

Multi-Sensor-Systeme

Qualitätssicherung und Validierung

Wintersemester 2022/2023

Dr.-Ing. Sören Vogel

- Messunsicherheiten und Einflussfaktoren auf die Qualität eines MSS
- Methoden zur Validierung eines MSS
 - Vorwärtsmodellierung
 - Rückwärtsmodellierung
 - Punktbasierte Verfahren
 - Parameterbasierte Verfahren
 - Flächenbasierte Verfahren / Punktwolkenvergleich
- Anwendungen und Praxisbeispiele

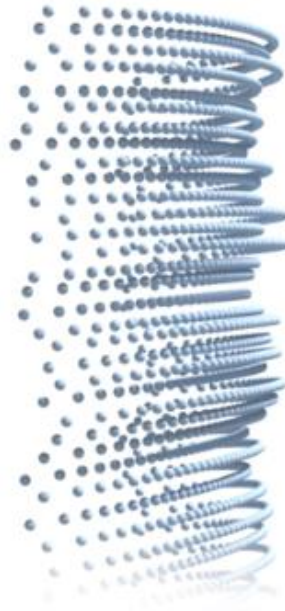
Simuliertes Messrauschen eines Velodyne HDL-64 Laserscanners

Wahrer Wert



**Systematische
Abweichungen**

Distanzoffset pro Scanstrahl



**Zufällige
Abweichungen**

pro Scanstrahl und pro
individueller Messung

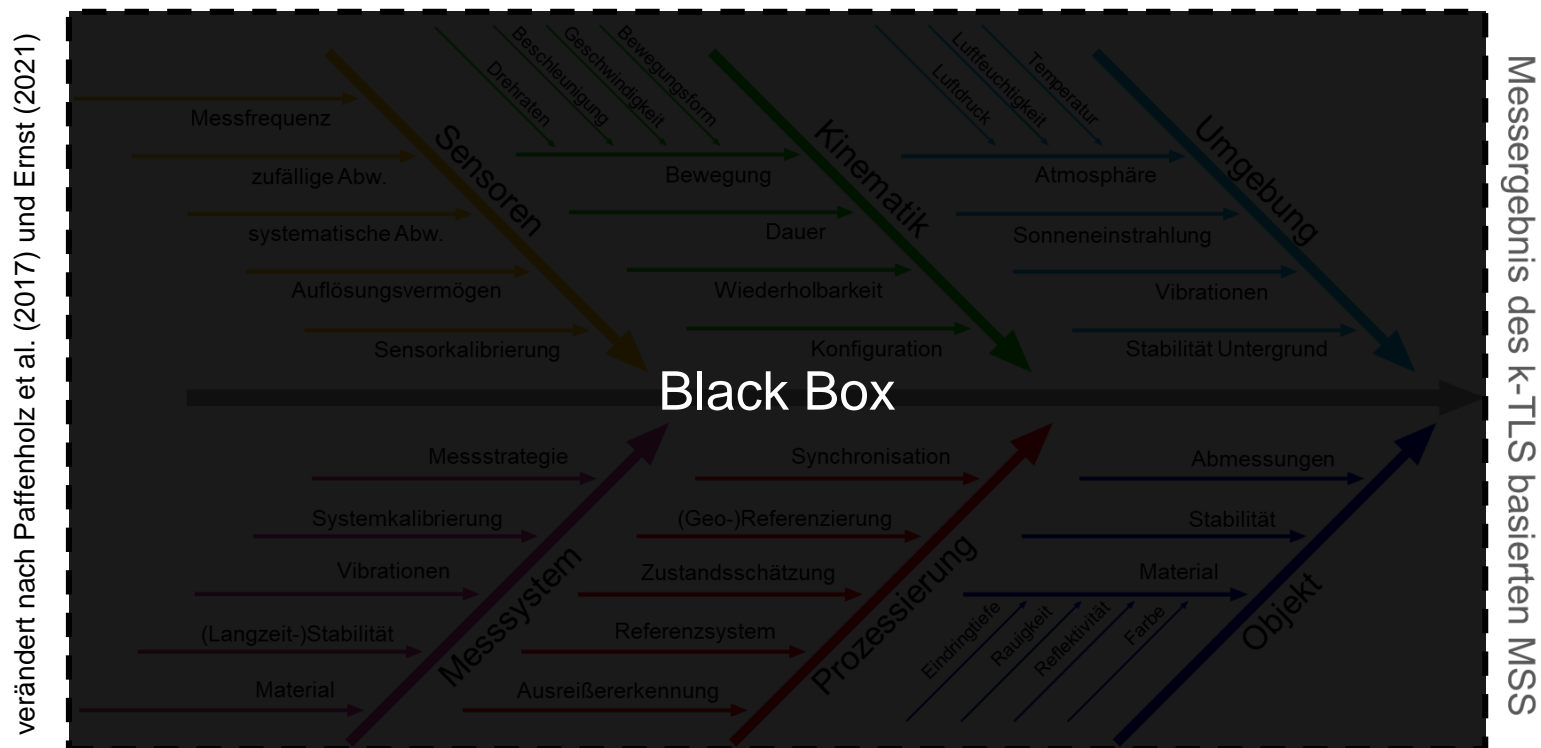


**Kombinierte
Messabweichungen**

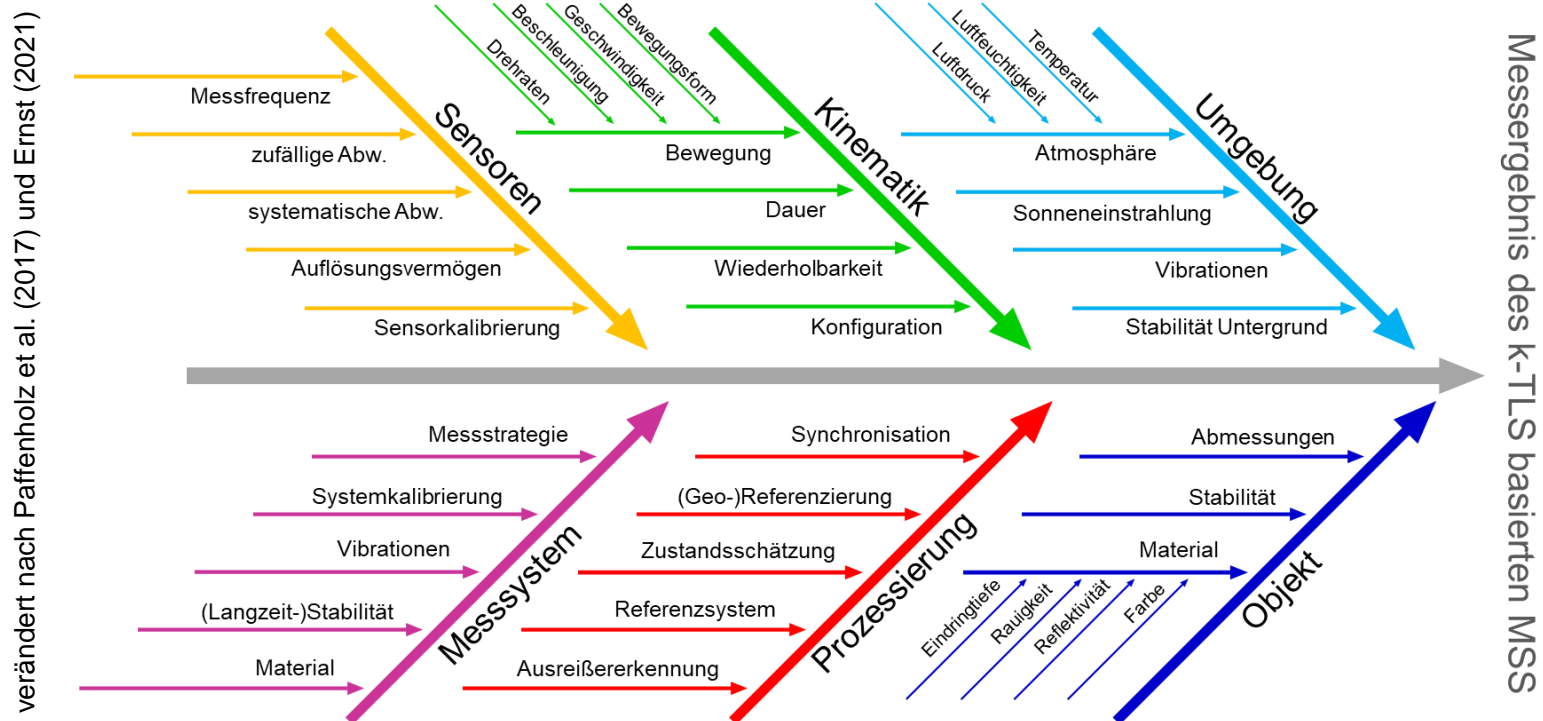


verändert nach Rakotosaona et al. (2020)

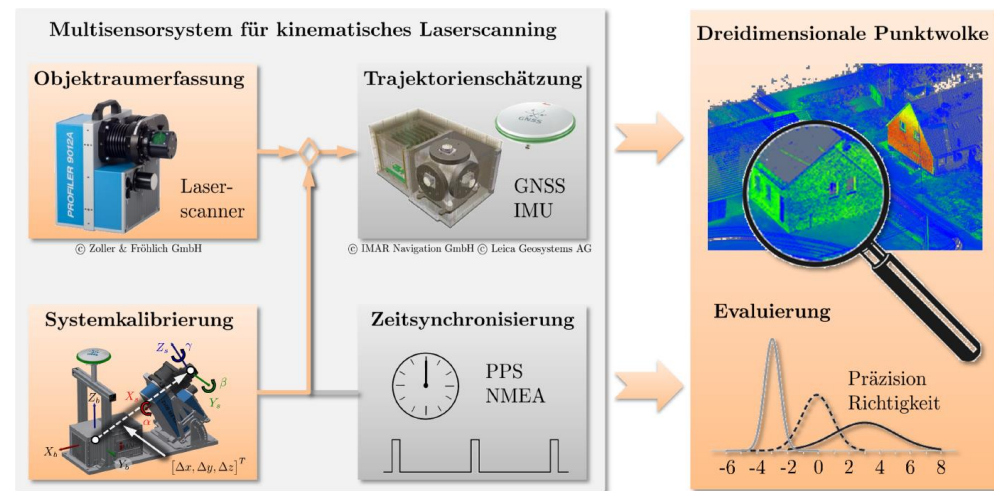
- Einfluss vieler unterschiedlicher (z.T. voneinander abhängiger) Effekte / Einflüsse auf die Qualität der Messergebnisse eines MSS
- Verzweigung / Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Einflussgrößen als große Herausforderung



- Einfluss vieler unterschiedlicher (z.T. voneinander abhängiger) Effekte / Einflüsse auf die Qualität der Messergebnisse eines MSS
- Verzweigung / Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Einflussgrößen als große Herausforderung



- Qualität beinhaltet viele Aspekte:
 - Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision), Zuverlässigkeit, Integrität, Vollständigkeit, Aktualität, Sensitivität, Robustheit, etc.
- Komplexe und ineinandergreifende Prozesskette bei der Betreuung eines (kinematischen) MSS stellt hohe Herausforderungen an die Qualitätsanalyse
- Möglichkeiten und Vorgehen um hohe Qualität zu erreichen:
 - Sensoren und MSS kalibrieren
 - Mathematische Kompensation systematischer Abweichungen
 - Wahl geeigneter Messprozesse in Abhängigkeit der Umgebung, Bewegung, Ausdehnung, etc.
 - Kinematisch: Bewegungsverhalten (Form, Geschwindigkeit, etc.)
 - Art der (Geo-)Referenzierung
 - ...



Heinz (2021)

Vorwärtsmodellierung

- Prädiktion der Unsicherheiten einer georeferenzierten Punktwolke, bedingt durch zufällige Abweichungen der individuellen Sensorbeobachtungen sowie verbleibende Abweichungen im Rahmen der Kalibrierung
- Ansetzen eines funktionalen und stochastischen Modells zur Beschreibung der Prozesskette mit Hilfe von Verteilungsfunktionen für die bekannten Einflussgrößen und entsprechender Varianzfortpflanzung oder Monte-Carlo-Simulation
 - Ziel: Genauigkeit finaler Produkte (z.B. Punktwolke) des MSS a priori zu quantifizieren
- Herausforderung:
 - Funktionale Zusammenhänge wegen Komplexität häufig nicht vollständig bekannt („Black-Box“), nicht normalverteilt und zeitlich / räumlich variabel
 - Unterschiedliche Genauigkeiten trotz identischem MSS möglich
- Basiert auf einer Vielzahl an Annahmen für komplizierte Multisensorsysteme und gewählte Modelle
- *Theoretische Vorgehensweise*

Rückwärtsmodellierung

- Mit dem MSS erfasste Messdaten (z.B. Punktwolken) werden mit unabhängig erfassten Referenz(-werten, -punktwolken, -geometrien, etc.) in Beziehung gesetzt
 - Analyse resultierender Abweichungen zur Referenz als Maß für die Genauigkeit des MSS über verschiedene Verfahren
 - *Punktbasiert*
 - *Parameterbasiert*
 - *Flächenbasiert / Punktwolkenvergleich*
 - Aussagen zur Präzision anhand von Wiederholungsmessungen möglich
 - Keine Separierung / Rückführung von vorliegenden Abweichungen auf einzelne Bestandteile der Prozesskette ohne weiteres möglich, wegen i.d.R. fehlendem Modellwissen
- *Empirische Vorgehensweise*

Punktbasiert

- Verwendung einzelner Kontrollpunkte und Abgleich mit Referenzwerten
 - Natürlicher Art (z.B. Gebäudeecken, Verkehrszeichen, Kanaldeckel)
 - Künstlicher Art (z.B. Zielzeichen, optische / haptische Markierungen)
 - Referenz über unabhängige Einmessung (z.B. Tachymetrie, GNSS, TLS)
- Aussagen zur Richtigkeit und Präzision (relative Abstände oder Wiederholmessungen) möglich
- Notwendigkeit der indirekten Extraktion anhand von z.B. Geraden- oder Mittelpunktsschätzung sowie Zielzeichenerkennung bedarf geeignete Auflösung der erfassenden Sensorik

Parameterbasiert

- Ableiten und Verwendung von geeigneten geometrischen Größen / Primitiven mit Referenzwerten
 - Natürlicher Art (z.B. Ampel- / Verkehrszeichen-Masten, Bordsteine, Häuserfassaden)
 - Künstlicher Art (z.B. Referenzflächen, Zylinder, Kugeln, Paraboloiden)
- Häufig in direktem Zusammenhang zum Endprodukt der Datenerfassung (z.B. objektbeschreibende Parameter wie die Detektion von Verkehrszeichen oder Fahrbahnmarkierungen) und daher starke Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung

Flächenbasiert

- (Nahezu) Vollständige Validierung auf Basis von Punktwolkenvergleichen mit einer geeigneten Referenz
 - Unabhängig erfasste (lokale oder georeferenzierte) Punktwolken oder erstellte 3D-Gebäudemodelle bzw. Geländemodelle
- Bestimmung von Abständen zwischen Punktwolke des MSS und Modelloberflächen
- Bestimmung der Richtigkeit und Präzision möglich
- Theoretisch kann die gesamte erfasste Punktwolke des MSS validiert werden, sofern flächendeckend Referenzen vorliegen
- Auf eine entsprechende Sensitivität der Umgebung ist zu achten, sodass auch aussagekräftige Ergebnisse abgeleitet werden können (z.B. geometrische Konfiguration)
- Vielzahl an unterschiedlichen Algorithmen (mit diversen Parametern) um Korrespondenzen (zusätzliche Frage nach deren Definition) zwischen Punktwolke und Referenz zu detektieren

Punktbasiert

Heinz (2021)



navis.com

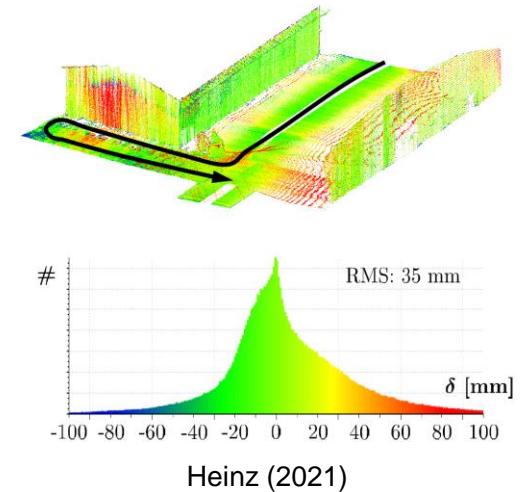


Parameterbasiert



Heinz (2021)

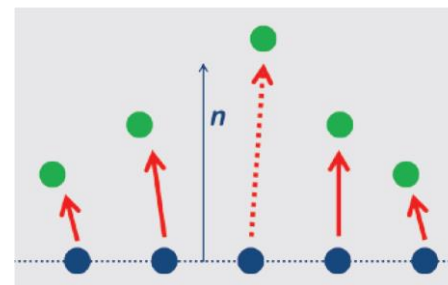
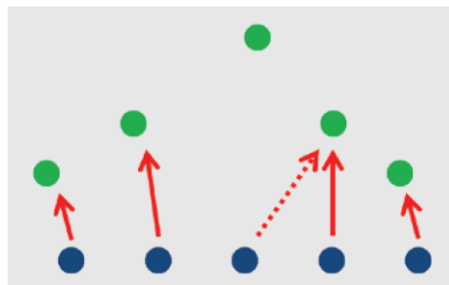
Flächenbasiert



- Vielzahl an unterschiedlichen Methoden, welche jedoch nicht standardisiert sind
- Kombination der einzelnen Möglichkeiten sinnvoll

Cloud-to-Cloud (C2C)

- Zuordnung korrespondierender Punkte und anschließende Berechnung der jeweiligen Abstände
 - Unterschiedliche Definition der Korrespondenz („nächster Nachbar“) kann zu fehlerhaften Zuordnungen führen
 - Häufige Verwendung einer modellierten Form bzw. Fläche zweiter Ordnung (Quadrik) für jeden einzelnen Referenzpunkt
 - Definition eines Normalenvektors für jeden Punkt, welcher die Suchrichtung vorgibt
- Ergebnis hängt ab von: Punktdichte, Messabweichungen, Ausreißern



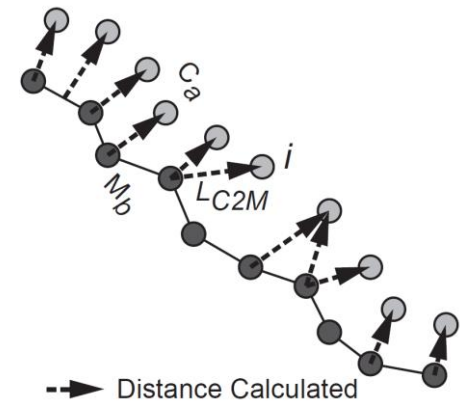
Holst et al. (2017)

Cloud-to-Mesh (C2M)

- Abstand einer 3D-Vermaschung zu einer Punktwolke mittels kürzesten Distanzen zu den jeweiligen Dreiecksflächen der vermaschten Punktwolke
- Ergebnis hängt ab von: Punktdichte, Messabweichungen (hier insbesondere den zufälligen), Ausreißern

Mesh-to-Mesh (M2M)

- Quasi identisch wie C2M, nur Abstände zwischen zwei Vermaschungen auf Basis der Normalenvektoren
- Ergebnis hängt ab von: Punktdichte, Messabweichungen (hier insbesondere den zufälligen), Ausreißern

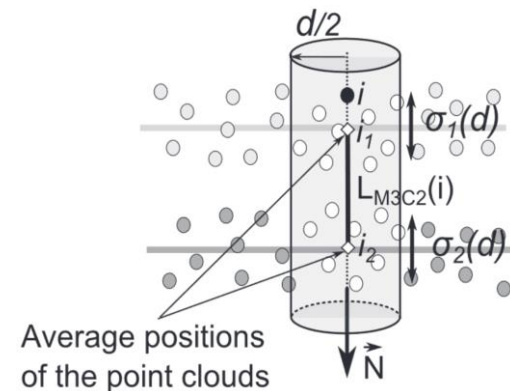
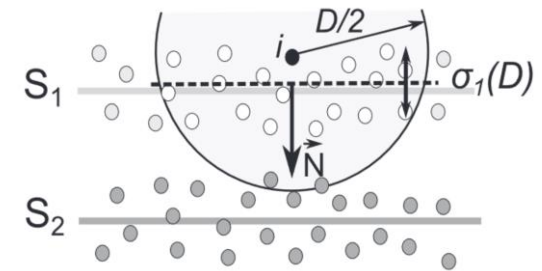


Barnhart & Crosby (2013)

Multiscale-Model-to-Model-Cloud (M3C2)

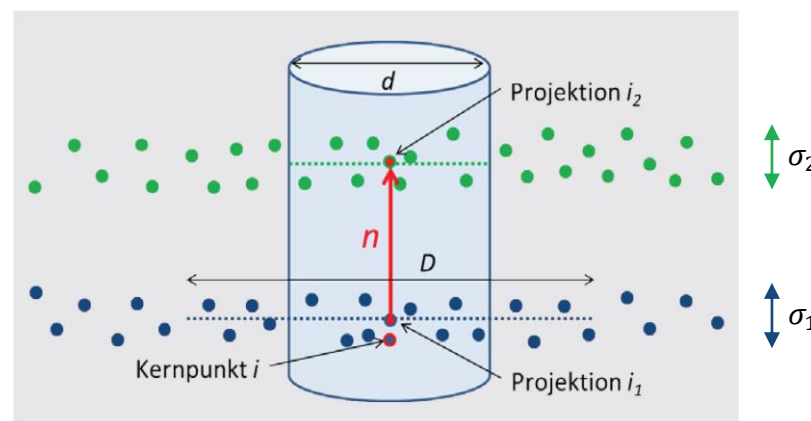
- Berücksichtigung des Messrauschens durch Verwendung von Kernpunkten i
- Zusammenfassung mehrere Punkte (und Streuung) in einem Punkt

1. Referenzpunktwolke wird auf gewisse Anzahl an Kernpunkten i reduziert
2. Berechnung eines Normalenvektors N für jeden Kernpunkt i innerhalb eines definierten Radius $D/2$, sowie $\sigma_i(D)$ als Maß für die Oberflächenbeschaffenheit der Umgebung
3. Projektion des Kernpunktes i entlang Normalenvektor in beide Punktwolken auf lokal minimierte Projektionsebenen (mit Radius $d/2$)
4. Distanz zwischen beiden Projektionspunkten i_1 und i_2 als Punktwolkenabstand L_{M3C2}



Multiscale-Model-to-Model-Cloud (M3C2)

- Grafische Darstellung der eingefärbten Kernpunkte (sowie Standardabweichung der Kernpunkte $\sigma_i(D)$ oder Anzahl der Nachbarn an jedem Kernpunkt) z.B. in CloudCompare
- I.d.R. geringere rechentechnische Laufzeit, da keine Vermaschung notwendig und Reduktion auf Kernpunkte
- Ergebnis hängt ab von: systematischen Messabweichungen, da Glättung und Reduktion auf Kernpunkt den Einfluss der anderen Faktoren minimieren



Holst et al. (2017)