichpflicht der unbemannten Fluggeräte gegenüber bemannten Luftfahrzeugen und unbemannten Freiballonen;
- Videobrillen sind erlaubt, wenn Flüge bis zu einer Höhe von 30 Metern stattfinden und das Gerät nicht schwerer als 0,25 kg ist oder eine andere Person es ständig in Sichtweite hat;
- Kennzeichnungspflicht für unbemannten Fluggeräten ab einer Startmasse von mehr als 0,25 kg (ab 01.10.2017);
- Kenntnissnachweis für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten ab 2 kg („Drohnen-Führerschein“) (ab 01.10.2017).

3.2 Erlaubnisfreier Betrieb

Der Betrieb mit UAS von nicht mehr als 5 kg Startmasse ist generell erlaubnisfrei, wenn innerhalb der Sichtweite geflogen wird (§ 21a Abs. 1 Nr. 1 i. V.m. § 21b Abs. 1 Nr. 1 LuftVO) und der Betrieb am Tag (nicht bei Nacht) stattfindet. Tag ist die Zeit von ungefähr 30 Minuten vor Sonnenaufgang bis ungefähr 30 Minuten nach Sonnenuntergang. Für den Nachtflug bedarf es einer Betriebserlaubnis (§ 21a Abs. 1 Nr. 5 i. V.m. § 21a Abs. 3 und § 21c LuftVO).

3.3 Betriebsverbote mit Ausnahmen

Der Betrieb von UAS in der Gewichtsklasse bis zu 5 kg unterliegt außerhalb der Sichtweite einem Betriebsverbot (§ 21b Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 LuftVO). Allerdings sind Ausnahmen vom Sichtweiteerfordernis möglich (siehe im Einzelnen § 21b Abs. 3 LuftVO und die dortigen Verweisvorschriften). Dabei dürfen der

beabsichtigte Betrieb und die Nutzung des Luftraums nicht zu einer Gefahr für die Sicherheit des Luftverkehrs oder die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere zu einer Verletzung der Vorschriften über den Datenschutz und über den Naturschutz, führen. Die zuständige Behörde kann für die Zwecke einer Gefahraberschätzung das Gutachten eines Sachverständigen über die Eignung des Geländes und des betroffenen Luftraums für den Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen oder Flugmodellen verlangen.

§ 21b Abs. 1 Satz 2 LuftVO enthält eine Definition des Begriffs „Sichtweite“: Der Betrieb erfolgt danach dann außerhalb der Sichtweite des Steuerers, wenn der Steuerer das unbemannte Fluggerät ohne besondere optische Hilfsmittel nicht mehr sehen oder seine Fluglage nicht mehr eindeutig erkennen kann.

In Satz 3 wird in diesem Zusammenhang klargestellt, dass ein Betrieb mittels Videobrille unter bestimmten Bedingungen als ein Betrieb innerhalb der Sichtweite zu behandeln ist (und damit nicht verboten ist und keiner Ausnahmegenehmigung bedarf). Damit soll in bestimmten Grenzen ein Betrieb mit sogenannten FPV-Brillen („First-Person-View“) ermöglicht werden. Bei dieser Art des Betriebs wird mithilfe der Videobrille das Fliegen aus Pilotenperspektive ermöglicht, indem das Videobild der am unbemannten Fluggerät angebrachten Kamera live zum Piloten am Boden übertragen wird. Eine FPV-Videobrille empfängt dieses dann und stellt das Bild dar¹.

Voraussetzung für einen derartigen Betrieb ist allerdings, dass er in Höhen unterhalb von 30 Metern erfolgt und entweder die Startmasse des Fluggeräts nicht mehr als 0,25 Kilogramm beträgt, oder der Steuerer von einer anderen Person, die das Fluggerät ständig in Sichtweite hat und die den Luftraum beobachtet, unmittelbar auf auftretende Gefahren hingewiesen werden kann.

3.4 Bereichsausnahme: Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

UAS-Betrieb von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben bzw. unter Aufsicht der genannten Stellen sind erlaubnisfrei, und zwar unabhängig von der Startmasse des betriebenen UAS.

¹ Verordnungsbegründung, BR-Drucks. 39/17, S. 27.

3.5 Erlaubnispflichtiger Betrieb

§ 21a Abs. 1 LuftVO beschreibt die Betriebsarten, für die vor dem Flug eine Erlaubnis einzuholen ist (Regelinstrument):

- **UAS mit einer Startmasse von mehr als 5 kg bis zu 25 kg:**
Der Betrieb ist erlaubnispflichtig (§ 21a Abs. 1 Nr. 1 i. V. m. § 21c LuftVO). Der Betrieb ist auch außerhalb der Sichtweite möglich (Umkehrschluss aus § 21b Abs. 1 Nr. 1 LuftVO). Anders als in den Gewichtsklassen bis zu 5 kg und jenseits von 25 kg gilt für diese Art des Betriebs nämlich kein Betriebsverbot. Die Ermöglichung des Betriebs außerhalb der Sichtweite erfolgt in dieser Gewichtsklasse deshalb nicht im Wege der Ausnahmegenehmigung, sondern durch Erlaubniserteilung. Obwohl beide Varianten durch eine Verwaltungsentscheidung ermöglicht werden, ist diese Unterscheidung für den Antragsteller keineswegs unerheblich. Wie bereits oben (...) ausgeführt, ist im Erlaubnisfall der Betrieb im Zweifel zu gestatten, während das im Ausnahmegenehmigungsfall umgekehrt ist. Die Argumentationslast für eine Ablehnung liegt bei der Prüfung einer Erlaubnis bei der Behörde, während die Argumentationslast für eine Ausnahmegenehmigung beim Antragsteller liegt.
- **UAS mit einer Startmasse von mehr als 25 kg:**
Oberhalb einer Startmasse von 25 kg gilt ein generelles Betriebsverbot (und zwar einschließlich des Verbots des Betriebs außerhalb der Sichtweite) mit Ausnahmemöglichkeiten.

Anders als die soeben aufgeführten sind die folgenden Betriebs- bzw. Überflugverbote einer Befreiung mangels eines Berechtigten nicht zugänglich. Es können aber auch hier von den zuständigen Behörden Ausnahmen erteilt werden (§ 21b Abs. 3 LuftVO). Dies gilt mit Ausnahme der in den Nrn. 10 und 11 normierten Verbote.

- **Naturschutzgebiete (Nr. 6):**
Hierunter sind rechtsverbindlich festgesetzte Gebiete zu verstehen, in denen ein besonderer Schutz von Natur und Landschaft erforderlich ist (§ 23 Abs. 1 BNatSchG). Es ist zu beachten, ob der Betrieb von unbemannten Fluggeräten in diesen Gebieten nach landesrechtlichen Vorschriften gegebenenfalls abweichend geregelt ist. § 21b Abs. 1 Nr. 6 LuftVO lässt in solchen Fällen diesen eventuellen landesrechtlichen Vorschriften den Vorrang.
In Deutschland bestehen 8757 Naturschutzgebiete mit einer Fläche von 1.376.989 ha (dies entspricht etwa 3,9 % der Gesamtfläche Deutschlands).

Karten und Listen der Naturschutzgebiete finden sich auf Webseite des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) (BfN 2019a).

- **Nationalparks (Nr. 6):**

Dies sind rechtsverbindlich festgesetzte, zu schützende Gebiete, die die Voraussetzungen eines Naturschutzgebiets erfüllen und sich in einem vom Menschen nicht oder wenig beeinflussten Zustand befinden. Ein möglichst ungestörter Ablauf der Naturvorgänge in ihrer natürlichen Dynamik soll gewährleistet werden (§ 24 Abs. 1 und 2 BNatSchG). Auch hier ist zu beachten, ob der Betrieb von unbemannten Fluggeräten in diesen Gebieten nach landesrechtlichen Vorschriften gegebenenfalls abweichend geregelt ist. § 21b Abs. 1 Nr. 6 LuftVO lässt in solchen Fällen diesen eventuellen landesrechtlichen Vorschriften den Vorrang.

Derzeit gibt es in Deutschland 16 Nationalparke mit einer Gesamtfläche von 1.047.859 ha. Ohne maritime Gebiete beträgt die Gesamtfläche der Nationalparke 214.588 ha (dies entspricht etwa 0,60 % der Fläche der Gesamtfläche Deutschlands). Informationen enthält die Webseite des BfN (2019b).

- **Gebiete von gemeinschaftlicher Bedeutung (Nr. 6 in Verbindung mit § 7 Abs. 1 Nr. 6 BNatSchG):**

Geschützt wird die biologischen Vielfalt in bestimmten Regionen (alpin, atlantisch und kontinental). In Deutschland gibt es 45 Gebiete mit prioritären natürlichen Lebensraumtypen oder prioritären Arten (überwiegend alpiner Raum). Die aktuelle Liste der Gebiete enthält der Durchführungsbeschluss (EU) 2016/2332 vom 9. Dezember 2016.

- **Europäische Vogelschutzgebiete (Nr. 6 in Verbindung mit § 7 Abs. 1 Nr. 7 BNatSchG):**

Deutschland hat 742 Vogelschutzgebiete mit einer Landfläche von 3.989.737 ha (dies entspricht etwa 11,3 % der Landfläche Deutschlands) eingerichtet. Dazu kommen 1.970.450 ha Bodensee sowie Meeres-, Boddensee- und Wattflächen. Informationen hierüber enthält die Webseite des BfN (2019c).

- In allen genannten „Gebieten des Naturschutzes“ sind Handlungen, die zu einer Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung des Naturschutzes oder zu einer nachhaltigen Störung führen können, verboten. Dazu zählt auch der Betrieb von Flugmodellen und UAS, was in § 21b Abs. 1 Nr. 6 LuftVO nochmals deutlich gemacht wird. Das Verbot gilt dann nicht, wenn bundes- oder landesrechtliche Regelungen des Naturschutzes den Flugbetrieb gestatten. Das ist im Einzelfall zu prüfen. Die Befreiung von dem Betriebsverbot kann

aus Sicht des Naturschutzrechtes von der zuständigen Naturschutzbehörde und aus luftrechtlicher Sicht von der zuständigen Luftfahrtbehörde gegeben werden. Beide Behörden müssen die Ausnahme von dem Betriebsverbot zulassen.

Empfehlung: Intensives Kartenstudium vor dem Flugbetrieb. Sollten dann noch Zweifel bestehen, ob in dem Bereich des beabsichtigten Fluges nicht doch ein „Gebiet für den Naturschutz“ besteht, empfiehlt es sich, eine entsprechende Anfrage an die Behörde zu richten.

3.6 Kenntnisanachweis durch den Steuerer

Für Steuerer von UAS mit mehr als 2 kg Startmasse und Flugmodellen besteht die Pflicht, die notwendigen Kenntnisse über

- Anwendung der Fluggeräte,
- Navigation,
- luftrechtliche Grundlagen,
- örtliche Luftraumordnung

nachzuweisen. Der Nachweis kann durch die Erlaubnis als Luftfahrzeugführer oder eine Bescheinigung über die Einweisung durch einen beauftragten Luftsportverband oder eine Bescheinigung über die bestandene Prüfung durch eine vom Luftfahrt-Bundesamt anerkannte Stelle erbracht werden (§ 21a Abs. 4 i. V. m. §§ 21e und 21d LuftVO). Diese Verpflichtung gilt ab dem 1. Oktober 2017.

Der Kenntnisanachweis ist nicht erforderlich, wenn der Betrieb auf einem Gelände stattfindet, für das eine Aufstiegserlaubnis für Flugmodelle erteilt und für die eine Aufsichtsperson bestellt worden ist (§ 21a Abs. 4 LuftVO am Ende).

3.7 Kennzeichnungspflicht für UAS mit mehr als 0,25 kg Startmasse

Name und Anschrift des Eigentümers sind an sichtbarer Stelle in dauerhafter und feuerfester Beschriftung anzubringen (§ 19 Abs. 3 LuftVZO). Es reicht ein kleines und leichtes Aluminiumschild mit besonders widerstandsfähigem Druck oder gravierter Schrift, das eingeklebt wird.

3.8 Versicherungspflicht

Es besteht für UAS eine Versicherungspflicht gem. §§ 32 Abs. 1 Nr. 13 LuftVG, 101 ff. LuftVZO. Der Haftpflichtversicherungsvertrag für Drittschäden muss die

sich aus dem Betrieb eines Luftfahrzeugs für den Halter ergebende Haftung decken (siehe §§ 33, 37 LuftVG). Für Güterschäden gelten besondere Mindesthöhen für die Versicherungssumme.

3.9 Ordnungswidrigkeiten

Ordnungswidrig im Sinne des § 58 Abs. 1 Nr. 10 LuftVG handelt und mit Geldbuße bis zu 50.000 Euro bestraft werden kann, wer vorsätzlich oder fahrlässig

- ohne eine Erlaubnis nach § 21a Abs. 1 LuftVO ein unbemanntes Luftfahrtsystem oder Flugmodell betreibt,
- einer mit einer Erlaubnis nach § 21a Abs. 1 oder § 21b Abs. 2 Satz 2 oder Abs. 3 Satz 1 LuftVO verbundenen vollziehbaren Auflage zuwiderhandelt,
- entgegen § 21a Abs. 4 Satz 1 LuftVO einen dort genannten Nachweis nicht, nicht richtig, nicht vollständig oder nicht rechtzeitig erbringt,
- entgegen § 21b Abs. 1 Nr. 1 bis 9 oder Abs. 2 Satz 1 LuftVO ein unbemanntes Luftfahrtsystem oder Flugmodell betreibt,
- entgegen § 21f LuftVO nicht dafür sorgt, dass ein unbemanntes Luftfahrtsystem oder Flugmodell ausweicht,
- entgegen § 21 Abs. 1 LuftVO eine Flugverkehrskontrollfreigabe nicht einholt oder
- entgegen § 19 Abs. 3 LuftVZO eine dort genannte Beschriftung nicht, nicht richtig, nicht vollständig oder nicht rechtzeitig anbringt.

3.10 Strafrechtliche Sanktionen

- Beim Betrieb von unbemannten Fluggeräten sind insbesondere folgende strafrechtlichen Vorschriften zu beachten:
- Nach § 315 StGB wird mit Freiheitsstrafe von sechs Monaten bis zu zehn Jahren bestraft, wer die Sicherheit des Flugverkehrs dadurch beeinträchtigt, dass er Anlagen oder Beförderungsmittel zerstört, beschädigt oder beseitigt, Hindernisse bereitet oder einen ähnlichen, ebenso gefährlichen Eingriff vornimmt und dadurch Leib oder Leben eines anderen Menschen oder fremde Sachen von bedeutendem Wert gefährdet.
- Nach § 315a StGB wird mit Freiheitsstrafe bis zu fünf Jahren oder Geldstrafe bestraft, wer als Führer eines Luftfahrzeuges durch grob pflichtwidriges Verhalten gegen Rechtsvorschriften zur Sicherung des Luftverkehrs verstößt und dadurch das Leben eines anderen Menschen oder Sachgüter von bedeutendem Wert gefährdet. Unbemannte Luftfahrzeuge werden zwar gesteuert und nicht geführt, doch macht es in Hinblick auf die Zweckbestimmung der

Vorschrift keinen Unterschied, ob sich der Täter an Bord des Luftfahrzeuges befindet oder am Boden.

- § 62 LuftVG stellt Zuwiderhandlungen gegen Anordnungen über Luftsperrgebiete und Gebiete mit Flugbeschränkungen unter Strafe (Freiheitsstrafe bis zu zwei Jahren oder Geldstrafe). Die Vorschrift des § 62 LuftVG findet nur dann Anwendung, wenn die Tat nicht nach anderen Vorschriften mit schwererer Strafe bedroht ist (z. B. § 315a StGB oder § 59 ff. LuftVG).

4 Künftiges EU-Recht

Das bisherige EU-Recht sah in der sog EASA-Grundverordnung (216/2008) eine gesetzgeberische Zuständigkeit für UAS lediglich ab 150 kg maximaler Startmasse vor. Damit lag die Gesetzgebungskompetenz für den Großteil der betriebenen Drohnen bei den nationalen Stellen. Die im September 2018 in Kraft getretene Nachfolgeverordnung 2018/1139 hat diese Grenze aufgehoben, so dass die EU nunmehr für das gesamte Drohnenspektrum zuständig ist. Dies bedeutet aber nicht, dass damit die deutsche Rechtslage automatisch hinfällig wäre. Der Anwendungsvorrang des EU-Rechts gegenüber nationalem Recht gilt naturgemäß nur dann, wenn es entsprechendes EU-Recht bereits gibt. Dies ist aber (noch nicht) der Fall. Die sog. Implementing Rules der Kommission sind zwar schon im Entwurf vorhanden, werden aber aller Voraussicht nach erst 2019 in Kraft gesetzt.

Ausgehend von dem Ansatz, auf den Typus des jeweiligen Betriebes abzustellen, sollen die sich daraus ergebenden jeweiligen Risiken minimiert werden. Die verschiedenen nationalen Vorschriften sollen auf diese Weise wie folgt harmonisiert werden:

Die „offene Kategorie“ stellt lediglich ein geringes Risiko dar. Deshalb soll sie weder eine Anmeldung noch eine behördliche Erlaubnis erfordern. Erfasst hiervon sind Drohnen mit einem Gewicht von weniger als 25 kg, die in einer Flughöhe unterhalb 120 m, in Sichtweite und außerhalb reservierter Gebiete wie z. B. Flugplätzen betrieben werden. Die Entfernung, in der Drohnen über, in der Nähe oder weit entfernt von Leuten, die damit nichts zu tun haben, betrieben werden dürfen, soll von der Größe der Drohnen abhängen. Drohnen der „offenen Kategorie“ sollen allgemeine technische Anforderungen erfüllen, sowie einer Produktdefinition und CE Kennzeichnungsverfahren unterliegen, einschließlich der Notwendigkeit von geo-fencing und elektronischen Identifikation für bestimmte Unterkategorien von Drohnen.

Bei der „spezifischen Kategorie“ geht es um ein mittleres Risiko. Sie erfasst den BVLOS-Betrieb (Beyond Visual Line of Sight) und wird vor Erteilung der Erlaubnis eine betriebliche Risikoeinschätzung sowie eine Prüfung von Mini-

mierungsmaßnahmen durch die Behörde erfordern. Für bestimmte vordefinierte Standardsituationen soll eine bloße Anmeldung durch den Drohnenbetreiber ausreichen. Um eine Erlaubnis zu erhalten, muss der Betreiber darlegen, dass er mögliche Risikominimierungsmaßnahmen ergriffen hat.

Für die „zertifizierte Kategorie“, die ein höheres Risiko darstellt, ist die Zertifizierung der Drohne erforderlich, ferner eine Lizenz für den Steuerer und eine generelle Betriebserlaubnis für den Betreiber, die ihm von der zuständigen Behörde ausgestellt wird.

Literatur

- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2019a): www.bfn.de/themen/gebietsschutz-grossschutzgebiete/naturschutzgebiete.html, letzter Zugriff 01/2019.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2019b): www.bfn.de/themen/gebietsschutz-grossschutzgebiete/nationalparke.html, letzter Zugriff 01/2019.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2019c): www.bfn.de/fileadmin/BfN/natura2000/Dokumente/spa2015_barrierefrei.pdf, letzter Zugriff 01/2019.

Kontakt

Prof. Dr. iur. Elmar Giemulla
Honorarprofessor für Luftverkehrsrecht (TU Berlin)
Professor für Verwaltungsrecht (HS Bund)
Adjunct Professor für Luftrecht und Luftsicherheitsrecht (Embry-Riddle Aeronautical University)
Schopenhauerstraße 51, 14129 Berlin
giemulla@giemulla.com

UAS Traffic Management (UTM) aus Sicht der DFS Deutsche Flugsicherung GmbH

Ralf Heidger

1 Einleitung: Die Herausforderung für ANSPs

Drohnen oder in der ICAO-Definition „Unmanned Aircraft Systems“ (UAS) (ICAO 2015) entwickeln sich spätestens seit etwa 2015 zu einer Herausforderung für die Flugsicherungen der Welt (ANSPs), durch ihr massenhaftes Erscheinen vor allem im untersten Luftraum (very low level airspace, VLL), aber auch in wachsenden Stückzahlen in anderen Bereichen des kontrollierten Luftraums (C, D, E) und sogar oberhalb dessen (very high level airspace, VHL). Das dabei benötigte „UAS Traffic Management“ (UTM), ein von der NASA und der FAA aufgebrachter Begriff für ein neues Verkehrsmanagementsystem (Kopardekar et al. 2016), soll dabei mit einem hohen Automatisierungsgrad den Verkehr von UAS überwachen und steuern. Folgerichtig hat dazu die NASA ein mehrjähriges Forschungsprogramm gestartet. Die Herausforderung an die Flugsicherungen ist dabei zweifach:

1. Taktisch sind UAS ein potenzielles Sicherheitsrisiko für die bemannte Luftfahrt, da sie weder optisch für ein „See and avoid“ durch Piloten gesehen, noch durch die üblichen Sensoren in der Luftfahrt (Radar, Multilateration, ADS-B) detektiert werden können, um Kollisionen zu vermeiden.
2. Strategisch stellen UAS, UTM und der UAS-Markt eine disruptive technologische Herausforderung für das System der Luftfahrt und für ATM dar, denn sie repräsentieren neue Flugtechnologien mit einem hohen Automatisierungspotenzial, auch und gerade in UTM. Das Wachstum ihrer Stückzahl zeigt hohe, oft zweistellige Zuwachsraten. Durch die zahlreichen neuen Anwendungsgebiete für UAS erzeugt dieser Markt sein eigenes Ökosystem. Die Expansion der Anwendungen und der Stückzahlen erfolgt in alle Richtungen, und zahlreiche alte Geschäftsmodelle der Luftfahrt laufen Gefahr, dramatisch verändert, obsolet bzw. durch UAS-Operationen bzw. UTM-Systeme ersetzt zu werden.

Sehr verlässliche Zahlen zu den Stückzahlen in Deutschland liegen nicht vor. Die DFS schätzte aufgrund von Umsatzzahlen von DJI und anderen Drohnenherstellern sowie Daten der Landesluftfahrtbehörden zu Aufstiegsgenehmigungen für 2016 etwa 400.000 Stück, davon nicht mehr als 100.000 im gewerblichen

Einsatz, die übrigen privat für Hobby- und Sportzwecke genutzt, und für 2017 etwa 600.000 Stück, mit etwa 150.000 im gewerblichen Einsatz. Insbesondere bei den privat genutzten UAS ist eine hohe Volatilität festzustellen, da viele Nutzer einerseits mehrere Folgegenerationen von Drohnen erwerben sowie oft mehrere Typen nebeneinander betreiben, andererseits aber auch ein hoher, nicht bezifferbarer Anteil wieder ungenutzt im Hobbykeller verschwindet. Beim gewerblichen Drohneneinsatz ist ein langsames, aber stetiges Wachstum zu verzeichnen, hier werden die UAS aber auch kontinuierlich und über längere Zeit eingesetzt. Darauf deuten vor allem die Zahlen der Aufstiegsanträge und -genehmigungen hin.

Die Einsatzgebiete für UAS sind vielfältig, und wenn man eine Kategorisierung versucht, stellt man fest, dass sie schon in kurzer Zeit durch Neuerungen wieder überholt ist. Das Konzeptpapier der U-Space Task Force (E.C./DG MOVE 2018) führt folgende Anwendungsbereiche auf:

- Precision Agriculture
- Transport and Package Delivery
- Infrastructure Monitoring
- Mapping/Photography
- Land Surveying
- Environmental Assessment
- Security/Surveillance
- Emergency Response/Search & Rescue
- Recreation

„Infrastructure Monitoring“, „Mapping/Photography“ und „Land Surveying“ dürften heute nach „Recreation“ der größte Anwendungsbereich sein, gefolgt von „Precision Agriculture“ und „Environmental Assessment“, sodann von „Security/Surveillance“ und „Emergency Response/SAR“, und schließlich „Transport and Package Delivery“ (SJU 2016). „Transport and Delivery“ wird in der SESAR Outlook Study ein großes Wachstumspotenzial eingeräumt, allerdings müssen hier wegen des vergleichsweise hohen Risikos der Operation besonders hohe technologische Sicherheits- und Genehmigungshürden überwunden werden, insbesondere dann, wenn UAS-Airtaxis Passagiere transportieren, so dass hier das Wachstum erst verzögert einsetzen dürfte (SJU 2016), analog auch die Umfrageergebnisse von UVS International (2018).

2 Reaktion in der DFS-Strategie

In Anerkennung der eingangs geschilderten zweifachen Herausforderung an die ANSPs reagierte die DFS Anfang 2016 mit der Bildung des „Issue Manage-

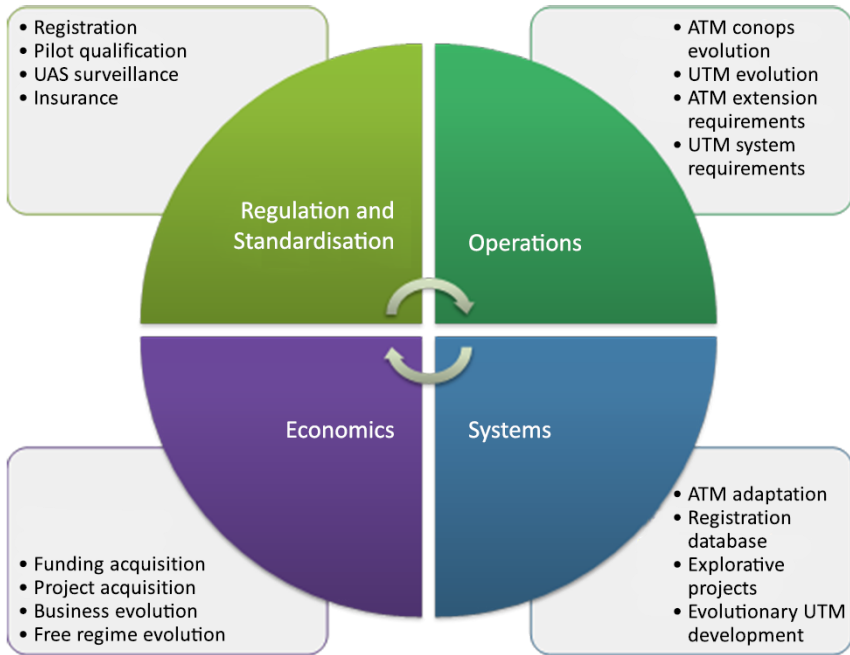


Abb. 1: Vier-Felder-Strategie „Safe and fair integration“

ments UAS“ im Bereich VE, das unter dem Paradigma „Sichere und faire Integration von UAS in den Luftraum“ eine proaktive Strategie für den Umgang mit dem Drohnenmarkt formulierte. Diese Strategie umfasst, umklammert von einer stark betonten Kommunikationskomponente, vier Bereiche (Abb. 1):

1. Regulierung und Standardisierung
2. Betrieb
3. Technik und Systeme
4. Wirtschaftliche Aspekte

Als klassisches Thema der Unternehmensentwicklung und -strategie war es naheliegend, dies bei VE in unmittelbarer Nähe der Geschäftsführung anzusiedeln. Dies erwies sich als außerordentlich hilfreich, um die strategische Aufmerksamkeit der Unternehmensleitung, die Aufmerksamkeit der betroffenen Bereiche und ihrer Leiter und das erforderliche Anschubbudget zu erhalten, um wirksam in der DFS tätig werden zu können, und das Thema UAS auf den richtigen Ebenen zu diskutieren und zu entscheiden.

3 Regulierung und Standardisierung

Beim Themenkomplex „Regulierung und Standardisierung“ war und ist erforderlich,

- das Sicherheitsniveau der bemannten Luftfahrt den neuen Akteuren in der unbemannten Luftfahrt zu vermitteln und zu einem geeigneten Transfer gestaltend beizutragen,
- innovative Ansätze aus diesem neuen Markt aufzugreifen und für die eigenen Aufgaben nutzbar zu machen,
- dazu regulative Ziele und benötigte Standards zu identifizieren,
- die dazu nötigen Arbeitsgruppen zu identifizieren und ihnen beizutreten oder ggf. neue Arbeitsgruppen ins Leben zu rufen,
- in diesen Arbeitsgruppen bzw. durch politische Willensbildung für die Vorstellungen der DFS zu argumentieren, richtige Anregungen Dritter aufzunehmen und die eigenen ggf. modifizierten Ziele durchzusetzen.

Dazu wirkt die DFS in den folgenden Arbeitsgruppen und Projekten mit:

- Auf nationaler Ebene u. a.:
 - in den DIN-Arbeitsgruppen zu UAS-Begriffsdefinitionen und zu UTM, um dort die eigenen benutzten Begriffsdefinitionen und Erkenntnisse bekannt zu machen und die DFS-Vorstellungen einzubringen (DIN 5452-1);
 - in der Bund-Länder-Arbeitsgruppe zur SORA (SORA-GER) und zu den UAS-Missions-Genehmigungsprozessen, um diese Prozesse mitzugestalten (Forderung einer nationalen Registration und E-Identifikation von UAS, einer verbindlichen Kartendatenquelle für Geofencing, und eines Drohnenführerscheins), ins eigene UTM einzubringen und dem BMVI und den Landesluftfahrtbehörden (LLBs) die eigenen UTM-Entwicklungen bekannt zu machen und diese in Zukunft als Kunden zu gewinnen;
 - als Beobachter, Konferenzteilnehmer und Referent bei der UAV DACH mit ihrer jährlichen Konferenz bei der AERO-Messe in Friedrichshafen, der UTM-Arbeitsgruppe und ihrem neu ins Leben gerufenen jährlichen „European Drone Summit“ (EDS), um das Netzwerk mit UAS-Operateuren und -Herstellern zu pflegen und deutsche Marktentwicklungen zu beobachten.
- Auf europäischer Ebene u. a.:
 - in der sehr aktiven und fokussierten UAS-Task Force der „A6“, der wichtigsten europäischen ANSPs (DFS, DSNA, ENAV, ENAIRE, NATS und eine Gruppe kleinerer ANSPs, u. a. mit Naviair, Austrocontrol, PANSA und LFV) zur Interessenvertretung im SESAR-Joint Undertaking (SJU), um strategische Ziele und Vorstellungen der ANSPs bzgl. eines nationalen UTMs;

- gegenüber der Kommission und dem Direktorat „DG Move“ zu formulieren (A6 Alliance 2018);
- in der „Adhoc U-Space Task Force“ bei DG Move in der Europäischen Kommission zur Stärkung der ANSP-Position im zukünftigen „U-Space“ (E.C./DG MOVE 2018) (diese AG konkurriert aktuell mit der „U-Space Reflection Group“, in der Non-ANSP-Interessensvertreter der Drohnenindustrie und Telekommunikation Einfluss auf die Politik der Europäischen Kommission auszuüben versuchen;
- als Beobachter in der EUROCAE, in der WG 105 und den Subgruppen zu UAS und UTM, um Standardisierungsentwicklungen zu verfolgen (die dort allerdings mit viel zu großem Zeitaufwand und viel zu wenig Ertrag verlaufen, weswegen die DFS ihre Aktivitäten drastisch reduziert hat);
- im EU-SESAR-Projekt „CORUS“ zusammen mit anderen ANSPs wie NATS, DSNA, Eurocontrol und ENAV zur Mitgestaltung eines Referenz-„Concept of Operation“ (ConOps) für Drohnenmissionen und einer Referenzarchitektur für UTM-Systeme (CORUS 2018).
- Auf internationaler Ebene u. a.:
 - im RPAS-Panel der ICAO ist die DFS seit Beginn vertreten und begleitet die Produktion von Regelungen und Manuals zu RPAS nicht nur in der Klasse über 150 kg und für grenzüberschreitende Flüge, sondern nun auch für die kleineren UAS, denen sich die ICAO seit 2018 auch zuwendet;
 - in der Global UTM Association (GUTMA) mit Sitz in Genf ist die DFS Gründungsmitglied seit 2016, wirkt an Architekturpapieren und Diskussionen zu Datenformaten mit, im Wesentlichen dienen die Aktivitäten jedoch der Betonung der ANSP-Rolle in UTM und der Pflege des Netzwerkes von Kontakten zu UTM-Softwarelieferanten, um ggf. auf Alternativen zurückgreifen zu können;
 - insbesondere im europäischen Flügel der CANSO ist die DFS aktiv, um die zentrale Rolle von ANSPs in UTM bzgl. UAS-Registration, Identifikation, Kartenproduktion für Geofencing sowie Surveillance und Tracking von UAS zusammen mit benachbarter bemannter Luftfahrt zu betonen sowie die Regulierungsentwürfe der EASA zu UAS zu kommentieren.

Diese Aktivitäten führen insgesamt zu einem profilierten internationalen Bild der DFS mit einem klaren Bekenntnis zu einer aktiven und zentralen „UTM Service Provider“-Rolle der ANSPs im entstehenden UAS- und UTM-Markt anstelle eines ANSPs, der „nur“ für ATM zuständig bleibt, mit neuen Service Providern in UTM Daten austauscht, und so mehr oder weniger am Rande das Geschehen im Drohnenmarkt verfolgt. Die DFS sieht in einer solchen Rollenzumessung langfristig die Gefährdung der Zukunft der ANSPs, der bemannten Luftfahrt und des in der Luftfahrt etablierten hohen Sicherheitsniveaus.

4 Betriebliche Aspekte

Im Bereich „Betrieb“ ist die Sicht der DFS, dass sich UTM und ATM vor allem durch Zuordnung zu bestimmten Lufträumen einerseits und durch einige wichtige paradigmatische Unterschiede voneinander abgrenzen. Die Luftraumzuordnung wird in [Abb. 2](#) für die Verhältnisse in Deutschland dargestellt (Luftraumklassifikation in: AIP 2018).

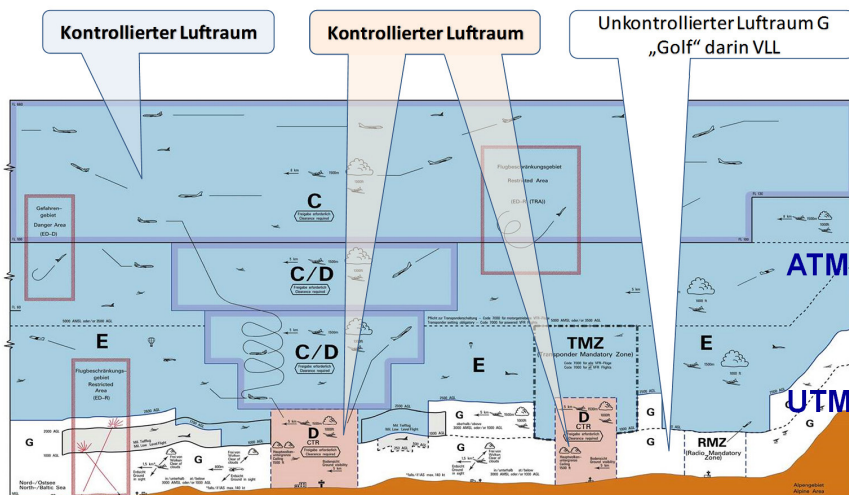


Abb. 2: Luftraumstruktur in Deutschland und Zuordnung UTM und ATM

Beide Luftraumbereiche umfassen unbemannte und bemannte Luftfahrt, allerdings mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Die überwiegende Menge der UAS werden im VLL operieren, also im Airspace G (weißer Bereich des Bildes), hier je nach den sich etablierenden Regelwerken und ConOps ca. bis 100 m oder 150 m AGL. Dieser Luftraum indes ist nicht leer, bemannte Luftfahrt wie VFR-Fliegerei, Helikopter von Notfalldiensten und Polizei, Luftsport wie Ballonflug, Segler, Gleiter uvm. sind hier unterwegs. Die Kollision nicht nur von UAS untereinander, sondern zwischen UAS und bemannter Luftfahrt stellt ein ernstes Risiko dar, da wegen der geringen Abmessungen der UAS das ohnehin schon schwierige und anspruchsvolle „keep well clear“ und „see and avoid“ nach den ICAO-Regeln für die Fliegerei praktisch nicht anwendbar ist. In diesem Luftraum sieht die DFS heute in erster Linie den Anwendungsbereich für UTM.

Im kontrollierten Luftraum C, D, E ist in erster Linie bemannte Luftfahrt nach IFR- bzw. VFR-Regeln unterwegs, aber auch hier treten heute und zukünftig UAS-Operationen auf, wie z. B. Inspektionen mit UAS an Flughäfen, militärische

UAS-Operationen, Durchquerungen von kontrolliertem Luftraum für Aufstiege in den VHL bzw. Abstiege und ggf. zukünftige UAS-Missionen für Güter- oder gar Personentransport. Hier wird es aus DFS-Sicht vor allem darum gehen, diese UAS-Missionen in die ATM-Systeme zu integrieren (mit entsprechender Labeldarstellung, Missionsdatenverarbeitung und Koordination mit der restlichen Luftfahrt. Hier besteht bereits heute die Pflicht, Transponder für Identifikation, Surveillance und Tracking mitzuführen, auch für UAS.

Über dem kontrollierten Luftraum, im VHL ab FL 660, sind ebenfalls UAS-Operationen zu erwarten, so z.B. meteorologisches „Station Keeping“, Messflüge, Langzeitmissionen z.B. zur Versorgung mit Internet- oder Mobilfunkkonnektivität bzw. militärische Aufklärungsmissionen. Es ist wahrscheinlich organisatorisch sinnvoller, dies als besonderen Teil in den ATM-Systemen zu belassen statt dies als weiteres, abgesetztes Layer in UTM zu verorten.

„UTM“ ist aus unserer Sicht dabei in vor allem ein technischer Begriff, der analog zu ATM ein System bezeichnet, während der von der europäischen Ver-

kehrskommissarin Violeta Bulc 2016 aufgeworfene Begriff von „U-Space“ in erster Linie ein politisches Zielkonzept darstellt, mit dem Verkehrs-, Technologie- und Wirtschaftsziele über vier Phasen (U1–U4) verknüpft werden (U-Space Blueprint 2017). Allerdings gehen wir in der Diskussion von einem erweiterten Systembegriff aus, nicht zuletzt wegen des Rückgriffs auf die überaus positiven Erfahrungen aus der Sicherheitskultur der bemannten Luftfahrt der vergangenen Jahrzehnte (Abb. 3).

Ein funktionierendes und sicheres Gesamtsystem umfasst neben den eigentlichen technischen Systemkomponenten stets auch Menschen/Akteure, die nach geltenden Regeln in einem System von Interaktionen und Organisationen ein oder mehrere technische Systeme einsetzen, um in einem definierten Luftraum Verkehrsmanagementfunktionen zum Zweck

der Sicherheit, fairem Zugang und Effizienz auszuüben.

Trotz der weiter unten noch darzustellenden paradigmatischen Unterschiede gehören jedoch UTM-Systeme wie ATM-Systeme in der Informationstechnik zu den „Command, Control and Communications Systems“ oder kurz C³-Systeme, die weltweit für Verkehrsüberwachung und -koordination für die unterschiedlichsten Verkehrsträger wie Luftfahrt, Seefahrt und Straßenverkehr im Einsatz sind (Heidger 2014). C³-Systeme weisen eine typische funktionale Pyramide auf,

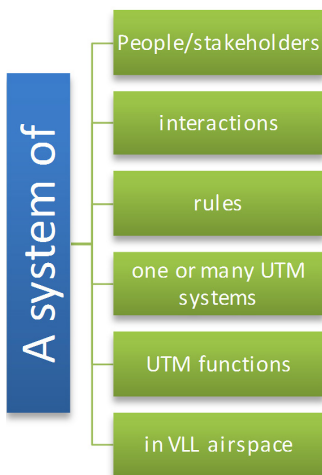


Abb. 3: Erweiterter Systembegriff von UTM

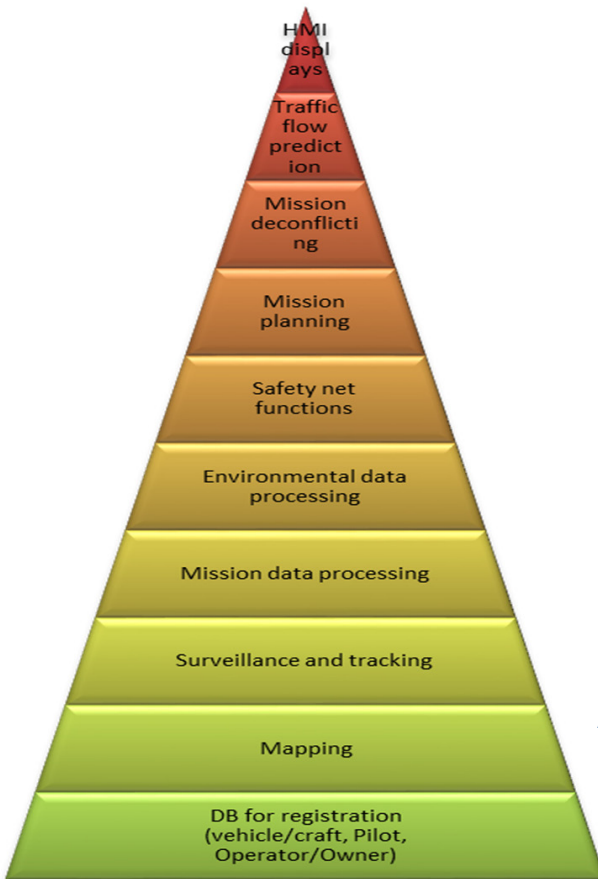


Abb. 4:
Funktionale Pyramide
von Verkehrsmanagementsystemen, angewandt auf UTM

die auch wieder für UTM-Systeme maßgeblich ist und die Entwicklung der betrieblichen Anforderungen leiten kann (Abb. 4).

Fundament eines UAS Traffic Managements ist demzufolge zunächst einmal eine Datenbank mit allen registrierten UAS und ihren hinterlegten Daten zur Ausstattung, Kennzeichnungen sowie dem Bezug zu den Haltern, also Drohnenoperatoren (Firmen) und ihren Piloten bzw. Einzelpersonen, wo Operateur und Pilot identisch sind. Diese Daten können im Tracking und bei der Nutzung des Systems durch Behörden mit Ordnungs- und Sicherheitsaufgaben (BOS) genutzt werden. Im darüber liegenden funktionalen Layer sind Kartendarstellungen erforderlich, die die Missionsumgebung und die Örtlichkeit 2D und/oder 3D visualisieren. Neben Hintergrund-Bitmaps mit Topographie, Satellitenbildern oder Stadt- und Straßenkarten wird es Overlays geben, die No-Fly-Zones (NFZs) und andere Lufträume sowie besonders relevante Punkte

darstellen. Diese Kartendaten sind natürlich laufend zu aktualisieren, und es ist naheliegend, dass dies am besten vollautomatisch zu bestimmten Stichtagen wie AIRAC-Terminen erfolgt. Auch 3D-Hindernis-Kartendaten gehören zu dieser Kategorie. Der nächsthöhere funktionale Layer benutzt Surveillance-Daten aus unterschiedlichen Quellen von UAS-Positionen, und in einer Multisensordatenfusion wird dies zu einem dynamischen Lagebild zusammengerechnet. Dieses Lagebild wird nicht notwendigerweise so direkt auf den HMI Clients gezeigt, es muss aber innerhalb des UTM-Systems als permanent aktualisiertes „Lagegedächtnis“ existieren, damit es von den verschiedenen weiteren funktionalen Layern wie Konflikterkennung und Lagedarstellung benutzt werden kann. Missions- bzw. Flugplanung erfolgt vor dem Flug in der „preflight phase“, und ist ein Flugplan validiert und genehmigt, wartet er im System auf den Zugriff durch den Tracker bei Start des Fluges, wird mit dem passenden Track kombiniert oder „korreliert“ und stellt dann bedarfsweise für den betreffenden Track die zusätzlichen Plandaten zur Verfügung. Dies kann wiederum im nächsthöheren Layer von der Konfliktdetektion benutzt werden. Neben den Tracks und den Flugplan- oder Missionsdaten sind in UTM (wie auch in ATM) Umweltdaten erforderlich, um ein Gesamtlagebild zu erzeugen. Diese Umweltdaten umfassen im wesentlichen Wetter mit einer UTM-spezifischen Ausprägung (Bodenwind und Niederschlag in hoher Auflösung sowie KPI-Index der Sonnenaktivität wg. GPS-Störung sind hier von besonderer Bedeutung) sowie für den VLL-Höhenbereich gefilterte NOTAMs. Im nächsthöheren Layer benutzen Safety Net Funktionen die Menge der Tracks und Missionsdaten, Kartendaten, NOTAMs, Wetterinformationen, um folgende Konflikte zu identifizieren:

- Verletzen UAS statische und temporäre sowie zukünftig auch dynamische (z. B. wetterbasierte) No-Fly-Zones?
- Bleiben UAS in zugewiesenen Geocages (Zylinder, Gebiete oder Korridore einer Mission)?
- Nähern sich UAS untereinander unterhalb kritischer vertikaler und horizontaler Abstände?
- Nähern sich UAS und bemannte LFZ unterhalb kritischer vertikaler und horizontaler Abstände?
- Nähern sich UAS Hindernissen oder Terrain unterhalb kritischer Abstände?
- Gibt es zwischen den Missionsplänen von UAS untereinander kritische Überschneidungen in Raum und Zeit?

Im nächsthöheren Layer kann auf der Basis der Missionspläne und der detektierten Konflikte ermittelt werden, welche Flugwegveränderungen oder ggf. auch Stopps (Multikopter-UAS sind ja dazu in der Lage) einen Konflikt bereinigen, und in einem weiteren Ausbauschritt ist denkbar, dass das UTM-System die dazugehörenden Kommandos automatisch an die betreffende Drohne

übermittelt, sofern die dazu nötige Konnektivität sichergestellt ist. Als „Königsdisziplin“ ist oberhalb dieser funktionalen Layer Verkehrsflussprädiktion und -steuerung denkbar, in der die potenziellen Konflikte und ihre passende Lösung schon so frühzeitig gesteuert werden, dass ein reibungsloser Fluss der UAS sichergestellt werden kann. Als oberstes funktionales Layer benötigen wir dazu angepasste, laufend weiterentwickelte HMIs. Da wir bei UTM mehr Stakeholder als in ATM identifizieren und diese unterschiedlichen Organisationen angehören, werden Web-technologiegestützte HMI-Clients bedeutsam, und da auch UAS-Piloten im Feld zwecks „situational awareness“ zu den Nutzern gehören werden, sind auch mobile App-HMIs auf Smartphones bzw. Tablets zu berücksichtigen. Rotiert man diese funktionale Pyramide in eine Zeitdimension, erhält man im Übrigen eine der Sequenz von U1, U2, U3, U4 wie im U-Space Blueprint sehr ähnliche Abfolge, mit dem Unterschied, dass die Funktionalitäten „Surveillance“ und „Tracking“ bereits von Anfang an Teil der Roadmap sind (U-Space Blueprint 2017).

Die vorgenannten Funktionen gehören überwiegend zur „inflight phase“ der Drohnenoperationen; UTM soll aber auch die „preflight phase“ und die „post-flight phase“ unterstützen. Hierzu unterscheiden wir mindestens die folgenden Anforderungen:

- In der „Preflight Phase“:
 - Registrierung von Operateur, Pilot und UAS,
 - Befüllung und Pflege des Operatordatensatzes mit den erforderlichen Zertifikaten, Nachweisen, Betriebshandbüchern, Versicherungsdokumenten und Qualifikationen seiner Piloten,
 - Definition, Editierung und ggf. Modifikation von UAS-Missionen,
 - Validierung dieser Missionen gegen bestehende nationale Regelungswerke,
 - Identifikation von strategischen Plankonflikten mit anderen Missionen in gleichen Zeitfenstern,
 - Abwicklung des Genehmigungsprozesses einer Mission oder einer Serie von Missionen insbesondere mit den LLBs.
- In der „Postflight Phase“:
 - Erzeugen von Reports
 - Pflege des Logbuches
 - ggf. Incident Management
 - ggf. weitere Maintenance-Funktionen

Wie schon angekungen, identifizieren wir im Gegensatz zu ATM nicht nur Piloten und Lotsen als Stakeholder im UTM-System, sondern es kommen einen ganze Reihe weiterer Akteure hinzu, während der Lotse im klassischen Sinne voraussichtlich nur noch an bestimmten Brennpunkten wie Flugplätzen eine

Rolle spielt und sonst nicht mehr, da UTM schon allein aufgrund der schier erwarteten Zahl von UAS-Missionen auf Selbstorganisation und -verantwortung von Operateuren und Piloten setzt statt auf das klassische Piloten-Lotsen-Verhältnis. Diese Akteure sind:

- UAS-Operateure als UAS-Betreiber,
- UAS-Piloten als Steuerer bzw. Überwacher automatischer Flüge mit Eingriffsverantwortung,
- auch Piloten von VFR-Flügen im VLL,
- ANSP als UTM Service Provider (USP) mindestens des zentralen UTM-Systems in einem Land, wenn nicht auch der USP überhaupt,
- Behörden für die Genehmigung (CAA in vielen Ländern, in Deutschland an erster Stelle die LLBs, ggf. aber auch Ordnungsämter und Naturschutzbehörden),
- Behörden mit Ordnungs- und Sicherheitsaufgaben (BOS) zur Durchsetzung der Regeln und Ahndung von Verstößen (v. a. Polizei),
- ggf. noch weitere Luftfahrtbehörden mit Rollen im Registrations-, Zertifizierungs- oder Genehmigungsprozess (BMVI, LBA, BAF, mil. Stellen).

Wir erhalten damit die in Abb. 5 gezeigte Aufstellung von Akteuren in einer landesweiten UTM-Cloud.

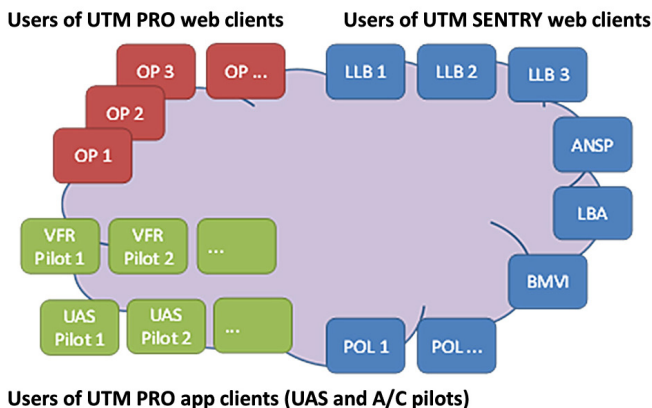


Abb. 5:
Stakeholder in
der Cloud eines
UTM-Systems

Insbesondere für den Genehmigungsprozess, aber auch für das Monitoring des Geschehens im Sinne von BOS-Aufgaben sind zusätzlich zu den bisherigen HMI-Anforderungen auch Webclients für die behördlichen Aufgaben erforderlich, und zwar

- Lagemonitoring im Zuständigkeitsbereich,
- Zugriff auf die Registratur zur Identifikation von Regelverletzern,

- Abwicklung von Missionsgenehmigungen im Zuständigkeitsbereich,
- Definition (und Aufhebung) von temporären zusätzlichen NFZs zur Absicherung von Veranstaltungen, Unfällen u. ä. lokalen schutzwürdigen Ereignissen.

Es ist erkennbar, dass es in UTM zahlreiche funktionale Analogien zu ATM gibt, aber es existieren auch einige fundamentale paradigmatische Unterschiede zu ATM:

- Eine beschleunigte Automatisierung nicht nur in der Robotik des UAS (damit Ermöglichung von Funktionen der Selbstorganisation wie D&A, Schwarmformation u. a.), sondern auch der UTM-Funktionen werden von der technologischen Innovation („brushless motors“, Sensorminiaturisierung, Leistungssteigerung in FMS, AI-Algorithmen) vorangetrieben.
- Eine geradezu explodierende Vielfältigkeit und Menge von einzubeziehenden Ressourcendaten in anderen Größenordnungen als in ATM (Karten, 3D-Objektdaten – statt 1 Mio. ca. 100 Mio. Geodaten) sowie Umweltdaten (detailliertere Wetterdaten, NOTAMs) stellt das UTM-System vor Performanz-Herausforderungen.
- Eine Multiplizität von Identifikationsmitteln, Positionssensorik und Übertragungswegen fordert von Beginn an die Fähigkeit des UTM-Systems zu einer Multisensordatenfusion (MSDF).
- Die erwartete Menge von UAS-Operationen erfordert Selbstorganisation und Selbstservice für die Nutzer, insbesondere Operateure und Piloten, aber auch Behörden, sowie neue webbasierte HMIs und Abläufe.
- Während ATM relativ privat in geschlossenen Systemen in ACCs und TWRs abgewickelt wird, ist UTM durch seine Vielzahl an Nutzern und Stakeholdern viel mehr ein öffentliches System und stellt andere Anforderungen an die IT-Sicherheit.
- Es gibt in UTM eine Vielfältigkeit und Heterogenität der Nutzer über das ATM-Paar „Lotse und Pilot“ hinaus.
- Daher sind intuitive und nutzerfreundliche HMIs von viel größerer Bedeutung als in ATM.
- Die Erwartungshaltung im Markt der mobilen Apps ist zudem ein vergleichsweise niedriger Preis.
- Ebenso dürften leicht fassliche Abrechnungsmodalitäten zu den Erwartungen gehören.
- Die Finanzierung von UTM wird u. U. auch andere, neuere Wege einschlagen als dies bei ATM der Fall ist.

Auch diese paradigmatischen Unterschiede wirken sich auf die betriebliche Anforderungsentwicklung an UTM aus. Die zentrale Lageproduktion in den Trackservern der UTM-Cloud und die unterschiedlichen Darstellungsbedürfnisse der

Stakeholder sowie die zu berücksichtigenden Anforderungen an die Sicherheit der bemannten Luftfahrt dürften dazu führen, dass UTM-Clients im Internet/Web

- ein ausgeklügeltes Login-, Rechte- und Funktionsfreischaltungskonzept benötigen,
- ausgereifte Lagedarstellungsfiler für die Zieldarstellung von UAS und umgebender Luftfahrt benötigen, ggf. auch geeignete Aggregationen (da niemand etwas mit einem „Wimmelbild“ von massenhaften UAS-Flügen anfangen kann),
- diese Kommunikation sicher erfolgt und gegen Verfälschungen abgesichert wird.

Ein weiterer Treiber für die betrieblichen Anforderungen werden die „Concepts of Operation“ (ConOps) sein, die in diversen Missionsentwürfen von UAS bei den Operateuren, aber auch in EU-Projekten (wie z. B. ein Referenz-ConOps in CORUS (CORUS 2018)) bzw. als Standardszenarios für die SORA-Bewertung bei JARUS (JARUS 2017, darin auch Annex J) entstehen. Dabei wird es bedeutsam sein, wie diese ConOps die Regulierungsvorschläge der europäischen Agentur EASA in Köln (EASA NPA 2017, Opinion Nr. 01/2018) zur Einführung eines risikobasierten Ansatzes für die Genehmigung von UAS-Operationen der Kategorien „open“, „specific“ und „certified“ aufgreifen. In CORUS ist das eine der zentralen inhaltlichen Diskussionen. Diese ConOps adressieren typischerweise:

- Anwendungstypen von UAS-Missionen,
- Missionsabläufe (Normalfall, Contingency und Emergency-Fälle),
- Auswirkungen von unterschiedlichen UAS-Typen auf Missionsabläufe,
- Risikokategorien der Operation (Open – Specific – Certified),
- Überlegungen zu Risiken, Risikobewertungen und SORA (siehe JARUS 2017),
- UAS-Luftraumstrukturierungen und darin geltende Bestimmungen und Abläufe,
- Regeln für die Missionsabwicklung und den Flug,
- Mitwirkende bei Missionen und ihre genauen Rollen und Aufgaben,
- Vorschläge zu Abstandsminima zu NFZs, anderen UAS und bemannter Luftfahrt,
- Regelungen zu Vorwarnungen, Warnungen und Alarmen,
- vorgesehene Interaktion mit einem zukünftigen UTM-System.

Auch das CORUS-Referenz-ConOps wird diese Themen bearbeiten und Vorschläge z. B. zu Separationsminima unterbreiten, ebenso wie andere Initiativen und Projekte auch, die dann in die globale Diskussion der „Best Practices“ für UAS-Betrieb eingehen werden und u. U. zur Regelbildung bei EASA bzw. dem

europäischen Trilog zwischen Kommission, Rat und Parlament beitragen oder über JARUS-Vorschläge und Aufgriffe in den ICAO-Arbeitsgremien Teil der zukünftigen internationalen Regeln zum UAS-Betrieb werden.

Für das UTM-Projekt der DFS selbst, das November 2016 anlässlich der DFS-Drohnenkonferenz „The Drone Challenge“ in Langen unter dem Arbeitsnamen „U:CON Drones Connected“ zwischen der DFS und dem Partner „Deutsche Telekom AG“ (DTAG) ins Leben gerufen wurde, wurde nach der initialen Anforderungsdefinition v.1.0 vom Januar 2017 im Juni 2018 ein wesentlich umfangreicheres Anforderungsdokument v.2.2 erstellt. Dieses hat die bisherigen Erkenntnisse aus den mittlerweile über 20 unterschiedlichen U:CON Use Cases, der Arbeit der DFS in CORUS, den ConOps aus Projekten der DFS und DAS mit externen Kunden aufgegriffen (Heidger 2018). Dieses Anforderungsset ist die Grundlage der weiteren UTM-Entwicklung durch das Systemhaus und den externen Lieferanten Unifly aus Antwerpen, Belgien.

UTM-Anforderungen an die bestehenden ATM-Systeme sind zum heutigen Stand noch nicht erarbeitet worden. Dies ist sicherlich ein betriebliches Erfordernis, das als weiterer Schritt zur Komplettierung der sicheren und fairen UAS-Integration in den deutschen Luftraum erfolgen muss. Wahrscheinlich ist es dazu am zweckdienlichsten, wenn sich die jeweiligen Anforderungs- und Produktmanagements der operativen ATM-Systeme mit den Vertretern des entstehenden UTM-Produktmanagements zum geeigneten Zeitpunkt zwecks Requirements Engineering zusammensetzen. Sicherlich ist es dabei von praktischem Nutzen, dass es auf UTM-Seite schon Vorstellungen zum Datenaustausch zwischen ATM und UTM gibt, und als Nebeneffekt der Wahl des weit in der DFS verbreiteten PHOENIX-MSDF-Trackers nebst AWP als TrackServer-Backbone für die UTM-Cloud Tracks von UAS-Missionen im ATM-Kontext wie z. B. in einem Tower sichtbar gemacht werden können.

5 Systementwicklung und UTM-Architektur

Im Bereich „Systeme“ folgte nach der „Drohnenkonferenz“ der DFS Anfang November 2016 eine rasche Entscheidung für ein exploratives Projekt zusammen mit der DTAG. Ebenso erfolgte eine frühe Entscheidung für die Einbeziehung von MSDF und Tracking auf der Basis des DFS-Trackers PHOENIX als zentrale serverseitige Datenverarbeitungsfunktionalität und der Nutzung der Mobilfunkinfrastruktur der DTAG als zentralem Medium für die Übertragung von UAS-Positionsdaten. Als ein exploratives Projekt war „U:CON“ deswegen angelegt, weil noch unklar war, wie gut sich Drohnen tracken lassen, denn sie haben eine andere Flugdynamik als gewöhnliche Luftfahrt. Ebenso unklar war die ausreichende Coverage des GSM, LTE- und 5G-Mobilfunknetzes in Deutschland.

Und schließlich mussten die Vorstellungen zu den UTM-Funktionalitäten im Verlauf des Projektes weiter ausgearbeitet und konkretisiert werden, da zu UTM weder ausreichend „best practices“ noch klare gesetzliche Vorgaben existierten (und auch heute noch fehlen).

Parallel dazu entwarf die DFS die Anforderungen und den ersten Prototyp einer nationalen Registrationsdatenbank. Die Einführung einer UAS-Registration ab z. B. 250 g (ursprünglicher DFS-Vorschlag) oder 900 g (EASA NPA 2017-05) war von Beginn an eine der zentralen Forderungen der DFS an die Luftfahrtbehörden in Deutschland, allein wollte man dort die Regelungsentwicklung bei der EASA abwarten, um dann evtl. auf deren Grundlage Bestimmungen zu erlassen. So diente der prototypische Entwurf der DFS dem Zweck, der Politik zu signalisieren, dass eine Lösung bei der DFS bereitsteht, sobald das politische Mandat dazu erteilt wird. Mittlerweile ist die Registrationsdatenbank Teil des prototypischen UTM-Systems, weil es sinnvoll ist, UTM-Services direkt auf die Registrationsdaten zugreifen zu lassen, u. a. wegen Identifikation und Labelling, Track-Flugplan-DB-Korrelation, Nutzung von Registrationsinformationen für die Missionsvalidierung, Neukundenanlage, und Recherche für „Law Enforcement“.

Wie oben dargestellt, führt die Vielzahl von Nutzern und Stakeholdern, die landesweit in unterschiedlichsten Organisationen und Firmen verteilt sind, ganz natürlich zu einer webbasierten, skalierungsfähigen Cloud-Lösung. Früh war jedoch klar, dass dies eine private Cloud der DFS sein würde, denn für Polizeien, BOS-Kräfte und andere deutsche Organisationen wie die DFS selbst, die vertrauliche Daten in dem System würden handhaben müssen, wäre eine Amazon- oder Microsoft-Cloud problematisch wegen des nicht kontrollierbaren Datenzugriffs, und schon ganz und gar würden solche UTM-Clouds ausfallen, wo die Lieferanten beim Betrieb in ihrer Cloud gemäß ihren Lizenzbestimmungen automatisch Datenverwertungsrechte erwerben würden (zu diesem Zeitpunkt bei Altitude Angels und AIRMAP sowie anderen US-amerikanischen UTM-Lösungen der Fall).

Im Zuge dieser Erörterungen schärfte sich das DFS-eigene Bild einer UTM-Referenzarchitektur, die so dann auch in die Diskussion von CORUS und der A6 eingebracht wurde. Sie ist in [Abb. 6](#) dargestellt.

Demzufolge existiert ein UTM-System in einer privaten „staged cloud“ mit öffentlichen Zugängen, eine „staged cloud“ deswegen, weil in dieser Cloud eine Entwicklungsebene benötigt wird (Stage 1), typischerweise „Sandbox-Umgebungen“, sodann eine Test- und Integrationsebene (Stage 2), und schließlich eine öffentlich zugängliche Ebene (Stage 3), die aus einer Instanz heraus gemanagt werden müssen, um Konsistenz zu wahren. Damit wird UTM nebenbei auch ein Treiber von Cloud-Technologie-Anwendungen bei ANSPs. Die Serverseite ist zudem zweigeteilt:

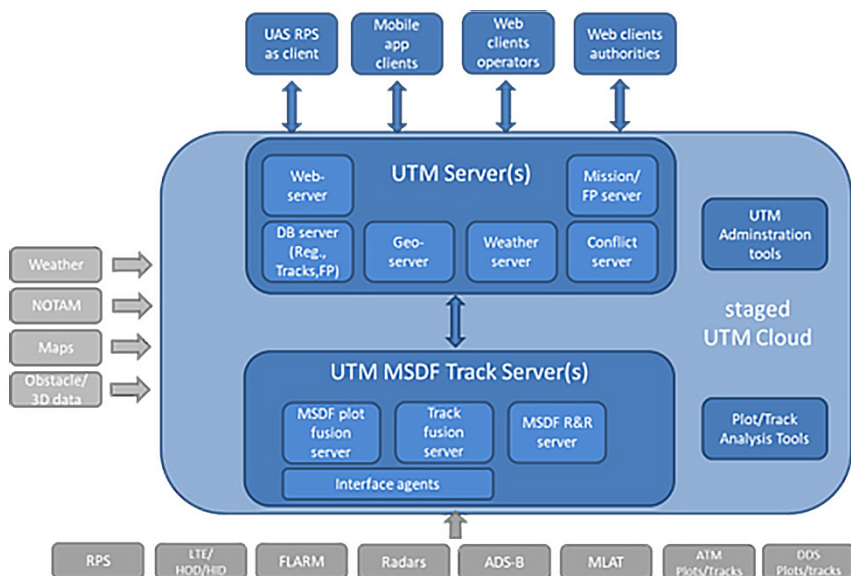


Abb. 6: Die DFS-UTM-Referenzarchitektur

1. UTM-MSDF Track Server für die MSDF
 - mit MSDF Plot Fusion Server für die Verarbeitung von ungetrackten UAS-Positionsmeldungen (sowie ungetrackten Messdaten aus der benannten Luftfahrt),
 - und einem Track Fusion Server für die Verarbeitung von getrackten UAS-Positionsmeldungen (sowie ggf. vorverarbeiteten ATM-Tracks),
 - sowie einem Recording & Replay-Server für „Legal Recording & Replay“ für Analyse- und Investigationszwecke.
2. UTM-Server erhalten die Tracks unbemannter und bemannter LFZ und verarbeiten diese weiter, und dies im Wesentlichen mit Hilfe folgender Serverprozesse:
 - Datenbankserver zur Aufnahme der Registrationsdatenbank, der Datenbank aller aktuellen Tracks und der Datenbank aller aktuellen Flugpläne (sowie ggf. „History Stores“ für zurückliegende Vorfalluntersuchungen),
 - Geoserver zur Verarbeitung von 2D- und 3D-Karten- und Hindernisdaten für das schnelle Zeichnen von Hintergrundkacheln und Vordergrundlayern für die Flugplanung und -validierung bzw. das FlightView-Lagedisplay,
 - Wetterserver zur Verarbeitung von Umweltdaten, v.a. UAS-relevante METEO-Informationen, Identifikation von dynamischen Geofences (z. B. Gewitterfronten, Schnee- und Regenfronten, bodennahen Sturmgebieten),

- Mission- bzw. Flugplanserver zur Korrelation von Tracks mit Missionen/ Flugplänen, Validierung von Flugplänen, Conformance Monitoring von aktuellen Tracks gegen Flugpläne und zur Konfliktdetektion von Flugplänen untereinander (Plankonflikte), sowie zukünftig sicherlich auch zur Konfliktlösung und evtl. Kommandierung von UAS aus UTM heraus im Konfliktfall (sofern dazu die rechtlichen Implikationen angemessen geregelt sind),
- Conflict Server berechnen die schon im vorigen Kapitel aufgeführten Konfliktfälle, sowohl in der Missionsplanung wie im aktuellen Flug, auf der Basis von Tracks, Flugplänen, Geodaten und Wetter,
- Webserver binden die Nutzersysteme an und stellen mobilen Apps bzw. Web-Clients die erforderlichen UTM-Funktionen und HMIs zur Verfügung,
- NOTAM-Input wird voraussichtlich sowohl von Flugplanservern wie Geoservern verarbeitet werden müssen – insbesondere, wenn sich der Status von Lufträumen ändert und dies Auswirkungen auf aktuelle wie zukünftig geplante UAS-Missionen hat.

Diese Server sind nicht notwendigerweise eigene Hardwarekomponenten, sondern zunächst einmal ausführbare Linux-Prozesse in einer skalierbaren Umgebung von virtuellen Maschinen, die über einen ESB-Bus miteinander Daten austauschen können. Wichtig bei allen Serverprozessen ist ihre Skalierbarkeit, damit dem erwarteten starken Aufwuchs der schier Zahl von Drohnenmissionen in der Performance Rechnung getragen werden kann. Daneben wird es eine Schicht von Prozessen geben, die UTM-Administrationstools für den UTM- und Cloud-Betrieb und Plot- bzw. Track-Analysetools für die Diagnostik und laufende Qualitätssicherung der Zieldatenverarbeitung bereitstellen.

Von der Sensorseite ins „Feld der UAS-Operationen“ hinein erwarten wir, dass folgende Inputkanäle und Sensortechnologien zur möglichst vollständigen Surveillance des Luftraumes eine zentrale Rolle spielen:

- RPS als Quelle der UAS-Id- und Positionsdatenübertragung aus der RPS-Telemetrie,
- LTE- (bzw. GSM bzw. zukünftig G5) gestützte HODs und HIDs als Quelle von Position und Id (HODs sind drohnenagnostisch und daher universell einsetzbar, haben aber keine Verbindung zum UAS-eigenen Autopiloten oder der Telemetrie; HIDs hingegen sind integrierte Lösungen und daher verbunden, sind aber UAS-spezifisch zu implementieren und daher von der jeweiligen UAS-Herstellerpolitik abhängig),
- FLARM als Quelle von Position und Id für UAS und bemannte Luftfahrt,

- Radaranlagen (PAR, PSR, SSR, Mode S) als Quelle von Position und Id für UAS und bemannte Luftfahrt,
- ADS-B bzw. Low-Power-ADS-B als Quelle von Position und Id für UAS und bemannte Luftfahrt,
- Multilateration (Nahbereich-MLAT oder Weitbereich-WAM) als Quelle von Position und Id für UAS und bemannte Luftfahrt),
- Plots aus ATM-Systemen oder vorverarbeitete Tracks aus ATM-Systemen als Quelle von Position und Id für bemannte Luftfahrt,
- Drohnerdetektionssysteme (DDS) für non-kooperative UAS als Quelle von Position und Id für „rogue UAS“ (benutzen i. d. R. eine Kombination von PAR oder holographischen Radaren, Akustik, Optik, und Frequenzscanning als Detektortechnologien).
- Hier ist interessant zu beobachten, dass das Auftreten von UAS im VLL die Surveillance von bemannter Luftfahrt im gleichen Bereich stark beschleunigt.
- Die bemannte Luftfahrt im Luftraum Golf ist nicht verpflichtet, sich zu identifizieren, und die ANSPs haben üblicherweise hier kein FVK-Mandat. Aus Eigensicherungsgründen hat sich hier in den vergangenen zehn Jahren unter den Nutzern ein Low-Cost „Grassroots-ATC“ auf der Basis von ADS-B (Flightradar 24) und FLARM (sowie Power-FLARM und FARM für Gleitschirmflieger) entwickelt. Das Auftreten von UAS in VLL thematisiert nun verstärkt die Sichtbarwerdung von VFR-Fliegerei in ebendiesem Luftraum. Nun kann auf diese Technologien zurückgegriffen werden, um das Luftlagebild Zug um Zug zu vervollständigen.

Neben diesen Inputs der Surveillance werden UTM-Systeme laufend weitere externe Daten verarbeiten. Hier sind insbesondere zu nennen:

- Wetterdaten
- Karten-/Geodaten
- Obstacle/3D-Daten
- NOTAMs

Auf der Clientseite finden wir zwei Gruppen von Applikationen in der Referenzarchitektur:

1. Mobile Anwendungen auf Smartphones und Tablets (typischerweise Android- und iOS-Plattformen):
 - Mobile Apps als Clients des UTM
 - Kostenfreie Informationsdisplays für die Allgemeinheit (wie z.B. die „DFS-DrohnenApp“)
 - Kostenpflichtige mobile Clients („Apps“) für die Profi-UAS-Piloten
 - Kostenpflichtige mobile Clients/Apps für die VFR-Piloten

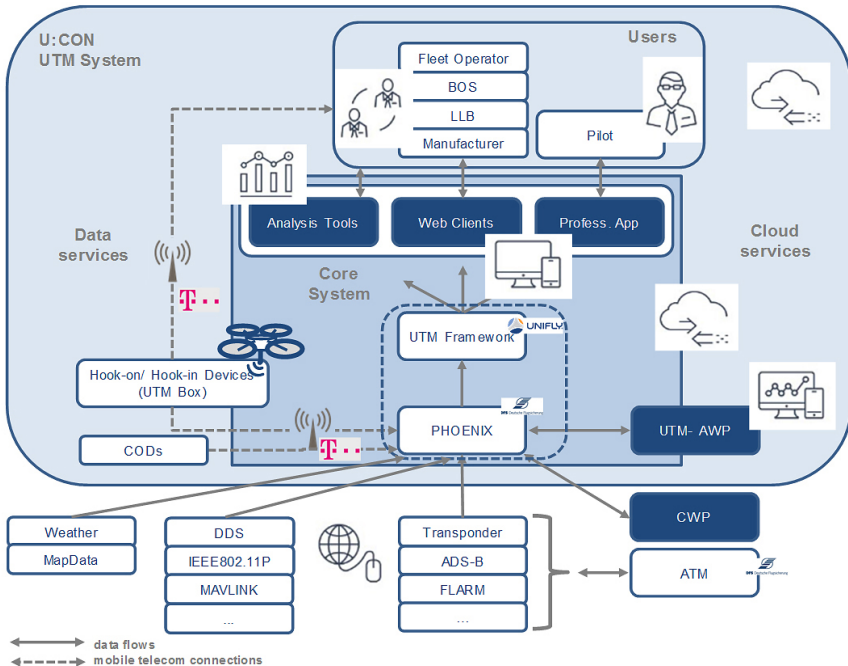


Abb. 7: Das in der DFS im Aufbau befindliche UTM-System

- Kostenpflichtige mobile Clients/Apps für BOS-Kräfte (z.B. die in Vorbereitung befindliche DFS-App „Whats that drone?“)
- Modifizierte und UTM-integrierte UAS-RPS (so etwas wie „Mission Planner“ oder „QGroundControl“) als Clients

2. Web-Clients

- Web-Clients für Operateure und Piloten (in der DFS-Client-Terminologie „Pro Web Clients“)
- Web-Clients („Sentry Clients“) für Behörden, BOS, LLBs und ANSPs bzw. Web-Displays für offizielle Informationsseiten (siehe z. B. in Europa bei Austrocontrol, Naviair, und Belgocontrol)
- Diese Referenzarchitektur befindet sich bei der DFS in der Implementation und im Test. Ein Gesamtbild dazu liefert [Abb. 7](#).

Dabei wird die MSDF-Tracking-Funktionalität von einem erweiterten PHOENIX-IMM-Tracker verrichtet (siehe zur Theorie des Kalman-Filters im Tracking: Heidger 2014, Mathias und Pourvoyeur 2010; Grundlagen in: Bar-Shalom und Li 1993 sowie Kalman 1960), der vor allem durch folgende Anpassungen „drohnentauglich“ gemacht wurde:

- Schaffung der Interfaces zum HOD/HID (UAS Plot ICD Format: Heidger et al. 2018) sowie zu MAVLINK und FLARM;
- Erweiterung der Konfigurationsmöglichkeiten im Tracker für UAS-Daten (aus Inputkanälen des Trackers, die der UAS-Detektion zugeordnet sind – Nutzung des PHOENIX-Konzeptes der „sensorlokalen Trackerkonfiguration“);
- Erweiterung des ASTERIX Cat 62-Outputs (UAS Track ICD: Pourvoyeur und Dix 2018) für die höhere Positionsgenauigkeit der UAS-Daten;
- Vergrößerung des Wertebereichs für Positions- und Kinematikdaten im Tracker (dadurch höhere Auflösung);
- Implementierung einer Feature-Fusion für unterschiedliche Ids von Drohnen aus IMSI, ADS-B-Kennung, MAVLINK-Kennung oder FLARM-Identifizier;
- Verarbeitung und Umrechnung von geometrischer und barometrischer Höhe für UAS.

Die erreichten Ergebnisse wurden im technischen Report des explorativen Projektes U:CON zusammengestellt (Frisch und Heidger 2018). Es wurden 2017 bis 2018 mehr als 15 Trackingtests an diversen Orten verteilt über ganz Deutschland durchgeführt, und zwar

- auf dem DFS-Campus ab 07/2017–2018,
- mit Agrar-Flugpattern GA Flugplatz Pforzheim 07/2017,
- mit den Multi-UAS-Experimenten auf dem Fluggeländes des Modellflugclubs MFC Langen 07–09/2017,
- mit den Multi-UAS-Flügen am FH Egelsbach 07–10/2017,
- mit den Agrar-Pattern auf den Testflächen für Weinanbau der Universität Geisenheim, 10/2017,
- mit der erstmaligen Integration mit ATM-Plots, DLRG Horneburg 10/2017,
- mit den „Search pattern“-Flügen bei THW Bonn-Beuel 11/2017,
- mit den HOD-Flügen hoch bis 2700 ft bei St. Leon-Roth südlich von Heidelberg 12/2017,
- mit den Airtaxi-UAS-Flügen bei Volocopter am Flugplatz Bruchsal 04/2018,
- mit den Survey Pattern bei Duisburg am Rhein 05/2018 (wieder inkl. ATM-Tracks),
- mit Airport Construction Site Inspektionsflügen bei Fraport in Frankfurt 06/2018 und 10/2018 (dto.),
- mit Sensor-Fusionstests rund um den DTAG-Funkturm in Waghäusel und weiteren Standorten in Südpfalz und Baden-Württemberg 06 ff/2018 (dto.).

Die ausgesprochen vielversprechenden Ergebnisse der Tracking-Tests sind in [Tab. 1](#) zusammengefasst.

Handlungsbedarf besteht noch im Zeitverhalten der HODs und bei einzelnen Varianten der Sensor- und Id-Fusion für UAS in Abgrenzung zu Tracks bemannter LFZ.

Analysefunktionen und Recording & Replay-Dienste übernimmt dabei die PHOENIX AWP (siehe Abb. 8). Sie wurde schon in den letzten Monaten für



Abb. 8: PHOENIX AWP Luftlage mit UAS und bemannter Luftfahrt (Campus DFS, Wag-
häuserl)

Tab. 1: Ergebnisse der Tracking-Tests

Positionsgenauigkeit horizontal	1 m im Geradeausflug 3 m bei schnellen Kurvenflügen
Erfassung in der Horizontalen	Im gesamten Bundesgebiet im D1-Mobilfunknetz
Erfassung in der Vertikalen	Flächendeckend meist bis 150 m, Gebietsweise sehr unterschiedlich
Datenreisezeit im MF-Netz	100–400 ms
Datengröße pro Meldung	40–150 byte
Trackkontinuität	Für kurzzeitige Aussetzer gegeben
Trackkapazität modif. UTM-PHOENIX	10.000 max

die Trackingtests benutzt. Genaue Analysen von Tracks, Messdaten, Zeitverhalten, Lücken, Dateninhalten und Trackerperformanz sind damit möglich, ebenso Regressionstests mit Recording und Replay inkl. Re-Tracking mit veränderten Parametern bzw. Algorithmen.

Wetterdaten werden im Rahmen des bestehenden Servicevertrages zukünftig vom DWD geliefert, der dazu sein Lieferprogramm vor allem um Winddaten in Bodennähe in feinerer Zellaufösung vertikal und horizontal zur Verfügung stellt, ebenso Niederschlagsdaten, Temperatur, Taupunkt, QNH, und den KP-Index der Sonnenaktivitäten, die die Genauigkeit von GNSS-Messungen beeinträchtigen können (KPI > 4).

Die zentralen UTM-Services werden auf das UTM-Framework von Unifly gestützt (siehe [Abb. 9](#) und [Abb. 10](#)), ebenso die mobilen Apps mit Ausnahme der „What’s that drone?“ App für BOS, die zum Einstieg in die App-Entwicklungstechnologie vom DFS-Systemhaus gebaut wird. Das HOD wird von der DTAG bereitgestellt. Bisher wurden zwei Generationen von Prototypen erprobt, diese sind funktional noch nicht ganz ausreichend, eine dritte mit der Nutzung von MQTT und einem weiter verbesserten Zeit- und Timeout-Verhalten wird ggw. getestet. Bei den bisherigen Versuchen hat sich gezeigt, dass eine vertikale Ausrichtung der HOD-Antenne die besten Erfassungsergebnisse liefert. Die benutzten Frequenzbereiche sind das 800 MHz- (für große Flächenabdeckung), das 1600 MHz- (Standardspektrum für LTE), und das 2800 MHz-Band (lokaler Einsatz zur Erhöhung der Kapazität) (Frisch und Heidger 2018). Die Devices verbinden sich auch nicht unbedingt mit den nächsten Mobilfunkzellen, sondern durch ihre Flughöhe mit weiter entfernten, was zu Herausforderungen an das Scheduling im Netz führt.

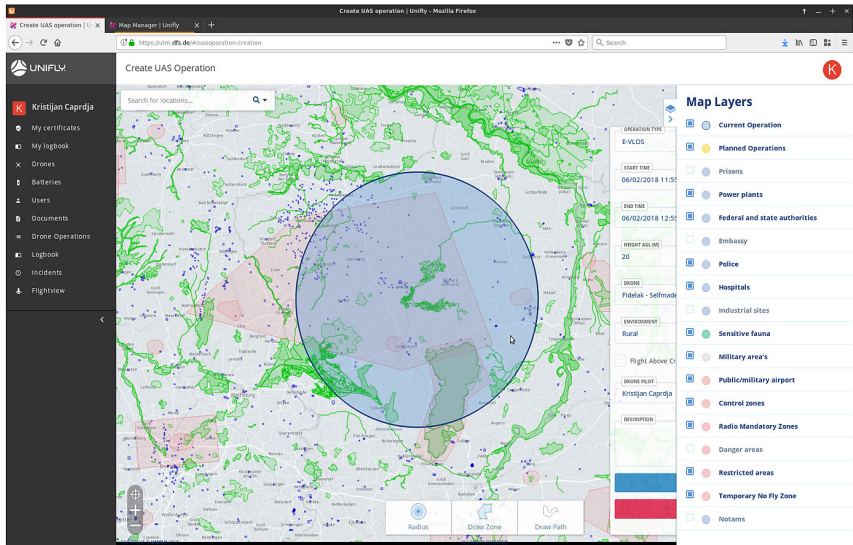


Abb. 9: Planungsdisplay in „UTM PRO“

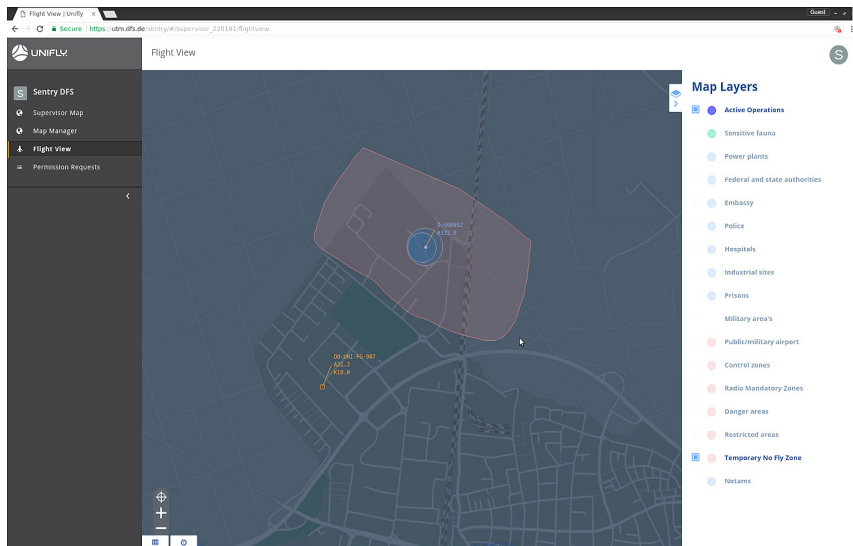


Abb. 10: Lagedisplay in „UTM-SENTRY“

Neu in dem Instrumentarium der Analyse- und Lagedisplay-Tools für UTM ist der „TrackViewer“, der eine konfigurierbare und filterbare Luftlage übers Web an ausgewählte freigeschaltete Nutzer bereitstellt, um direkt aktuelle UseCase Experimente in U:CON zu unterstützen (siehe [Abb. 11](#)). Dieses mit „Ruby on Rails“ entwickelte Werkzeug wird fürs schnelle Prototyping eingesetzt, um neue Ideen des HMIs und des Nutzersupports möglichst schnell auszuprobieren und dann nach erfolgter Evaluation in den UTM-Clients nachzuimplementieren.

In den nächsten Monaten wird der Schwerpunkt der Entwicklung auf dem Testen, Bug-Fixen und Herstellen eines „Minimum Viable Products“ (MVP) liegen, um die öffentliche Freischaltung des UTM-Systems übers Internet durch DFS und DTAG zu ermöglichen. Dabei sind insbesondere die Genehmigungsabläufe zwischen Operateuren und Landesluftfahrtbehörden zu erproben und zu härten, damit das UTM-System die Genehmigung v. a. von BVLOS-Flügen unterstützt. Im Genehmigungsprozess selbst werden Kriterien des SORA zukünftig eine zentrale Rolle spielen. Hier ist noch abzuwarten, wie sich die deutsche SORA-Variante nach der Publikation der SORA von JARUS und den zugehörigen Standardszenarios anpassen wird. Die Funktionalitäten von Konfliktwarnung werden im Anschluss intensiver getestet, um dann – voraussichtlich in 2020 ff. – die höheren Funktionen der Konfliktauflösung und des Congestion Managements anzugehen.

Beim Datenaustausch zwischen ATM und UTM, der bald zu einem weiteren zentralen Entwicklungsthema wird, ist aus Sicht der DFS davon auszugehen, dass es dabei mindestens um die folgenden Daten geht:

- Trackdaten von UAS bzw. LFZ, v. a. an Transitionszonen,
- Flugplandaten von UAS, v. a. in Kontrollzonen und an Flughäfen,
- (ggf. aggregierte) Zustandsdaten wichtiger Ereignisse, wichtiger Verkehrseinheiten und von Lufträumen,
- Meldungen, Warnungen und Alarmer zu Konflikten (UAS-UAS, UAS-LFZ, UAS-NFZs),
- ggf. NOTAMs falls diese sich als Austauschmedium von Informationen zwischen ATM und UTM bewähren sollten.

Zwischenzeitlich wird auch erörtert, wie die Kommunikation zwischen verschiedenen UTM zukünftig aussehen soll. Dazu hat Google einen „Inter-USS“-Plattformvorschlag gemacht, der aber von vielen ANSPs als problematisch angesehen wird, denn er impliziert die anschließende Abhängigkeit von Google. Aus ANSP-Sicht entwickeln sich derartige Schnittstellen besser ohne Abhängigkeiten aus den nationalen UTM-Systemen heraus, in einem zweiten Schritt, und dabei möglichst gemeinsam vereinbarten Standards folgend.

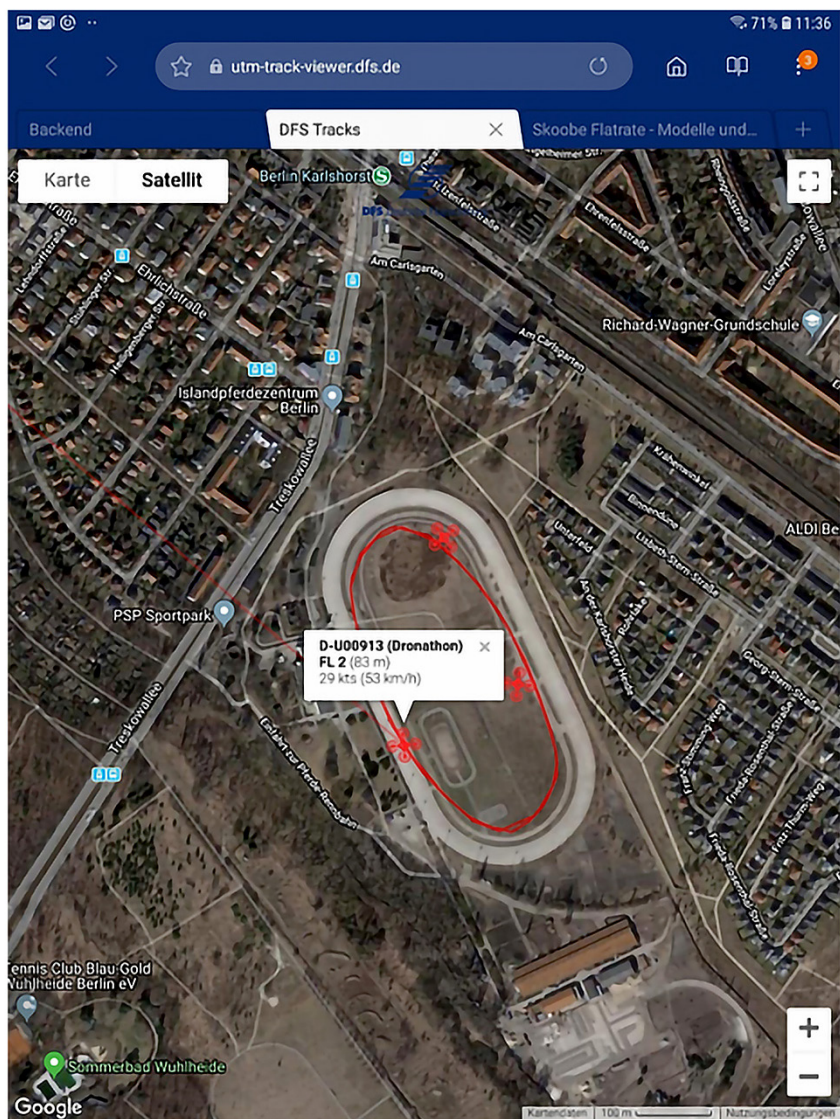


Abb. 11: TrackViewer-Darstellung für UAS-Marathon der Dronemasters Berlin August 2018

6 Wirtschaftliche Aspekte

Im vorliegenden Rahmen ist nicht genug Raum, alle wirtschaftlichen Aspekte von UTM zu erörtern. Es ist schon wegen des andersartigen Marktes klar, dass neue Bezahlprinzipien wie „Software as a service“ und „User pays for login time/flight time“ in einem gegenüber ATM erweiterten Nutzerkreis und sogar unter Einschluss von Öffentlichkeit zur Anwendung kommen müssen. Im erstellten Businessplan von DFS und DTAG wird auch im Wesentlichen auf diese neuen Prinzipien zurückgegriffen. UTM ist für die DFS auch eine Investition in ein neues Geschäftsfeld bzw. Markt sowie in neue Technologien wie Cloud, Web und AI, die auch im traditionellen Geschäft neue Lösungen anbieten können. Unabhängig von der Geschäftsform für die neuen Aktivitäten ist dabei festgelegt, dass die UTM System Services aus der DFS heraus erbracht werden, um genau diese Rationalisierungs- und Synergiepotenziale auch für das ATM-Geschäft zu erschließen und den Asset PHOENIX nicht zu gefährden.

7 Fazit und Ausblick

Aktuell wird in der europäischen Kommission, in SESAR und der A6 intensiv die zukünftige „UTM Deployment Architektur“ diskutiert, und damit auch die Rolle der ANSPs und ihr Verhältnis zu den zukünftigen dritten UTM Service Providern (USPs). Die DFS nimmt hier einen dezidierten Standpunkt ein und sieht ein nationales UTM in den Händen des ANSP, zumindest mit den Funktionen Registration, Surveillance, Integration und Tracking, AIM Datenbereitstellung, Wetterinformationen, sowie Geofencing/-caging, Missionsplanung, Deconfliction und Festlegung von Priorisierungsregeln sowie dem ANSP-Anteil am Genehmigungsprozess. Sollte es irgendwann einmal weitere regionale USPs geben, würden hier eher spezifische Lagedarstellungen, Payload-spezifische Services und Flottenmanagement angesiedelt sein. Auf jeden Fall erweist sich UTM als thematisch enorm groß, als Beginn einer langen Reise, mit einem Umfang potenziell größer als ATM. Es mag sein, dass irgendwann sogar ATM und UTM miteinander verschmelzen und wir vor einem fundamental veränderten Luftfahrtsystem stehen.

Abkürzungen

ATM	Air Traffic Management
BOS	Behörden mit Ordnungs- und Sicherheitsaufgaben
CAA	Civil aviation authority
COD	Carry-on-device (= Tablet oder Smartphone)
DDS	Drohnendetektionssystem (für nicht-kooperative UAS)
DTAG	Deutsche Telekom AG
FMS	Flight Management System (Autopilot der Drohne)
HID	Hook-in-device
HOD	Hook-on-device
IMM (IMM-KF)	Interacting multiple model Kalman Filter
IMSI	International mobile subscriber identity (Mobilfunk- teilnehmerkennung)
JV	Joint Venture
LLB	Landesluftfahrtbehörden
MSDF	Multisensordatenfusion
NFZ	No Fly Zones
SORA	Specific operations risk assessment
PAR	Phased array radar (oft auch „holografisches Radar“ genannt)
UAS	Unmanned aircraft system, Drohne
USP	UTM Service Provider
UTM	UAS Traffic Management

Literatur

- A6 Alliance (2018): U-Space architecture and the role of ANSPs. Version of 16.10.2018. www.a6alliance.net.
- AIP (2018): Aeronautical Information Publication. DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Langen.
- Bar-Shalom, Y.; Li, X.-R. (1993): Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software. Artech House, Boston, London.
- CORUS (2018): Concept of Operations for U-Space. By A. Hatley et al. Eurocontrol Open Sky Teams CORUS Webpage; Version 1.0, 25.6.2018.
- DIN 5452-1 (2018): Luft- und Raumfahrt – Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS) – Teil 1: Begriffe. DIN e. V. Berlin.
- European Aviation Safety Agency (2017): Notice of proposed Amendment 2017-05 (A): Introduction of a regulatory framework for the operation of drones. (EASA NPA 2017-05) Köln, 2017.
- Dazu auch als Update: EASA Opinion No 01/2018.
- European Commission, DG MOVE (2018): Model for a future U-Space in Europe. A discussion paper. From Flying Drones to Doing Business. Version 0.40, Brussels, 26.10.2018.
- Frisch, A.; Heidger, R. (2018): UTM-Lösungen für die sichere und faire Integration von UAS in das Luftverkehrssystem. Mobilfunk, Surveillance und Tracking U:CON vom 4.2.2018. Deutsche Telekom AG, DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, Bonn und Langen.

- GUTMA (2017): UTM System Architecture. Published on the Global UTM Association Website: www.gutma.org.
- Heidger, R. (2014): The PHOENIX White Paper, Version 5.0, 2014. DFS Deutsche Flugsicherung, Langen, Germany.
- Heidger, R. (2018): UTM System Requirements, Version 2.2, 8.8.2018. DFS Deutsche Flugsicherung, Langen, Germany.
- Heidger, R.; Caprdja, K.; Pourvoyeur, K.; Dix, A. (2018): U:CON Message Specification Plot Message CSV Format. v.2.1, 15.5.2018. (Plot ICD für UAS). DFS Deutsche Flugsicherung, Langen.
- ICAO (2015): Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Doc 10019. AN/507. ICAO, Montreal Canada, (1) 2015.
- JARUS (2017): Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA). JAR-DEL-WG6-D.04. V. 1.0, 26.6.2017. <http://jarus-rpas.org>.
- Kalman, R. E. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems (= Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering), 35–45.
- Kopardekar, P., et al. (2016): Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Concept of Operations. In: AIAA Aviation. 13–17 June 2016, Washington D.C. 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Mathias, A.; Pourvoyeur, K. (2010): Enhanced IMM Model Switching using Residual Accumulation. In: Proc. Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (ESAVS 2010), Berlin, Germany, March 16 17, 2010.
- Pourvoyeur, K.; Dix, A. (2018): PHOENIX Standard Document for Surveillance Data Exchange. UCON-Cat062/SP – Mobile Communication Track Messages. V. 2.2. 15.6.2018. DFS Deutsche Flugsicherung, Langen.
- SJU/SESAR Joint Undertaking (2016): European Drones Outlook Study. Unlocking the value for Europe. Brussels, November 2016.
- Unify (2017): Unify Architecture. Draft Version. November 2017, Update January 2018, Unify NV, Antwerp, Belgium.
- U-Space Blueprint (2017): SESAR Joint Undertaking, Luxembourg Publications Office of the European Union.
- U-Space Discussion Paper (2018): Model for a future U-Space in Europe. A Discussion Paper, Draft Version 0.20, 4. Feb. 2018. SJU/EC DG MOVE, Brussels.
- UVS International/van Blyenburgh, P. (2018): Is Europe ready for commercial drone operations? In: European Drone Summit 2018. By UAV DACH e. V., Frankfurt/Main, Oct. 2018.

Kontakt

Ralf Heidger | Angela Kies
DFS Deutsche Flugsicherung GmbH
Am DFS-Campus 10, 63225 Langen
ralf.heidger@dfs.de | angela.kies@dfs.de

NfL, SORA, Kenntnissnachweis – „Wir wollen doch ›nur messen‹!“

Marten Krull

1 Einleitung

Die Photogrammetrie hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Neben den Algorithmen und dem eigentlichen Messsensor, der Kamera, hat sich insbesondere die Möglichkeit verändert, wie dieser mittels unbemannter Luftfahrtsysteme dreidimensional positioniert werden kann und einen, für die Aufgabenstellung optimierten Bildverband zu liefern im Stande ist. Aufgrund der Neuartigkeit dieser UAVs im öffentlichen Raum und der damit verbundenen Notwendigkeit der gesetzlichen Regulierung, ergeben sich für den Geodäten mitunter unstehten und heterogene Bedingungen für die Umsetzung von photogrammetrischen Projekten. Teilweise bedingen hierbei gesetzliche Grundlagen geometrische Restriktionen in der praktischen Bildverbandsplanung, welche sich ebenfalls in der Genauigkeit des geodätischen Endprodukts widerspiegeln.

Der vorliegende Beitrag beschreibt ausgewählte gesetzliche Grundlagen des UAV-Einsatzes und deren vermessungsalltäglichen Konsequenzen auf Grundlage der Erfahrung von photogrammetrischen UAV-Einsätzen seit 2012 als Ingenieurbüro, sowie als vom Luftfahrtbundesamt anerkannte Stelle für den Kenntnissnachweis im Zusammenhang mit der Schulung und dem Vertrieb UAV-photogrammetrischer Systeme.

2 Luftrechtliche Grundlagen und Entwicklungen

Erst durch eine Gesetzesänderung des Luftverkehrsgesetzes im Mai 2012 wurde der Himmel für unbemannte Luftfahrtsysteme und damit für Geodäten und Photogrammeter rechtssicher geöffnet. So enthält seitdem der § 1 des LuftVG den Hinweis: „Ebenfalls als Luftfahrzeuge gelten unbemannte Fluggeräte einschließlich ihrer Kontrollstation, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden (unbemannte Luftfahrtsysteme).“ Die Kategorisierung als Luftfahrzeug und somit des Steuerers als Luftfahrzeugführer hat dementsprechend weitreichende Folgen für anzuwendende und einzuhaltende Regeln und Gesetzesgrundlagen. So seien als wichtigste genannt:

- das Luftverkehrsgesetz, z. B. Notwendigkeit einer Luftfahrt-Haftpflichtversicherung (Deckungssumme mindestens 750.000 Sonderziehungsrechte, entspricht zum 1.12.2018 ~ 912.500 Euro),
- die Luftverkehrsordnung, u. a. die Nachweispflicht der ordnungsgemäßen Flugvorbereitung,
- die aktuellen Luftfahrer- bzw. ICAO-Karten, welche die Luftraumstruktur als Kartenbild darstellen, z. B. in Form von Flugbeschränkungsgebieten um Kernkraftwerke und Truppenübungsplätze oder kontrollierte Lufträume um Flugplätze,
- AIP (Aeronautical Information Publication, Luftfahrthandbuch): allgemeine Regeln z. B. zur Luftraumstruktur, aber auch Detailinformationen, wie Start- und Landebahnen, Öffnungszeiten und Kontaktdaten der Flugplätze,
- SUP (AIP Supplement): vorübergehende Änderungen des Luftfahrthandbuchs, z. B. AIP SUP VFR 25/18: Flugbeschränkungsgebiet zum Oktoberfest in München,
- NOTAM (Notice to Airmen): kurzfristige Änderungen des AIP, z. B. Flugschauen, Fallschirmsprünge, Militärübungen, aber auch Hinweis auf Flüge unbemannter Luftfahrzeuge jenseits der Sicht des Piloten,
- NfL (Nachrichten für Luftfahrer): Amtsblätter mit rechtlich verbindlichen Bekanntmachungen und Anordnungen und wichtigen Informationen für die Luftfahrt, z. B. Flugverkehrskontrollfreigaben zur Durchführung von Flügen von unbemannten Luftfahrtsystemen an bestimmte Flughäfen.

Nach der Berücksichtigung von unbemannten Luftfahrtsystemen im Luftverkehrsgesetz im Mai 2012 folgten im Juni „Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 16 Abs. 1 Nr. 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)“ als NfL 161/12. Hiermit wurde nun ein erster einheitlicher Rahmen zur Erteilung von Erlaubnissen durch die Landesluftfahrtbehörden geschaffen. So konnten erstmalig Allgemeinerlaubnisse für unbemannte Luftfahrtsysteme bis zu einem Gewicht von 5 kg und einer maximalen Flughöhe von 100 m über Grund erlangt werden. So bekamen wir 2012 unsere erste Aufstiegserlaubnis für ein System, dessen Komponenten vor dem Hintergrund der Photogrammetrie zusammengestellt wurden und damals eine Systemkamera mit 16 Megapixeln und Halbformatsensor enthielt. Die größte Herausforderung zu diesem Zeitpunkt war aufgrund der Größe und des Gewichts der erhältlichen Rahmen und Gimbals die Gewichtsgrenze von 5 kg.

Bereits Ende 2012 erschien die nächste gesetzliche Änderung in Form der Standardised European Rules of the Air (SERA, Durchführungsverordnung (EU) 923/2012), welche gemeinsame europäische Luftverkehrsregeln festlegte. Sie ersetzte weitgehend die Luftverkehrsordnung und brachte unter anderem

etwas andere Mindestwetterbedingungen für den Sichtflug mit, dem UAV-Piloten ebenfalls unterliegen. Sie wurde schließlich rechtsverbindlich am 5.12.2014 und in Folge dessen wurde 2015 die Luftverkehrsordnung dahingehend angepasst.

Die folgende Zeit, in der sich unbemannte Luftfahrtssysteme langsam zu etablieren schienen, war geprägt von Erleichterungen und Lockerungen der bestehenden Regularien. So brachten die verschiedenen Flugplatzbetreiber nach und nach Flugverkehrskontrollfreigaben heraus, welche auch den Flug von UAVs in den meisten kontrollierten Lufträumen unter bestimmten Bedingungen (Flüge bis 50 m Höhe und Mindestabstand von 1,5 km zum Flugplatz) ohne größeren Verwaltungsaufwand ermöglichten. Die im Juli 2016 erschienene NfL 1-786-16 ermöglichte ab diesem Zeitpunkt sogar die Erteilung von Allgemein-erlaubnissen für UAVs bis 10 kg Abfluggewicht, was uns ermöglichte, insbesondere größere und schwere Sensoren und Kameras in die Luft zu bringen.

2.1 Drohnenverordnung 2017

Die nächste weitreichende Gesetzesänderung stellte die „Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten“ im April 2017 dar. Sie änderte die Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung dahingehend, dass seit dem 1.10.2017 alle unbemannten Luftfahrtssysteme mit einem Gewicht über 250 g eine feuerfeste Eigentümerplakette tragen müssen. Weiterhin wurde die Luftverkehrsordnung insbesondere um den § 21 „Betrieb von unbemannten Luftfahrtssystemen und Flugmodellen“ erweitert. Die wichtigsten Neuerungen sind:

- Unbemannte Luftfahrtssysteme unter 5 kg benötigen keine Erlaubnis mehr.
- Die Gewichtsgrenze der erlaubnisfähigen UAVs von 10 kg wurde auf 25 kg angehoben.
- Für den Betrieb von UAVs ab 2 kg ist seit 1.10.2017 ein Kenntnisnachweis oder eine gültige Lizenz als Luftfahrzeugführer erforderlich. Die Stellen zur Abnahme der Prüfung des Kenntnisnachweises müssen hierzu vom Luftfahrtbundesamt autorisiert werden, wobei umfangreiche Dokumentations- und Qualitätsanforderungen vorgeschrieben sind. Die Prüfungsfragen entstammen den drei Bereichen Luftrecht, Meteorologie, sowie Flugbetrieb und Navigation. Deren geforderte Inhalte sind in einem Prüfungssyllabus herausgegeben worden. Als Mitglied des UAV DACH, der ersten vom LBA anerkannten Stelle, müssen wir hierzu Fortbildungen und regelmäßige Qualitätsaudits nachweisen, um die Prüfung zum Kenntnisnachweis abnehmen zu dürfen.

Verbote nach § 21b:

- Verbot des Betriebs über Wohngrundstücken und Naturschutzgebieten,
- Verbot des Betriebs über und in einem seitlichen Abstand von 100 m von: Bundesfern- und Bundeswasserstraßen, Bahnanlagen, Industrieanlagen, Anlagen der Energieerzeugung und -verteilung, sowie rund 15 weiteren Örtlichkeiten.

Insbesondere die Verbote nach § 21b und der Sicherheitskorridor von 100 m um viele Örtlichkeiten konnte zur Folge haben, dass man plötzlich Flächen, welche man ggf. seit Jahren turnusmäßig mittels UAV vermessen hatte, nicht mehr befliegen durfte. Am Beispiel eines Teils des Ruhrgebietes verdeutlicht Abb. 1 die komplexe Verbotslage.

Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben wurden jedoch im Rahmen der Novellierung der Luftverkehrs-Ordnung besonders berücksichtigt. So benötigen diese zum einen keinen Kenntnisnachweis, wobei ein absoluter Großteil der uns bekannten Behörden, welche UAVs einsetzen, diesen aufgrund der komplexen Gesetzeslage und der Fürsorgepflicht gegenüber den Mitarbeitern freiwillig erbracht haben. Zum anderen sind diese Stellen aber auch von den umfangreichen Verboten von § 21b ausgenommen. Dies gilt ebenfalls für nicht-behördliche Unternehmen, sofern deren Einsatz unter Behördenaufsicht erfolgt.



Quelle: <https://map2fly.flynex.de>, letzter Zugriff 1.12.2018

Abb. 1: Visualisierung der Verbote am Beispiel des Ruhrgebietes

2.2 NfL 1-1163-17, SORA GER und deren Umsetzung

Aufgrund der weitreichenden Verbote der Luftverkehrs-Ordnung wurden bereits Ende Oktober 2017 „Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung von Erlaubnissen und die Zulassung von Ausnahmen zum Betrieb von unbemannten Fluggeräten gemäß § 21a und § 21b Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)“ als NfL 1-1163-17 veröffentlicht (Abb. 2). Diese gaben den Rahmen

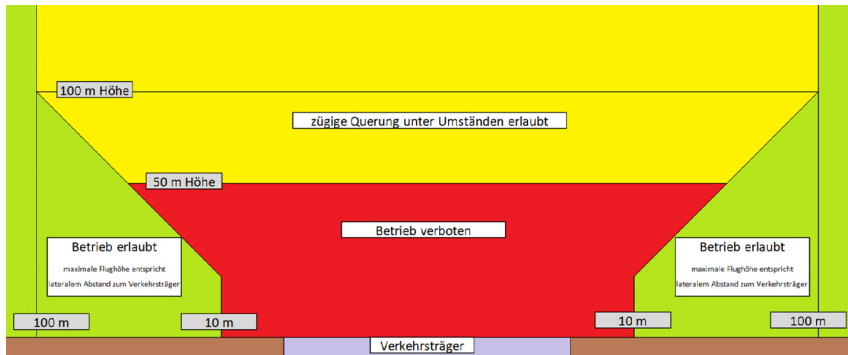


Abb. 2: 1:1-Regelung aus NfL 1-1163-17

vor, um von verschiedenen Verboten befreit zu werden, wobei aus UAV-photogrammetrischer Sicht insbesondere das Verbot des Betriebes über Wohngrundstücken, sowie die Unterschreitung des 100 m-Abstandes zu Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen eine Erleichterung erwarten ließ. So sieht die NfL eine 1:1-Regelung vor, d. h. die Höhe soll stets kleiner als der Abstand zur Infrastruktur sein, mit einem Mindestabstand von 10 m und der Möglichkeit des zügigen Überfluges in einer Mindesthöhe von 50 m.

Die Umsetzung dieser Grundsätze obliegt allerdings wiederum den einzelnen Landesluftfahrtbehörden, welche hier unterschiedlich vorgehen. So hatten wir auf gebührenpflichtigen Antrag zeitnah eine Erlaubnis in NRW erhalten, sowohl über Wohngrundstücke zu fliegen, als auch die 1:1-Regelung bei Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen zu nutzen, allerdings wurde der Überflug in mindestens 50 m Höhe kategorisch abgelehnt, was sich dementsprechend auf die Bildverbandsplanung in der Nachbarschaft solcher Verkehrswege auswirkte.

Andere Bundesländer gehen über die vorgesehenen Ausnahmen von Verboten sogar noch bedeutend hinaus, wie z. B. Bayern, Baden-Württemberg und Sachsen. Sachsen beispielsweise hat hierzu eine Nachricht für Luftfahrer (NfL 1-1233-18) veröffentlicht, welche umfangreiche Ausnahmen mit sehr geringem Verwaltungsaufwand und ohne Gebühren gewährt.

Neben der Ausnahme von den Verboten beschreibt die NfL 1-1163-17 ein weiteres, zukunftsweisendes Instrument zur Beantragung von Flügen, welche ggf. durch eine besondere Risikolage eine Einzelerlaubnis benötigen. Hierzu werden zwei Risikoklassen unterschieden, welche durch den Betrieb verursacht werden. Zum einen jene auf dem Boden, welche insbesondere durch das Gewicht und den Abstand zu Infrastruktur und Menschen verursacht wird, und zum anderen jene in der Luft, welche sich hauptsächlich durch die Nähe zu zu erwartendem Flugverkehr definiert. Beide Klassen haben klar vorgegebene Kategorien und ermöglichen darüber hinaus durch technische Einrichtungen am UAV (z.B. Geofencing mit Return-To-Home, Hinderniserkennung, elektronische Sichtbarkeit für den Luftverkehr), aber auch durch besondere Maßnahmen der Durchführung, wie z.B. Absperrungen oder Warnhinweise, die Gefährdungskategorie zu reduzieren. Dies resultiert schließlich in einer Gefährdungskategorie inklusive zu erbringender Maßnahmen, wie z.B. Qualifikationsnachweise, Anforderung an die Dokumentation der Prozesse und des Einsatzes etc.

3 Beispiele aus der Praxis

3.1 Pumpspeicherkraftwerk in kontrolliertem Luftraum

Das Pumpspeicherkraftwerk Koepchenwerk liegt im kontrollierten Luftraum des Dortmunder Flughafens. Zum Zeitpunkt der Befliegung Anfang April 2017, wenige Tage nach Inkrafttreten der neuen Drohnenverordnung des BMVI, erteilte die NfL 1-466-15, welche seit Mai 2015 Gültigkeit besaß, eine Flugverkehrskontrollfreigabe unter bestimmten Auflagen. So war u.a. ein Flug bis zu einer Höhe von maximal 50 m über Grund innerhalb des kontrollierten Luftraums freigegeben. Am Rande sei erwähnt, dass diese NfL im Mai 2017 aufgehoben wurde durch die NfL 1-1027-17, welche wiederum zum Januar 2018 durch die NfL 1-1199-17 aufgehoben wurde.

Aufgrund der besonderen Topographie mit 160 m Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterbecken, hohen Leitungsverläufen im Hang und der zu erwartenden Gefährdungslage durch elektromagnetische Störquellen, reichten die 50 m Flughöhe, welche durch die NfL erlaubt gewesen wäre, nicht aus. So wurde ein geländeangepasster Nadirflug in einer Höhe von 100 m geplant mit zusätzlichen Obliquebildverbänden in größerem Bildmaßstab um relevante Infrastruktur. Zum Einsatz kam u.a. ein DJI Matrice 600 mit D-RTK-Modul (siehe auch Abb. 3), welcher durch zwei Zweifrequenz-GNSS-Antennen mit konstanter Basis zur Berechnung des Kurswinkels unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen ist. Aufgrund des Gewichts des Kopters in der beschriebenen Ausführung von 11 kg und der geplanten Flughöhe von 100 m innerhalb



Abb. 3: Fototexturiertes 3D-Modell und Matrice 600 mit D-RTK

des kontrollierten Luftraums, wurde eine Flugverkehrskontrollfreigabe bei der Deutschen Flugsicherung sowie eine Einzelerlaubnis bei der zuständigen Landesluftfahrtbehörde beantragt. Die Erlaubnis sah insbesondere vor, dass vor dem Beginn der Arbeiten sowie nach Abschluss der Tower am Dortmunder Flughafen informiert werden musste.

3.2 Offshore-Trassen im Nationalpark Wattenmeer

Kabelanbindungen im Rahmen von Offshore-Trassen im Nationalpark Wattenmeer stellen besondere Anforderungen an die Minimierung des menschlichen Eingriffs in die natürliche Landschaft. Für die Matthäi Wasserbau GmbH & Co. KG wurde hierzu ein Konzept zum UAV-photogrammetrischen Monitoring einer Baustelle erstellt, sowie gemeinsam mit dem Auftraggeber ein Antrag bei der zuständigen Landesluftfahrtbehörde gestellt. Aus luftrechtlicher Sicht führten hierbei insbesondere die Nähe zum Flughafen Norderney, sowie die Lage in einem Naturschutzgebiet zu der Notwendigkeit, einen Einzelantrag mit Gültigkeit für die Dauer der Baumaßnahme zu stellen. Aus photogrammetrischer Sicht erschwerend hinzu kam die Tatsache, dass zur Minimierung des menschlichen Eingriffs in die Natur lediglich sechs dauerhafte Passpunkte entlang des Baufeldes von 700×100 m eingebracht werden durften. Durch die Nutzung von Oblique-Bildverbänden entlang der Trassenrichtung in unterschiedlichen Flughöhen wurde hierbei die Stabilität der Bildverbände bedeutend erhöht. Zusätzliche Herausforderungen waren ein Zeitfenster von lediglich zwei Wochen bis zum ersten Flug, sowie aufgrund der Tidezeiten zu erwartende suboptimale Lichtbedingungen und begrenzte Messzeiten. Abb. 4 zeigt farblich visualisierte Höhen-differenzen der ersten Messepochen, wobei zwischenzeitlich Kampfmittelsondierungen mittels Quads vor Beginn der Baumaßnahmen stattgefunden hatten.

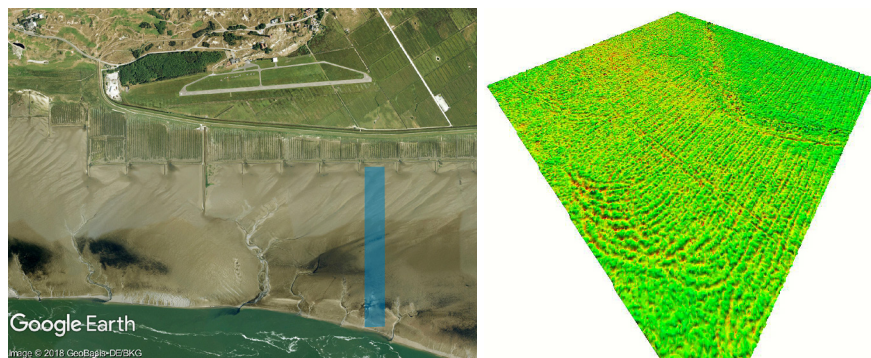


Abb. 4: Flughafen und Baufeld (links) und erkennbare Quadspuren als farbcodierte Höhendifferenzen (rechts)

Aufgrund der positiven Erfahrungen dieses Referenzprojektes und zur weiteren Minimierung des menschlichen Eingriffs in das Watt, wurden weitere Einzelgenehmigungen bei der niedersächsischen Landesluftfahrtbehörde für weitere Projekte beantragt. Da zwischenzeitlich die NfL 1-1163-17 Gültigkeit besaß, welche das Antragsverfahren für Einzelerlaubnisse standardisiert, konnte anhand des SORA-GER (Specific Operations Risk Assessment German) Gefahrenlagen auf dem Boden, wie in der Luft eindeutig klassifiziert werden. Weiterhin wurden durch die NfL die notwendigen Maßnahmen, welche sich an der Gefährdungslage orientieren, wie z. B. Nachweis der Kenntnis und Erfahrung der Steuerer, Wartungen, Verfahrensweisungen und Checklisten etc. eindeutig benannt.

Beantragt und genehmigt wurden auf diese Weise bei Folgeprojekten Flüge zur Kampfmittelondierung mittels UAV (Abb. 5), welche die Befahrung mit Quads im Sinne des Umweltschutzes überflüssig machten. Hierzu wurden Flüge in konstanter, sehr niedriger Höhe über dem Watt mittels Magnetometer durchgeführt. Ebenfalls genehmigt wurden BVLOS-Flüge (beyond visual line of sight) mit einem DJI Inspire 2, wobei das Watt im Sinne des Umweltschutzes für die Monitoringflüge nicht mehr betreten werden musste. Die bemannte Luftfahrt wurde durch eine NOTAM (Notice to Airmen), welche die Lage des genehmigten Korridors und den Hinweis „DRONES FLYING ACTIVITIES“ enthielt über die besondere Gefährdungslage unterrichtet.

3.3 Die 1:1-Regelung zu Gefährdungsbereichen

Die 1:1-Regelung zu Gefährdungsbereichen, welche in verschiedenen Bundesländern nicht mit dem zügigen Überflug kombiniert erlaubt wird, resultiert in



Abb. 5: Kampfmittel-Sondierung mittels UAV im Watt

einer gewissen Herausforderung für die Anlage der Bildverbände bei Aufmaßen neben verbotsbehafteten Verkehrswegen. Darüber hinaus mag in manchen Fällen ebenfalls zum Tragen kommen, dass man das Risiko in Bereichen, bei denen ein Absturz sehr große Schäden verursachen würde, minimieren möchte, da der Grundgedanke der 1:1-Regelung ist, dass Multikopter bei einem Ausfall maximal in einem 45°-Winkel zu Boden fallen dürften, sofern der Ausfall in Bewegung erfolgt oder nur einseitig Motoren ausfallen.

So ist bei einem Nadirflug in 100 m Höhe, bei dem man dementsprechend 100 m von dem Rand des Verkehrsweges entfernt bleibt, der Öffnungswinkel der Sensor-Objektivkombination ausschlaggebend dafür, welche Fläche noch überdeckt wird. In dem folgenden Beispiel ist der Rand des Projektes ca. 30 m entfernt vom Rand des Verkehrsweges, welche durch einen Grünstreifen getrennt sind, und wurde durch ein sehr weitwinkliges Objektiv gerade noch erfasst. Aus verschiedenen Gründen ist hierbei natürlich mit einer starken Abnahme der Genauigkeit zu rechnen. Hierzu zählen insbesondere die geringere und heterogenere Überlappung und die unzuverlässigere Berechnung der äußeren Orientierung zu den Projekträndern, sowie auch die Abnahme der Bildqualität zum Projektrand und die zum Sensorrand abnehmende Zuverlässigkeit der Parameter der inneren Orientierung. Verschiedene Maßnahmen dieser Genauigkeitsabnahme entgegenzuwirken beschreibt die [Abb. 6](#).

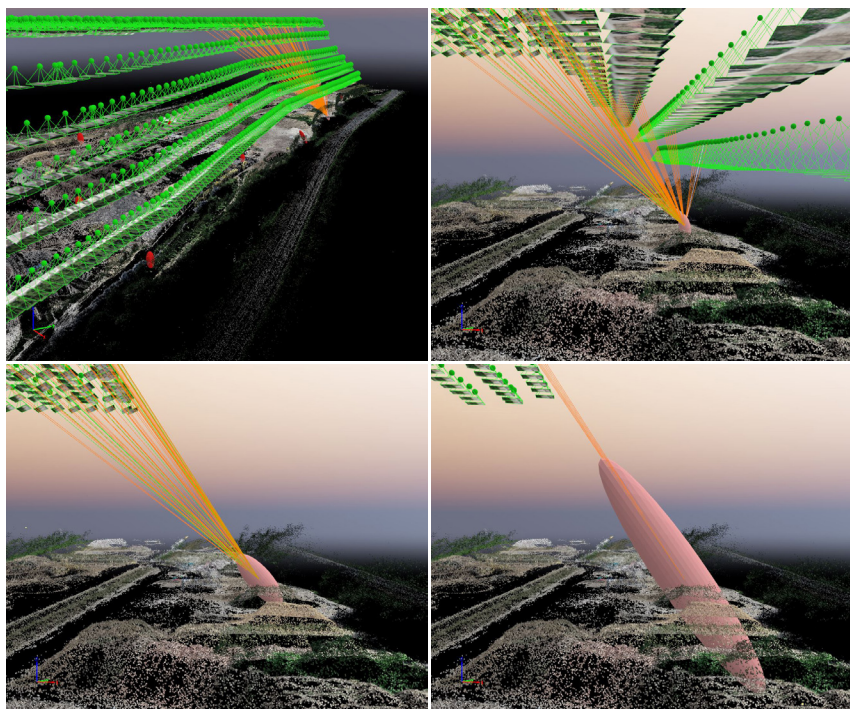


Abb. 6: Bildverband neben Eisenbahntrasse (oben links), Strahlenschnitte und mit konstantem Faktor skaliertes Konfidenzellipsoid für die Kombination aus Nadir-, Oblique- und Stufenflug (oben rechts), Nadir- und Obliqueflug (unten links) sowie nur Nadirflug mit Punktbestimmung am Rande der Sensorfläche (unten rechts)

4 Fazit

Das Luftrecht im Bereich UAVs unterliegt einem scheinbar steten Wandel, dessen Verfolgung und Berücksichtigung Ressourcen verbraucht und nicht zu unterschätzen ist. Dieser Wandel hat zudem teilweise unmittelbare Auswirkungen auf die photogrammetrischen und geodätischen Möglichkeiten. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Textes stehen die nächsten Änderungen mit der Harmonisierung der europäischen UAV-Regulativen kurz bevor. So stellt sich abschließend vielleicht die Frage: Lohnt sich dieser Aufwand für ein derart neues und von den Regularien noch unstetes Messmittel überhaupt?

Wenn man sich die Entwicklung der Photogrammetrie mit seinen Möglichkeiten hinsichtlich Effizienz, Genauigkeit und die Informationsdichte der Ergebnisse und Schnittstellen anschaut, wird vermutlich die Begeisterung für die

Möglichkeiten überwiegen. Diese Begeisterung, begünstigt durch geringe Investitionskosten, scheint teilweise Fachfremde schneller zu packen als die eigentlichen Geodäten, welche aber wiederum die Ergebnisse mit der hinreichenden Fachkenntnis nicht nur besser zu erzeugen, sondern auch zu beurteilen und zu nutzen in der Lage sein könnten, wenn wir denn wollen. Bei längerfristigen Verträgen regelmäßiger Aufmäße sollte man nur vielleicht die unstete Gesetzeslage dementsprechend berücksichtigen.

Kontakt

Marten Krull
Vermessung3D
Photogrammetrie-Handel & Ingenieurbüro Krull
Eppenhauser Straße 155, 58093 Hagen
krull@vermessung3d.de

Session 2:

UAV-Anwendungen im Kataster, ländliche Neuordnung und Stadtplanung

Drohneneinsatz in Stadtplanung und Flurneuordnung – Praxisbeispiele aus Baden-Württemberg, Bayern und Hessen

Johannes Schlesinger | Steffen Vogt

1 Drohnenbefliegungen in Stadtplanung und Flurneuordnung

1.1 Einleitung

Im vorliegenden Artikel wird anhand von Praxisbeispielen aufgezeigt, wie insbesondere öffentliche Auftraggeber von einer Drohnenbefliegung profitieren können. Die Beispiele zeigen, wie durch die Drohnenbefliegung ein inhaltlicher und wirtschaftlicher Mehrwert im Vergleich zu den von Amts wegen bereits zur Verfügung stehenden Daten (z. B. Ortholuftbilder aus der Landesbefliegung, Höhenmodelle aus Airborne Laserscanning) oder im Vergleich zu klassischen terrestrischen Vermessungen erzeugt werden kann.

Die Stärke der mittels Drohnenbefliegung erzeugten Daten liegt dabei nicht nur in der Aktualität und im Detailgrad der Daten. Neben der Verwendung als Grundlage für die Bestandsvermessung und -erfassung bieten die Daten zusätzlich einen visuellen Kontext für die Planung und stellen in Form von 3D-Visualisierungen einen zentralen Baustein in der Kommunikation mit Projektbeteiligten und Projektbetroffenen dar. Dies vereinfacht die Arbeit von Kommunen und Planungsbüros und kann dazu beitragen, den Verfahrensablauf effizienter und weniger konfliktreich zu gestalten und damit deutlich zu beschleunigen.

Der Artikel bietet einen Überblick über die technischen Grundlagen sowie aktuelle praktische Anwendungsbeispiele aus dem Bereich von Bebauungsplanverfahren und Flurbereinigung.

1.2 Technische Grundlagen

Drohnen stellen ein stetig an Bedeutung gewinnendes Messwerkzeug dar, das weitaus mehr liefern kann, als schöne Luftbilder und -videos. Die Voraussetzung dafür ist jedoch eine professionelle Ausrüstung, technisches Verständnis sowie Fachwissen in den Bereichen Luftfahrtrecht, Meteorologie, Photogrammetrie und Vermessung. Aufgrund der großen Dynamik in diesem Bereich erfordert es



Abb. 1: Teilmenge der bei einer Drohnenebefliegung erzeugten Einzelfotos

zudem die regelmäßige Fortbildung, da sich rechtliche Grundlagen und technische Möglichkeiten sehr schnell verändern (vgl. z. B. Brandt 2018).

Unbemannte Flugsysteme bestehen in der Regel aus drei Komponenten. Die offensichtlichste Komponente ist dabei die Drohne selbst, auch Trägerplattform genannt. Die Bandbreite an Trägerplattformen wächst ständig und hat zu einer unübersichtlichen Vielzahl an Drohnensystemen geführt. Die Bandbreite reicht dabei von preisgünstigen Modellen aus dem Hobbybereich bis zu professionellen Systemen, die qualitativ hochwertig, gegen den Ausfall einzelner Komponenten geschützt und daher entsprechend hochpreisigen sind. Es erfordert ein umfassendes technisches Verständnis, um die zum Teil sehr geringen, aber je nach Anwendungsbereich oft entscheidenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Fluggeräten erkennen zu können.

Die zweite Komponente ist die Bodenstation, vereinfacht gesagt die Fernsteuerung der Trägerplattform. Auch in diesem Bereich gibt es unterschiedlichste Ausführungen. Diese reichen von der Möglichkeit, Drohnen über das Handy zu steuern bis hin zu komplexen Flugsteuerungsprogrammen auf leistungsstarken Computern.

Die für die hier beschriebenen Anwendungen entscheidende Komponente ist jedoch der Sensor. Bei den vorgestellten Beispielen werden optische Sensoren verwendet. Dabei handelt es sich um Kamerasysteme, die je nach Modell sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, die sich auf die Bildqualität und damit letztlich auch auf die erreichbare Qualität der photogrammetrischen Auswertung auswirken (vgl. z. B. Cramer et al. 2017). Bei Drohnen aus dem Hobbybereich sind in typischerweise kleine, einfache und daher leistungsschwächere Kameras verbaut. Leistungsstarke Kameras, die für den professionellen Einsatz im Bereich Vermessung geeignet sind, sind in der Regel deutlich schwerer und erfordern größere Trägerplattformen.

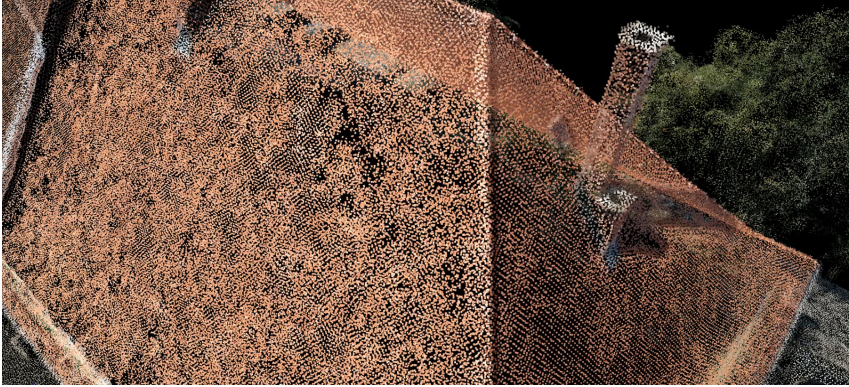


Abb. 2: Detailausschnitt einer 3D-Punktwolke aus einer Drohnenbefliegung

Bei einer photogrammetrischen Befliegung wird das Zielgebiet – also etwa der zu beplanende Bereich und die daran anschließende Bestandsbebauung – in einem regelmäßigen Muster von der Trägerplattform überflogen. Dabei nimmt der Sensor in regelmäßigen Abständen hochaufgelöste Fotos des Zielgebietes aus unterschiedlichsten Perspektiven auf (vgl. [Abb. 1](#)).

Typischerweise werden bei einer solchen Befliegung mehrere Hundert, in vielen Fällen auch mehrere Tausend Einzelfotos aufgenommen. Zur genauen Verortung der Fotos werden im Vorfeld am Boden Passpunkte signalisiert und mit klassischen Verfahren eingemessen. Alternativ dazu können die Kamerapositionen der Aufnahme auch mit RTK-GNSS bestimmt werden, wenn das Trägersystem mit entsprechender Sensorik ausgestattet ist.

Im Anschluss an eine Befliegung werden diese sehr großen Datenmengen – in der Regel mehrere Gigabyte – auf leistungsstarke Computer übertragen und dort mittels photogrammetrischer Verfahren zu 3D-Daten aufbereitet. Diese Modelle bestehen aus vielen Millionen einzelner Messpunkte, die jeweils drei Koordinaten (X, Y und Z) sowie einen Farbwert besitzen. Diese dichte 3D-Punktwolke bildet die Grundlage aller aus einer Drohnenbefliegung abgeleiteten Datensätze.

[Abb. 2](#) zeigt einen kleinen Ausschnitt aus einer solchen Punktwolke. Abgebildet ist hier ein Teilbereich eines Daches, in der rechten Bildhälfte ist ein Schornstein zu sehen. Jeder dieser Punkte entspricht dabei einer einzelnen Messung.

1.3 Von der Definition der Anforderungen zum Datensatz

Die im Rahmen eines Drohnenfluges erfassten Daten und die daraus abgeleiteten Produkte sind sehr vielfältig und reichen von einfachen Schrägluftbildern bis hin zu sehr komplexen CAD-Modellen in 3D. Daher ist es unabdingbar, die

Anforderungen an das Endprodukt vor einer Befliegung präzise zu beschreiben. Die folgenden Fragen helfen dabei, ein klares Anforderungsprofil zu definieren:

- Wie groß ist die zu erfassende Fläche/das zu erfassende Objekt?
- Welche räumliche/zeitliche Auflösung wird benötigt?
- Wie sind die Anforderungen hinsichtlich der absoluten/relativen Lagegenauigkeit?
- In welchem Referenzsystem werden die Daten benötigt (z.B. lokal/DHDN GK3/ETRS89 UTM)?
- Welches Produkt wird benötigt (z.B. Bestandsplan, Orthofoto, 3D-Visualisierung)?
- In welchem Dateiformat soll das Endprodukt übergeben werden?

Auf der Grundlage dieses Anforderungsprofils werden die entsprechenden Parameter für die Erstellung des Flugplanes sowie für die anschließende Datenaufbereitung gewählt. Dazu gehören unter anderem:

- Wahl der passenden Trägerplattform (Starrflügler/Kopter) und Sensoren
- Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Überlappung der Einzelaufnahmen
- Anzahl und Lage von Passpunkten im Gelände
- Wahl der Software für die Datenauswertung (z. B. Photogrammetriesoftware, GIS, CAD)

Sind diese technischen Anforderungen definiert, müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen geprüft werden, die für die geplante Befliegung gelten. Sollte aufgrund luftfahrtrechtlicher Vorgaben eine spezielle Aufstiegserlaubnis erforderlich sein, ist mit einem entsprechenden zeitlichen Vorlauf zu planen.

2 Beispiele aus der Stadtplanung

2.1 Mehrwert durch Einsatz von Drohnentechnik bei Bebauungsplanverfahren

Die Lage am Wohnungsmarkt zwingt viele Kommunen für die Nachverdichtung im Bestand oder für die Erschließung und Bebauung von neuem Bauland als Träger der Planungshoheit die bauplanungsrechtlichen Grundlagen zu schaffen. Typischerweise geschieht dies durch die Aufstellung von Bebauungsplänen (BPlan). Ergänzend zu Bebauungsplänen im Innenbereich einer Gemeinde können in Bebauungspläne nach § 13b BauGB zeitlich befristet auch geeignete Außenbereichsflächen mit in die Planung einbezogen werden. Unabhängig davon, welche Instrumente genutzt werden, stehen Kommunen bei der Aufstellung von Bebauungsplänen häufig sowohl unter Zeit- als auch Erfolgsdruck.

Neben der reinen Grundlagenvermessung rückt daher zunehmend eine umfangreichere Erhebung räumlicher Daten in den Fokus. Diese sind notwendig für die detaillierte Dokumentation des Bestandes und bieten gleichzeitig die Grundlage für 3D-Visualisierungen sowohl des Bestandes als auch zur Darstellung von Planungsvarianten im realitätsnahen Kontext. Damit lässt sich zum einen die Entscheidungskenntnis von Gremien erhöhen, die nicht immer nur mit Fachleuten besetzt sind. Zum anderen sind solche Visualisierungen sehr hilfreich für die Information der Bürger und für die Kommunikation im Rahmen von Bürgerbeteiligungsverfahren. Diese gestiegenen Anforderungen lassen sich ohne weiteres auch auf weitere städtebauliche Instrumente übertragen, wie z. B. Programme zur Dorfkernsanierung, zur Erneuerung von Stadtquartieren oder zur Umnutzung von Industriebrachen.

Mit klassischen Vermessungsdaten alleine kann man diesen gestiegenen Anforderungen nur bedingt gerecht werden. In den letzten Jahren hat sich in den Bereichen Vermessung und 3D-Visualisierung eine enorme Dynamik entwickelt. Diese Dynamik wird durch den Fortschritt im Bereich der Drohnentechnik weiter verstärkt. So nutzen auch im kommunalen Bereich Behörden und Planungsbüros zunehmend die von Dienstleistern angebotenen Produkte, um zeit- und kosteneffizient ihre Zielvorgaben zu erreichen.

Insbesondere im Bereich der BPlan-Verfahren bieten Drohnen einen großen Mehrwert gegenüber den klassischen Methoden der Datengewinnung und -verarbeitung. Dazu werfen wir zunächst einen Blick auf die Herausforderungen, die derzeit bei solchen Verfahren häufig zu Kostensteigerungen und Zeitverzögerungen führen:

- Für die effiziente und reibungslose Durchführung von BPlan-Verfahren fehlen oftmals genaue und aktuelle Vermessungsdaten.
- Orthofotos der zu überplanenden Gebiete stammen – wenn überhaupt vorhanden – in der Regel aus zentral organisierten Befliegungskampagnen. Daher sind sie oftmals zu alt oder nur in unzureichender Auflösung vorhanden.
- Die detaillierte Bestandserfassung ist häufig mit kosten- und zeitintensiven Ortsbegehungen verbunden.
- An BPlan-Verfahren sind viele Akteure mit unterschiedlichsten Interessen, beruflichem Hintergrund und Vorwissen im Planungswesen beteiligt. Das führt zu Missverständnissen, unterschiedlichen Interpretationen von Planungsentwürfen und in einigen Fällen zu (politischen) Konflikten.

Von diesen vielfältigen Herausforderungen sind die meisten Kommunen betroffen, von der kleinen Gemeinde bis hin zur Millionenmetropole. Das Fehlen von Vermessungsdaten kann dabei durch eine – oft teure und zeitintensive – Vermessung vom Boden aus gelöst werden. Die verfahrensbezogene Erstellung von Orthofotos durch eine zeitnahe flugzeuggestützte Befliegung ist in der Regel

keine Option, da eine konventionelle Befliegung mit einem Flugzeug für Flächen von wenigen Hektar Größe nicht wirtschaftlich sinnvoll angeboten werden kann. Auch für das Problem der unterschiedlichen Interpretationen von Planungsentwürfen haben die meisten Kommunen keine wirklich befriedigende Lösung gefunden. Hier wird in Einzelfällen auf aufwändig produzierte Gips- oder Holzmodelle zurückgegriffen.

Genau diese Herausforderungen eines BPlan-Verfahrens können durch professionell durchgeführte Drohnenbefliegungen und die damit verbundene Datenaufbereitung gemeistert werden.

2.1.1 Vom Aufstellungsbeschluss bis zur Feststellung – effizienteres Arbeiten bei jedem Verfahrensschritt

Aufgrund der oftmals großen Komplexität von BPlan-Verfahren wünschen sich viele Kommunen und Planungsbüros eine Vereinfachung der verschiedenen Verfahrensschritte. Es stellt sich also die Frage: Welche Schritte eines BPlan-Verfahrens können durch Daten aus Drohnenbefliegungen günstiger, effizienter und mit weniger Konflikten bearbeitet werden?

Den typischen Ablauf eines BPlan-Verfahrens zeigt Abb. 3. Es beginnt mit einem Planungsanstoß, der aus der Bürgerschaft, von einem Investor oder auch



Abb. 3: Ablauf, häufige Probleme und Lösungen bei Bebauungsplanverfahren

aus dem Gemeinderat kommen kann. In der Folge gibt es einen Aufstellungsbeschluss durch den Gemeinderat, die frühzeitige Beteiligung verschiedener Akteure und einen ersten Entwurf.

Dieser Entwurf wird öffentlich ausgelegt, alle Interessierten können sich erneut beteiligen, sodass die entsprechenden Gremien im Anschluss über Änderungsvorschläge debattieren und das Für und Wider abwägen können. Erst am Ende dieses langwierigen und manchmal mühsamen Verfahrens steht die Feststellung des BPlans.

An einem solchen Prozess sind viele verschiedene Akteure beteiligt. Alle diese Akteure benötigen aktuelle und informative Unterlagen zum Planungsgebiet – am besten Falle in leicht verständlicher Weise aufbereitet.

2.1.2 Aufstellungsbeschluss und frühzeitige Beteiligung

Zu Beginn des Verfahrens geht es zunächst darum, an Informationen über den Ist-Zustand, also den Bestand zu gelangen. Die Herausforderung vieler Kommunen liegt dabei darin, dass viele der benötigten Daten und Informationen nicht ohne Weiteres verfügbar sind. Zunächst werden die Bestandspläne herangezogen, sofern für das zu beplanende Gebiet Pläne vorhanden sind. Häufig sind diese Pläne jedoch nicht mehr aktuell, sodass eine Überarbeitung notwendig wird.

Einige Städte und Gemeinden können an diesem Punkt auf ein Orthofoto zurückgreifen. Doch die Befliegungen liegen oftmals schon einige Jahre zurück, sodass die Daten nicht den aktuellen Ist-Zustand wiedergeben. Darüber hinaus sind solche Daten mit einer Auflösung von typischerweise 10 bis 20 cm pro Bildpunkt nicht sehr detailliert (vgl. [Abb. 4](#)).

Im Gegensatz dazu liefern Drohnenbefliegungen Orthofotos mit Auflösungen von etwa 1 bis 3 cm pro Bildpunkt, einen deutlichen Zugewinn beim Detailgrad und somit bei der Erkennbarkeit baulicher Strukturen bedeutet. Darüber hinaus können diese Orthofotos genau zu dem Zeitpunkt erstellt werden, der aus Sicht der Kommune der sinnvollste ist. Das kann etwa zu Beginn des Verfahrens oder nach Abräumen/Abriss von Altbestand sein.

Selbst ein solch aktuelles und detailliertes Orthofoto kann nur eine erste Grundlage eines solchen Verfahrens bilden. Darüber hinaus sind auch Informationen über die Höhenverhältnisse und den generellen Charakter des Planungsgebietes von Bedeutung. Durch Begehungen können sich kommunale Entscheider sowie Planer einen ersten Eindruck des Planungsgebietes verschaffen. Was darüber hinaus hilft, ist der Überblick über das Gesamtgebiet als erste Annäherung.

Um diesen Überblick zu verschaffen, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann das Planungsgebiet aus verschiedenen Perspektiven mit einzelnen Schrägluftbildern aufgenommen werden. Das ermöglicht einen guten ersten Eindruck,

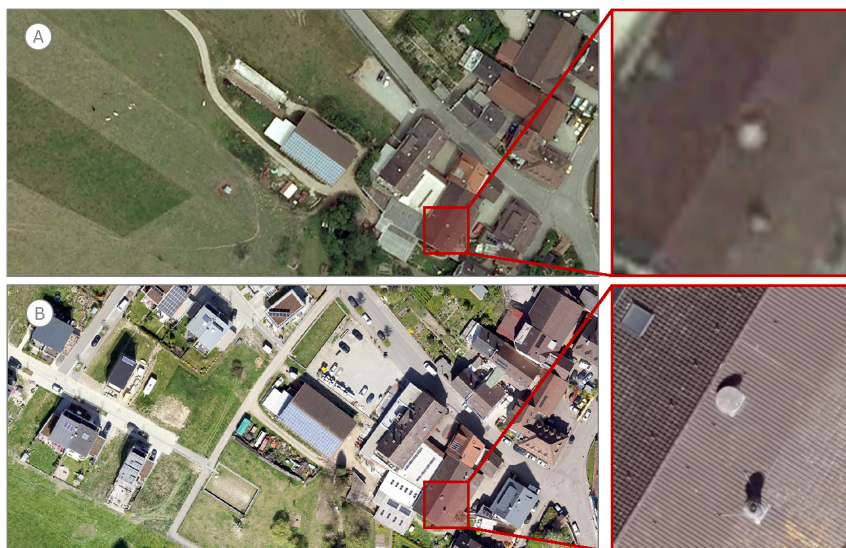


Abb. 4: Vergleich von Orthofotos aus klassischer Befliegung (A) und Drohnenebefliegung (B)



Abb. 5: Exemplarischer Überblick über ein Planungsgebiet. Den Ansichten liegen keine Schrägluftbilder zugrunde, vielmehr sind die Perspektiven aus einem texturierten 3D-Modell abgeleitet. Rot markiert: Flurstück für vorhabenbezogenen BPlan

doch meist ist auf diesen Bildern gerade das Detail nicht zu sehen, über das im weiteren Verlauf des BPlan-Verfahrens debattiert wird. Daher gibt es auch die Möglichkeit – wie in Abb. 5 zu sehen – entsprechende Darstellungen auf Grundlage des aus der Drohnenbefliegung erzeugten 3D-Modells zu erstellen. So kann auch im weiteren Fortgang des Verfahrens jede beliebige Ansicht des Planungsgebietes aus dem digitalen Modell erzeugt werden. So bekommt jeder am Verfahren beteiligte – Bürgermeister, Gemeinderäte, Sachbearbeiter, Betroffene und sonstige Interessierte – am Schreibtisch oder in der Gemeinderatssitzung einen sehr guten Überblick über die Verhältnisse vor Ort.

2.1.3 Entwurf des Bebauungsplans

Nach der Verabschiedung des Aufstellungsbeschlusses und der frühzeitigen Beteiligung verschiedener Akteure geht es darum, einen Entwurf des BPlans zu entwickeln. Auch hier stehen viele Kommunen wieder dem Problem gegenüber, dass für die Planungsgebiete in der Regel keine aktuellen Pläne vorhanden sind. Sollten Pläne vorhanden sein, weisen diese oftmals keine oder nur unzureichende Gebäude- und Geländehöhen aus. In diesem Fall werden typischerweise Vermesser beauftragt, um den Gebäudebestand aufzunehmen und anschließend einen Bestandsplan zu erstellen.

Die Herausforderung dabei ist, dass eine solche Vermessung teuer werden kann, da sie in der Regel zeitintensiv ist. Denn für eine Vermessung muss fast jedes Flurstück begangen und technische Ausrüstung am Boden häufig umgesetzt werden. Um den zeitlichen Aufwand und somit die Kosten gering zu halten, wird nur eine sehr begrenzte Anzahl an Messpunkten aufgenommen.

Der Ansatz bei einer Drohnenbefliegung unterscheidet sich in diesem Punkt grundlegend von der klassischen Vermessung. Aus der flächenhaften 3D-Information, die mittels Photogrammetrie ohne Begehung eines einzigen Flurstücks erzeugt werden kann, werden im Prozess der Datenaufbereitung genau die Daten selektiert, die im Planungsprozess relevant sind. Das gilt beispielsweise für First-, Wand- und Geländehöhen sowie Informationen zu Dachaufbauten und -formen. Ebenso können aus der 3D-Punktwolke geeignete Systemschnitte mit Gelände- und Gebäudehöhen extrahiert werden.

Die Daten werden so aufbereitet, wie die Bearbeiter in der Kommune und im Planungsbüro es gewohnt sind. Das Ergebnis ist ein klassischer Bestandsplan mit allen Informationen, die im BPlan-Verfahren benötigt werden. Die Daten werden dazu in der Regel im PDF-Format und als CAD-Datei weitergegeben (vgl. Abb. 6)

Sollten im weiteren Planungsprozess noch zusätzliche Höheninformation benötigt werden – beispielsweise weitere Geländeschnitte oder zusätzliche Höhen von Dachaufbauten – können die entsprechenden Daten schnell aus dem bereits

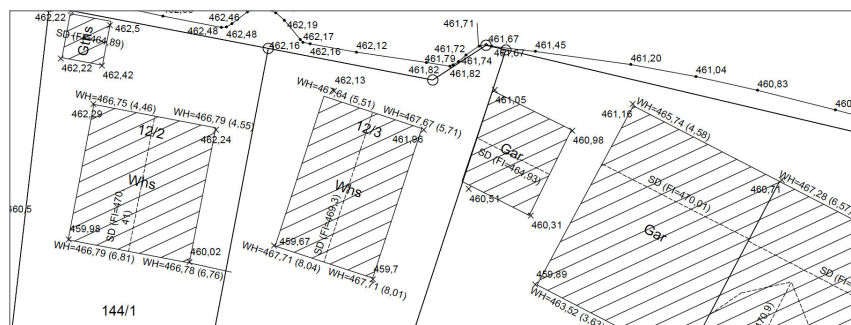


Abb. 6: Ausschnitt aus einem Bestandsplan, der aus einer Drohnenbefliegung abgeleitet wurde.

vorliegenden flächenhaften Datensatz ergänzt werden. Bei klassischen Vermessungsverfahren wäre ein weiterer Personeneinsatz vor Ort notwendig, der wiederum mit entsprechenden Kosten verbunden ist.

2.1.4 Auslage und Beteiligungsprozesse

Wie eingangs gezeigt, gehen die Anwendungsmöglichkeiten von Drohnen Daten im Rahmen von BPlan-Verfahren deutlich über die eben vorgestellte reine Vermessung hinaus. So können sie beispielsweise zu einem besseren Verständnis von Planentwürfen beitragen. Viele Akteure, die nicht direkt im Detail mit einem solchen Verfahren vertraut sind, tun sich mit Planzeichnungen oftmals schwer. Das kann zu Missverständnissen oder unterschiedlichen Interpretationen der Pläne führen. In vielen Fällen führt das wiederum zu Konflikten, sowohl innerhalb der Verwaltung, aber insbesondere auch im politischen Umfeld. Daher sind zeitaufwändige Diskussionen im Gemeinderat oder bei Bürgerversammlungen im Rahmen solcher Verfahren keine Seltenheit.

Visualisierungen, die aus Drohnenbefliegungen abgeleitet werden, können dabei helfen, dieses Konfliktpotenzial bereits in einem frühen Stadium des Verfahrens zu beseitigen.

Das in **Abb. 7** dargestellte Beispiel zeigt eine einfache Visualisierung eines Gebietes, für das ein neuer BPlan erstellt werden soll. In diesem Gebiet soll eine größere Baumaßnahme realisiert werden. In der Bildmitte sind die Gebäude erkennbar, die – umrahmt vom bereits bestehenden Gebäudeensemble – neu gebaut werden sollen. Bei diesen Bildern handelt es sich nicht etwa um Fotos eines Holz- oder Gipsmodells, sondern um eine am Computer erzeugte Darstellung eines Bebauungsplangebietes. Die Gebäudehöhen und -formen des Bestands und auch die Geländehöhen wurden aus einer Drohnenbefliegung abgeleitet, die geplanten Gebäude auf Grundlage von Plänen modelliert.

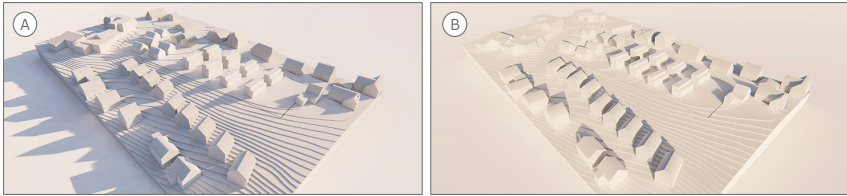


Abb. 7: Am Computer erzeugte 3D-Visualisierung zur Darstellung von Größenverhältnissen und Schattenwurf an einem Wintertag um (A) 11 Uhr und um (B) 17 Uhr

Mit so einem Modell kann die Wirkung geplanter Baukörper bereits in einem frühen Planungsstadium abgeschätzt werden, was möglichen Konflikten bereits vorab die Grundlage entziehen kann. Darüber hinaus kann auch der Schattenwurf realistisch dargestellt werden, ebenfalls ein Themenbereich der häufig Konfliktpotenzial in sich trägt.

2.2 Mehrwert bei Entscheidungsfindungen für Einzelobjekte

Auch bei der Planung und Entscheidungsfindung im Bezug auf Einzelobjekte kann eine Bestandserfassung mittels Drohnenbefliegung einen Mehrwert schaffen. Die einfachste Möglichkeit der Darstellung ist das Verschmelzen von einzelnen Schrägluftbildern mit dem Modell einer geplanten Bebauung (vgl. [Abb. 8](#)).

In diesem Fall diente die Drohne nur als Mittel zur Erstellung eines einzelnen Luftbildes. Das vom zuständigen Architekturbüro bereitgestellte 3D-Gebäudemodell wurde anschließend per Fotomontage korrekt skaliert und georeferenziert in dieses Luftbild eingearbeitet. Das Ergebnis ist eine für Entscheider, Planer, und Bürger leicht verständliche und nachvollziehbare Darstellung der Situation, die nach der Umsetzung der Baumaßnahme eintreten würde.

Visualisierungen von Planungsvarianten und Ansichten aus beliebigen Perspektiven lassen sich noch flexibler auf Grundlage von digitalen 3D-Modellen



Abb. 8: Luftbild eines zu bebauenden Flurstücks im Ausgangszustand und mit Visualisierung der geplanten Bebauung



Abb. 9: Unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten eines 3D-Modells von Bestandsbebauung und geplanter Bebauung (Planung: fsp.Stadtplanung)

realisieren. Bei dem in [Abb. 9](#) gezeigten Beispiel wurde der Gebäudebestand zunächst mittels Drohnenbefliegung erfasst und in ein fotorealistisches digitales 3D-Modell überführt. Anschließend wurden die 3D-Modelle der neu zu bauenden Gebäude nach den Vorgaben der planenden Architekten und Landschaftsplaner in das Gesamtmodell integriert und zu 3D-Visualisierungen aufbereitet.

Der Detailgrad des Gesamtmodells kann an das jeweilige Verfahren und die Umstände angepasst werden. Das reicht von eher abstrakten Darstellungen bis hin zu detaillierten Visualisierungen mit Fassadentextur, Straßenmobiliar und Personen und Fahrzeugen. [Abb. 9](#) zeigt verschiedene Darstellungsvarianten eines Modells. Mit solchen Modelle lassen sich auch Videoanimationen mit virtuellen Rundflügen oder virtuellen Rundgängen durch das Modell generieren.

2.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Beispiele zeigen, dass Drohnen dazu beitragen können, BPlan-Verfahren effizienter und reibungsloser zu gestalten. Das gilt für erste vorbereitende Maßnahmen im Vorfeld des Aufstellungsbeschlusses, für die Vermessung im Rahmen der Bestandserfassung und reicht bis zur leicht verständlichen Darstellung von Planungsentwürfen. Professionelle Vermessungsdrohnen eignen sich dabei hervorragend, um flächenhafte, aktuelle und genaue 2D- und 3D-Daten zu erzeugen. Die Kosten des Drohneneinsatzes sind ungefähr mit denen einer klassischen Vermessung vergleichbar. Dafür erhalten Kommunen und Planer jedoch deutlich mehr Daten – vom Orthofoto über den Bestandsplan bis zur

Visualisierung – auf die in verschiedenen Phasen eines BPlan-Verfahrens zurückgegriffen werden kann.

Die Voraussetzung für eine erfolgreiche und zielführenden Einsatz von Drohnen ist, dass bereits vor der ersten Befliegung die entsprechenden Anforderungen an das Endprodukt definiert werden, um mit geeigneten Sensoren und einer geeigneten Flugplanung adäquates Bildmaterial erzeugt zu können. Dies muss dann mit entsprechendem Kow How in der Photogrammetrie ausgewertet und aufbereitet werden, um Endprodukte in überprüfbarer Qualität zu erhalten.

Unter diesen Voraussetzungen bietet die Drohnentechnik für Kommunen und Planungsbüros bereits jetzt ein enormes Potenzial für Kostensenkung und Effizienzsteigerung. Es ist davon auszugehen, dass die aus Drohnenbefliegungen abgeleiteten Produkte in BPlan-Verfahren zukünftig wichtige Bausteine bei Vermessung, Planung und Bürgerbeteiligung werden.

3 Beispiel aus der Flurneuordnung

3.1 Mehrwert durch Einsatz von Drohnentechnik bei Flurneuordnungsverfahren

Auch bei Flurneuordnungsverfahren kann der gezielte Einsatz von Drohnen zur Schaffung von Datengrundlagen und zur Dokumentation des Verfahrens einen erheblichen Mehrwert erzeugen. Die prinzipielle Eignung von UAVs zur Datengewinnung in solchen Verfahren wurde schon von Cramer et al. (2013) in einer Pilotstudie für das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg nachgewiesen. In dieser Studie wurde gezeigt, dass die photogrammetrische Vermessung mittels Drohnen die Genauigkeitsanforderungen in solchen Verfahren erfüllen kann.

In der Praxis wirken sich weitere Stärken der Datenerhebung mittels Drohnen aus: die zeitliche Flexibilität in den Befliegungen, die relativ kostengünstigen Mehrfachbefliegungen und die Aktualität und der Detailgrad von hochaufgelösten, flächenhaften Daten.

Im folgenden Beispiel wurde ein größeres Flurneuordnungsverfahren am Kaiserstuhl im Zeitraum von 2015 bis 2017 mit Drohnenbefliegungen begleitet. Im Zuge des Verfahrens wurden unter anderem Rebterrassen umgestaltet, Wirtschaftswege neu trassiert und eine Tröpfchenbewässerung installiert (Abb. 10).

Eine erste Befliegung wird sinnvollerweise bereits vor Beginn der Maßnahmen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Befliegung können dann für die Bestandserfassung und Bestandsdokumentation vor Beginn der Maßnahmen herangezogen werden. Dies unterstützt die spätere Dokumentation des Verfahrens und kann bei der Wertermittlung der Grundstücke hilfreich sein. Auch bei der

Aufstellung des Wege- und Gewässerplanes liefert ein aktuelles und hochauflöses Orthofoto einen hilfreichen visuellen Kontext. Das digitale Oberflächenmodell bietet bei geeigneter Aufbereitung zu einem Geländemodell (ohne Vegetation) für die Planung der baulichen Maßnahmen und den Wege- und Gewässerplan eine geeignete Grundlage.



Abb. 10: Neuterrassierung im Rahmen einer Rebflurbereinigung am Kaiserstuhl



Abb. 11: Digitales phototexturiertes 3D-Modell des Flurbereinigungsgebietes als Grundlage für Visualisierungen

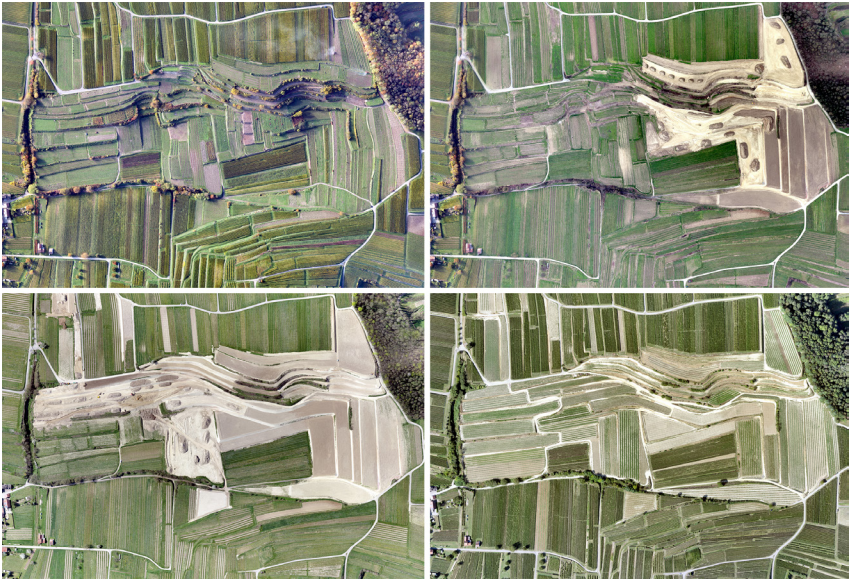


Abb. 12: Von oben links nach unten rechts: Ausgangszustand am 31.10.2015, erster Bauabschnitt am 28.2.2016, zweiter Bauabschnitt am 11.4.2016, nach Abschluss der Baumaßnahmen am 29.9.2016

Weiter ist es möglich, auf Basis des digitalen phototexturierten 3D-Oberflächenmodells aus der Erstbefliegung des Bestandes (in [Abb. 11](#) dargestellt) Planungsvarianten dreidimensional zu visualisieren. In Aushandlungsprozessen mit der Teilnehmergemeinschaft oder mit sonstigen Beteiligten (z. B. Naturschutz und Tourismus) hat man mit solchen Visualisierungen eine anschaulichere Diskussionsgrundlage zur Verfügung, als dies klassische Pläne bieten.

Weitere Befliegungen während der Bauarbeiten dokumentieren den Baufortschritt und die teilweise nicht unerheblichen Eingriffe in die Landschaft. Da aus den Befliegungen georeferenzierte Orthofotos und skalierte 3D-Modelle abgeleitet werden können, erlauben die Daten nicht nur eine visuelle Interpretation der Veränderungen, sondern ermöglichen auch eine quantitative Dokumentation und Bewertung der Maßnahmen. [Abb. 12](#) zeigt vier Orthofotos vom Ausgangszustand über die Bauphasen bis zum Zustand nach Abschluss des Verfahrens. Die Befliegung nach Abschluss der Maßnahmen dokumentiert den erreichten Zustand am Ende des Verfahrens und ermöglicht eine Überprüfung von Planung und Umsetzung in der Örtlichkeit. Bei größeren baulichen Maßnahmen, die das Gelände umgestalten, können aus den Daten auch Volumina z. B. von abgetragenen Material (Mutterboden für die spätere Weiterverwendung o. ä.) ermittelt werden.

4 Zusammenfassung

Die Beispiele aus den Bereichen Stadtplanung und Flurneuordnung zeigen, dass die Vermessung mittels Drohnenbefliegung auch für die öffentliche Hand in etablierten Verfahren einen deutlichen Mehrwert gegenüber den bereits von Amts wegen vorhandenen Daten oder auf klassischem Wege erhobenen Vermessungsdaten bieten kann.

Die Daten können vorhabenbezogen aktuell, flächendeckend und detailliert erhoben werden. Sie dokumentieren durch Mehrfachbefliegungen den Verfahrensfortgang. Sie ergänzen die reinen Vermessungsdaten um einen visuellen Kontext. Und sie können zu ganz unterschiedlichen Endprodukten weiterverarbeitet werden. Mit Blick auf die zunehmende Bedeutung des Bürgerdialogs in vielen Verfahren kommt dabei der Visualisierung von Ist- und Planungszuständen eine zentrale Rolle zu.

Alle diese Vorteile tragen dazu bei, Verfahren transparenter und effizienter zu machen, Verzögerungen im Planungsprozess zu reduzieren und so letztlich die Kosten zu senken.

Literatur

- Brandt, C. (2018): Unbemannte Luftfahrtsysteme in Deutschland – rechtlich gesehen. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 23–20.
- Cramer, M.; Haala, N.; Rothermel, M.; Leinss, B.; Fritsch, D. (2013): UAV@LGL – Pilotstudie zum Einsatz von UAV im Rahmen der Landesvermessung in Deutschland. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), Heft 5, Stuttgart, 495–409.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Meißner, H.; Stebner, K. (2017): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: DVW e.V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Augsburg, 67–84.

Kontakt

Dr. Johannes Schlesinger | Dr. Steffen Vogt
svGeosolutions GmbH
Lise-Meitner-Straße 2, 79100 Freiburg
info@svgeosolutions.de

Planungsgrundlagen im Städtebau am Beispiel der Nachnutzung von ehemaligen Bahnflächen

Johannes Vieten | Jörg Spitthöver

1 Einleitung

Die Verwendung von UAS (unmanned aerial system) für geodätische Anwendungen erfreut sich seit einigen Jahren zunehmender Verbreitung. Durch erschwinglich und besonders ausgereifter gewordener Flug- und Kamerasysteme nutzen auch immer mehr kleinere Ingenieurbüros Technologien zur Datenerfassung aus der Luft. Besonders die Geschwindigkeit, mit der die Daten erfasst werden können, als auch die Möglichkeit schwer zugängliche Gebiete, wie beispielsweise stark befahrene Bahntrassen, vermessen zu können, sind Gründe für das steigende Interesse. Neben einer Vielzahl ingenieurgeodätischer Anwendungen, wie die Erstellung von digitalen Geländemodellen oder Mengenanalysen, eignen sich unbemannte Flugsysteme ebenso zur Erstellung von Plangrundlagen im Städtebau.

2 Projekt Dahlhauser Straße

Das Planungsgebiet ist das ehemalige Zechengelände „Hüttenwerk Neu-Schottland“ aus dem 19. Jahrhundert in Essen-Steele. Der zuletzt in der 1960er Jahren ausgebauten Gebäudebestand ist über die Jahre zu einem Gewerbepark gewachsen und stark renovierungsbedürftig. Das Objekt besteht größtenteils aus kleinen und mittelgroßen Hallenflächen sowie aus einigen Frei-, Büro- und Wohnflächen, und beheimatet diverse Speditionen, Kfz-Werkstätten sowie einen Getränkegroßhandel und ein Fitnesscenter (Aurelis 2018, WAZ 2017; siehe auch [Abb. 1](#)).

Das Gebiet sollte zusätzlich zum terrestrischen Aufmaß des Gebäudebestands mittels UAV befliegen werden. Im Besonderen war das Ziel, Erkenntnisse über die in direkter Nachbarschaft liegende Bahntrasse sowie über die Höhen und Beschaffenheit der Dachformationen des Gebäudebestands zu erlangen, da diese sich in vielen Bereichen als uneinsehbar herausstellten.



Abb. 1: Punktwolke des Objekts Dahlhauser Straße in Agisoft Photoscan

3 Eingesetztes Messsystem

Für den Bildflug wird ein UAS des Typs GAUI 840H eingesetzt (Abb. 2). Bei dem Hexacopter handelt es sich um ein Trägersystem ohne fest verbaute Kamera. Die Spannweite zwischen zwei gegenüberliegenden Motoren beträgt 84 cm bei einer Gesamthöhe von 34 cm. Gesteuert wird der Flugroboter mit dem GPS Flight Controller WooKong M der Firma DJI. Als Kamerasystem dient eine Nikon Coolpix A mit Nikon CMOS-Sensor im DX-Format ($26,6 \times 15,6$ mm) mit einer Auflösung von 4928×3264 Pixel. Sie ist mit einem fest verbauten Weitwinkelobjektiv ausgestattet, welches mit einer Festbrennweite von 18,5 mm (28 mm bei Kleinbild) aufwartet (Nikon 2018).



Abb. 2:
GAUI 840H mit
Nikon Coolpix A

4 Messung und Auswertung

Geplant und durchgeführt wird der Flug mit der Tablet-Applikation *Ground Station Pro* der Firma DJI. Es wird ein Block mit insgesamt 535 Bildern aufgenommen, der auf 29 terrestrisch bestimmten Passpunkten gelagert wird (siehe auch [Abb. 3](#)). Außerdem wird die Kamera mit Hilfe der GCP (Ground Control Points) simultan kalibriert.

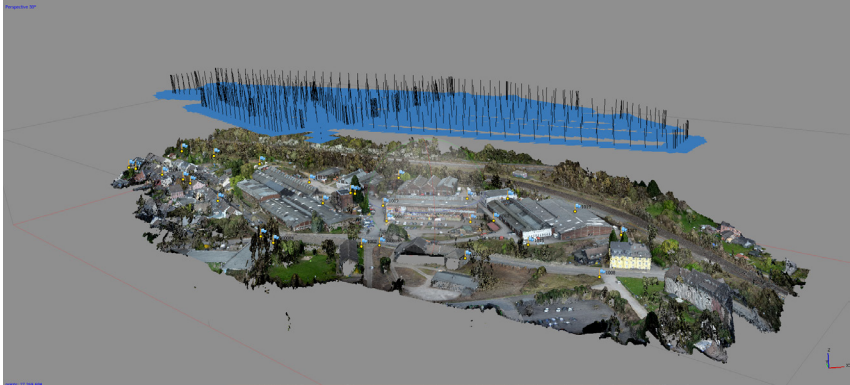


Abb. 3: Ausgerichteter Bildverband in Agisoft Photoscan

Neben der Punktwolke wird ein hochauflösendes, georeferenziertes Orthofoto generiert. Aus diesem werden Topographieelemente, insbesondere aus den nicht zugänglichen Bereichen (Dachlandschaften, Bahngleise ...), entnommen und in die Lageplandarstellung übertragen (siehe auch [Abb. 4](#)). Die zugehörigen Höhen werden aus der Punktwolke entnommen.

Im nächsten Schritt werden die Messergebnisse mit Daten von externen Quellen kombiniert (Katasterdaten, Kanalinformationen, etc.). Insbesondere die (nicht örtlich überprüfen!) ALKIS-Daten bilden hier die Grundlage der Lageplangestaltung. Zu beachten ist hier, dass die Befliegung mit einer Bodenauflösung von 2,39 cm/pix Ergebnisse in mindestens Katastergenauigkeit liefert. Da die Katasterkoordinatenqualität im Messgebiet allerdings nur im Dezimeterbereich liegt, führt dies punktuell dazu, dass beispielsweise Topographieelemente in der Plandarstellung auf der „falschen“ Seite einer Flurstücksgrenze dargestellt werden. In [Abb. 5](#) ist beispielsweise eine Mauer zu erkennen, die im Riss auf der rechten Seite der Grenze dargestellt ist. Nach Auswertung der Befliegung befindet sich die Mauer jedoch auf der anderen Seite der Grenze. Zu „heilen“ wäre dies durch eine Grenzuntersuchung des Umrings, welche allerdings nicht beauftragt ist. Dennoch können auf diese Weise auch fehlerhafte Katasterdaten aufgedeckt werden.



Abb. 4: In der Punktwolke sichtbare Topografieelemente (oben) und zum besseren Verständnis der Planinhalte hinterlegtes Orthofoto

5 Fazit

Die Erfassung der Topographie aus den Befliegungsdaten am Computer im Büro ist effizienter, als jeden Punkt terrestrisch zu messen. Terrestrisch gemessene Objekte lassen sich anhand des Orthofotos überprüfen, und auch ein eingeschränkter Planvergleich (gegen die Örtlichkeit) ist möglich. Insbesondere in schwer oder nicht zugänglichen Bereichen ist dieses Vorgehen eine Arbeits erleichterung. Zusätzliche nachgeforderte Eintragungen, etwa Einzelhöhen von Mauersegmenten, können ohne örtliche Nachmessung vorgenommen werden.

Durch Abgabe einer Lageplanversion mit hinterlegtem Orthofoto lässt sich die Situation besser visualisieren, was Planern und insbesondere Nicht-Fachleuten die Interpretation erheblich erleichtert. Der Informationsgehalt ist größer als in herkömmlichen Plänen, da sich flächenhaft weitere Informationen, etwa zu Materialität oder Erhaltungszustand, aus dem Bild entnehmen lassen.



Abb. 5: Richtige Darstellung der Mauer im Vermessungsgriss (oben) und falsche Darstellung der Mauer im Lageplan (Mitte mit Luftbild und unten) aufgrund der ungenauen Katasterkoordinaten

Literatur

Aurelis (2018): <https://www.aurelis-real-estate.de/news/pressemitteilungen/pressemitteilungen/2018/aurelis-kauft-gewerbepark-in-essen>, letzter Zugriff 11/2018.

Nikon (2018): www.nikon.de/de_DE/product/discontinued/digital-cameras/coolpix/2017/coolpix-a#tech_specs, letzter Zugriff 11/2018.

WAZ (2017): Gewerbegebiet in Horst an Projektentwickler Aurelis verkauft. WAZ. www.waz.de/staedte/essen/das-gewerbegebiet-in-horst-ist-verkauft-id212867091.html, letzter Zugriff 12/2018.

Kontakt

Johannes Vieten | Jörg Spitthöver

ÖbVI Jörg Spitthöver

Fischerstraße 13, 45128 Essen

info@verm-essen.de

FindMine – UAV im humanitären Einsatz

Werner Mayr

1 Einleitung

Im Jahresbericht 2017 des Geneva Centre for Humanitarian Demining (GICHD 2018) sind 8605 durch Minenexplosion geschädigte Personen erfasst. Ein Jahr hat 8760 Stunden – jede Stunde jeden Tages im Jahr ein Betroffener zu viel, verletzt oder tot. Die Dunkelziffer ist höher. Über 80 % der Betroffenen sind Zivilisten. 42 % sind Kinder. 84 % der Opfer sind männlich, 16 % sind weiblich. Die meisten Betroffenen benötigen lebenslange medizinische Unterstützung und Prothesen. Der Bedarf steigt. Sehr viele Personen sterben. Man schätzt, dass noch immer ca. 150 Millionen scharfe Minen vorhanden sind, auf und im Boden liegend, Auch Gewässer sind betroffen. In über 60 Ländern der Erde finden sich Minen, Streubomben und andere Arten von Explosiva auf und im Boden. Als Minen bezeichnet man Antipersonen-Minen (APM, engl. anti-personnel mines) und Antipanzern-Minen, engl. Anti-Tank-Mines (ATM), heute aufgrund fast täglicher Vorkommnisse als Anti-Vehicle-Mines (AVM) bezeichnet. Während APM auf Verletzung und Behinderung am Fortkommen von Einzelpersonen ausgelegt sind, oftmals jedoch tödlich wirken, sind AVM auf gleichzeitige Tötung mehrerer Personen ausgelegt. In 58 Ländern plus drei Gebieten (Landeszugehörigkeit strittig) findet man Antipersonen-Minen.

Man schätzt, dass weltweit noch knapp 2000 km² alleine mit APM verseucht sind. Hinzu kommen riesige AVM-kontaminierte Flächen. Jeder einzelne Quadratzentimeter einer kontaminierten Fläche muss bei humanitärer Minenräumung händisch mehrfach untersucht und gegebenenfalls geräumt werden. Der Zeitaufwand ist exorbitant. Die berichtete, weltweite Räumungsrate für APM lag für 2016 bei 172 km² (MAR 2017), für 2017 bei ca. 134 km² (MAR 2018); rückläufig! Durch Gebilde wie Islamischer Staat oder Boko Haram ist ein Zuwachs an APM zu verzeichnen. Einmal gelegt, bleiben Minen dauerhaft eine Gefahr für Leib und Leben. Die von UNO-Organisationen wie GICHD erfassten Statistiken sind deutlich filigraner und bewegender, als dies hier einleitend umrissen ist. Die von Minen oder Bomben ausgehenden Gefahren sind in Deutschland fast wöchentlich in Form von zu entschärfenden Fliegerbomben aus dem Zweiten Weltkrieg allseits präsent.

Minen verhindern dauerhaft die Nutzung von Landwirtschaftsflächen zur Nahrungsmittelerzeugung. Wegen Minen bleibt Kindern der Schulweg versperrt. Aufgrund von Minen können Flüchtlinge auf sehr lange Zeit nach Konflikte nicht in ihre Heimat zurückkehren. Minen verhindern den Wiederaufbau von Infrastruktur und vielem mehr.

Die dringende, humanitäre Aufgabe, zur Beschleunigung bei der Räumung von Minen beizutragen, ist evident. Hierfür hat der Schweizer Unternehmer Urs Endress die nach ihm benannte Urs Endress Stiftung mit Sitz in Arlesheim bei Basel, Schweiz, 2015 ins Leben gerufen. Ziel der gemeinnützigen Urs Endress Stiftung ist, einen nachhaltigen Beitrag zur Beschleunigung bei der humanitären Minenräumung zu leisten. Dafür startete die UE-Stiftung 2016 das „FindMine“ R&D-Projekt, über das im Folgenden berichtet wird. Ergebnisse werden der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, um so nützliche, neue Technologien für die humanitäre Minenräumung zugänglich zu verbreiten und zum Einsatz zu bringen.

2 FindMine

Mittels Remote-Sensing möchte die Urs Endress Stiftung erreichen, APM und ATM bis in eine Tiefe von 20 cm gefahrenfrei detektieren und lokalisieren zu können. Dabei soll keine Notwendigkeit zur Bodenberührung bestehen. Es ist naheliegend, die entsprechende Sensorik als Nutzlast von einem unmanned aerial vehicle (UAV) über die vermeintlich kontaminierte Fläche zu fliegen. Zur Umsetzung dieser Idee startete die Urs Endress Stiftung 2016 das R&D-Projekt FindMine. Als Primär-Sensor für die Detektion wurde seither ein ground penetrating synthetic aperture radar (GPSAR) entwickelt. Es ist als Nutzlast (engl. payload) unter einer Trägerplattform befestigt (Abb. 1) (Schartel 2018a).



Schartel 2018a

Abb. 1:
Hexacopter
DJI Magic
Pro 600 mit
GPSAR-Sensor

Trägerplattform ist ein Multikopter-UAV, derzeit ein Hexacopter DJI Magic Pro 600, welcher bis 5 kg Payload tragen kann.

FindMine umfasst zwei komplementäre Bereiche, Radar und UAV-Steuerung. Für die Umsetzung der Radar-Aufgabenstellungen konnten die Universität Ulm, Institut für Mikrowellentechnik, und die Hochschule Ulm, Institut für Angewandte Forschung, gewonnen werden. Sie sind mit Radar-Signalprozessierung und Radar-Antennendesign befasst. Die UAV-Steuerung hat die ETH Zürich, Autonomous Systems Lab (ASL), übernommen. Dort erfolgen Umsetzung von Flugregelung, Komponenten-Integration, Flugplanung und autonome Flugfähigkeit-Integration.

Radar ist ein aktiver Sensor. Im Gegensatz zum Laserstrahl zum Zeitpunkt T liegt beim Radar zum Zeitpunkt T eine Wellenausbreitung vor, deren Reflexionen von einer Antenne empfangen und registriert werden. Vereinfachend kann man die Wellenausbreitung durch ihren strahlenartigen Radius darstellen. Beim Auftreffen der Radarwelle auf Boden erfolgt beim Eindringen in den Boden eine Beugung (Abb. 2).

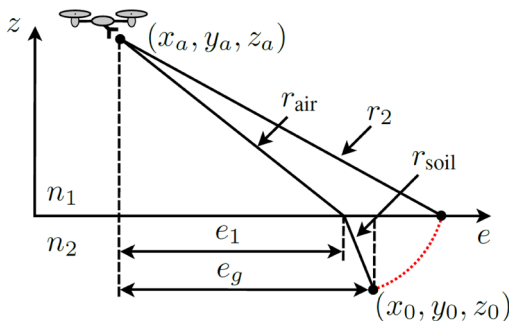


Abb. 2:
Geometrie beim Übergang
des „Radar-Strahls“ von Luft
in Boden; e repräsentiert ent-
weder x oder y

(Schartel 2018b)

Unstetigkeiten im Boden verursachen unterschiedliches Reflexionsverhalten, welches in der Radar-Signalverarbeitung erkannt werden kann. Solche Unstetigkeiten können z. B. Steine, andere Bodenverdichtungen oder eben auch Minen sein. Aufgaben der hier angewandten Radar-Signalverarbeitung sind das Erkennen dieser möglichen Objekte und deren 3D-Lokalisierung. Typischerweise sind AVM nicht tiefer als 20 cm im Boden vergraben. Sie werden i. d. R. durch Druckübertragung ausgelöst, wozu die Gewichtskraft eines Fahrzeugs nötig ist. D. h., sie sind i. d. R. für Menschen beim Betreten eines AVM-Ortes nicht unmittelbar gefährlich. APM findet man meist bodengleich oder knapp unter der Erdoberfläche vergraben. Manche APM-Arten sind mit Stolperdrähten versehen. Ältere Minen haben meist metallische Gehäuse, jüngere sind hingegen meist mit Kunststoffgehäuse versehen. Es gilt, eine Vielzahl von Parametern in der Signalverarbeitung zu berücksichtigen.

Um in den Boden mit Radarwellen bis ca. 20 cm tief einzudringen, ist eine Frequenz zwischen 0,5 GHz und 4,5 GHz nötig. Als Radar kommt ein synthetic aperture Radar (SAR) mit Sende- und Empfangsantenne zum Einsatz (Abb. 1), die speziell für FindMine entwickelt wurde (Burr 2018). Die FindMine GPSAR-Sensor-Nutzlast wiegt 2,3 kg. In Analogie zu einer Kameraoptik wird deren Brennpunkt beim SAR durch eine Trajektorie im Raum ersetzt. Aufgrund der physikalischen Randbedingungen des eingesetzten SAR ist derzeit eine Flughöhe H über Grund von 2 m bis ca. 4 m erforderlich, was Auswirkungen auf Flugführung und -regelung hat. Abb. 3 zeigt schematisch die Flugbahn (engl. flight-path) des FindMine-Systems und die unter Winkel $\alpha \sim 45^\circ$ seitlich schauende (engl. side-looking) Blickrichtung seines GPSAR. Beim Aufzeichnen von SAR-Signalen entlang eines geraden Flugstreifens spricht man von strip-map SAR.

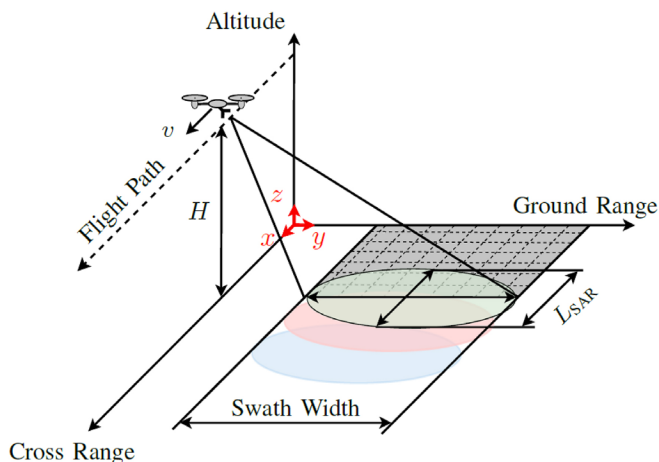


Abb. 3:
Schematische
Darstellung beim
strip-map SAR
(Schartel 2018a)

Um SAR-Signale nunmehr optimal prozessieren zu können, ist der 3D-Verlauf der Trajektorie hochgenau zu bestimmen, z. B. durch Rekonstruktion oder durch direkte Messung. Die hochgenaue Sensor-Positionsbestimmung führt beim SAR gewissermaßen zu schärferen Bildern, welche wiederum die Bildanalyse auf im Objektraum enthaltene Objekte, mögliche Minen, sehr unterstützt. Bei der in FindMine angewandten Radarauflösung bedeutet dies, dass die Trajektorie mit einer relativen Genauigkeit $\leq \pm 2$ cm in 3D bekannt sein muss. Dies ist eine nicht unerhebliche Messaufgabe. Neben der 3D-Position ist auch die Kenntnis der Lage der Sensor-Payload von großer Wichtigkeit. Deren Raumlage wird durch die drei Raumwinkel roll, pitch, yaw (auch bearing oder heading genannt) definiert. Sie werden mittels eines geeignet genauen IMU-Systems

erfasst (inertial measurement unit = IMU). Als Photogrammeter würde man sagen, direkte Georeferenzierung für SAR ist umzusetzen. Es liegt somit eine 6-DoF (degree of freedom) Aufgabenstellung vor. In FindMine gelingt das hinsichtlich der Positionsbestimmung, was mit der Bestimmung von X,Y,Z eine 3-DoF-Aufgabe ist, auf zwei Arten, extern und intern, und bzgl. der Payload-Lagebestimmung im Raum, was mit der Bestimmung von roll, pitch, yaw eine weitere 3-DoF-Aufgabe ist, mittels eines IMU-Systems.

Als externe Art der Positionsbestimmung bezeichnet FindMine die Anwendung eines Robot-Tachymeters, welcher ein unter dem UAV montiertes Prisma kontinuierlich verfolgt und mit hinreichender Frequenz die Polarkoordinaten des Prismas ermittelt und registriert. Dies konnte man mit einem Tachymeter MS50 von Leica und gleichermaßen mit einem Tachymeter SPS930 von Trimble nachweisen. Die so erfassten 3D-Koordinaten, auch gemessen bis auf eine Distanz von ca. 190 m zwischen Tachymeter und UAV, sind mit einer Genauigkeit $\leq \pm 1$ cm verfügbar. Das ist für die Radar-Signalverarbeitung genauer als gefordert. Neben der Genauigkeitsgüte ist die wesentliche Eigenschaft der externen Art der Positionsbestimmung, dass zwischen Tachymeter und UAV ständige Sichtverbindung bestehen muss.

Aufgrund seiner Messgenauigkeit dient der Tachymeter-Ansatz zur Validierung der zweiten, mit intern bezeichneten Art der 3D-Positionsbestimmung. Diese wendet RTK an. Eine oder zwei RTK-Rover-Antennen sind auf dem UAV montiert und agieren im Zusammenspiel mit einer Base-Antenne (Abb. 4). Mit zwei Rover-Antennen lässt sich das Heading ohne Verwendung einer IMU ermitteln. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Beitrags sind Tests mit leistungsfähigen RTK OEM-Komponenten in Ausführung. Über die Ergebnisse wird im Februar 2019 auf dem 178. DVW-Seminar „UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum“, zu dem dieser Tagungsband erscheint, berichtet werden.

Anforderung und Erwartung an die RTK-Implementierung sind eine Positionsgenauigkeit von $\leq \pm 2$ cm, mindestens in 2D, vorzugsweise in 3D. In der Höhe kann die geforderte Genauigkeit mittels RTK evtl. schwer erreichbar sein. Hierfür ist auf dem FindMine-UAV ein Radaraltimeter implementiert worden, welches neben einem ebenfalls vorhandenen Laser-Altimeter betrieben wird und hinreichend genaue Höhen-über-Grund-Werte liefert. Das Radar-Altimeter ist auch über Bewuchs, z.B. Maisfeld mit 2,3 m hohem Bestand, einsetzbar und liefert den Abstand zum Erdboden und damit die Höhe über Grund hinreichend genau (Schartel 2018c). Der Einsatz von RTK gestattet ein Betreiben des FindMine-Systems ohne Sichtverbindung zur Base-Antenne oder zum Piloten. Auch gestattet es das Minensuchen bei Nacht.

Ob nun Tachymeter oder RTK zur Positionsbestimmung zum Einsatz kommen, sie liefern X,Y,Z-Koordinaten in einer bestimmten Frequenz. Mit anderer Frequenz stellt das IMU-System die Lagewinkel zur Verfügung. Mit einer

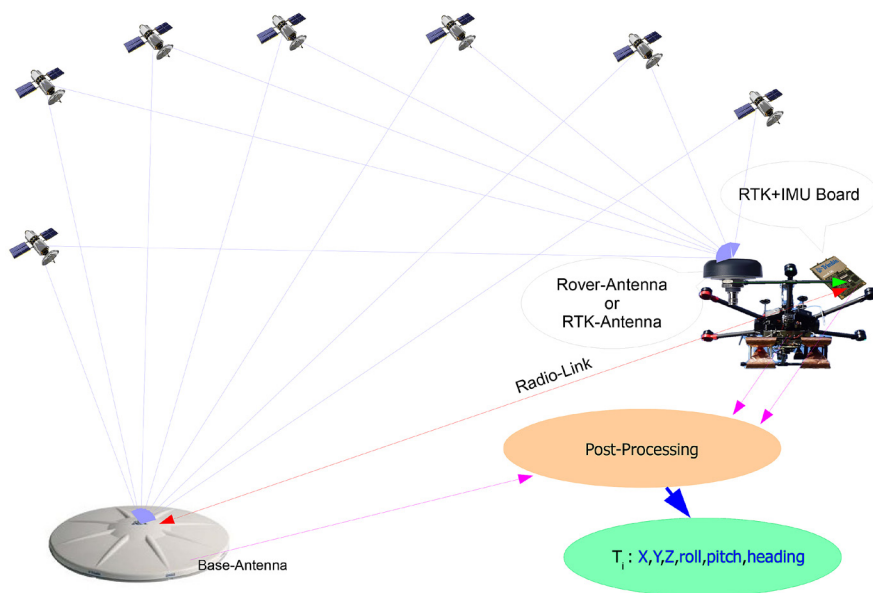


Abb. 4: Implementierung von RTK-Positionierung im FindMine-System

weiteren Frequenz sendet, empfängt und zeichnet das GPSAR Daten auf. Um diese Messdaten und die einiger anderer Messsensoren in der Auswertung zu vereinen, bedarf es kalibrierter und konstant erfassender Messsysteme sowie einer Synchronisierung mittels Zeitmessung mindestens im μ -Sekundenbereich. Dies ist in der FindMine Sensor-Payload realisiert.

Die Anwendung des FindMine-Systems erfolgt in mehreren Schritten. In Schritt 1 wird das Interessengebiet photogrammetrisch befliegen. Aus den Luftbildern werden ein digitales Oberflächenmodell (DOM) und ein Orthomosaik abgeleitet. Diese georeferenzierten Daten dienen im Weiteren der Flugplanung und der Visualisierung von Fundorten. Die Bildkarte steht später sowohl der nationalen Vermessungsorganisation als auch der GIS-Datenbank von GICHD zur Verfügung. Mittels DOM ist in Schritt 2 eine detaillierte 3D-Flugplanung in z. B. 3 m über Grund möglich. Zur sicheren, bodennahen GPSAR-Befliegung verfügt das FindMine-System zusätzlich über in die Flugregelung integrierte Sense&Avoid-Sensorik, womit ein erster Level autonomen Fliegens erreicht werden kann. So werden im DOM nicht enthaltene Objekte (= Hindernisse) während der Befliegung in Echtzeit erkannt und der Flugweg autonom angepasst. Die GPSAR-Befliegung erfolgt in Mäanderform, Kreuzbefliegung oder Kreisform (engl. circular SAR = CSAR) (Ponce 2014). Kreuzbefliegung und Kreisform ermöglichen die vorteilhafte Objekteinsicht aus allen Raumrichtungen.

Dies erhöht Redundanz bei der Signalprozessierung, aber auch die Rechenzeit. Bodeneigenschaften haben auf die Befliegungsmuster eine Auswirkung. In Schritt 4 erfolgt die Radar-Signalauswertung, welche automatisiert Objekte auf und im Boden erkennt und deren 3D-Lage angibt. Fundorte werden über dem Orthomosaik eingefärbt dargestellt und koordinatenmäßig in Listenform festgehalten.

3 Zusammenfassung und Ausblick

FindMine ist ein UAV-basiertes Remote-Sensing-System mit humanitärem Einsatzzweck. Seine Umsetzung erfolgt in konstruktiver und engagierter Zusammenarbeit mehrerer Fachdisziplinen, zu der auch die Vermessung beiträgt. Das technologisch sehr komplexe FindMine-System hat grundlegende Risiken überwunden. Die Fortsetzung realitätsnaher, entwicklungsbegleitender Nachweistests ist eine weitere, wichtige Phase dieses R&D-Projektes.

Es ist naheliegend, dass man mit einer Sensortechnologie nicht alle Minen detektieren kann. Bei der Beschäftigung mit dem Thema humanitäre Minenräumung kommt man nicht umhin, weitere Sensoriktechnologien in Betracht zu ziehen. Als solche wurden Multispectral, Thermal und Hyperspectral Imaging genauso wie Gas- und Metall-Detektion ausgiebig analysiert. Kombiniert man diese Technologien mit einem UAV, also mit dem Ansinnen der Urs Endress Stiftung, um ein kontaminiertes Gelände zu untersuchen und darin enthaltene Minen zu lokalisieren, ohne es betreten oder befahren, d.h. ohne es berühren zu müssen, treten neue, ungelöste Aufgabenstellungen hervor. So müsste z. B. ein Gasetektor, also eine Art elektronische Nase, ein Sprengstoffmolekül in 10^{12} Luftmolekülen sicher identifizieren. Speziell ausgebildete Minensuchhunde können das! Das FindMine-Team ist der Auffassung, dass mindestens ein weiterer, komplementärer Sensor zur Minendetektion integriert werden muss, um ein robustes, zuverlässiges FindMine-System zu erreichen. Die Vorarbeiten hierzu haben begonnen.

Das FindMine-Team dankt der Urs Endress Stiftung für ihre Unterstützung und die Möglichkeit, an diesem so wichtigen Projekt beitragen zu können.

Literatur

Burr, R.; Schartel, M.; Schmidt, P.; Mayer, W.; Walter, T.; Waldschmidt, C. (2018): Design and Implementation of a FMCW GPR for UAV-based Mine Detection. IEEE Xplore.
GICHD (2018): Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Annual_report_2017.pdf. www.gichd.org.

Mine Action Review (MAR) (2017): Clearing-the-Mines-2017.pdf. www.mineactionreview.org.

Mine Action Review (MAR) (2018): NPA_Clearing_the_Mines_2018_Web.pdf. www.mineactionreview.org.

Ponce, O.; Prats-Iraola, P.; Pinheiro, M.; Rodriguez-Cassola, M.; Schreiber, A.; Reigber, A.; Moreira, A. (2014): Fully Polarimetric High-Resolution 3-D Imaging With Circular SAR at L-Band. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 6, 3074–3090.

Schartel, M.; Burr, R.; Mayer, W.; Docci, N.; Waldschmidt, C. (2018a): UAV-Based Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar. IEEE Xplore 23.08.2018. DOI: [10.1109/ICMIM.2018.8443503](https://doi.org/10.1109/ICMIM.2018.8443503).

Schartel, M.; Prakasan, K.; Hügler, P.; Burr, R.; Mayer, W.; Waldschmidt, C. (2018b): A Multicopter-based Focusing Method for Ground Penetrating Synthetic Aperture Radars. IEEE Xplore 05.11.2018. Freiburg. DOI: [10.1109/IGARSS.2018.8518905](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518905).

Schartel, M.; Burr, R.; Schröder, P.; Rossi, G.; Hügler, P.; Mayer, W.; Waldschmidt, C. (2018c): Radar-Based Altitude over Ground Estimation of UAVs. IEEE Xplore 12.04.2018. Freiburg. DOI: [10.23919/GEMIC.2018.8335039](https://doi.org/10.23919/GEMIC.2018.8335039).

Kontakt

Dr.-Ing. Werner Mayr

ConWel UG

Steinbeise 79, 73642 Welzheim

werner.mayr@findmine.org

Session 3:

UAV-Anwendungen in der Ingenieur- vermessung mit Praxisbeispielen

Sechs Jahre Drohnenerfahrung: Praktische Beispiele aus dem Ingenieur- und Anlagenbau

Stephan Fick

1 Einleitung

Der Einsatz von Drohnen in der Vermessung hat rasant zugenommen. Ich möchte Beispiele vorstellen, die zeigen, was mit Drohnen „geht“ und auch was „nicht geht“.

1.1 Früher und heute

Bei meinem Studium an der TU Berlin ging es noch ziemlich analog zu (Abb. 1). Um photogrammetrisch tätig zu werden, brauchte man u. a. ein Flugzeug, eine Spezialkamera und Auswertegeräte.

Heute geht es wesentlich einfacher und auch kostengünstiger zu. Wir haben Drohnen, eine einfache Bildflugplanung, einen Autopilot mit GPS, eine handelsübliche Kamera und die digitale Auswertung.



Abb. 1: Stereoauswertegerät

2 Aspekte der Drohnenvermessung

2.1 Auflösung

Ein großer Vorteil gegenüber der „Flugzeugphotogrammetrie“ (Auflösung 10 cm) ist die wesentlich höhere Auflösung bei Drohnen. Ein Pixel im Bild entspricht den in Abb. 2 dargestellten Auflösungen. Die Abb. 3 zeigt ein amtliches Luftbild mit einer Auflösung vom 10 cm und ein Drohnenbild mit einer Auflösung vom 2 cm.

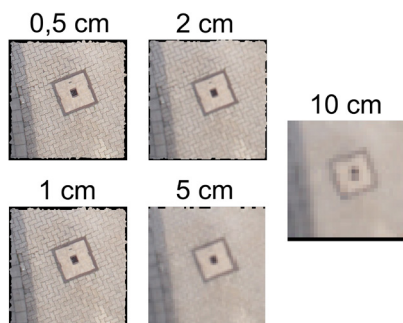


Abb. 2:
Auflösungen im Vergleich



Abb. 3: Vergleich amtliches Foto mit 10 cm Auflösung (links) und Drohnenfoto mit 2 cm Auflösung (rechts)



Abb. 4: Kanalkataster

2.2 Schnelle Erfassung großer Flächen

Durch eine Drohnenbefliegung können sehr große Flächen in viel kürzerer Zeit als früher erfasst werden. Durch eine Auflösung von 1 cm ergeben sich Genauigkeiten in der Lage von 1 cm und in der Höhe von 2 cm. Dies ist in aller Regel ausreichend. Hierzu wird hinter das georeferenzierte Orthofoto das digitale Geländemodell (DGM) gelegt und am Bildschirm werden dann Schächte und Einläufe mit Höhe digitalisiert (Abb. 4).

3 Probleme der Drohnenvermessung

3.1 Feinde der Drohne

3.1.1 Wind

Die Windanfälligkeit (siehe auch Abb. 5) bei Drohnen war (und ist bei manchen Modellen) ein großes Problem. Beim Waypointflug wurden die Drohnen abgetrieben, was bei der Auswertung zu nicht akzeptablen Löchern im Modell führt. Dies spielt heute jedoch nicht mehr eine so große Rolle. Denn schnellere Mess- und Regeltechnik in den Maschinen gleicht selbst größere Windstärken problemlos aus.



Abb. 5: Wind

3.1.2 Akkus

Der größte Hemmschuh liegt in der Flugzeit der Drohnen. Dies ist in der Leistungsfähigkeit der Akkus (Abb. 6) begründet. In der Realität werden nämlich maximal Flugzeiten von 15 Minuten erreicht und das auch nur im Sommer, im Winter sind die Flugzeiten deutlich geringer. Deshalb hat jeder Drohnenflieger seinen Heizkoffer dabei. In der Akkutechnik haben sich in den letzten Jahren leider nur wenig Verbesserungen ergeben.



Abb. 6: Flugakku

3.1.3 Flughindernisse

„Plötzlich“ auftretende Hochspannungsleitungen sind schwer einzuschätzende Hindernisse. Sie sind bei GoogleEarth nicht erkennbar, tauchen plötzlich am Ende des Fluggebietes auf und sind in der Höhe kaum kalkulierbar (Abb. 7). Bei größeren Entfernungen ist es auch schwer einzuschätzen, ob die Drohne wirklich noch vor dem Masten fliegt oder schon dagegen.



Abb. 7: Hochspannungsleitung

3.2 Erster Absturz 2012

Hier ist nur zu sagen: Runter kommen sie immer (Abb. 8)!

3.3 Vorteil Hexakopter

Bei einem Projekt in Holland wurde ein Windrad falsch eingeschätzt. Das Ergebnis waren, neben hohem Blutdruck und rasanter Herzfrequenz, vier kaputte Propeller. Das Projekt konnte dank des Hexakopters fertiggestellt werden, was bei einem Quadrokopter nicht der Fall gewesen wäre. Die Aussage „Propeller werden überschätzt“ halte ich dennoch für übertrieben (Abb. 9).



Abb. 8: Drohne im Belebungsbecken



Abb. 9: Zerstörte Propeller

4 Vorteile der Drohnenvermessung

4.1 Messung unzugänglicher Punkte

In der Punktwolke oder im dgm können die Höhen unzugänglicher Punkte gemessen werden (Abb. 10).

4.2 Arbeitssicherheit

Immer wieder kommt es zu schweren Unfällen bei der konventionellen Bahnvermessung. Durch Drohneneinsätze müssen Menschen nun nicht mehr in das Gleisbett (Abb. 11). Die Drohne zeigt sich durch den Fahrtwind unbeeindruckt.

4.3 Anschauliche Pläne

Aufgenommene Objekte können sehr anschaulich in maßstäbliche Pläne ausgearbeitet werden (Abb. 12).

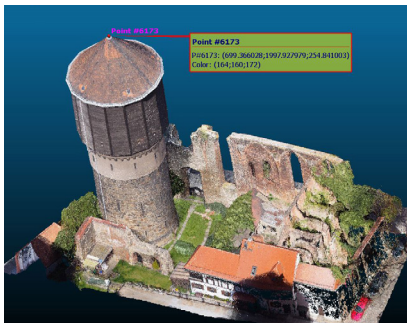


Abb. 10: Punktwolke in Cloud Compare



Abb. 11: Flüge über der Bahn

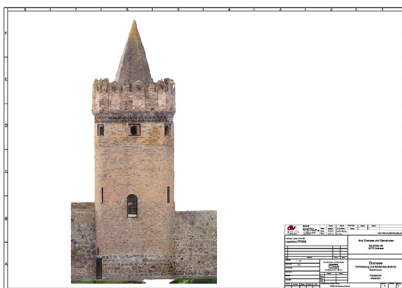


Abb. 12: Fassadenplan

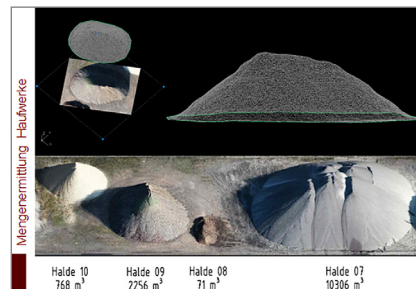


Abb. 13: Volumenbestimmung

4.4 Volumenbestimmung

Die Erfassung von Haufwerken (Abb. 13) mit Drohnen ist wesentlich ungefährlicher als per Hand. Auch hier gab es schon Tote durch Verschüttungen. Die Volumenberechnung erfolgt über das DGM sehr anwenderfreundlich.

5 Grenzen der Drohnenvermessung

5.1 Leitungen

Leitungen werden durch die Software sehr schlecht modelliert. Das ist bedauerlich, da gerade Leitungsaufmaß und -darstellung eine große Herausforderung darstellen. In Abb. 14 gibt es tatsächlich nur eine blaue Leitung, die exakt gerade verläuft. Die Software findet nicht genügend identische Punkte (Abb. 15).

5.2 Sondermodelle

Die Software ist auch manchmal kreativ (Abb. 16).



Abb. 14: Ungenügende Leitungsmodellierung im Orthofoto

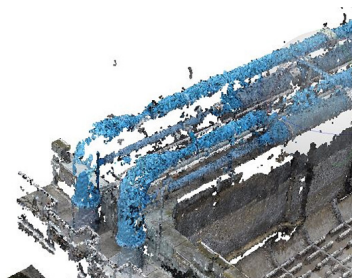


Abb. 15: Ungenügende Leitungsmodellierung in der Punktwolke



Abb. 16: Sondermodelle

6 Neue Möglichkeiten

6.1 Ölfleckenkataster

Der Vermesser freut sich an Katastern aller Art (Abb. 17).

6.2 Solarpotenzialanalyse

Auf Grundlage von 3D-Modellen können Solarfarmen geplant und deren Potenziale berechnet werden. Mit Thermalkameras können die Paneele überwacht und fehlerhafte identifiziert werden (Abb. 18).

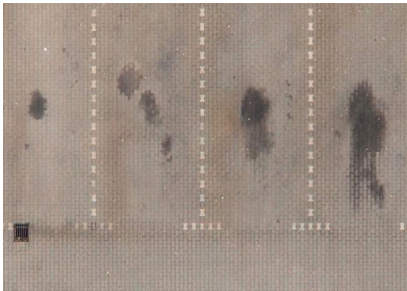


Abb. 17: Ölflecken

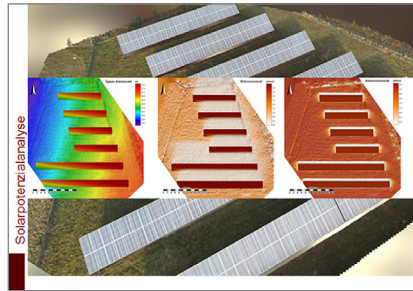


Abb. 18: Solarpotenzialanalyse

Kontakt

Dipl.-Ing. Stephan Fick

div-gmbh

Gertraudenstraße, 16540 Hohen Neuendorf

stephan.fick@div-gmbh.de

Bauvermessung mit unbemannten Flugsystemen: B 525n – Neubau Ortsumgehung Nottuln

Udo Bertels

1 Einleitung

Das Ingenieurbüro Bertels ist ein Partner für anspruchsvolle vermessungstechnische Dienstleistungen, die neben hoher Präzision noch einen weiteren entscheidenden Erfolgsfaktor bieten – Erfahrung. Seit 1995 stellen wir Ihnen für Ihren Auftrag unser gesamtes Know-how zur Verfügung, welches wir in einer Vielzahl von Projekten jeder Größenordnung gewonnen haben. So sorgen wir dafür, dass aus komplexen messtechnischen Daten direkt nutzbares Wissen wird – und stellen damit einen echten Mehrwert für Sie her: www.vom-messen-zum-wissen.de.

Fünf Jahre Erfahrungen mit einem Multikopter! Seit Januar 2014 führt das Ingenieurbüro Bertels auch Vermessungs- und Inspektionsleistungen aus der Luft durch. Aus bislang nicht dagewesenen Blickwinkeln ermöglichen wir Ihnen ganz neue Perspektiven auf Ihre Objekte und Anlagen.

2 Projektvorstellung

Die B 525 ist für den überregionalen und regionalen Verkehr ein wichtiges Bindeglied zwischen Südlohn an der niederländischen Grenze und der BAB A43 im Münsterland. Mit der Verkehrsfreigabe der Ortsumgehung Nottuln im Mai 2018 wird nun der Verkehr auf einer Länge von 48 Kilometern nicht mehr durch Ortsdurchfahrten ausgebremst. Für die Ortskerne ergeben sich durch die Reduzierung des PKW- und vor allem des LKW-Verkehrs, neue Chancen.

Der erste Spatenstich für die Ortsumgehung Nottuln erfolgte im April 2013. Sechs Brücken wurden gebaut – unter anderem durch das Naturschutzgebiet Nonnenbachtal. Um die Bauwerke gut in die Natur einzubinden, wurde ein Gestaltungswettbewerb durchgeführt. Die neuen Brücken ruhen nun auf baumartigen Stützpfählen und fügen sich mit einer fließenden Formgebung harmonisch in die Landschaft ein.

Für das Streckenlos und zwei Brückenbauwerke führte das Ingenieurbüro Bertels seit November 2015 die baubegleitenden Bauausführungsvermessungen für die fünf Kilometer lange Hauptstrecke und die drei Kilometer Nebentraßen

und Wirtschaftswege durch. Von der Urgeländeaufnahme mit einem Multikopter über die Aufbereitung der Daten für die Baumaschinensteuerung, der Absteckungen für den Erd- und Deckenbau bis zur Mengenermittlung für die Bauabrechnung erbrachte das Ingenieurbüro für die bauausführende Firma alle erforderlichen Vermessungsarbeiten.

2.1 Verfahrensgebiet

Die B 525n wird über eine Länge von fünf Kilometern nördlich um die Ortschaft Nottuln herumgeführt ([Abb. 1](#)).

2.2 Übersichtsplan

Die [Abb. 2](#) zeigt eine Übersicht über die Haupt- und Nebenstrecken.

3 Bauvermessung – Urgeländeaufnahme mit einem UAS

Vor Beginn der Bauarbeiten im Streckenlos musste nach Übergabe der Ausführungsunterlagen sowie Baufelder und Achsen an den Baubetrieb das Urgelände im Baufeld vermessen und dokumentiert werden. Nach Abstimmung mit der bauausführenden Firma und Freigabe der Technologie durch Straßen NRW als Bauherr erfolgte die Urgeländeaufnahme mit unserem Multikopter.

3.1 Befliegung mit einem UAS als Messverfahren

Mit der Überlegung, als Messverfahren den Multikopter mit Fotokamerasystem einzusetzen, waren die im Folgenden aufgeführten Anforderungen festzulegen.

3.1.1 Anforderungen an das Ergebnis der Befliegung festlegen

- Bildqualität bestimmen
- Erstellung einer 3D-Punktwolke und/oder eines Orthofoto
- Erstellung eines 3D-Modell der Oberfläche
- Genauigkeitsanforderung an das Ergebnis bestimmen

3.1.2 Fluggenehmigungen einholen, Luftaufsicht – Eigentümer

Zur Beurteilung des Luftraumes ist die Umgebung des Befliegungsortes luftfahrtrechtlich zu bewerten und eventuelle Besonderheiten mit der Luftfahrtbehörde abzustimmen. Gleiches gilt für die Interessen der Eigentümer.

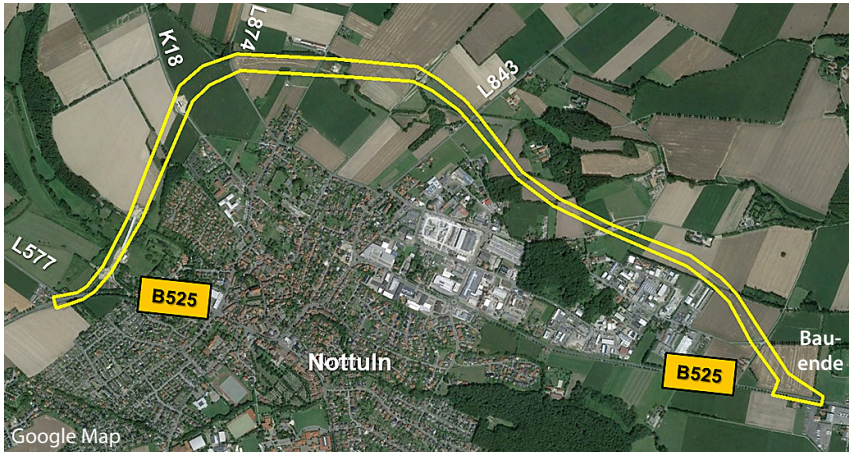


Abb. 1: Bau-Km 0+000 – 4,930

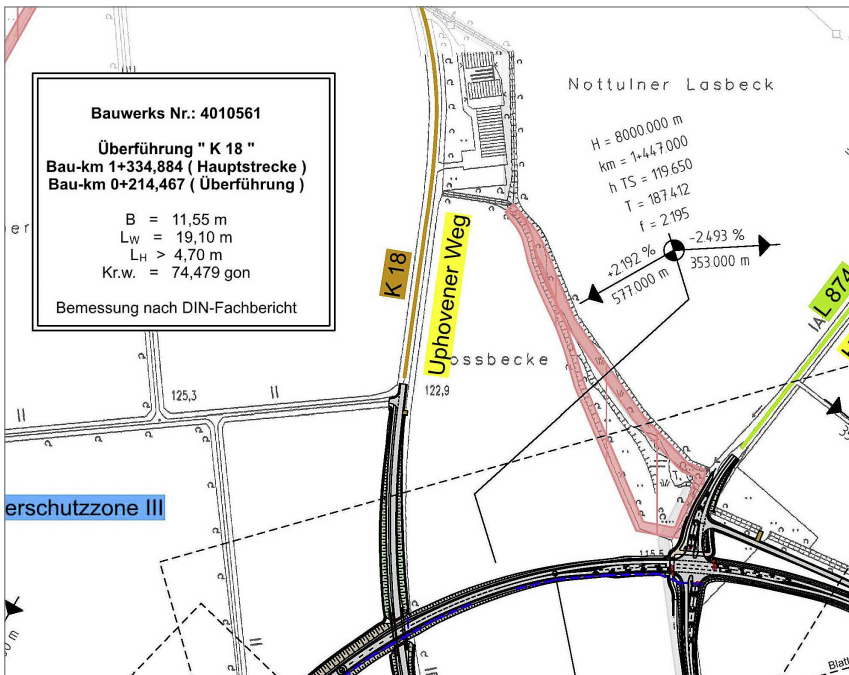


Abb. 2: Bau-Km 0+000 – 4,930 und ca. 3 km kreuzende Straßen, Rad- und Wirtschaftswege

3.1.3 Festlegung der Parameter für die Flugplanung

Auf der Grundlage der Anforderungen an das Ergebnis ist in Abhängigkeit von der Bodenauflösung die einzusetzende Digitalkamera, das Objektiv, die Brennweite und die Flughöhe zu bestimmen.

3.1.4 Flugplanung erstellen

Auf der Grundlage der Festlegungen in Kap. 3.1.3 wird die Flugplanung erstellt. Ergänzend um die Parameter für die Überlappung der Bildfolge in Längs- und Querrichtung wird die Fluggeschwindigkeit und das Intervall der Bildfolge bestimmt.

3.1.5 Festlegung, Signalisierung und Einmessung der Passpunkte

In Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit wird das Vermarkungsmaterial für die Passpunkte ausgewählt:

- befestigte Flächen – Farbkreuz in roter oder gelber Signalfarbe (Abb. 3),
- unbefestigte Flächen – Signaltafel in Schwarz-Weiß, 25 cm × 25 cm (Abb. 4).



Abb. 3: Befestigte Fläche



Abb. 4: Unbefestigte Fläche

3.1.6 Befliegung in Abhängigkeit vom Wetter: Regen – Wind – Licht

Der Tag des Bildfluges ist immer unter Berücksichtigung der Wettereinflüsse Regen, Wind und Lichtverhältnisse auszuwählen.

3.2 Auswertung der Befliegungsdaten von einem UAS

Nach Durchführung der Befliegung entstehen eine Vielzahl von Bilddaten, die verschiedensten Auswerteprozessen zugeführt werden müssen. Die Grundlage für die CAD-Bearbeitung zur Erstellung von digitalen Geländemodellen und Bestandslageplänen bildet die Auswertung der Bilddaten.

3.2.1 Auswertung der Bilddaten

- Bildverband auswerten
- 3D-Punktwolke berechnen
- Orthofoto erstellen

3.2.2 Bearbeitung der Ergebnisse der Befliegung

Nach Auswertung der Bilddaten konnten aus der 3D-Punktwolke und dem Orthofoto die folgenden Ergebnisse erarbeitet werden:

- Ermittlung von Gelände- und Objektpunkten
- Digitales Geländemodell – Urgeländehorizont (Kennziffer 10-REB)
- Digitales Geländemodell – Planumshorizont
- Ausführungsplanung mit Urgeländehorizont
- Steuerungsdaten für Baumaschinen – DGM – Planumshorizont

4 Befliegung mit einem UAS – Auswertung der Bilddaten

Nach Abstimmung der Anforderungen an das zu erzielende Vermessungsergebnis erfolgt die Auswahl des Kopters, das Einholen der entsprechenden Genehmigungen und die Flugplanung.

4.1 Rechtliche Anforderungen an einen Bildflug

- Einholen personenbezogener Genehmigungen bei der Luftfahrtbehörde
 - Allgemeine Aufstiegserlaubnis für Abfluggewichte > 5 kg
 - Einholen von Ausnahmeerlaubnissen bei Erfordernis
 - Kenntnissnachweis (Drohnenführerschein) für jeden Piloten bei Abfluggewicht > 2 kg
- Gesonderte Haftpflichtversicherung für Luftfahrzeuge
- Einsatzorte
 - Zustimmung des Eigentümers für die Startplätze
 - Information an das Ordnungsamt/Polizeileitstelle
 - Anmeldung an Flughäfen/Flugplätzen, Abstand < 1,5 km
 - Kein Flugbetrieb über Menschenansammlungen
- Beachtung des Abfluggewichts von < 10 Kg
- Beachtung der maximalen Flughöhe von 100 m
- Beachtung des Flugbetriebs in Sichtweite des Steuerers (ca. 400 m)


4.2 Befliegung mit dem Aibotix X6

Die Erstellung der Flugplanung musste bei der Befliegung der Ortsumgebung auf die Besonderheiten der langgestreckten Anlage abgestimmt werden. Es wurden zwei parallel verlaufende Flugstreifen angelegt, die am Bauanfang und Bauende sowie den kreuzenden Straßen und Wegen mit einer ausreichenden Überlappung zu versehen waren.

4.2.1 Flugparameter

■ Systemkamera mit Vollformatsensor	Sony a7R
■ Objektiv	35 mm
■ Flughöhe über Grund	75 m
■ Fluggeschwindigkeit über Grund	5 m/s
■ Überlappung der Bildfolge in Flugrichtung	80 %
■ Seitliche Überlappung der Bildfolge	60 %
■ GSD = (Ground Sample Distance) = Pixelgröße	1,6 cm
■ Abstand der Flugstreifen	31 m
■ Auslösegeschwindigkeit der Bildfolge	2,5 sec.

4.2.2 Flugplanung

Die Punkte  in [Abb. 5](#) und [Abb. 6](#) bildeten die Straßenachsen und wurden als Sollpunkte der Flugplanung zugrunde gelegt. Die roten Linien stellten die Flugstreifen dar. In einem seitlichen Abstand von 15,5 m wurden die Flugstreifen zur Hauptachse angeordnet.

4.2.3 Festlegung der Passpunktverteilung

Auch die Verteilung der Passpunkte ([Abb. 7](#) und [Abb. 8](#)) musste auf die Besonderheiten der langgestreckten Anlage abgestimmt werden. In einem Abstand von 150 m bis 200 m entlang der Achse und unter Versatz von ca. 20 m links und rechts der Achse erfolgte die Festlegung der Passpunkte. An kreuzenden Straßen und Wegen wurden die Passpunkte wie in der Hauptachse verteilt und am Ende mit jeweils 2 Passpunkten abgeschlossen. Für das Befliegungsgebiet wurden 86 Passpunkte signalisiert und in Lage und Höhe eingemessen. Die Befliegung erfolgte ohne hochpräzises GNSS/RTK.



Abb. 5: Übersicht der Flugplanung

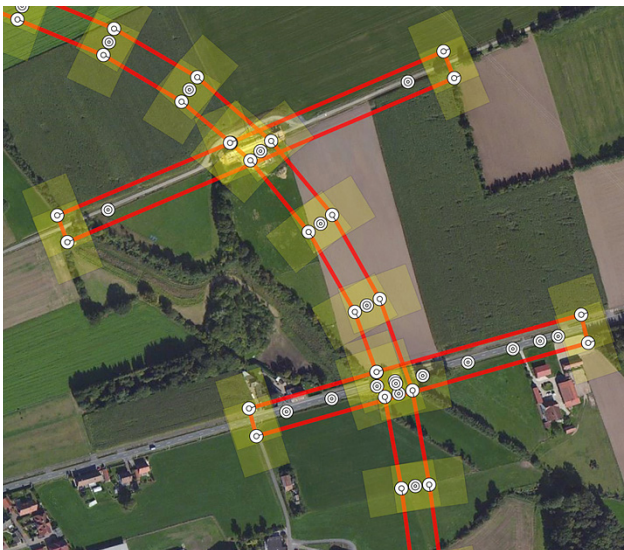
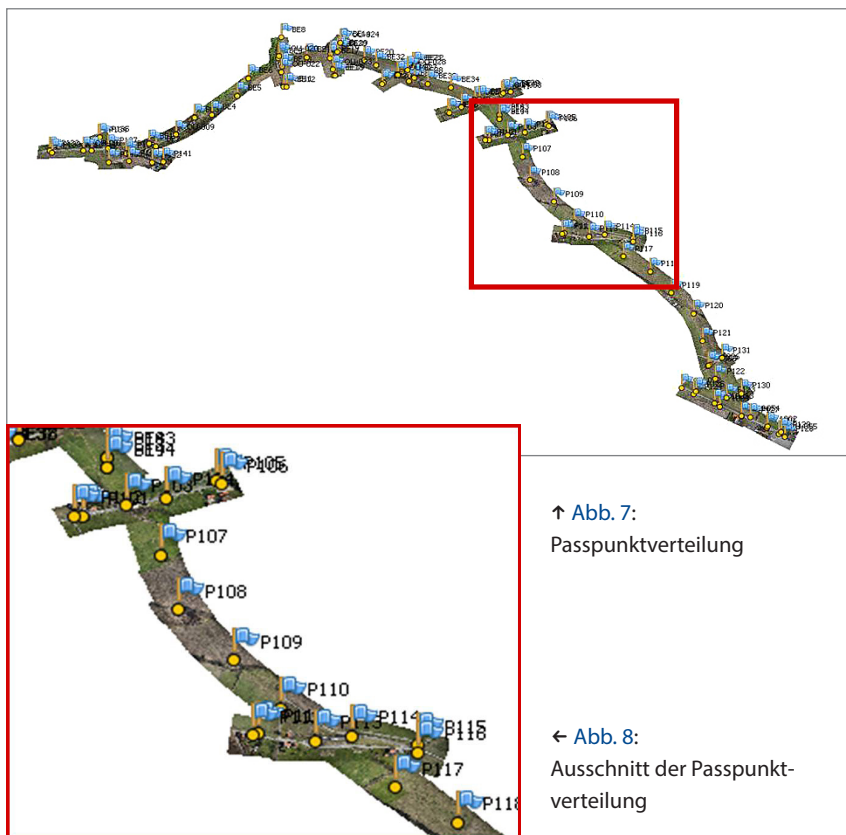


Abb. 6:
Ausschnitt der
Flugplanung



4.2.4 Genauigkeiten der Befliegung und Passpunktbestimmung

Für das Erreichen der geforderten Genauigkeiten von 5 cm für den Erdbau, wurde die Flugplanung auf eine Pixelgröße von 1,6 cm ausgerichtet. Die Bestimmung der Passpunkte erfolgte mit einer Lage- und Höhengenaugkeit von $\pm 2,0$ cm mittels GPS-Messverfahren.

4.2.5 Bildverband

Die Befliegung zur Erstellung des Bildverbandes (Abb. 9) erfolgte für die Langgestreckte Anlage mit 20 Flügen in einer Höhe von 75 m über Grund unter Verwendung einer „Sony a7R“ Fotokamera mit Vollformatsensor.

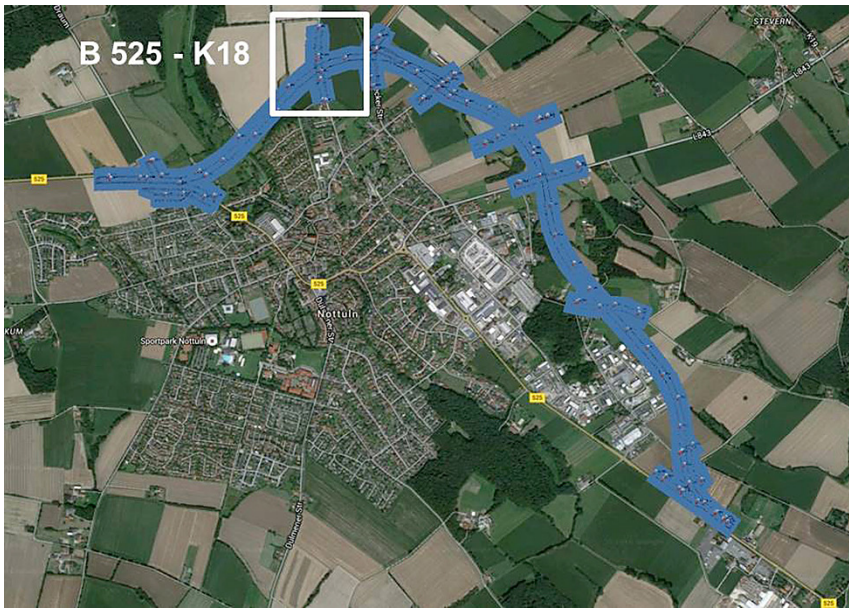


Abb. 9: Bildverband mit 1853 Fotos

4.3 Auswertung der Bilddaten

Nach Abschluss des Bildfluges, der Georeferenzierung der Einzelbilder, der Zuordnung der Passpunkte und der Orientierung und Auswertung der 1843 Bilder mit der Software „PhotoScan“ von Agisoft entstand eine 3D-Punktwolke (Abb. 10).

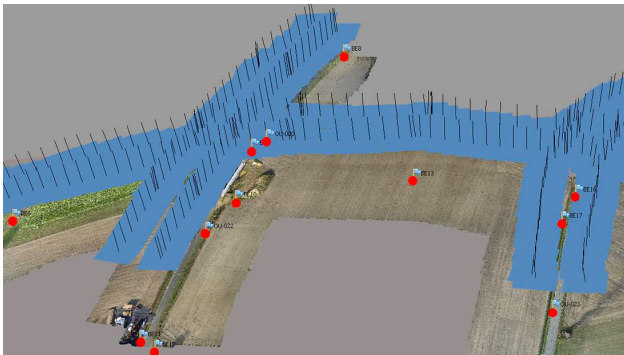
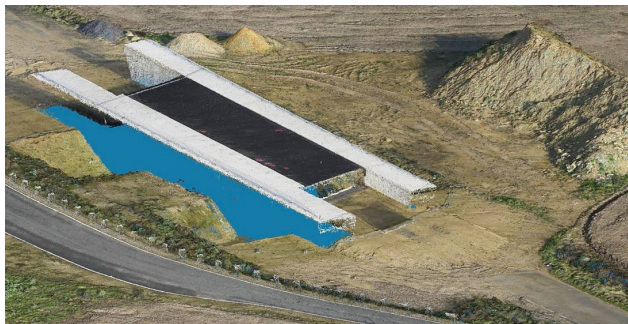


Abb. 10:
Bildorientierung –
Ausschnitt:
Kreuzung Haupt-
strecke – K18



↑ Abb. 11:
3D-Punktwolke
über 5 km mit ca.
1 Mrd. Punkten



← Abb. 12:
3D-Punktwolke –
Kreuzungsbauwerk:
Hauptstrecke – K18

← Abb. 13:
3D-Punktwolke – Ausschnitt:
Kreuzungsbauwerk – K18

4.3.1 3D-Punktwolke

Die 3D-Punktwolke bildete die Grundlage für die weiteren Auswertungen (Abb. 11 bis 13) zur Erstellung eines Orthofotos, eines Bestandsplans nach RAS-Verm, eines Abrechnungsplanes mit Längen- und Flächenpositionen und der Kontrolle der Urgeländeaufnahme des Bauherrn im Auftrag des Baubetriebes.

4.3.2 Orthofoto

Das aus der 3D-Punktwolke berechnete Orthofoto erstreckte sich über eine Länge von 5 km bei einer Bodenauflösung von 1,6 cm und war mit einer Dateigröße von 15 GB nicht mehr zu bearbeiten. Für die Weiterverarbeitung wurde es in 20 Kacheln aufgeteilt (Abb. 14). Zur Erstellung von Übersichtsplänen erfolgte eine Umrechnung in Bodenauflösungen von 5 cm und 10 cm. Bedingt durch die hohe Auflösung der Fotokamera war es auch aus 75 m Flughöhe möglich Details auf dem Brückenbauwerk zu erkennen (Abb. 15).

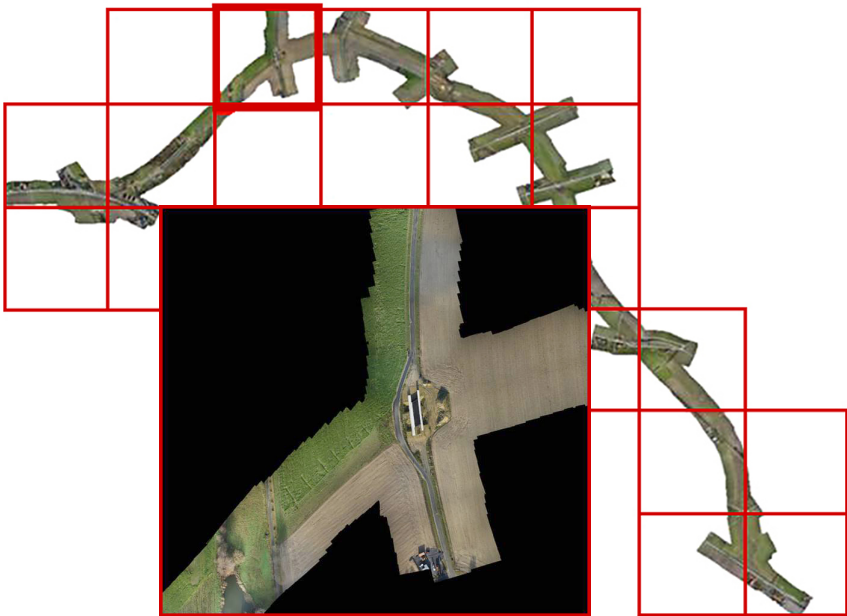


Abb. 14: Orthofoto – Kreuzungsbauwerk: Hauptstrecke – K18



Abb. 15: Orthofoto – Ausschnitt: Kreuzungsbauwerk – K18

5 Bearbeitung der Ergebnisse der Befliegung

5.1 Ermittlung von Gelände – und Objektpunkten

Auf der Grundlage der hochauflösenden und georeferenzierten Orthofotos erfolgte die Digitalisierung der Lage für jeden Gelände- und Objektpunkt (Abb. 16). Aus der 3D-Punktwolke wurde in einem zweiten Bearbeitungsschritt die Höhe für die Lagekoordinate ermittelt.

Nach Abschluss der Digitalisierung aller Gelände- und Objektpunkte und Ausgestaltung der Zeichnungsdatei nach der Abbildungsvorschrift RAS-Verm entstand ein aktueller Bestandslageplan über das Verfahrensgebiet.

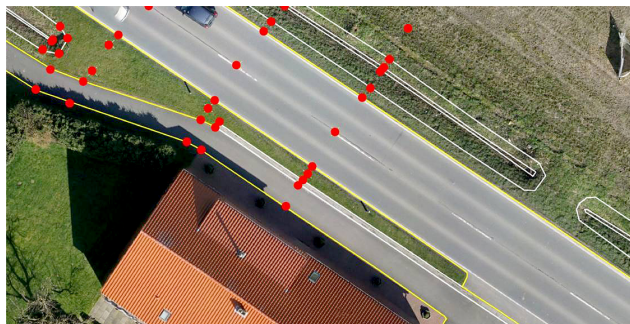


Abb. 16:
Digitalisierung auf
dem Orthofoto und
der 3D-Punktwolke

5.2 Digitales Geländemodell (DGM) – Urgeländehorizont

Aus dem Bestandslageplan wurden die Bruchkanten für die Berechnung des DGM definiert und das digitale Geländemodell für den Urgeländehorizont berechnet (Abb. 17 und Abb. 18).

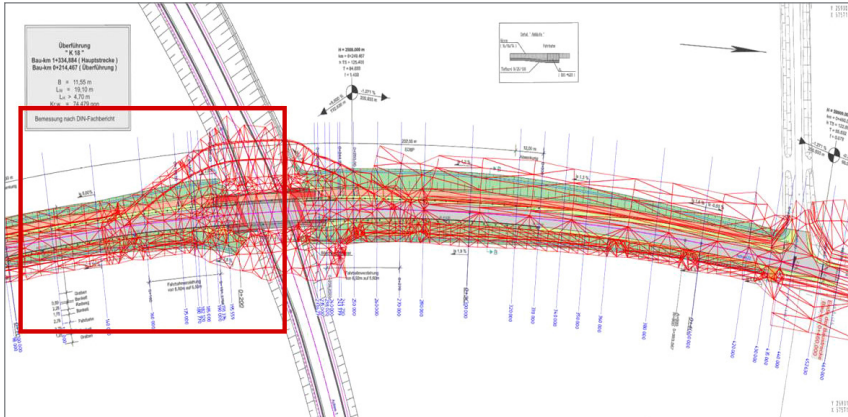


Abb. 17: Berechnung des DGM aus den digitalisierten Geländedaten

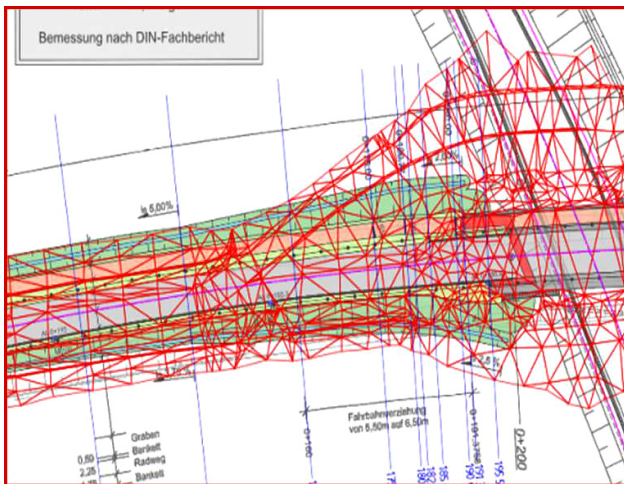


Abb. 18:
Ausschnitt: Berechnung des DGM aus den digitalisierten Geländedaten

5.3 Digitales Geländemodell (DGM) – Planumshorizont

Aus der vom Bauherrn bereitgestellten Ausführungsplanung wurde ein vollständiges digitales Geländemodell für den Planumshorizont berechnet. In dieses Modell wurde auch der aus der Befliegung entstandene Horizont für das Urge-lände eingefügt.

Aus den nun vorliegenden Horizonten wurden die für den Erdbau erforderlichen Steuerungsdaten der Entwässerungsgräben, der Einschnitte, der Rampen und der Streckenabschnitte bereitgestellt (Abb. 19 und Abb. 20).



Abb. 19: Grundlage für die Daten der Baumaschinensteuerung

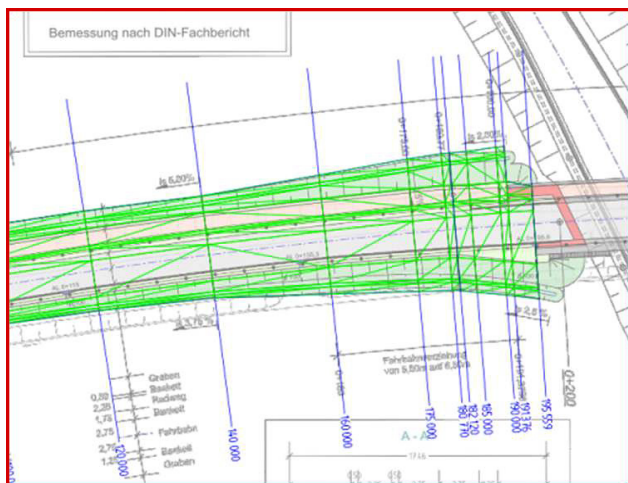


Abb. 20:
Ausschnitt: Grund-lage für die Daten der Baumaschinen-steuerung

5.4 Baumaschinensteuerung – Rampe

5.4.1 Ausführungsplanung mit Urgeländehorizont

In das digitale Geländemodell wurde der Urgeländehorizont aus der Befliegung eingefügt ([Abb. 21](#)).

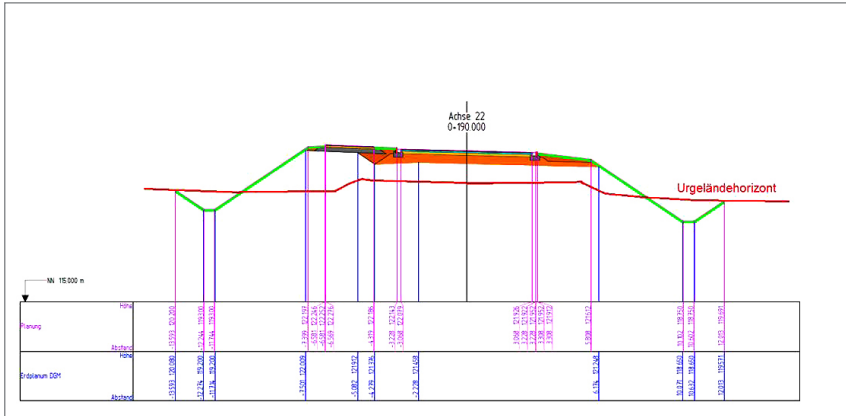


Abb. 21: Kreuzende Nebenstrecke K18 – Rampe zur Brücke

5.5 Baumaschinensteuerung – DGM – Planumshorizont

Auf der Grundlage der 3D-Modelldaten für die verschiedenen Horizonte wurden die Steuerungsdaten für die Baumaschinensteuerung (Abb. 22) berechnet und dem Baubetrieb im geforderten Datenformat bereitgestellt.

5.6 Baumaschinensteuerung – Einschnitt

5.6.1 Ausführungsplanung mit Urgeländehorizont

In das digitale Geländemodell wurde der Urgeländehorizont aus der Befliegung eingefügt (Abb. 23).

5.6.2 Digitales Geländemodell – Maschinensteuerung

Auf der Grundlage der 3D-Modelldaten für die verschiedenen Horizonte wurden auch hier die Steuerungsdaten für die Baumaschinensteuerung (Abb. 24) berechnet und dem Baubetrieb bereitgestellt.

[illegible]

118 DVW-SCHRIFTENREIHE ■ Band 94/2019

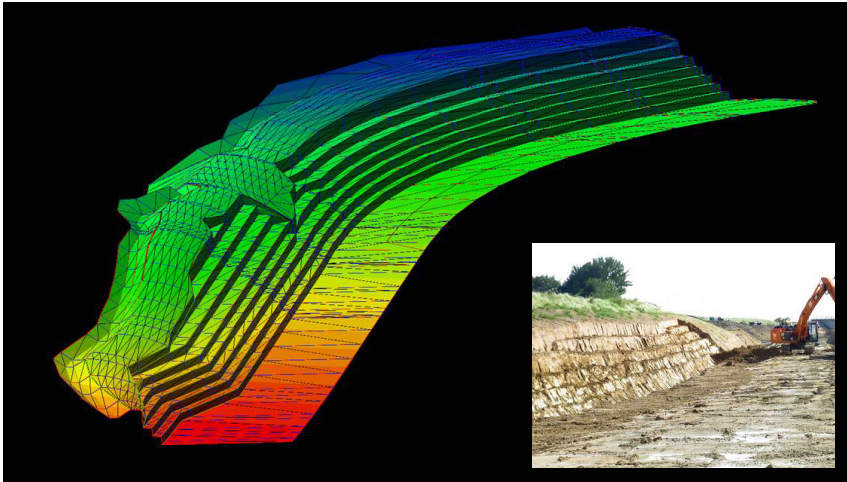


Abb. 24: Hauptstrecke – Einschnitt mit Stufenplanung

6 Kontrolle der Bearbeitungsergebnisse aus dem UAS

6.1 Kontrollvermessungen

Zur Absicherung und Qualifizierung der Ergebnisse aus den Daten der Befliegung wurden verschiedenste Kontrollvermessung durchgeführt.

6.1.1 Passpunkte

Die in der Örtlichkeit signalisierten 86 Passpunkte wurden mit Anbindung an das Festpunktfeld der Baustelle durch eine zweifache GPS-Messung beobachtet und die Differenzen in Lage und Höhe dokumentiert (Abb. 25). Die Lagerung der GPS-Messung zur Passpunktbestimmung wurde durch einen Vergleich mit den durch Straßen NRW übergebenen Festpunkten überprüft. Die Abweichungen in Lage und Höhe werden in Abb. 26 auszugsweise dargestellt.

6.1.2 Bildverband – Bündelblockausgleichung

Die Orientierung und Auswertung des Bildverbandes erfolgte mit der Auswertesoftware Agisoft PhotoScan. Nach der Bündelblockausgleichung ergab sich ein maximaler Punktfehler von unter 2 cm für den Vergleich der Passpunkte aus dem Bildverband und den Ergebnissen der GPS-Messung. In Abb. 27 sind die Punktfehler ab 1,5 cm aufsteigend dargestellt.

Punkt Nr.	Punktklasse	Datum/Uhrzeit	Rechtswert	Hochwert	Ellip. Höhe	Lage + Höh...
✓ OU-022	Gemessen	12/03/2015 09:37:36	2593137.3842	5756822.9126	162.8964	0.0165
✓ OU-007	Gemessen	12/03/2015 12:36:34	2592525.0865	5756321.3054	150.6205	0.0152
✓ OU-015	Gemittelt	12/03/2015 08:35:00	2592919.2190	5756606.7651	156.5876	0.0139
✓ BE5	Gemittelt	12/03/2015 12:54:03	2592916.2113	5756651.7988	158.2296	0.0127
✓ BE8	Gemittelt	12/03/2015 13:07:21	2593126.0204	5757098.7327	167.0623	0.0113
✓ BE27	Gemittelt	12/03/2015 14:17:48	2593808.2444	5756737.7831	150.7924	0.0113
✓ BE19	Gemittelt	12/03/2015 13:49:36	2593420.1908	5756790.6145	157.7367	0.0109
✓ BE18	Gemittelt	12/03/2015 13:47:11	2593413.7008	5756789.8355	157.7509	0.0107
✓ P132	Gemittelt	04/01/2016 10:27:42	2592013.3221	5756293.0436	153.3341	0.0103
✓ P143	Gemittelt	04/01/2016 10:57:35	2592315.1912	5756198.3819	153.5298	0.0101
✓ 901	Gemittelt	12/03/2015 14:15:39	2593787.6630	5756756.9526	151.1513	0.0100
✓ BE17	Gemittelt	12/03/2015 13:42:13	2593390.8501	5756925.5839	159.6847	0.0094
✓ OU-027	Gemittelt	12/03/2015 14:28:56	2593748.7857	5756785.7992	151.9756	0.0094
✓ BE10	Gemittelt	12/03/2015 13:18:33	2593140.5079	5756863.7446	163.9535	0.0092
✓ BE11	Gemittelt	12/03/2015 13:21:34	2593152.8006	5756712.8649	158.9987	0.0091
✓ BE39	Gemittelt	03/01/2016 11:50:01	2594332.4527	5756643.5598	147.1394	0.0087
✓ BE9	Gemittelt	12/03/2015 13:16:10	2593117.2929	5756929.6999	165.4036	0.0086
✓ BE7	Gemittelt	12/03/2015 13:05:27	2593100.9152	5757106.8414	167.4396	0.0084
✓ BE3	Gemittelt	12/03/2015 12:46:35	2592707.1711	5756509.8912	146.4012	0.0084

Abb. 25: Auszug aus der Dokumentation der Lage- und Höhenqualität der GPS-Messung

Punktnummer	Rechtswert (GPS)	Hochwert (GPS)	Höhe (GPS)	Rechtswert (Soll)	Hochwert (Soll)	Höhe (Soll)	Differenz 2D	Differenz 3D
OU-007	2592525,09	5756321,31	106,44	2592525,10	5756321,30	106,43	0,011	0,018
OU-015	2592919,22	5756606,77	112,41	2592919,21	5756606,76	112,40	0,012	0,018
OU-020	2593123,02	5756946,09	121,26	2593123,02	5756946,10	121,24	0,009	0,019
OU-022	2593137,38	5756822,91	118,72	2593137,37	5756822,89	118,71	0,022	0,026
OU-024	2593446,38	5757052,00	116,03	2593446,38	5757051,99	116,00	0,009	0,030
OU-027	2593748,79	5756785,80	107,80	2593748,78	5756785,81	107,79	0,010	0,011
OU-028	2593800,19	5756827,35	106,40	2593800,18	5756827,35	106,38	0,005	0,014

Abb. 26: Auszug aus der Kontrolle der Lagerung der GPS-Messung

Markierungen	Rechtswert (m)	Hochwert (m)	Höhe (m)	Fehler (m)
✓ BE12	2593168.186000	5756709.060000	114.602000	0.015407
✓ BE20	2593574.167000	5756908.583000	111.056000	0.016189
✓ BE27	2593808.244000	5756737.783000	106.616000	0.016249
✓ OU-020	2593123.023000	5756946.096000	121.244000	0.016508
✓ OU-033	2594291.949000	5756628.323000	103.525000	0.016590
✓ P137	2592297.854000	5756299.228000	107.528000	0.016707
✓ BE25	2593673.038000	5756729.797000	109.099000	0.016995
✓ BE24	2593769.870000	5756807.923000	107.344000	0.018722
✓ BE9	2593117.293000	5756929.700000	121.231000	0.019167
✓ BE28	2593834.299000	5756762.712000	105.072000	0.019311
✓ BE36	2594167.940000	5756581.628000	106.422000	0.019632
✓ BE41	2594283.438000	5756618.121000	103.847000	0.019724
✓ BE34	2594023.191000	5756679.826000	105.405000	0.019764
✓ 1006	2595076.273000	5754860.686000	85.334000	0.069574
Gesamtfehler				0.009841

Abb. 27: Auszug aus dem Protokoll der Bündelblockausgleichung

6.1.3 Kontrollvermessungen in der Örtlichkeit

Zur Kontrolle der Auswertung der Bilddaten wurden Gelände- und Objektpunkte in der Örtlichkeit durch tachymetrische Geländeaufnahmen in verschiedensten Teilbereichen aufgemessen und den Ergebnissen der 3D-Punktwolke und dem Bestandslageplan gegenübergestellt. Die Teilbereiche wurden nach ihrer Befestigungsart ausgewählt: befestigte Straßen (Abb. 28), unbefestigte Wirtschaftswege (Abb. 29) und Ackerflächen (Abb. 30).

Durch das Ergebnis der Kontrollvermessungen bestätigte sich, dass die Vermessung aus der Luft mit einem Multikopter und Fotokamerasystem, bei entsprechender Planung und Ausführung, eine hinreichende Genauigkeit in den Ergebnissen für eine Urgeländeaufnahme lieferte.

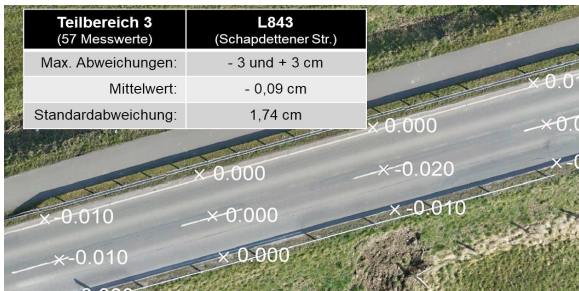


Abb. 28:

Auszug aus der Kontrollvermessung – befestigte Straßen

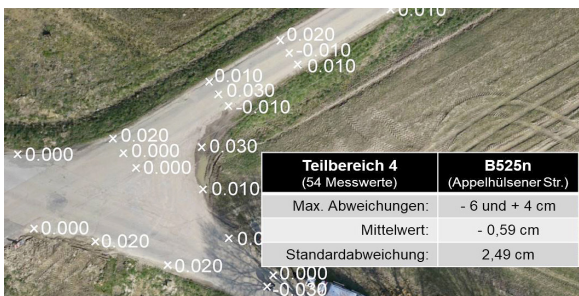


Abb. 29:

Auszug aus der Kontrollvermessung – unbefestigte Wirtschaftswege

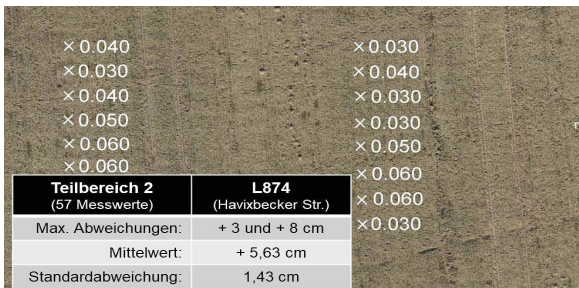


Abb. 30:

Auszug aus der Kontrollvermessung – Ackerflächen

6.1.4 Zusammenfassung der Genauigkeiten

- GSD = (Ground Sample Distance) = Pixelgröße 1,6 cm
- Passpunktgenauigkeit Lage und Höhe $< \pm 2,0$ cm
- Differenzen aus Kontrollvermessungen für definierbare Objektpunkte
 - befestigte Straßen Lage und Höhe $< \pm 2,0$ cm
 - unbefestigte Wirtschaftswege Lage und Höhe $< \pm 2,0$ cm

7 Zusammenfassung

Die in diesem Projekt (Abb. 31) erzielten Ergebnisse bestätigten sich bei uns auch in anderen Projekten, in denen der Multikopter mit Fotokamerasystem für Vermessungen aus der Luft zur Mengenermittlung und Erstellung von Bestandslageplänen für die verschiedensten Stufen der Planung und Bauausführung eingesetzt wurde.

- Orthofoto
- 3D-Punktwolke
- digitales Geländemodell für den Urgeländehorizont
- digitale Bestandslagepläne für die Entwurfs- und Ausführungsplanung



Abb. 31: B 525n – Ortsumgehung Nottuln vor der Verkehrsfreigabe

Kontakt

Dipl.-Ing. Udo Bertels

Ingenieurbüro Bertels GmbH, Fridtjof-Nansen-Weg 7, 48155 Münster

udo.bertels@bertels-info.de

Einsatz von UAV in der Ingenieurvermessung – Praxisanwendungen aus dem Tiefbau

Rayc Beckmann

1 UAV im Ingenieurbüro Beckmann

Das Ingenieurbüro Beckmann besteht seit dem Jahr 2004. Die Inspiration zur Investition in die UAV-Technologie gaben mir zahlreiche Artikel und Flyer von Stephan Fick, der in dieser Seminarreihe ebenfalls einen Vortrag gehalten hat. Der Einstieg in meinem Büro begann im Mai 2016 mit der Teilnahme an der Veranstaltung Flying Surveyors der Fa. CADDy Geomatics GmbH aus München. Da das Investitionsvolumen für extra für den Vermessungseinsatz konzipierte Drohnen damals wie heute nicht unerheblich ist, fing ich zunächst mit der Consumer-Drohne von DJI, der Phantom 4, an. Ihre Kameraauflösung beträgt 12 MP. Später wechselte ich dann schnell zur Phantom 4 Pro mit 20 MP.

1.1 Das UAV – umgangssprachlich auch Drohne genannt

Die Phantom 4 Pro hat umfangreiche Spezifikationen ([Abb. 1](#)), die Kamera verfügt ebenfalls über zahlreiche Eigenschaften auf ([Abb. 2](#)). Die jeweils abgebildeten Angaben stellen nur einen kleinen Teil der Eigenschaften des Fluggerätes

Fluggerät	
Gewicht (mit Akku & Propellern)	1388 g
Diagonale (einschließlich Propeller)	350 mm
Max. Steiggeschwindigkeit	Sportmodus: 6 m/s, GPS-Modus: 5 m/s
Max. Sinkgeschwindigkeit	Sportmodus: 4 m/s, GPS-Modus: 3 m/s
Max. Fluggeschwindigkeit	72 km/h (Modus „S“), 58 km/h (Modus „A“), 50 km/h (Modus „P“)
Max. Neigungswinkel	42 ° (Sportmodus), 35° (Modus „A“), 25° (GPS-Modus)
Max. Winkelgeschwindigkeit	250°/s (Sportmodus), 150°/s (Modus „A“)
Dienstgipfelhöhe über N.N.	6.000 m
Max. Flugzeit	etwa 30 Minuten
Betriebstemperatur	0° bis 40 °C
Satellitenpositionierungssysteme	GPS/GLONASS
Schwebefluggenauigkeit	Vertikal: ±0,1 m (mit VPS); ±0,5 m (mit GPS)
	Horizontal: ±0,3 m (mit VPS); ±1,5 m (mit GPS)

Abb. 1: Spezifikation Phantom 4 Pro (Ausschnitt aus der Betriebsanleitung)

Kamera	
Sensor	1" CMOS, effektive Pixel: 20 M
Objektiv	Sichtfeld (FOV) 84°, 8,8 mm (entspricht 35-mm-Format: 24 mm), f/2.8 bis f/11, Autofokus auf 1 m bis ∞
ISO-Bereich	Videos 100 bis 3200 (Auto), 100 bis 6400 (manuell) Fotos: 100 bis 3200 (Auto), 100 bis 12800 (manuell)
Mechanischer Verschluss	8 – 1/2000 s
Elektronischer Verschluss	8 – 1/8000 s
Bildformat	Seitenverhältnis 3:2: 5472×3648
	Seitenverhältnis 4:3: 4864×3648
	Seitenverhältnis 16:9: 5472×3078
PIV-Bildgröße	4096×2160 (4096×2160 24/25/30/48/50p)
	3840×2160 (3840×2160 24/25/30/48/50/60p)
	2720×1530 (2720×1530 24/25/30/48/50/60p)
	1920×1080 (1920×1080 24/25/30/48/50/60/120p)
	1280×720 (1280×720 24/25/30/48/50/60/120p)

Abb. 2: Spezifikation Phantom 4 Pro (Ausschnitt aus der Betriebsanleitung)

dar. Die Angabe sämtlicher Eigenschaften würde hier zu weit führen. Sie sind im Netz jedermann zugänglich.

Der Umstieg von der P4 auf die P4 Pro hatte begründete sich in der Kamera. Wie schon erwähnt ist die Sensorgröße von 1/2.3" CMOS auf 1" CMOS gestiegen, was eine weitaus höhere Lichtempfindlichkeit ausmacht. Zudem wurde Pixelauflösung auf 20 MP angehoben. Die Kamera der P4 Pro hat im Gegensatz zur P4 einen Zentralverschluss welcher die Rolling-Shutter-Effekte minimiert.

2 Die Umsetzung des Erlernten

Nach der dreitägigen Schulung wurden zunächst verschiedene kleine Projekte befliegen. Da das Hauptbetätigungsfeld meines Büros in der Begleitung von Tiefbaumaßnahmen für Bauunternehmen und Kommunen besteht, erstellte ich zunächst Straßenzustandspläne und Abrechnungspläne für den Ausbau von Oberflächen. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf die Auflösung der



Abb. 3: Straßenbestandsplan mit eingetragenen Kanalbestand

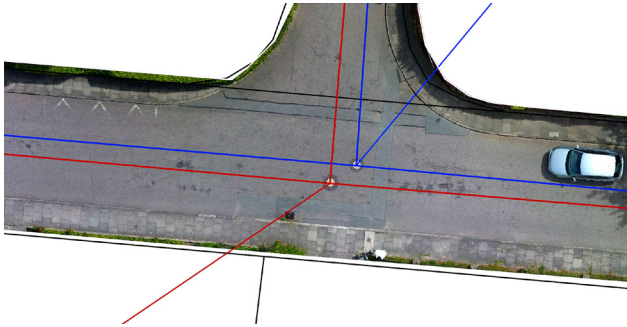


Abb. 4:
Ausschnitt aus
Abb. 3

beflogenen Objekte gelegt. In Abb. 3 ist ein Straßenbestandsplan mit eingetragem Kanalbestand zu sehen, Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt in einer höheren Zoomstufe. Die Straßenschäden sind deutlich zu erkennen.

Eines der nächsten Projekte war die Abrechnung eines Parkplatzes, bei dem entsprechend eines Leistungsverzeichnisses diverse Positionen abgerechnet werden sollten (Abb. 5 und Abb. 6).



Abb. 5: Parkplatz

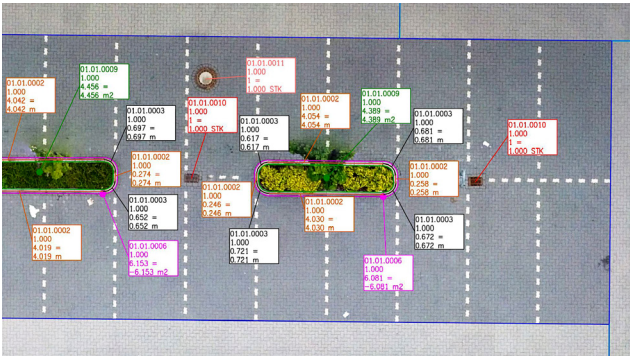


Abb. 6:
Ausschnitt aus
Abb. 5 in höherer
Zoomstufe

3 Flugplanung

Für die Steuerung der P4 Pro verwende ich je nach Aufgabenstellung verschiedene Flugprogramme. Um nur einige zu nennen wären da Pix4Dcapture, Drone-deploy, die Groundstation Pro von DJI und eine neue APP von 3Dsuryey. Das Handling der verschiedenen APPs ist bis auf einige kleine Unterschiede meist

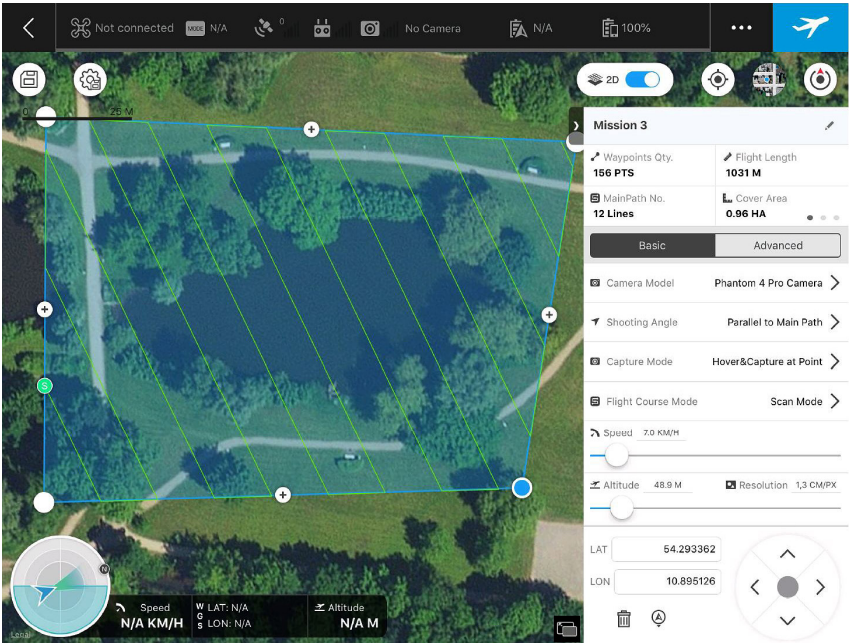


Abb. 7: Screenshot aus der GS Pro von DJI

ähnlich. Bei der Flächenbefliegung wird meist ein Polygon um das gewünschte Gebiet kreiert, die Flughöhe, die Flugrichtung und die Überlappung der Einzelbilder konfiguriert – und schon kann es losgehen. Bei einzelnen Programmen kann noch ein Stop vor jedem Foto einprogrammiert werden, wobei gerade bei

schlechten Lichtverhältnissen mit etwas längeren Verschlusszeiten der Kamera doch wesentlich schärfere Bilder entstehen. Abb. 7 zeigt einen Screenshot aus der GS Pro von DJI.

Seit kurzer Zeit gibt es von der Firma 3DSurvey eine Flug-APP, mit der man auf einfache Weise einen Flugplan erstellen kann, der es ermöglicht, Straßenzüge in mehreren Streifen zu befliegen. Es wird zunächst die Kontur der zu beobachtenden Straße über Stützpunkte generiert, danach kann eingestellt werden, in wie vielen Streifen und mit welcher Überlappung geflogen werden soll (Abb. 8 bis Abb. 10). Der Flug selber geschieht dann annähernd vollautomatisch.

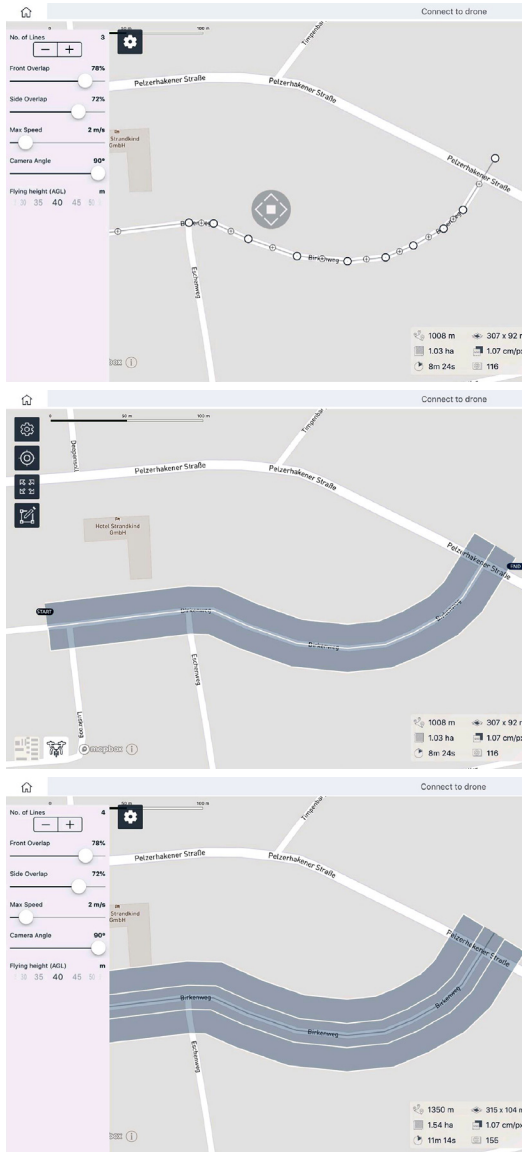


Abb. 8 (oben):
Befliegung von Straßen-
zügen – einstreifig

Abb. 9 (Mitte):
Befliegung von Straßen-
zügen – zweistreifig

Abb. 10 (unten):
Befliegung von Straßen-
zügen – dreistreifig

4 Projekt: Unbegehrter Schlammteiler

Ein Tiefbauunternehmen soll sich im Auftrag eines Privateigentümers eines verschlammten, etwa 4,6 ha großen Teiches annehmen. Über die bewegten Schlammteiler sollte eine möglichst prüfbar Massenermittlung (Förderung durch eine öffentliche Stelle) erstellt werden. Der Schlamm wurde mit Baggern auf großen Stahlplatten in sogenannte Dumper geladen. Diese beförderten dann den Schlamm auf einen für diese Zwecke bereitgestellten Ackerschlag und verteilten ihn dann 0,7 bis 1,7 m hoch auf dem Acker.

Der Schlamm war durch seine wasserhaltige Konsistenz nicht begehr. Ein terrestrisches Aufmaß kam also nicht in Frage. Laserscanning kam auf Grund der flachen Sichten nicht auch nicht in Frage. Der Auftraggeber entschied sich dann auf die Befliegung mit der Drohne. Im Vorfeld der Maßnahme wurden die bereitgestellten Ackerflächen mit einem terrestrischen Ureländeaufmaß erfasst. Das Ureländeaufmaß erfolgte terrestrisch, da die Oberfläche zur Zeit der Messung noch mit unregelmäßigem Bewuchs überzogen war, und die daraus entstehenden Ungenauigkeiten aus einer Befliegung zu unsicher erschienen.

Um einer Prüfbarkeit entgegenzukommen wurden in den Plan zur Massenermittlung Auftragshöhen eingetragen. Zur Überprüfung ist der AG im Nachhinein mit großen Schneeschuhen über den Polder gegangen und hat mit einer Sonde sporadisch die Tiefen gemessen. Laut Aussage des AG war das Ergebnis für ihn und den öffentlichen Förderer mehr als überzeugend.

Nach Abschluss der Maßnahme wurde noch einmal der gesamte See beflogen, um über die Fläche und die ermittelten Massen die durchschnittliche Aushubtiefe zu ermitteln. Das Ergebnis bestätigte als Plausibilitätskontrolle noch einmal die ermittelten Massen. Die Abb. 11 bis 14 vermitteln Eindrücke des Projekts.

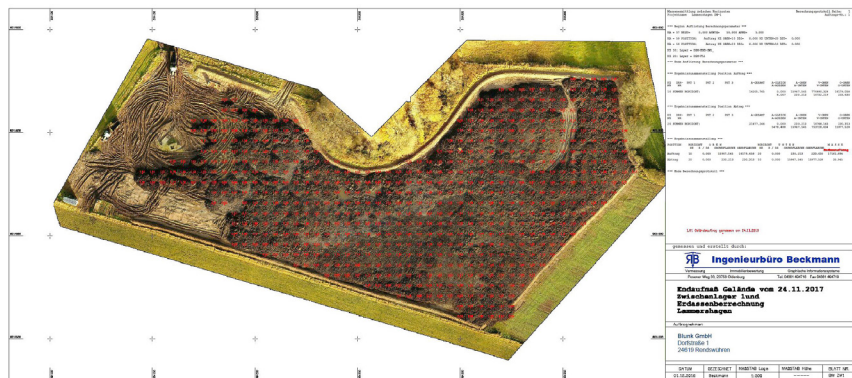


Abb. 11: Planausschnitt

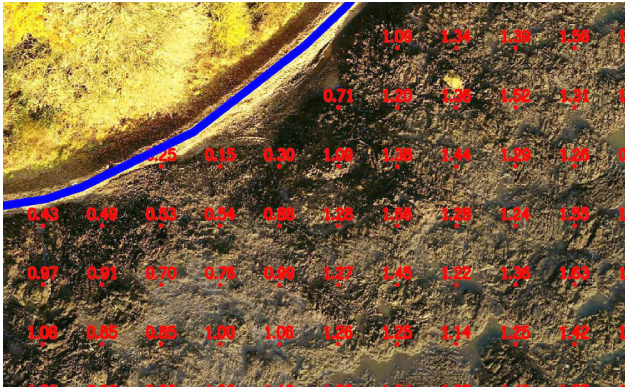


Abb. 12:
Unbegehrbarer
Polder



Abb. 13:
Unbegehrbarer
Polder



Abb. 14:
Unbegehrbarer
Polder

5 Projekt: Leitungsdokumentation und Massenermittlung eines Campingplatzes

Die Infrastruktur eines ca. 6,5 ha großen Campingplatzes soll saniert werden (Abb. 15 bis 19). Hierfür werden etwa 5 km Gräben ausgehoben, insgesamt ca. 18,4 km der verschiedenen Leitungsmedien von Schmutzwasser, Trinkwasser, Stromkabeln und Lichtwellenleiter verlegt. Eine entsprechende Leitungsdokumentation soll erstellt werden. Der Zeitraum für die Sanierung belief sich von Oktober 2017 bis März 2018. Im Anschluss wurde der Campingplatz zum 1.4.2018 wieder geöffnet. Es sah aus, als wäre nichts geschehen. Sämtliche Wege wurden neu mit Recyclingschotter auf einer Fläche von ca. 1 ha wiederhergestellt. Die Rasenflächen, die während der Bauphase eher einem Kriegsschauplatz in den frühen Jahren des letzten Jahrhunderts ähnelten, wurden mit ca. 2 ha Rollrasen in einen ansehnlichen Zustand versetzt.

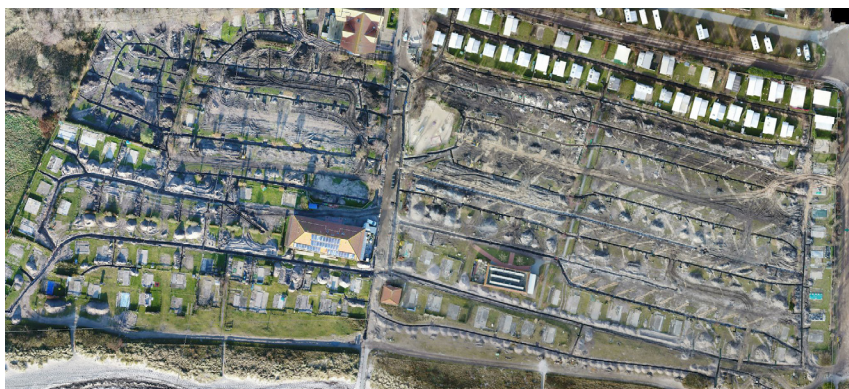


Abb. 15: Campingplatz mit Leitungsgräben: Übersicht über den gesamten Platz

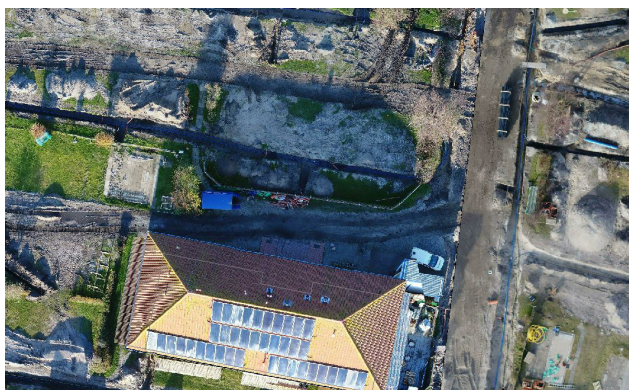


Abb. 16:
Ausschnitt aus
Abb. 15



Abb. 17: Zusammenstellung aller Leitungen auf dem Campingplatz



Abb. 18: Darstellung der generierten Oberflächen zur Abrechnung

Für die Leitungsdokumentation wurden im Büro in Zusammenarbeit mit dem Bauunternehmen die diversen Leitungen in die aus dem Luftbild generierten Leitungsgräben projiziert. So entstand für jedes Leitungsmedium ein eigener Plan. Entsprechen den Anforderungen des Baubetriebes wurden Abrechnungspläne über die entsprechenden Elemente gefertigt.

Bei der Befliegung des Campingplatzes im Endzustand wurden 1086 Bilder aus einer Flughöhe von ca. 50 m verwendet.



Abb. 19: Campingplatz nach der Fertigstellung

6 Fazit

In der mittlerweile 2½-jährigen Arbeit mit der Drohne kann ich aus meiner Sicht sagen, dass sich die Investition in das Fluggerät und vor allem die vielen, vielen Stunden, in denen ich mich mit der Auswertetechnik, dem Austesten der verschiedenen Einstellungen für die Kamera und der Konfiguration von Passpunkten beschäftigt habe, gelohnt haben. Die Luftbildvermessung mit einem UAV ist zwar keineswegs eine Wunderwaffe und immer einsetzbar, aber sie erhöht doch das eine oder andere Mal erheblich die Produktivität. Immer getreu dem Motto: Welches Werkzeug benutze ich für welche Aufgabe.

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Rayc Beckmann
Ingenieurbüro Beckmann
Posener Weg 33, 23758 Oldenburg in Holstein
mail@r-beckmann.de

Session 4:

Technische Neuentwicklungen und wissenschaftliche Anwendungen

MIDRAS – Mikro-Drohnen Abwehr System

Anass Dinia | Steffen Doerner | Viktoriia Federova | Arno Fischer |
Claudius Marx | Martin Schafföner

1 Motivation

„Drohnen stehen heute da, wo sich Autos 1898 befanden – ganz am Anfang. Die unbemannten Flugobjekte entwickeln sich mit einer bisher in der Technik noch nie da gewesenen Geschwindigkeit. Keine Zeit für Evolution, disruptive Vorgänge sind in der ganzen Welt zu beobachten. Die Zahl der Drohnen alleine in Europa wird im Jahr 2025 mehr als 7 Millionen betragen: 7 Millionen im Freizeitsektor, 200.000 bei Behörden und in der Wirtschaft sowie 1000 beim Militär. Das jedenfalls prognostiziert Alain Siebert, der Chef-Ökonom von SESAR, einer von der Europäischen Union und Eurocontrol ins Leben gerufenen Initiative zur Vereinheitlichung und Harmonisierung des europäischen Flugverkehrsmanagements.“ (FAI 2017)

Beispielsweise gründete Frank Wang 2006 die Firma DJI in China und wurde damit der jüngste Milliardär Chinas (Tech Wire Asia 2017). Sein Hauptgeschäft bestand und besteht in der Entwicklung und Vermarktung von preiswerten Mikrodrohnen. Die Disruption verlagert sich dadurch in die Einsatzfelder von Drohnen.

Wie stark die Disruption bereits in das Einsatzfeld der Geodäsie einwirkt, zeigt die Firma 3D Robotics aus den USA. Aus einem im Jahr 2007 gegründeten und zeitweise führenden Unternehmen für kleine intelligente Drohnen wurde ein Unternehmen, welches als Geschäftsfeld nur noch AEC-Unternehmen (AEC = Architectural/Engineering/Construction) berät (Anderson 2018), d. h. die Drohne ist einfaches Arbeitsgerät – die hocheffiziente geodätische Vermessung mittels Drohne wird zum neuen Geschäftsmodell.

In viele Branchen und auch in viele Bereiche des öffentlichen Lebens wird die Drohne Einzug halten. Allerdings wachsen mit ihrem Erfolg auch die Gefahren, die von Drohnen ausgehen können. Handelt es sich bei den Drohnen um „kooperative“ Drohnen, d. h. werden sie im Rahmen der gesetzlichen Bestimmungen eingesetzt, so können künftige Konzepte wie UTM (Kies 2018) und U-Space die erwartete Drohnenflut kanalisieren und die Sicherheit erhöhen.

U-Space besteht dabei aus einer Reihe neuer Dienste, die auf einem hohen Maß an Digitalisierung und Automatisierung von Funktionen und speziellen Verfahren beruhen, um einen sicheren und effizienten Zugang zum Luftraum für eine große Anzahl von Drohnen zu ermöglichen (Single European Sky ATM

Research 2018). Beispielsweise erproben die Deutsche Flugsicherung, die Deutsche Telekom und die DLRG bereits gemeinsam die Steuerung und Überwachung von Drohnen aus der Ferne (Deutsche Flugsicherung 2017) und erarbeiten damit erste Lösungsansätze.

Was passiert aber, wenn es sich um „nicht kooperative“ Drohnen handelt? Ein aktuelles Beispiel dafür scheinen die Vorfälle um den Flugplatz Gatwick in England zu sein (Spiegel 2018). Mehr als 100.000 Flugreisende strandeten für mehr als 30 Stunden wegen Drohnenalarms auf dem Flughafen. Es wird vermutet, dass „nicht kooperative“ Drohnen die Sicherheit des Flughafenbetriebes gefährdeten.

2 Projektrahmen und -konsortium

Hier setzt das Projekt MIDRAS an: wenn es gelingt, auch „nicht kooperative“ Drohnen rechtzeitig zu erkennen und mit geeigneten Mitteln sicher aus den Luftraum zu entfernen, wird die Betriebssicherheit für alle Drohnenanwendungen nachhaltig erhöht und auch dem allgemeinen Sicherheitsbedürfnis der zivilen Gesellschaft Rechnung getragen.

Das Projekt MIDRAS wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmenprogramm der Bundesregierung „Forschung für die zivile Sicherheit“ umfassenden Sicherheitslösungen (BMBF Sicherheitsforschung 2015) gefördert. Im Zeitraum 5/2017 bis 4/2020 soll im Rahmen dieses Projektes ein Demonstrator für die Detektion und die Abwehr „nicht kooperativer“ Drohnen entwickelt werden (BMBF 2017).

Der Koordinator des Projektkonsortiums ist die Firma ESG (ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH 2018). Diese besitzt bereits ein Drohnenabwehrsystem, welches sich im Einsatz während des G7-Gipfels 2015 in Elmau, während des Besuchs von US-Präsident Barack Obama auf der Hannover Messe 2016 und zuletzt während des G20-Gipfels in Hamburg im Juli 2017 bewährt hatte (ESG Defense and Public Security 2018). Die ESG wird im Projekt ein geeignetes Führungsleitsystem für die Einsatzkräfte vor Ort bereitstellen und die Arbeitsergebnisse der Projektpartner integrieren.

Das Fraunhofer HHI entwickelt massiv-MIMO-Antennen. Diese werden im Projektrahmen für die räumliche Detektion von Mikro-Drohnen wie auch für die gezielte Störung eingesetzt (Fraunhofer Heinrich Herz Institut 2018).

Die Firma OptoPrecision entwickelt für das Projekt ein elektrooptisches System. Mit diesem und weiteren Sensoren sollen automatisierte Flugobjekte detektiert, identifiziert und klassifiziert werden (OptoPrecision Security Systems GmbH 2017).

Die Technische Hochschule Brandenburg entwickelt eine akustische Kamera (passives SONAR) und einen Sensor für eine aktive akustische Überwachung des Luftraums. Neben der IT-Integration der verfügbaren Sensorik durch moderne Methoden der Sensorfusion soll die Trajektorie der „nicht kooperativen“ Drohne ermittelt werden. Auch werden künftige Nutzer des Gesamtsystems für erste Tests des Demonstrators geschult.

Die Universität Würzburg entwickelt zwei autonome Drohnen mit einem Drohnenfangnetz. An einem berechneten Abfangpunkt fängt das MIDRAS-System die feindliche Drohne ein und bringt sie aus dem geschützten Bereich heraus. Der Vorteil zu anderen Abwehrmaßnahmen besteht darin, dass die Drohne oder ihre Teile nicht abstürzen und daher keinen Schaden im zu schützenden Bereich verursachen (Montenegro 2018a).

Das European Aviation Security Center e. V. (EASC e. V. 2018) entwickelt die Testszenarien und untersucht juristische Aspekte im Rahmen seiner Begleitforschung.

Zur Sicherstellung der praxisorientierten Forschung und Entwicklung sollen die folgenden assoziierten Partner das Projekt aktiv begleiten:

- Ministerium für Justiz und Gleichstellung des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg
- Bundeskriminalamt, Wiesbaden
- Vereinigung Cockpit e. V, Frankfurt

Die drei assoziierten Partner können zielgruppenspezifische Anforderungen an den Demonstrator einbringen und sind daher für den Gesamterfolg des Projektes von großer Bedeutung.

3 Beiträge der Technischen Hochschule Brandenburg

Im Folgenden berichtet die Technische Hochschule über den derzeitigen Stand ihres Teilprojekts. Es ist geplant, die erzielten Endergebnisse nach Abschluss des Projekts einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Wegen der Aktualität des Themas berichtet die Hochschule bereits zum jetzigen Zeitpunkt, allerdings schwerpunktmäßig, nur über ihre eigene Projektplanung.

3.1 Nutzerqualifikation

Für die Nutzerqualifikation soll als Flugfeldinfrastruktur unter anderem der Sonderlandeplatz Brandenburg/Mühlenfeld genutzt werden. Dort können sowohl Testflüge zur Verifikation von Teillösungen der Detektion und Abwehr

Lernsystem für Fachkräftetraining (Screenshot Lernplattform)



Abb. 1: Screenshot Lernplattform (Basis ILIAS)

von „nicht kooperativen“ Drohnen getestet werden, als auch ein Lern- und Trainingsmodul genutzt werden, welches teilweise in Form von E-Learning-Inhalten flexibel auch Online (und damit vor Ort) verfügbar ist (Abb. 1).

Im Rahmen der Gesamtsystemintegration und -tests werden repräsentative Nutzer qualifiziert und in die Tests eingebunden, um die Tauglichkeit des Demonstrators nachweisen zu können.

Ziel ist es, in diesem Teilvorhaben die Nutzung des Demonstrators durch die assoziierten Partner zu ermöglichen, indem geeignete Qualifizierungs- und Trainingsmöglichkeiten geschaffen und durchgeführt werden. Parallel zur Qualifikation wird das Nutzerverhalten erforscht. Die Ergebnisse fließen in eine Handlungsempfehlung zur Optimierung des Bediensystems des Demonstrators ein.

3.2 Akustische Kamera

Das Gesamtsystem soll eine automatische Detektion von Drohnen ermöglichen. Daher sollen Drohnen von anderen Flugobjekten, wie zum Beispiel Vögeln, unterschieden werden können. Dafür gibt es verschiedene Ansätze. Neben der Detektion von elektromagnetischen Signalen des Flugobjektes, oder der optischen Erkennung, kann auch die akustische Emission von Drohnen als Erkennungsmerkmal dienen. Die akustische Erkennung kann in aktive als auch in passive Detektion unterteilt werden.

Bei der passiven Detektion werden mit einem Array hochsensibler Mikrofone, auch akustische Kameras genannt, spezielle Frequenzen und akustische Muster herausgefiltert und verarbeitet. Danach werden die Messaufnahmen mit einer Datenbank verglichen, die bereits bekannte akustische Merkmale von verschiedenen Drohnentypen enthält. Ähneln die Messaufnahmen den Werten aus der Datenbank, so wird das Objekt als Drohne identifiziert. Darüber hinaus kann über dieses Verfahren auch die Richtung, aus der das Flugobjekt kommt, bestimmt werden.

Der Vorteil der passiven Messung ist, dass sie sehr wenig Leistung benötigt und selbst nicht detektierbar ist, da keine Energie in den Raum abgestrahlt, sondern nur empfangen wird. Dies macht auch den Einsatz in Gebieten möglich, in denen Schallemission für manche Frequenzen verboten ist, wie zum Beispiel in Fledermausschutzgebieten.

Der Nachteil an passiver Detektion ist jedoch, dass nur Objekte klassifiziert werden können, die in der Datenbank bereits enthalten sind. Das setzt eine sehr breite akustische Analyse voraus, nach der die Datenbank aufgestellt ist.

Die aktive akustische Detektion hingegen arbeitet wie ein SONAR. Es werden innerhalb eines speziellen Frequenzbereichs Patterns von akustischen Signalen in den Raum gesendet und mittels einer akustischen Kamera auf eine Reflektion dieser Patterns gewartet. Durch Analyse der Zeitdauer zwischen Sendesignalimpuls und Signalantwort kann die Entfernung des Objektes berechnet und damit gemessen werden. Es kann ebenfalls bestimmt werden, ob sich das Objekt nähert oder hinfort bewegt. Die Messungen erfolgen mehrmals innerhalb kurzer Zeit, wodurch das Verhalten des Flugobjektes sehr klar beschrieben werden kann.



Schallemission und passives / aktives SON(AR)

Schallemission und passives SON(AR):

- Spektrale Erfassung der Schallwellenfront
- Schallsignatur der observierten Objekte
- Bestimmung der Objektpeilung
- Bestimmung der Entfernung bei verteilten Sensorknoten

Aktives SONAR

- Beamforming der Schallkeule
- Hohe Energiedichte im US-Band
- Bestimmung von Richtung und Entfernung des Eindringlings

Transducerarrays:

- Phasenverschobene Ansteuerung (Phased-Array)
- Dynamische Fokussierung für Sende- und Empfangssignale

Abb. 2: Einige Aspekte des aktiven und passiven SONARs

Anders als bei der passiven Messung wird hierbei keine Datenbank für spezielle akustische Emissionen benötigt, außerdem kann das Verhalten des Flugkörpers viel genauer erfasst werden. Allerdings benötigt die aktive Detektion wesentlich mehr Leistung und sendet aktiv, was den Einsatz nicht in allen Gebieten möglich macht. Da die Sendeimpulse relativ stark durch die Luft gedämpft werden, ist die Reichweite der aktiven Messung auch geringer als die der passiven.

Für die Detektionen von Drohnen ist es nützlich, die aktive und passive Messung hintereinander als gestuftes Verfahren zu nutzen. Das bedeutet, dass erst passiv auf ein verdächtiges Signal gewartet wird. Sobald dies der Fall ist, wird die genaue Position mit der aktiven Messung verfolgt und somit Näheres bestimmt. Die Erfassung von Drohnen ist somit gewährleistet. Die Abb. 2 zeigt einige Aspekte.

3.3 Sensorfusion

Wesentlicher Bestandteil des Demonstrators ist die Sensorfusion und Weiterverarbeitung durch Analyse- und Klassifikationsverfahren. Um flexibel alle beteiligten Komponenten des Systems in effizienter Weise zu verbinden, wird mit einer Middleware und dem Kommunikationsprotokoll MQTT kommuniziert. Aktuell wird das erreichbare Zeitverhalten überprüft. Eine Anbindung an das Führungsleitsystem des Partners ESG ist geplant.

Eine Aspekte der MIDRAS-Fusions-Architektur zeigt Abb. 3.



MIDRAS-Fusions-Architektur

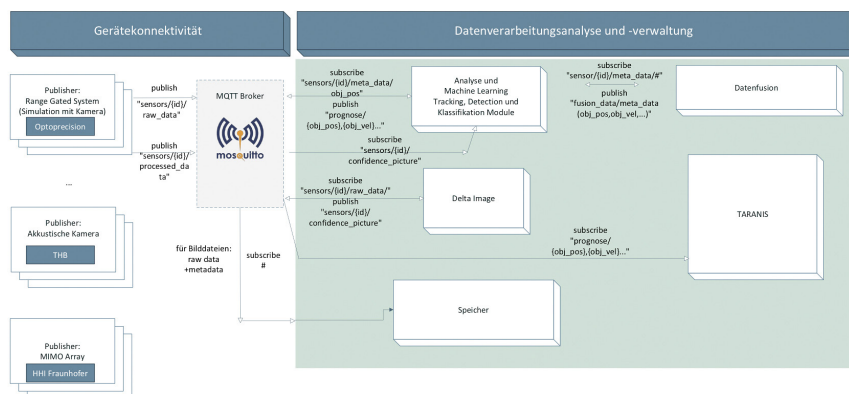


Abb. 3: Aspekte der MIDRAS-Fusionsarchitektur

4 Fazit

Dieser Aufsatz beschreibt die Notwendigkeit „nicht kooperative“ Drohnen zu detektieren und abzuwehren, damit Personen und kritische Infrastrukturen vor Gefahren, die von diesen Drohnen ausgehen, wirksam geschützt werden können.

Das Projekt MIDRAS, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird, versucht die Machbarkeit mittels eines geeigneten Demonstrators nachzuweisen. Kritische Infrastrukturen, wie Flughäfen oder Justizvollzugsanstalten, sollen geschützt werden, ohne dass allzu hohe Qualifikationsanforderungen an das Bedienpersonal gestellt werden.

Die Technische Hochschule Brandenburg entwickelt Teilkomponenten für das Projekt: die Lehrunterlagen, einen akustischen Sensor und die IT unter Nutzung einer geeigneten Middleware sowie Algorithmen zur Sensorfusion und Objektklassifikation.

Literatur

- Anderson, C. (2018): 3DR History. <https://3dr.com/company/about-3dr/>, letzter Zugriff 12/2018.
- BMBF (2017): Projektumriß MIDRAS. (20.04.2017). www.sifo.de/files/Projektumriss_MIDRAS_C3.pdf, letzter Zugriff 12/2018.
- BMBF Sicherheitsforschung (2015): Schutz vor Kriminalität und Terrorismus. (05.10.2015). www.sifo.de/de/bewilligte-projekte-aus-der-bekanntmachung-aspekte-und-massnahmen-der-1767.html, letzter Zugriff 30.12.2018.
- Deutsche Flugsicherung (2017): Deutsche Flugsicherung, Deutsche Telekom und DLRG erproben erstmals gemeinsam die Steuerung und Überwachung von Drohnen aus der Ferne. (17.10.2017). www.dfs.de/dfs_homepage/de/Presse/Pressemitteilungen/2017/09.10.2017.-%20Drohnen%20als%20Lebensretter, letzter Zugriff 12/2018.
- EASC e. V. (2018): Auftrag. www.easc-ev.org/?q=de/auftrag, letzter Zugriff 12/2018.
- ESG Defense and Public Security (2018): <https://esg-defencesecurity.com/de/aviation-solutions/drohnenabwehr>, letzter Zugriff 12/2018.
- ESG Elektroniksystem-und Logistik-GmbH (2018): Gesamtsystem. <https://drohnenabwehr.de/gesamtsystem/>, letzter Zugriff 12/2018.
- FAI (2017): 1. FAI Drone Conference Lausanne: Unbemannte Flugobjekte revolutionieren die Luftfahrt. (03.09.2017). www.fai.org/sites/default/files/documents/press_release_unbemannte_flugobjekte_revolutionieren_die_luftfahrt_4sept2017.pdf, letzter Zugriff 12/2018.
- Fraunhofer Heinrich Herz Institut (2018): Drahtlose Kommunikation und Netze – MIDRAS. www.hhi.fraunhofer.de/abteilungen/wn/projekte/midras.html, letzter Zugriff 12/2018.

- Kies, A. (2018): Deutsche Flugsicherung. (27.03.2018). www.din.de/blob/271404/614d85c30315ace9e21629e52731d7cf/workshop-iii-uas-traffic-management-data.pdf, letzter Zugriff 12/2018.
- Montenegro, S. (2018a): Einblick – Online-Magazin der Universität Würzburg. On-line-Magazin 06.02.2018. www.uni-wuerzburg.de/aktuelles/einblick/single/news/abfangjaeger-aus-dem-3d-drucker, letzter Zugriff 12/2018.
- Montenegro, S. (2018b): Midras – Lehrstuhl für Informatik VIII. (30.12.2018) <http://www8.informatik.uni-wuerzburg.de/wissenschaftsforschung/midras/>, letzter Zugriff 12/2018.
- OptoPrecision Security Systems GmbH (2017): www.optoprecision.de/security-systems/aktuelles/nachrichtenansicht/optoprecision-beginnt-mit-forschungsvorhaben-midras-zur-zivilen-sicherheit/186d4750d1d102ee9bbb5acd909ab6fe, letzter Zugriff 12/2018.
- Single European Sky ATM Research (2018): U-Space. www.sesarju.eu/U-space, letzter Zugriff 12/2018.
- Spiegel (2018): (21.12.2018). www.spiegel.de/wissenschaft/technik/flughafen-london-gatwick-warum-drohnen-fuer-flugzeuge-gefaehrlich-sind-a-1245082.html, letzter Zugriff 12/2018.
- Tech Wire Asia (2017): Drone maker Frank Wang becomes Asia's youngest tech billionaire. (25.08.2017). <https://techwireasia.com/2017/08/drone-maker-frank-wang-asias-youngest-tech-billionaire/>, letzter Zugriff 12/2018.

Kontakt

Anass Dinia | Steffen Doerner (Projektleiter) | Viktoriia Federova |
Arno Fischer (Sprecher) | Claudius Marx | Martin Schafföner
Technische Hochschule Brandenburg
Magdeburger Straße 50, 14770 Brandenburg an der Havel
anass.dinia@th-brandenburg.de | steffen.doerner@th-brandenburg.de |
viktoriia.federova@th-brandenburg.de | arno.fischer@th-brandenburg.de |
claudius.marx@th-brandenburg.de | martin.schaffoener@th-brandenburg.de

Multispektrale Fernerkundung mit Drohnen

Görres Grenzdörffer

1 Einleitung

Multispektrale Fernerkundung war bis vor wenigen Jahren nur Erdbeobachtungssatelliten und Flugzeugen speziellen Multi- oder Hyperspektralkameras vorbehalten. Das hat sich mit der Entwicklung von Drohnen, als neue Trägerplattform und der Entwicklung miniaturisierter multispektraler Kameras nachhaltig geändert. Tatsächlich bieten sowohl multi- als auch hyperspektrale Bilder in vielen Bereichen neue Möglichkeiten und Märkte, auf die im nachfolgenden exemplarisch eingegangen wird.

Die Unterscheidung zwischen multi- und hyperspektralen Sensoren wird in der Regel sowohl über die Anzahl der spektralen Kanäle bzw. Bänder vorgenommen. Bis 16 Kanäle spricht man von Multispektralsensoren und Geräte, die das Spektrum noch feiner abtasten als Hyperspektralsensoren. Während hyperspektrale Sensoren in der Lage sind die genaue spektrale Signatur eines Objekts zu erfassen, tasten multispektrale Sensoren die Erdoberflächen in mehreren spezifischen, signifikanten Spektralbereichen ab. Somit sind grundsätzlich hyperspektrale Daten aufgrund ihrer fast kontinuierlichen Spektren besser geeignet um spezielle Material- oder Pflanzeigenschaften, wie z. B. bestimmte Blattpigmente, Chlorophyllgehalte etc. zu erkennen. Allerdings geht mit einer Verbesserung der spektralen Auflösung durch eine hyperspektrale Datenerfassung auch eine ungemein komplexere Datenverarbeitung einher, die oftmals nicht zu signifikant besseren Ergebnissen führt, da in den Spektren sehr viel redundante Informationen stecken.

Es gibt mittlerweile eine Reihe von Hyperspektralscanner für Drohnen (vgl. Adão et al. 2017). Diese sind aber verhältnismäßig teuer und deren Einsatz ist sehr komplex und immer noch rein wissenschaftlichen Fragestellungen vorbehalten. Aus diesem Grunde soll dieser Beitrag nur auf die multispektralen Sensoren fokussieren, für die es kommerzielle und einfach handhabbare Produkte gibt.

Unabhängig von dem verwendeten Sensor gibt es in der Verarbeitung und Analyse multi- und hyperspektraler Daten deutliche Unterschiede zur herkömmlichen Prozessierung von Farbluftbildern, schließlich müssen die Aufnahmen nicht nur geometrisch, sondern auch radiometrisch kalibriert und korrigiert werden.

2 Anwendungen multispektraler Drohnenfernerkundung

Das größte Anwendungspotenzial multispektraler Fernerkundung liegt aktuell in der Landwirtschaft, Stichworte „Precision Farming“ bzw. „Smart Farming“, wobei beide Begriffe in etwa das gleiche bedeuten. In diesem Zusammenhang sind es die speziellen spektralen Reflexionseigenschaften von Pflanzen, vor allem im nahen Infrarotbereich, die sich je nach der Pflanzenvitalität, der Nährstoffversorgung, dem Befall von Schädlingen etc. innerhalb eines Feldes variieren können. Die aus Drohnenbildern üblicherweise abgeleiteten Indizes, wie der NDVI oder der NDRE – auf die später noch eingegangen wird – zeigen allerdings nur die Unterschiede innerhalb eines Feldes auf. Diese Information ist in vielen Fällen schon ausreichend, z. B. um ein Wild- oder Hagelschaden zu dokumentieren.

Um an die Ursache der spektralen Unterschiede zu kommen, um beispielsweise Düngekarten zu erstellen, ist es notwendig parallel zur Befliegung Referenzmessungen, so genanntes Ground Truth Informationen zu erheben. Dabei wird z. B. die Biomasse, der Blattflächenindex (LAI), der Chlorophyllgehalte, der Stickstoffgehalt oder ähnliches gemessen. Über eine Korrelation zu den Messwerten kann dann auf das ganze Feld zurück geschlossen werden.

Die skizzierte Vorgehensweise für die Landwirtschaft lässt sich selbstverständlich für forstwirtschaftliche oder generell andere (landschafts)ökologische Fragestellungen, in denen Pflanzen bzw. die Vegetationsoberfläche im Vordergrund steht, übertragen.

Gegenüber der Satelliten- und Flugzeugfernerkundung ist der besondere und einzigartige Vorteil UAS-gestützter Fernerkundung für landwirtschaftliche und ökologische Fragestellungen im Allgemeinen die hohe zeitliche (temporale) Auflösung mit der die hochaufgelösten fernerkundlichen Daten erhoben werden können. Da unterhalb der Wolken geflogen werden kann, ist es grundsätzlich möglich nahezu an jedem Tag zu fliegen. Man ist also nicht mehr unbedingt auf wolkenlosen Himmel angewiesen, sondern kann auch bei bedecktem Himmel fliegen, was insbesondere die spektrale Kalibrierung stark vereinfachen kann, da die bidirektionalen Reflexionseigenschaften (BRDF) des direkt einfallenden Sonnenlichts nicht berücksichtigt und modelliert werden müssen. Zudem kann man vor Ort flexibel auf wechselnde Witterungsbedingungen reagieren und – wenn möglich – die sonnigen oder voll bedeckten Minuten, bzw. Stunden voll ausnützen. Mit den damit planbaren Aufnahmen können fernerkundliche Dienstleistungsunternehmen sicherstellen, zu phänologisch oder pflanzenbauliche relevanten Zeitpunkten Daten zu erheben. Die damit mögliche kontinuierliche Erfassung des Aufwuchses eröffnet viele neue Anwendungsmöglichkeiten, um z. B. den Verlauf der Pflanzenentwicklung und somit auch Prozesse, wie die Düngeaufnahme und den Verlauf von Pflanzenkrankheiten zu erfassen und zu

dokumentieren. Das setzt allerdings voraus, dass die Datenprozessierung und auswertung mehr oder weniger automatisch geschieht.

3 Unterschiede zwischen UAS-Vermessungsbildflug und multispektraler UAS-Befliegung

Auf den ersten Blick unterscheidet sich der Workflow zwischen einer „klassischen“ Drohnenbefliegung für Vermessungszwecke und der einer multispektralen UAS-Befliegung gar nicht so sehr. Natürlich sind die verwendeten Kameras unterschiedlich, aber bei der Flugplanung für einen systematischen Bildflug sind die ähnliche Längs- und Querüberlappungen von 80 / 60 % bzw. 80 / 80 % einzuhalten, um eine reibungslose und automatische photogrammetrische Datenprozessierung zu gewährleisten und ein möglichst radiometrisch einheitliches Bild zu erhalten und BRDF-Probleme zu vermeiden. Passpunkte oder die Verwendung einer RTK/PPK-fähigen Drohne sind für hochaufgelöste multitemporale Fragestellungen von großem Vorteil, da die geometrisch lagerichtigen Daten im Anschluss problemlos und pixelgenau miteinander verglichen werden können. Darauf aufbauend lassen sich anschließend z. B. Zeitreihen erstellen und Veränderungen dokumentieren.

Zur Ableitung biophysikalischer Größen, wie z. B. der Biomasse, dem Blattflächenindex (LAI) etc. sind wie an obiger Stelle bereits erwähnt, zeitgleich zur Befliegung „Radiometrische Passpunkte“, bzw. Ground Truth Information zu erfassen.

Vor und/oder nach dem Flug wird zur radiometrischen Kalibrierung ein Referenzpanel mit bekanntem Reflektionsverhalten fotografiert. Dadurch wird eine Beziehung zwischen den aktuellen Lichtverhältnissen und bekannten Reflektanzen hergestellt. Bei der Durchführung des Bildfluges ist darauf zu achten, dass die Beleuchtungsbedingungen während des Bildfluges möglichst konstant sind und mit denen der Referenzaufnahmen möglichst übereinstimmen. Wechselnde Bewölkung ist ungünstig, da diese nur teilweise von dem Sonnenlichtsensor kompensiert werden kann und zudem die Wolken einen Schatten auf den Boden werfen können. Zudem soll der Bildflug möglichst um den Sonnenhöchststand herum realisiert werden, um die Länge des Schattens zu verringern. Bei Wasserflächen, Wald oder anderen dunklen Flächen sollte in Abhängigkeit des Öffnungswinkels der Kamera und je nach Jahreszeit eher etwas früher oder später geflogen werden, um „Hot Spots“ zu vermeiden, die durch eine spiegelnde Reflexion auftreten können (vgl. [Abb. 1](#)).

Vegetationsoberflächen reflektieren das von der Sonne einkommende Licht nicht gleichmäßig in alle Richtungen wieder zurück. Vielmehr variiert die Reflexion in Abhängigkeit der Richtung des einfallenden Lichtes und der Kamera.

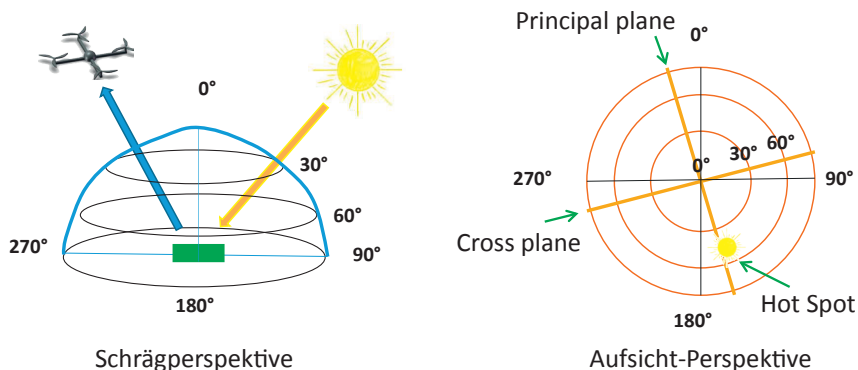


Abb. 1: Prinzip der Bestimmung des Reflektanzverhaltens einer Oberfläche und Darstellung Principal Plane und Cross Plane

Dies wird auch als bidirektionale Reflexionsfunktion (BRDF) bezeichnet. Für die Bestimmung der BRDF wird das Reflektanzverhalten der Oberfläche aus verschiedenen Blickwinkeln zu einem bestimmten Zeitpunkt (bzw. Sonnenstand) bestimmt. Abb. 1 soll den Strahlengang der Sonne und der Oberflächenreflektion zur Kamera verdeutlichen. Die Ebene, die durch den Stand der Sonne und durch den Punkt des Interesses (POI) sowie der Horizontalen im POI an der Erdoberfläche definiert ist, wird principal plane genannt. Befindet man sich zwischen Sonne und POI, erkennt man eine sehr starke Überstrahlung an der Oberfläche (Hot Spot). Abb. 1 verdeutlicht in einer Draufsicht den Verlauf der Principal Plane und der dazu senkrechten Cross Plane.

Das Postprocessing der Bilder hin zu einem fertigen Orthofoto beinhaltet den bekannten photogrammetrischen Workflow und eine radiometrische Kalibration. Da es sich bei den Multispektralkameras in der Regel um Mehrkamerasysteme mit vier bis fünf individuellen Optiken und bekannter relativer Orientierung zueinander handelt, werden diese als so genanntes „Camera Rig“ prozessiert. Dabei wird zuerst eine Referenzkamera definiert, in der Regel die Kamera der grünen Wellenlänge. Anschließend werden für die Bilder dieser Kamera die äußeren Orientierungsparameter berechnet und abschließend unter Nutzung der Translationsparameter zu den anderen Kameras auf diese übertragen.

Im Zuge der radiometrischen Kalibrierung werden die „rohen“ Grauwerte eines Bildes in absolute spektrale Strahlungswerte mit der Einheit $W/m^2/sr/nm$ umgewandelt. Dabei wird das Grundrauschen der Sensorelemente (Schwarzkalibration) kompensiert, die Empfindlichkeit des Sensors berücksichtigt und die Einstellungen für Blende, ISO und Belichtungsdauer sowie Vignettierungseffekte, d. h. den Helligkeitsrandabfall der Optik berücksichtigt. Die dafür notwendigen Daten sind in den Metadaten der Bilder enthalten bzw. werden aus

den Aufnahmen des Referenzpanels abgeleitet. Diese Kalibration wird, bei dem Einsatz marktgängiger Software (z.B. Agisoft PhotoScan bzw. Pix4D) nahezu vollautomatisch durchgeführt und bedarf seitens des Benutzers keinerlei spezieller Eingaben.

3.1 Multispektrale Kameras für (kleine) Drohnen

Technisch gesehen gibt es mehrere Möglichkeiten multispektrale Bilder zu erzeugen. Zum einen mit einem Zeilenscanner mit einer Optik und verschiedenen Zeilen für jeden aufzunehmenden Wellenlängenbereich. Dieses Prinzip hat sich z. B. im Weltraum bei Erdbeobachtungssatelliten sehr bewährt, setzt aber voraus, dass sich die Orientierung der Kamera während der Aufnahme nicht verändert, bzw. die Bewegungen der Kamera hochgenau erfasst werden. Das ist auf einer Drohne nicht möglich. Deshalb kommen dort nur Multispektralsysteme mit mehreren Optiken zum Einsatz. Dies sind einzelne kleine Kameras, die über einen entsprechenden Bandfilter einen definierten Bereich des Spektrums aufzeichnen. Um gegenüber Vibrationen und Bewegungen gefeit zu sein, können nur Kameras mit einem so genannten Global Shutter, d.h. einem elektronischen oder mechanischen Verschluss zu Einsatz kommen. Kameras mit einem Rolling Shutter, wie bei Videokameras üblich, sind generell nicht geeignet.

Tab. 1: Technische Daten marktgängiger multispektraler Kameras

Kamerasystem	Parrot Sequoia	MicaSense (Rededge-M)
Sensoren	Grün – Rot – Red Edge – NIR	Blau – Grün – Rot – Red Edge – NIR
Spektralbereich	530 – 810 nm	400 nm – 900 nm
Sensorauflösung	1280 × 960 (4x)	1280 × 960 (5x)
Pixelgröße	3,75 µm, RGB Sensor 4608 × 3456 pixel	3,75 µm
Bildwiederholffrequenz	2 Hz / 1 Hz (RGB)	1 Hz
Brennweite	3,98 mm / 4,9 mm (RGB)	5,4 mm
Betriebstemperatur	–10 °C bis +45 °C	0 °C bis 40 °C
Field of View (FOV)	89,6° (MS) / 73,5° (RGB)	47°
Maße	59 × 41 × 30 mm	121 × 66 × 46 mm
Gewicht	ca. 107 g	ca. 232 g
Bildformat	10-bit RAW	12-bit RAW
Preis	ca. 3900 Euro	ca. 5000 Euro

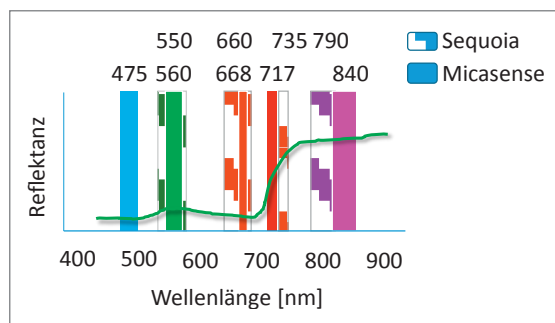


Abb. 2:
Auslegung der Spektralkanäle der Multispektralkameras Micasense Rededge-M (MX) und Parrot Sequoia, Beispielspektrum grüne Vegetation

Neben der zugrundeliegenden Technologie müssen Multispektralkameras für kleinere Drohnen, d. h. solche mit einem Abfluggewicht unter 5 kg, bzw. zukünftig unter den europäischen EASA-Bestimmungen eher 4 kg, leichtgewichtig (d. h. < 200–400 g) sein und idealer Weise auch über einen Sonnenlichtsensor verfügen, auf dessen Funktionsweise und Bedeutung im nachfolgenden Kapitel noch näher eingegangen wird.

Unter diesen Maßgaben und ohne Berücksichtigung experimenteller Lösungen gibt es zur Zeit zwei Kamerasysteme am Markt, die vierkanalige Sequoia Kamera der Firma Parrot und die fünfkanalige Rededge M(MX) der Firma Micasense, deren technische Parameter in [Tab. 1](#) und die spektralen Eigenschaften in [Abb. 2](#) verglichen werden. Der Vergleich zeigt, dass Sequoia kleiner, leichter und preiswerter ist, aber nur über vier Spektralkanäle verfügt. Die Spektralkanäle der Micasense zudem schmalbandiger, was für viele Fragestellungen wichtig ist.

Die Firma Micasense hat kürzlich einen neuen Sensor mit dem Namen ALTUM auf den Markt gebracht, der zusätzlich über eine Thermalkamera (160 × 120 Pixel) verfügt und die Auflösung der Kameras auf 2064 × 1544 Pixel (3,2 MPix.) gesteigert hat, bei gleicher Auslegung der Spektralbänder. Durch die zusätzliche Kamera hat sich allerdings das Gewicht auf über 400 g quasi verdoppelt und ist somit nur etwas größeren Drohnen als Nutzlast vorbehalten.

3.2 Sonnenlichtsensor – Funktionsweise und Bedeutung

Für die Vergleichbarkeit spektraler Messungen wird üblicherweise der Anteil der reflektierten Strahlung als Größe gemessen. Um diesen Anteil zu ermitteln, wird bei Satellitenaufnahmen eine mehr oder weniger aufwendige Atmosphärenkorrektur durchgeführt, die eine Modellierung der jeweiligen atmosphärischen Bedingungen beinhaltet.

Alternativ ist eine „Empirical Line“ Methode üblich, die zeitgleiche spektrale Referenzmessungen am Boden (Ground Truth) benötigen. Bei modernen

Multispektralsensoren für Drohnen ist das glücklicherweise nicht mehr notwendig, da neben den zum Erdboden schauenden multispektralen Bildsensoren parallel ein weiterer, nach oben schauender Sensor die einkommende Sonnenstrahlung (Irradiance) misst und die atmosphärischen Bedingungen zwischen der Drohne und der Erdoberfläche einheitlich sind. Zusätzlich zu dem Sonnenscheinsensor sind in den Kamerasystemen noch ein einfaches Inertialmesssystem und ein GPS mit integriert. Damit kann zusätzlich die Lage des Sensors bzw. der Kamera zum Zeitpunkt der Bildaufnahme festgehalten werden. Das ist insbesondere bei Flächenflüglern von Bedeutung, da diese in der Regel keinen Gimbal zur Kompensation Auswirkungen des Windes in Form von Abweichungen von der idealen Fluglage haben und somit Abweichungen von 10 bis 20° von der Lotrechten möglich sind. Somit ergeben sich dann auch Unterschiede in der Menge der gemessenen Einstrahlung, da der Sonnenlichtsensor in einem anderen Winkel zur Sonne steht, die in der weiteren Auswertung mit berücksichtigt werden müssen.

Nichtsdestotrotz kann auch mit diesem Multispektralsensor nicht bei jedem Wetter geflogen werden. Sonne oder gleichmäßig bedeckter Himmel sind Voraussetzung. Bei schnell wechselnder Bewölkung hingegen können im Bild Schatten auftreten, die vom Sonnenscheinsensor nicht erfasst werden können (vgl. Abb. 3).

Um die Bedeutung der gleichzeitigen Irradiance Messung zu verdeutlichen, wurde ein Bildverband, der bei stark wechselnder Beleuchtung aufgenommen wurde, mit und ohne die Korrekturdaten aus dem Sonnenlichtsensor prozessiert (siehe Abb. 4 und Abb. 5).

Bei der Prozessierung ohne die spektralen Korrekturdaten des Sonnenlichtsensors (Abb. 5) zeigt sich, dass ein Teil des Bildverbands überbelichtet und ein anderer eher unterbelichtet ist. Das zeigt zugleich, dass die Sonnenlichtkorrektur prinzipiell funktioniert und gerade bei wechselnden Beleuchtungsverhältnissen zu deutlich besseren Ergebnissen führt.

Es stellt sich natürlich die Frage, wie genau denn die berechneten Reflektionswerte der Multispektralkameras sind bzw. was die Genauigkeit beeinflusst.

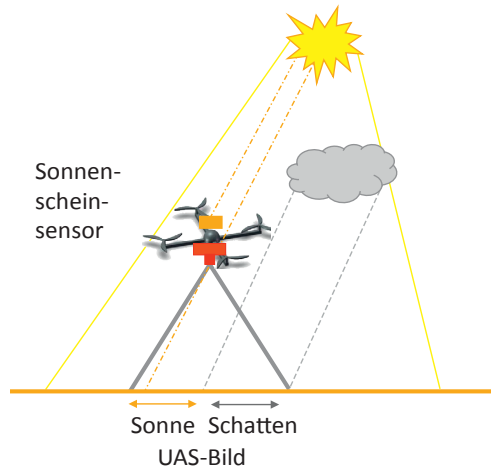


Abb. 3: Grenzen des Einsatzes des Sonnenscheinsensors bei wechselnder Bewölkung

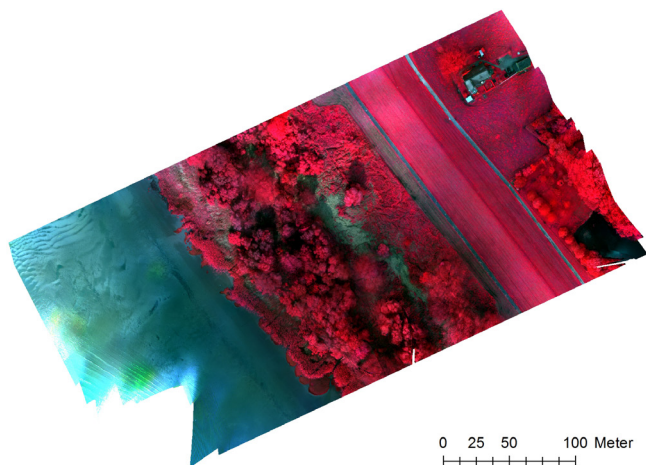


Abb. 4:
NIR-Farbkompo-
sit der Multi-
spektralbeflie-
gung Bielenberg
mit dem Se-
quoia-Sensor –
Auswertung mit
Sonnenlichtkor-
rektur

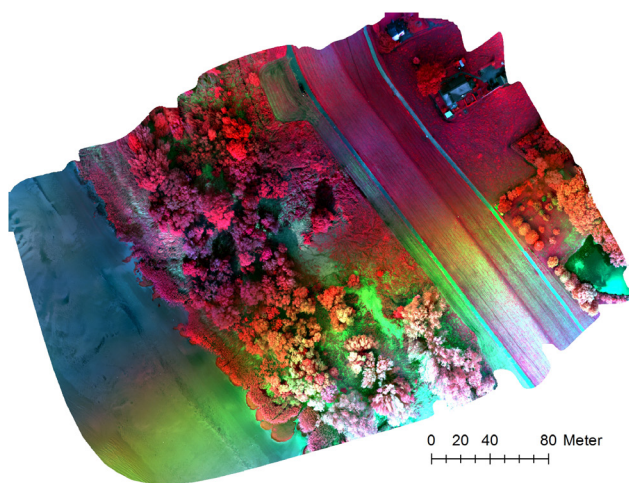


Abb. 5:
Multispektral-
datensatz Bie-
lenberg – Photo-
grammetrische
Prozessierung
ohne Sonnen-
lichtsensor-
korrektur

Assmann et al. (2018) haben gezeigt, dass die Art und die Durchführung der radiometrischen Kalibration sowie der Sonnenstand, wenn er über einem gewissen Schwellwert ist, die Reflektionswerte bzw. den daraus abgeleiteten NDVI-Wert in geringem Maß (ca. 0,02–0,03) beeinflussen und somit Aufnahmen zu verschiedenen Tages- bzw. Jahreszeiten vergleichbare Ergebnisse liefern. Problematischer sind Wolken, Nebel und ungleiche Beleuchtung während des Bildfluges. Ein auch nicht zu unterschätzender Effekt sind Veränderungen der Spektraleigenschaften des Referenzpanels, insbesondere bei häufigem Gebrauch, was zu Abweichungen von 0,02 beim NDVI führen kann.

Eigene Untersuchungen können diese Beobachtungen grundsätzlich bestätigen, allerdings haben diese auch gezeigt, dass gerade bei sehr niedrigen Sonnenständen von $< 10^\circ$, wie sie in den Wintermonaten häufig auftreten, und der Verwendung eines Flächenflüglers, der Sonnenscheinsensor keine vernünftigen Korrekturen liefert und unrealistische Reflektanzen > 1 erzeugt werden. Ursache ist, dass der Sonnenscheinsensor bei einem ungünstigen Verkippen des Fluggeräts nicht mehr der Sonne zugewandt ist.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die berechneten Reflektanzen der Multispektralkameras in der Regel sehr zuverlässig sind und durchaus mit den Genauigkeiten eines Feldspektrometers vergleichbar sind.

3.3 Vergleich der Vegetationsindices von RGB- und MS-Aufnahmen

Bei Aufnahmen mit einer multispektralen Kamera, die auch den nahinfraroten Wellenlängenbereich mit abtastet, lässt sich auch der weithin genutzte normalisierte Differenzvegetationsindex NDVI berechnen. Die Formel zur Berechnung des NDVI lautet:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Für die Bestimmung der Pflanzenvitalität hat sich auch der normalisierte Redgedifferenzvegetationsindex NDRE etabliert (Xie et al. 2018), der durch eine ähnliche Formel gebildet wird:

$$NDRE = \frac{Red\ Edge - R}{Red\ Edge + R}$$

Darüber hinaus gibt es noch eine Fülle weiterer Vegetations- und Feuchteindices mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen (vgl. z. B. Xue und Sue 2017).

Alternativ können aus Farbluftbildern ebenfalls verschiedene Vegetationsindizes zur Differenzierung verschiedener Vegetationsarten abgeleitet werden, die die Interpretation durch einen Landschaftsökologen wesentlich erleichtern können. Der VARI-Index (Visible Atmospherically Resistant Index) (Gitelson et al. 2002) hat sich dabei als besonders geeignet herausgestellt. Die Formel zur Berechnung des VARI lautet:

$$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$$

Um die beiden Indices in ihrer Wirkung zu vergleichen ist ein ca. 5 ha großer Uferstreifen der Elbe bei Bielenberg nacheinander durch einen Flächenflügler Ebee+ der Firma Sensefly mit unterschiedlicher Nutzlast mit einer RGB-Kamera (S.O.D.A) und einer Multispektralkamera (Parrot Sequoia) am 25.9.2017 befliegen worden (Abb. 6 und Abb. 7).

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit die beiden Vegetationsindices übereinstimmen bzw. ähnliche und/oder vergleichbare Informationen zur Vegetation

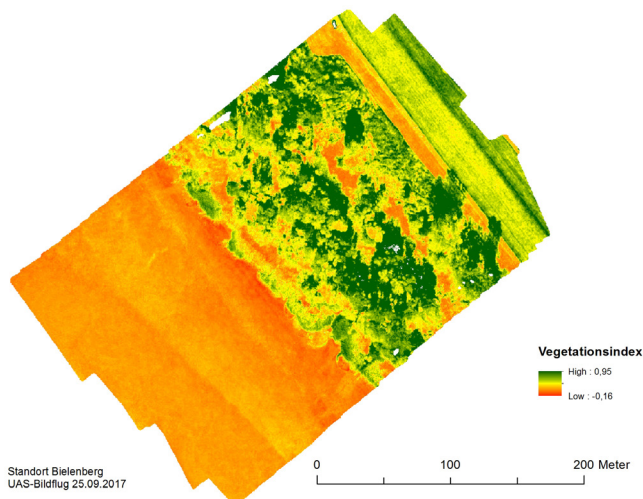


Abb. 6:
VARI-Index –
Berechnet auf
der Grundlage
der RGB-Kamera
S.O.D.A., GSD
2 cm, Bildflug
am 25.9.2017

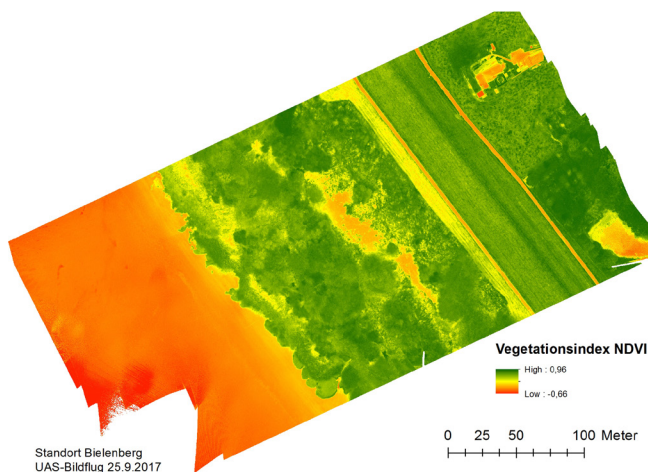


Abb. 7:
NDVI – Be-
rechnet auf der
Grundlage der
Multispektral-
kamera Sequoia
am 25.9.2017,
GSD 7 cm

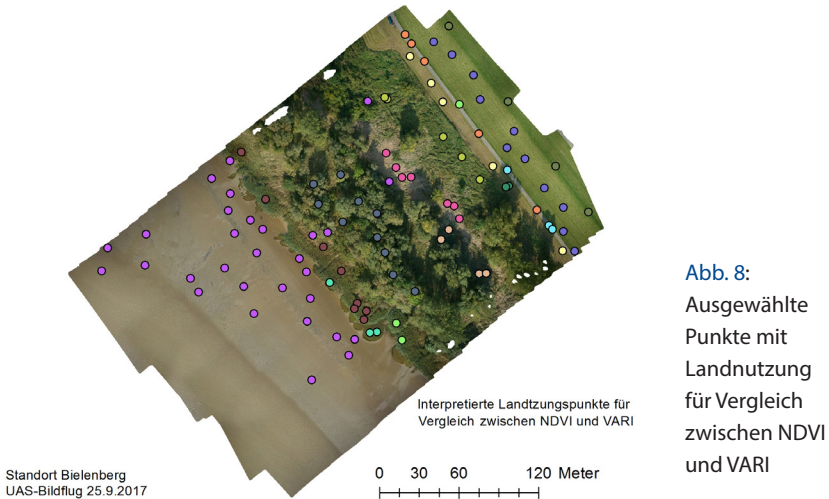


Abb. 8:
Ausgewählte
Punkte mit
Landnutzung
für Vergleich
zwischen NDVI
und VARI

und deren Vitalität liefern. Beim Vergleich (Abb. 8) ist allerdings zu berücksichtigen, dass beim Flug mit dem RGB-Sensor durchwegs sonniges Wetter vorherrschte, beim Multispektralflug jedoch nur teilweise. Rein visuell fällt auf, dass insbesondere im Bereich der Bäume der VARI ein sehr viel differenziertes Bild erzeugt, bei dem das Spiel von Licht und Schatten innerhalb und zwischen den Bäumen gut zu erkennen ist. Nun hat das leider nichts mit Unterschieden der Pflanzenvitalität zu tun. Vielmehr wirkt sich die Beleuchtung und deren Einfluss auf den unkalibrierten RGB-Sensor aus. Deshalb ist erst einmal festzuhalten, dass das NDVI-Bild des Sequoia Sensors in dieser Hinsicht wesentlich besser ist. Gleichwohl kann auch der VARI-Index in den Wattbereichen punkten und hier ein differenziertes Bild präsentieren.

Um die Zusammenhänge auch statistisch zu überprüfen, wurde an 100 Punkten Werte der beiden Datensätze abgegriffen, die Nutzung an diesen Punkten ermittelt und in Form eines Plots eingetragen.

Aus dem Plot (Abb. 9) wird deutlich, dass die Spreizung der NDVI-Daten deutlich größer ist als die VARI-Werte. Die höchsten VARI-Werte liegen im Schatten. Die Trennung zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation (Weg, Watt, liegendes Schilf) ist bei den NDVI-Daten zuverlässiger als bei den VARI-Daten. Bei Vegetationsflächen, z. B. einer Wiese, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen NDVI- und VARI-Werten, was sich auch mit den bisherigen Erfahrungen deckt.

Es stellt sich wiederum die Frage, inwieweit die beiden Vegetationsindices übereinstimmen bzw. ähnliche und/oder vergleichbare Informationen zur Vegetation und deren Vitalität liefern. Bei einem Vergleich am Standort Bielenberg

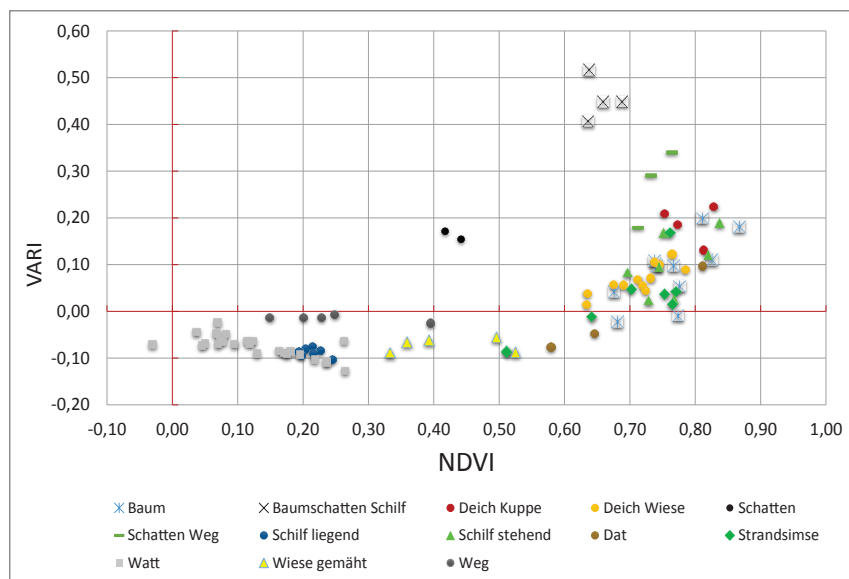


Abb. 9: VARI vs. NDVI in Abhängigkeit der Landnutzung

im Herbst 2017 hat sich gezeigt, dass die Beleuchtung und deren Einfluss auf den unkalibrierten RGB-Sensor starke Auswirkungen haben kann. Deshalb ist erst einmal festzuhalten, dass für Fragen der Pflanzenvitalität, LAI, Biomasse etc. der abgeleitete NDVI des Sequoia Sensors in dieser Hinsicht wesentlich besser geeignet ist.

3.4 Pan-Sharpenering multispektraler Bilder

Aufgrund der vergleichsweise geringen Auflösung der multispektralen Sensoren, der Brennweite und der beschränkten Bildfolgezeit von 1 Sekunde können aus den üblichen Flughöhen von 50 bis 100 m über Grund nur Bodenauflösungen von 4 bis 7 cm realisiert werden. Gleichwohl lässt sich bei einer kombinierten Befliegung mit einer hochauflösenden RGB-Kamera und einer Multispektralkamera die Auflösung der multispektralen Daten rechnerisch erhöhen.

Durch ein in der Satelliten- und Luftbildphotogrammetrie seit vielen Jahren übliches Verfahren des Pan-Sharpenerings (Gram-Smith Sharpening Methode) sind durchaus Bodenauflösungen von < 2 cm im Postprozessing zu erreichen, wie Abb. 10 verdeutlicht.

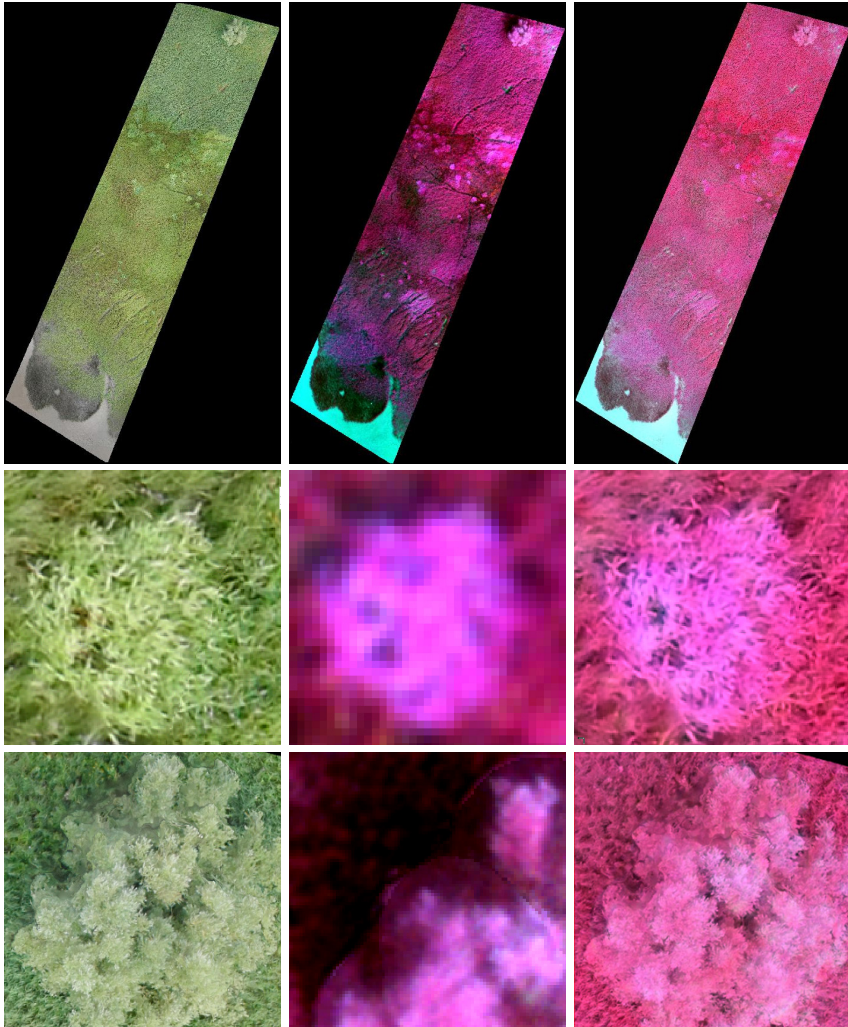


Abb. 10: Bildbeispiele für den Pan-Sharpening-Prozess multispektraler Daten (Parrot Sequoia) mit hochaufgelösten RGB-Aufnahmen

4 Beispiel multispektraler Drohnenfernerkundung

Multispektrale Drohnenbilder lassen sich fernerkundlich auf verschiedenste Art und Weise auswerten, wobei es in der Regel darum geht, Zusammenhänge zwischen terrestrisch erhobenen Ground Truth Informationen und den spektralen UAS-Daten herzustellen. Das kann z. B. über einen Index, eine überwachte Multispektralklassifikation oder ein (multivariates) Regressionsverfahren erfolgen.

Ziel der folgenden Anwendung ist es, in einem Uferbiotop an der Unterelbe verschiedene im Feld gemessene Pflanzenparameter wie z. B. die Wuchshöhe, Pflanzengewicht, Wassergehalt und photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) in die Fläche zu übertragen (vgl. Grenzdörffer et al. 2018). Dazu wird ein Verfahren auf Basis einer Partial Least Squares Regression (PLSR) genutzt. Der Eingangsdatensatz umfasst neben den multispektralen Daten auch eine thermale Aufnahme sowie das aus den Multispektraldaten abgeleitete Oberflächenmodell. Gerade das Oberflächenmodell liefert oft Zusatzinformation.

PLSR kombiniert Merkmale der Hauptkomponentenanalyse mit Merkmalen der mehrfachen Regression. Zunächst wird ein Set latenter Faktoren extrahiert, die einen möglichst großen Anteil der Kovarianz zwischen den unabhängigen und den abhängigen Variablen erklären. Anschließend werden in einem Regressions-schritt die Werte der abhängigen Variablen mithilfe der Zerlegung der unabhängigen Variablen vorhergesagt.

Die PLSR hat in den letzten Jahren sehr stark an Bedeutung gewonnen und hat sich im Vergleich zu anderen komplexen multivariaten Regressionsverfahren (wie der Support Vector Regression oder der Gaussian Process Regression) als sehr robust erwiesen. Dies konnten unter anderen Siegmann und Jarmer (2015) für multi- und hyperspektrale Daten durch unabhängige Validierungsversuche nachweisen. Außerdem konnten sie nachweisen, dass die PLSR relativ robust gegenüber einer Überanpassung (over fitting) der Modelle agiert. Vor allem in der Spektroskopie wird die PLSR zur Kalibrierung von Eigenschaften aus Spektren verwendet. Die Berechnungen der PLSR wurden mit der frei verfügbaren Software EnMAP-Box (van der Linden et al. 2015) durchgeführt. [Abb. 11](#) zeigt die Vorhersage der Trockenmasse.

5 Ausblick

Die für Drohnen entwickelte multispektrale Bildgebungstechnologie hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, insbesondere bei der Größen- und Gewichtsreduzierung. So sind die multispektralen Sensoren, die heutzutage zum Einsatz kommen, nur halb so groß und wiegen nur ein Viertel des Gewichts der vorherigen Sensorgeneration. Auch die Kosten, der photogrammetrische

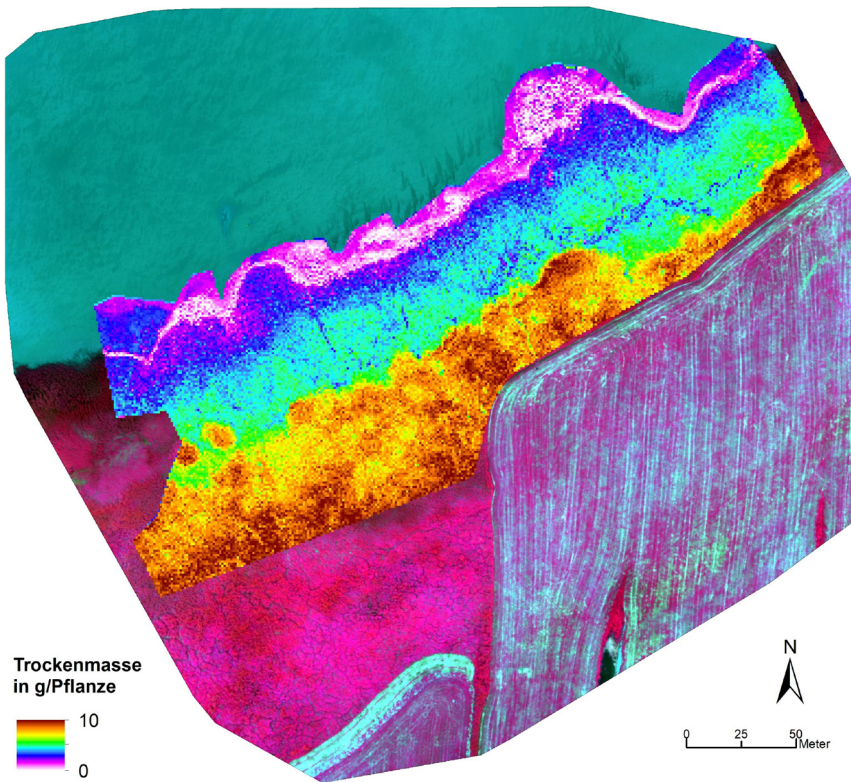


Abb. 11: Vorhersagekarte der Trockenmasse in g/Pflanze mit Hilfe PLSR auf der Grundlage eines multisensoralen Datensatzes (B + G + R + NIR + Red Edge + DOM + Thermal)

und radiometrische Workflow und die Datenqualität insgesamt haben sich enorm verbessert.

Gleichwohl gibt es noch viele Begehrlichkeiten und Potenziale für zukünftige Entwicklungen. Die Spektralbänder und die Auflösung der echten Multispektralsensoren haben sich nicht wesentlich geändert. Es besteht zum Beispiel Bedarf nach einer höheren räumlichen Auflösung, mehr Spektralbändern und einer kürzeren Belichtungszeit.

„Mehr Kanäle“ bedeutet jedoch nicht, dass es 1000 oder mehr Kanäle sein sollen. Stattdessen werden dynamisch auswählbare, spektral unterschiedlich enge Kanäle benötigt, idealerweise in einem hyperspektralen Bildgeber, der in einem multispektralen Modus verwendet wird. Für viele Anwendungen wäre ein definierbarer 8- bis 10-Band-Sensor ein idealer Kompromiss zwischen der Datenmenge und der benötigten Spektralinformation.

Literatur

- Adão, T.; Hruška, J.; Pádua, L.; Bessa, J.; Peres, E.; Morais, R.; Sousa, J. J. (2017): Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. *Remote Sens.* 2017, 9, 1110. DOI: [10.3390/rs9111110](https://doi.org/10.3390/rs9111110).
- Assmann, J. J.; Kerby, J. T.; Cunliffe, A. M.; Myers-Smith, I. H. (2017): Vegetation monitoring using multispectral sensors best practices and lessons learned from high latitudes. DOI: [10.1101/334730](https://doi.org/10.1101/334730).
- Gitelson, A. A.; Kaufman, Y. J.; Stark, R.; Rundquist, D. (2002): Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.*, 80 (2002), 76–87.
- Grenzdörffer, G.; Beyer, F. (2018): Machbarkeitsstudie zur fernerkundlichen Erfassung der Vegetationsstruktur für eine Quantifizierung von Ökosystemleistungen durch Marschpflanzen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 131. DOI: [10.5675/tibass2018_ErfassungPflanzeigenschaftenFernerkundung](https://doi.org/10.5675/tibass2018_ErfassungPflanzeigenschaftenFernerkundung) (http://doi.bafg.de/BfG/2018/tibass2018_ErfassungPflanzeigenschaftenFernerkundung.pdf)
- Grenzdörffer, G.; Niemeyer, F. (2011): UAV based BRDF-measurements of agricultural surfaces with PFIFFikus. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-1-C22, 229–234. DOI: [10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-229-2011](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-229-2011).
- Siegmann, B.; Jarmer, T. (2015): Comparison of different regression models and validation techniques for the assessment of wheat leaf area index from hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing* 36(18): 4519–4534. DOI: [10.1080/01431161.2015.1084438](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1084438).
- Siegmann, B.; Jarmer, T.; Beyer, F.; Ehlers, M. (2015): The Potential of Pan-Sharpened EnMAP Data for the Assessment of Wheat LAI. *Remote Sensing*. DOI: [10.3390/rs71012737](https://doi.org/10.3390/rs71012737).
- van der Linden, S.; Rabe, A.; Held, M.; Jakimow, B.; Leitão, P. J.; Okujeni, A.; Schwieder, M.; Suess, S.; Hostert, P. (2015): The EnMAP-Box—A Toolbox and Application Programming Interface for EnMAP Data Processing. *Remote Sensing* 2015, 7, 11249–11266.
- Xie, Q.; Dash, J.; Huang, W.; Peng, D.; Qin, Q.; Mortimer, H.; Casa, R.; Pignatti, S.; Lanneve, G.; Pascucci, S.; Dong, Y.; Ye, H. (2018). Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. DOI: [10.1109/JSTARS.2018.2813281](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2813281).
- Xue, J. und Su, B. (2017): Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, vol. 2017, Article ID 1353691, 17 S. DOI: doi.org/10.1155/2017/1353691.

Kontakt

Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer
Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik
J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock
goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de

Geo2VR – Sensorfusion im virtuellen Raum

Torsten Genz | Uwe Krause

1 Sensorfusion im virtuellen Raum

Intelligente Lösungen erfordern authentische Daten. Mit der fortwährend rasanten technologischen Entwicklung im Kontext der Digitalisierung, als große Herausforderung unserer Gesellschaft dieser Zeit, bekommt auch der Begriff Multisensorsysteme eine neue Bedeutung und wir kommen den intelligenten Daten – dem authentischen digitalen Zwilling – immer näher.

Vielfach findet eine sensorische Vernetzung nicht mehr nur noch in den Geräten, sondern messgeräteübergreifend statt. Dabei sind insbesondere im Bereich der Genauigkeit sehr unterschiedliche und komplexe Sensordaten zu fusionieren. Die Bedeutung von punktwolkenerzeugenden Systemen steigt hierbei stetig. Dies wird verstärkt durch aktuelle technologische Entwicklungen im Bereich der punktwolkenbasierten Datenerzeugung – von der photogrammetrischen Methodik bis hin zu Handscanner-Systemen ebenso wie im Bereich der Consumer Technologie. Dies ermöglicht mit schon jetzt mit fusionierten Geodaten eine höhere Ebene der Interaktion und Interpretation bereits im Felde. Darüber hinaus ist auch der gesamte Bereich der Augmented Reality (AR), Virtual Reality- (VR) und Mixed Reality- (MR) Hardwareplattformen dabei seine Kinderkrankheiten abzuwerfen und bietet nun interessante Perspektiven für eine Evolution der Wahrnehmung unserer Umwelt.

Die Anforderungen an eine qualitätsgerechte Sensorfusion im virtuellen Raum sind jedoch vielfältig und nicht immer trivial. Sie reichen von der Frage „Was sind authentische Geodaten“ bis zur qualitätsgerechten reproduzierbaren Geodatenhaltung auf Punktwolkenbasis.

Mit dem praxisnahen Ansatz „Geo2VR“ soll an Hand von zwei Beispielen kurz skizziert werden, wie aktuelle und zukünftige Fragestellungen – von der immersiven Qualitätsbeurteilung von Punktwolkenszenarien im Felde bis zur Hochwassersimulation mit Was-Wäre-Wenn-Szenarien für Krisenmanagement und Leitstände – davon profitieren und neue Perspektiven mit innovativen Lösungsansätze im Bereich der Geodäsie entstehen können.

1.1 Geodäsie „gestern, heute und morgen“

Geoinformationen werden seit jeher erfasst, um ortsunabhängig Entscheidungen treffen zu können, sei es aus militärischen, wirtschaftlichen oder politischen Gründen. Im Laufe der Zeit wurde die Erfassung immer präziser, vielschichtiger und umfangreicher. So wurden etwa aus Inselkarten blattschnittfreie Kartenwerke im Bereich des Katasters. In anderen Bereichen wird mittlerweile mit INSPIRE als Grundstein für moderne Geodateninfrastrukturen zum Zwecke der Umweltpolitik im europäischen Rahmen in einem ganzheitlichen Kontext gedacht und erfasst.

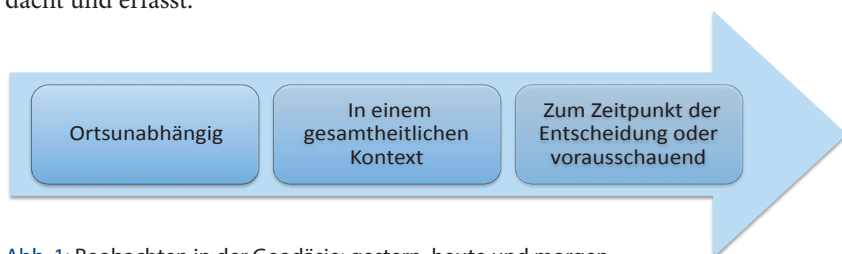


Abb. 1: Beobachten in der Geodäsie: gestern, heute und morgen

Und trotzdem haben all diese Informationen noch ihre Grenzen, wenn es um dynamische Prozesse und komplexere Ansprüche von Authentizität geht. Aktuelle Punktwolkentechnologien, Cloud Services und Mixed Reality lassen jedoch schon die nächste Evolutionsstufe der Geodäsie erkennen (Abb. 1). Es ist der Moment, wenn zum Zeitpunkt der Entscheidung oder vorausschauend all diese Informationen – just-in-time – zur Verfügung stehen.

1.2 Beobachten in einer neuen Dimension

Zunächst ist es lohnend zurückzuschauen und die Grundzüge des „klassischen“ Beobachtens (Abb. 2) zu betrachten, um zu verstehen, dass vieles, was in den letzten Jahren von der steigenden der Interdisziplinarität bei Problemlösungsstrategien bis hin zur cloudbasierten Echtzeitdatenverarbeitung technologisch bereits erreicht wurde, auch als Abfolge von notwendigen Teillösungen auf dem Weg zur Evolution des Beobachtens 2.0 betrachtet werden könnte.

Wenn wir bisher beobachtet haben, so geschah dies üblicherweise durch einen Beobachter direkt am realen Objekt. Dabei wurden zunächst die Geometrie und je nach Aufgabenstellung weitere objektspezifische Parameter und Verhaltensweisen beobachtet.

Dabei kommt es häufig vor, dass die Parametergruppen durch unterschiedliche Beobachter erfasst werden. Etwa weil verschiedene Gewerke in einem

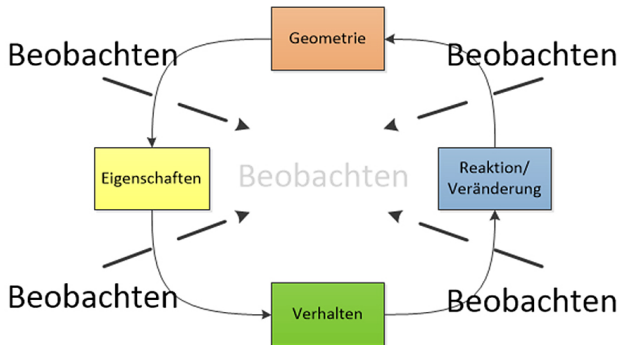


Abb. 2:
Klassische Primär-
beobachtung mit
multipler Erfassung

komplexen Prozess zusammenkommen oder einfach auf Grund sich ändernder Anforderungen in einem laufenden umfangreichen Projekt. Auftretende „Beobachtungsmängel“ in Form von unterschiedlichen Ansprüchen an die Beobachtungstiefe, -genauigkeit und -qualität im Allgemeinen pflanzen sich dabei schnell derart fort, dass regelmäßig Nacherfassungen, also zusätzliche Beobachtungen bereits bekannter Parametergruppen notwendig werden.

Dieser unnötige Ressourcenverbrauch könnte erheblich minimiert werden, wenn man die Beobachtung derart umgestalten würde, dass man zunächst eine Art digitalen Zwilling auf Punktwolkenbasis bereitstellt, in dem dann die eigentliche „Sekundär“-Beobachtung stattfindet (Abb. 3). Hierbei muss dann lediglich darauf geachtet werden, dass die notwendige Authentizität des Objektes bzw. der Szenerie gewährleistet wird. Der fachlich versierte Anwender muss dann lediglich in die Lage versetzt werden, auf natürliche Art und Weise mit diesen intelligenten Geodaten zu „kommunizieren“. Dazu muss die Umgebung einerseits authentisch genug für ihn sein, was nutzerspezifisch dynamisch angepasst werden kann. Andererseits muss eine natürliche Interaktion mit dem authentischen digitalen Zwilling ermöglicht werden.

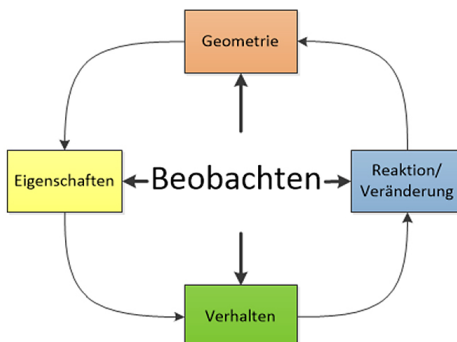


Abb. 3:
Sekundärdaten-
beobachtung und
nicht destruktive
Sekundärdaten-
interpretation aus
einem originären
Datensatz

1.3 Auf dem Weg zum authentischen digitalen Zwilling

Wenn wir uns an das EVAP-Standardmodell halten und dabei kurz skizzieren, welche Anforderungen hierzu notwendig wären sowie welche technischen Lösungen bereits existieren, wird schnell offensichtlich, dass rein technisch gesehen bereits ein großer Teil des Weges geschafft ist (Abb. 4). Die Verbindung der einzelnen Technologien erlaubt es bereits heute, theoretisch einen authentischen digitalen Zwilling bereit zu stellen. Der Knackpunkt liegt eher in der anwendergerechten und sicheren Umsetzung innerhalb einer virtuellen qualifizierten geodätischen Prozesskette.

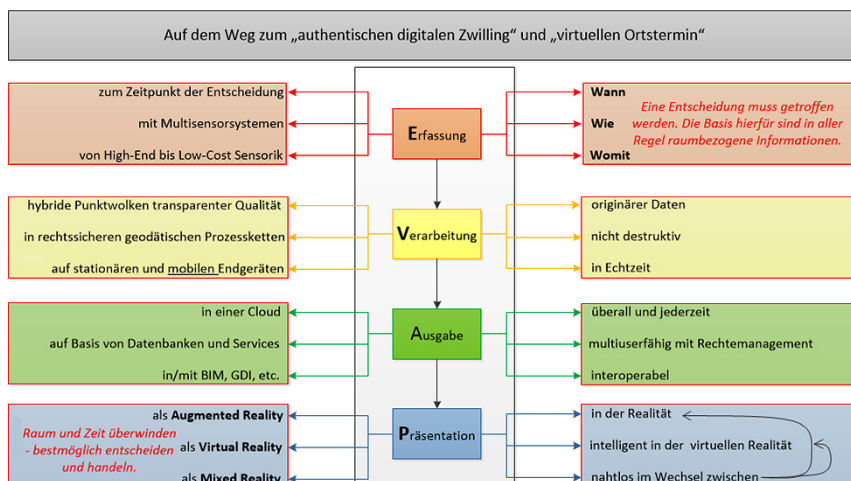


Abb. 4: Was ist notwendig (links) und was ist technisch möglich (rechts) für den authentischen digitalen Zwilling

Insbesondere die gerade aktuell wieder aufgelebten AR-/VR- und MR-Technologien haben noch großes Potenzial bezüglich einer natürlichen und anwendergerechten Interaktion in den Geodaten. Ähnliches gilt für die Echtzeitpunktwolkentechnologie, welche jedoch zumindest schon ab dem Punkt nach der erfolgreichen Registrierung grundsätzlich State-of-the-art ist, wenn man sich die aktuellen Produkte der großen Hersteller anschaut.

2 Auf dem Weg in die Praxis

2.1 Anforderungen an die Sensorfusion im virtuellen Raum

Hybride fusionierte Punktwolkendaten kommen aktuell aus den unten stehenden Verfahren bzw. Systemen (Abb. 5). Die neben stehenden Anforderungen an die Dateninterpretation im virtuellen Raum sind dabei jedoch in jedem Fall zu erfüllen, da andernfalls Mehrfacherfassungen, Fehlinterpretationen und schließlich ein Vertrauensverlust in die effiziente und qualitätsgerechte Anwendung des virtuellen Beobachtens die Folge wären.

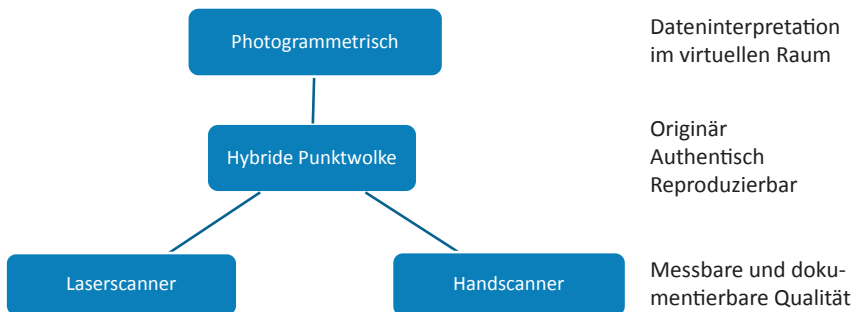


Abb. 5: Aktuelle Systeme/Verfahren für Punktwolkendaten

Um dies zu verhindern und eine qualitätsgerechte Abbildung von realen Beobachtungsobjekten im virtuellen Raum zu gewährleisten, sind zumindest folgende Aspekte erforderlich:

- ein Qualitätsmodell, welches jederzeit erlaubt, die atomaren Bestandteile der fusionierten Punktwolke z. B. hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu beurteilen,
- ein Interaktionsmodell, welches die effiziente Dateninterpretation auf eine natürliche Art und Weise für definierbare Nutzerszenarien erlaubt sowie
- ein Prozessmodell, welches authentisch, reproduzierbar sowie rechtssicher eine fortlaufende digitale Dokumentation über gesamte Lebenszyklen von Beobachtungsobjekten erlaubt.

Zwei kurze Beispiele für den Fortschritt und die Möglichkeiten auf diesem Wege werden hierbei im Folgenden kurz dargestellt.

2.2 MoVEQuaD – Natürliche Qualitätsanalyse im Felde

Das Projekt MoVEQuaD (Abb. 6) ist darauf angelegt, wesentliche Bestandteile der derzeitigen Lärmschutz-Prozesskette zu präzisieren, zu operationalisieren und effizienter zu gestalten. Wesentliches Merkmal der Neuentwicklung ist ein lückenloser digitaler Prozess von der Planung über die Erfassung (terrestrisch und luftgestützt) mit integrierter Daten- und Qualitätsanalyse bis zur Visualisierung der Ergebnisse vor Ort in naher Echtzeit. Hierzu wurde eine komplexe Systementwicklung, bestehend aus Hard- und Software, zur hochpräzisen, iterativen und semantischen 3D-Gebäudemodellierung realisiert. Dies stellt einen signifikanten Schritt hin zu einer automatisierten und qualitätsgerechten Umsetzung der Lärmschutz-Prozesskette oder auch allgemein für eine BIM-gerechte Erfassung dar.

Hervorzuheben ist hierbei die Möglichkeit, dass der Anwender durch VR-Technologie und die Erschaffung eines digitalen Zwillings bereits vor Ort einfache Qualitätsaussagen zu komplexen Punktwolkendaten ganz intuitiv und natürlich treffen kann. Qualitätsparameter wie Genauigkeit und Vollständigkeit können so trotz Multisensortechnologie und komplexer Datenfusion im Felde zuverlässig und schnell beurteilt werden. (Stenz et al. 2015, Cefalu et al. 2017).

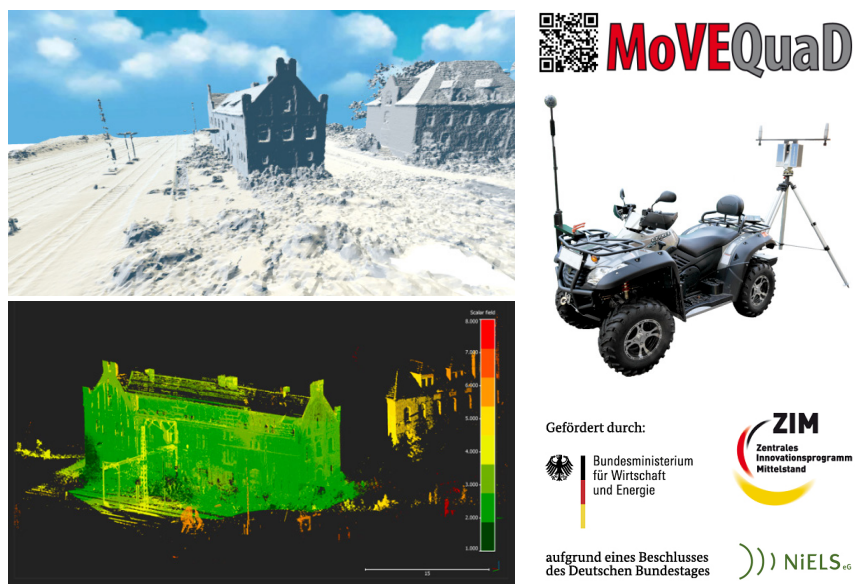


Abb. 6: Echtzeitnahe Vermaschung aufgenommener Geometrie zur Vollständigkeitskontrolle (links oben), Qualitätsanalyse anhand von Referenzgeometrien mit übergeordneter Genauigkeit (links unten), Prototyp MoVEQuaD (rechts)

2.3 PHP – Von der Pegelmessung zur interaktiven virtuellen Hochwassersimulation

Mit dem Projekt PHP – Proaktive Hochwasserprognose (Abb. 7) wurde die Entwicklung eines Informationssystems und der dafür notwendigen Low-Cost-Sensoren und Services zur verbesserten Prognose von Hochwassersituationen auf Basis von modernen hydrologischen und meteorologischen Vorhersagen angegangen. Wesentliche Punkte waren hierbei das Problem der bisher nicht hinreichend untersuchten Abbildung der Prozesse in den Quellgebieten sowie einer



Abb. 7: Simulation mit Echtzeitpegelupdate und Flusssimulation

viel zu geringen Anzahl von aktuellen und relevanten Pegelinformationen in den kritischen Gebieten. Es stellte sich jedoch noch ein weiterer Punkt, insbesondere für Krisenstäbe und Entscheider, als signifikant heraus. So gibt es nun auch eine Möglichkeit, die bereitgestellten Informationen in „quasi-reale“ Was-Wäre-Wenn-Szenarien zu transformieren.

Die bisherige Sensortechnologie, bestehend aus Primär- und Sekundärpegelstandsensoren sowie Umwelt-, Foto- und weiteren Sensoren, wurde dabei ergänzt um einen vollständigen Scan des Messstandortes. Mit diesen Informationen und nach entsprechender Modellbildung konnten so im Anschluss einfache Stresssimulationen, z. B. auf lose Körper im Rahmen simulierter Verkläuerungen, durchgeführt werden, indem verschiedene Pegelstände, Wassergeschwindigkeiten, Wind, etc. simuliert wurden.

Dieses entsprechend dezidiert aufzuarbeiten und fortzuentwickeln bietet eine breite Basis für die weitere Forschung und Entwicklung. Im Zusammenhang mit bereits sehr einfachen Virtual Reality-Demonstratoren lässt sich dabei aber bereits jetzt das enorme Potenzial für Was-Wäre-Wenn-Szenarien erahnen.

3 Ausblick

Sensorfusion im virtuellen Raum mit Hilfe von Echtzeitpunktwolkentechnologie und dem authentische Einsatz von Mixed-Reality-Technologien werden unsere Sicht auf die Dinge und das Wesen der Beobachtung erneut verändern.

Als große Themen der Zukunft stellen sich hierbei die natürliche und qualitätsgerechte Interaktion in virtuellen Welten, die „korrekte“ Modellierung komplexer „interdisziplinärer“ Zusammenhänge und die Abbildung rechtssicherer Prozesse im virtuellen Raum, welche bisher noch eine physische Präsenz erfordern, dar.

Diagnose, Simulation und Prognose von modellierten Prozessen werden ebenfalls gegenüber der reinen Erfassung von Zuständen weiter an Bedeutung gewinnen. Dies gilt im Übrigen auch über die Geodatenwelt hinaus, wenn es um die Schnittstellen zu digitalisierten Geschäfts- und Verwaltungsprozessen geht.

Technologien wie Augmented, Virtual und Mixed Reality bieten hierbei vielfältige Möglichkeiten, natürliche Prozesse abzubilden und diese „virtuell-empirisch“ – als neue Dimension (Form) des Beobachtens – zu untersuchen.

Literatur

- Cefalu A.; Haala N.; Schmohl S.; Neumann I.; Genz, T. (2017): A mobile multi-sensor platform for building reconstruction integrating terrestrial and autonomous UAV-based closed range data acquisition. ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Stenz, U.; Link, J.; Timmen, A.; Genz, T.; Krause, U.; Neumann, I. (2015): Modellierung und Visualisierung von 3D-Punktwolken mittels virtueller Umgebungen. 18. Internationale geodätische Woche Obergurgl.

Kontakt

Verm.-Ass. Dipl.-Ing. Torsten Genz | Dipl.-Ing. Uwe Krause
Geo-Office Gesellschaft für graphische Datenverarbeitung und Vermessung mbH
Karl-Liebnecht-Straße 101, 14612 Falkensee
torsten.genz@geo-office.de | uwe.krause@geo-office.de

Unbemannte Luftfahrzeuge (engl. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) haben in den letzten Jahren zur Erweiterung des Aufgabenspektrums und einer effizienteren Erfüllung von geodätischen Aufgaben beigetragen. Eine Vielzahl an UAV-Systemen ist inzwischen verfügbar. UAV sind Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen und von Entwicklungen für geodätische Sonderaufgaben; sie werden bereits vielfach in der geodätischen Praxis erfolgreich eingesetzt. Ein hoher Automationsgrad in Erfassung und Auswertung großer Datenmengen ermöglicht es, den stetig steigenden Anforderungen an aktuelle Geodaten auch durch UAV gerecht zu werden.

Dieser Band informiert Forscher, Entwickler und Anwender über Trends, neue technische Entwicklungen und Anwendungen von UAVs bei Vermessungsprojekten.



ISBN: 978-3-95786-203-7



9 783957 862037

Schriftenreihe des DVW
Band 94 / 2019
Printversion: 28,00 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

