

Dr.-Ing. Melanie Elias, Institut für Photogrammetrie & Fernerkundung, TU Dresden

Einführung in die Photogrammetrie & Structure-From-Motion

Mittwoch, 14. Juni 2023

Was ist Photogrammetrie?

Photo - gram - metrie (griech.) = „mit Licht gezeichnetes messen“
= Generieren von *metrischen* 3D-Objektinformation, z.B. aus Bildern



Begriff heute wieder weit verbreitet für das **Erstellen eines 3D-Modells eines Objektes aus vielen Bildern**
→ **“Structure-from-Motion”** als modernes Synonym

Photogrammetrie – Themenbereiche

Aufnahme-Standpunkt

Aufnahme-System

Nahbereichsphotogrammetrie

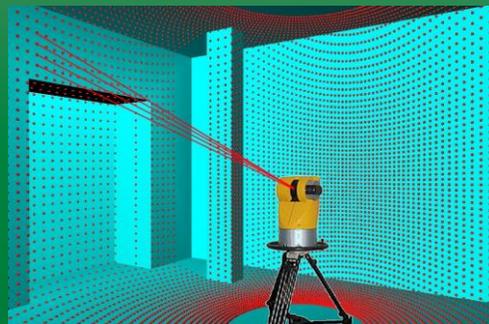


Luftbildphotogrammetrie

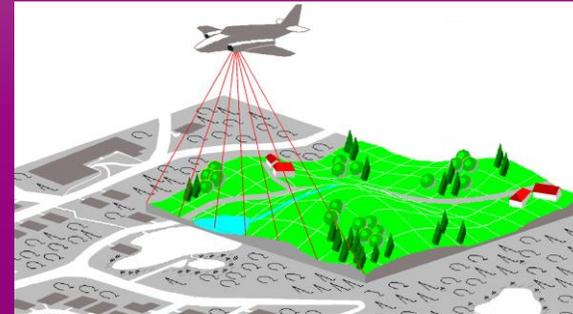


Spezialrichtung der „Vermessung“ → **Ingenieurwissenschaft**

Terrestrisches Laserscanning (TLS)

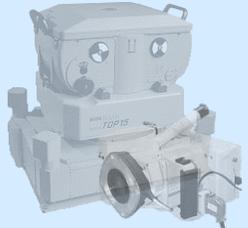


Flugzeug-Laserscanning (aka Airborne Laserscanning, ALS)



Was „macht“ Photogrammetrie?

Datenaufnahme

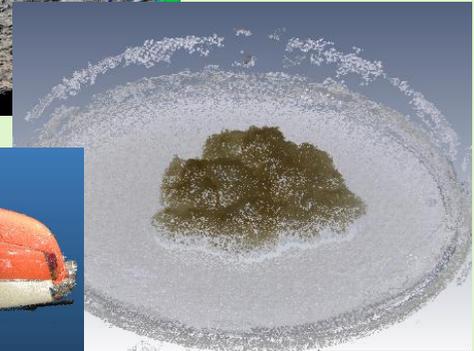
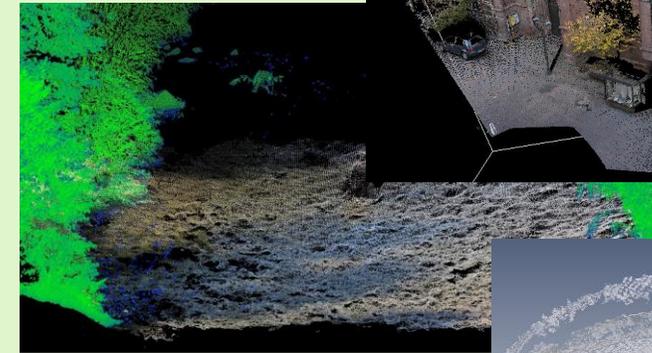
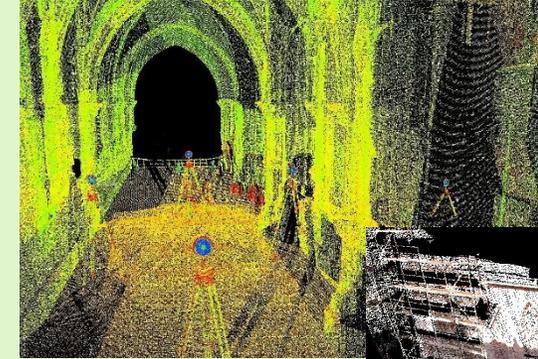


Verarbeitung



- Anwendung & Entwicklung von 3D-Software
- **Entwicklung von Algorithmen**
- Konzeption von Messsystemen
- Optimierung von Messaufgaben (Performanz!)

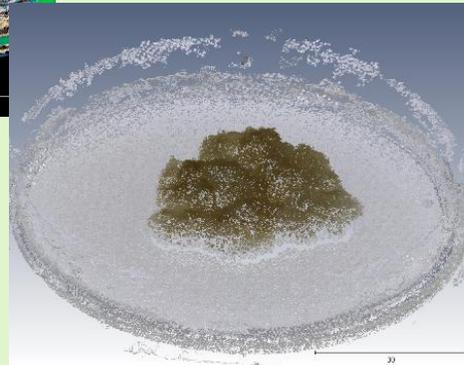
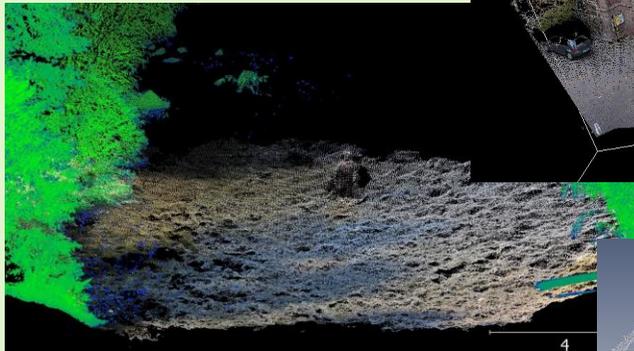
Zwischenergebnis: 3D-Punktwolken



Was „macht“ Photogrammetrie?



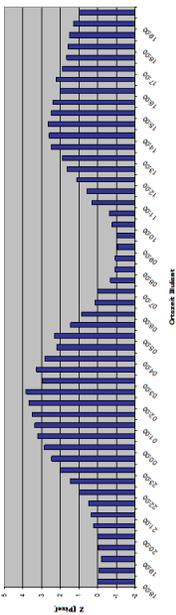
Zwischenergebnis:
3D-Punktwolken



- Punktwolkenverarbeitung
- Bildanalyse

Weiterverarbeitung / Ziele:

- 2D-Schnitte und -Profile
- 3D-Oberfläche (Vermaschung)
- Visualisierung am Display
- Virtual/Augmented Reality
- 3D-Druck
- Maßgetreue Dokumentation
- Volumenbestimmung
- 4D-Veränderungsdetektion
- Sonstige wissenschaftliche Analysen (z.B. Boden-Rauigkeit)
- Echtzeit-Hinderniserkennung
- Genauigkeitsanalysen



Interpretation der Ergebnisse

- Automobilbauer
- Mediziner
- Glaziologen
- etc.

Photogrammetrische Vielfalt

- Einteilung nach **Messprinzip**:
Time-of-Flight (ToF) vs. Triangulation
- Einteilung nach **Aufnahmetechnik**:
Passiv vs. Aktiv
- Einteilung nach **Scanauflösung/Qualität**:
Low-Cost vs. High End
- Einteilung nach **Messvolumen**:
Briefmarke vs. Petersdom
- etc.



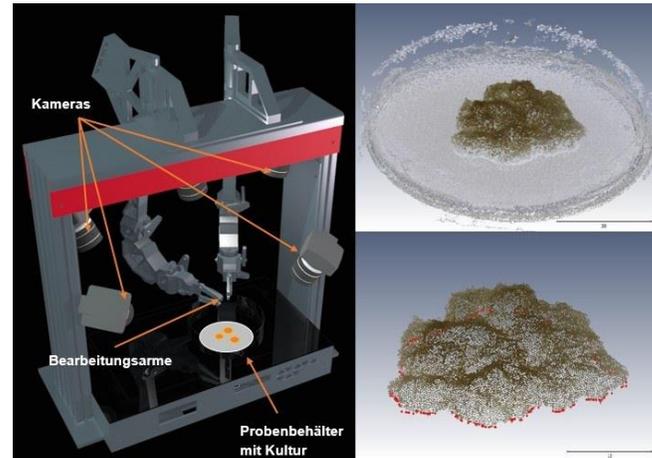
Passives kamera-basiertes
Messen per Triangulation



Aktives Messen per ToF,
z.B. Laserscanning mit Riegl VZ400i



Scannen von Landschaften
(hier Gletschermonitoring)



Kamera-basierte 3D-Erfassung
biologischer Proben



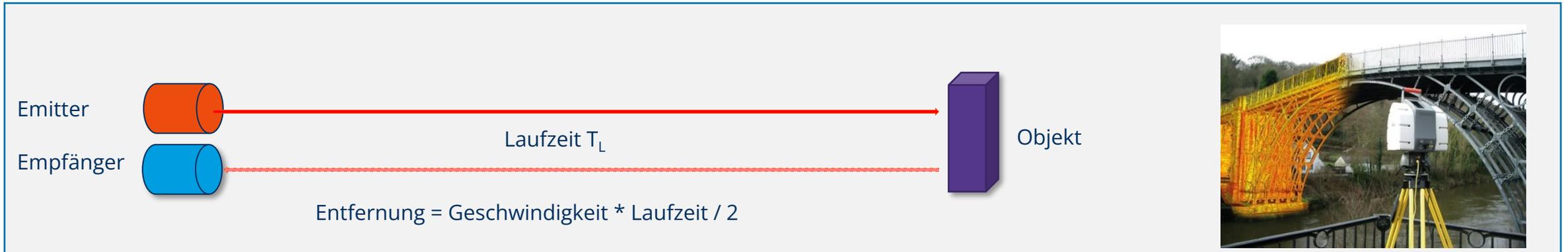
Low-cost Triangulations-
scanner „David“



High-end Weißlicht
Triangulationsscanner GOM-ATOS

Überblick über Photogrammetrische 3D-Messverfahren

Messprinzip – Time-of-Flight (ToF) vs. Triangulation



Vorteile: 1 Sensor, hohe Reichweite, kompakte Größe

Nachteile: limitierte Genauigkeit und Auflösung, teure Profi-Geräte (z.B. Laserscanner)

Überblick über Photogrammetrische 3D-Messverfahren

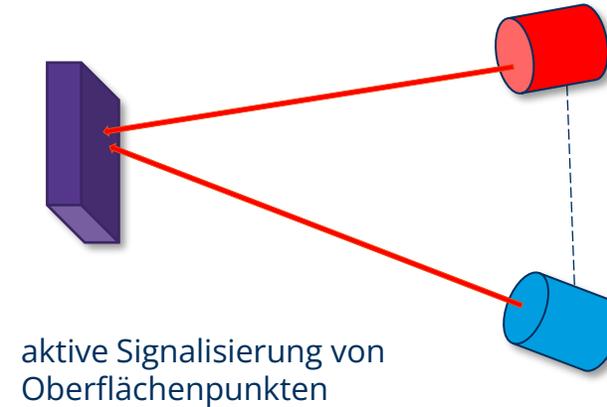
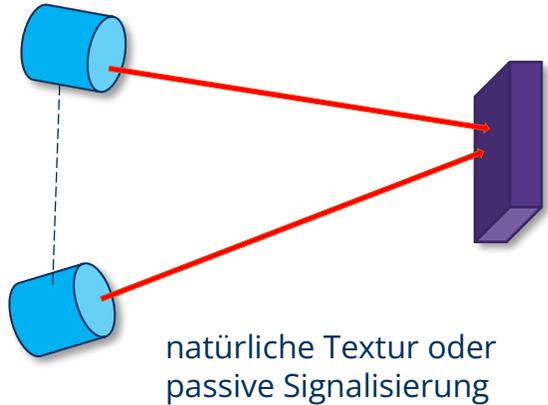
Messprinzip - Time-of-Flight (ToF) vs. Triangulation



Aufnahmetechnik

Passive Sensoren
mind. 2 Kameras /
Kamerastandpunkte

Passiv

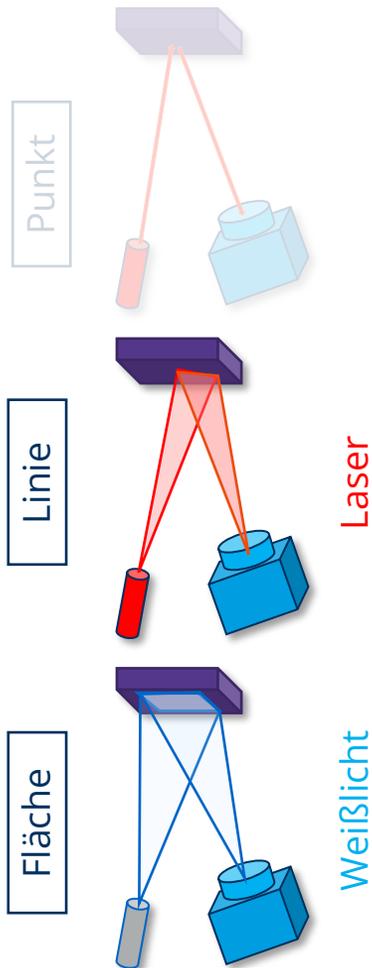


Aktiver Sensor
mind. 1 Projektor /
Laser

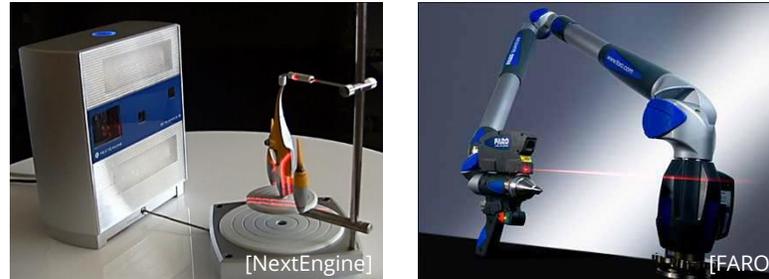
Aktiv
Strukturierte
Beleuchtung

Überblick über Photogrammetrische 3D-Messverfahren

Messprinzip – Triangulation | Aufnahmetechnik - Aktiv (Strukturierte Beleuchtung)

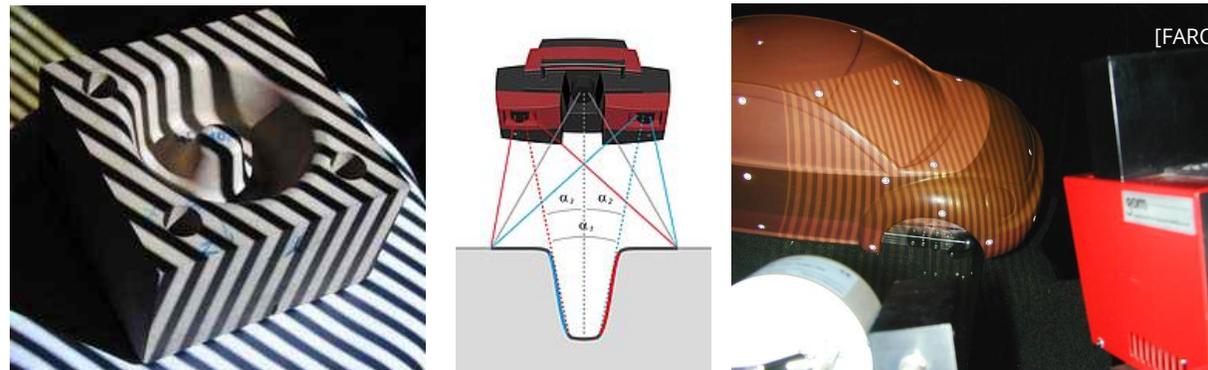


Laserbasierte Systeme – Linienlaser



Vorteile: extrem hohe Genauigkeit / Auflösung;
Weißlicht: Texturerfassung (RGB / SW)
Nachteile: teure Profi-Geräte, hauptsächlich für **kleine Messvolumen**

Flächenbasierte Systeme – Streifenprojektion (Weißlicht)



Überblick über Photogrammetrische 3D-Messverfahren

Messprinzip - Triangulation | Aufnahmetechnik - Passiv (klassische Photogrammetrie / SfM)



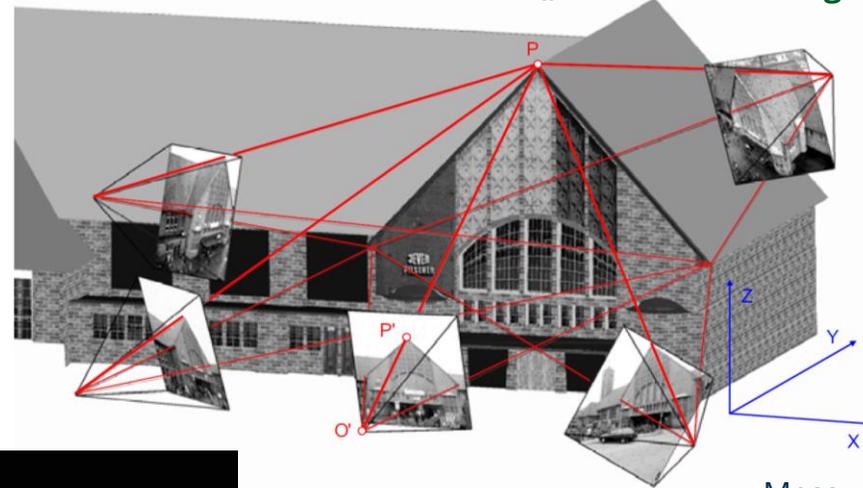
© Shutterstock

„Structure-from-Motion“ (SfM)



Erzeugung von irregulären Punktwolken

„Klassische Photogrammetrie“

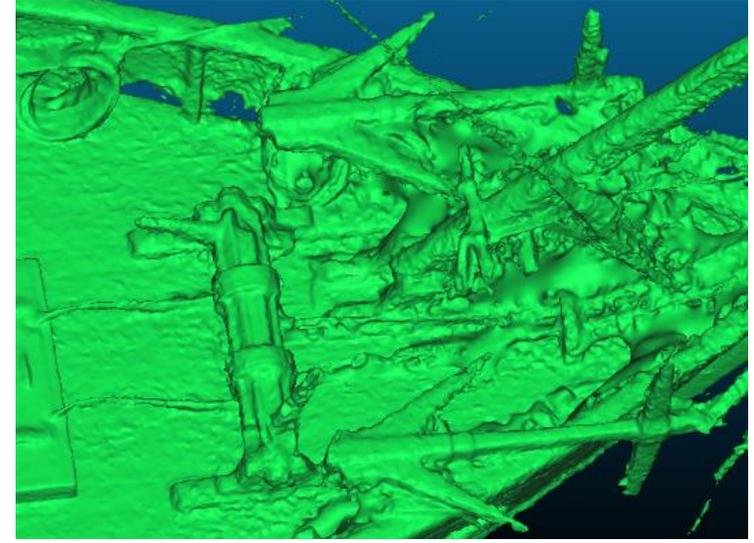
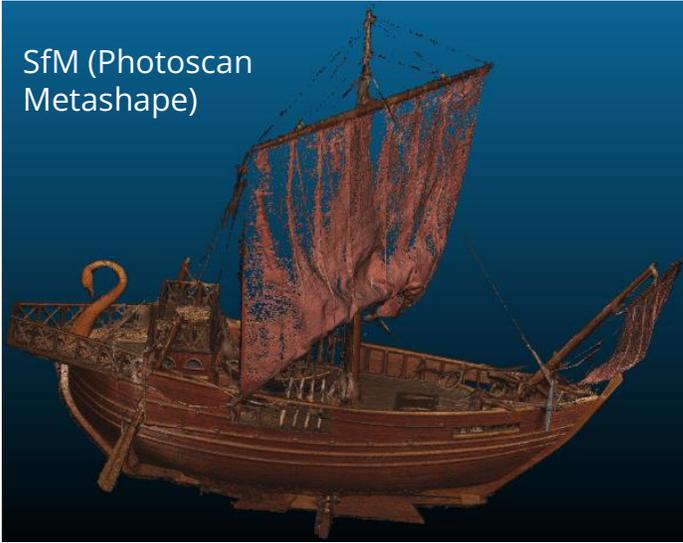


Messung diskreter Punkte (z.B. Gebäudeecken)

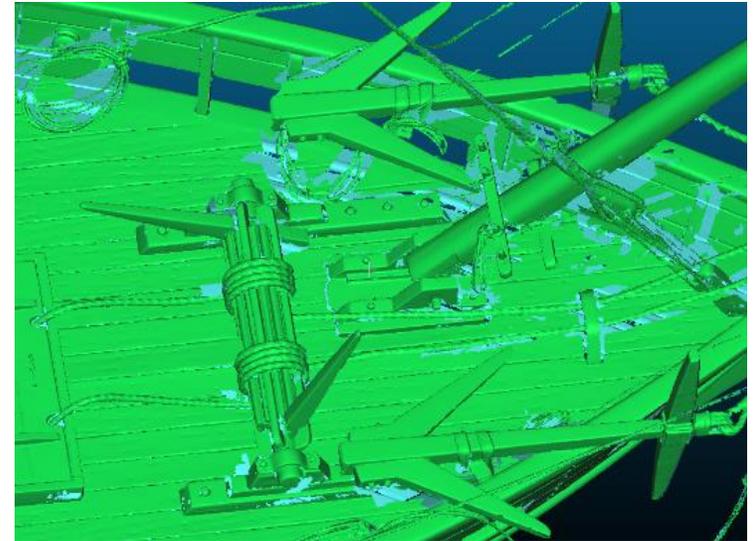
- Vorteile:** nahezu **unbeschränkt im Messvolumen**, kostengünstiges Messequipment („Smartphone reicht“) (SfM)
- Nachteile:** **Zuverlässigkeit / Genauigkeit** (SfM)

Überblick über Photogrammetrische 3D-Messverfahren

SfM (Photoscan
Metashape)



Weißlichtscanner
(AICON Smartscan)



Überblick über Photogrammetrische 3D-Messverfahren

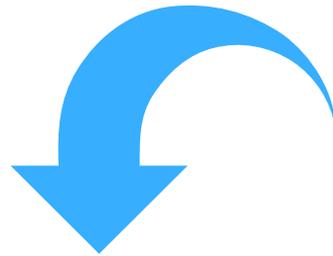
Verfahren	Techn. Aufwand	Auflösung	Genauigkeit	Zuverlässigkeit	Reichweite	Geschwindigkeit
Laserscanning (TOF)	Hoch, Laser und Empfangseinheit	Abhängig von Winkelauflösung	mittel (max. 2mm)	hoch	0,4-1000m	ca. 100.000 Punkte/Sekunde
Bildverband Structure-from-Motion	Geringer Aufwand: Kamera + Maßstäbe (ggf. Signalisierung)	Abhängig von Textur und Kamera → Erfahrung!	mittel (abhängig von Erfahrung des Fotografen)	mittel	10 cm – mehrere m, km	Auswertzeit ca. 1h bis mehrere Tage*
Laserlinie	Mittel, Linienlaser & Kamera	hoch, Abhängig von Kamera und Liniendicke	mittel - hoch	mittel-hoch	0,1 - 1m	> 10 Mio Punkte/Sekunde
Streifenprojektion (Weißlicht, mehrfacher Lichtschnitt)	Spezielles Messsystem Mind. Projektor + Kameras → Kalibrierung!	hoch, Kamera-abhängig, Tiefen-koordinate für jedes Bildpixel	hoch	hoch	0,1 – 2m	schnell ca. 1 Mio Punkte/Sekunde

* cloud-basierte Tools ermöglichen die Prozessierung großer Bildverbände in wenigen Minuten!

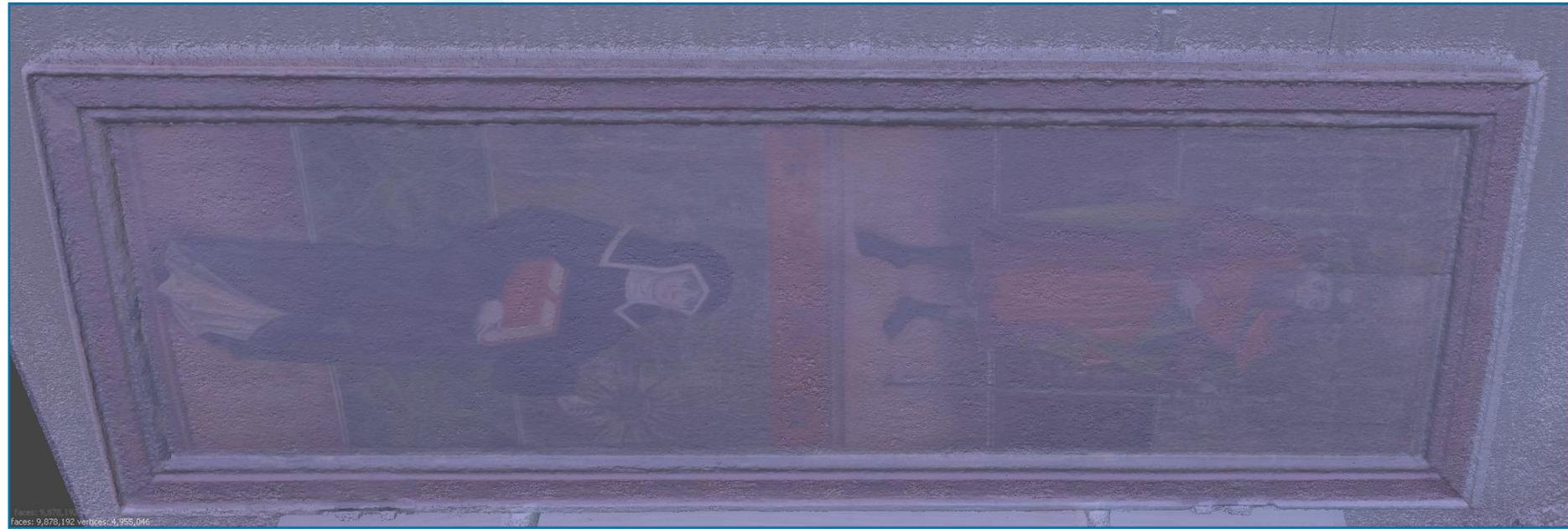
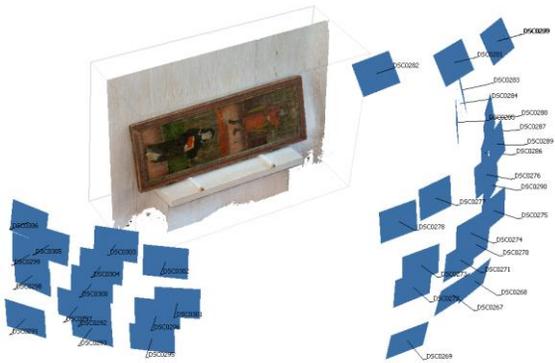
Von Bildern zum 3D-Modell: Mehrbildverarbeitung via *Structure-from-Motion*



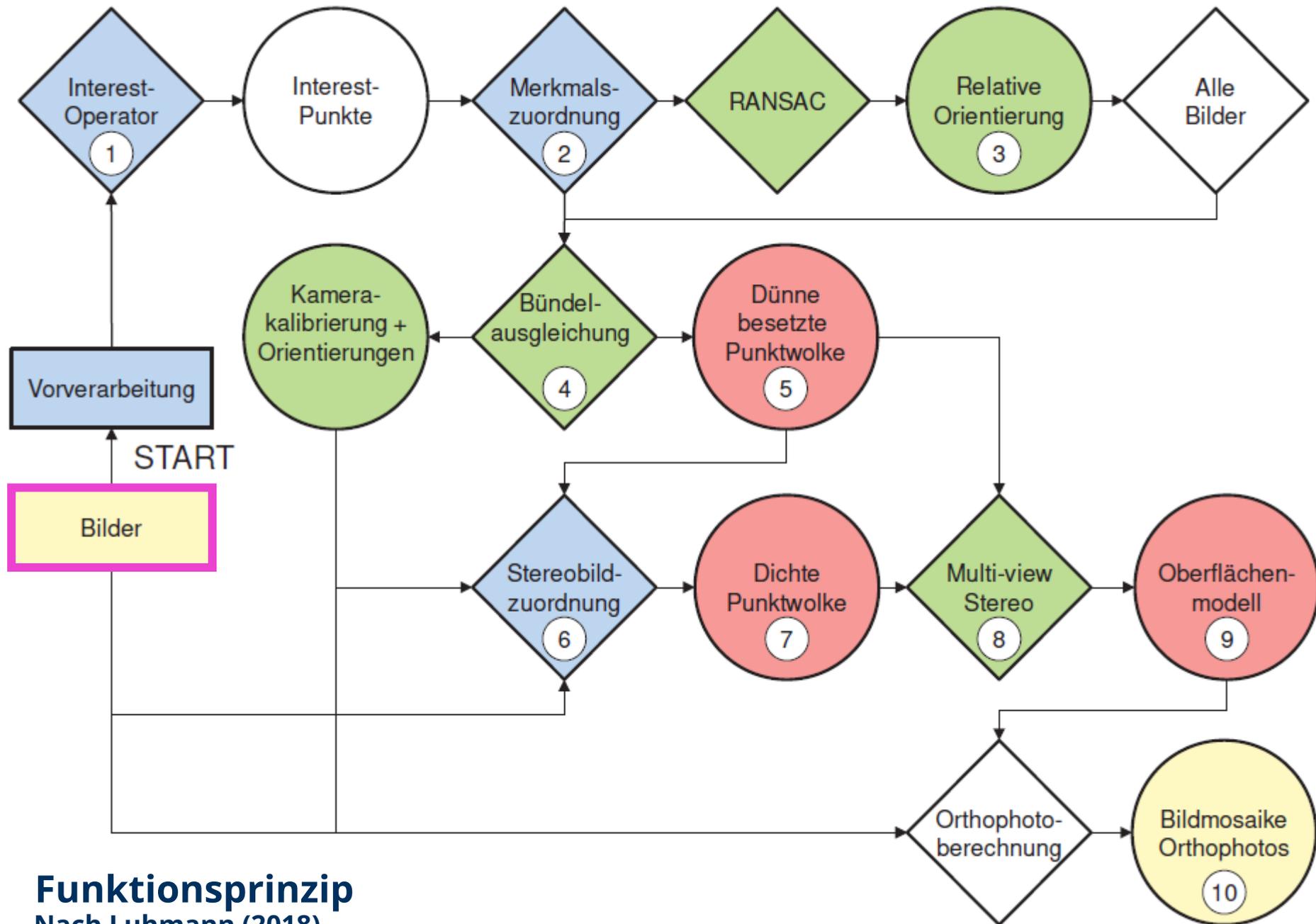
Von Bildern zum 3D-Modell: Mehrbildverarbeitung via *Structure-from-Motion*



Von Bildern zum 3D-Modell: Mehrbildverarbeitung via *Structure-from-Motion*



Faces: 9,878,192 vertices: 4,958,046



Funktionsprinzip Nach Luhmann (2018)

Anforderungen an die Kamerabilder

Grundlagen Kameraeinstellung



Anforderungen an die **Kamerabilder** Blende

→ Umfang der möglichen Blende **abhängig** vom verwendeten **Objektiv**

Merke:

Je **kleiner die Blendenzahl**, je **mehr Licht** trifft auf den Sensor und je **kürzer** ist die **Belichtungszeit**.

ABER:

Bei **offener Blende** (kleine Blendenzahl) besteht **nur minimale Schärfentiefe**

- **Schön** für Portraitfotografie (Hintergrund unscharf)
- **Schlecht** für die Erstellung von 3D-Modellen (Bildinformation geht verloren)



f/ 2,8

Blende variabel:
100mm | 0,5 Sek. | ISO 100
Quelle: Wikipedia

Anforderungen an die **Kamerabilder** Objektiv / Einstellungen

Brennweite einstellen

- Arbeit mit verschiedenen Brennweiten grundsätzlich möglich, muss in Auswertung aber gesondert berücksichtigt werden!
Vorsicht bei Zoom-Objektiven!
- Autofokus erlaubt, Manuelles fokussieren besser („Können“ vorausgesetzt)

Wahl der **Brennweite abhängig von Aufnahmesituation:**



Großes zu erfassendes Objekt/ Szenario

- Kürze/mittlere Brennweite zur Erfassung der gesamten Situation (**20-50mm**)
- Längere Brennweiten / Makroobjektive zur Erfassung von Details (**50-“x“mm**)



Kleines detailliertes zu erfassendes Objekt

- Objektiv mit mittlerer/längerer Brennweite (**50-100mm**)

Anforderungen an die **Aufnahmesituation** Aufnahmekonfiguration

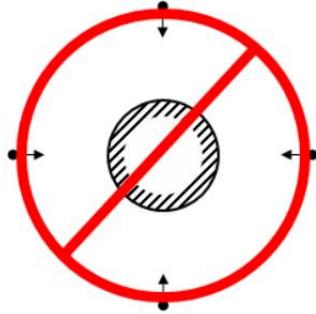
- Aufnahme **konvergenter** Bilder mit **reichlich Bildüberlappung** (mind. 60 %, besser 80 %)
 - Die **Kamera muss sich** um das Objekt herum bzw. entlang eines zu modellierenden Oberfläche **bewegen**
 - Bei Verwendung einer Kamera dürfen **sich Objekt** und **Objekthintergrund nicht verändern**
 - Die **Beleuchtungssituation** sollte möglichst **konstant bleiben**
 - **Scharfe Bilder, nicht verwackelt, Schärfentiefe beachten, ...**
 - **Möglichst konstanten** Abstand zum Interessenobjekt einhalten
- Je **näher das Interessenobjekt**, desto **höher** ist der spätere **Detailgrad** des Modells

ABER!

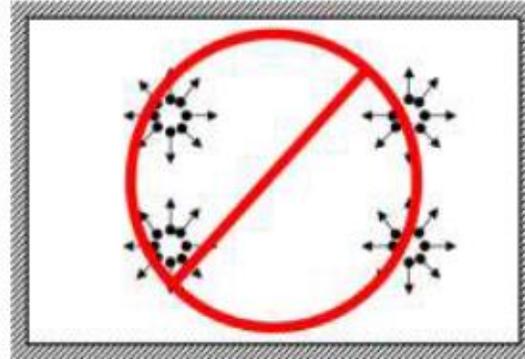
→ Je **näher das Objekt**, desto **desto mehr überlappende Aufnahmen** benötigt!

Anforderungen an die **Aufnahmesituation** Aufnahmekonfiguration

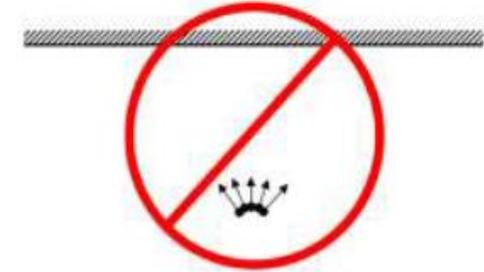
Isolated Object (Incorrect)



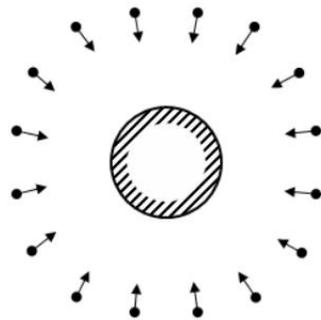
Interior (Incorrect)



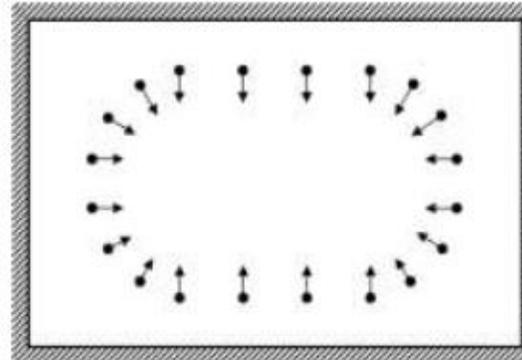
Facade (Incorrect)



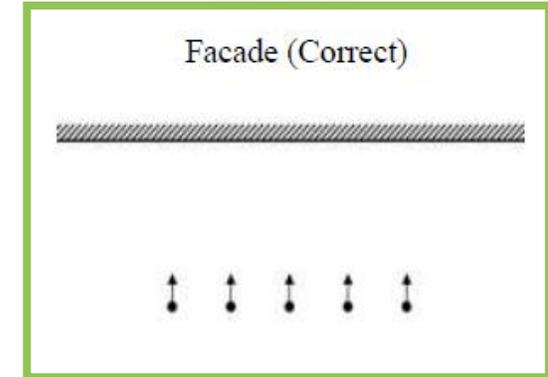
Isolated Object (Correct)



Interior (Correct)



Facade (Correct)

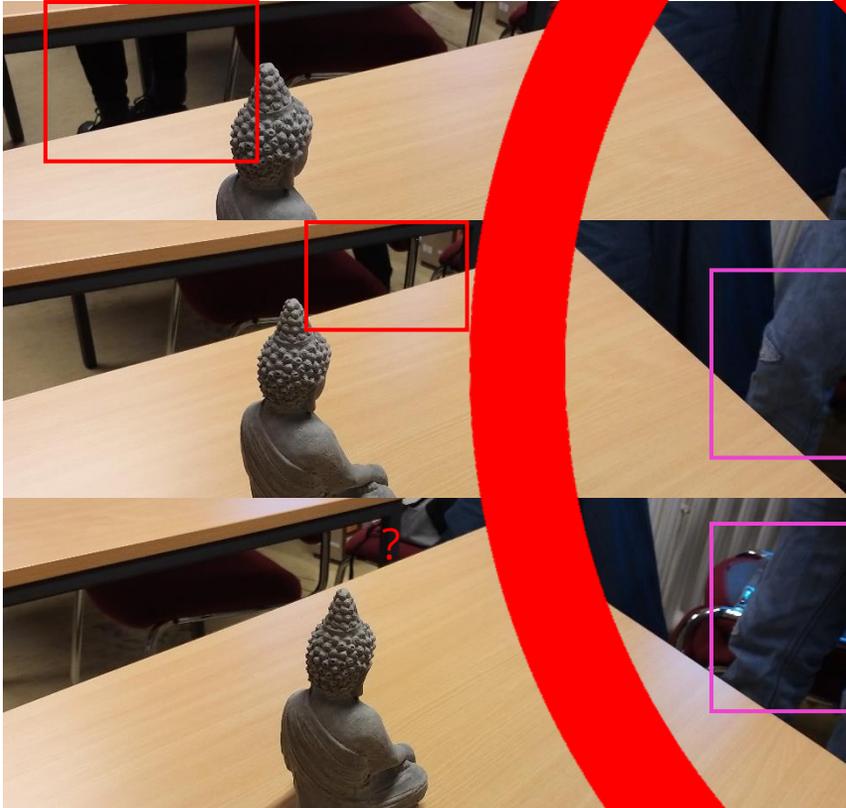


© Agisoft (2020)

Anforderungen an die Aufnahmesituation

Worst Case Szenarios

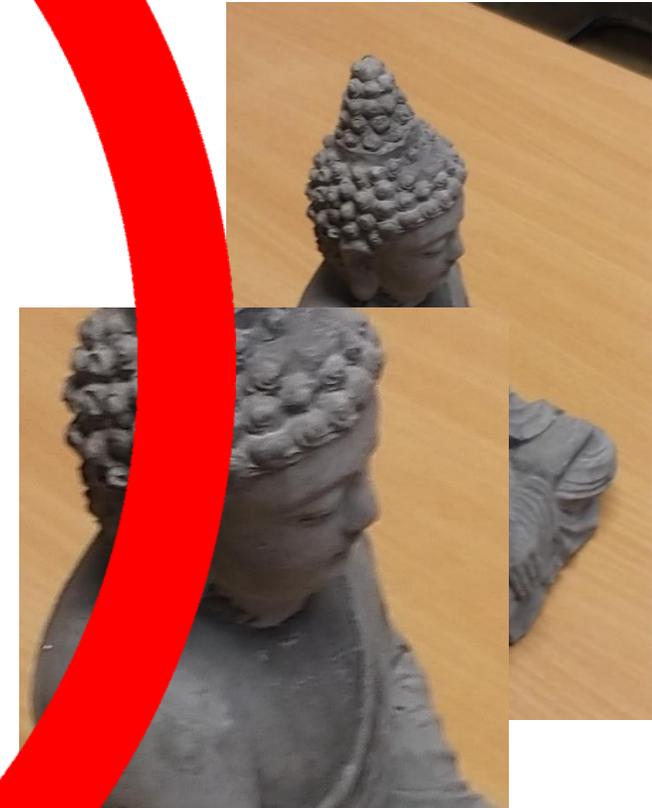
Bewegliche Interessenpunkte



Beleuchtungsunterschiede



Unscharfe Aufnahmen

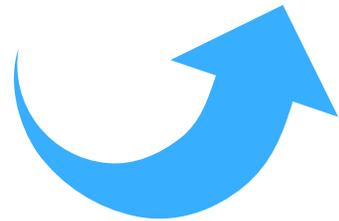
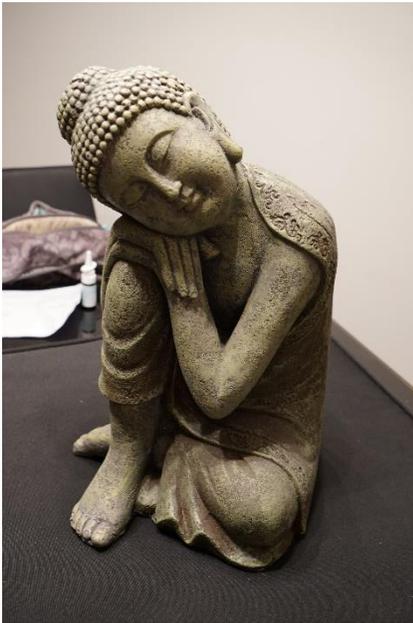


Anforderungen an das zu modellierende Objekt

Textur

Heterogene Textur

→ wichtig für Interessenpunkte / Stereo-Matching

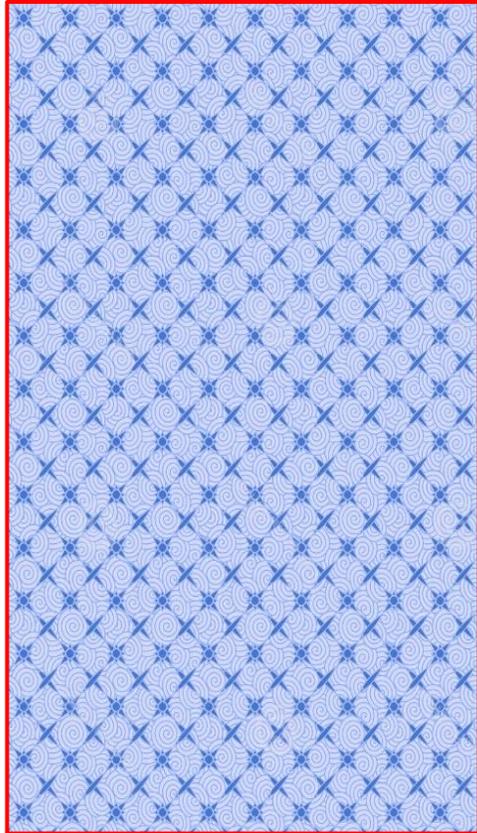


Anforderungen an das zu modellierende Objekt

Worst Case Szenarios



Vermeiden von **homogenen** (einheitlichen) Oberflächentexturen und **stark spiegelnden** Oberflächen



[C by dreamstime.com](http://C.by.dreamstime.com)



[C by welt.de](http://C.by.welt.de)

Datumsinformationen: Maßstäbe vorbereiten

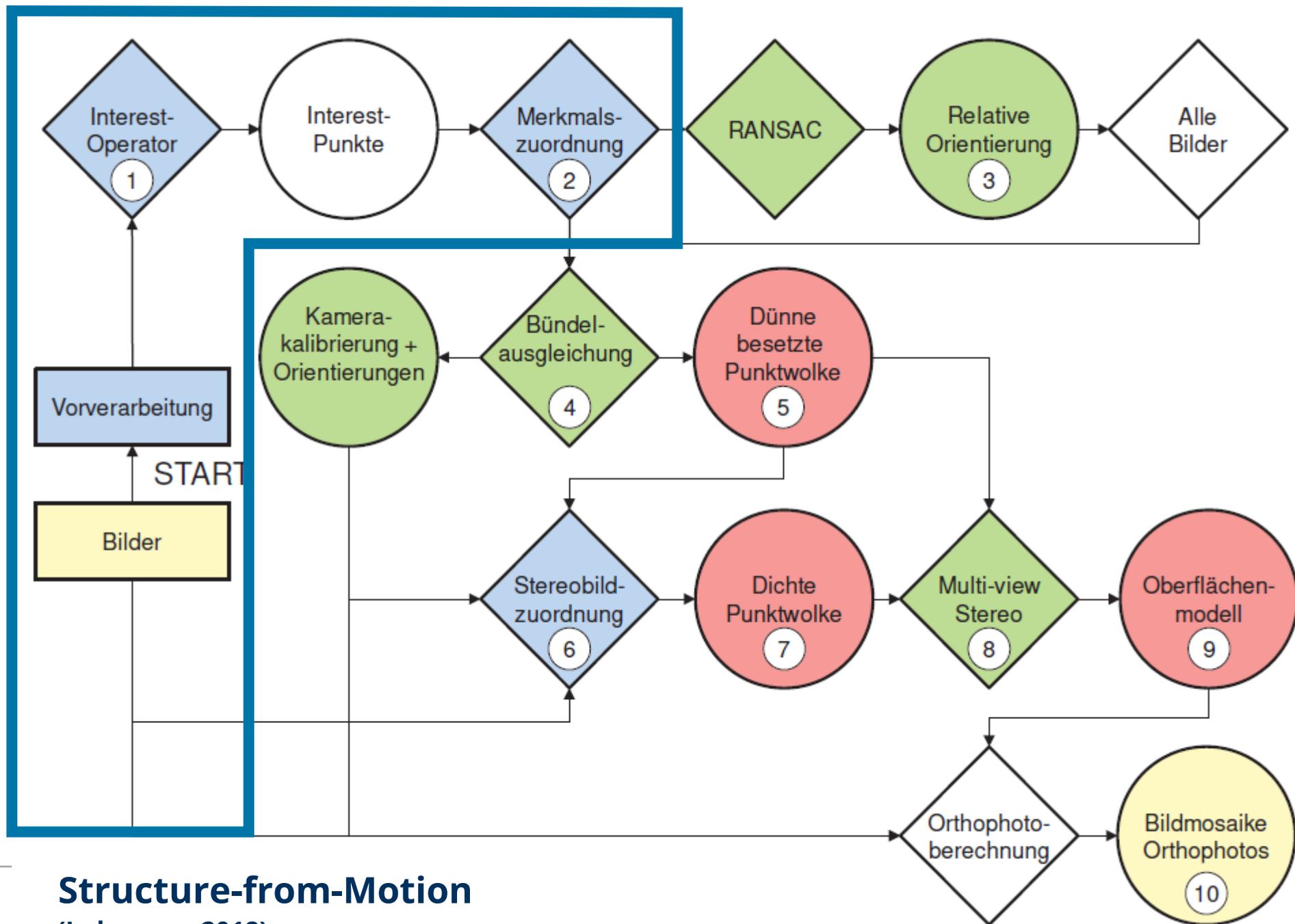
Messen im Objekt verlangt?

- Einbringen von *Maßstäben* in unmittelbarer Nähe des Objektes
- **Option a):** Platzierung eines unveränderlichen Stabs (eingemessener Maßstab, Zollstock, etc...)
- **Option b):** Messen bekannter Strecken

Anforderungen an die Maßstäbe

- an das Interessenobjekt angepasste Ausdehnung
- → Verteilen in verschiedene Ebenen / Richtungen
→ Einsatz unterschiedlicher Längen
- **Veränderungskartierung?**
wenn möglich, Einsatz *stabiler* Maßstäbe, die im Messaufbau verweilen können





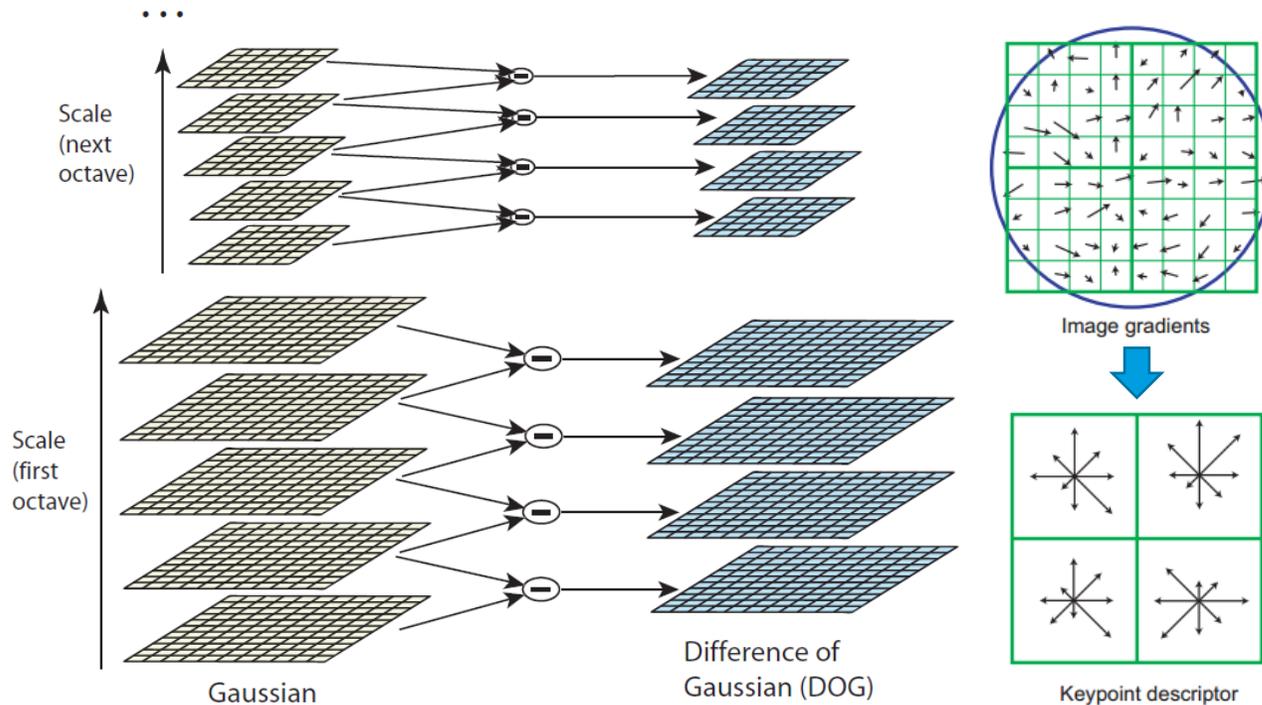
Structure-from-Motion (Luhmann, 2018)

SFM: Merkmalspunkte erkennen und zuordnen

Erkennen von Punkten, die möglicherweise in weiteren Bildern zu finden sind

→ „interessante, **eindeutige Merkmalspunkte**“ (engl. „*Interest points*“)

Beschreibung dieser mit einem „**Deskriptor**“ (engl. „*Description*“ → Beschreibung)

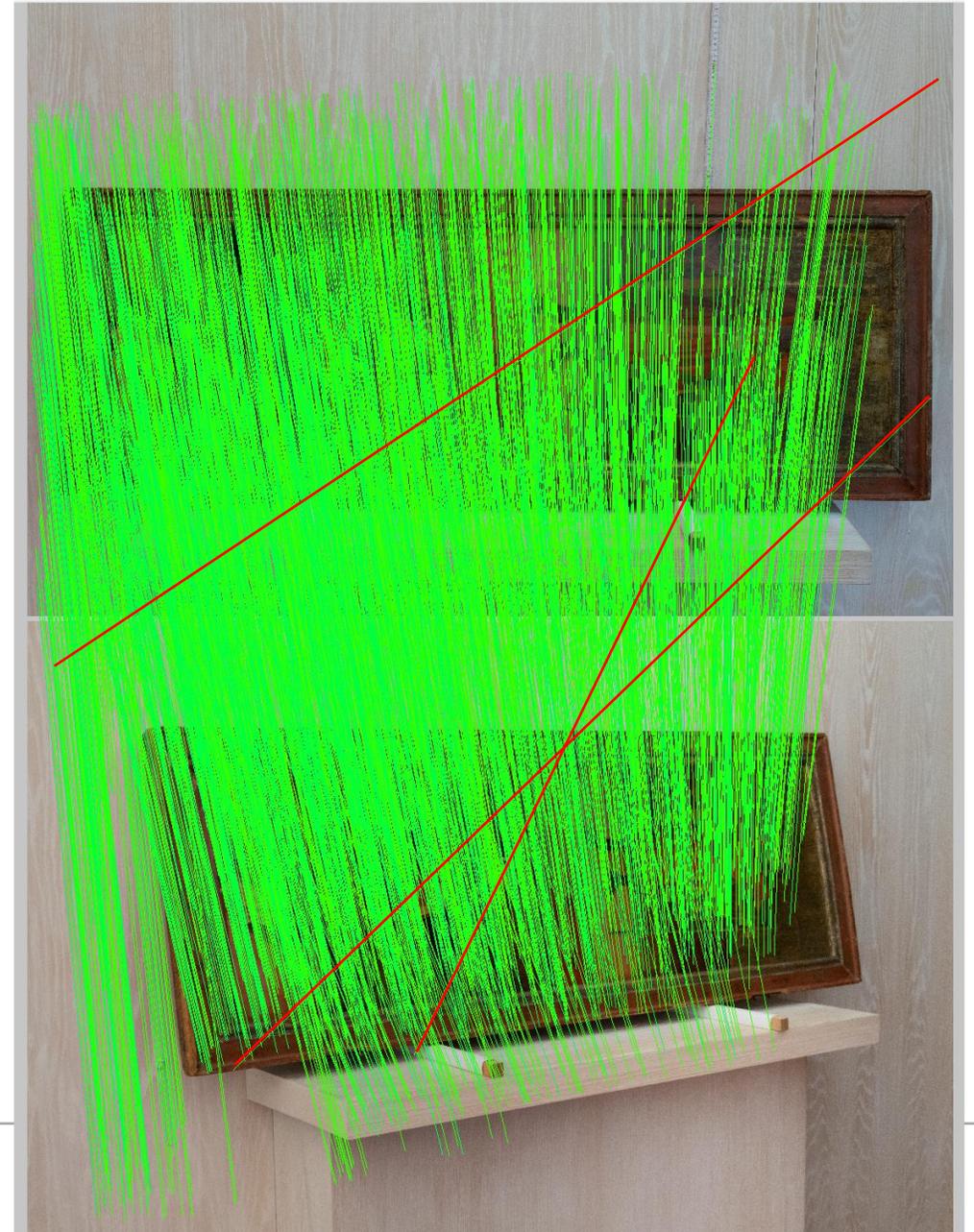


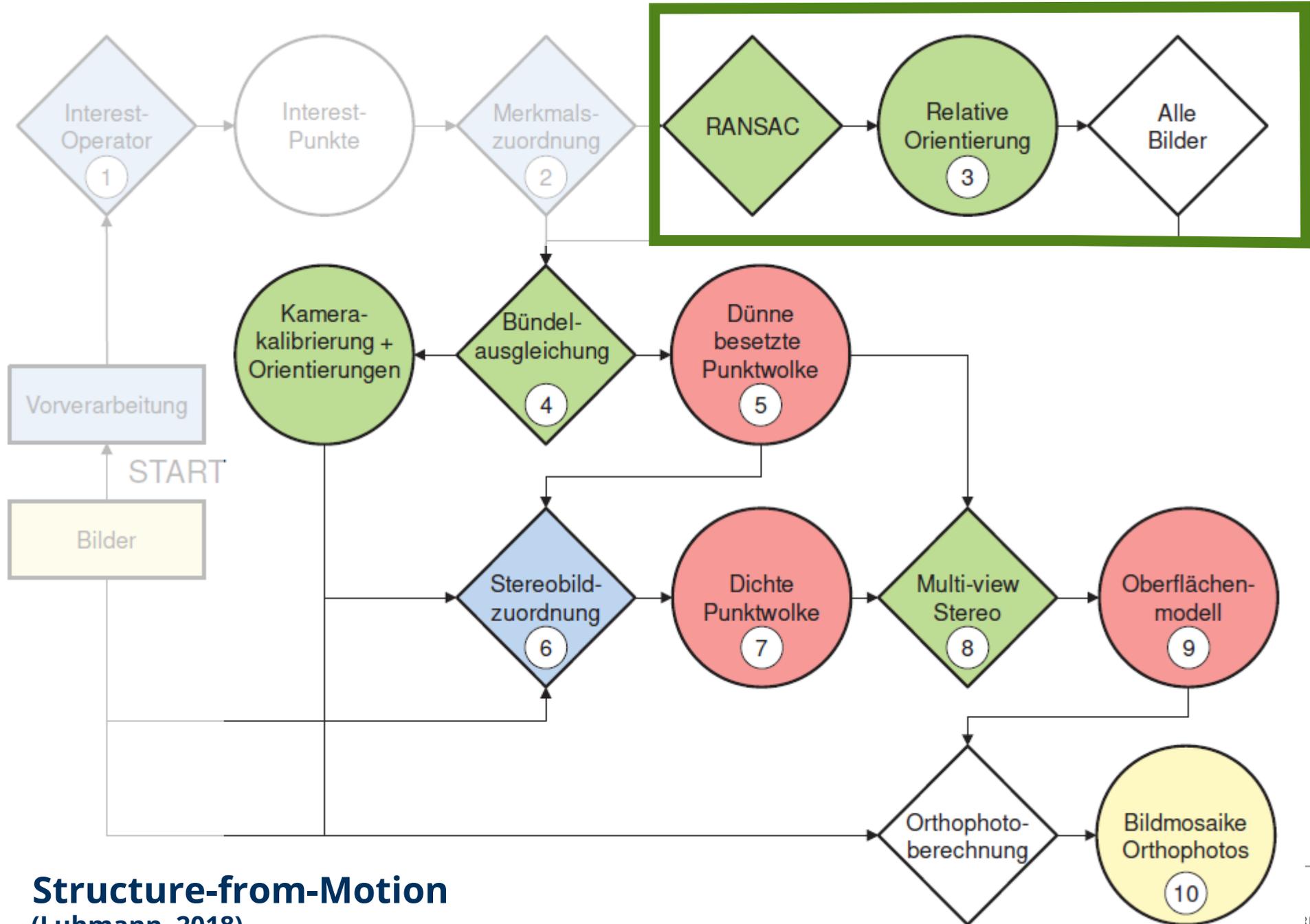
SFM: Merkmalspunkte erkennen und zuordnen

Suche nach **korrespondierenden Bildpunkten** zwischen den Bildern

→ Vergleichen der Deskriptoren

Ergebnis: Viele richtige, einige falsche Zuordnungen



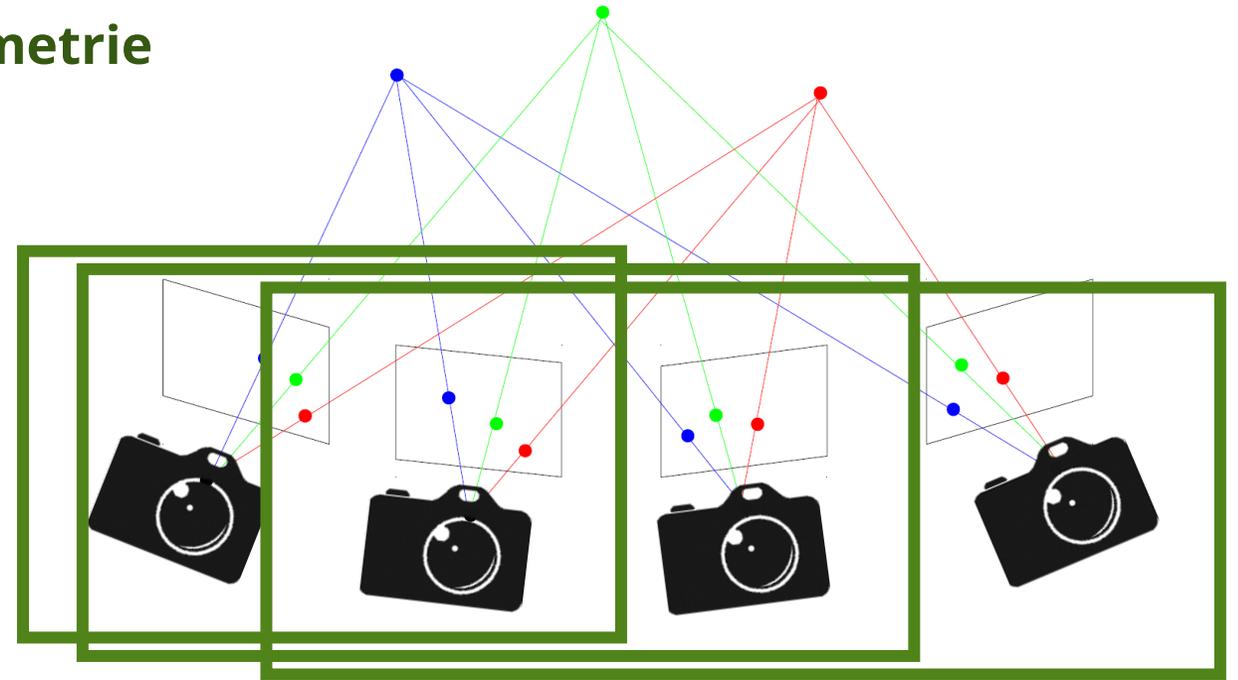


Structure-from-Motion (Luhmann, 2018)

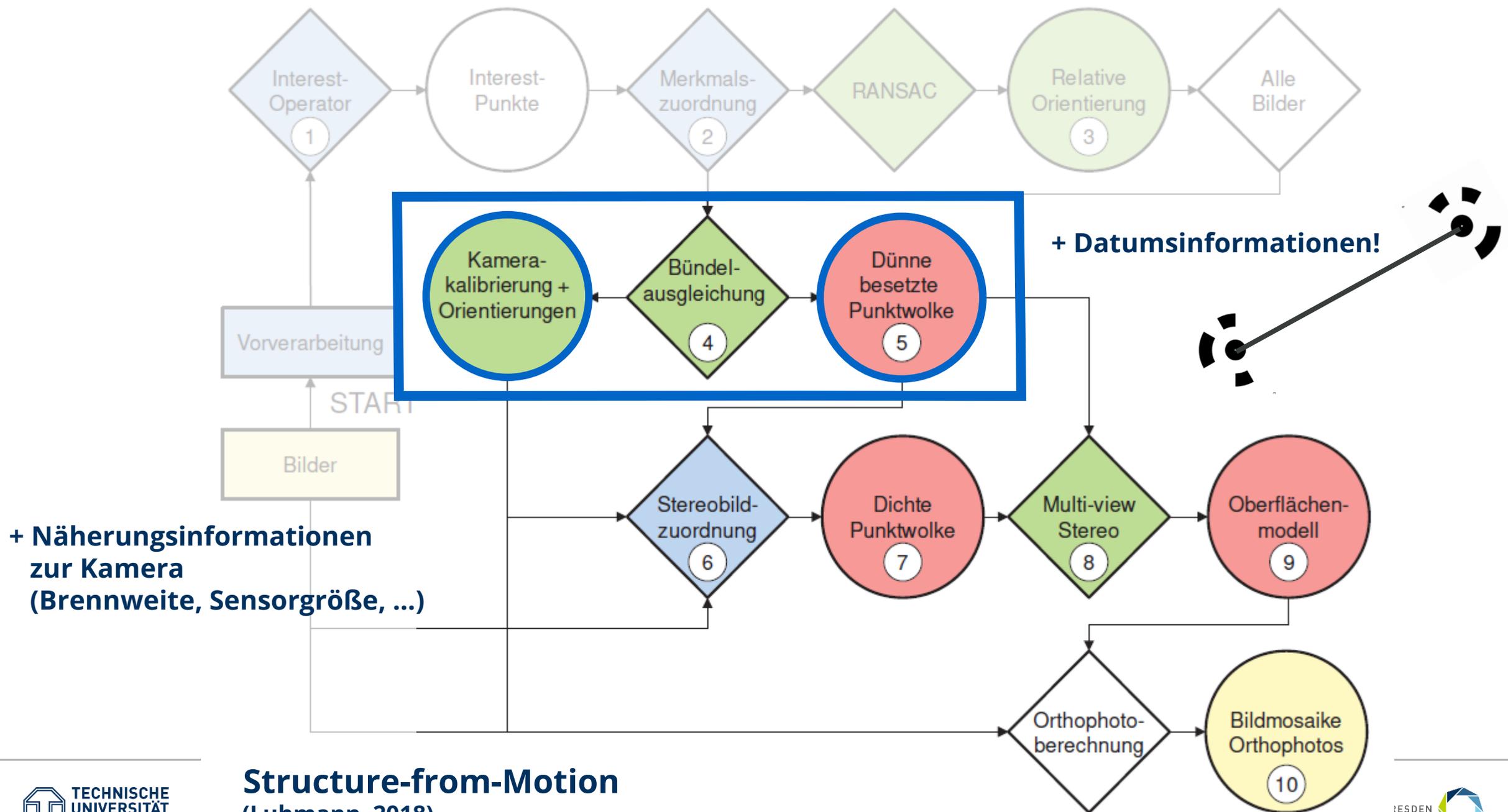
SFM: Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie

Einpassen eines *mathematischen Modells*

→ Bestimmung der **relativen Kamerapositionen**
anhand der zugeordneten Merkmalspunkte



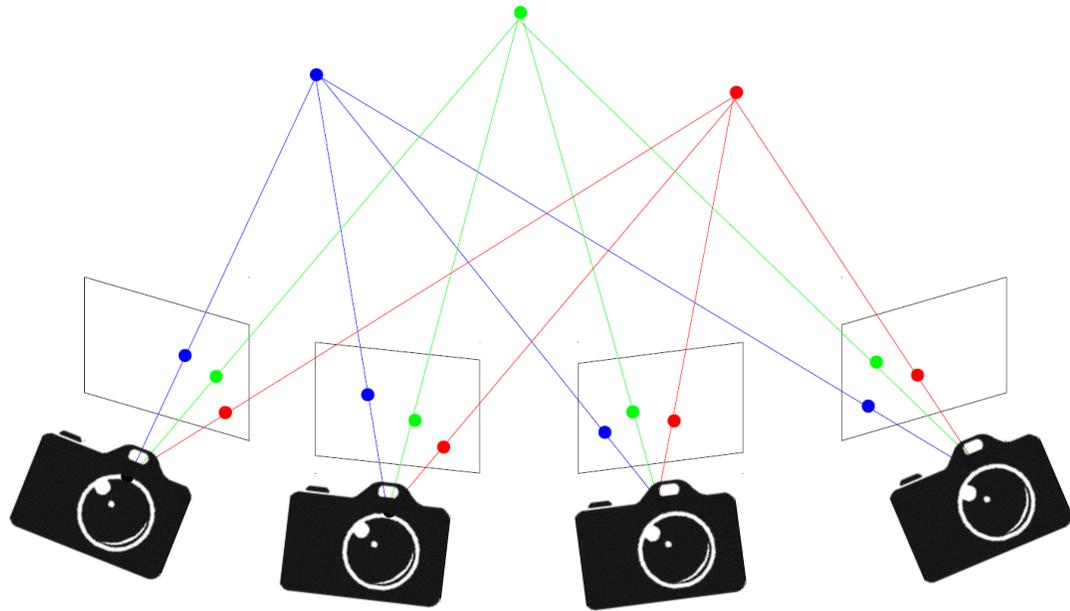
1. Nutzen von zugeordneten, sog. „homologen“ Punkten eines Bildpaares
→ Bestimmung der Aufnahmeposition und Orientierung beider Kameras
2. Hinzuziehen des nächsten Bildes → Bestimmen dessen Position und Orientierung in Bezug auf vorheriges Bildpaar
3. Nächstes Bild orientieren, ... → Folgebildanschluss



Structure-from-Motion

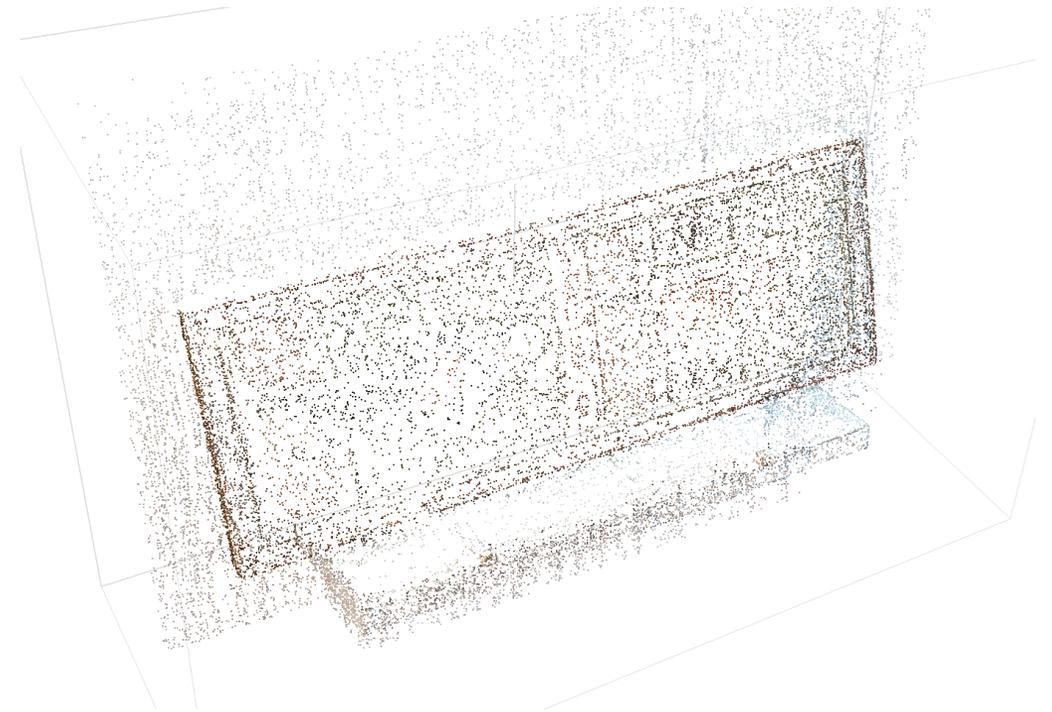
(Luhmann, 2018)

Structure-from-Motion: Ergebnis

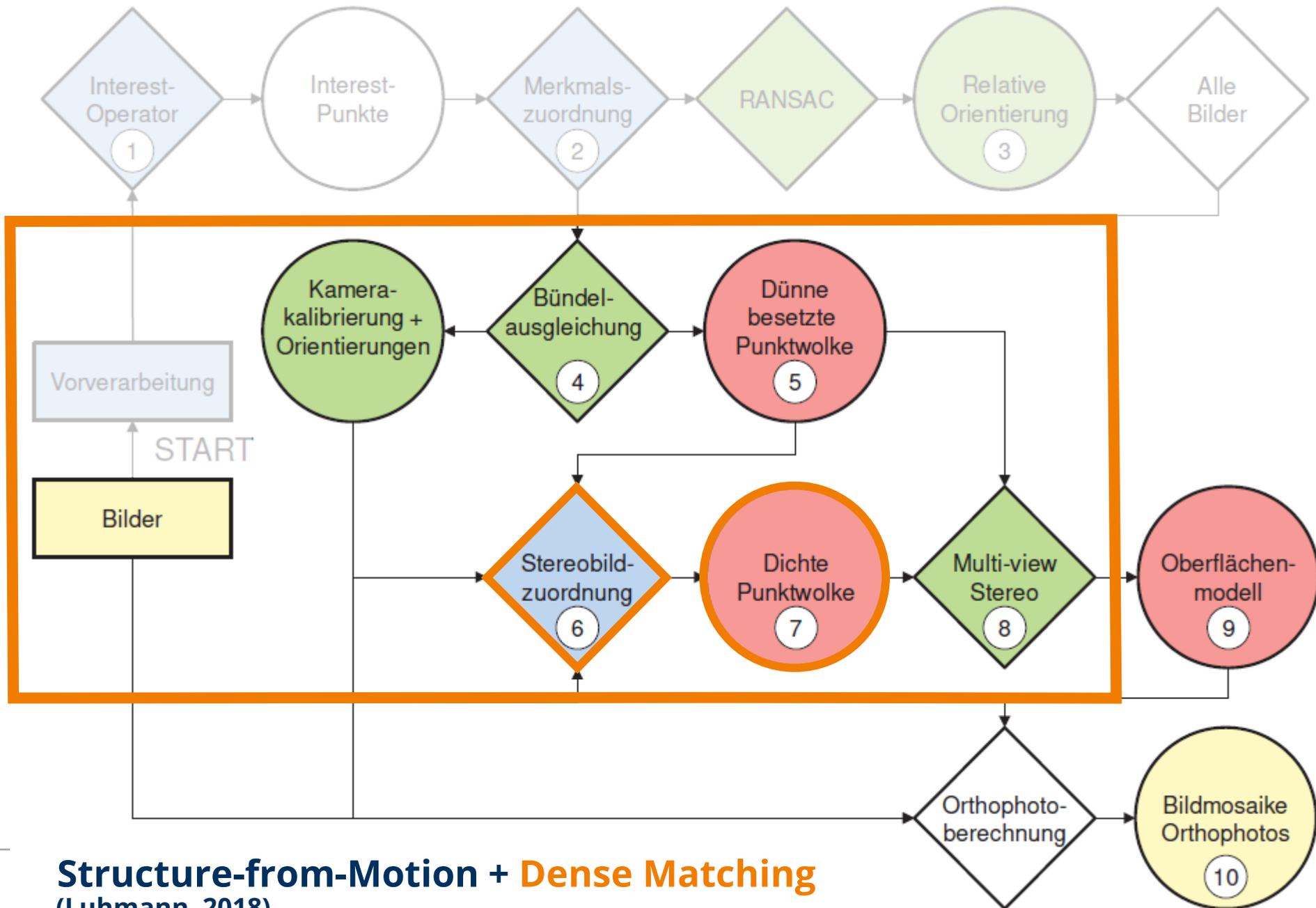


- Kamerapositionen, Orientierungen bestimmt*
- Kamerakalibrierung berechnet

* Bei Verwendung von
Datumsinformationen im **metrischen System**

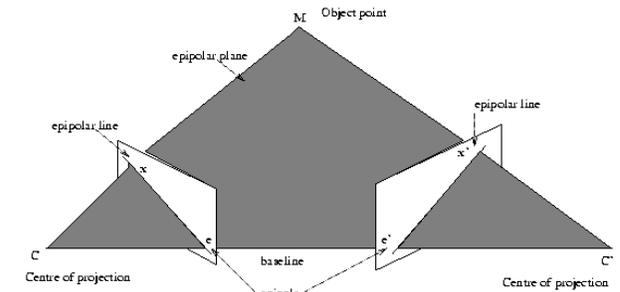


→ „Sparse“ (Dünne) Punktwolke*



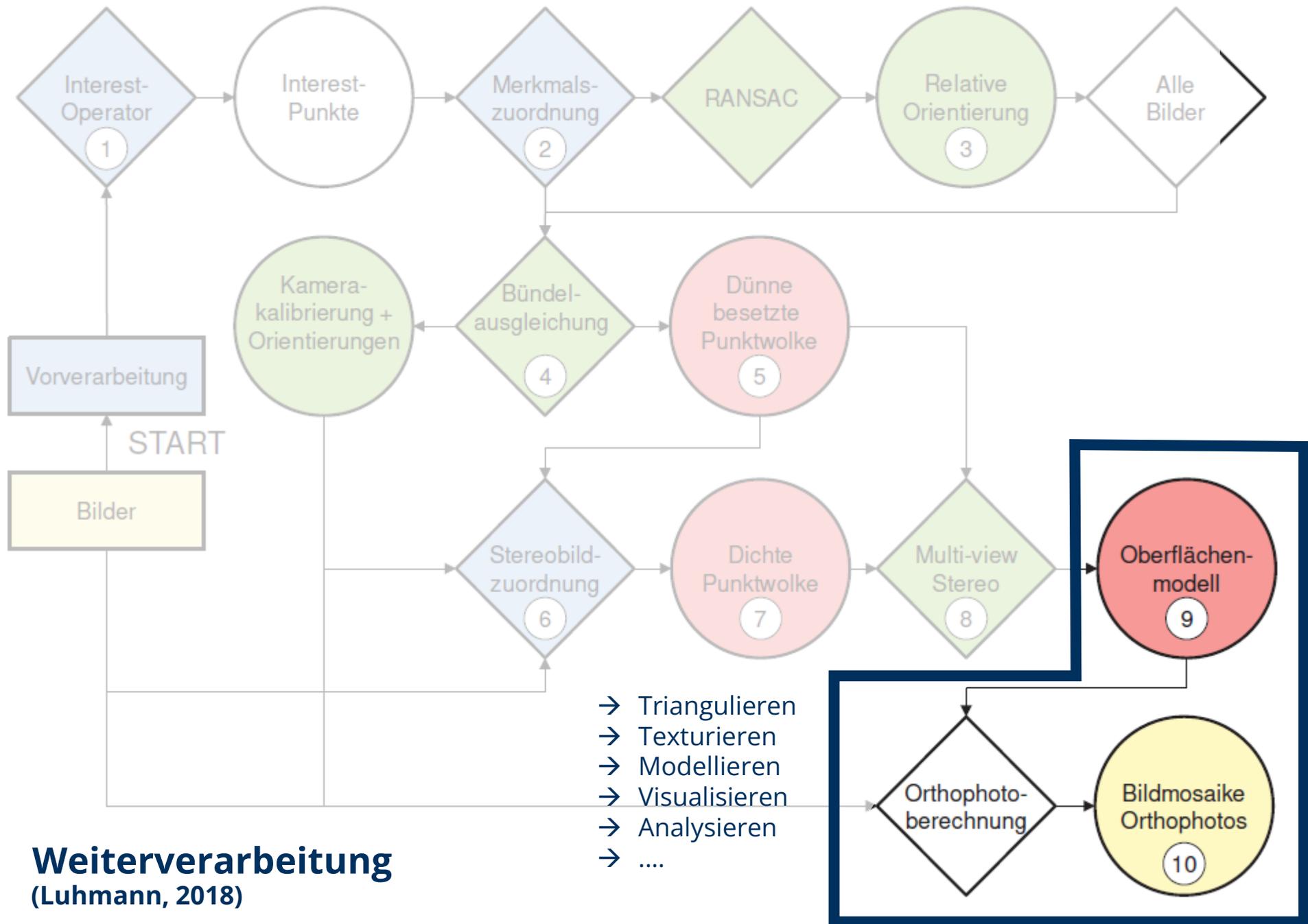
Structure-from-Motion + Dense Matching (Luhmann, 2018)

Structure-from-Motion + Dense Matching Ergebnis



- **Verdichten** der dünnen Punktwolke
- Einsatz der berechneten Orientierungsdaten & Kernliniengeometrie:
 - Bilder sind zueinander ausgerichtet
 - Punktkorrespondenzen via sog. Kernlinien bestimmbar





Weiterverarbeitung (Luhmann, 2018)

Structure-from-Motion + Dense Matching

TroubleShooting

Problem: Extrem Lückenhaftes Modell

Grund: wahrscheinlich homogen- oder wenig-texturiertes Modell

Lösung (Aufnahmevorgang): Modell texturieren (Beleuchtung/ Farbe, ...)

Lösung (Nachgang): „eigene“ Merkmalspunkte setzen (*Metashape* → *Marker zweckenfremden*)

Problem: Einzelne Bilder können nicht orientiert werden

Grund: a) EXIF-Informationen evtl. aus Bild entfernt durch Vorverarbeitung,

b) Bildüberlappung zu gering (keine Einpassung in Bildverband möglich)

Lösung: a) EXIF-Informationen händisch im Dialog „Kamera-Kalibrierung“ eingeben

b) wenn möglich nachträglich Bildaufnahme von fehlenden Überlappungsbereichen aufnehmen

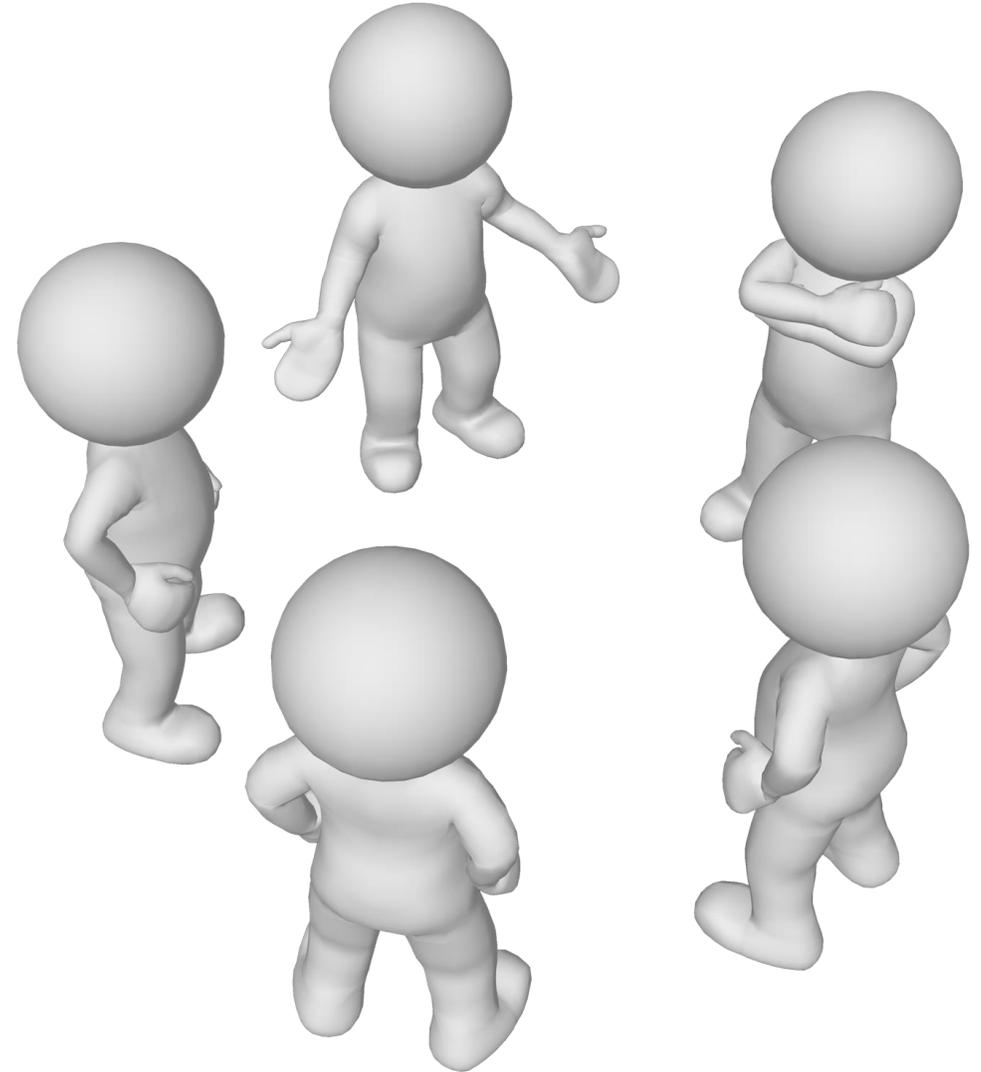
Problem: Fehler in 3D-Punktwolke

Grund: ggf. falsch orientierte Bilder; unscharfe/verwackelte Bilder im Bildverband

Lösung: Bilder aus Bildverband entfernen, Berechnung optimieren (*Info's im Metashape-Teil*)

TBC ...

Zeit für Fragen ...



Dr.-Ing. Melanie Elias
✉ melanie.elias@tu-dresden.de