

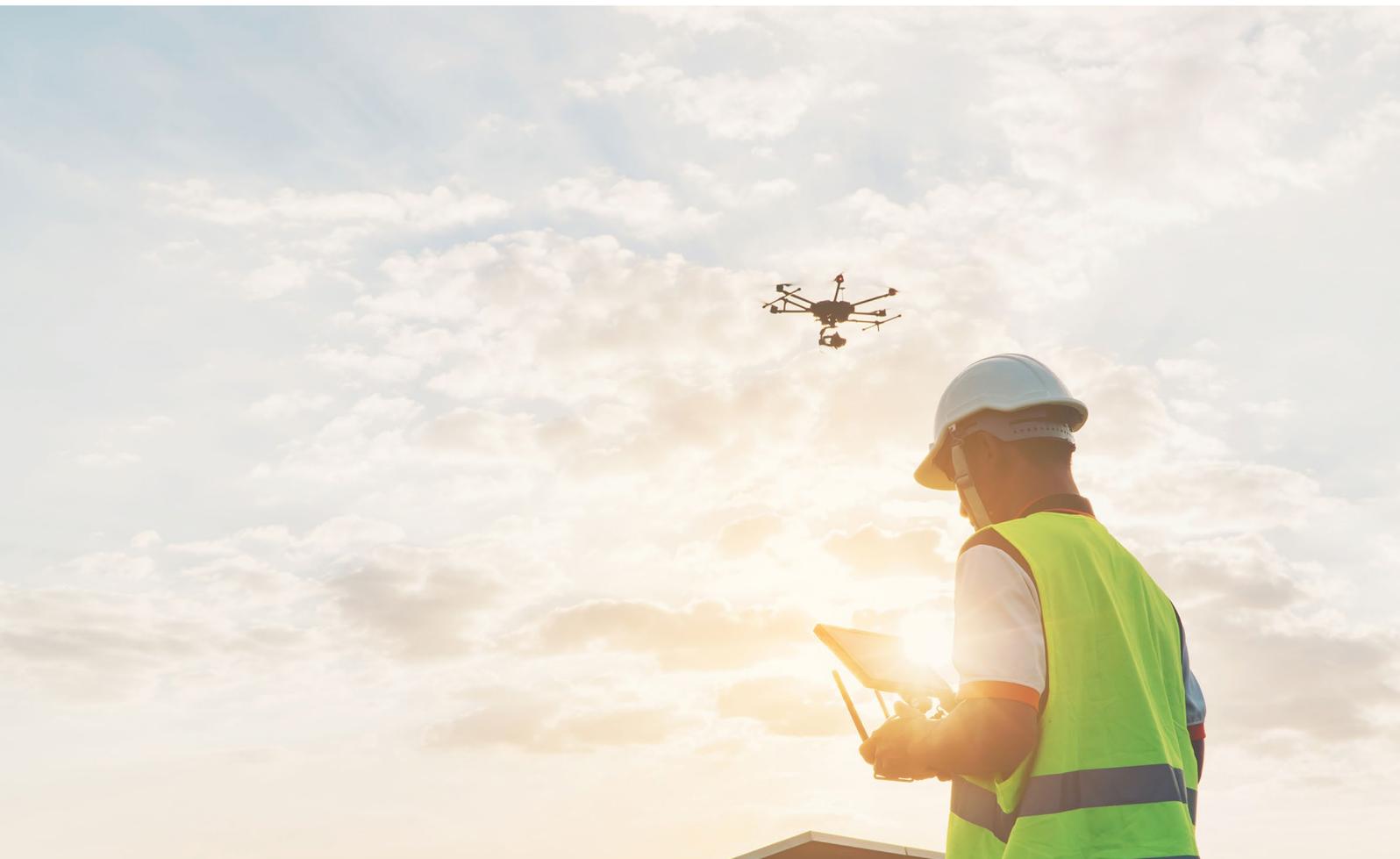


Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



MODUL 09

AUSBILDUNGSPROGRAMM LIDAR





Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht	3
1 Zielsetzung des Moduls	5
2 Lidar-Einführung	6
2.1 Was ist LIDAR ?	6
2.2 Arten von LiDAR	8
2.2.2 Hauptmerkmale von TLS & ALS Scanning	8
2.3 Komponenten des LiDAR-Systems (ALS)	11
3 LIDAR-Daten	13
3.1 Während des LiDAR-Scannens aufgezeichnete Datentypen	13
3.2 Datenformat und -struktur	15
4 LIDAR-Anwendungen	17
4.1 Vermessung, Kartierung und Inspektion/Analyse des Standorts	17
4.2 Vermessung bei hoher Laubdichte	19
4.2.1 Durchdringung der Pflanzendecke mit LIDAR	19
4.2.2 Multispektrales LiDAR (MS LiDAR)	21
4.3 Sicherheitsinspektionen und Bewertungen des baulichen Zustands	25
4.4 Hochwassermodellierung und Umweltverträglichkeitsprüfungen	26
4.5 Versorgungs- und Infrastrukturmanagement	27
5 LIDAR-Felderfassung und Verfahrensmethodik	28
5.1 Hardware	28
5.2 Einstellung vor dem Flug	30
5.3 Flugaufnahmen und Aufnahmesoftware	33
5.4 Verarbeitung & Software	35
5.5 Datenausgabe	37
Tabellenverzeichnis	39
Abbildungsverzeichnis	39

DRONES4VET Erasmus+ Projektteilnehmer und Autoren

CMQE HEREC Occitanie France Team:

Régis Lequeux – Dozent, Bauingenieur, Lycée Dhuoda, Nîmes – Koordinator der 10
Module
Nicolas Privat – Dozent, Bauingenieur, Lycée Dhuoda, Nîmes
Eric Remola – Dozent, Lycée Dhuoda, Nîmes
Nicolas Vassart – Dozent, Ph.D., Lycée Dhuoda, Nîmes
Valerie Poplin – CMQE HEREC Geschäftsführer

MTU Irland Team:

Sean Carroll CEng MEng BEng (Hons) MIEI Dozent und Forscher
Michal Otreba Inz, MScEng, PhD, Dozent und Forscher, beide Koordinatoren des
Einstufungs- und Nachbereitungssitzungen für Pädagogen

FH Kufstein Tirol. Österreich

Emanuel Stocker, Hochschullehrer für Facility- und Immobilienmanagement
Sarah Plank, F&E Controllerin

CRN Paracuellos-Team (Dirección General de Formación. Comunidad de Madrid). Spanien

José Manuel García del Cid Summers, Direktor
Daniel Sanz, Direktor der Dron-Arena
Santos Vera, Techniker
Jorge Gómez Sal, Leiter der Technischen Einheit
Fernando Gutierrez Justo, Erasmus-Koordinator – Projektantragsteller

BZB Düsseldorf. Deutschland:

Frank Bertelmann-Angenendt, Projektleiter
Markus Schilaski, Projektleiter

DEX. Spanien

Ainhoa Perez
Ignacio Gomez Arguelles
Diego Diaz Mori
Yvan Corbat
Erasmus-Management

1. Zielsetzung des Moduls

In diesem Modul werden die Teilnehmer in **LIDAR** eingeführt und erfahren, wie diese Fernerkundungstechnologie in Verbindung mit UAS zur Erfassung von Felddaten verwendet werden kann. Die **Schlüsselterminologie** in Bezug auf LIDAR-Scans wird ebenso identifiziert wie die wichtigsten Methoden zur Durchführung eines LiDAR-Scans. Anhand eines **illustrierten Beispiels wird** erläutert, welche Schritte zur erfolgreichen Durchführung eines **LiDAR-Scans** mit einem UAS erforderlich sind und wie die daraus resultierenden Daten verarbeitet werden können. Schließlich werden einige Beispiele für die zahlreichen **Anwendungen in der Bauindustrie** erörtert, für die diese Technologie in Verbindung mit UAS eingesetzt werden kann.

2. Lidar-Einführung

2.1 Was ist LIDAR?

LiDAR (Light Detection and Ranging) ist eine aktive Fernerkundungsmethode, bei der ein Laser oder Licht zur Messung von Objekten eingesetzt wird. Bei einem LiDAR-System werden die Entfernungen (oder Reichweiten) zu einem Objekt durch Lichtimpulse gemessen, die von einem schnell feuernden Laserscanner ausgesendet werden. Wenn ein Lichtimpuls auf ein Ziel trifft, wird ein Teil der Photonen zum Scanner zurückreflektiert, wo sie gemessen und aufgezeichnet werden können. Der LiDAR-"**Puls**" bezieht sich auf die ausgesendeten Lichtphotonen, und die zurückreflektierten Photonen werden als "**Echo**" oder "Rücklauf" bezeichnet. LiDAR-Scanner können auf verschiedenen Plattformen montiert werden, z. B. auf Stativen oder in Flugzeugen (UAVs, Flugzeuge usw.), wie in Abbildung 1 dargestellt.

Ein LiDAR-System misst den Standort des Scanners, die Richtung oder den Winkel des ausgestrahlten Lichts und die Zeit, die das Licht für den Weg zum Objekt und zurück benötigt. Da die Lichtgeschwindigkeit und der Standort des Scanners bekannt sind, kann die aufgezeichnete Zeit vom Aussenden des Lichts (Puls) bis zur reflektierten Rückkehr (Echo) verwendet werden, um den 3D-Standort (x,y,z-Koordinaten) des reflektierenden Objekts mit Hilfe der Grundgeometrie zu berechnen. Während eines LiDAR-Scans kann ein Laser Millionen von zeitgestempelten Lichtimpulsen aussenden, von denen aufgezeichnet wird, wann und wo sie reflektiert werden, wodurch eine genaue 3D-Punktwolke des Zielobjekts oder -bereichs entsteht. Diese Daten können dann zur Entwicklung digitaler Modelle verwendet werden, um die 3D-Struktur des Zielobjekts oder -gebiets zu schätzen.

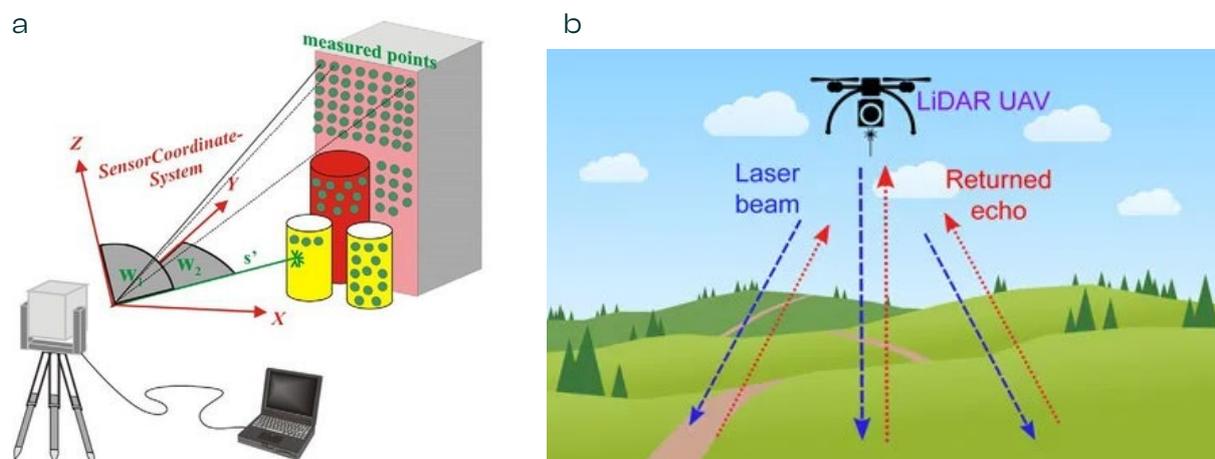


Abbildung 1 LiDAR-Scanning (a) Terrestrischer Laserscanner auf Stativ⁴ (b) UAV-gestütztes Laserscanning - Airborne Laser Scanning⁵.

LiDAR als Fernerkundungstechnik wird als Beispiel für eine **aktive Technologie bezeichnet**, während Luftaufnahmen, die als Teil der Photogrammetrie verwendet werden können, als **passive Technologie** gelten. Dieser wichtige Unterschied besteht darin, dass die Fotografie auf Sonnenlicht oder Strahlung angewiesen ist, die von einem externen Objekt reflektiert wird, während LiDAR-Systeme ihre eigene Strahlung aussenden und messen, wie diese Strahlung von einem Ziel reflektiert wird. Der Einsatz von LiDAR ist daher nicht auf die Tageslichtstunden beschränkt und kann weniger durch Umwelteinflüsse gestört werden.

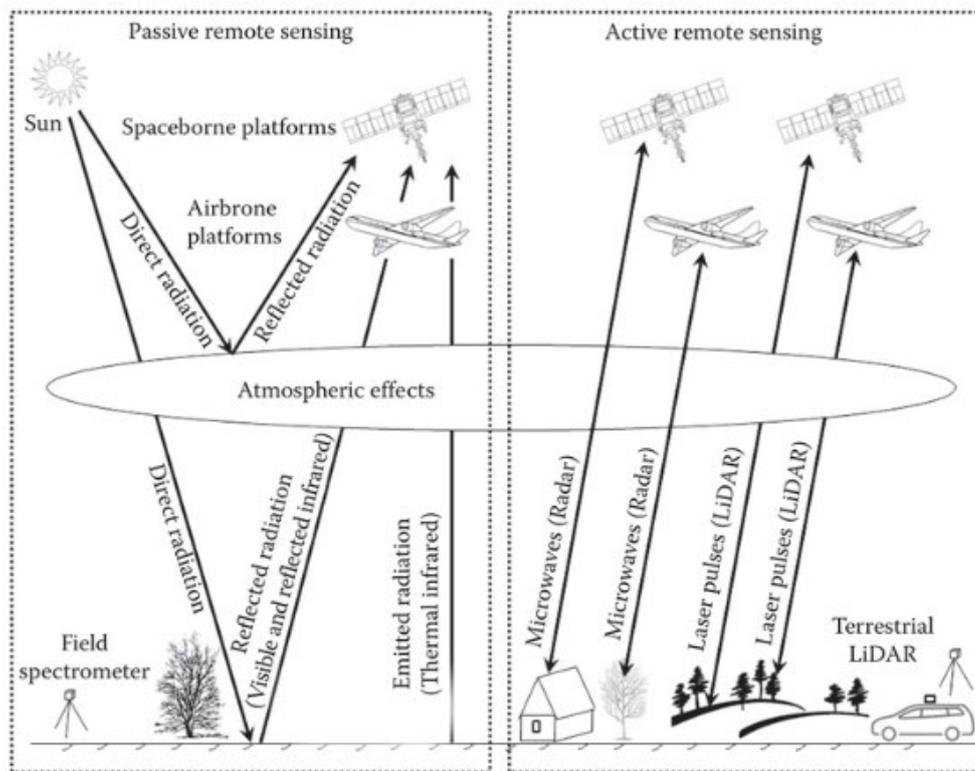


Abbildung 2 Passive und aktive Fernerkundung³

2.2 Arten von LiDAR

LiDAR kann nach Aufbau und Funktionsweise des Systems klassifiziert werden. Einige der wichtigsten Typen sind:

- Terrestrisches Laserscanning (**TLS**) - ist ein Laserscanning-System, das auf dem Boden arbeitet. Dabei kann es sich um ein statisches (d. h. auf einem Stativ montiertes) oder ein dynamisches (mobiles Fahrzeug/Gerät) montiertes System handeln.
- Airborne LiDAR (**ALS**) - ist ein Laserscanning-System, das an einem Luftfahrzeug wie einem UAV, Flugzeug oder Hubschrauber angebracht ist.
- Bathymetrisches Scannen - ist eine Art des Laserscannings, mit dem die Wasseroberfläche durchdrungen werden kann (bis zu ca. 50 m in klarem Wasser)
- Satelliten-LiDAR - wie der Name schon sagt, werden Scanner in Satelliten eingebaut, die nicht nur die Erdoberfläche, sondern auch die Atmosphäre scannen können.

1.1.2 Hauptmerkmale von TLS & ALS Scanning

In der Bauindustrie werden hauptsächlich die beiden LiDAR-Scanverfahren **TLS** und **ALS** eingesetzt, die beide zur Erfassung räumlicher 3D-Daten der Erdoberfläche und von Strukturen verwendet werden können. Beim terrestrischen Laserscanning vor Ort werden in der Regel an der Oberfläche oder auf einem Stativ montierte Laserscanner verwendet, die strategisch um das Gelände oder das zu untersuchende Objekt herum platziert und nach jedem Scan entsprechend bewegt werden. Abbildung 3 zeigt einige der Hauptkomponenten eines solchen Systems, zu dem ein Scanner gehört, der sich horizontal um 360 Grad drehen kann (d. h. er dreht sich um die vertikale Achse), sowie eine Laserquelle, die schnell Licht aussendet, das normalerweise von einem Spiegel reflektiert wird, der sich vertikal um 360 Grad dreht (d. h. er dreht sich um die horizontale Achse).

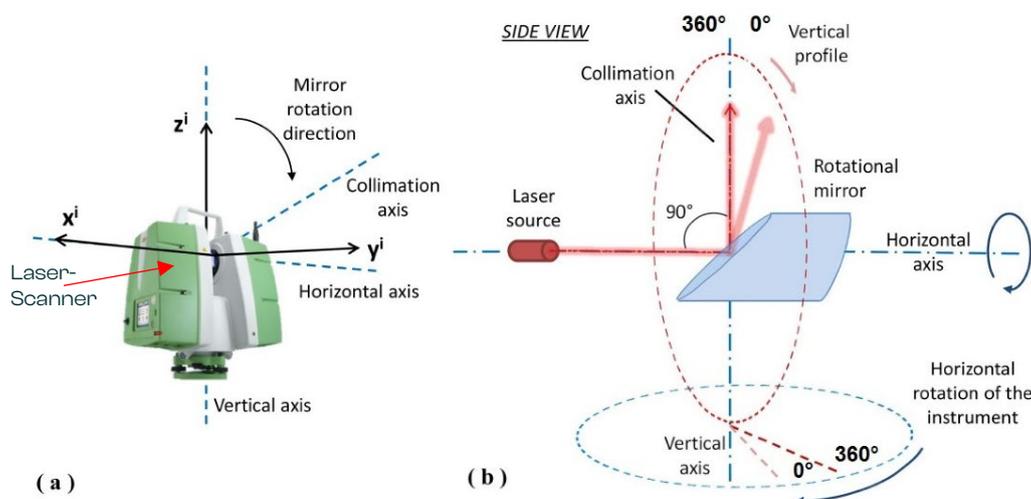


Abbildung 3 Hauptkomponenten eines auf einem Stativ montierten TLS (a) Scanner⁶ (b) Rotationsspiegel im Scanner⁶

Bei der ALS werden Laserscanner an Flugzeugen, Hubschraubern oder UAVs angebracht. Diese Scanner senden Laserimpulse in Richtung Boden aus, und die reflektierten Signale werden verwendet, um eine 3D-Punktwolke der Zieloberfläche und der Objekte zu erstellen. Abbildung 4 veranschaulicht einige der Hauptkomponenten der ALS-Systeme, zu denen eine Trägheitsmesseinheit (IMU) zur Verfolgung der Bewegung des Luftfahrzeugs (Neigung, Drehung und Gieren) und eine GNSS-Antenne zur genauen Erfassung der Position (Höhe und X,Y-Koordinaten) gehören. In Abschnitt 2.3 werden die wichtigsten Komponenten eines ALS-Systems näher erläutert.

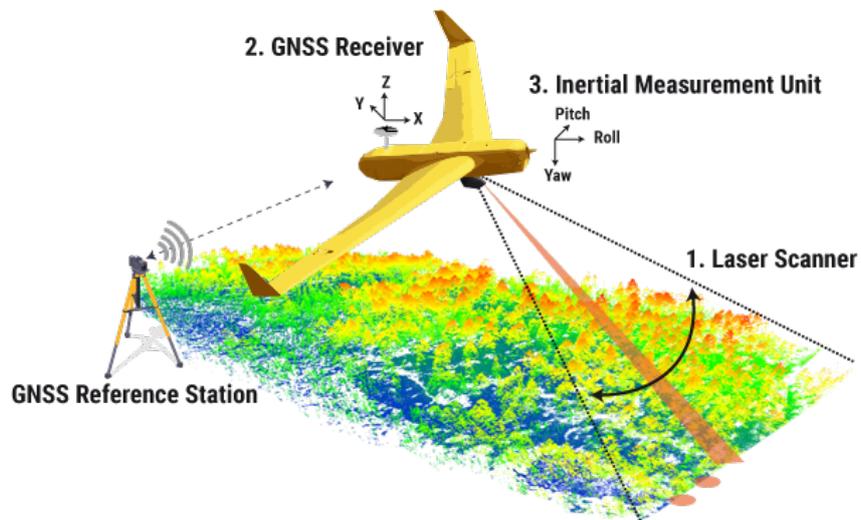


Abbildung 4 Hauptkomponenten eines ALS-Systems⁶

Sowohl das TLS- als auch das ALS-System des Laserscannings haben jeweils ihre eigenen Vorteile im Hinblick auf die Erfassung räumlicher 3D-Daten. Tabelle 1 vergleicht diese beiden Laserscanning-Methoden anhand einiger Schlüsselkriterien, die vor der Erfassung räumlicher Daten im Feld zu berücksichtigen sind. Außerdem werden einige der typischen Anwendungen für jede Methode genannt.

Tabelle 1 Vergleich von TLS- und ALS-Techniken

	Terrestrisches Laser-Scanning (TLS)	Airborne Laser Scanning (ALS)
Standort/Plattform	Beim TLS werden stationäre Laserscanner eingesetzt, die auf dem Boden aufgestellt oder auf Stativen montiert sind. Diese Scanner werden an bestimmten Positionen im Gelände oder in der Nähe der zu untersuchenden Objekte aufgestellt.	Bei der ALS werden Laserscanner an Flugzeugen wie UAS montiert. Diese Scanner senden Laserimpulse in Richtung Boden aus, und die reflektierten Signale werden verwendet, um eine 3D-Punktwolke der Erdoberfläche und der Objekte zu erstellen.
Bereich	Terrestrische Laserscanner haben in der Regel eine geringere Reichweite als luftgestützte Laserscanner. Sie können in einem begrenzten Radius von maximal ein paar hundert Metern eine hohe Datendichte erfassen.	Luftgestützte Laserscanner haben im Vergleich zu terrestrischen Scannern eine viel größere Reichweite, so dass sie in einem einzigen Flug große Gebiete, in der Regel mehrere Quadratkilometer, erfassen können.
Auflösung	Aufgrund der großen Nähe zum Ziel kann TLS eine sehr hohe Datenauflösung erreichen. Es kann feine Details von Objekten und Oberflächen mit hoher Genauigkeit erfassen.	ALS-Daten können im Vergleich zu TLS-Daten eine geringere Auflösung aufweisen, da der Scanner die Daten aus einer größeren Höhe erfasst, was zu einer größeren Grundfläche für jeden Laserimpuls führt. Fortschritte in der Technologie ermöglichen jetzt eine höhere Auflösung, aber es muss ein Gleichgewicht zwischen der Intensität oder Auflösung des Scans und dem zu erfassenden Bereich erreicht werden.
Anwendungen	TLS wird unter anderem für die Vermessung kleiner bis mittelgroßer Gebiete, die detaillierte Modellierung von Strukturen, archäologischen Stätten, die Bauüberwachung und industrielle Anwendungen eingesetzt.	Starrflügler-ALS sind ideal für großflächige Kartierungen, Waldinventur, Flächennutzungsplanung, Hochwassermodellierung, topografische Kartierung und andere Anwendungen, die eine umfassende Abdeckung großer Gebiete erfordern. Multirotor-ALS sind u. a. ideal für die Bauüberwachung und das Asset Management.
Geschwindigkeit der Datenerfassung	Die TLS-Datenerfassung ist im Vergleich zum Airborne-Laserscanning langsamer, da jede Scanposition einzeln eingerichtet und verarbeitet werden muss.	ALS kann große Gebiete schnell abdecken und ist daher eine effiziente Methode zur Datenerfassung in weitläufigen Landschaften.

Für die Zwecke dieses Schulungsmoduls werden im weiteren Verlauf nur die spezifischen Anforderungen und Merkmale von ALS-Systemen betrachtet.

2.3 Komponenten des LiDAR-Systems (ALS)

Bei vielen Laserscanning-Operationen wird das LiDAR-System auf einem Flugzeug oder UAV montiert. Die wichtigsten Komponenten eines solchen Systems sind in Abbildung 6 hervorgehoben und umfassen:

- LiDAR-Sensor: Während des Fluges werden vom LiDAR-Sensor Impulse im nahen Infrarotbereich abgefeuert. Abbildung 5 veranschaulicht die Wellenlängen im elektromagnetischen Spektrum.

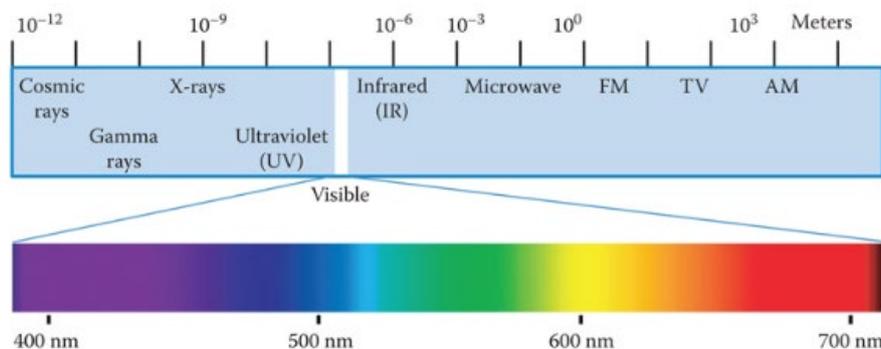


Abbildung 5 Elektromagnetisches Spektrum³

- GPS-Empfänger: GPS-Empfänger verfolgen die Höhe und den Standort des Flugzeugs oder der Drohne, so dass eine genaue Positionierung des Flugzeugs für die Verarbeitung der Daten möglich ist.
- Trägheitsmessgeräte (IMU): Die IMU verfolgt die Neigung, die Drehung und das Gieren des Flugzeugs, so dass eine genaue Messung der Bewegung des Flugzeugs und der Emission/Rückkehr der Laserimpulse möglich ist.

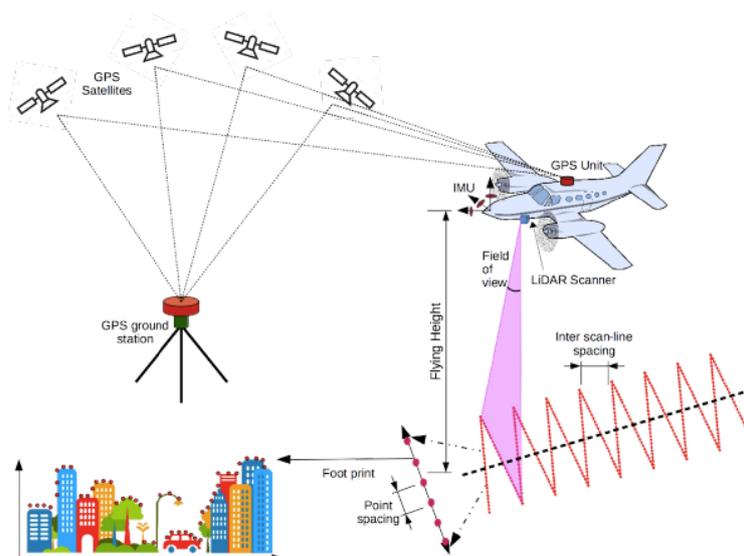


Abbildung 6 ALS-Komponenten¹³

- Datenrekorder oder CPU: Eine eingebaute CPU-Einheit zeichnet alle Impulsinformationen auf, die dann in exakte Positionen (x,y,z) übersetzt werden.

Bei großflächigen Kartierungen werden in der Regel Starrflügler oder UAVs eingesetzt. Wenn jedoch kleinere Gebiete oder bestimmte Objekte/Strukturen gescannt werden sollen, werden häufig Mehrrotor-Drohnen eingesetzt.



Abbildung 7 Multi Rotar DJI M300 mit L1-Laserscanner⁷

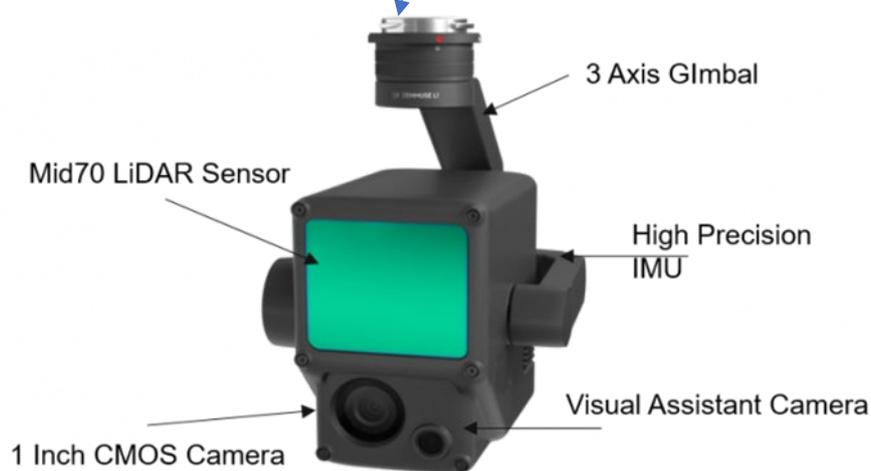


Abbildung 8 L1 Zenmuse DJI Laser Scanner¹⁰

3. LIDAR-Daten

3.1 Während des LiDAR-Scannens aufgezeichnete Datentypen.

Während eines LiDAR-Scans können mehrere verschiedene Datentypen (Feldmessungen, Metadaten usw.) erfasst werden, um eine genaue 3D-Darstellung des Scanbereichs oder Objekts zu erstellen und zu ergänzen. Während die Datentypen je nach Anwendung und Scannertyp variieren können, sind einige der häufigsten Datentypen in Abbildung 9 und Tabelle 2 unten aufgeführt:

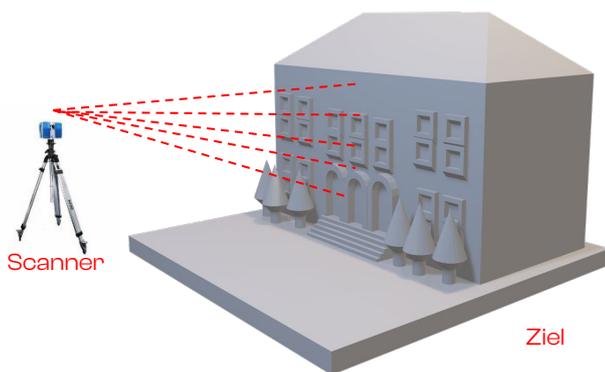


Abbildung 9 LiDAR-Datentypen

	Scanner	Ziel
Feldmessung	Abstand Frequenz Neigung	Standort (X,Y,Z) Intensität (I) Farbe (RGB)
Metadaten	Zeitpunkt der Erfassung Umweltbedingungen Details zur Kalibrierung Informationen zum Dienstanbieter	Projektname/Standort Kontrollnetz Business Intelligence

Tabelle 2 LIDAR-Datentypen und Parameter

Datenarten	Beschreibung
Punktwolken-Daten	Das grundlegende Ergebnis eines LiDAR-Scans ist eine Punktwolke. Jeder Punkt in der Punktwolke repräsentiert einen bestimmten Ort in der räumlichen 3D-Umgebung. Zusammen bilden diese Punkte ein 3D-Modell der Oberfläche, des Bereichs oder des Objekts, das gescannt wurde.
Scan-Parameter	Die Scan-Einstellungen des LiDAR-Systems haben einen erheblichen Einfluss auf die Qualität, Auflösung und Genauigkeit des Scans. In der Regel werden Parameter wie die Pulsrate (Puls/Sekunde) und die Scanauflösung aufgezeichnet.
GPS-Positionsdaten	LiDAR-Systeme zeichnen die geografischen Koordinaten (Breitengrad, Längengrad) und die Höhe jedes Laserpulses auf, von dem er ausgeht und zu dem er zurückkehrt. Diese Informationen ermöglichen eine genaue Berechnung von Entfernungen und die Positionierung in der realen Welt.
Daten zur Intensität	Die Intensität ist ein Maß für die Rückstrahlstärke des Laserpulses, der den Punkt erzeugt hat. Jeder Laserrücklauf oder jedes Echo hat einen Intensitätswert, der zusätzliche Informationen über das Reflexionsvermögen oder die Materialeigenschaften von Oberflächen liefern kann, was die Unterscheidung zwischen verschiedenen Oberflächen erleichtert.
RGB-Daten	Viele LiDAR-Systeme sind mit Kameras ausgestattet, die Farbbilder oder RGB-Daten erfassen. RGB-Daten können in die Punktwolke eingebettet werden, um eine visuell realistische und farbige 3D-Darstellung des gescannten Objekts oder Bereichs zu erstellen...
Klassifizierungsdaten	Punkte in einer Punktwolke können auf der Grundlage der Objekte oder Oberflächen, von denen sie stammen (z. B. Boden, Wasser, Gebäude usw.), klassifiziert werden, was bei der Datenanalyse und bei der Interpretation während der Verarbeitung hilfreich sein kann.
Rückgabenummer und Anzahl der Rückgaben	Jeder Laserpuls kann zu mehreren Rückläufen führen, wenn er mit mehreren Oberflächen interagiert. Die Rücklaufnummer gibt an, um welchen Rücklauf es sich handelt (erster, zweiter usw.), und die Anzahl der Rückläufe gibt an, wie viele Rückläufe für diesen Impuls aufgezeichnet wurden.
Kalibrierungsdaten:	Einige LiDAR-Systeme erfassen Kalibrierungsdaten, mit denen sich Sensorschwächen korrigieren und die Genauigkeit der Punktwolke optimieren lassen.

3.2 Datenformat und -struktur

Es gibt eine Reihe von Punktwolken-Dateiformaten, in denen die Lidar-Daten kodiert werden können, darunter LAS (.las), LAZ (.laz) und E57, die zu den gängigsten gehören. Das LAS-Format wird von der Amerikanischen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ASPRS) verwendet. Unabhängig davon, welches Dateiformat gewählt wird, handelt es sich bei der überwiegenden Mehrheit letztlich um einige Variationen des XYZ-I-RGB-Positions-Intensitäts-Farb-Schemas, wie in Abbildung 10 dargestellt. LAS ist häufig der Industriestandard für die Speicherung von LiDAR-Daten aus der Luft und wird häufig für GIS-Anwendungen verwendet. E57 hat ein breiteres Anwendungsspektrum für Laserscanning und ermöglicht die Speicherung von Bildern und Metadaten zusammen mit der Punktwolke. Beide Formate können in andere Formate wie .TXT oder Shapefiles konvertiert werden. LiDAR-Punktwolkendaten können eine "Klassifizierung der Erträge" enthalten, die dem Endbenutzer hilft, die Art des gescannten Objekts zu bestimmen, z. B. Boden, Gebäude oder Wasser. Dies kann andere Datenmodelle wie DSMs und DTMs ermöglichen.

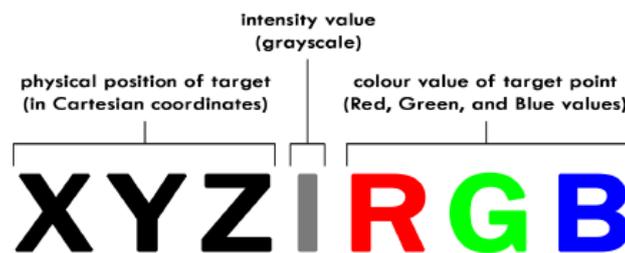


Abbildung 10 LiDAR-Datenformate⁸

Es gibt zwar eine Reihe eigener Hardware- und Softwarelösungen, mit denen LiDAR-Daten in eine Vielzahl von Datenformaten konvertiert werden können, doch ist es für diejenigen, die LiDAR-Daten beschaffen, wichtig, das Dateiformat zu bestimmen, das die beste Integration der Daten in bestehende Systeme (z. B. Asset-Management-Systeme) gewährleistet, um die Interoperabilität sicherzustellen.

Im Hinblick auf die LAS-Formatierungsart werden die wichtigsten Informationen, die jeden Impuls beschreiben, in die Kategorien X, Y, Z, I, N, R, C eingeteilt:

- X, Y und Z sind die Koordinaten der Echopositionen.
- I gibt die Intensität oder Stärke des Echos an.
- N steht für die Anzahl der von einem einzelnen Impuls empfangenen Rückmeldungen (Echos) und
- R gibt die Reihenfolge dieser Echos oder die Rücklaufnummer an. Eine Kombination aus N = 2 und R = 1 bedeutet zum Beispiel, dass zwei Echos von diesem Impuls (N = 2) aufgezeichnet wurden, von denen dieser Datensatz der erste ist (R = 1). Es ist üblich, dass Echos in öffentlichen Daten in Kategorien eingeteilt werden.
- In Spalte C sind diese Kategorien für diese Klassifizierung angegeben.⁸

X	Y	Z	I	N	R	C
597847.589	7336016.990	329.020	1	3	1	3
597847.290	7336017.230	325.050	1	3	2	3
597846.979	7336017.490	320.780	1	3	3	1
597845.609	7336017.429	319.820	14	1	1	1
597842.969	7336017.230	319.330	18	1	1	2
597840.359	7336017.009	319.060	17	1	1	2
597838.520	7336016.200	328.500	8	1	1	1
597836.849	7336016.370	323.710	5	2	1	3
597836.469	7336016.660	318.960	0	2	2	2

Abbildung 11 LAS (las) LiDAR-Datenformat⁶⁹

4. LIDAR-Anwendungen

Unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs), die mit LiDAR-Technologie ausgestattet sind, haben zahlreiche Anwendungen in der Bauindustrie und im Tiefbau gefunden. Im Vergleich zu anderen Luftfahrzeugen wie Hubschraubern oder Flugzeugen kann das Scannen mit UAVs erhebliche Vorteile in Bezug auf Effizienz, Genauigkeit und Kosteneffizienz bieten. Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele für die neuartigen Einsatzmöglichkeiten von UAV-LiDAR im Hoch- und Tiefbau aufgeführt. Diese Liste ist nicht erschöpfend, und es ist auch erwähnenswert, dass UAV-LiDAR von vielen verschiedenen Branchen außerhalb der Bauindustrie eingesetzt wird. Die Kombination von UAVs und LiDAR-Technologie bietet Fachleuten im Hoch- und Tiefbau hochgenaue, aktuelle und leicht zugängliche Daten. Dies ermöglicht eine bessere Entscheidungsfindung, ein verbessertes Projektmanagement und eine erhöhte Sicherheit bei einer Vielzahl von Anwendungen in der Branche.

4.1 Vermessung, Kartierung und Inspektion/Analyse des Standorts.

UAV-LiDAR kann schnell und genau topografische Karten von Baustellen erstellen. Diese Daten helfen Ingenieuren und Planern, das Gelände, bestehende Strukturen und die Vegetation zu verstehen. Sie helfen bei der Standortauswahl, der Planung und dem Entwurf von Infrastrukturprojekten. Mit LiDAR ausgestattete Drohnen können genaue volumetrische Berechnungen von Halden, Ausgrabungsstätten und Mülldeponien durchführen. Diese Informationen sind für das Projektmanagement, die Fortschrittsverfolgung und die Verwaltung von Materialmengen von entscheidender Bedeutung. Regelmäßige LiDAR-Scans einer Baustelle können in Echtzeit Einblicke in den Projektfortschritt geben. Dies hilft bei der Erkennung von Verzögerungen, der Lösung von Problemen und der Einhaltung von Projektplänen. Während der Bauarbeiten kann UAV-LiDAR eingesetzt werden, um den Ist-Zustand eines Projekts zu erfassen. Diese Daten können mit den Entwurfsmodellen verglichen werden, um Abweichungen zu erkennen und sicherzustellen, dass die Bauarbeiten wie geplant verlaufen.



Abbildung 12 LIDAR-Scan des Hafens⁹

4.2 Vermessung bei hoher Laubdichte.

Durchdringung der Pflanzendecke mit LIDAR

Bei LiDAR-Anwendungen in Gebieten mit hoher Laubdichte, wie z. B. Wäldern, gelangt ein erheblicher Teil der LiDAR-Strahlen nicht bis zum Boden, da Äste, Blätter und andere Objekte den Weg versperrern. LiDAR (Laserstrahlen) können diese Objekte nicht durchdringen. Die Ergebnisse von LiDAR-Scans in solchen Gebieten unterscheiden sich je nach Jahreszeit (im Winter ist in der Regel weniger Laub vorhanden - LiDAR-Scans können erfolgreicher sein, im Frühjahr/Sommer dagegen ist das Laub stärker und die Strahlen können nicht bis zum Boden vordringen).

Bei ALS-Scans mit hoher Pflanzendichte liegt der Schwerpunkt für Punktwolkenmodelle daher auf den Punkten, die erfolgreich zwischen den Objekten bis zum Boden gelangt sind.

Es ist erwähnenswert, dass der Abtastwinkel einer der Schlüsselfaktoren für einen erfolgreichen Einsatz ist. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für das Eindringen von Laserimpulsen in Holzflächen unter Berücksichtigung des vertikalen Sichtfelds. Wie Sie sehen können, dringen einige Laserstrahlen bis zum Boden durch, während andere, abhängig von der Dichte der Blattbedeckung, zum LiDAR zurückkehren, bevor sie den Boden erreichen.

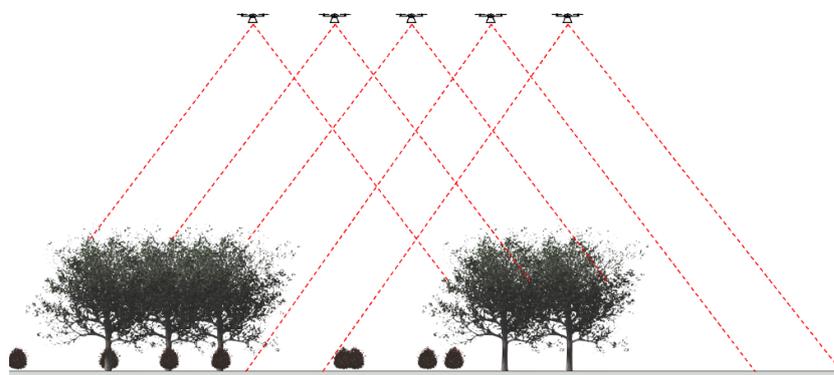


Abbildung 13 Beispiel für das Eindringen des Laserstrahls durch Bäume.

Die nachstehende Abbildung zeigt ein Beispiel für einen Waldscan unter Verwendung von ALS.



Abbildung 14 Beispiel für einen Waldscan⁹

Um ALS-Einsätze wie die oben beschriebenen zu planen, muss ein UAS-Pilot eine Reihe von Faktoren bei der Auswahl der am besten geeigneten LIDAR-Ausrüstung und Scan-Einstellungen für die jeweilige Umgebung berücksichtigen:

1. **Impulswiederholrate/Frequenz** - Anzahl der vom LiDAR-Scanner gesendeten Lichtimpulse pro Sekunde. Eine höhere Impulswiederholungsrate bedeutet eine höhere Punktdichte der LiDAR-Daten; die Wahrscheinlichkeit, dass LiDAR-Impulse durch Laublöcher hindurchgehen, um die Bodenoberfläche zu messen, steigt.
2. **Sichtfeld** - um die Wahrscheinlichkeit der LIDAR-Durchdringung durch Laub zu erhöhen,
Viele Scanner sind in der Lage, ihr Sichtfeld durch vertikale und horizontale Drehung des Sensors während einer Mission zu vergrößern, anstatt eine statische Sensorposition zu verwenden.

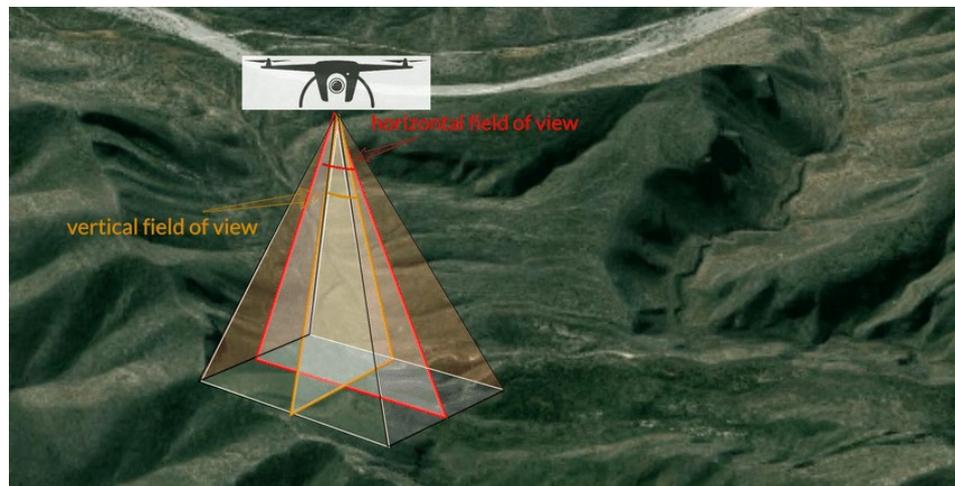


Abbildung 15 Sichtfeld[®]

3. **Anzahl der Rückläufer (Echos)** - jeder LiDAR-Sensor ist in der Lage, von jedem Laserimpuls eine Anzahl von Rückläuferechos (nach dem Auftreffen auf ein festes Objekt) zu erkennen. Je höher die Anzahl der erkannten Rückläuferechos ist, desto besser ist die Entfernungsempfindlichkeit und desto höher ist die Auflösung der gescannten Vegetationsstruktur.
4. **Laser-Wellenlänge** - die meisten LIDAR-Geräte für Flugzeuge verwenden zwei typische Wellenlängen: 905 und 1550 nm. Die 1550-Wellenlänge ist oft die effizientere Option zum Scannen der Vegetation, da sie eine hohe Laserleistung hat und das Scannen in großer Höhe ermöglicht (eine sicherere Option für hohe Bäume und größere Abstände). Außerdem verfügt er über eine ausgefeiltere Verarbeitung, mehr Rückläufe und geringeres Datenrauschen. Der 905nm ist in feuchteren und nasseren Umgebungen besser geeignet. Der 905er sollte für niedrige Vegetation und flacheres Terrain gewählt werden.

5. **Strahldivergenz** - stellt die Divergenz der Photonen eines Laserstrahls (in Kegelform) vom LIDAR-Sensor dar. Die folgende Abbildung zeigt zwei LIDAR-Sensoren mit unterschiedlicher Strahldivergenz.

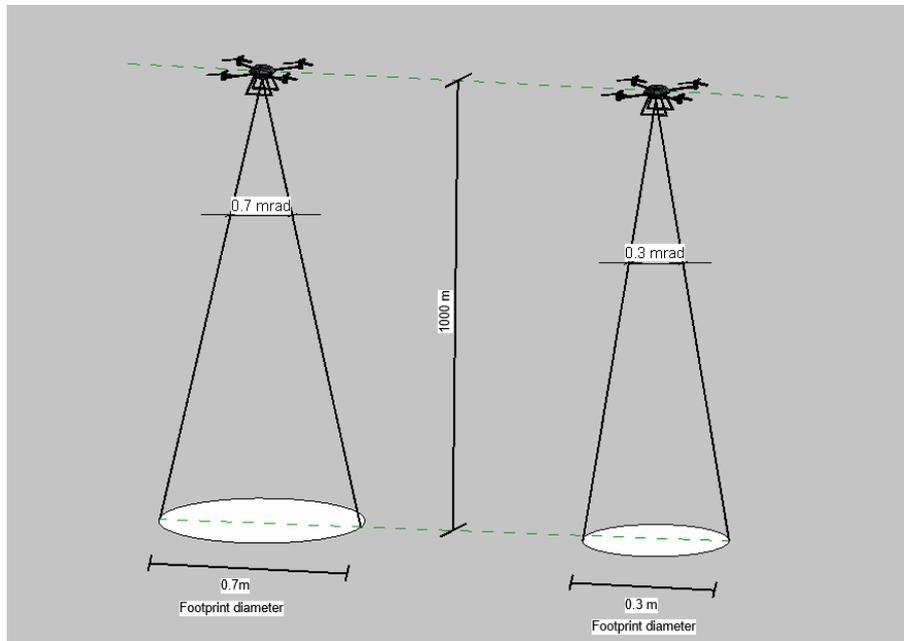


Abbildung 16 Verschiedene Beispiele für LIDAR-Strahldivergenzen (nicht maßstabsgetreu)

Wie bereits erwähnt, zeigt Abbildung 13 zwei Drohnen mit LIDAR-Sensoren mit unterschiedlicher Strahldivergenz. Es ist auch wichtig zu erwähnen, dass die Genauigkeit des Scans umso höher ist, je geringer die Strahldivergenz ist.

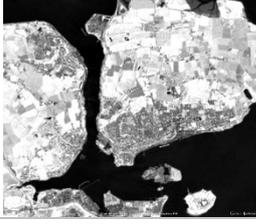
Multispektrales LiDAR (MS LiDAR)

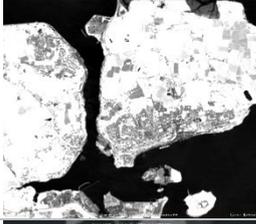
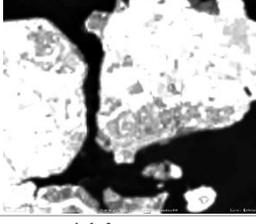
Es ist erwähnenswert, dass LIDAR seit kurzem seine Fähigkeiten mit der multispektralen Bildgebung kombiniert. Die Multispektraltechnik ist bereits weit verbreitet, z. B. beim Satelliten Sentinel-2. Bei der multispektralen Bildgebung wird eine Reihe von Wellenlängenbereichen verwendet, um Bilder in verschiedenen Bereichen des Lichtspektrums zu erfassen. Diese Technik hilft bei der Bestimmung der Bodenbedeckung, der Art und des Zustands der Bepflanzung.

Bei der Vermessung und Bewirtschaftung von Wäldern können Multispektralkameras bei der Erkennung von Baumarten, deren Gesundheit und Biomasse helfen.

Wie bereits erwähnt, gibt es eine Reihe von Frequenzbändern, auf denen diese Geräte arbeiten können:

Tabelle 3 Sentinel-2-Satellitenbilder nach Wellenlängen/Bändern²⁰

Sentinel-2-Bänder	Zentrale Wellenlänge (in Mikrometern)	Beispiel eines Bildes für den Hafen von Cork
Band 1 - Küstenaerosol	0.443	
Band 2 - Blau	0.490	
Band 3 - Grün	0.560	
Band 4 - Rot	0.665	
Band 5 - Vegetation Roter Rand	0.705	
Band 6 - Vegetation Roter Rand	0.740	

Band 7 - Vegetation Roter Rand	0.783		
Band 8 - NIR	0.842		
Band 8A - Vegetation Roter Rand	0.865		
Band 9 - Wasserdampf	0.945		
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	K.A.	
Band 11 - SWIR	1.610		
Band 12 - SWIR	2.190		

MS-LIDAR-Systeme werden in Kombination mit anderen Wellenlängen Abbildungsfunktionen einführen.

Das Titan-System von Optech kombiniert drei Wellenlängen¹⁵:

- Sichtbares grünes Licht - 532 nm
- Nahes Infrarot (NIR) - 1064 nm
- Infrarot (IR) - 1550nm

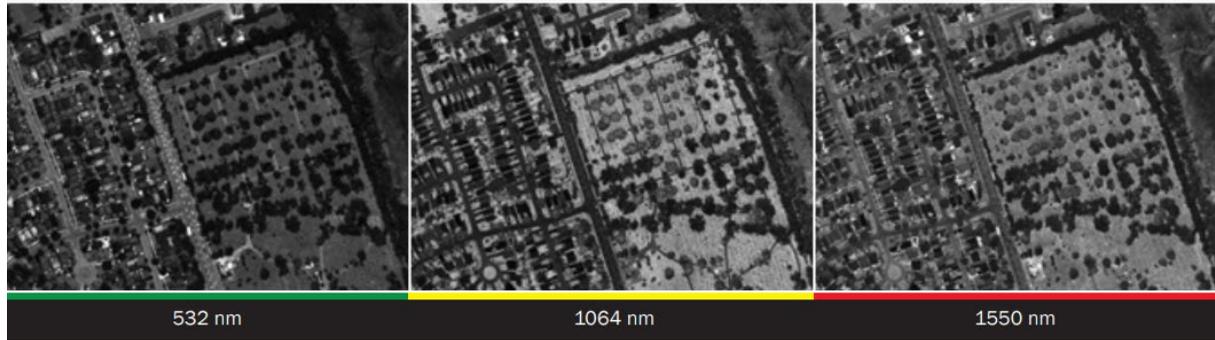


Abbildung 17 Beispiel für MS-LIDAR-Bilder

4.3 Sicherheitsinspektionen und Bewertungen des baulichen Zustands

Mit LiDAR ausgerüstete Drohnen können den Zustand bestehender Bauwerke wie Brücken und Gebäude beurteilen. Durch die Erkennung von Verformungen, Rissen und anderen Anomalien können Ingenieure fundierte Entscheidungen über Wartung und Reparaturen treffen. Drohnen mit LiDAR können schwer zugängliche oder gefährliche Bereiche erreichen, so dass weniger Personal in riskanten Umgebungen arbeiten muss. Dies ist besonders nützlich für die Inspektion von hohen Strukturen oder Standorten mit gefährlichen Bedingungen. Die Abbildung unten zeigt ein Beispiel für einen Tower-Bridge-Scan mit der ursprünglich verarbeiteten Punktwolke auf der linken Seite und einem Höhenfilter, der auf das Bild auf der rechten Seite angewendet wurde.

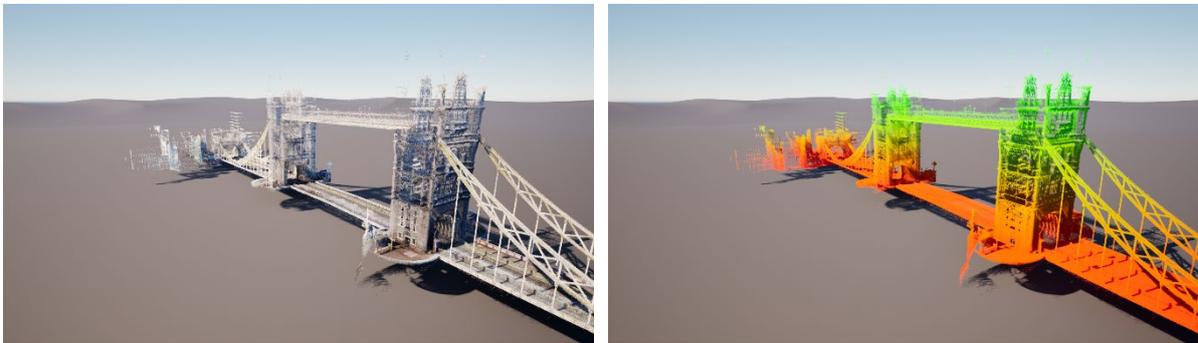


Abbildung 18 Beispiel für einen LiDAR-Scan der Tower Bridge UK⁹

4.4 Hochwassermodellierung und Umweltverträglichkeitsprüfungen

Mit LiDAR erzeugte Höhendaten sind für die Erstellung genauer Hochwassermodelle und die Entwicklung wirksamer Hochwasserschutzstrategien von entscheidender Bedeutung. LiDAR kann die Vegetationsdichte und Landbedeckung genau erfassen. Diese Informationen sind nützlich für die Bewertung von Umweltauswirkungen, wie z. B. das Potenzial für Überschwemmungen, Erosion und die Zerstörung von Lebensräumen. UAV-LiDAR-Daten können Stadtplanung und Landentwicklungsprojekte unterstützen, indem sie genaue Informationen über Landnutzung, bestehende Strukturen und natürliche Merkmale liefern.

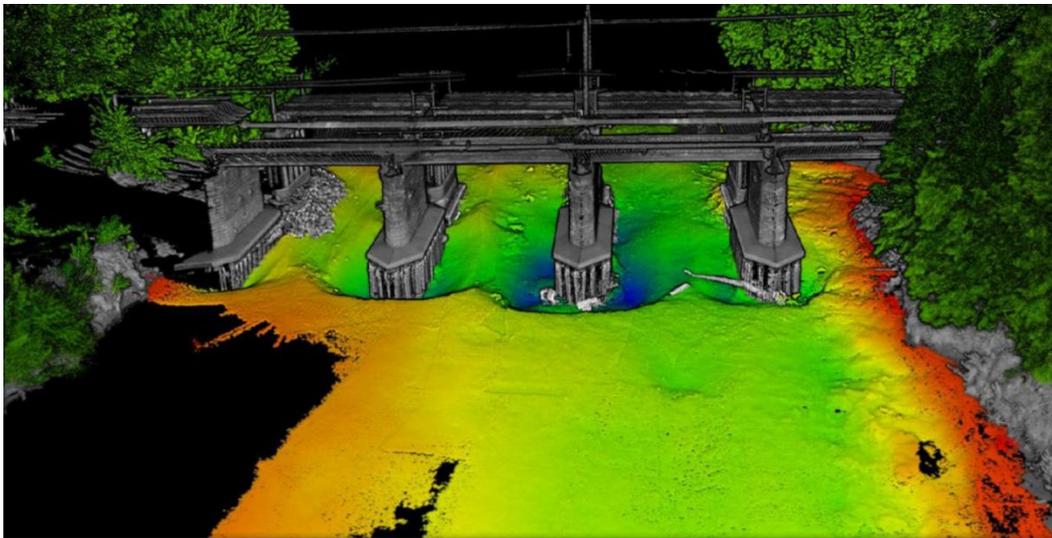


Abbildung 19 Beispiel eines LIDAR-Scans des Flusses Eden¹⁴

4.5 Versorgungs- und Infrastrukturmanagement

LiDAR wird zur Vermessung und Kartierung von Versorgungsnetzen, wie Stromleitungen und Pipelines, eingesetzt. Diese Daten helfen bei der Planung von Wartung, Aufrüstung und Erweiterung.

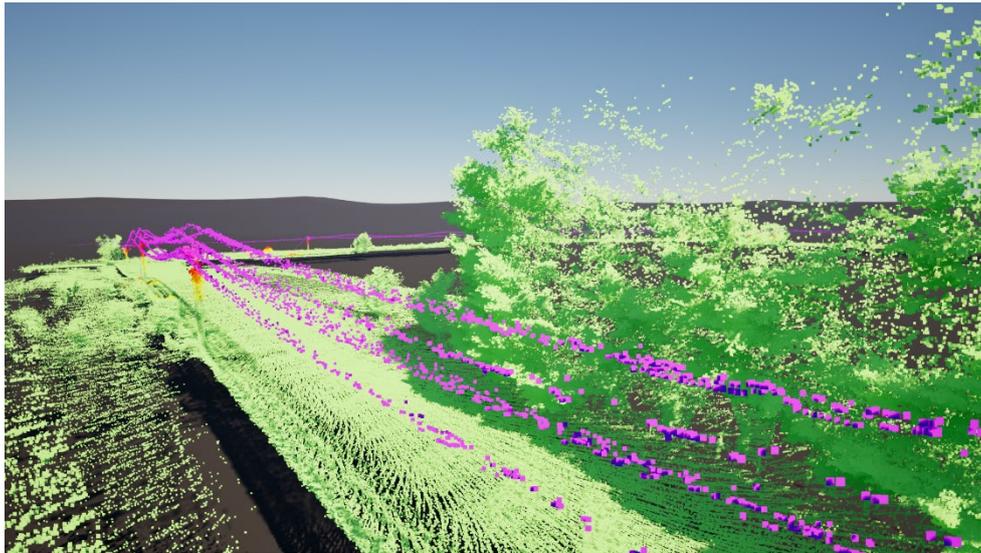


Abbildung 20 Beispiel für eine Powerline-Scan-Analyse⁹

5. LIDAR-Felderfassung und Verfahrensmethodik

Wenn der Betreiber den Einsatz von LIDAR-Ausrüstung in Verbindung mit UAVs in Erwägung zieht, muss er daran denken, seinen Einsatz entsprechend zu planen, wie in Modul 2 "Flugplanung und Berichterstattung" dieses Programms beschrieben.

5.1 Hardware

Es gibt eine Reihe von LiDAR-Sensorlösungen auf dem Markt, und in der Regel haben die meisten Drohnenhersteller eine LIDAR-Lösung, die in ihre eigenen UAV-Systeme integriert werden kann.

Zu den populärsten gehören DJI-Drohnen (z. B. M300 mit LIDAR-Lösung DJI Zenmuse L1), die in der Regel für ca. 10.000 € verkauft werden. Auch hier ist es wichtig zu erwähnen, dass sich diese Branche ständig verändert und die Palette der Lösungen immer größer wird.



Abbildung 21 Ein Beispiel für ein LIDAR für Drohnen-ausrüstung¹⁰

Es ist unbedingt erforderlich, Geräte auszuwählen, deren Eigenschaften den Anforderungen für die jeweilige Art von Mission entsprechen. Einige der wichtigsten zu berücksichtigenden Parameter sind in der folgenden Tabelle für einige der derzeit am häufigsten verwendeten LiDAR-Sensoren aufgeführt:

Tabelle 4 Vergleich der LIDAR-Sensoren Details¹¹

Modell	Roegl mini VUX-1DL ¹¹	Velodyne VLP-16 ¹²	Quanergy M8 ¹³	L1Zenmuse DJI ¹⁴
Wellenlänge (nm)	Nah-Infrarot	903	905	905
Messbereich (m)	3-200	<100	0,3-200	190m@10%, 100klx; 450m@80%, 0klx
Genauigkeit/Präzision (mm)	+15/10	+30	+30	<u>3 cm @ 100 m</u>
Max. Impulswiederholfrequenz (PRF) (Khz)	100	-	-	200
Max. Effektive Messrate (kPts/Sek.)	100	300/600	430	Einzelne Rückgabe: max. 240.000 pts/s; Mehrfache Rückgabe: max. 480.000 pts/s
Abtastfrequenz (Hz)	20-150	5-20	5-30	ein/zwei Rückläufer: 80K/s, 160K/s, 240K/s; drei Rückgaben: 80K/s, 240K/s
Sichtfeld (FOV) (Grad)	-23+23	-15+15 (vertikal) 360 (Horizontal)	-17+3 (vertikal) 360 (Horizontal)	Nicht wiederholtes Abtastmuster: 70,4° (horizontal) × 77,2° (vertikal); Wiederholtes Abtastmuster: 70,4° (horizontal) × 4,5° (vertikal)
Max. Betriebsflughöhe (AGL) (m)	80	-	-	50m-120m
Winkelauflösung (Grad)	0,001	2 (vertikal) 0,1-4 (horizontal/azimutal)	0,03-0,2	-
Echos	Bis zu 5 Echos	Bis zu 2 Echos	Einzelnes Echo	-
Gewicht (kg)	2,4	0,83	0,9	0,930±0,01

Tabelle 3 enthält LIDAR-Sensoren, die für jede Drohne verwendet werden können, die den Herstellungsspezifikationen entspricht, die in der Regel von der Nutzlast, der verfügbaren Hardware, dem Rahmen, dem Platz für die Installation und der Software bestimmt werden. Zusätzlich hebt Tabelle 3 einige der wichtigsten Parameter für LIDAR-Lösungen hervor. Es gibt jedoch noch weitere Parameter, die berücksichtigt werden müssen: Leistung, IP-Schutz, Betriebstemperatur, Lagertemperatur, Ausgabedateiformate, Auflösung).

5.2 Einstellung vor dem Flug

Wie zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt, müssen die Betreiber bestimmte Verfahren zur Vorbereitung der Drohne und der zugehörigen Ausrüstung befolgen, um den Einsatz durchführen zu können (weitere Einzelheiten in Modul 2).

SCHRITT 1 RTK oder PPK als Genauigkeit der Scan-Einrichtung

Die LIDAR-Einrichtung selbst würde sich bei einer speziellen Drohnen-LIDAR-Einrichtung leicht unterscheiden. Für einen gut ausgeführten, hochpräzisen Scan sollte die anfängliche Einrichtung entweder über Echtzeit-Kinematik (RTK) oder Post-Processing-Kinematik (PPK) verfügen:

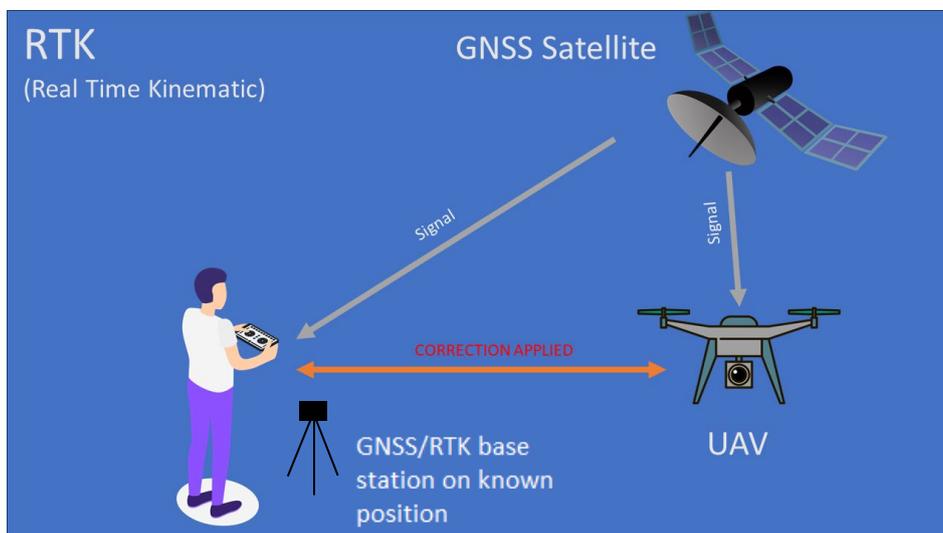


Abbildung 22 RTK Erklärt

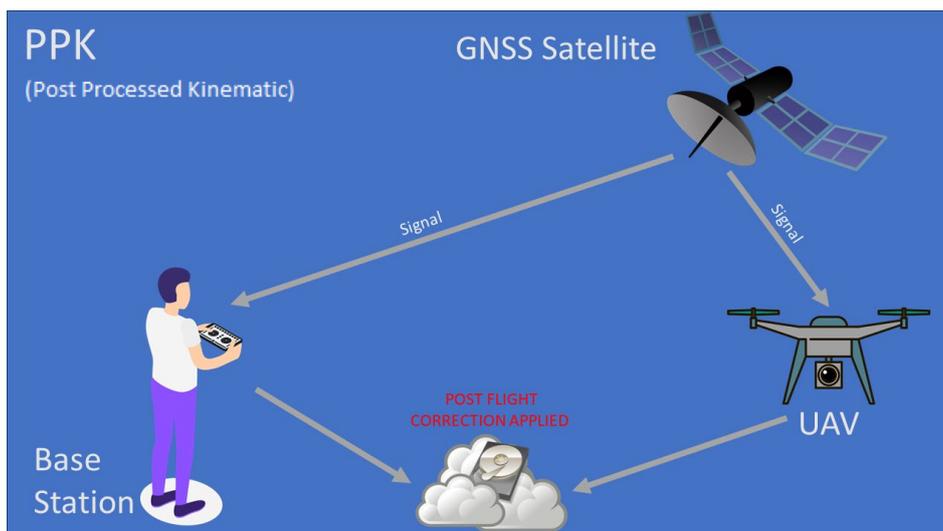


Abbildung 23 PPK Erläutert

HINWEIS: Wenn die RTK-Stabilität nicht gewährleistet werden kann (z. B. schwaches Satellitensignal), sollte auch PPK verwendet werden.

Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Ansätzen ist die Anfangszeit für die Positionskorrektur:

- Der RTK-Anflug wird während des Fluges korrigiert,
- PPK erfolgen alle Korrekturen nach dem ersten Flug.

SCHRITT 2 Trägheitsmessgerät - IMU-Kalibrierung

Um eine korrekte LIDAR- und Endwolkengenauigkeit zu gewährleisten, müssen Drohnenbetreiber die IMU-Inertialmesseinheit kalibrieren. Jeder Drohnenhersteller hat spezifische Schritte, um diesen Schritt zu vollziehen. Bei der DJI L1 LIDAR beispielsweise muss dies vor, während (alle 100 Sekunden) und nach dem Flug erfolgen. Diese Schritte gewährleisten eine korrekte Genauigkeit.

Bei der Kalibrierung muss das UAV in der Regel auf eine bestimmte Höhe aufsteigen, dann 30 m vorwärts und dann die gleiche Strecke rückwärts fliegen.

HINWEIS: Achten Sie darauf, dass die IMU-Kalibrierung vorzugsweise in einem hindernisfreien Bereich durchgeführt wird.

SCHRITT 3 Kalibrierung der RGB-Kamera

Normalerweise muss die RGB-Kamera nur dann neu kalibriert werden, wenn es visuelle Probleme mit den erfassten Daten gibt. Eines der Beispiele sind so genannte Geisterlinien in Punktwolken-Scans.

HINWEIS: Jeder Hersteller gibt Anweisungen zur Neukalibrierung einer RGB-Kamera.

SCHRITT 4 Flugmissionsplanung - Auswahl der richtigen Flugparameter und Einstellung für den fehlenden Typ.

Je nach Art des Flugzeugs und der LIDAR-Ausrüstung gibt der Hersteller Empfehlungen zu den empfohlenen Parametern:

- FOV - Sichtfeld
- Bodenschwad - auf der vermessenen Oberfläche abgebildeter Bereich
- Höhe der Erfassung
- Geschwindigkeit
- Flugabstände

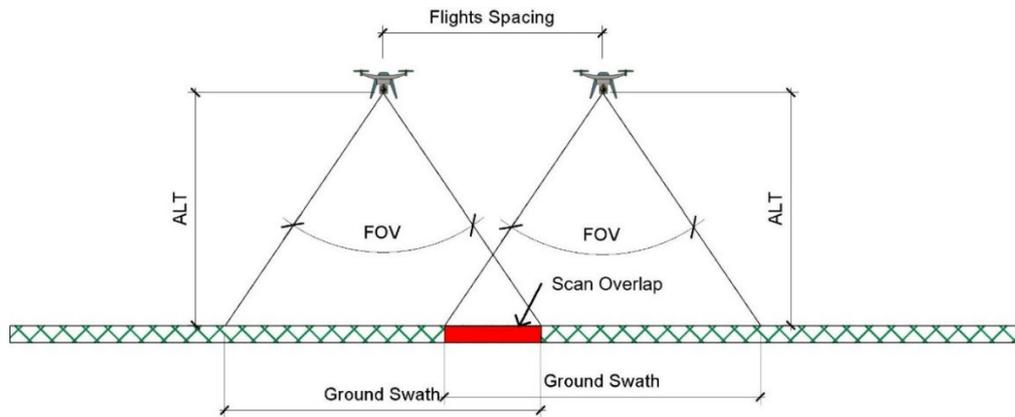


Abbildung 24 Flugplanungsparameter

Die obige Abbildung zeigt die Flugparameter und ihre Auswirkung auf die Scan-Überlappung - Scan-Qualität/Dichte.

Außerdem sind vor einer Mission folgende Parameter zu definieren:

- Scan-Auflösung [Pixel]
- Brennweite [mm]
- Bildrate [sec/Bild]
- Anforderung an die Daten

5.3 Flugaufnahmen und Aufnahmesoftware

Bei der Erfassung während des Fluges geht es neben der Einstellung und Planung der Parameter vor dem Flug vor allem um Software und ihre Anwendungen. Bei den meisten neuen LIDAR-Drohnen ist eine App vorinstalliert, die bei der Flugplanung hilft (nicht nur für LIDAR).

Bei der Planung der Datenerfassung (wie in Schritt 4 der Missionsplanung erwähnt) ist es wichtig, die Flugroute der Drohne festzulegen (je nach Art der Vermessung, z. B. Topografie, Flussufer, Vermessung von Stromleitungen).

Um Routen zu planen, muss man eine detaillierte und aktuelle Karte des Gebiets erwerben/verwenden (vom Drohnenhersteller empfindlich). Die erworbenen Karten können in der Drohnensteuerungs-App für die Planung verwendet werden. Es ist unbedingt erforderlich, das Koordinatensystem der Kartendatei (sehr oft vom Typ ***.tiff**) zu verstehen.



Abbildung 25 DJI Terra GUI

Wie bereits erwähnt, ist auf dem Drohnen-Controller in der Regel eine App vorinstalliert, die die Bahnplanung ermöglicht.

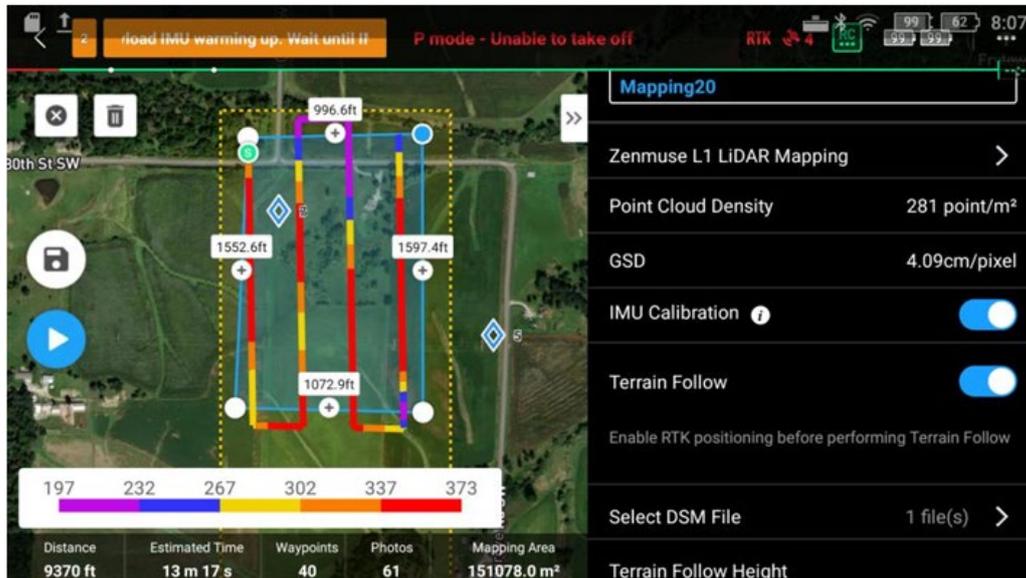


Abbildung 26 DJI Pilot App - Beispiel für Missionsplanung¹²

Die Erfassung erfolgt während des Drohnenflugs. Die Dateien werden auf dem Speicher der Drohne gespeichert und können nach Abschluss der Mission zur Verarbeitung auf einen Desktop-PC oder ein anderes Betriebssystem übertragen werden.

5.4 Verarbeitung & Software

Wenn man sich mit der Verarbeitung von LIDAR-Drohrendaten beschäftigt, muss man eine Plattform in Betracht ziehen. Es gibt eine Reihe von Softwarepaketen (z. B. DJI terra, PIX4D). Für jede Software gibt es spezifische Anweisungen, die zu befolgen sind.

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, müssen die Daten in eine Nachbearbeitungssoftware importiert werden.

Rohdaten enthalten in der Regel Informationen:

- LIDAR-Punkt konnte Rohdaten
- Kalibrierung der LIDAR-Kamera
- IMU-Kalibrierung
- Visuelle Kalibrierung
- Trägheitsnavigation
- Visuelle Daten
- RTK-Basisstationsdaten
- RTK-Unterantennen-Daten
- JPEG-Dateien - Bilder

Nach erfolgreichem Import in die Nachbearbeitungssoftware können die Daten verwendet werden.

Die RAW-Daten von LIDAR werden zu einer LAS-Datei zusammengestellt. Unterschiedliche Software bietet eine Vielzahl von Optionen (z. B. Punktwolkendichte und Ausgabekoordinatensystem) für die Ausgabe, bevor die Daten verarbeitet und die Punktwolke erzeugt wird.

Im Allgemeinen kann die Nachbearbeitung in 5 Schritte unterteilt werden:

- A. Flugbahnverarbeitung - nach dem Flug - dieser Schritt beinhaltet die Überprüfung auf mögliche Fehler in der Flugbahn
- B. Punktwolkenerzeugung - wie bereits erwähnt, wird nach Eingabe der folgenden Ausgabeparameter eine Punktwolke erzeugt.

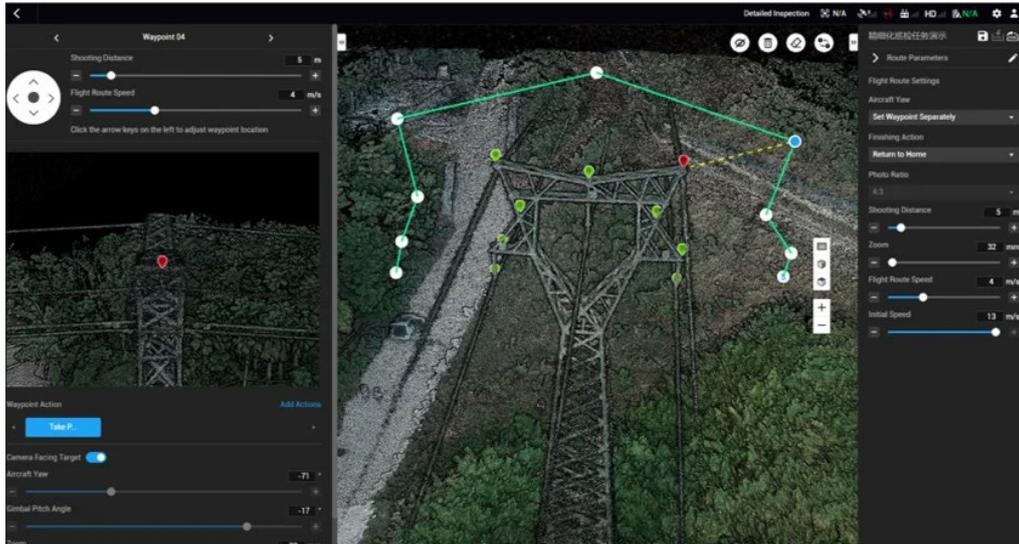


Abbildung 27 Beispiel für eine Punktwolke, die für die Inspektion von Stromleitungen erstellt wurde.¹²

- C. Verfeinerung der Genauigkeit von Punktwolken
- D. Einfärbung - in diesem Schritt werden der Punktwolke Farben hinzugefügt, um eine detailliertere Ansicht der untersuchten Objekte/Bereiche zu erhalten. In diesem Schritt wird das Bild mit alternativen RGB-Farben (rot, grün, blau) bearbeitet, um zusätzliche Informationen aus der Punktwolke zu erhalten.

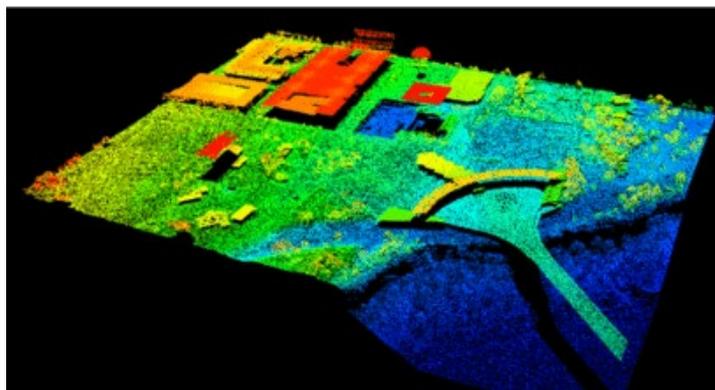


Abbildung 28 Verwendung der Farbintensität pro Höhe¹³

- E. Klassifizierung - dieser Schritt ermöglicht die Zuordnung von Klassifizierungen zu verschiedenen Arten von Elementen/Objekten innerhalb der Punktwolke. Dabei kann es sich um verschiedene Kategorien handeln, wie z. B.: Boden, Wasser, Gebäude usw.

5.5 Datenausgabe

Eine der wichtigsten Datenausgaben ist eine verarbeitete Punktwolkendatei, typischerweise eine LAS- oder LAZ-Datei, die verschiedene Informationen enthält (Einzelheiten in Kapitel O). Einige Softwarepakete ermöglichen den Export von

- Details zur Mission (Daten im LIDAR-Rohdatenpaket enthalten), - Dateityp abhängig von der Software
- während des Einsatzes aufgenommene Bilder (JPEG, PNG, BMP usw.)
- 2D-Karten (z. B. Geotiff - georeferenziertes Bild; TIFF)
- 3D-Modelle (z. B. OBJ, B3DM, OSGB, PLY, S3MB, I2S)

Die Datenausgabe wird in der Regel durch den Erhebungsvertrag und die endgültige Verwendung der Daten vorgegeben.

Referenzen

- 1) <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/drones-information-notice>
- 2) <https://www.parrot.com/en/drone-regulations/eu>
- 3) LiDAR-Fernerkundung und Anwendungen, Dong und Qi Chen, CRC Press
- 4) Staiger R., 2003, "Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications", in 2nd FIG Regional Conference, Sheraton Marrakech, Marrakech, Morocco, December 2-5 (2003)
- 5) <https://www.onyxscan-lidar.com/aerial-photogrammetry-and-drone-based-lidar-for-surveying-missions/>
- 6) Sensitivitätsanalyse und minimale Messgeometrie für die zielbasierte Kalibrierung von terrestrischen High-End-Panorama-Laserscannern
- 7) Unbemannte Luftfahrzeuge für die Vermögensverwaltung, CIRIA
- 8) Kundenleitfaden für 3D-Laserscanning und Datenerfassung - BIM Task Group
- 9) <https://geoslam.com/sample-data/>
- 10) <https://enterprise-insights.dji.com/blog/lidar-equipped-uavs>
- 11) Zhou W., Chen F., Guo H., Panpan T. "UAV Laser scanning technology: a potential cost-effective tool for micro-topography detection over wooded areas for archaeological prospection" in International Journal of Digital Earth, Januar 2020
- 12) DJI L1 Betriebshandbuch, V1.1
- 13) Lohani B., Ghosh S., "Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems" e in Proceedings of the National Academy of Sciences, India - Section A - November 2017.
- 14) <https://www.networkrailmediacentre.co.uk/resources/mzy64-zoghg-6yss8-ig53o-slrQl>
- 15) <https://geo3d.hr/sites/default/files/2018-06/Titan-Specsheet-150515-WEB.pdf>
- 16) <https://www.yellowscan.com/knowledge/how-does-lidar-work/>
- 17) <https://www.dji.com>
- 18) <https://www.gim-international.com/case-study/new-generation-zenmuse-l1-lidar-drone-system-combines-quality-with-affordability>
- 19) Luo, Yawen & Chen, Yuhua. (2021). Energiebewusste dynamische 3D-Platzierung einer Multi-Drohnen-Erfassungsflotte. Sensors. 21. 2622. 10.3390/s21082622.
- 20) <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich von TLS- und ALS-Techniken	10
Tabelle 2 LIDAR-Datentypen und Parameter	14
Tabelle 3 Sentinel-2-Satellitenbilder nach Wellenlängen/Bändern	22
Tabelle 4 Vergleich der Details von LIDAR-Sensoren ¹¹	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 LiDAR-Scanning (a) Terrestrischer Laserscanner auf Stativ ⁴ (b) UAV- gestütztes Laserscanning - Airborne Laser Scanning ⁵	6
Abbildung 2 Passive und aktive Fernerkundung 5 ³	7
Abbildung 3 Hauptkomponenten eines auf einem Stativ montierten TLS (a) Scanner ⁶ (b) Rotationsspiegel im Scanner 6 ⁶	8
Abbildung 4 Schlüsselkomponenten eines ALS-Systems 6 ¹⁶	9
Abbildung 5 Elektromagnetisches Spektrum 8 ³	11
Abbildung 6 ALS-Komponenten 8 ¹³	11
Abbildung 7 Muti Rotar DJI M300 mit L1 Laser Scanner 9 ¹⁷	12
Abbildung 8 L1 Zenmuse DJI Laser Scanner 9 ¹⁰	12
Abbildung 9 LiDAR-Datentypen	13
Abbildung 10 LiDAR-Datenformate ³	15
Abbildung 11 LAS (las) LiDAR-Datenformat ³	16
Abbildung 12 LIDAR-Scan des Hafens ⁹	18
Abbildung 13 Beispiel für das Eindringen des Laserstrahls durch Bäume.	19
Abbildung 14 Beispiel für einen Waldscan ⁹	19
Abbildung 15 Sichtfeld ¹⁹	20
Abbildung 16 Verschiedene Beispiele für LIDAR-Strahldivergenzen (nicht maßstabsgetreu)	21
Abbildung 17 Beispiel für MS-LIDAR-Bilder	24
Abbildung 18 Beispiel für einen LIDAR-Scan der Tower Bridge UK ⁹	25
Abbildung 19 Beispiel eines LIDAR-Scans des Flusses Eden ¹⁴	26
Abbildung 20 Beispiel für eine Powerline-Scan-Analyse ⁹	27
Abbildung 21 Ein Beispiel für LIDAR für Drohnen ausstattungen ¹⁰	28
Abbildung 22 RTK erklärt	30
Abbildung 23 PPK Erläutert	30
Abbildung 24 Flugplanungsparameter	32
Abbildung 25 DJI Terra GUI	33
Abbildung 26 DJI Pilot App - Missionsplanungsbeispiel ¹²	34
Abbildung 27 Beispiel für eine Punktwolke, die für die Inspektion von Stromleitungen erstellt wurde. ¹²	36
Abbildung 28 Verwendung der Farbintensität pro Höhe. ¹³	36