

**Oldenburger 3D-Tage 2024**

---

**Anmerkungen zur  
Qualitätssicherung von  
UAV-Messungen**

Heinz-Jürgen Przybilla  
Hattingen

# Gliederung

---

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

# UAV - Ein Multi-Sensor-System

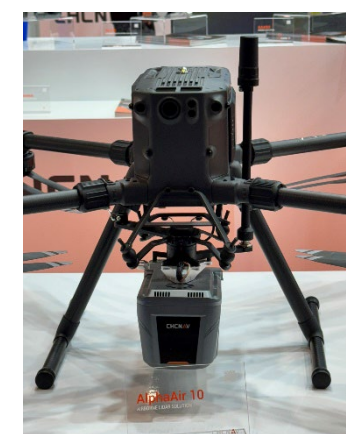
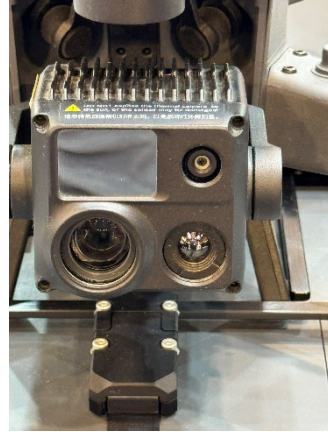
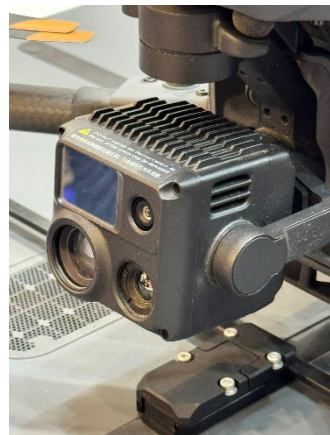
---

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

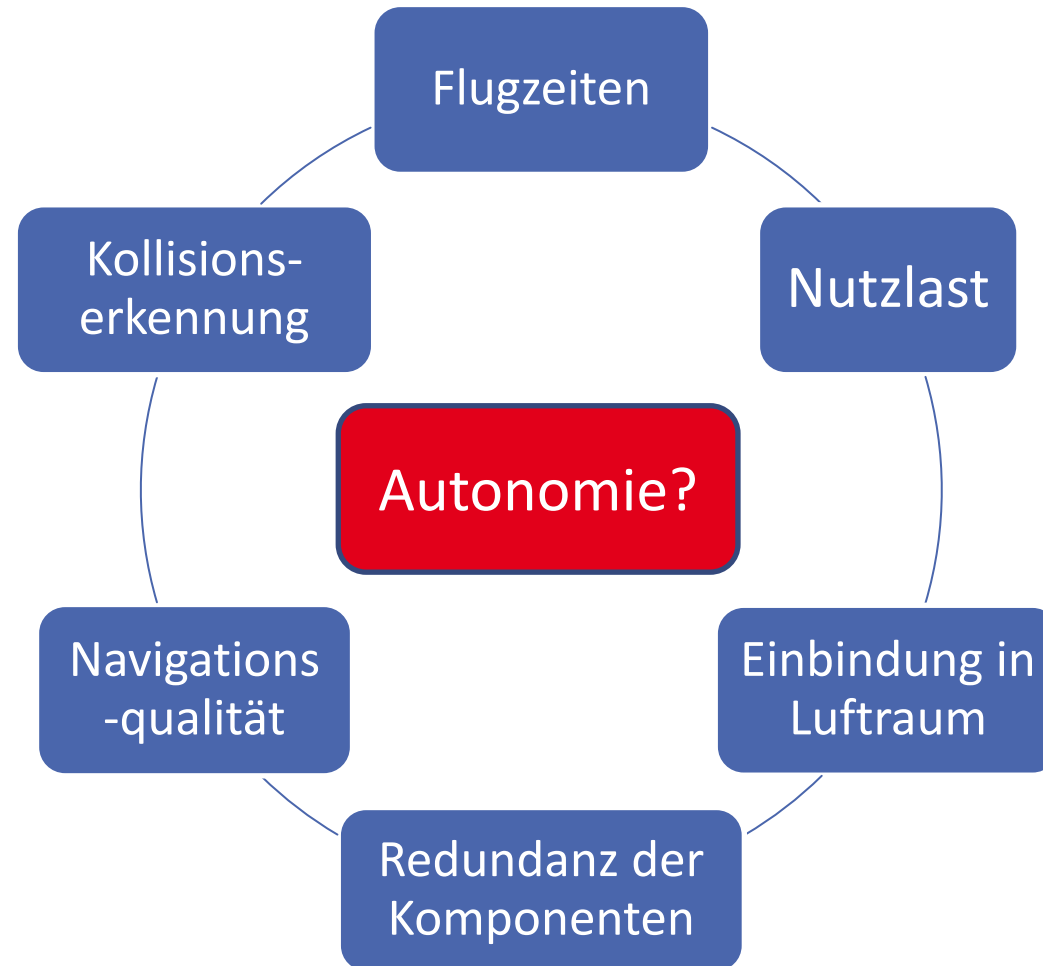
## UAV – Mess-Sensoren





# Qualitäts-Entwicklung 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 – zukünftig z.B. durch den Einsatz von KI.
- 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)

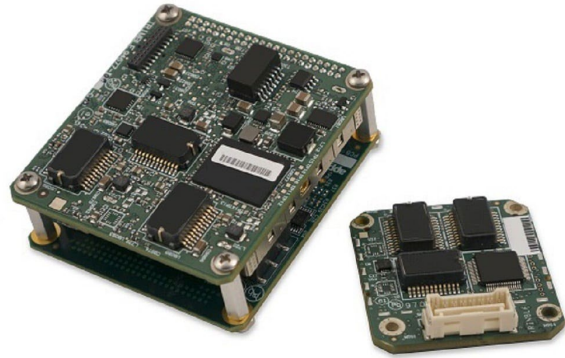
# Qualitätsmerkmal „Georeferenzierung“

---

- Die Georeferenzierung ist eine zentrale Grundlage, vor allem bezüglich der Qualität der Punktwolke.
- Der **RTK/PPK-Technologie** kommt beim UAV-Einsatz eine besondere Bedeutung zu:
  - Präzisere Positionierung der UAV-Plattform im 3D-Raum ( $\pm 2-3$  cm)
  - **Direkte Georeferenzierung**
  - Aufwandsreduzierung bei den örtlichen Arbeiten (Passpunktsignalisierung und -bestimmung).
  - Der Einsatz von Airborne Scannern (auf UAV) ist unmittelbar von der Qualität der gemessenen **Trajektorie** abhängig.



# Komponenten der Direkten Georeferenzierung

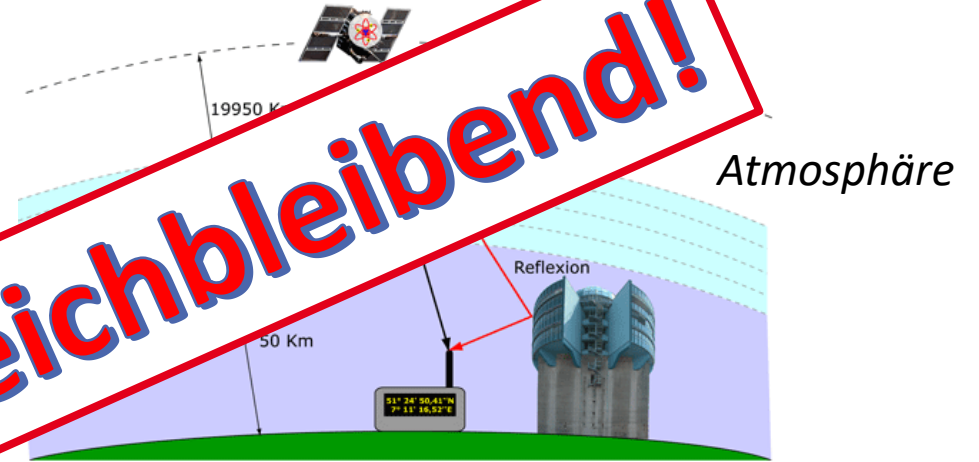


Applanix APX 20  
(GNSS-IMU)



Basisstation

Fotos: Hersteller



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

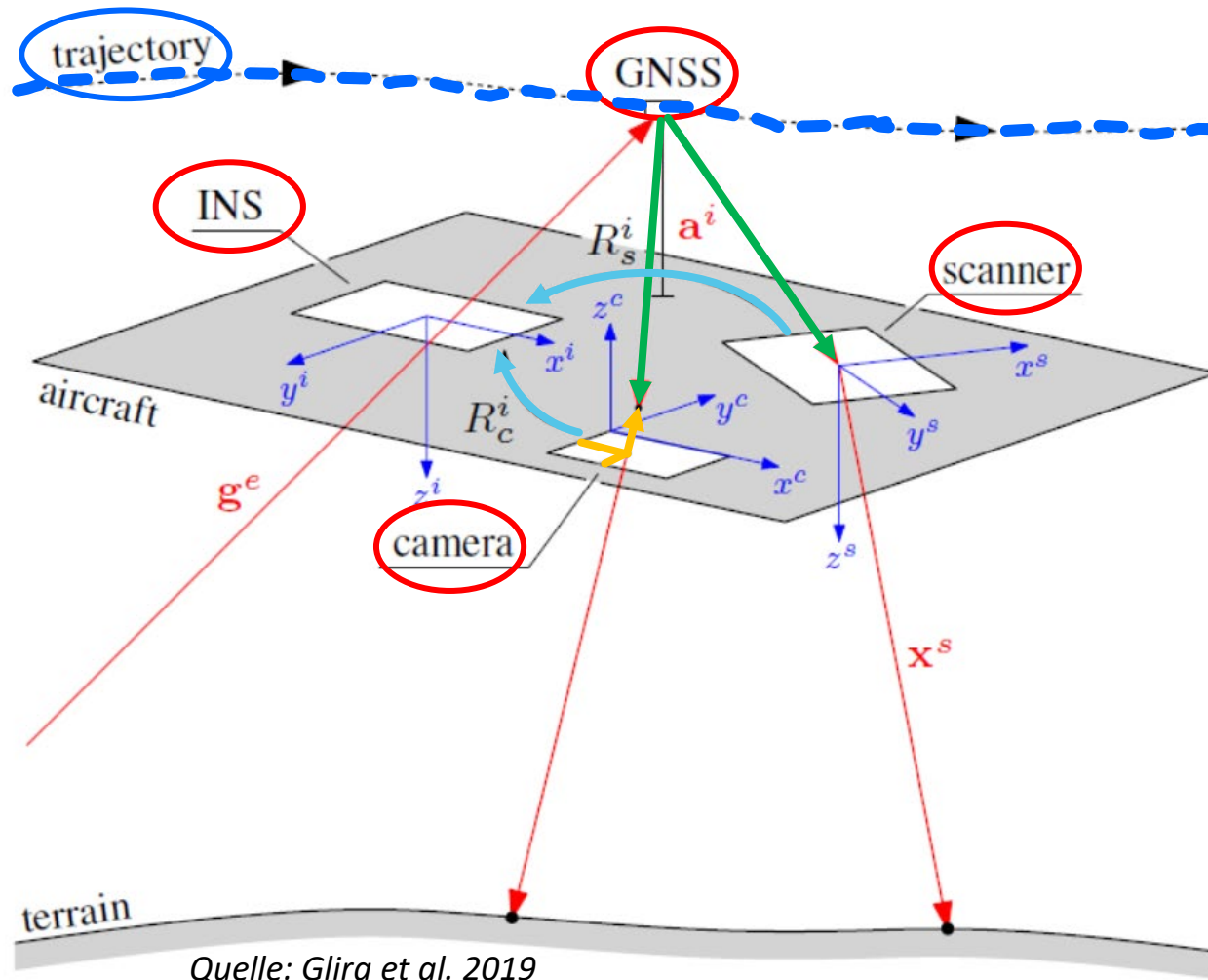


Korrekturdienst

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

**Qualität der DG nicht gleichbleibend!**

# Position und Orientierung des UAV im 3D-Raum



- ← Lever arms (Hebelarme)
- ← Misalignment
- ← Innere Orientierung der Kamera

Sensoranordnung auf einer luftgestützten Plattform.

Quelle: Glira et al. 2019

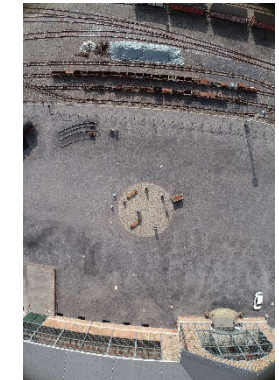
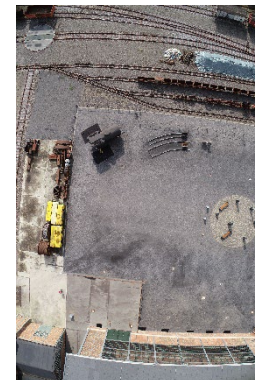
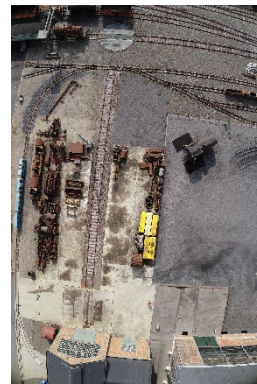
# Bildbasierte Punktwolke

## Digitale Kamera

- Punktuelle Erfassung
- Flächenhafte Abtastung (Foto)



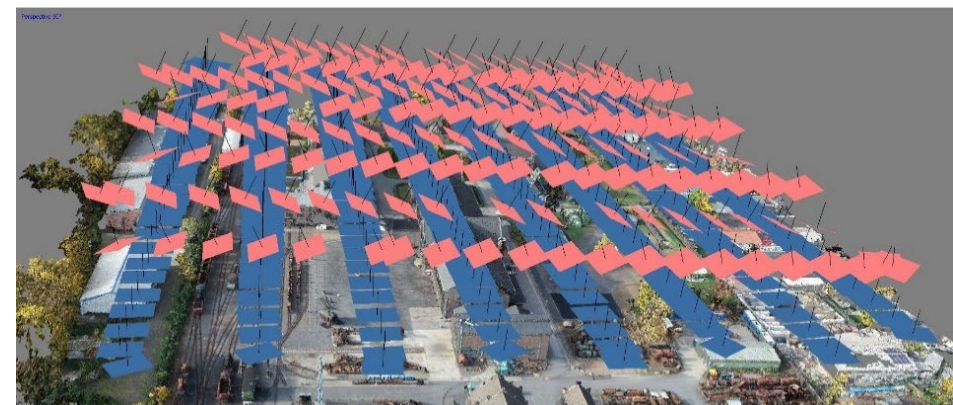
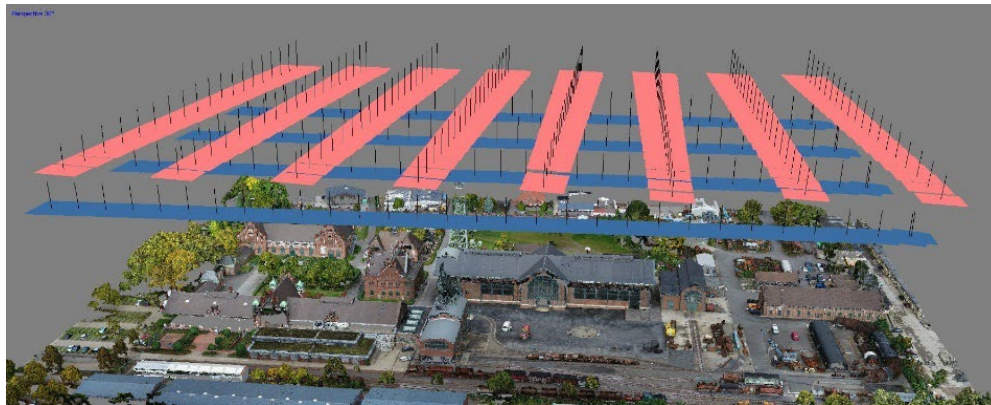
*Quelle der Fotos: Hersteller*



# Qualität bildbasierter Punktwolken

## 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).



# Qualität LiDAR-basierter Punktwolken

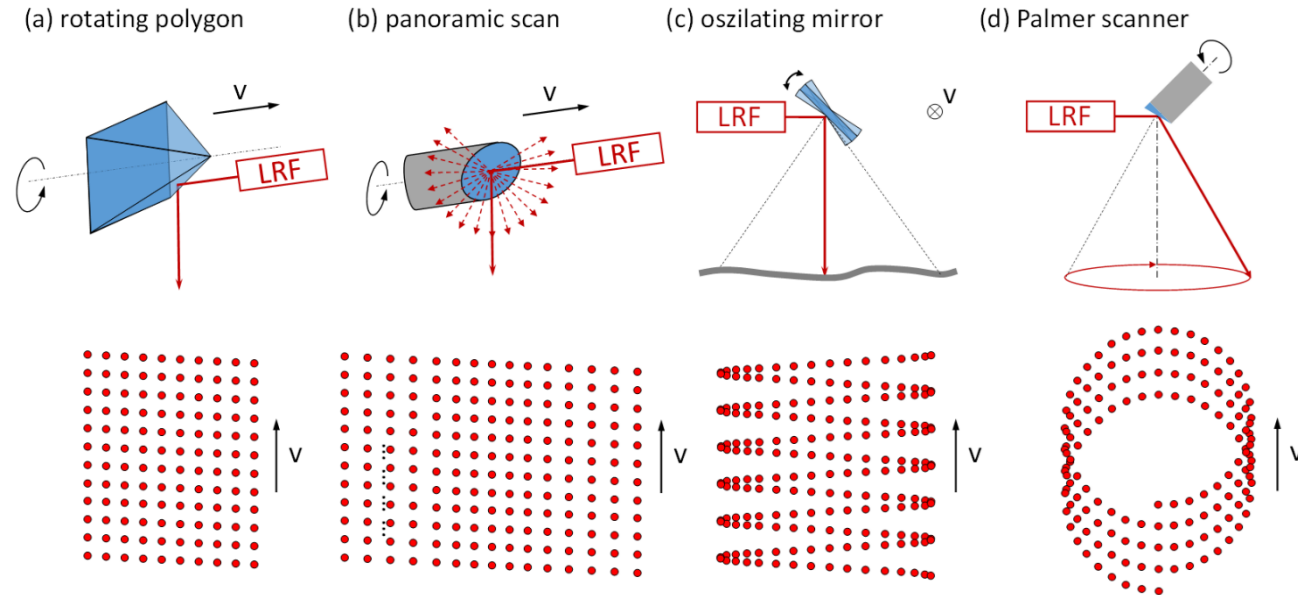
## Laserscanner (LiDAR)

- Kontinuierliche Erfassung
- Abtastung über Scanmuster



Quelle der Fotos: Hersteller

### LRF – Laser Range Finder



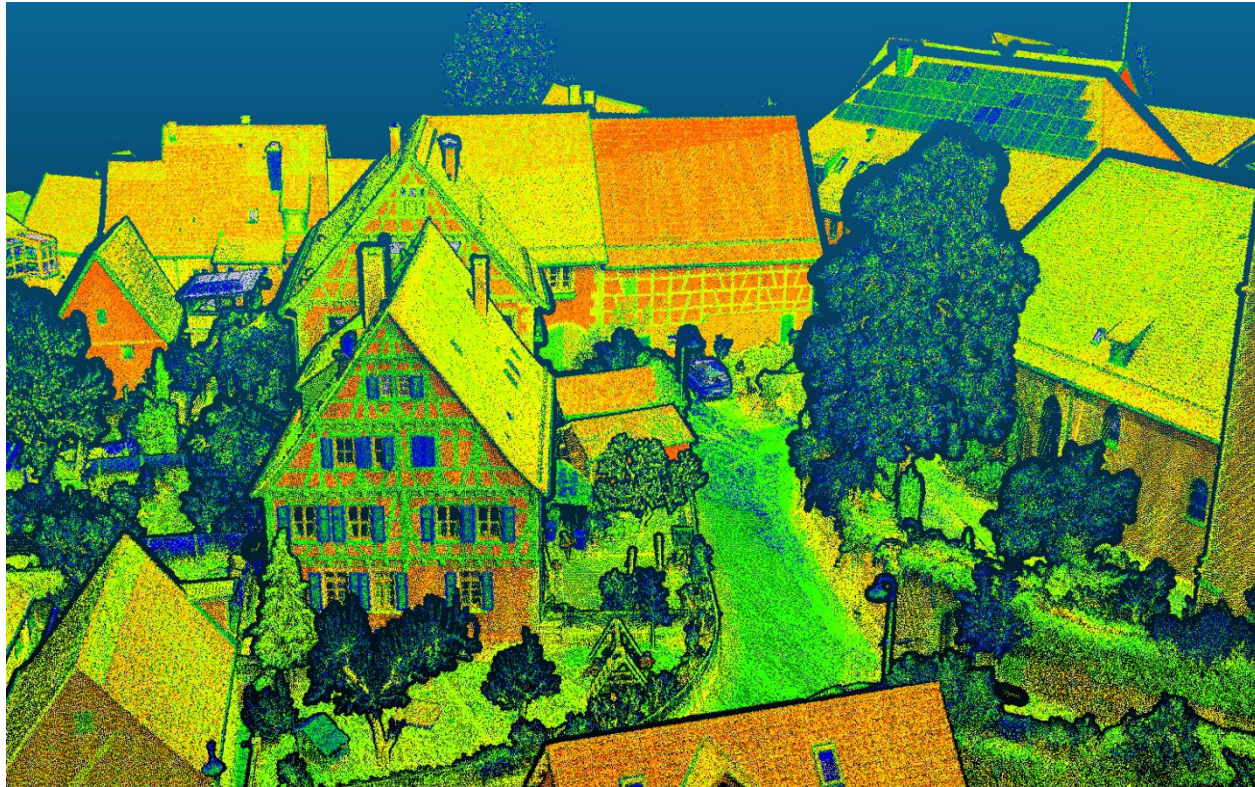
Mandlbürger: EduServ 2021, Recent LiDAR technologies

Module 6: UAV - What's new?

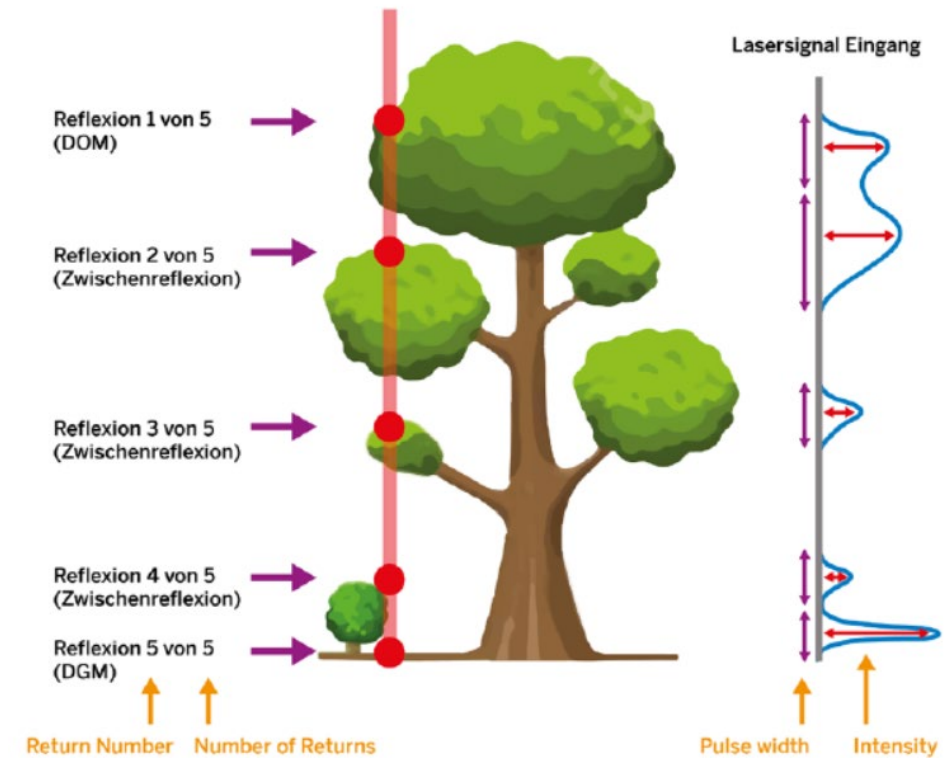
15

Quelle: G. Mandlbürger (TU Wien)

# Qualität LiDAR-basierter Punktwolken



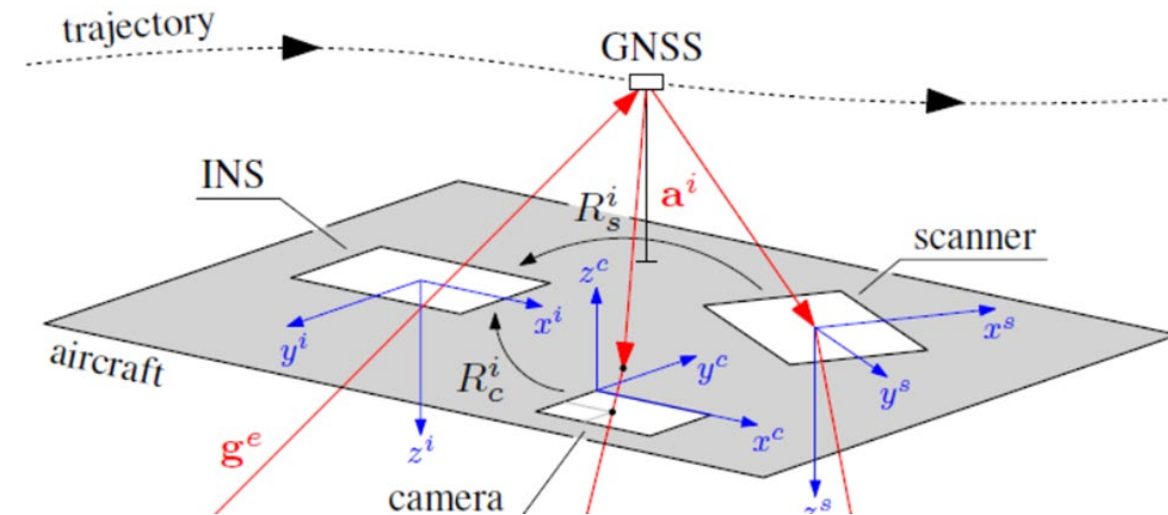
Quelle: Haala et al. 2019, Sensor: RIEGL VUX1-LR.



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 tendenz, dass sie zeitabhängig sein zu können.

**„Schwache“ Bestimmung der Trajektorie**



# Dynamische Fehler beim LiDAR-Flug

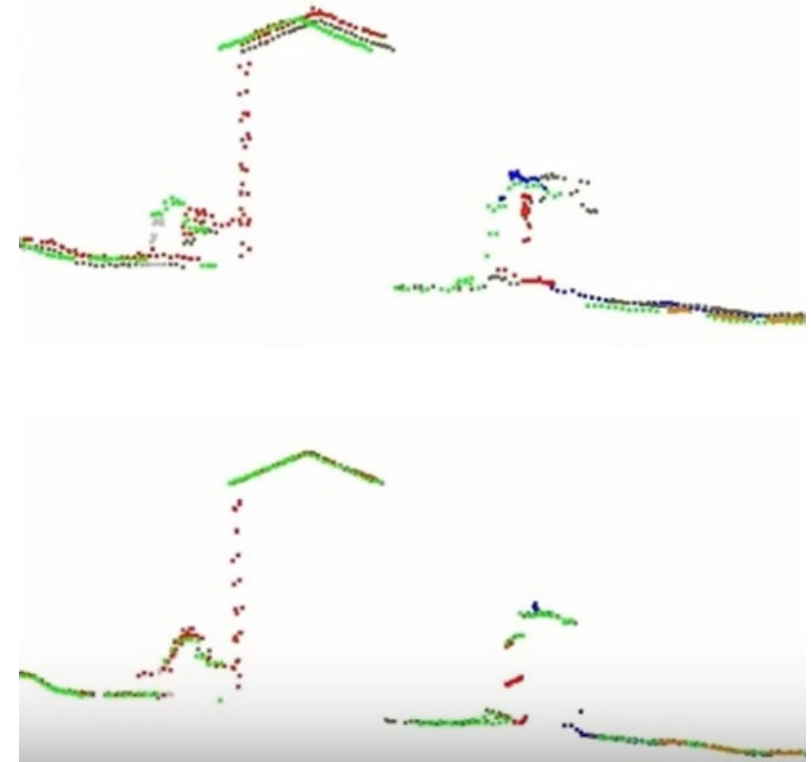
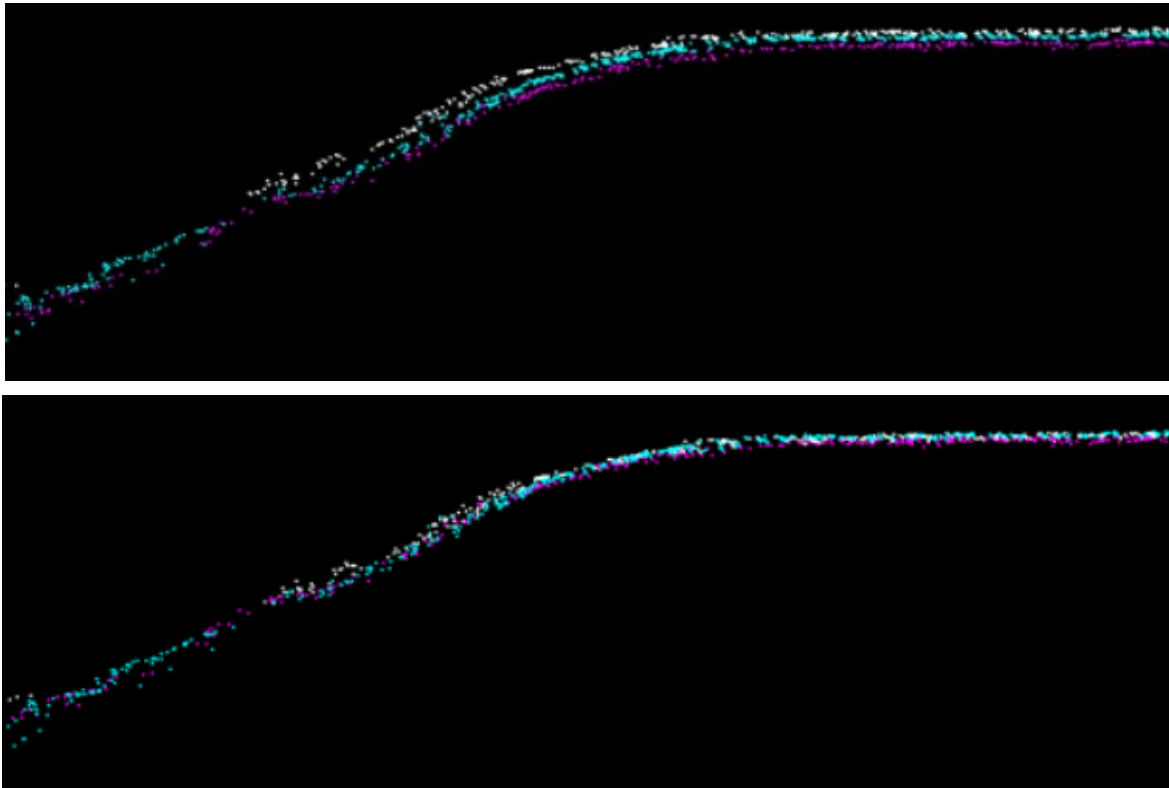
---

- 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.

# Streifenenausgleichung – Beispiel TerraMatch



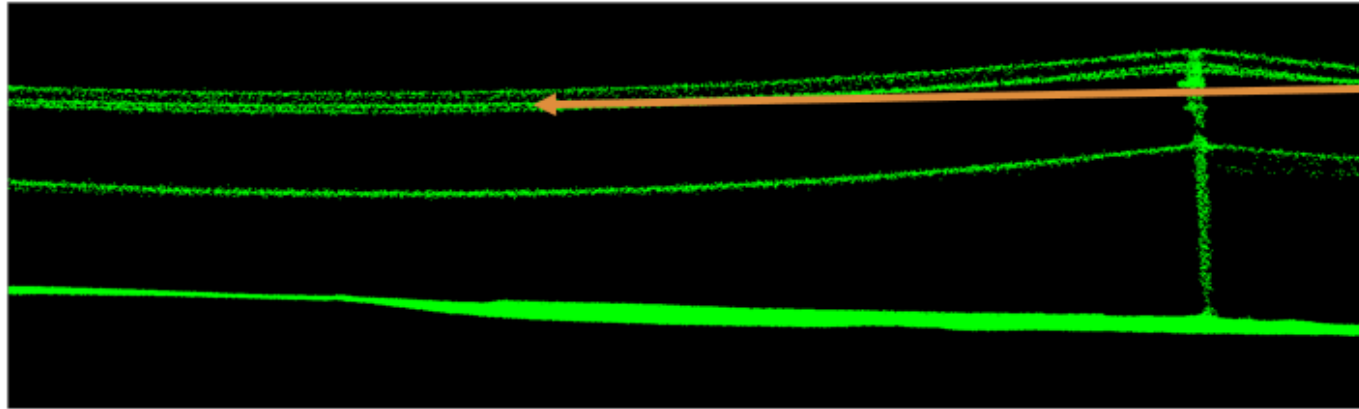
Profile aus zwei Flügen. Oben ohne und unten nach der Korrektur mittels Streifenenausgleichung (*Quelle: TerraMatch by TerraSolid, Finnland*).

# Streifenausgleichung – was korrigiert sie?

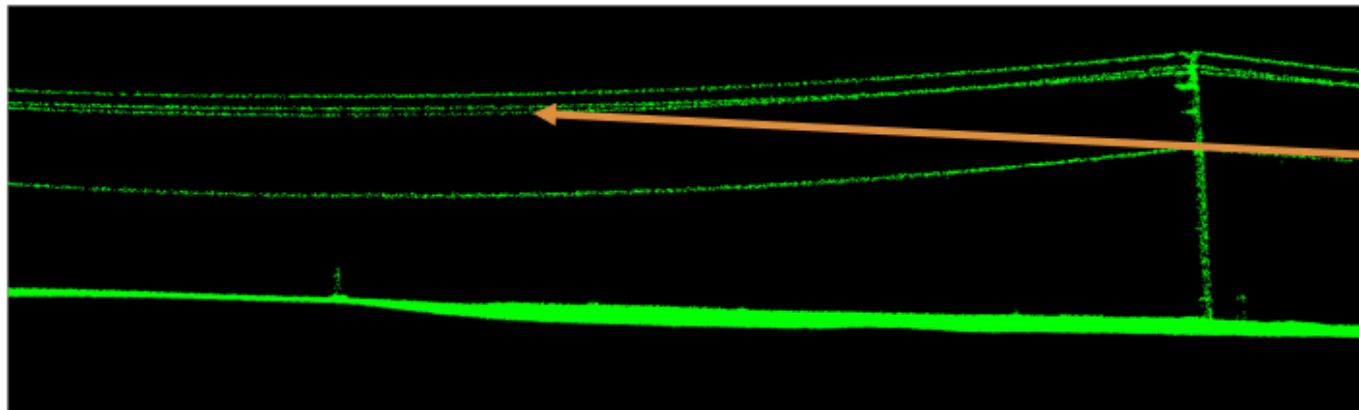
---

- Die Streifenausgleichung verbessert die Georeferenzierung durch Schätzung
  - der **Scanner Mounting Kalibrierung** sowie von
  - **Korrekturparametern** für die **GNSS/IMU-Trajektorienlösung**.
- Normalerweise wird für jeden Streifen ein **konstanter Offset** ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta \text{roll}$ ,  $\Delta \text{pitch}$ ,  $\Delta \text{yaw}$ ) geschätzt.
- Alternativ dazu können **zeitabhängige Korrekturen** für jeden dieser sechs Parameter durch Splines modelliert werden.

# Qualität der LiDAR-Punktwolke



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



Klare Trennung der individuellen Leitungsverläufe (Scanner 2).

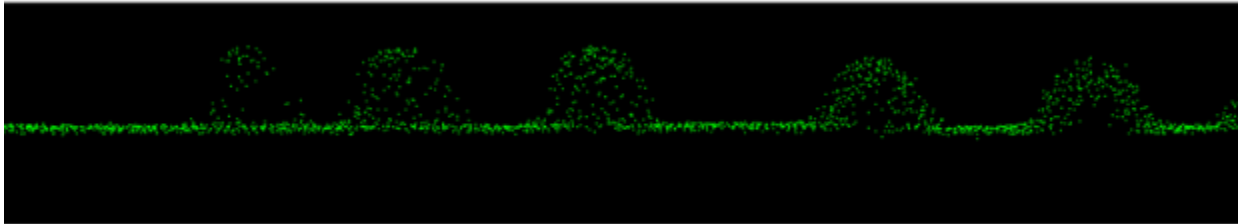
Quelle: G. Mandlbauer (TU Wien)

**Einflussfaktor: Sensor**

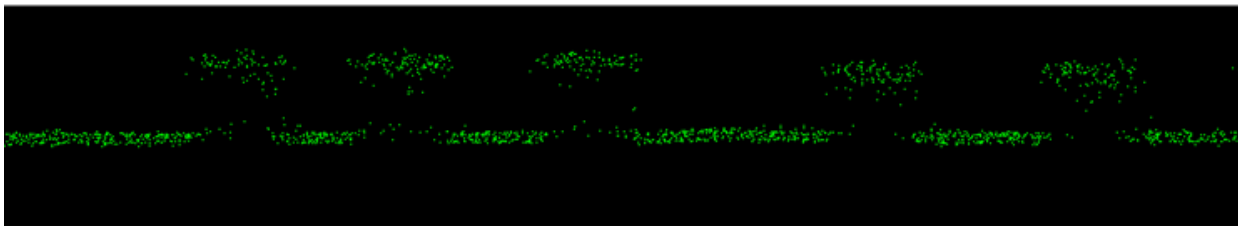
# Qualität der LiDAR-Punktwolke



Lineare Anordnung rechteckiger Lüfter



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

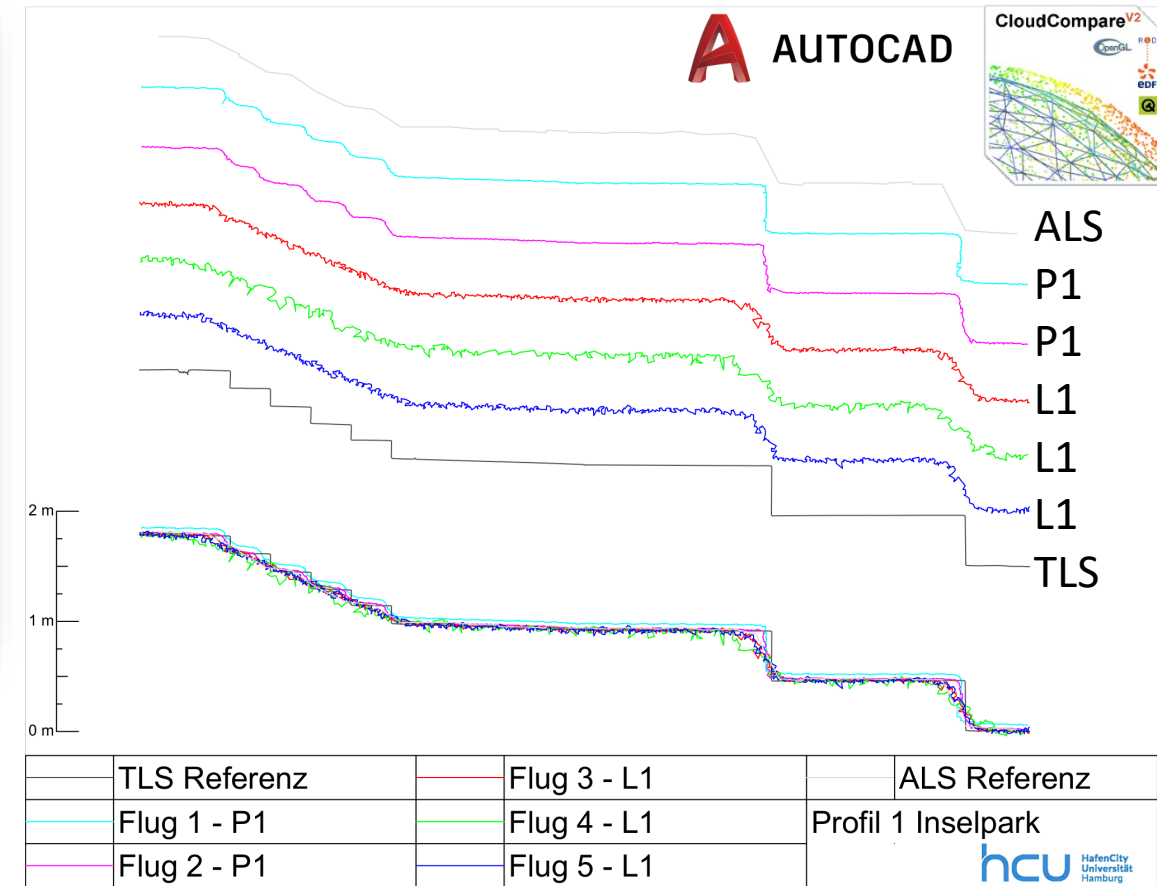
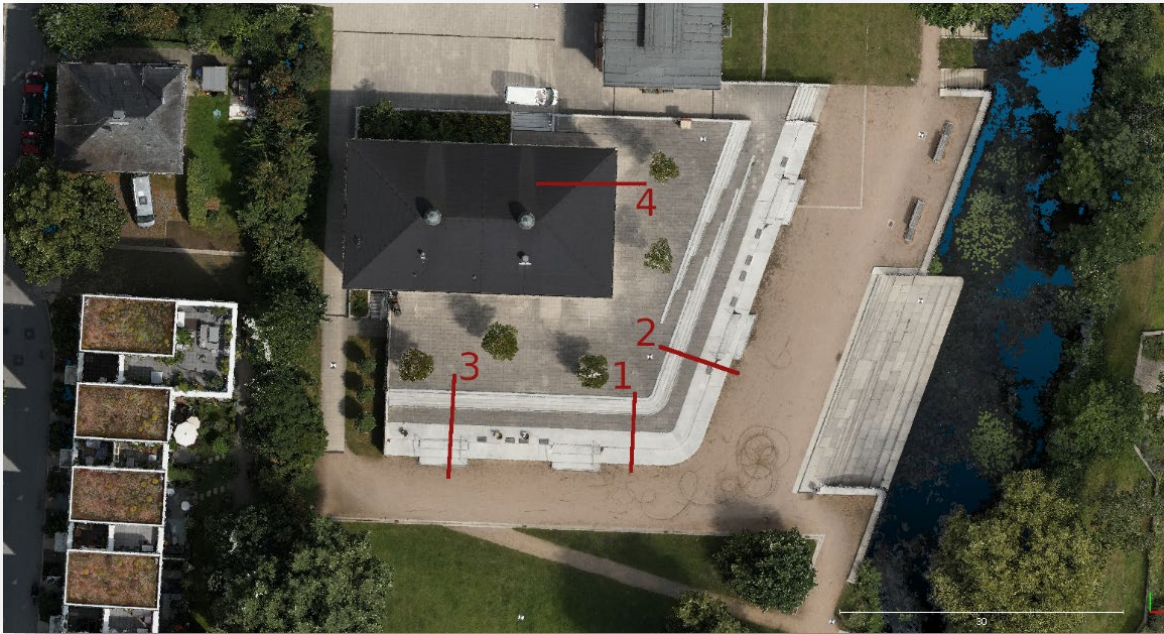


Die Punktwolke gibt die Gestalt der Lüfter korrekt wider (Scanner 2).

Quelle: G. Mandlbauer (TU Wien)

**Einflussfaktor: Sensor + Filterung**

# Qualität der 3D Punktwolke



## UAV-Testfeld Hamburg Inselpark

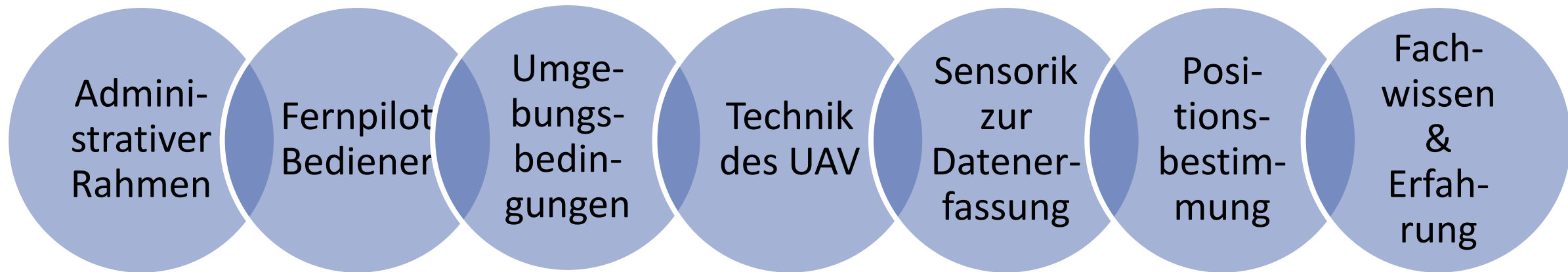
Vergleich ausgewählter Profile aus

**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 Sensoren bieten unterschiedlichste Leistungsmerkmale, die direkten Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses haben.
- Die System-Prüfung neuer Sensoren durch unabhängige Einrichtungen (z.B. Universitäten/Hochschulen) muss (auch) zukünftig gewährleistet sein!
- Dies gilt in gleicher Weise für die Wirkweisen eingesetzter Software!



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

In Kooperation mit



**INTERGEO®**  
akademie

Seminar & Workshop

# UAV 2024 – Geodaten im Höhenflug

20. und 21. März 2024 – Workshop • 21. und 22. März 2024 – Seminar | Frankfurt am Main

## Seminar & Workshop »UAV 2024 – Geodaten im Höhenflug«

Der DVW-Arbeitskreis 4 »Ingenieurgeodäsie und Messtechnik« veranstaltet gemeinsam mit dem DVW-Arbeitskreis 8 »Mobile und autonome Sensorsysteme« und den DGPf-Arbeitskreisen »Sensoren und Plattformen« und »Optische 3D-Messtechnik« das Seminar mit Workshop zum Thema »UAV 2024 – Geodaten im Höhenflug« unter dem Dach der INTERGEO akademie.

### Termin/Ort

20./21. März 2024 Workshop

21./22. März 2024 Seminar

Frankfurt am Main

Anmeldung und weitere Informationen unter:

[https://eveeno.com/intergeo\\_akademie\\_230](https://eveeno.com/intergeo_akademie_230)

(Frühbuchertermin bis zum 31. Januar 2024)