

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

Jeder Pilot muss in der Lage sein, ein Dokumentationsareal eigenständig manuell zu befliegen, ohne dabei auf automatisierte Flugplanungswerkzeuge zurückzugreifen. Dabei ist es entscheidend, die zu erfassende Struktur zu verstehen und systematisch die geeigneten Flugmuster und Aufnahmestrategien auszuwählen, die für den späteren 3D-Rekonstruktionsprozess unerlässlich und erfolgreich sind. Dies erfordert nicht nur ein tiefes Verständnis für die Flugtechniken, sondern auch eine präzise Kenntnis der Umgebung und der zu dokumentierenden Objekte.



Oft gibt es für solche Aufnahmen nur ein kurzes Zeitfenster, daher können kleine Fehler und Unachtsamkeiten später möglicherweise schwerwiegende Auswirkungen haben. Automatisierte Flugplanungen ermöglichen zwar das Abdecken großer zusammenhängender Flächen, für eine erfolgreiche 3D-Rekonstruktion sind jedoch oft zusätzliche Aufnahmestrategien erforderlich, um präzise und detaillierte Ergebnisse zu gewährleisten.

### 5.1. Flugvorbereitung, Absicherung und Teambesprechung

In Abschnitt 4.1.1 des vorhergehenden Kapitels haben wir bereits die wesentlichen Regeln für den sicheren Umgang mit Multicoptern vorgestellt und anhand verschiedener Beispiele verdeutlicht.

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

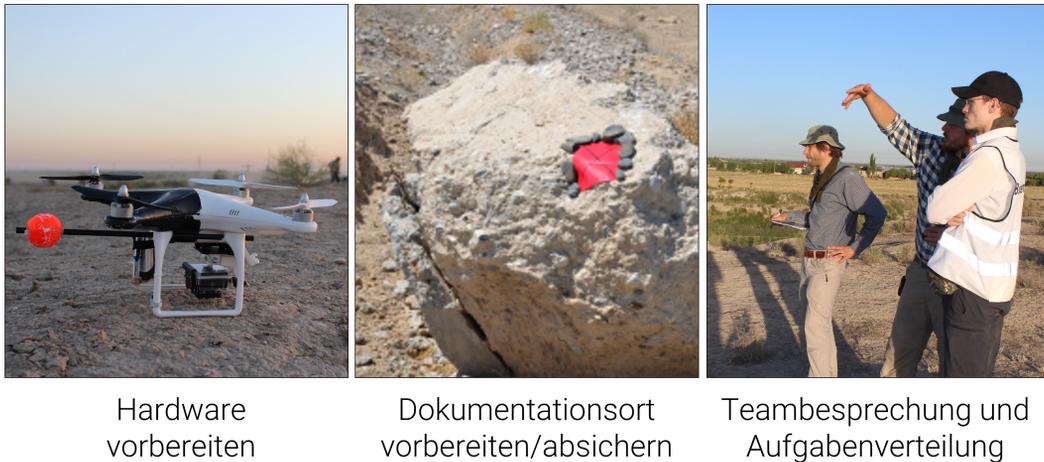


Abbildung 5.1.: Hier sind Aufnahmen bei einer Dokumentationskampagne in Bukhara (Usbekistan) aus dem Jahr 2015 zu sehen. Links: Im ersten Schritt wird die Hardware vorbereitet. Dazu zählen eine ganze Reihe von Maßnahmen, vom Aufladen der Akkus über die Säuberung der Kamera bis hin zur Vorbereitung der Protokolle. Mittig: Der Dokumentationsort muss abgesichert werden, denn es gilt bei allen Multicopterflügen: Safety first! Niemand darf während der Aufnahmen gefährdet werden. Passpunkte werden bei Bedarf positioniert und vor oder nach der Befliegung eingemessen. Rechts: Die Besprechung im Team stellt ebenfalls einen wichtigen Schritt vor jeder Befliegung dar. Die Aufgaben der Beteiligten werden abgesprochen, die geplanten Flugmanöver werden vorgestellt und die Kommunikation während der Aufnahmen wird geregelt.

An dieser Stelle sollten wir uns den ersten Punkt dieser Liste genauer ansehen und näher untersuchen, was sich dahinter verbirgt:

### Flugvorbereitung und Absicherung

Das Befliegungsareal ist abgesichert und alle Beteiligten sind über die geplante Befliegung informiert.

Zu dieser Regel gehören je nach Dokumentationsort sehr unterschiedliche Dinge, die berücksichtigt und vorbereitet werden müssen. Die notwendigen Schritte lassen sich übersichtlich durch die folgenden drei Teile beschreiben (siehe Abb. 5.1):

- ▶ Vorbereitung des Multicopters und der Kamera,
- ▶ Absicherung und Vorbereitung des Dokumentationsortes und
- ▶ eine ausführliche Teambesprechung durchführen.

Die Verantwortung dieser Punkte liegt beim Piloten. In einem gut eingespielten Befliegungsteam können die Aufgaben verteilt und mithilfe von Checklisten durchgeführt werden. Das erspart Zeit, minimiert das Risiko und erhöht die Erfolgsaussichten für die Ergebnisse einer Befliegungskampagne.



Abbildung 5.2.: Links: Oben sehen wir eine typische Situation der Flugvorbereitungsphase in der Mongolei 2018. Die Multicopter werden geprüft und vorbereitet. Darunter sehen wir weitere Schritte, die oft notwendig sein können. Die Platzierung der Passpunkte in Usbekistan 2015, das Einmessen der verteilten Passpunkte und die Dokumentation der Passpunkte auch über Fotos für das schnellere Wiederfinden in großen Flächenmodellen. Rechts: Zur Vorbereitung gehört immer eine Teambesprechung mit den geplanten Befliegungen, der Verteilung der Aufgaben und Rollen. Rechts oben sehen wir eine Situation, in der das Pilotenteam von ungeplanten Besuchern, wie hier in der Mongolei 2017, abgeschirmt werden muss. Eine Abstimmung vorab regelt auch solche Situationen. (Fotos von Niklaas Görsch)

### 5.1.1. Multicopter und Kamera vorbereiten

Zu den Flugvorbereitungen zählen viele wichtige Punkte bezüglich der verwendeten Hardware, die vor jedem Flug in einer Checkliste abgearbeitet werden sollten (siehe Abb. 5.2 links oben):

- ▶ Sind die Propeller sauber montiert und die Motoren intakt?
- ▶ Sind alle Erweiterungen des Multicopters sicher angebracht und einsatzbereit?
- ▶ Sind die Akkus (Multicopter, Controller) vollgeladen und damit der Multicopter einsatzbereit?
- ▶ Ist die Kameralinse gereinigt und die Kameraaufhängung intakt?
- ▶ Sind die Speicherkarten leer und eingesetzt?
- ▶ Ist der Aufnahmemodus der Kamera wie geplant eingestellt?
- ▶ Sind die Akkus für die Kamera (falls eigenständige Stromversorgung) aufgeladen?
- ▶ Steht ein Protokoll für die Aufnahme Flüge bereit?

Es wäre doch sehr schade, wenn eine nahezu volle Speicherkarte am Ende einer Befliegung dafür verantwortlich ist, dass eine Aufnahmestrategie nicht vollständig durchgeführt werden konnte und wiederholt werden muss.

### 5.1.2. Absicherung und Vorbereitung des Dokumentationsortes

Bevor es zu einer Befliegung geht, müssen selbstverständlich die rechtlichen Fragen geklärt sein und eine schriftliche Zustimmung des Eigentümers vorliegen. Zur Absicherung des Dokumentationsortes können mehrere Punkte gehören, die sehr unterschiedlich sein können (siehe Abb. 5.2 links unten):

- ▶ Falls notwendig muss eine Absicherung des Befliegungsortes durch Absperrbänder oder andere Maßnahmen durchgeführt werden.
- ▶ Platzierung und Einmessen der Passpunkte (Vermessungspunkte) im Gelände.
- ▶ Alle Teammitglieder tragen gut sichtbare Sicherheitswesten und machen damit für alle Nichtbeteiligten deutlich, dass hier eine besondere Situation vorliegt und Obacht geboten ist.

Zu den Vorbereitungen des Dokumentationsortes gehört im Vorfeld auch die Entscheidung, ob eine Georeferenzierung des zu erstellenden Struktur- oder Geländemodells automatisiert möglich ist, oder ob Passpunkte im Gelände platziert werden (siehe Kap. 7).

### 5.1.3. Teambesprechung und Aufgabenverteilung

Bevor es richtig losgehen kann, muss jeder Teilnehmer Bescheid wissen, welche Rolle er bei der Befliegung übernimmt und wie die Befliegung geplant ist (siehe Abb. 5.2 rechts). Zu den Rollen und Aufgaben gehören:

- ▶ Pilot: Wer fliegt den Multicopter?
- ▶ Gibt es einen Co-Piloten, der die Kommunikation mit den anderen Beteiligten übernimmt oder den Multicopter im Auge behält?
- ▶ Wer ist für die Absicherung des Dokumentationsortes verantwortlich?
- ▶ Wie findet die Kommunikation während der Befliegung statt?
- ▶ Wer kümmert sich bei mehreren Flügen um die Bereitstellung der Akkus und Speicherkarten bzw. überwacht die abkühlenden Akkus und lädt diese gegebenenfalls wieder auf?
- ▶ Wer übernimmt die Aufgabe des Protokollanten?
- ▶ Tragen alle Beteiligten eine gut sichtbare Warnweste?

Das ist aus vielerlei Gründen sehr wichtig. Zum einen können mehrere Augen die Befliegung von verschiedenen Perspektiven überwachen und während oder nach der Befliegung nützliche Hinweise geben. Zum anderen können unerwartete Ereignisse, wie z. B. das Auftauchen unbeteiligter Personen, durch das Team besser abgefangen werden (siehe Situation in Abb. 5.2 rechts oben).

Hier können wir uns wieder eine wichtige Regel ableiten:

Kommunikation findet über Co-Piloten statt

Der Pilot darf bei der Befliegung nicht gestört werden und die Kommunikation zu den anderen Beteiligten läuft ausschließlich über den Co-Piloten.

Klare Absprachen und eingespielte Abläufe beschleunigen die Dokumentationsaufnahmen nicht nur, sie sorgen auch für Sicherheit.

## 5.2. Händische Aufnahmestrategien im Idealfall

In den meisten Fällen wird eine Kombination aus automatischer Befliegung zur gesamtflächigen Georeferenzierung und händischer Befliegung zur Aufnahme komplexer Strukturen zum Erfolg führen. Dazu werden zunächst grundlegende Aufnahmestrategien im Idealfall und deren Bedeutung im Kontext der 3D-Rekonstruktion vorgestellt.

### 5.2.1. Orthogonale versus orientierte Aufnahme Flüge

Im Normalfall ist eine Kamera unterhalb eines Multicopters montiert, so dass wir mit dieser Kamera Objekte und Strukturen nur von oben und der Seite aufnehmen können. Für die weitere Klassifizierung der Aufnahmestrategien unterscheiden wir Aufnahme Flüge, bei denen entweder eine senkrechte (orthogonale) oder eine angewinkelte (orientierte) Kameraposition während der kompletten Aufnahme vorliegt (siehe Abb. 5.3).

Eine angewinkelte Kamera hat den Vorteil, Objekte und Strukturen von der Seite zu sehen. Da wir in einer Flugrichtung aber nur eine Seite sehen können, müssen wir in den meisten Situationen mehr Flüge durchführen, als bei einer senkrecht montierten Kamera.

Wenn das Ziel eine vollständige Aufnahme eines Dokumentationsortes ist, entscheiden die strukturellen Eigenschaften über die Wahl der Aufnahmestrategie. Das Ziel kann ein Orthofoto, ein 2.5D-Modell oder ein 3D-Modell sein. Für die ersten beiden Fälle genügen oft orthographische Aufnahmestrategien. Weist der Dokumentationsort einen höheren Komplexitätsgrad auf, denken wir an würfelfähnliche, einfache Gebäude, dann benötigen wir bereits orientierte Aufnahmestrategien.

Herausfordernd werden Strukturen, die bspw. Überhänge aufweisen, bei denen muss dann eine zusätzliche Kamera eingesetzt werden. Hier ist es auch entscheidend, am Ende die Bildersets zusammenzubringen und an die notwendigen Überlappungen zu denken.

### 5.2.2. Orthogonal-Grid-Flight und Orthogonal-Double-Grid-Flight

Das entscheidende Kriterium für die erfolgreiche Bestimmung einer 3D-Position aus einer Menge von Bildern ist die Überlappung der Bildinhalte. Erst wenn wir ein Bildelement im

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

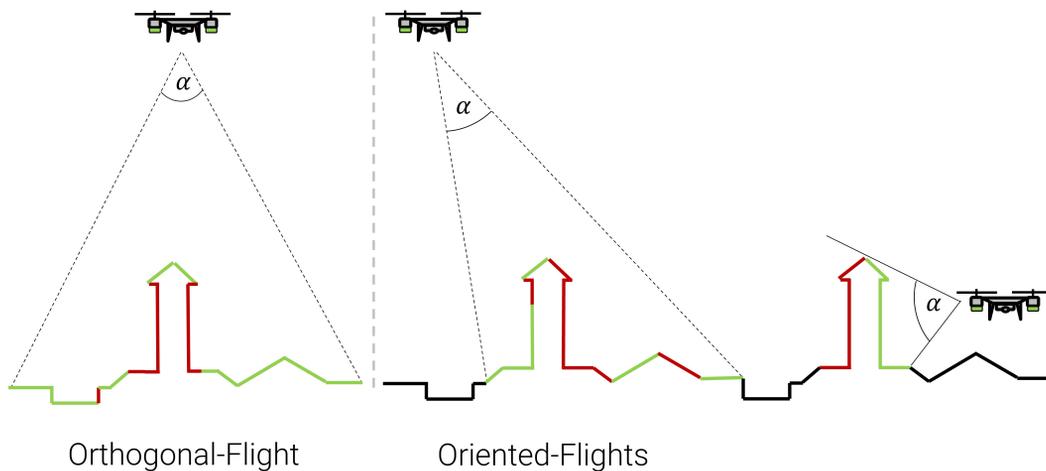


Abbildung 5.3.: Links: Beim Orthogonal-Flight ist die Kamera senkrecht nach unten orientiert und deckt damit die oberen Bildbereiche sehr gut ab. Rechts: Bei den Oriented-Flights ist die Kamera angewinkelt und kann je nach Winkel Objekte von schräg oben oder der Seite aufnehmen.

Kontext zu anderen Bildelementen aus verschiedenen Perspektiven gesehen haben, können wir daraus 3D-Punkte bestimmen. Wenn wir in einer Flugrichtung unterwegs sind und Bilder systematisch aufnehmen, können wir die Überlappung in eine Richtung selbstständig kontrollieren. Um jetzt auch in der zweiten Richtung eine Überlappung zu garantieren, muss ein Parallelflug die entsprechende Bildüberlappung aufweisen (siehe Abb. 5.4 rechts).

### Aufnahmestrategie: Orthogonal-Grid-Flight

Um dieses Konzept zu verdeutlichen, betrachten wir den orthogonalen Flug als Beispiel. Durch einen parallel versetzten Rückflug kann bereits die erforderliche Überlappung gewährleistet werden. Auf diese Weise können rechteckige Flächen systematisch befliegen und aufgenommen werden. Diese spezifischen Aufnahmestrategien werden als Orthogonal-Grid-Flights bezeichnet und repräsentieren die grundlegendste Vorgehensweise (siehe Abb. 5.4 links).

### Aufnahmestrategie: Orthogonal-Double-Grid-Flight

Um die Überlappung der verschiedenen Flugbahnen zu erhöhen und damit die Rekonstruktion zu verbessern, kann eine weitere um  $90^\circ$  versetzte Befliegung durchgeführt werden. Diese Aufnahmestrategie nennen wir Orthogonal-Double-Grid-Flight (siehe Abb. 5.4 mittig). Die doppelte Abdeckung des Aufnahmegebietes ist besonders bei schwierigen Aufnahmesituationen vorzuziehen, bei denen bspw. durch Wind schlechte Einzelaufnahmen oder leicht versetzte Flugbahnen auftreten können. Der zeitliche Aufwand verdoppelt sich allerdings bei der Aufnahme und erhöht die Berechnungskomplexität oft quadratisch.

## 5.2. Händische Aufnahmestrategien im Idealfall

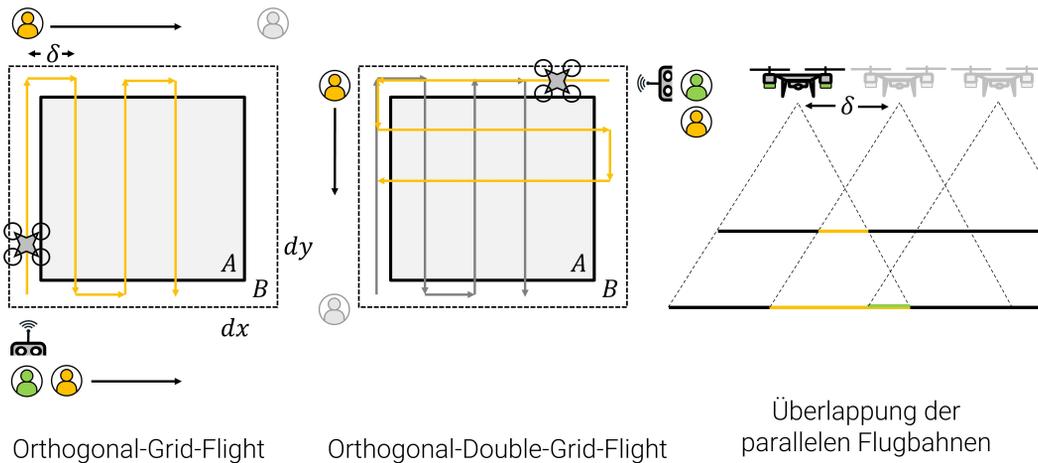


Abbildung 5.4.: Links: Beim Orthogonal-Grid-Flight werden parallele Bahnen hin und zurück geflogen. Obwohl in den Bildaufnahmen Areal  $B$  mit Bildern aufgenommen wurde, wird aufgrund der fehlenden Überlappung die kleinere Fläche  $A$  am Ende des Rekonstruktionsprozesses geliefert. Der Pilot in grün und der Co-Pilot in gelb wandern zusammen entlang der Flugbahnen. Am Ende der Flugbahnen kann idealerweise ein weiteres Teammitglied die Überwachung der Aufnahmen und des Dokumentationsbereiches übernehmen. Es können je nach Komplexität und Größe des Dokumentationsortes noch weitere Augen den Prozess überwachen. Mitte: Beim Orthogonal-Double-Grid-Flight werden weitere Flüge um  $90^\circ$  gedreht aufgenommen. Rechts: Der Abstand der Flugbahnen in Abhängigkeit zur Flughöhe relativ zum Boden bestimmt über die vorhandene Bildüberlappung. Hier sehen wir den Zusammenhang zwischen den Überlappungen der parallelen Flugbahnen: Wenn ein Pixel als 3D-Position auch aus den parallelen Flugbahnen sicher bestimmt werden soll, muss die prozentuale Überlappung groß genug gewählt werden, um die Schnittmenge von drei Bahnen zu erreichen (grün dargestellt).

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

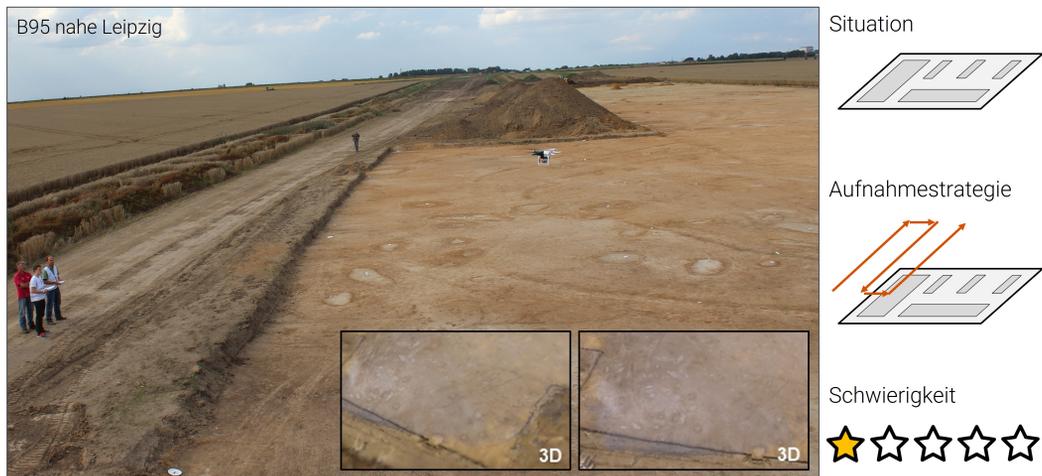


Abbildung 5.5.: Hier sehen wir eine geeignete Situation einer großen flachen Fläche für den Orthogonal-Grid-Flight, aufgenommen 2013 beim Straßenbau an der B95 in der Nähe von Leipzig mit dem Landesamt für Archäologie Sachsen. Die Befliegung eines flachen Dokumentationsortes ist mit Abstand am einfachsten.

### Anwendungsorte für Orthogonal-Grid-Flight und Orthogonal-Double-Grid-Flight

Die beiden sehr ähnlichen Aufnahmestrategien, Orthogonal-Grid-Flight und Orthogonal-Double-Grid-Flight, sind besonders für relativ flache Geländestrukturen ohne signifikante Höhenunterschiede geeignet. Sie werden angewendet, um Orthofotos oder 2.5D-Modelle zu erstellen, die eine genaue Darstellung der Oberfläche ermöglichen. Gut geeignet für diese Aufnahmestrategien war die Situation an der B95 in der Nähe von Leipzig, die in Kooperation mit dem Landesamt für Archäologie in Sachsen im Jahr 2013 aufgenommen wurde (siehe Abb. 5.5).

Bei den archäologischen Untersuchungen konnten hier Siedlungsstrukturen endneolithischer Kulturen nachgewiesen werden, wie in den Publikationen von Dalidowski et al. nachzulesen ist [50, 51].

### 5.2.3. Oriented-Grid-Flight und Oriented-Double-Grid-Flight

Bei einer angewinkelten Kameraposition ist es offensichtlich, dass möglicherweise nur eine Seite der Objekte und Strukturen korrekt erfasst wurde und es notwendig sein kann, alle vier Seiten aufzunehmen. Um diese Überlegung in eine konkrete Aufnahmestrategie umzusetzen, betrachten wir den parallelen Rückflug als Aufnahmezug für die Rückseite, während der ursprüngliche Flug lediglich die Vorderseiten erfasst (siehe Abb. 5.6). Auf diese Weise gewährleisten wir eine umfassende und präzise Erfassung aller Seiten der Objekte und Strukturen.

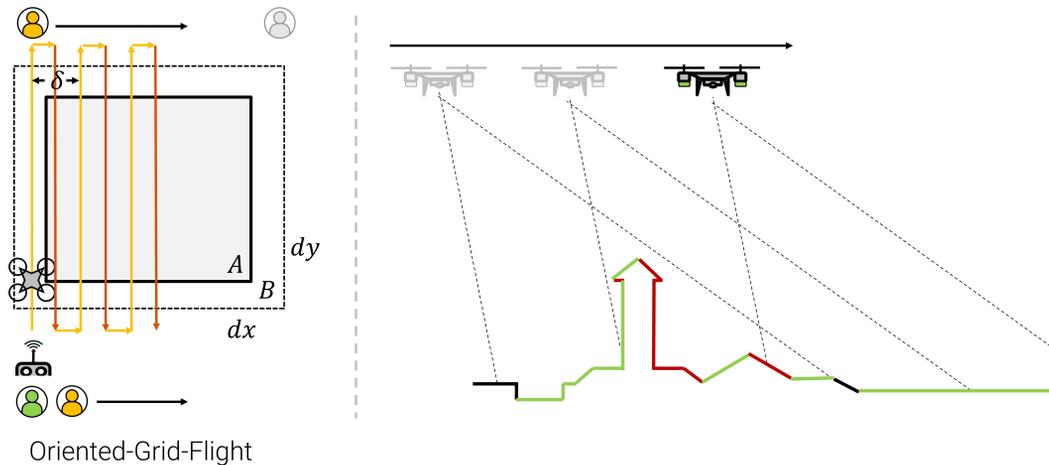


Abbildung 5.6.: Links: Beim Oriented-Grid-Flight kommen zwei Besonderheiten hinzu: Auf der einen Seite müssen wir den Kamerawinkel beim Start- und Endpunkt einer Flugbahn berücksichtigen, was hier durch einen früheren Flugstart im Vergleich zum Orthogonal-Grid-Flight dargestellt ist. Auf der anderen Seite müssen wir beim Rückflug, bei dem die Kamera in die entgegengesetzte Richtung zur ersten Bahn zeigt, enger fliegen. Das bedeutet, dass die Bahnen mit der Kamera in eine Richtung den gleichen Abstand aufweisen müssen, wie beim Orthogonal-Grid-Flight. Wir haben bei dieser Aufnahmestrategie also, aufgrund der durch engere Flugbahnen erzeugten Überlappung des aufgenommenen Materials, mehr als doppelt soviel Strecke zurückzulegen. Rechts: Hier sehen wir die Aufnahmen in einer Bahn, bei der eine Seitenansicht aufgenommen wird. Hier müssen wir gegebenenfalls mit dem Oriented-Double-Grid-Flight alle vier Richtungen mit einer Aufnahmestrategie abdecken.

### Aufnahmestrategie: Oriented-Grid-Flight

Wichtig ist hier die Halbierung des Abstandes zwischen den Flugbahnen, im Vergleich zu den Grid-Flügen aus Abschnitt 5.2.2, da die Überlappung analog zum Orthogonal-Grid-Flight nur für eine Richtung gilt. Das bedeutet, dass wir mit einem Flug zwei Seiten aufnehmen können, aber den doppelten Flugweg und damit die doppelte Flugzeit benötigen.

### Aufnahmestrategie: Oriented-Double-Grid-Flight

Wenn wir die Seitenansichten vervollständigen wollen, müssen wir zusätzlich einen weiteren um  $90^\circ$  gedrehten Oriented-Grid-Flight durchführen. Damit verdoppelt sich allerdings wieder der Aufwand bei der Aufnahme. Im Vergleich zum Orthogonal-Grid-Flight haben wir also die vierfache Anzahl von Einzelaufnahmen und benötigen demnach auch die vierfache Zeit beim Aufnehmen.

In Abschnitt 5.2.4 wird gleich erläutert, dass sich die Erhöhung der Bildanzahl im 3D-Rekonstruktionsprozess quadratisch auf den Berechnungsprozess auswirkt und was das in der Praxis bedeutet.

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

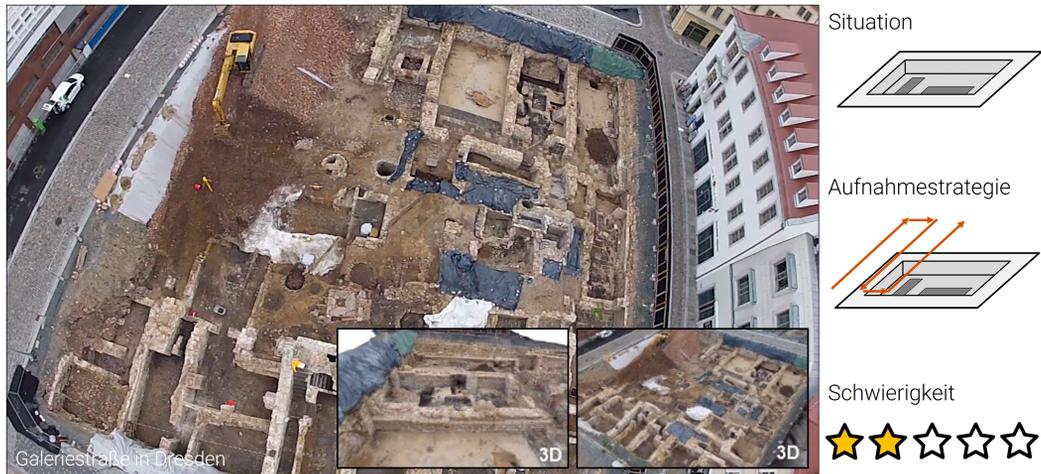


Abbildung 5.7.: Diese Ausgrabung in der Galeriestraße in Dresden stellt eine typische Situation für eine solche Befliegung dar. Die Grabung des Landesamtes für Archäologie in Sachsen wurde durch mehrere Befliegungskampagnen in den Jahren 2013-2014 begleitet. Der Ausgrabungsbereich stellt eine Vertiefung dar. Hier müssen wir, um gerade die innen liegenden Seitenwände aufzunehmen, eine Aufnahmestrategie wählen, die eine angewinkelte Kameraposition beinhaltet. In diesem Fall wurde ein Oriented-Double-Grid-Flight ausgewählt. Die Schwierigkeit erhöht sich aufgrund der erhöhten Strukturkomplexität aber auch aufgrund der Lage innerhalb der Stadt.

### Anwendungsorte für Oriented-Grid-Flight und Oriented-Double-Grid-Flight

Die Aufnahmestrategien Oriented-Grid-Flight und Oriented-Double-Grid-Flight sind besonders für anspruchsvolle Geländestrukturen geeignet, wenn das Ziel darin besteht, detaillierte 3D-Modelle zu erstellen. Sie ermöglichen die präzise Erfassung und Rekonstruktion von komplexen Geländeformen wie Grabungsschnitten oder erhöhten Strukturen (siehe Abb. 5.7). Diese Strategien bieten eine optimale Lösung, um feine Details und die räumliche Geometrie solcher Objekte und Räume umfassend darzustellen.

#### 5.2.4. Vergleich von Aufnahmeaufwand und Berechnungskomplexität

Für die Aufnahmeplanung ist jetzt nicht nur der zeitliche Aufwand für die Flüge interessant, sondern möglicherweise auch der resultierende Zeitaufwand für die anschließende 3D-Rekonstruktion, den wir hier nicht außer Acht lassen sollten (siehe Tab. 5.1).

Nehmen wir bspw. bei einem Orthogonal-Grid-Flight mit einer vorab geplanten Überlappung in beiden Richtungen 1000 Bilder in 15 Minuten auf und benötigen zur Berechnung des 3D-Modells eine Stunde, dann würde ein Double-Grid-Flight zwar den doppelten Zeitaufwand mit 30 Minuten für die Flüge bedeuten, aber durch die 2000 aufgenommenen Einzelbilder auch eine Berechnungszeit statt der doppelten Zeit sogar möglicherweise die zehnfache Zeit. Es gibt also einen linearen Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Bildanzahl und der Zeitkomplexität für die Aufnahme sowie einen quadratischen Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Bildanzahl und der Verarbeitungszeit für die Rekonstruktion.

Tabelle 5.1.: In dieser Tabelle starten wir in der ersten Zeile mit dem Orthogonal-Grid-Flight, bei dem  $n$  Einzelbilder aufgenommen werden. Die dafür notwendige Zeit steht im linearen Verhältnis zur Bildanzahl. Das bedeutet in etwa, dass bei doppelter Bildanzahl die doppelte Zeit benötigt wird. Anders verhält es sich bei der 3D-Rekonstruktion, bei der alle Bilder miteinander in Zusammenhang gebracht werden müssen, hier benötigen wir quadratischen Aufwand. Wenn jetzt die Orthogonal-Double-Grid-Flight-Variante im Vergleich dazu verwendet wird, verdoppelt sich die Bildanzahl und damit die notwendige Zeit, aber hier muss klar sein, dass der Aufwand für die Berechnung quadratisch wächst.

| Aufnahmestrategie             | Anzahl aufgenommener Einzelbilder | Zeitkomplexität für Aufnahme | Zeitkomplexität für 3D-Rekonstruktion |
|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Orthogonal-Grid-Flight        | $n$                               | $\Theta(n)$                  | $\Theta(n^2)$                         |
| Orthogonal-Double-Grid-Flight | $2 \cdot n$                       | $\Theta(n)$                  | $\Theta(n^2)$                         |
| Oriented-Grid-Flight          | $2 \cdot n$                       | $\Theta(n)$                  | $\Theta(n^2)$                         |
| Oriented-Double-Grid-Flight   | $4 \cdot n$                       | $\Theta(n)$                  | $\Theta(n^2)$                         |

### 5.2.5. Circle-Flight und Helix-Flight

Eine sehr wichtige Aufnahmestrategie ist der kreisförmige Flug um eine Struktur herum mit der Kamerarichtung zum Zentrum, bei nahezu gleichem Abstand. Diese Flugvariante ist sehr herausfordernd und erfordert ein hohes Maß an Konzentration und Übung (siehe Abb. 5.8 links). Auf verschiedenen Flughöhen und möglicherweise mit unterschiedlichen Kameraausrichtungen können mehrere Kreisflüge das Objekte bzw. die Struktur aufnehmen. Bei einer gleichmäßigen Umrundung mit leichtem Anstieg nach der ersten Runde haben wir die höchste Form der Aufnahmestrategie, den sogenannten Helix-Flight (siehe Abb. 5.8 rechts).

#### Anwendungsorte für Circle-Flight und Helix-Flight

Hier können beispielsweise Grabungsschnitte oder erhöhte Strukturen gut aufgenommen und rekonstruiert werden (siehe Abb. 5.9).

### 5.2.6. Kalibrierungsflug zur Kameraparameterschätzung

Im 3D-Rekonstruktionsprozess werden neben den äußeren auch die inneren Kameraparameter geschätzt (siehe Abschn. 2.6.3). Wenn wir eine Kamera mit fester Brennweite unverändert verwenden, ist die Bestimmung der Kameraparameter besonders genau. Auch verschiedene Aufnahmestrategien mit vielen Kreuzungspunkten zwischen den Flugbahnen können die Parameter sehr positiv beeinflussen. Eine besonders effektive Aufnahmestrategie, die nicht nur die Kreuzungspunkte betrachtet hat, sondern auch verschiedene Flughöhen zusammenbringt, wurde von James und Robson 2014 untersucht und vorgestellt [78].

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

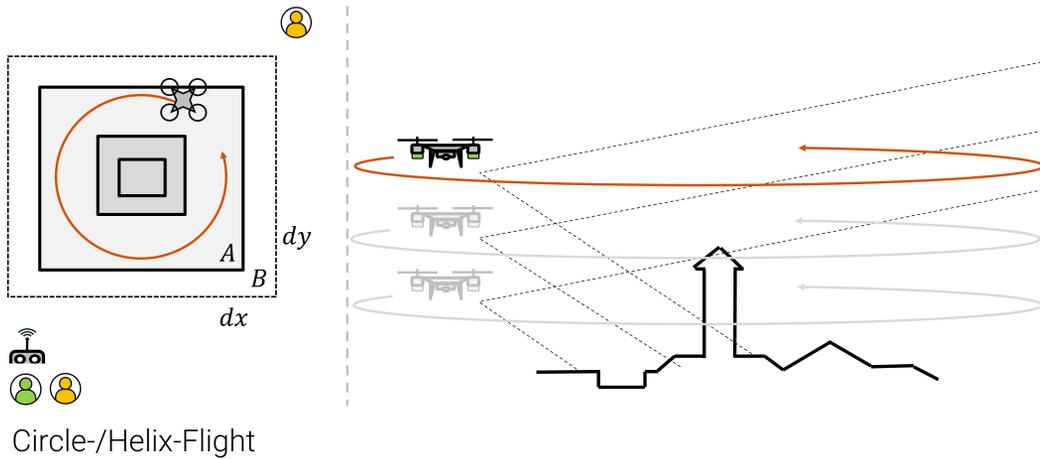


Abbildung 5.8.: Link: Mit der Kamerarichtung nach innen drehen wir kreisförmig um das freistehende Objekt herum. Da das Flugmanöver sehr anspruchsvoll ist, bewegt sich der Pilot dabei nicht von der Stelle. Die gegenüberliegende Seite muss abgesichert werden. Rechts: Beim Circle-Flight wird bei gleicher Kameraorientierung und konstanter Höhe um das freistehende Objekt geflogen. Verschiedene Aufnahmen mit unterschiedlichen Höhen oder die Kombination zum Helix-Flight liefert am Ende die notwendigen Videodaten.

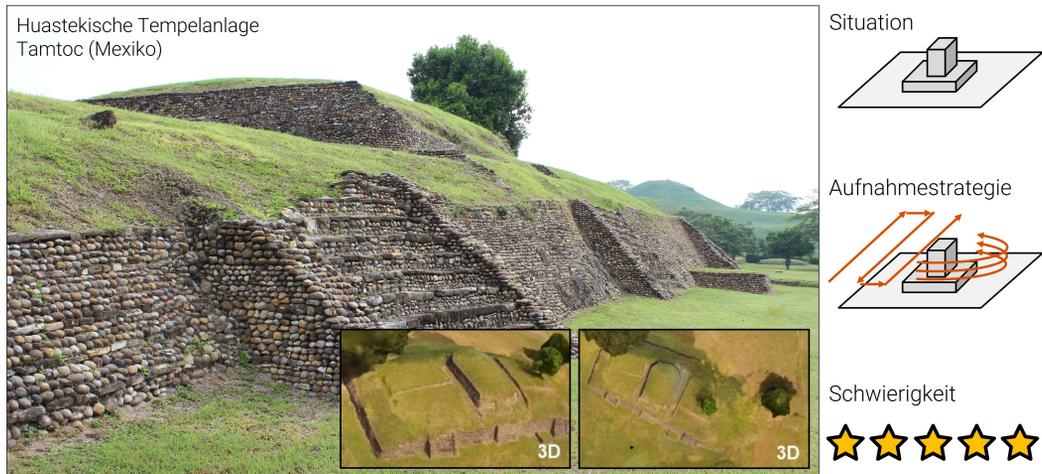


Abbildung 5.9.: Erhöhte, freistehende Strukturen erfordern oft eine aufwendige Aufnahmestrategie. In diesem Fall sehen wir eine huastekische Tempelanlage in Tamtoc (Mexiko), die teilweise Ausmaße von über 100 Metern besitzt. Die Rekonstruktion dieser und weiterer Anlagen und dem umliegenden Gebiet wurde im Jahr 2013 in Kooperation mit der Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) und der Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) durchgeführt. Für die händische Aufnahme mit einer DJI Phantom 1 wurden mehrere Helix-Flights in Kombination mit einem Oriented-Double-Grid-Flight gewählt.

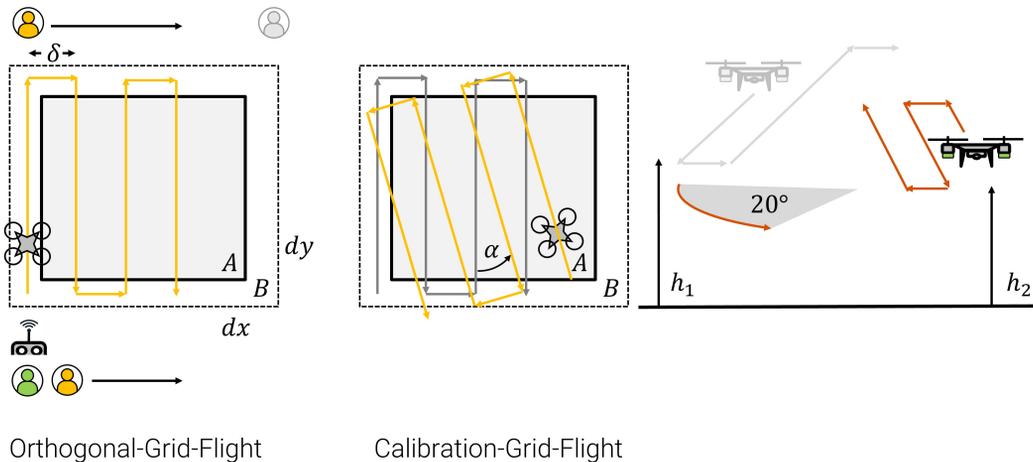


Abbildung 5.10.: Links: Zunächst wird ein Orthogonal-Grid-Flight als Standardflug mit einer konstanten Flughöhe  $h_1$  aufgenommen. Mitte: Anschließend wird ein entgegengesetzter Flug auf den gleichen Flugbahnen um  $\alpha = 20^\circ$  rotiert und mit einer Flughöhe von  $h_2$  (etwa 5% Höhenunterschied zum ersten) durchgeführt. Rechts: Hier sehen wir die Flugmanöver noch einmal schräg von der Seite.

Die Analyse<sup>1</sup> der Flugstrategie in OpenDroneMap ist sehr anschaulich und Basis der Abbildung 5.10. Nach einer solchen Aufnahmestrategie unter Einsatz einer Kamera mit fest gewählter Brennweite können wir nach dem Rekonstruktionsprozess die geschätzten inneren Kameraparameter auch für andere Aufnahmestrategien verwenden.

### 5.3. Händische Aufnahmestrategien in der Realität

In den letzten Abschnitten wurden verschiedene Aufnahmestrategien in Bezug auf ideale Eigenschaften der Dokumentationsorte vorgestellt. In der Realität weisen Dokumentationsorte allerdings sehr viel komplexere Strukturen und Eigenschaften auf, was eine Kombination verschiedener Aufnahmestrategien erfordert. Als Beispiel betrachten wir die Dokumentationskampagne in Punta di Zambrone (Italien) im April 2014, die in Kooperation mit der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Wien und der Universita Federico II in Neapel unter Leitung von PD Dr. Reinhard Jung und Prof. Marco Pacciarelli durchgeführt wurde (siehe Abb. 5.11).

Später in Kapitel 11 werden wir sehen, wie sich automatisierte und händische Aufnahmestrategien erfolgreich kombinieren lassen.

<sup>1</sup><https://www.opendronemap.org/2019/09/self-calibration-of-cameras-from-drone-flights/>

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

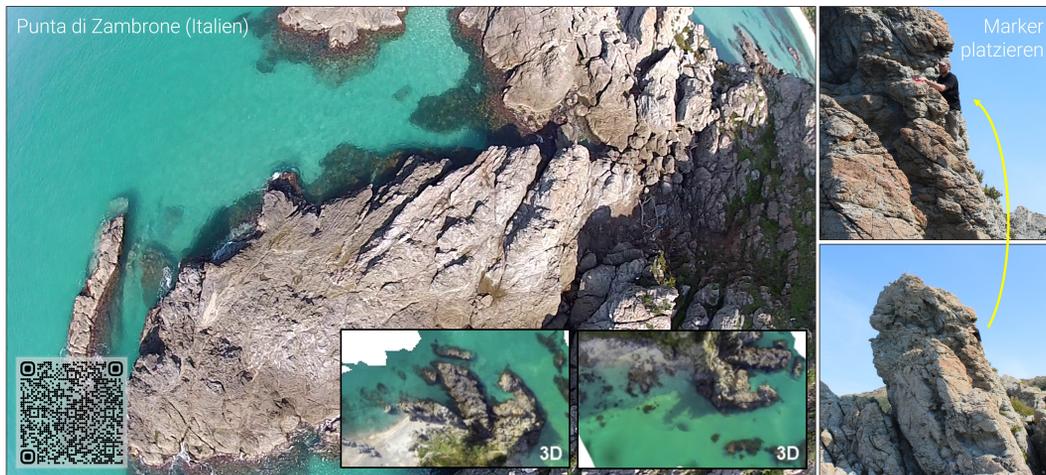


Abbildung 5.11.: Hier sehen wir eine komplexe Küstensituation, aufgenommen bei einer Dokumentationskampagne in Punta di Zambrone in Italien im April 2014 [76]. Die Herausforderung bestand darin, ausreichend viele Marker gut sichtbar zu platzieren und die Befliegung für parallele Aufnahmen zu planen und durchzuführen.

### 5.4. Checklisten, Protokolle und Flugnachbereitung

Für einen sicheren und möglichst reibungslosen Ablauf einer Dokumentationsbefliegung ist die Abarbeitung von Checklisten und das Führen von Protokollen unersetzbar. So ist jede Aufnahme auch jederzeit nach einem Flug einem konkreten Piloten zuzuweisen. Gut geführte Protokolle sind gerade bei langen Dokumentationskampagnen für die spätere Zuordnung extrem wichtig, da innerhalb kürzester Zeit tausende von Aufnahmen entstehen können (siehe Abb. 5.12 links).

#### 5.4.1. Protokollführung für Flugaufnahmen

Ob ein Protokoll<sup>2</sup> digital oder auf dem Papier geführt wird, ist erst einmal nicht wichtig. Es gibt verschiedene Apps, in denen die Protokollführung vorgenommen werden kann. Ein Protokoll kann auch je nach Bedarf an eine Dokumentationskampagne angepasst werden. Wichtig sind allerdings folgende Inhalte, die für jede Durchführung relevant sind:

- ▶ Datum und Ort
- ▶ Flug-ID
- ▶ Multicoptergerät und Pilot
- ▶ Kameraeinstellungen
- ▶ Start- und Endzeit der Befliegung

<sup>2</sup>Download: [https://www.vividus-verlag.de/3d\\_rekonstruktion](https://www.vividus-verlag.de/3d_rekonstruktion)



Abbildung 5.12.: Links: Bei der Protokollführung sind Ruhe und Sorgfalt gefordert. Dinge, die unsauber oder falsch im Protokoll vermerkt wurden, lassen sich, wenn überhaupt, oft nur mit großer Mühe rekonstruieren. So werden wie in diesem Beispiel gezeigt, auch die verwendeten Akkus im Protokoll vermerkt. Rechts sehen wir ein Protokoll, geführt bei der Dokumentationskampagne in der Mongolei 2018, bei der am Ende 204 Einzelflüge durchgeführt wurden, um mehr als 50 km<sup>2</sup> aufzunehmen (Fotos von Niklaas Görsch).

- ▶ LiPo-ID und Restkapazität
- ▶ Wind (in km/h) und Besonderheiten

Falls mehrere Geräte parallel zum Einsatz kommen, kann im Protokoll der Copter vermerkt werden oder pro Gerät wird jeweils ein eigenes Protokoll geführt.

Die korrekten Start- und Endzeiten, sowie eine zu Beginn der Kampagne durchgeführte Synchronisierung der verschiedenen Systemuhren in Bezug auf den Aufnahmeort (Copter, Handgelenk, Smartphone, Tablet, Rechner), erleichtern im Nachgang die Zuordnung der Bildaufnahmen zu den Flügen und damit zu den Missionen und Befliegungsarealen. Mit der LiPo-ID haben wir die Anzahl der Ladungszyklen im Blick und mit der Restkapazität ist das Team darauf sensibilisiert, den Akku nicht bis an die Grenze zu bringen. Hier können wir auch eine gute und sichere Flugplanung erkennen, die auf Sicherheit ausgelegt ist. Die maximale Flugzeit bei einer Phantom 4 Pro wird mit über 20 Minuten angegeben.

Bei der Missionsplanung in der Mongolei wurde berücksichtigt, dass sich der Befliegungsort ca. 1500 Meter über dem Meeresspiegel befindet und mit Temperaturen zwischen 5 und 15 Grad zu rechnen ist. Die Missionen in der Mongoleikampagne 2018 (siehe Abb. 5.12 rechts) wurden daher so geplant, dass eine Befliegung in weniger als 12 Minuten durchgeführt werden konnte, um das zu berücksichtigen.

Unter Besonderheiten können Dinge eingetragen werden, die direkt mit der Aufnahme zu tun haben, bspw. falls ein Flug unterbrochen und wiederholt werden musste oder es einen Wetterwechsel gab. Dann ist eine besondere Aufmerksamkeit den aufgenommenen Daten zu widmen (siehe Abb. 5.13). Eine gute Strategie ist es, ausreichend Speicherkarten dabei zu haben und diese als weitere Sicherungskopie aufzubewahren.

## 5. Aufnahmestrategien bei Befliegungskampagnen

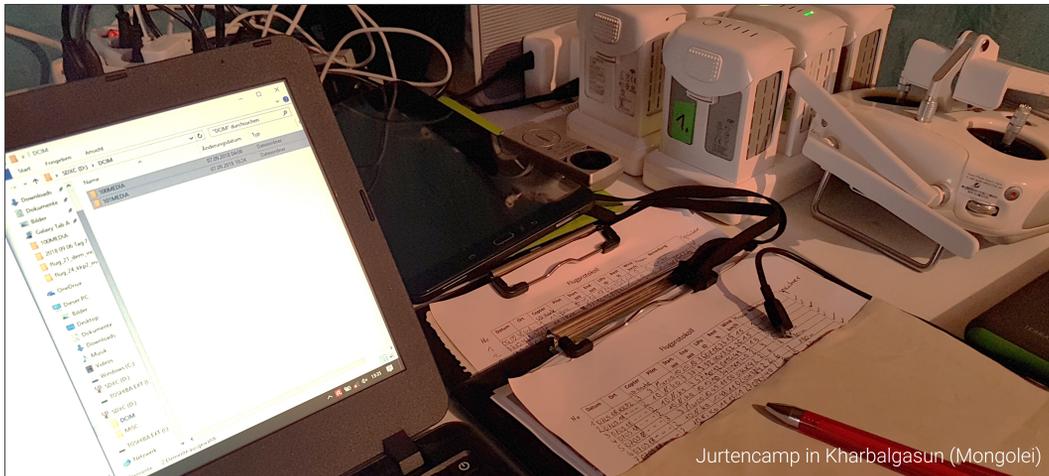


Abbildung 5.13.: Hier sehen wir die Nachbereitungsphase eines Dokumentationstages mit mehr als 30 Flügen in der Jurte. Die aufgenommenen Bilder werden mit Hilfe der Protokolle den geplanten Missionen zugeordnet, gesichtet und anschließend doppelt gesichert. Parallel dazu werden alle Akkus aufgeladen und für den nächsten Tag vorbereitet. Diese Phase dauert oft sehr lange und sollte ebenfalls sorgfältig durchgeführt werden (Foto von Marco Block-Berlitz).

### 5.4.2. Nachbereitungsphase direkt nach einer Flugaufnahme

Wir unterscheiden hier zwischen der direkten Flugnachbereitungsphase, die nach der Landung eines Multicopters stattfindet, und dem Nachbereiten eines kompletten Dokumentationstages mit mehreren Aufnahmevlügen.

Nachdem der Multicopter zu einer Landung angesetzt hat und das Gerät ausgeschaltet wurde, wird der Akku in jedem Fall gewechselt. Es ist weiterhin zu klären, ob auch die verwendete Speicherkarte mit den Aufnahmen zum Zweck der Datensicherung gewechselt wird oder im Copter verbleibt. Vor Flügen in der Nähe von Wasser oder bei anderen unklaren Situationen, die ein Risiko für die bisher aufgenommenen Daten darstellen, sollten die Speicherkarten auf jeden Fall durch einen Wechsel gesichert werden.

#### Prüfung und Vervollständigung des Protokolls

Die Protokolle sind oft die einzigen Zeugnisse von Ort und Zeit der Datenaufnahme und müssen geprüft, vervollständigt und gesichert werden.

Wichtig bei der Flugnachbereitungsphase ist auch die Vervollständigung des Protokolls. Hier ist auch zu klären, ob der Pilot eine Pause benötigt und die Aufgabenverteilung gegebenenfalls gewechselt wird. In einem gut funktionierenden Team kann jedes Mitglied prinzipiell jede Aufgabe übernehmen und die Abstimmung untereinander funktioniert.

### 5.4.3. Nachbereitungsphase eines Dokumentationstages

Typischerweise werden für die größere Befliegungen mehrere Aufnahmetage benötigt. Hier ist es ganz besonders wichtig, nach einem erfolgreichen Aufnahmetag Daten zu sichern und die Geräte für den nächsten Tag vorzubereiten. Nach einem Dokumentationstag ist die doppelte Sicherung der aufgenommenen Daten und damit die korrekte Zuordnung der aufgenommenen Bilder oder Videos zu den Missionen ein wichtiger und entscheidender Faktor.

Hier dürfen wir nichts dem Zufall überlassen und das Risiko eines Datenverlustes minimieren:

#### Datenprüfung und multiple Datensicherung

Das Prüfen und mehrfache Sichern der Daten nach einem Dokumentationstag ist ein wichtiger Bestandteil der Dokumentationsarbeit und dessen Bedeutung darf nicht unterschätzt werden.

Während der Datensicherung kann gleich eine Prüfung der Daten auf Vollständigkeit und Qualität vorgenommen werden. Was nützen die besten Flugmanöver bei bestem Aufnahme-wetter an einem wichtigen Aufnahmetag, wenn am Ende einer Dokumentationskampagne festgestellt wird, dass durch eine fehlerhafte Festplatte oder eine defekte Speicherkarte die ganze Arbeit umsonst war. Parallel zur Datensicherung kann die Zeit sinnvoll genutzt werden und die Geräte überprüft und die bspw. die Akkus geladen werden.

## 5.5. Übungsszenarien im Team durchführen

Für eine erfolgreiche Dokumentationskampagne ist der sichere und geübte Umgang mit dem Arbeitsgerät sehr wichtig. Gerade die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Flugmanöver und typischen Handgriffe, die in der Vorbereitungs-, der Aufnahme- und der Nachbereitungsphase notwendig sind, sollten regelmäßig geübt werden.

Erfahrende und ausgebildete Piloten können die in diesem Buch vorgestellten Übungsszenarien mit Anfängern durchführen und diese damit langsam auf den sicheren Umgang mit Multicoptern vorbereiten. Für alle vorgeschlagenen Übungsszenarien ist ein Workflow vorgesehen, der jedes Mal durchzuführen ist (siehe Anhang A). Die Reihenfolge der Arbeitsschritte ist dabei sehr wichtig, was der erfahrene Pilot erläutern kann und sollte.

Die vorgeschlagenen Flugszenarien sind im Anhang B zu finden und sollten in der angegebenen Reihenfolge und mit dazwischenliegenden Pausen durchgeführt werden. Ein regelmäßiger Umgang mit dem Arbeitsgerät oder mindestens vor einer Kampagne zur Auffrischung und Reaktivierung der Kenntnisse sollte zum Standardrepertoire eines geübten Piloten gehören. Ein paar Übungsszenarien mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden sind in Anhang C zu finden.

## 5.6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Kapitel 3 wurden die grundlegenden Aufnahmestrategien vorgestellt und erläutert. Dieses Wissen konnten wir nun in Befliegungskampagnen mit Multicoptern anwenden und dabei verschiedene manuelle Aufnahmestrategien kennenlernen. Bevor wir mit den Aufnahmen beginnen, führen wir eine gründliche Flugvorbereitung durch, sichern das Gebiet ab und halten Teambesprechungen ab. Für eine erfolgreiche, insbesondere aber sichere 3D-Dokumentation sind zudem Checklisten, Protokolle und eine sorgfältige Flugnachbereitung unverzichtbar.

Abschließend wurden im Kapitel auch Trainingsszenarien zur Vertiefung des erworbenen Wissens vorgestellt.

## 5.7. Verständnisfragen und Übungsaufgaben

Nach dem Lesen des Kapitels sollte die Beantwortung der folgenden Verständnisfragen helfen, die wichtigsten Aussagen noch einmal selbstständig zusammenzufassen.

1. Wer trägt die Verantwortung zur Vorbereitung des Multicopters, der Absicherung des Dokumentationsortes sowie der ausführlichen Teambesprechung?
2. Nennen Sie mindestens vier wichtige Punkte, die zur Vorbereitung des Multicopters und der Kamera gehören.
3. Welche Aufgaben hat der Co-Pilot bei den Befliegungen?
4. Erläutern Sie den Unterschied zwischen orthogonalen und orientierten Aufnahmeflügen.
5. Welche Aufnahmestrategien eignen sich für flache, großflächige Dokumentationsbereiche?
6. Warum gelten der Circle- und der Helix-Flight als besondere Herausforderung und wann werden diese Aufnahmestrategien benötigt?
7. Skizzieren Sie das Flugmuster, das sich für einen Kalibrierungsflug eignet.
8. Welche Aufgaben sind in der Nachbereitungsphase direkt nach einem Aufnahmeflug zu erledigen?
9. Warum ist die Nachbereitungsphase eines Dokumentationstages besonders wichtig und was muss getan werden?

Die Verständnisfragen sollten vollständig mit den Inhalten des Kapitels zu beantworten sein.

## 5.8. Praktikumsaufgaben

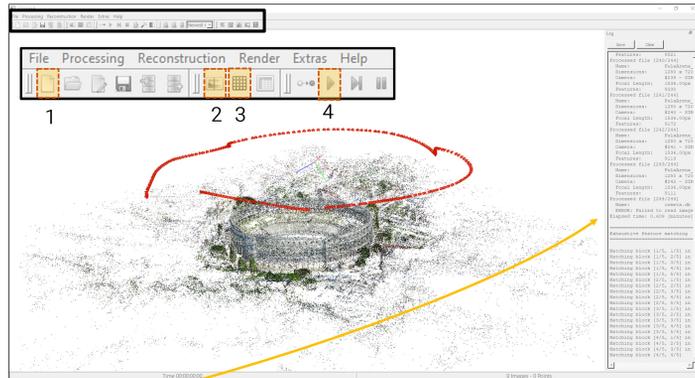
Im Fokus dieses Praktikumsteils steht die kostenlose Software COLMAP.

**AUFGABE 1:** Laden Sie sich die aktuelle Version 3.6 von COLMAP<sup>3</sup> als ZIP-Datei herunter und wählen Sie die Variante (mit oder ohne CUDA), die für Ihren Rechner geeignet ist. Nach dem Entpacken können wir die Datei COLMAP .exe direkt starten. Versuchen Sie sich noch einmal an folgendem Fotosatz<sup>4</sup> (242 Aufnahmen, DJI Phantom 4 Pro, 720p, 188MB) aus einem kurzen Abschnitt eines YouTube-Videos<sup>5</sup> des Amphitheaters in Pula (Kroatien). Dazu sollte erst einmal das Projekt gespeichert und der Bilderordner verknüpft werden. Anschließend führen wir die Feature-Extraction gefolgt vom Feature-Matching mit den Standardparametern durch. Jetzt haben wir alles für das Bundle-Adjustment vorbereitet, das wir über `Reconstruction start` beginnen.

- 1) Projekt speichern
- 2) Feature extraction
- 3) Feature matching
- 4) Resume reconstruction



Ergebnisse der verschiedenen Prozessierungsschritte



COLMAP

Notieren Sie sich bei der Berechnung, wie Ihr Rechner mit dem vorhandenen Datensatz zu-rechtkam. Dazu gehören Auslastung der CPU und Festplatte sowie ein Blick auf die Uhr, wie viel Zeit die Prozessschritte in etwa in Anspruch genommen haben.

<sup>3</sup><https://demuc.de/colmap/>

<sup>4</sup>[https://www.vividus-verlag.de/3d\\_rekonstruktion/datenpakete/pulaArena\\_2017.zip](https://www.vividus-verlag.de/3d_rekonstruktion/datenpakete/pulaArena_2017.zip)

<sup>5</sup><https://www.youtube.com/watch?v=VgwU2Vov2pw&t=1s>