

**BAUSCAN 2023**

---

**Erfassung und Qualität von  
3D Punktwolken. –  
Welchen Beitrag leisten UAV?**

Heinz-Jürgen Przybilla  
Hattingen

# Gliederung

---

- UAVs – Autonome Multi-Sensor Systeme?
- (Direkte?) Georeferenzierung – trivial oder “tricky”?
- Bild- und LiDAR-basierte Punktwolken
- Qualitätsaspekte der 3D-Punktwolke
- Fazit & Ausblick

# UAV - Ein Multi-Sensor-System

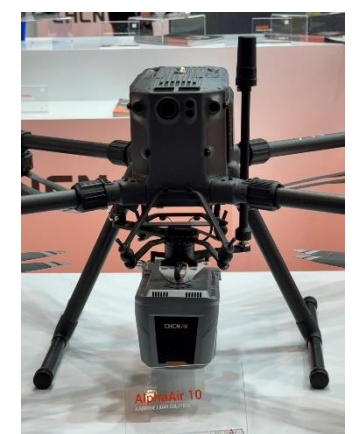
---

Ein UAV kann grundsätzlich als ein **Multi-Sensor-System** betrachtet werden. Hierzu gehören

- Basis-Sensoren zur **Stabilisierung** der Flugplattform,
- Sensoren zur **Orientierung** und **Positionierung** im Raum,
- Sensoren zur **Kollisionsvermeidung** sowie
- **Aufnahmesensoren** (Kameras, Laserscanner) zur gezielten Erfassung ausgewählter Objekte und deren Eigenschaften.

# Impressionen: UAV – Intergeo 2023

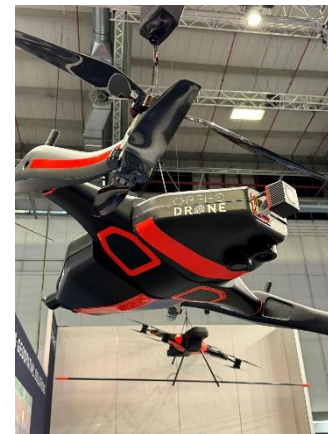
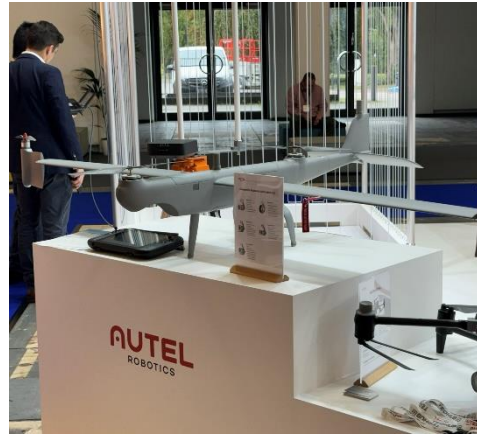
## UAV – Mess-Sensoren





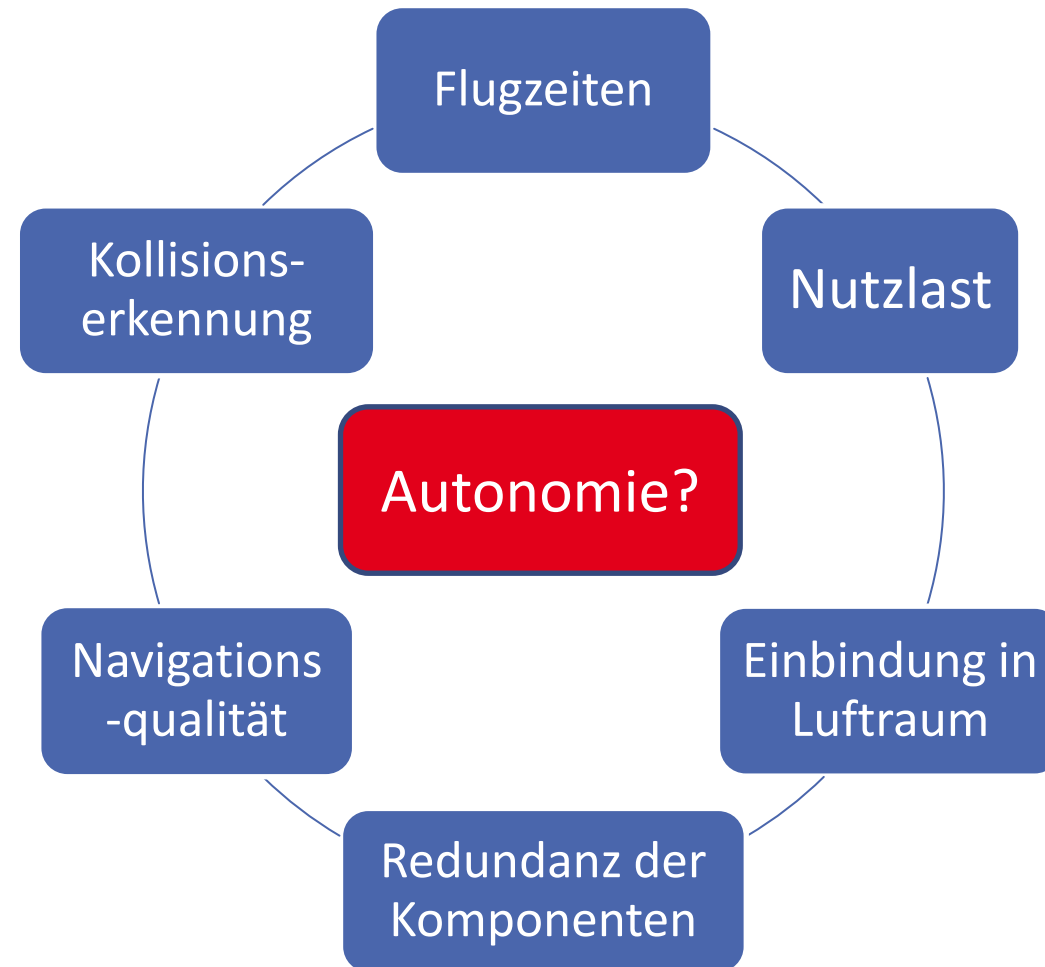
# UAV Plattformen

## ... Größer – Schneller – Weiter ... Autonomer?



# Weiterentwicklung der UAV Technologie

Technologische Verbesserungen stehen im Fokus neuer Systeme.



# Automation vs. Autonomie

---

Die Begriffe **Automatisierung** und **Autonomie** sollten nicht austauschbar verwendet werden, da sie sehr unterschiedliche Konzepte implizieren.

- Ein „**autonomes System**“ ist ein solches, das seine **Mission selbst bestimmt**, während der Mission **eigene Entscheidungen** trifft und seine **eigene strategische Planung** vornimmt - das heißt, es ist völlig selbstbestimmt und beherrscht sich selbst.
- Autonome UAV/UAS im obigen Sinne sind **kurz- bis mittelfristig** realistischerweise **nicht realisierbar!**

Quelle: *European Cockpit Association (ECA):*

[https://www.eurocockpit.be/sites/default/files/2020-04/Automation\\_Autonomy\\_ECA\\_Briefing\\_Paper\\_20\\_0423\\_F.pdf](https://www.eurocockpit.be/sites/default/files/2020-04/Automation_Autonomy_ECA_Briefing_Paper_20_0423_F.pdf)



# Autonomie-Level (\*)

LEVEL AUTONOMIE	0 Keine	1 Pilotengestützt	2 Partiell	3 Bedingt	4 Hoch	5 Voll
<b>Piloten Einbindung</b>	Pilot hat volle Kontrolle über den Steuerknüppel	Pilot hat volle Kontrolle über den Steuerknüppel	Pilot startet und fliegt das UAV	Pilot legt die POI fest	Pilot legt das Interessensgebiet fest	Pilot definiert die zu erfassenden Objekte
<b>System Einbindung</b>	Kontrolle der Höhenlage	Stabile vertikale Position	Stabile vertikale und horizontale Position	Fliegt unter begrenzten Bedingungen	Fliegt unter begrenzten Bedingungen und legt eigenständig POI fest	Fliegt unter allen Bedingungen
<b>Systemebene des Verstehens</b>	Keine	Bestimmt Orientierung und Höhe	Bestimmt Orientierung und Position	Erkennt Hindernisse	Erkennt die 3D-Umgebung	Umfassendes Verstehen
<b>Beispiel</b>	UAV stürzt ohne Piloten ab	UAV bleibt ohne Piloten in der Luft	UAV nutzt Sensoren zur Stabilisierung und erkennt Hindernisse	Das System fliegt und umfliegt Hindernisse	Das System fliegt und erkundet ohne GNSS	Das System fliegt in jeder Umgebung und identifiziert Objekte



# Georeferenzierung

- Die Georeferenzierung ist die Grundlage, vor allem bezüglich der Qualität der Punkte.

GCP

- Der RTK/PPK kommt beim ... besondere

RTK/PPK

... Positionierung ... im 3D-Raum ( $\pm 2-3$  cm)

- Aufwand ... örtlichen Arbeiter (Passpunkt ... -bestimmung).

- Der Einsatz von Airborne Scannern (auf UAV) ist unmittelbar von der Qualität der gemessenen Trajektorie abhängig.

Trajektorie

# Was ist Direkte Georeferenzierung (DG) ?

## Direct Georeferencing for UAV Products & Services

### WHAT IS DIRECT GEOREFERENCING

Direct Georeferencing or DG directly measures the position and orientation of an airborne mapping sensor, such as a digital camera or a laser scanner. Thereby making it possible to assign a geographical location on the earth to a pixel from a camera image or a digital point from a laser, without the need for ground control points or additional measurements referencing the ground.



Quelle: <https://www.applanix.com/products/dg-uavs.htm#overview>

# Komponenten der Direkten Georeferenzierung

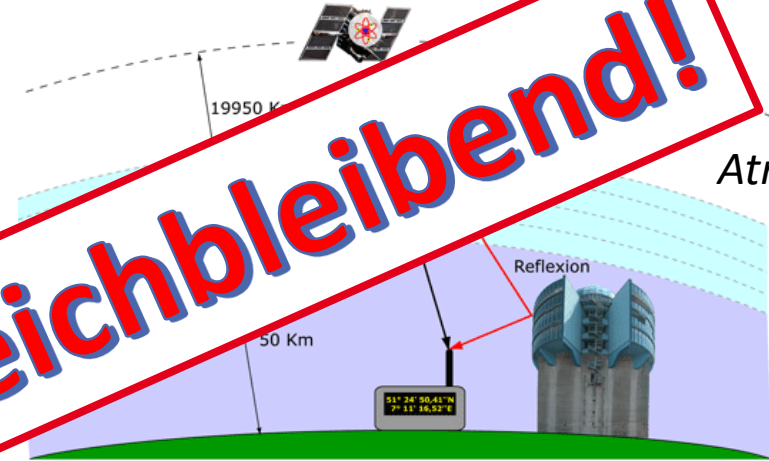


Applanix APX 20  
(GNSS-IMU)



Basisstation

Fotos: Hersteller



Atmosphäre

Quelle: <https://kompendium.infotip.de>

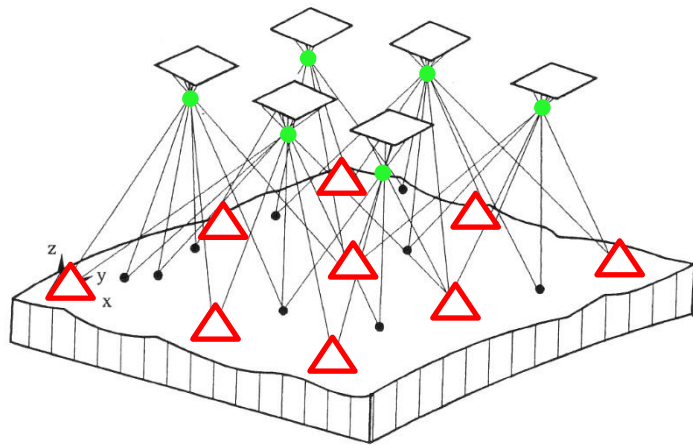


Korrekturdienst

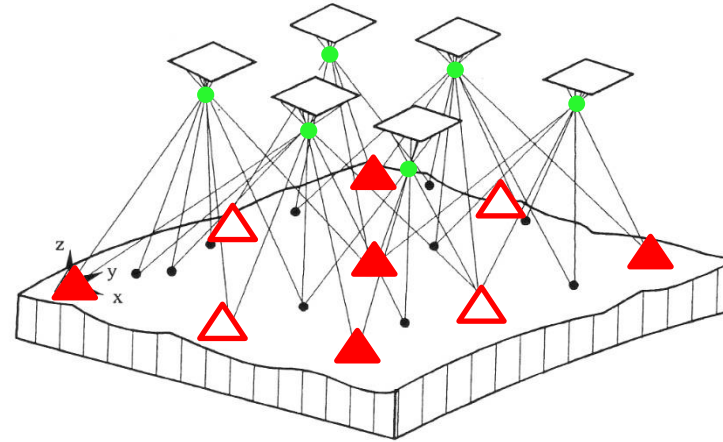
Quelle: <https://sapos.de/>

**Qualität der DG nicht gleichbleibend!**

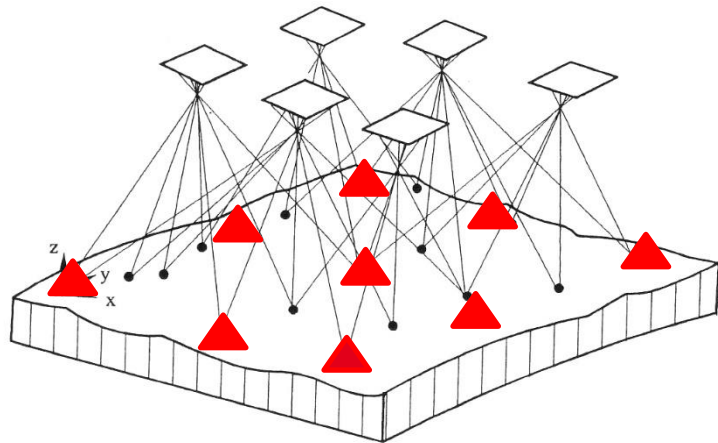
# Georeferenzierung – Trivial oder „tricky“



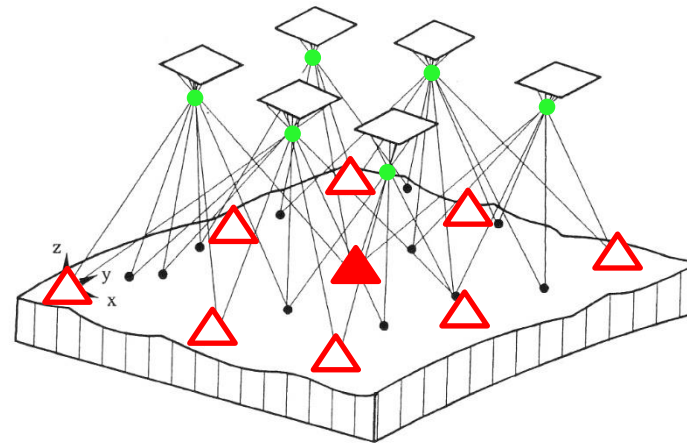
Direkte Lagerung (DG)






Integrierte Lagerung (DG & 4 bzw 5 GCP)



Indirekte Lagerung (GCP)

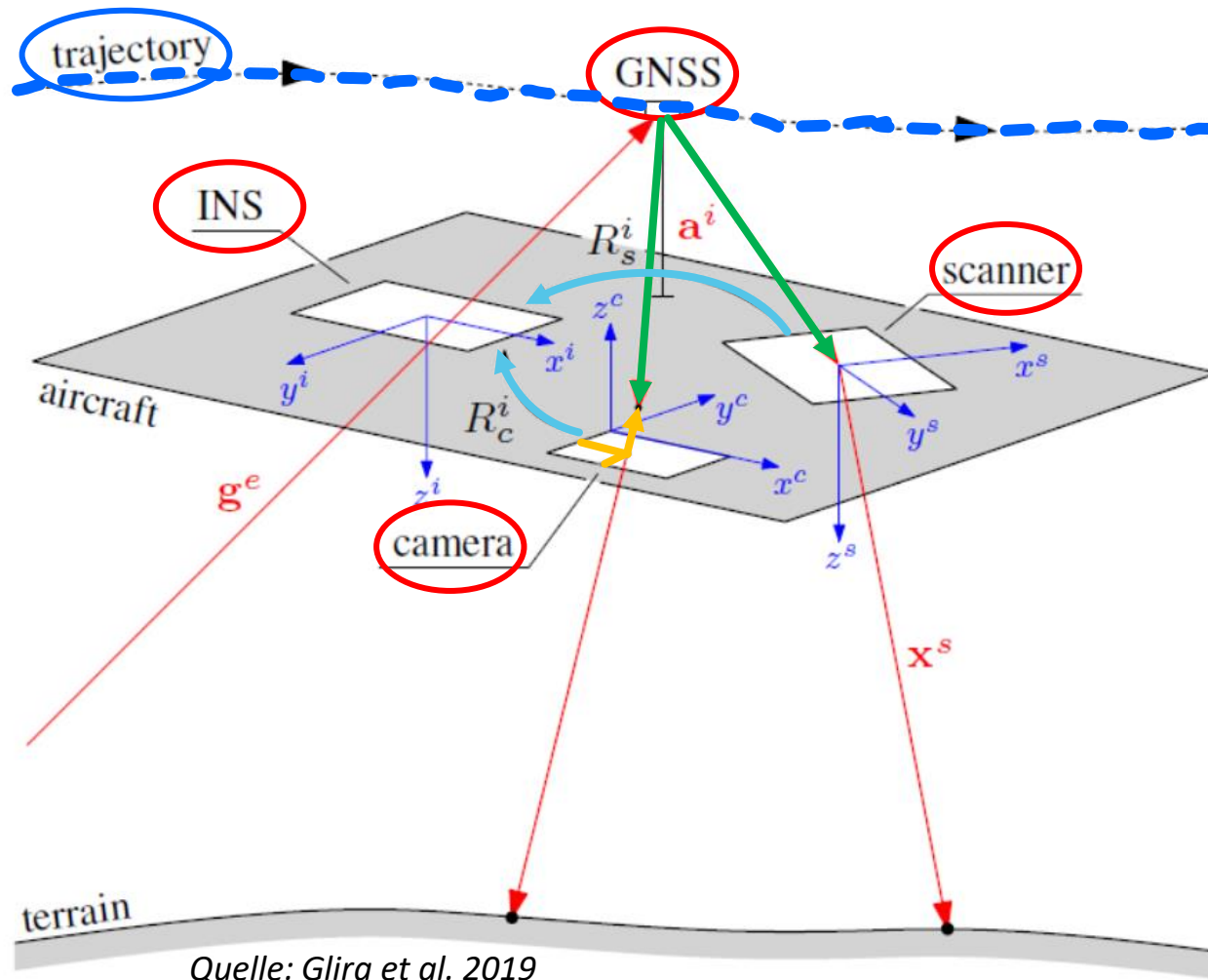


Integrierte Lagerung (DG & 1 GCP)

-  Passpunkt (GCP)
-  Kontrollpunkt (CP)
-  ÄORI - Äussere Orientierung (RTK/PPK)



# Position und Orientierung des UAV im 3D-Raum



- ← Green arrow: Lever arms (Hebelarme)
- ← Blue arrow: Misalignment
- ← Yellow arrow: Innere Orientierung der Kamera

Sensoranordnung auf einer luftgestützten Plattform.

Quelle: Glira et al. 2019

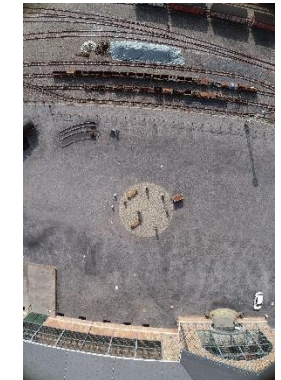
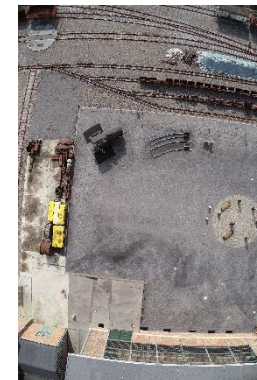
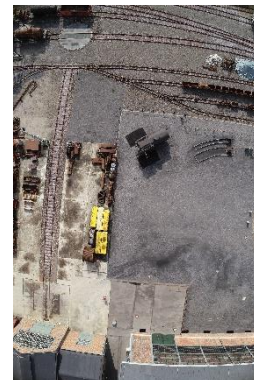
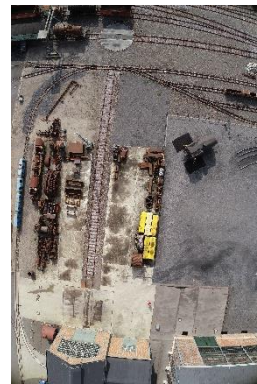
# Bildbasierte Punktwolke

## Digitale Kamera

- Punktuelle Erfassung
- Flächenhafte Abtastung (Foto)



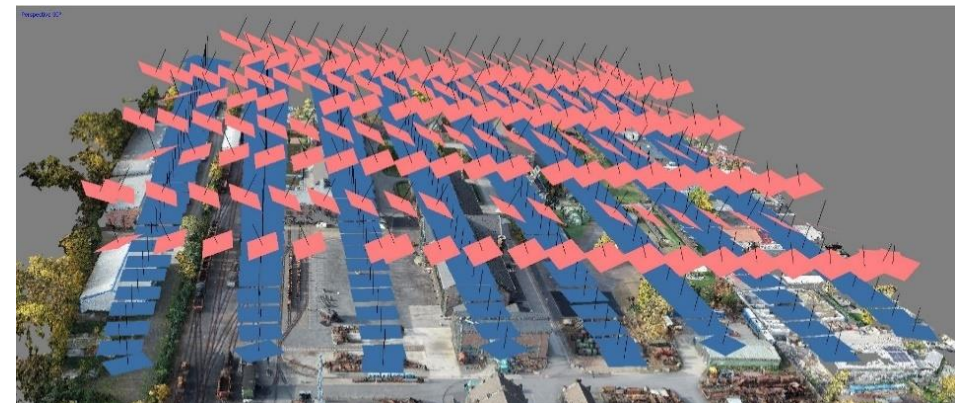
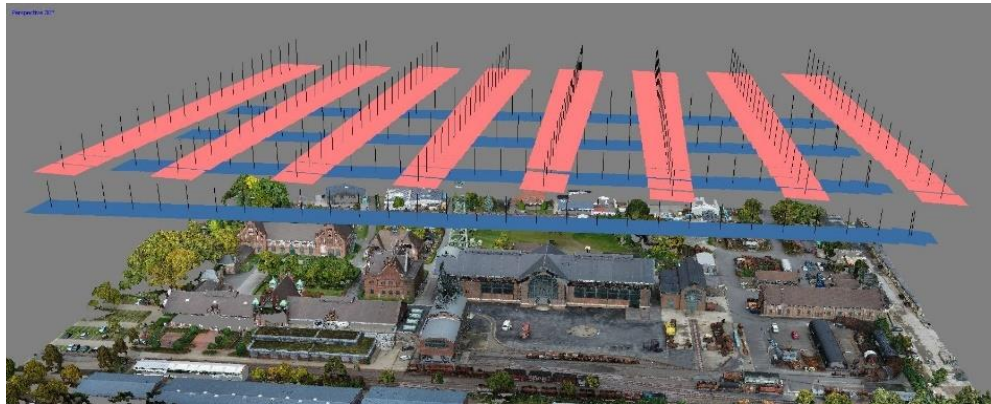
*Quelle der Fotos: Hersteller*



# Bildbasierte Punktwolke

## Qualitätsbeeinflussende Faktoren (Bildflugplanung):

- **Kreuz-Befliegungen** und **Befliegungen in unterschiedlichen Höhen** verbessern die Möglichkeiten der notwendigen Kamerakalibrierung und erhöhen die Gesamtgenauigkeit der Bildorientierung (linkes Bild).
- Ebenso verbessern **Flüge mit Schrägaufnahmen** die Kamerakalibrierung aufgrund der größeren Tiefe der Bildblöcke (rechtes Bild).





# LiDAR-basierte Punktwolke

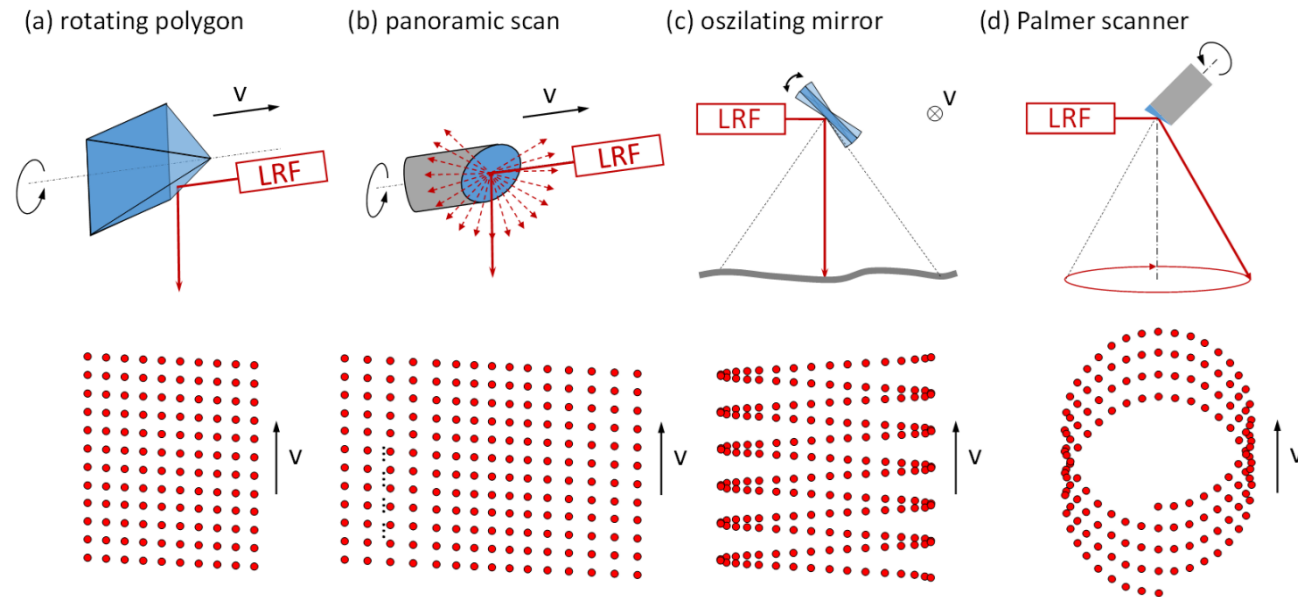
## Laserscanner (LiDAR)

- Kontinuierliche Erfassung
- Abtastung über Scanmuster



Quelle der Fotos: Hersteller

### LRF – Laser Range Finder



Mandlbauer: EduServ 2021, Recent LiDAR technologies

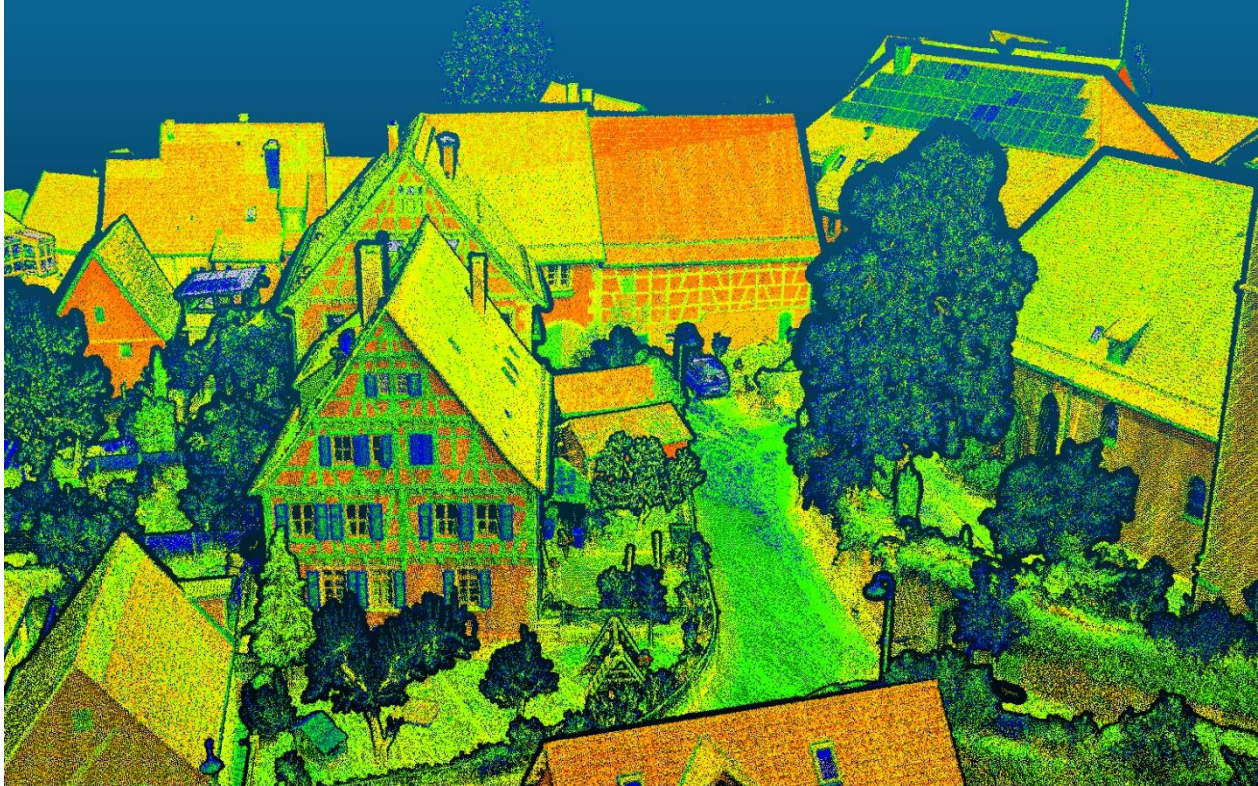
Module 6: UAV - What's new?

15

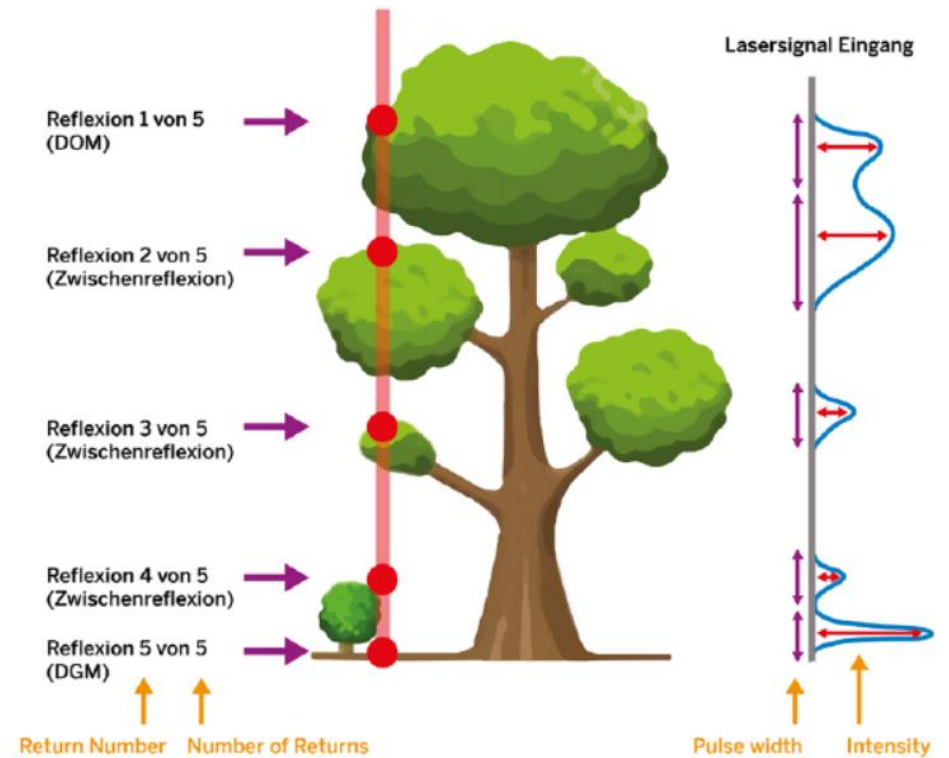
Quelle: G. Mandlbauer (TU Wien)



# LiDAR-basierte Punktwolke



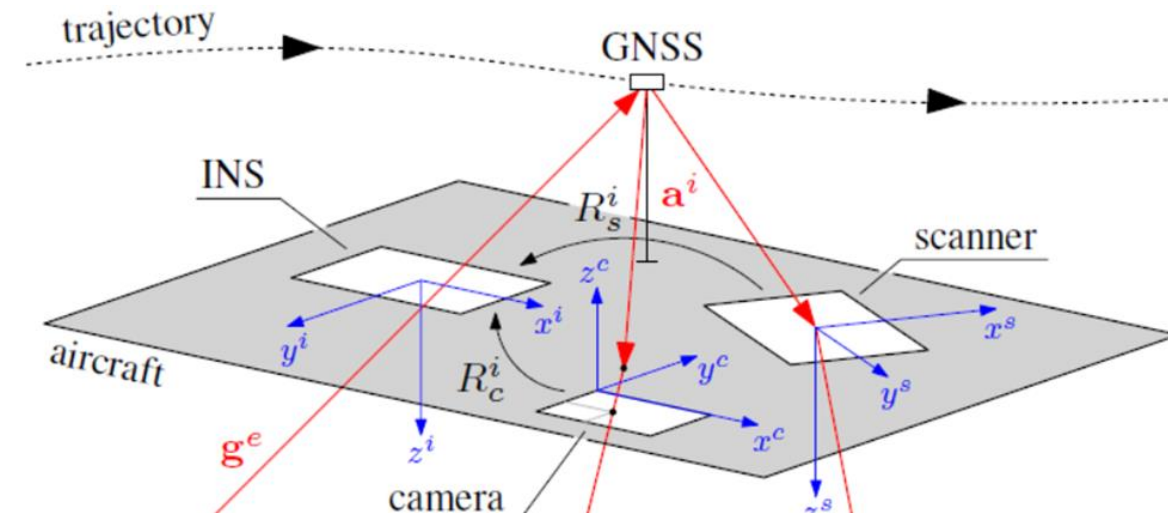
Quelle: Haala et al. 2019, Sensor: RIEGL VUX1-LR.



Quelle: Geobasis NRW

# Werkskalibrierung Laserscanner

- Multi-Sensor-Systeme werden im Werk einer (strengen) Systemkalibrierung unterzogen.
- Diese Kalibrierung bestimmt die **intrinsische Beziehung** zwischen den Elementen der Sensorplattform.
- Beim Betrieb der Plattform können **zusätzliche dynamische Fehler** auftreten.



Quelle: Glira et al. 2019

# Dynamische Fehler

- UAVs sind i.d.R. mit MEMS-Navigationssensoren ausgestattet, die eine hohe Genauigkeit aufweisen.
- Daraus resultierend treten dynamische Fehler auf. Diese sind bei jedem Projekt vorhanden und können nicht vermieden werden.
- Dynamische Fehler sind im Gegensatz zu statischen Kalibrierungsparametern zeitabhängig, was eine Tendenz, dass sie zeitabhängig sein zu können.

**„Schwache“ Bestimmung der Trajektorie**

# Dynamische Fehler beim LiDAR-Flug

---

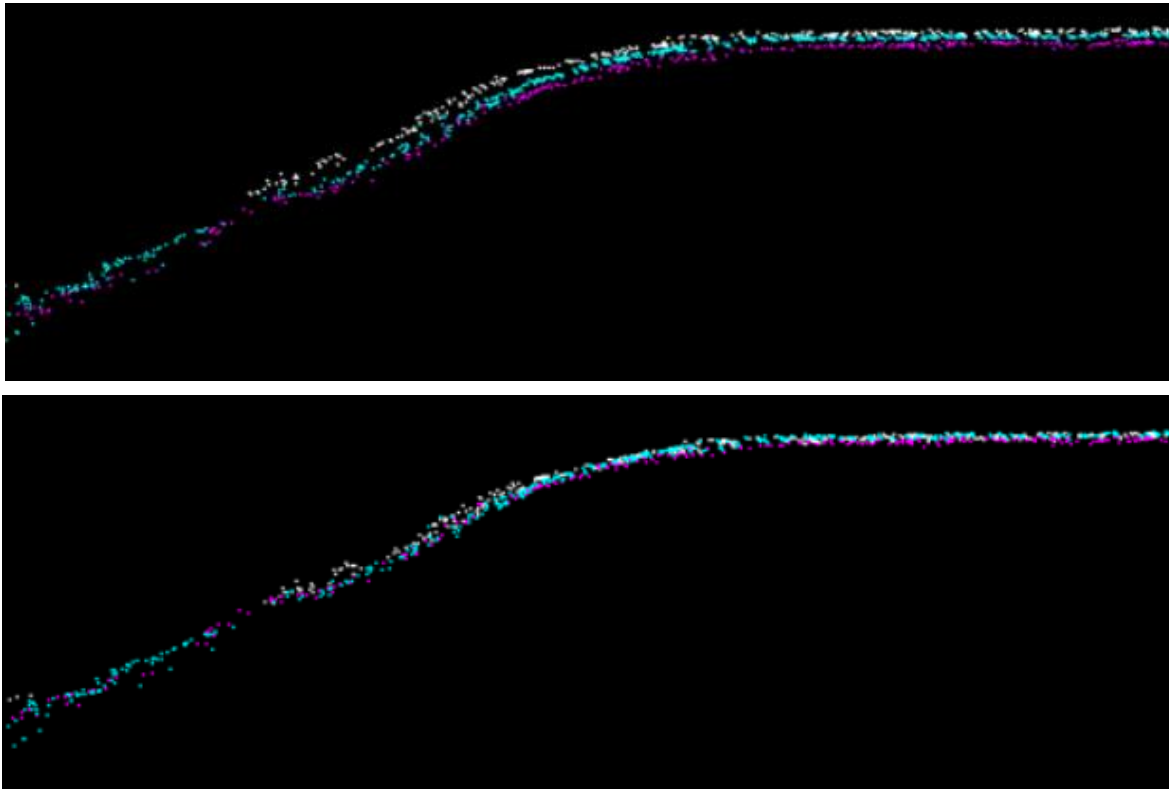
- Trajektorien verschiedener Flüge an verschiedenen Tagen können einen **Versatz** oder eine **Verschiebung** zwischen den Flugstreifen aufweisen.
- Abweichungen in der Trajektorie werden als **Diskrepanzen in der Punktwolke** sichtbar, wenn mehrere Scans denselben physischen Bereich beobachten (überlappende Bereiche).

## Herangehensweise:

Eine nachträgliche Streifenanpassung (-ausgleichung) nutzt Überlappungen, um Fehler der gemessenen Trajektorie zu reduzieren und ermöglicht eine **Selbstkalibrierung** während des Fluges.



# Streifenausgleichung – Beispiel TerraMatch



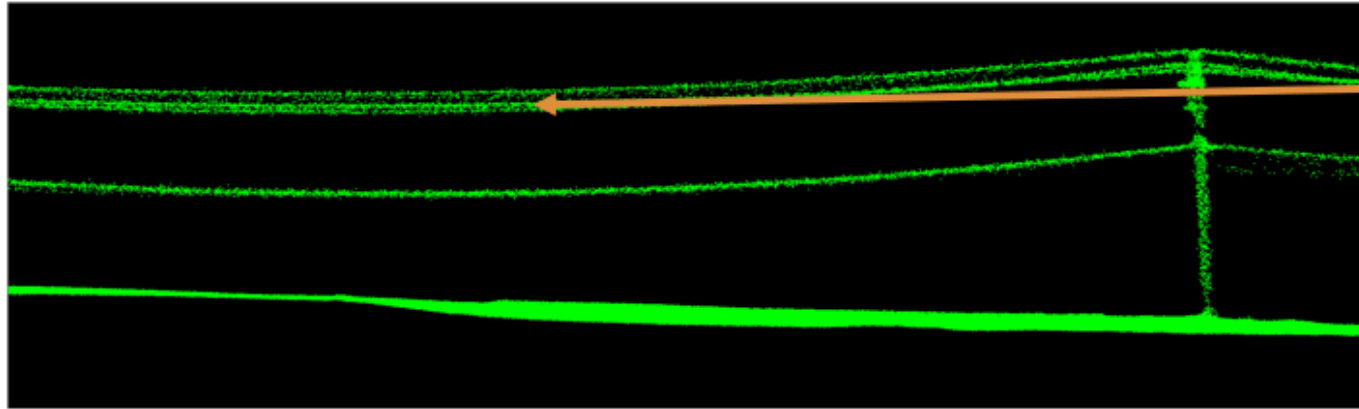
Profile aus zwei Flügen. Oben ohne und unten nach der Korrektur mittels Streifenausgleichung (*Quelle: TerraMatch by TerraSolid, Finnland*).

# Streifenausgleichung – wie korrigiert sie?

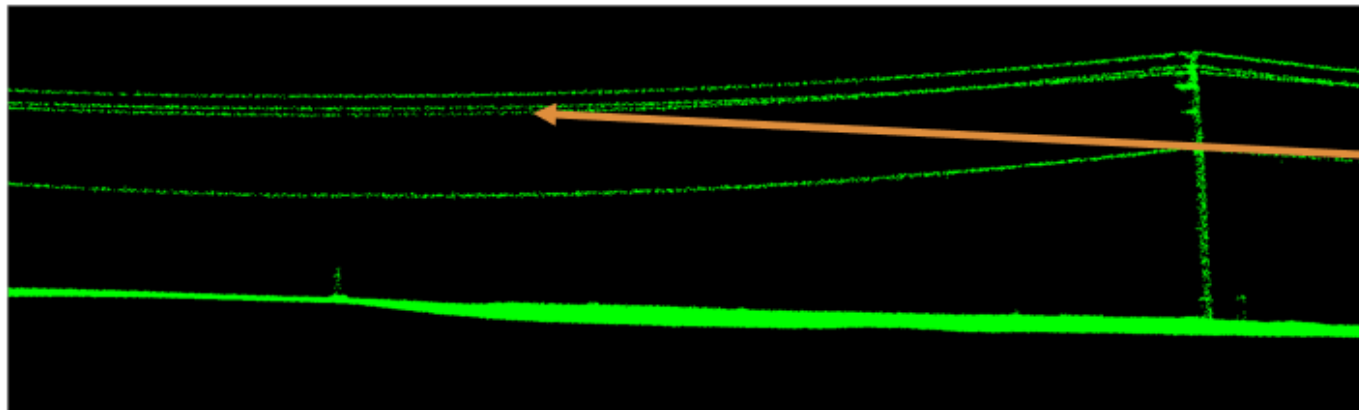
- Die Streifenausgleichung verbessert die Georeferenzierung und die Genauigkeit der Schätzung
  - der Scanner Mounting Kalibrierung
  - Korrekturparametern für die Trajektorienlösung.
- Normalerweise weisen Streifen ein konstanter Offset ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta \text{roll}$ ,  $\Delta \text{pitch}$ ,  $\Delta \text{yaw}$ ) auf.
- Diese Parameter können zeitabhängige Korrekturen für jeden dieser sechs Parameter durch Splines modelliert werden.

**Minimiert Differenzen zwischen Streifen**

# Qualität der LiDAR-Punktwolke



Rauschen in den Laserdaten verhindert automatische Leitungs-Detektion (Scanner 1).



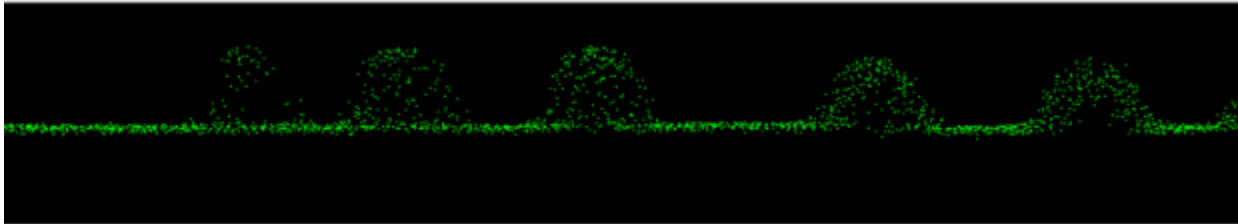
Klare Trennung der individuellen Leitungsverläufe (Scanner 2).

Quelle: G. Mandlbauer (TU Wien)

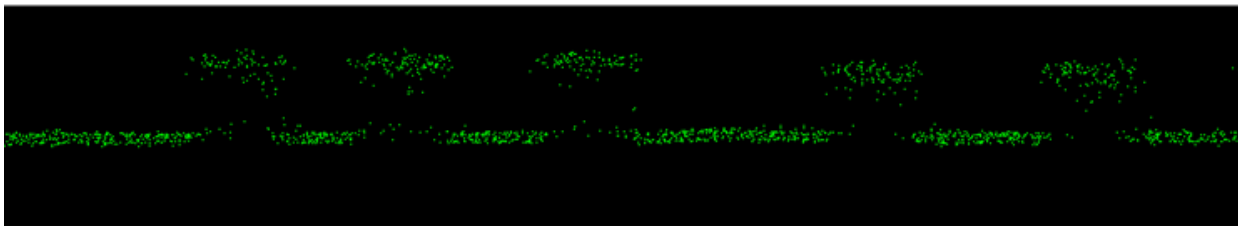
# Qualität der LiDAR-Punktwolke



Lineare Anordnung rechteckiger Lüfter



Die Gestalt der Lüfter wird in der Punktwolke stark verformt – möglicherweise durch einen **Glättungsfilter** (Scanner 1).

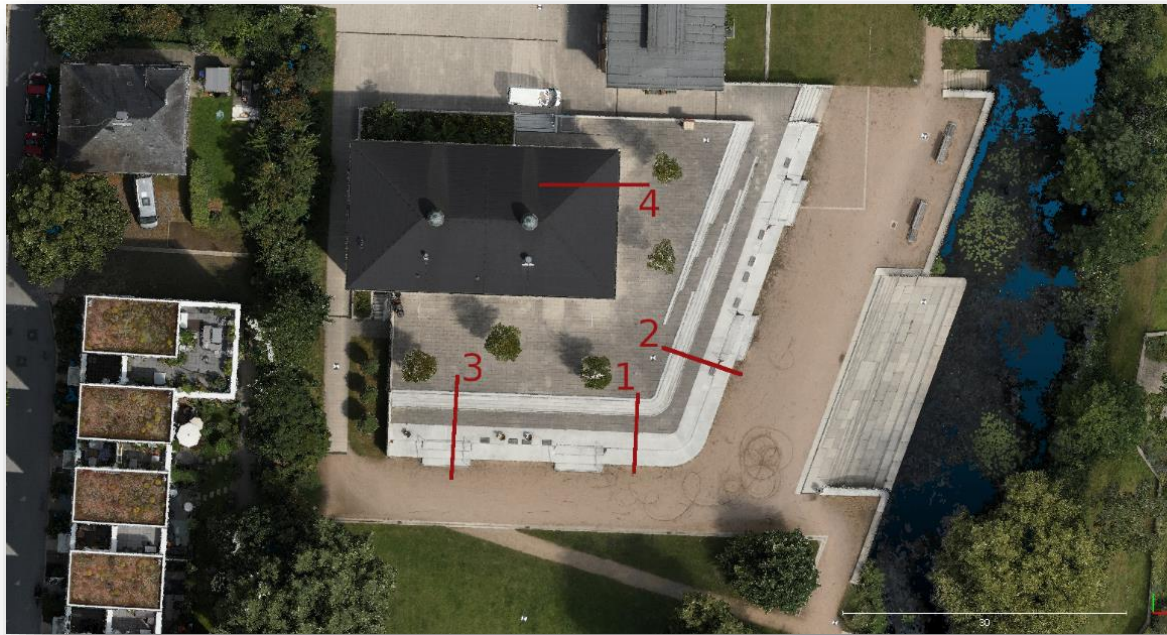


Die Punktwolke gibt die Gestalt der Lüfter korrekt wider (Scanner 2).

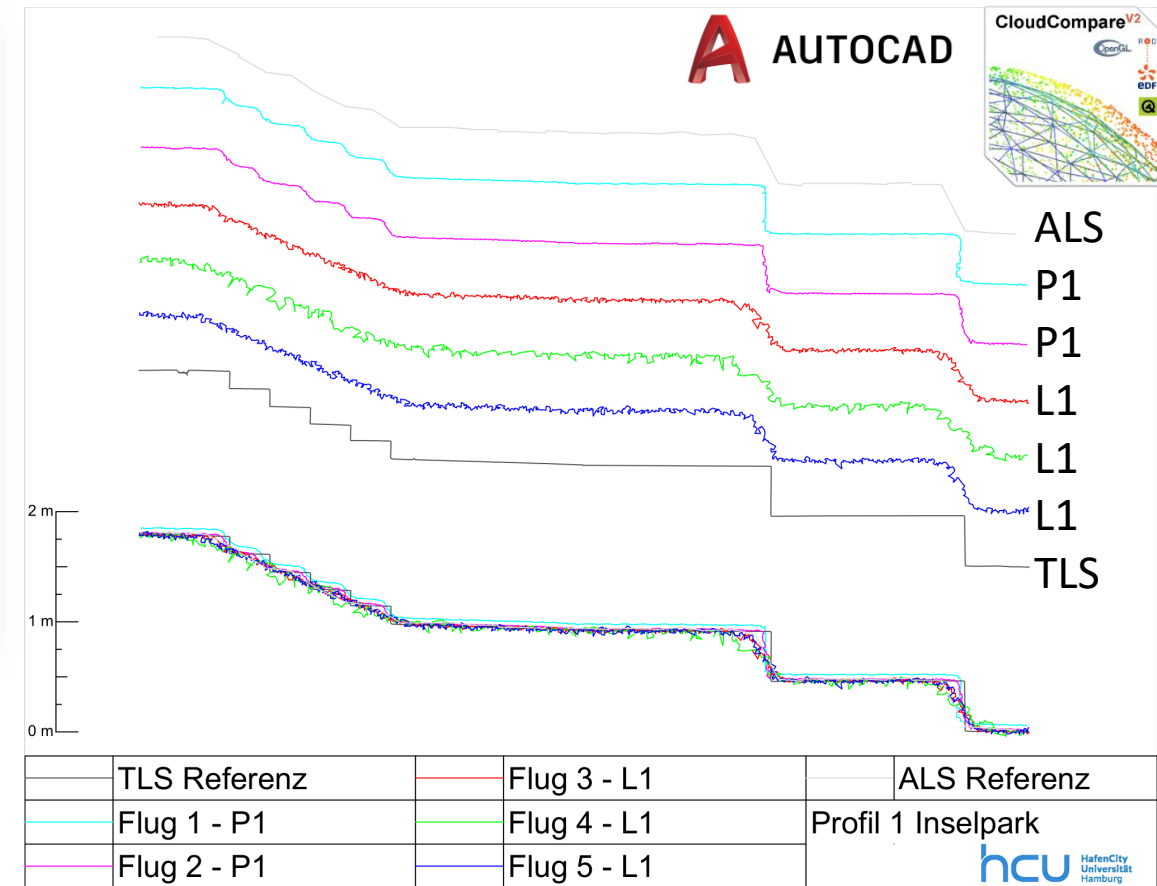
Quelle: G. Mandlbauer (TU Wien)



# Qualität der 3D Punktwolke



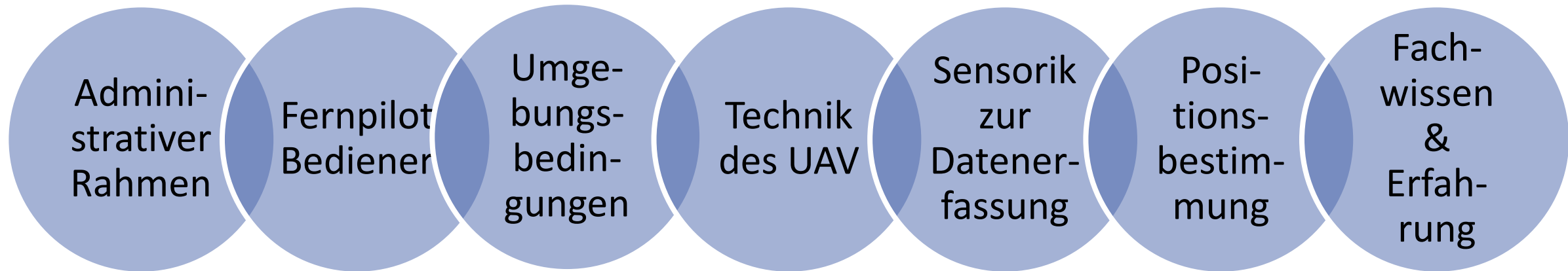
**UAV-Testfeld Hamburg Inselpark**  
 Vergleich ausgewählter Profile aus  
**DJI Livox L1** sowie Digitalkamera **P1** mit  
 TLS Referenzdaten (FARO Focus3D X330)



Quelle: Kersten et al. 2022

# Qualitätssicherung – was tun?

---



→ ZIEL: Optimierung aller Elemente der UAV-Prozesskette!

# Fazit & Ausblick

---

Die simultane Kalibrierung der UAV-Mess-Sensoren ist zwingend!

- Achten Sie auf Flugkonfigurationen, wenn Sie gleichzeitig Ihre nicht-metrische UAV-Kamera kalibrieren.
- Die Kalibrierung von LiDAR-Systemen durch die Hersteller ist nur eine Grundlage, die für weniger wertige Anwendungen genutzt werden kann.
- Die Streifenausgleichung bietet die Möglichkeit Systemparameter zu kalibrieren, die zu einer Verbesserung der Punktwolkenqualität führen.

# Fazit & Ausblick

- Am Markt verfügbare geodätische ... nächste Leistungsmerkmale, die direkt ... des Ergebnisses haben.
- Die System ... unabhängige Einrichtungen (z.B. ... muss (auch) zukünftig gewährleistet

**Bringen Sie Ihr photogrammetrisches Wissen auf einen aktuellen Stand!**

... Weise für die Wirkweisen eingesetzter Software!





Deutsche  
Gesellschaft für  
Photogrammetrie,  
Fernerkundung und  
Geoinformation

Kompetenz seit 1909!

[www.dgpf.de](http://www.dgpf.de)