

Institut für Geodäsie und Geoinformation

---

# Reduktion der Unsicherheiten bei der Registrierung von TLS-Punktwolken

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn

vorgelegt von

**Jannik Janßen**

aus Hagen (Westf.)

Bonn 2024



Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Holst

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juni 2024

Erscheinungsjahr: 2024

---

# Reduktion der Unsicherheiten bei der Registrierung von TLS-Punktwolken

## Zusammenfassung

Die Erfassung und Reproduktion der realen Umgebung bleibt auch in unserer zunehmend digitalisierten Welt eine zentrale Herausforderung. Zur flächenhaften Aufnahme unserer Umwelt wird seit einigen Jahren vermehrt das terrestrische Laserscanning (TLS) verwendet. Es ist inzwischen eines der Standardverfahren der Bestandsvermessung, Dokumentation kultureller Bauwerke und weiterer Anwendungsfelder. Durch die stetige technische und methodische Weiterentwicklung des TLS lässt sich dieses zudem in neuen Bereichen einsetzen, wie z. B. der Deformationsanalyse. Mit diesen Weiterentwicklungen und den neuen Einsatzgebieten erhöhen sich auch die Anforderungen an die Qualität der TLS-Punktwolken.

Zur vollständigen und abschattungsarmen Aufnahme eines Messobjektes werden meist mehrere TLS-Standpunkte benötigt. Die Scans der einzelnen Standpunkte müssen anschließend miteinander zu einer Gesamtpunktwolke registriert werden. Die Unsicherheit der Registrierung mittels identischer Punkte (z. B. Zielzeichen) hängt von zwei Einflussgrößen ab: der Beobachtungsunsicherheit und der geometrischen Netzkonfiguration der Registrierung. Auf Basis von Simulationen, empirischen Laboruntersuchungen sowie realen Registrierdatensätzen untersucht die vorliegende Dissertation Möglichkeiten zur Reduktion der Registrierunsicherheit. Es wird insbesondere untersucht, inwieweit die Quantifizierung und Verringerung der Beobachtungsunsicherheit sowie die Einführung neuer Beobachtungen in die Registrierung zur Reduktion beitragen. Die Erkenntnisse werden in vier Hauptaspekten herausgestellt:

1. **Reduktion der Beobachtungsunsicherheit:** Auf Basis von Wiederholungsscans wird der Einfluss verschiedener Algorithmen zur Schätzung der Zielzeichenkoordinaten sowie unterschiedlicher Zielzeichendesigns empirisch untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung des Kreuzkorrelationsalgorithmus sowie des BOTAS-Zielzeichens die Beobachtungsunsicherheit reduzieren und die zielzeichenbasierte Registrierung verbessern.
2. **Quantifizierung und Auswirkung der Beobachtungsunsicherheit:** Die Beobachtungsunsicherheit wird mit Hilfe von empirisch stochastischen Modellen für verschiedene Distanzen und Scanner quantifiziert. Es wird festgestellt, dass die verschiedenen Modelle zu unterschiedlichen Registrierparametern führen. Auf Basis der Ergebnisse empfiehlt sich die Nutzung der empirisch stochastischen Modelle für die Beobachtungen.
3. **Analyse der zeitlichen Beobachtungsstabilität:** Die Arbeit zeigt erstmals, dass durch die Aufwärmphase des Scanners die Beobachtungen der Registrierung beeinflusst werden – insbesondere die Zenitwinkel. Zur Eliminierung der Instabilitäten und zur Reduktion der Beobachtungsunsicherheit wird empfohlen, den Scanner vor der Datenerfassung mittels Probescans aufzuwärmen.
4. **Integration zusätzlicher Beobachtungen in die Registrierung:** Die Integration zusätzlicher Beobachtungen in den Registrierungsprozess trägt erfolgreich zur Verbesserung der Registrierqualität bei. Durch die Einbeziehung der Zielzeichenorientierung sowie markanter Punkte werden die Präzision und Zuverlässigkeit der Registrierung verbessert.

Im Gesamten leistet diese Dissertation Beiträge zur Reduktion der Registrierunsicherheit von TLS-Punktwolken. Die Erkenntnisse verbessern die Qualität der registrierten Gesamtpunktwolke und bieten somit allen Anwendungsfeldern des TLS neue Potentiale und Chancen. Durch die Verbesserungen können beispielsweise BIM-Modelle genauer modelliert werden oder im Bereich der Deformationsanalyse kleinere Signifikanzgrenzen erreicht werden.

# Reducing uncertainties in the registration of TLS point clouds

## Abstract

The recording and reproduction of our physical surroundings remains a major challenge in our increasingly digitalized world. In recent years, terrestrial laser scanning (TLS) has been increasingly used for areal acquisitions of our environment. It has become one of the standard methods for surveying as-built structures, documenting cultural buildings and other fields of application. Due to the continuous technical and methodological developments of TLS, it can also be used in new areas, such as deformation analysis. With these further development and the new fields of application, the demands regarding the quality of the TLS point clouds have also increased.

For a complete and shadow-free recording of a measured object, several TLS stations are usually required. The scans of the individual stations have to be registered with each other to form an overall point cloud. The uncertainty of the registration using identical points (e.g. targets) depends on two influencing factors: the observation uncertainty and the geometric configuration of the registration. On the basis of simulations, empirical laboratory tests and real registration data sets, this dissertation investigates possibilities for reducing the registration uncertainty. Particular emphasis is placed on the extent to which the quantification and reduction of observation uncertainties as well as the introduction of new observations contribute to reducing the uncertainty of the registration. The findings are highlighted in four main aspects:

1. **Reducing the observation uncertainty:** By means of repeat scans, the influence of different algorithms for target center estimation and various target designs is empirically investigated. The results show that the application of the algorithm using cross-correlations and the BOTAS target reduce the observation uncertainty and improve the target-based registration.
2. **Quantification and impact of the observation uncertainty:** The observation uncertainty is quantified with the help of empirical stochastic models for different distances and scanners. It is ascertained that the individual models lead to different registration parameters. Taking these results into account, it is recommended to apply the empirical stochastic models to the observations.
3. **Analysis of the temporal observation stability:** The study shows for the first time that the warm-up phase of the scanner influences the observations of the registration – in particular the vertical angles. In order to eliminate the instabilities and to reduce the observation uncertainty, it is recommended to warm up the scanner with test scans before collecting data.
4. **Integration of additional observations into the registration:** The integration of additional observations into the registration process successfully contributes to improving the registration quality. The inclusion of the target orientation as well as the detected keypoints improves the precision and reliability of the registration.

Overall, this dissertation contributes to reducing the registration uncertainty of TLS point clouds. The findings improve the quality of the registered point cloud, thus offering new potential and opportunities for all fields of application using TLS. With these improvements, it is possible to create more accurate BIM models or to achieve lower significance limits in the area of deformation analysis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Motivation . . . . .	3
1.2 Zielsetzung . . . . .	5
<b>2 Wissenschaftlicher Kontext</b>	<b>7</b>
<b>3 Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1 Terrestrische Laserscanner . . . . .	9
3.1.1 Messprinzip . . . . .	9
3.1.2 Unsicherheiten . . . . .	10
3.2 Registrierung von Punktwolken . . . . .	11
3.2.1 Herausforderungen der Registrierung . . . . .	11
3.2.2 Methoden zur Registrierung . . . . .	12
3.2.3 Parameterschätzung mittels identischer Punkte . . . . .	13
3.3 Qualität der Registrierung . . . . .	14
<b>4 Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen</b>	<b>17</b>
4.1 Unsicherheit der Beobachtungen zur Registrierung (Publikationen A – C) . . . . .	17
4.2 Ergänzung zusätzlicher Beobachtungen (Publikationen D und E) . . . . .	21
<b>5 Herausstellung der wichtigsten Aspekte</b>	<b>23</b>
5.1 Hauptaspekt 1: Reduktion der Beobachtungsunsicherheit . . . . .	23
5.1.1 Algorithmus zur Schätzung der Zielzeichenkoordinate . . . . .	23
5.1.2 Zielzeichendesign . . . . .	25
5.1.3 Entwicklung des BOTA8 . . . . .	27
5.2 Hauptaspekt 2: Modelle der Beobachtungsunsicherheit . . . . .	28
5.2.1 Beschreibung und Quantifizierung der Beobachtungsunsicherheit . . . . .	28
5.2.2 Auswirkungen stochastischer Modelle auf die Registrierung . . . . .	30
5.3 Hauptaspekt 3: Analyse der zeitlichen Beobachtungsstabilität . . . . .	31
5.4 Hauptaspekt 4: Ergänzung zusätzlicher Beobachtungen . . . . .	33
5.4.1 Methodische Beschreibung der zusätzlichen Beobachtungen . . . . .	34
5.4.2 Auswirkungen der zusätzlichen Beobachtungen auf die Registrierung . . . . .	36

<b>6 Fazit und Ausblick</b>	<b>41</b>
<b>7 Auflistung weiterer Veröffentlichungen</b>	<b>43</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>45</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>47</b>

# Vorwort

Die vorliegende kumulative Dissertation umfasst methodische Untersuchungen und Ergebnisse zur Reduktion der Unsicherheit der Registrierung von TLS-Punktwolken. Sie beruht auf fünf Veröffentlichungen, welche einer Peer-Review-Begutachtung unterzogen wurden:

- **Publikation A** (peer-reviewed):  
Janßen, J., Medić, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2019b). Decreasing the uncertainty of the target center estimation at terrestrial laser scanning by choosing the best algorithm and by improving the target design. *Remote Sensing*, 11(7), 845. doi.org/10.3390/rs11070845
- **Publikation B** (peer-reviewed):  
Medić, T., Holst, C., Janßen, J., & Kuhlmann, H. (2019a). Empirical stochastic model of detected target centroids: Influence on registration and calibration of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 13(3), 179–197. doi.org/10.1515/jag-2018-0032
- **Publikation C** (peer-reviewed):  
Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2021). Assessing the temporal stability of terrestrial laser scanners during long-term measurements. In A. Kopáček, P. Kyrinovič, J. Erdélyi, R. Paar, & A. Marendić (Hrsg.), *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying* (S. 69–84). Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-51953-7\_6
- **Publikation D** (peer-reviewed):  
Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2022). Target-based terrestrial laser scan registration extended by target orientation. *Journal of Applied Geodesy*, 16(2), 91–106. doi.org/10.1515/jag-2020-0030
- **Publikation E** (peer-reviewed):  
Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2024). Keypoint-based registration of TLS point clouds using a statistical matching approach. *Journal of Applied Geodesy*, 18(2), 267–284. doi.org/10.1515/jag-2022-0058

Diese Veröffentlichungen werden in Kapitel 4 zusammengefasst und ihre wichtigsten Aspekte anschließend in Kapitel 5 herausgestellt. Der Autor der vorliegenden Dissertation hat in jeder dieser Veröffentlichungen den Hauptbeitrag geleistet. Eine Ausnahme bildet die Publikation B: Der Hauptbeitrag des Verfassers dieser Dissertation besteht hier hauptsächlich im Teil der Entwicklung des stochastischen Modells sowie der Registrierung. Die anderen Teile der Publikation obliegen den Koautoren.



# 1. Einleitung

Die Erfassung und Reproduktion der realen Umgebung bleibt auch in unserer zunehmend digitalisierten Welt eine zentrale Herausforderung [Bolton et al., 2018; Akroyd et al., 2021; Ammar et al., 2022]. Digitale Konzepte, wie der digitale Zwilling oder Building Information Modeling (BIM), benötigen neben Sachdatenbanken auch geometrische Modelle unserer Umwelt [Borrmann et al., 2018; Farsi et al., 2020]. Die zur Erstellung dieser geometrischen Modelle häufig notwendige Aufnahmevermessung ist nach Kuhlmann et al. [2013] eine der Kernaufgaben der Ingenieurgeodäsie. Hierzu werden seit einigen Jahren vermehrt Sensoren und Instrumente verwendet, welche eine flächenhafte Abtastung ermöglichen [Kuhlmann & Holst, 2017; Chiang et al., 2021]. Das terrestrische Laserscanning (TLS) wird den Methoden zur flächenhaften Abtastung zugeordnet und ist inzwischen eines der Standardverfahren zur Bestandsvermessung [Tang et al., 2010; Wujanz et al., 2018b], zur Dokumentation von kulturellen Bauwerken [Kersten, 2007; Oostwegel et al., 2022] und für viele weitere Anwendungsfelder [Muralikrishnan, 2021]. Durch die stetige technische und methodische Weiterentwicklung des TLS lässt sich dieses zudem in neuen Bereichen einsetzen, beispielsweise zur Deformationsanalyse von baulichen Anlagen [Rashidi et al., 2020; Medić et al., 2023; Wiedemann & Holst, 2023] oder natürlichen Oberflächen [Barbarella et al., 2013; Holst et al., 2021]. Mit diesen Weiterentwicklungen und den neuen Einsatzgebieten erhöhen sich auch die Anforderungen an die Qualität der aus dem Laserscanning resultierenden Punktwolken.

Aufgrund von Abschattungen und weiteren Randbedingungen ist es in beinahe allen Anwendungsfällen des TLS notwendig, mehrere terrestrische Punktwolken miteinander zu verknüpfen. Diese Verknüpfung der Scans wird als Registrierung bezeichnet und stellt eine der wesentlichen Herausforderungen beim TLS dar [Wieser et al., 2016; Dong et al., 2020]. Sie beeinflusst maßgeblich die Qualität der finalen Punktwolke. Um den gestiegenen Anforderungen an die Punktwolkenqualität gerecht zu werden, konzentriert sich die vorliegende Dissertation auf die Analyse und Reduktion der Registrierunsicherheit. Es wird insbesondere untersucht, inwieweit die Quantifizierung und Verringerung der Beobachtungsunsicherheit sowie die Einführung neuer Beobachtungen zur Reduktion der Unsicherheit der Registrierung beitragen. Die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit werden in den folgenden Abschnitten 1.1 und 1.2 beschrieben.

## 1.1 Motivation

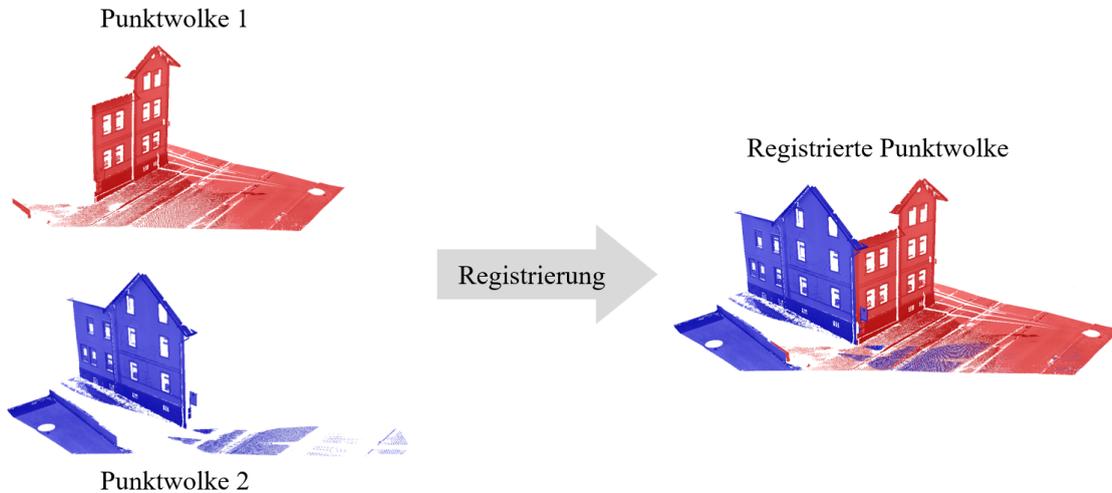
Die Registrierung von Punktwolken beschreibt die Verknüpfung von Scans, welche beim statischen Laserscanning von unterschiedlichen Standpunkten aus aufgenommen werden. Diese Verknüpfung ist zumeist notwendig, um Sichteinschränkungen und daraus resultierende Abschattungen zu kompensieren [Kuhlmann & Holst, 2017] oder um Auflösungs- und Genauigkeitsanforderungen an die Punktwolke gerecht zu werden. Abb. 1.1 veranschaulicht die Registrierung zweier Punktwolken. Als Resultat der Registrierung ergibt sich eine, im Vergleich zu den einzelnen Punktwolken, vollständigere und in den Bereichen der Überlappung dichtere Punktwolke.

Die Transformation eines Punktes  $\mathbf{x}$  eines Scans vom Standpunkt des Startbezugssystems  $\mathcal{S}$  in das Bezugssystem des Zielstandpunktes  $\mathcal{T}$  kann mithilfe einer 7-Parameter-Helmert-Transformation

$$\mathbf{x}^{\mathcal{T}} = \mu \cdot \mathbf{R}_z(\alpha) \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_x(\gamma) \cdot \mathbf{x}^{\mathcal{S}} + \mathbf{t} \quad (1.1)$$

beschrieben werden [Heunecke et al., 2013]. Wird für beide Standpunkte der identische Laserscanner verwendet, wird angenommen, dass der Maßstab  $\mu = 1$  ist. Dieser muss daher nicht mitbestimmt werden. Es verbleiben somit sechs Parameter, die zur Registrierung zweier Punktwolken bestimmt werden müssen: die

Rotation  $\alpha$  um die  $x$ -Achse, die Rotation  $\beta$  um die  $y$ -Achse, die Rotation  $\gamma$  um die  $z$ -Achse sowie die drei Translationen des Vektors  $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^\top$  entlang der jeweiligen Achsen.



**Abbildung 1.1:** Beispiel einer Registrierung zweier Scans eines Gebäudes, welche von unterschiedlichen Standpunkten aus aufgenommen wurde.

Zur Bestimmung dieser sechs Registrierparameter existieren verschiedene Ansätze [Theiler, 2015; Kuhlmann & Holst, 2017; Cheng et al., 2018; Dong et al., 2020]: Beispielsweise lassen sich die Registrierparameter hardwarebasiert mithilfe von Sensoren direkt messen [Reshetyuk, 2010; Paffenholz, 2012] oder softwarebasiert aus den Scans selbst ableiten [Besl & McKay, 1992; Grant et al., 2012; Wujanz et al., 2019]. Die vorliegende Dissertation konzentriert sich auf die Bestimmung der Registrierparameter mittels identischer Passpunkte, welche in den einzelnen Scans identifiziert werden. Diese identischen Punkte werden in der Regel durch die Zuhilfenahme von Zielzeichen signalisiert bzw. vermarktet und sind daher gut in den einzelnen Scans erkennbar [Becerik-Gerber et al., 2011; Liang et al., 2014]. Die anschließende Registrierung wird auch als zielzeichenbasierte Registrierung bezeichnet.

Für Anwendungen mit höchsten Qualitätsansprüchen, wie beispielsweise der Deformationanalyse, ist es notwendig, die Unsicherheit der final registrierten Punktwolke möglichst gering zu halten. Hierbei kommt der Registrierung eine entscheidende Rolle zu. Die bisher nach Soudarissanane [2016] bekannten Quellen der Unsicherheit (Laserscanner, geometrische Konfiguration, Atmosphäre und Objekteigenschaften) führen dazu, dass auch die Registrierung mit Unsicherheiten behaftet ist und diese sich negativ auf die Qualität der finalen, registrierten Punktwolke auswirken. Abb. 1.2 verdeutlicht die Auswirkungen von Abweichungen in den Registrierparametern  $\alpha$  und  $\beta$ . Abweichungen in diesen Parametern führen dazu, dass die zu registrierende Punktwolke systematisch verschwenkt ist. Durch die Hebelwirkung wirkt sich die Winkelabweichung der Registrierung auf Scanpunkte mit langen Distanzen stärker aus als auf nah am Standpunkt liegende Punkte.

Bei der Registrierung mittels identischer Punkte, wie der zielzeichenbasierten Registrierung, kann die Schätzung der Registrierparameter mithilfe eines kleinste-Quadrate-Ausgleichs im Gauß-Helmert-Modell erfolgen [Kuhlmann et al., 2013; Niemeier, 2008]. Die Unsicherheit der Parameter, beschrieben durch die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{pp}$ , ergibt sich nach Mikhail & Ackermann [1976] mit

$$\Sigma_{pp} = (\mathbf{A}^\top (\mathbf{B}^\top \Sigma_{ll} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{A})^{-1} \quad (1.2)$$

wobei es sich bei  $\Sigma_{ll}$  um die Kovarianzmatrix der Beobachtungen, bei  $\mathbf{A}$  um die Konfigurationsmatrix und bei  $\mathbf{B}$  um die Bedingungsmatrix handelt. Eine weiterführende Beschreibung der Parameterschätzung erfolgt in Abschnitt 3.2.3. Aus der Gleichung für die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{pp}$  sind die beiden Faktoren erkennbar, welche die Unsicherheit der Registrierung beeinflussen:



**Abbildung 1.2:** Beispiel einer Registrierung zweier Scans eines Gebäudes mit Abweichungen in den Registrierparametern  $\alpha$  und  $\beta$ .

1. die **Kovarianzmatrix**  $\Sigma_{ll}$ , welche die Unsicherheit der Kovarianzmatrix der Beobachtungen beschreibt. Bei der Registrierung mit identischen Punkten ergibt sich  $\Sigma_{ll}$  aus der Unsicherheit der Punktkoordinaten, welche zur Registrierung verwendet werden, beispielsweise die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten.
2. die **Konfiguration**  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$ . Sie beschreibt die geometrische Konfiguration der Scannerstandpunkte sowie der identischen Punkte, welche zur Registrierung verwendet werden. Werden Zielzeichen als identische Punkte verwendet, ist die geometrische Konfiguration vom Nutzer beeinflussbar. So kann durch eine günstige Platzierung der Zielzeichen auch die Genauigkeit der Registrierung verbessert werden. Eine ungünstige Verteilung der Zielzeichen führt zudem durch die Konfigurationsmatrix  $\mathbf{A}$  und die Bedingungsmatrix  $\mathbf{B}$  zu numerischen Instabilitäten in der Registrierausgleichung.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, die Unsicherheit der Registrierung von TLS-Punktwolken zu reduzieren und so die Genauigkeit der registrierten Gesamtpunktwolke weiter zu steigern. Der Fokus liegt hierbei auf der Registrierung mittels Zielzeichen, beziehungsweise im späteren Verlauf der Arbeit auf der Registrierung mittels Punktidentitäten im Allgemeinen.

Das Ziel der Reduktion der Unsicherheit der Registrierparameter kann als Optimierungsaufgabe interpretiert werden, bei der die Einträge der Kovarianzmatrix  $\Sigma_{pp}$  zu minimieren sind. Aus Gl. 1.2 und den daraus ersichtlichen Einflussgrößen geht hervor, dass es zwei Möglichkeiten zur Minimierung von  $\Sigma_{pp}$  gibt:

1. **Untersuchung der Beobachtungsunsicherheit:** Die Unsicherheiten der Registrierparameter  $\Sigma_{pp}$  werden kleiner, wenn die Beobachtungsunsicherheiten, repräsentiert durch  $\Sigma_{ll}$ , verringert werden. Bei der Verwendung von Zielzeichen zur Registrierung muss die Koordinatenunsicherheit der Zielzeichenmittelpunkte reduziert werden. Hierzu werden in den Publikationen dieser Dissertation insbesondere der Einfluss des Zielzeichendesigns und des Auswertalgorithmus (Veröffentlichung A), der Einfluss des stochastischen Modells (Veröffentlichung B) sowie die zeitliche Stabilität der Beobachtungen (Veröffentlichung C) untersucht.
2. **Integration zusätzlicher Beobachtungen:** Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Beobachtungen werden die Konfigurationmatrix  $\mathbf{A}$  und Bedingungsmatrix  $\mathbf{B}$  der Registrierung verändert, was nach Gl. 1.2 auch zu einer Veränderung von  $\Sigma_{pp}$  führt. Zusätzliche Beobachtungen können mathematisch nur zu einer Verringerung der Registrierunsicherheit  $\Sigma_{pp}$  führen. Die Veröffentlichungen D und E nutzen diese Gegebenheit und führen die Ebenenorientierung der Zielzeichen bzw. markante Punkte als zusätzliche Beobachtungen in die Registrierung ein.

Durch die Untersuchungen zu den Beobachtungsunsicherheiten und der Einbindung zusätzlicher Beobachtungen in die Registrierung zeigt diese kumulative Dissertation Wege zur Reduktion der Registrierunsicherheit auf. Da die Registrierunsicherheit bisher eine der Hauptunsicherheitsquellen beim TLS darstellt, leistet diese Dissertation einen wichtigen Beitrag zu einer höheren Datenqualität von TLS-Punktwolken.

Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 wird die Dissertation in den wissenschaftlichen Kontext und verwandte Arbeiten eingeordnet. Kapitel 3 erläutert die für die Veröffentlichung relevanten Grundlagen im Bereich des TLS. Die Veröffentlichungen A – E werden in Kapitel 4 zusammengefasst und ihre Hauptaspekte in Kapitel 5 herausgestellt. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse in Kapitel 6 in einem Fazit zusammengefasst.

## 2. Wissenschaftlicher Kontext

Der Übergang von geodätischen Einzelpunktaufnahmen hin zur flächenhaften Erfassung von Messobjekten in der letzten Dekade führt dazu, dass das TLS eine immer wichtigere Rolle innerhalb der Ingenieurgeodäsie einnimmt [Kuhlmann et al., 2013; Muralikrishnan, 2021]. Laserscanning wird jedoch nicht nur in der Ingenieurgeodäsie zur Aufnahme der Umgebung genutzt: auch bei der Entwicklung von Smartphones [Costantino et al., 2022; Catharia et al., 2023], Robotern [Haddeler et al., 2020] oder autonomen Fahrzeugen [Royo & Ballesta-Garcia, 2019] gehören Lidar (Light Detecting and Ranging)-Sensoren inzwischen zu den Standardkomponenten. Der Begriff Lidar ist in diesen Bereichen weiter verbreitet als der Begriff TLS, wobei beide Begriffe die Aufnahme der Umwelt mittels Lasertechnologie beschreiben.

Sowohl bei der Aufnahme mit TLS (Ingenieurgeodäsie) als auch bei der Erfassung mit Lidar-Sensoren (Robotik) ist das Ergebnis eine Punktwolke der Umgebung. Die Punktwolken unterscheiden sich allerdings in ihren Charakteristiken: (1) Die Punktdichte der Lidar-Sensordaten ist gegenüber den Daten aus geodätischen Scannern deutlich geringer. Während mittels TLS von einem Standpunkt aus mehrere Millionen Punkte aufgenommen werden, sind es bei einem Scan eines Lidar-Sensors nur mehrere hundert oder tausend Punkte [Raj et al., 2020; Wunderlich et al., 2013]. (2) Die Präzision der gemessenen Punkte der Lidar-Sensoren, welche in der Robotik eingesetzt werden, ist deutlich geringer. Überlicherweise werden hier Punkte mit Unsicherheiten mehrerer Zentimeter gemessen, wohingegen geodätische Scanner Punktaufnahmen im Genauigkeitsbereich weniger Millimeter ermöglichen [Li et al., 2018; Wujanz et al., 2018a]. (3) Bei der Registrierung der Scandaten können bei geodätischen Anwendungen mehrere Meter zwischen den Standpunkten liegen, bei den Scandaten der Robotik liegen die Aufnahmepunkte meist einige Zentimeter oder Dezimeter auseinander, sodass die Blickwinkelunterschiede deutlich kleiner sind [Barnea & Filin, 2012; Pomerleau et al., 2015]. Diese drei Unterschiede der Punktwolken zwischen der Ingenieurgeodäsie und der Robotik führen dazu, dass sich die Anwendungsgebiete, die Strategien zur Aufnahme sowie die Methodik der Prozessierung der Daten unterscheiden. Die vorliegende Dissertation konzentriert sich klar auf den Bereich der Ingenieurgeodäsie.

Im wissenschaftlichen Kontext der Ingenieurgeodäsie werden Laserscanner seit einigen Jahren auch für die Überwachung und Deformationsanalyse von Brücken [Rashidi et al., 2020; Medić et al., 2023], Staudämmen [Wiedemann & Holst, 2023; Zaczek-Peplinska & Kowalska, 2017; Alba et al., 2006] und anderen Bauwerken [Schill, 2018] eingesetzt. Die Themen Oberflächenrepräsentation, Kalibrierung des Laserscanners und Verständnis über die Unsicherheiten der Beobachtungen bilden die Forschungsschwerpunkte in diesem Bereich [Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 2023]. Werden mehrere Standpunkte für die vollständige und detaillierte Erfassung des Messobjekts benötigt, stellt die anschließende Registrierung der einzelnen Scans eine der Hauptherausforderungen dar [Wieser et al., 2016; Dong et al., 2020].

Um diese Herausforderung zu lösen, existieren verschiedene hardware-, software- und zielzeichenbasierte Ansätze der Registrierung [Hesse & Ehm, 2013; Kuhlmann & Holst, 2017; Theiler, 2015], auf welche in Abschnitt 3.2.2 näher eingegangen wird. Die zielzeichenbasierte Registrierung ist für die vorliegende Dissertation von besonderer Bedeutung. Sie bietet gegenüber der software- und hardwarebasierten Registrierung zwei Vorteile: Zum einen kann durch die achtsame Platzierung der Zielzeichen die geometrische Konfiguration und somit auch die Unsicherheit der Registrierung positiv beeinflusst werden. Im Gegensatz zu den anderen Registrierungsverfahren ist die zielzeichenbasierte Registrierung somit unabhängig vom Messobjekt. Zum anderen kann die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinate analysiert werden. Die Koordinaten der Zielzeichen, welche die Beobachtungen der zielzeichenbasierten Registrierung darstellen, sind wie alle Messungen mit Abweichungen behaftet. Die Unsicherheiten der Beobachtungen ergeben sich hierbei aus den messtechnischen Abweichungen des Laserscanners, der Schangeometrie (Distanz und Einfallswinkel), dem Zielzeichendesign (Material, Farbe, Reflektionseigenschaften) sowie der algorithmischen Auswertung des Scans und der Schätzung der Koordinate.

Seit mehr als zwei Jahrzehnten wird die Unsicherheit der zielzeichenbasierten Registrierung sowie die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten in unterschiedlichen Arbeiten wissenschaftlich untersucht [Lichti et al., 2000; Gordon et al., 2005; Rachakonda et al., 2017a]. Die bisherigen Untersuchungen widmen sich jedoch meist nur einzelnen Aspekten der Unsicherheitsquellen. So werden beispielsweise verschiedene Zielzeichen getestet, aber nur im Hinblick auf wenige geometrische Konfigurationen [Muralikrishnan et al., 2016]. Andere Veröffentlichungen untersuchen unterschiedliche Algorithmen zur Bestimmung der Koordinaten jedoch nur für ein Zielzeichendesign [Chow et al., 2010]. Des Weiteren werden in den Veröffentlichungen unterschiedliche Maße zur Beschreibung der Unsicherheit verwendet. Valanis & Tsakiri [2004] verwenden beispielsweise mittlere Absolutabweichungen zur Beschreibung der Unsicherheit, andere Publikationen nutzen hingegen Vergleichsstandardabweichungen gegenüber Referenzen [Ge & Wunderlich, 2015; Pejić et al., 2014] oder Wiederholstandardabweichungen aus Mehrfachmessungen [Kern et al., 2010]. Die Vielfalt an unterschiedlichen Qualitätsmaßen sowie die große Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten zu Einzelaspekten der zielzeichenbasierten Registrierung lassen eine Kombination der Erkenntnisse aufgrund unterschiedlicher Herangehensweisen nicht zu.

Im Hinblick auf das Ziel dieser Dissertation, die Unsicherheit der Registrierung zu reduzieren, und unter Berücksichtigung der Analyse der bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten ergeben sich im Wesentlichen vier offene Fragen, welche in den Hauptaspekten in Kapitel 5 beantwortet werden:

1. Wie kann die Beobachtungsunsicherheit, d.h. die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten, durch das Design des Zielzeichens sowie die algorithmische Auswertung möglichst verringert werden? Hierbei sollte auch der Einfluss verschiedener Scaengeometrien betrachtet werden.  
Dieser Punkt ist von besonderer Bedeutung, da eine Verbesserung der Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten nicht nur die Qualität der Registrierung erhöht, sondern auch die zielzeichenbasierte Kalibrierung positiv beeinflusst. Diese Verbesserung dient somit auch Projekten, bei denen Zielzeichen als Referenz- oder Passpunkte zur Evaluierung anderer Messsysteme genutzt werden, wie beispielsweise bei Mobile-Mapping-Systemen.
2. Sind die Beobachtungen der zielzeichenbasierten Registrierung zeitlich stabil? Ein bisher kaum untersuchter Aspekt der Beobachtungsunsicherheit ist die Stabilität der Beobachtungen. An diesem Punkt wird untersucht, inwieweit sich die Beobachtungen mit der Zeit ändern und von welchen Einflüssen diese Änderungen abhängen.
3. Wie wirken sich die Unsicherheiten der Beobachtungen auf die Registrierung aus? Führen unterschiedliche Unsicherheitsmodelle zu divergenten Registrierungen bzw. Registrierengenauigkeiten?
4. Wie kann die zielzeichenbasierte Registrierung verbessert werden? Können zusätzliche Beobachtungen die Unsicherheit weiter reduzieren? An dieser Stelle wird versucht, die Unsicherheit der Registrierung durch weitere Beobachtungen zu verringern, ohne den Aufwand während der Messungen zu erhöhen.

## 3. Grundlagen

Die für die vorliegende Dissertation wichtigsten Grundlagen werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Teile der Grundlagen wurden bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt und finden sich detailliert in den einzelnen Veröffentlichungen A – E wieder. Zur Verbesserung der Verständlichkeit und Übersichtlichkeit werden sie hier dennoch summarisch, strukturiert dargelegt. Abschnitt 3.1 beschäftigt sich mit den messtechnischen Grundlagen terrestrischer Laserscanner sowie deren Abweichungen. In Abschnitt 3.2 werden die Herausforderungen und Methoden der Punktwolkenregistrierung beschrieben. Die Qualitätsbeurteilung der Registrierung wird im anschließenden Kapitel 3.3 erläutert.

### 3.1 Terrestrische Laserscanner

Die im Folgenden beschriebenen Grundlagen zu terrestrischen Laserscannern beziehen sich ausschließlich auf das statische TLS. Im Gegensatz zum mobilen Laserscanning, bei dem sich der Laserscanner während der Datenaufnahme bewegt, verändert sich die Position des Scanners während der Datenaufnahme von einem Standpunkt aus nicht. Des Weiteren beschränken sich die Ausführungen zum Messprinzip in Abschnitt 3.1.1 auf reine Panorama-Scanner, welche die gesamte Umgebung erfassen. Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass weitere Bauformen existieren, beispielsweise Kamerascanner, die nur einen Teil der Umgebung scannen [Zogg, 2008]. Die Beschreibung der Unsicherheiten in Abschnitt 3.1.2 kann hingegen zu großen Teilen auf das Laserscanning im Allgemeinen übertragen werden.

#### 3.1.1 Messprinzip

Terrestrische Laserscanner gehören zur Gruppe der polar messenden Messinstrumente. Im Gegensatz zu Messungen mit Tachymetern werden beim TLS jedoch keine einzelnen Punkte aufgenommen, sondern die Umgebung wird kontinuierlich und berührungsgelöst mithilfe von reflektorlosen Distanzmessungen abgetastet. Moderne Laserscanner können bis zu zwei Millionen Punkte pro Sekunde aufnehmen [Leica Geosystems, 2018]. Um diese hohe Abtastrate zu erreichen, befindet sich in der Kippachse des Scanners ein um dieselbe Achse rotierender Spiegel. Eine Lasereinheit, welche sich seitlich versetzt auf der Kippachse befindet, sendet einen Laserstrahl entlang der Kippachse, wo er im Schnittpunkt der Steh-, Kipp- und Zielachse vom Spiegel um  $90^\circ$  Richtung Messobjekt abgelenkt wird. Durch die Rotation des Spiegels und mithilfe des abgelenkten Laserstrahls kann so ein vertikales Profil der Umgebung gemessen werden. Eine zusätzliche Rotation um die Stehachse des Scanners erreicht eine Abtastung in alle Horizontalrichtungen und somit eine vollständige Abtastung der Umgebung; abgesehen von bautechnischen Abschattungen unterhalb des Scanners.

Aufgrund der hohen Messrate von bis zu  $2\text{ MHz}$  sind einzelne Winkelabgriffe der horizontalen Scanner- und vertikalen Spiegelstellung nicht für jeden Punkt möglich. Die Winkelwerte der Scanpunkte werden deshalb aus der Rotationsgeschwindigkeit sowie den gemessenen Zeitpunkten der jeweiligen Punkte linear interpoliert. Hierbei wird von einer konstanten Winkelgeschwindigkeit der Rotationen des Spiegels ausgegangen. Ein weiterer Unterschied zu tachymetrischen Messungen ist, dass beim Laserscanning durch die kontinuierliche Rotation des Scanners keine Mehrfachmessungen zu demselben Punkt möglich sind und somit die Präzision der Strecke nicht durch Mittelbildung gesteigert werden kann. [Kuhlmann & Holst, 2017]

Neben den Teilkreisen zur Winkelmessung sowie der Lasereinheit zur Distanzmessung sind in vielen terrestrischen Laserscannern weitere Sensoren verbaut, wie beispielsweise Neigungssensoren zur Kompensation der Stehachsabweichung, ein Kompass oder Barometer. Diese werden unter anderem zur später beschriebenen

Grobregistrierung verwendet. Im Gegensatz zu Tachymetern liefern viele terrestrische Laserscanner für jeden Scanpunkt Intensitätswerte des zurückgestrahlten Lasers. Zusammen mit den verknüpften Bildern von zusätzlich integrierten Kameras können auf diese Weise bis zu sieben Informationen (7D) für jeden gemessenen Punkt beobachtet werden: die drei Polarelemente (Strecke  $r$ , Horizontalrichtung  $\varphi$  und Zenitwinkel  $\theta$ ), die Intensität  $i$  sowie drei Farbinformationen (RGB).

Aus den gemessenen Polarelementen eines Punktes  $j$  lassen sich die kartesischen Koordinaten des Punktes  $\mathbf{x}_j = [x, y, z]^\top$  mithilfe der Gleichung

$$\mathbf{x}_j = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} r \cdot \cos \varphi \cdot \sin \Theta \\ r \cdot \sin \varphi \cdot \cos \Theta \\ r \cdot \cos \Theta \end{bmatrix}_j \quad (3.1)$$

berechnen. Die Menge aller gemessenen Punkte  $\mathbf{x}$  eines Standpunktes bilden die Punktwolke eines Standpunktes  $\mathbf{X}$ . Die Punktwolken bzw. Scans mehrerer Standpunkte können mithilfe der Registrierung (s. Abschnitt 3.2) zu einer Gesamtpunktwolke zusammengeführt werden.

### 3.1.2 Unsicherheiten

Wie alle Messungen sind auch die Messungen mittels TLS mit Unsicherheiten behaftet. Dieser stochastische Prozess wird durch zufällige und systematische Abweichungen bestimmt, welche sich in vier Gruppen gliedern lassen:

1. **Scanner:** Produktions- oder verschleißbedingte Abweichungen von der idealen Konstruktion des Laserscanners führen zu systematischen Abweichungen in den Punktwolken. Mögliche Abweichungen sind, analog zum Tachymeter, beispielsweise die Zielachsabweichung, die Additionskonstante oder TLS-spezifisch die Inorthogonalität der primären Rotationsachse.

Durch die Kalibrierung terrestrischer Laserscanner wird versucht, diesen Abweichungen bestmöglich entgegenzuwirken. Die Kalibrierung besteht zum einen aus der qualitativen Beschreibung der scannerinternen Abweichungen mittels mathematischer Modelle und zum anderen aus der quantitativen Bestimmung der Korrekturparameter [Kuhlmann & Holst, 2017]. Hierbei kann zwischen Komponentenkalibrierungen (einzelne Komponenten und deren Abweichungen werden sukzessive kalibriert) und Systemkalibrierungen (alle Abweichungen werden in einer Kalibrierung gemeinsam bestimmt) unterschieden werden.

2. **Atmosphäre:** Bei den Abweichungen durch die Atmosphäre ist zwischen Auswirkungen auf die Streckenmessung und auf die Winkelmessung zu unterscheiden. Durch Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte wird der Maßstab der Streckenmessung beeinflusst. Korrekturmodelle hierfür sind für elektrooptische Distanzmessungen seit vielen Jahren mit für das TLS hinreichender Genauigkeit bekannt. Refraktive Effekte bewirken jedoch, dass der Laserstrahl nicht, wie bei der Berechnung der kartesischen Koordinaten (Gl. 3.1) angenommen, gerade verläuft, sondern gekrümmt ist [Bahnert, 1986]. Im Bereich des Long-Range-Laserscannings können die refraktiven Abweichungen mehrere Dezimeter betragen [Friedli et al., 2019]. Für Laserscanningdistanzen bis 100 m, wie sie in dieser Dissertation behandelt werden, wirkt sich die Refraktion nur wenig auf die Koordinaten aus. Die Abweichungen für diesen Bereich können nach Kahmen [2005] mit wenigen Zehntel Millimetern abgeschätzt werden.
3. **Geometrische Konfiguration:** Mit der geometrischen Konfiguration ist die Anordnung des Scanners im Verhältnis zum Messobjekt gemeint. Sie wird durch die Messdistanz und den Einfallswinkel beschrieben. Durch die Divergenz des Laserstrahls ist der Laserspot am Messobjekt nicht infinit klein,

sondern weitet sich aus. Dies führt dazu, dass bei schrägem Auftreffen am Messobjekt der Laser-spot verzerrt wird und die gemessene Strecke nicht mit der gemessenen Horizontalrichtung und dem gemessenen Vertikalwinkel korrespondiert [Kern, 2003; Soudarissanane et al., 2011; Schäfer, 2017]. Empirische Untersuchungen zu den systematischen Abweichungen durch den Einfallswinkel finden sich u.a. in Zámečnicková & Neuner [2018] und Linzer et al. [2021].

4. **Messobjekt bzw. Oberfläche:** Die Oberfläche des Messobjekts nimmt durch ihre Rauigkeit, ihre Farbe, ihr Material und ihr allgemeines Reflektionsverhalten einen Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis, welches wiederum einen Einfluss auf die Scangenaueigkeit hat. So kann beobachtet werden, dass beispielsweise die Präzision der Streckenmessung mit niedrigerer Intensität abnimmt [Wujanz et al., 2018a; Schmitz et al., 2019]. Neben diesen zufälligen Abweichungen können beim Scannen synthetischer Materialien, wie Plastik oder Styrospor, durch das Eindringen des Lasers ins Material systematische Abweichungen entstehen [Rachakonda et al., 2016; Mechelke et al., 2008]. Materialien mit minimalen Eindringtiefen und somit kleinen systematischen Abweichungen sind beispielsweise Aluminium und Holz [Muralikrishnan et al., 2017; Reshetyuk, 2006].

## 3.2 Registrierung von Punktwolken

Zur vollständigen und detaillierten Aufnahme mittels TLS ist es aufgrund von Abschattungen bei nahezu allen Scanprojekten notwendig, das jeweilige Messobjekt von mehreren Standpunkten aus zu scannen. Die Punktwolken der einzelnen Standpunkte müssen anschließend miteinander registriert werden. Die Aufgabe der Registrierung wird in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Abschnitt 3.2.2 beschreibt verschiedene Ansätze zur Lösung der Registrierung.

### 3.2.1 Herausforderungen der Registrierung

Unmittelbar nach der Datenaufnahme bezieht sich die Punktwolke  $\mathbf{X}$  eines Scannerstandpunktes auf das Bezugssystem des jeweiligen Standpunktes. Geht man zunächst von nur zwei Standpunkten aus, kann das Bezugssystem des ersten Standpunktes als Zielsystem  $\mathcal{T}$  bezeichnet werden und das Bezugssystem des zweiten Standpunktes als Startsystem  $\mathcal{S}$ . Die Transformation einer Punktwolke  $\mathbf{X}$  von  $\mathcal{S}$  zu  $\mathcal{T}$  kann mit Gl. 1.1 beschrieben werden. Mit der Annahme des Maßstabs von  $\mu = 1$  ist die Aufgabe der Registrierung die rotatorischen Parameter  $\alpha, \beta, \gamma$  sowie die drei translatorischen Parameter  $t_x, t_y, t_z$  zu bestimmen. Nach erfolgreicher Registrierung beziehen sich die beiden Punktwolken somit auf das identische Bezugssystem  $\mathcal{T}$ . Diese registrierte Punktwolke hat durch die höhere Punktdichte und geringeren Abschattungen auch eine höhere Vollständigkeit als die einzelnen Punktwolken.

Die hier beschriebene Aufgabe der paarweisen Registrierung lässt sich auf Scanprojekte mit  $N$  Standpunkten übertragen. Durch die Verkettung von  $N - 1$  paarweisen Registrierungen lässt sich auch der  $N$ -te Standpunkt in das Zielbezugssystem  $\mathcal{T}$  transformieren. Können mehrere redundante Registrierungen innerhalb eines Scanprojekts berechnet werden, müssen die Registrierungen untereinander ausgeglichen werden. Dies kann beispielsweise mittels Graph-Optimierung [Theiler et al., 2015] oder anhand eines kleinsten-Quadrate-Ausgleichs [Wujanz et al., 2019] erfolgen. Die Transformation der registrierten Gesamtpunktwolke in ein externes, übergeordnetes Bezugssystem wird als Georeferenzierung bezeichnet. Die Georeferenzierung wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

### 3.2.2 Methoden zur Registrierung

Abhängig von dem jeweiligen Messobjekt, den vorherrschenden Randbedingungen sowie den jeweiligen Anforderungen an die Punktwolke existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Registriermöglichkeiten. Die verschiedenen Ansätze zur Verknüpfung der zahlreichen Scans können in drei Methoden gegliedert werden: hardwarebasierte, softwarebasierte sowie zielzeichenbasierte Registrierungen.

Eine Möglichkeit ist die **hardwarebasierte** Registrierung, bei der zusätzlich am Scanner montierte oder verbaute Sensoren für die Registrierung verwendet werden, wie beispielsweise GNSS-Empfänger [Reshetyuk, 2010; Paffenholz et al., 2010], Smartphones [Chen et al., 2017], Kameras [Ge et al., 2019], Kompass oder Barometer. Aufgrund der relativ großen Unsicherheiten dieser Sensoren werden ihre Messwerte meist nur zur Vor- oder Grobregistrierung verwendet. Grobregistrierung bedeutet, dass die Punktwolken ungefähr vorregistriert werden, um sie dann in einem zweiten Schritt, der sogenannten Feinregistrierung, genauer zu registrieren. Neigungssensoren, welche ebenfalls in Scannern verbaut werden, liefern im Gegensatz zu den vorher genannten Sensoren so genaue Messergebnisse, dass sie als Stehachskompensatoren auch direkt zur partiellen Feinregistrierung verwendet werden können. Mit ihnen lässt sich die Verschwenkung der Horizontalebene der jeweiligen Aufstellung messtechnisch erfassen, rechnerisch korrigieren und so die Anzahl der rotatorischen Parameter von drei auf einen reduzieren [Kuhlmann & Holst, 2017].

Eine Alternative zur Registrierung mittels zusätzlicher Sensorik ist die **softwarebasierte** Registrierung. Bei diesem Ansatz werden die verschiedenen Punktwolken der einzelnen Standpunkte selbst zur Registrierung verwendet. Besl & McKay [1992] entwickelten bereits Anfang der 90er Jahre den Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP), welcher iterativ in den zu registrierenden Scans korrespondierende Punkte sucht und deren Abstände zueinander minimiert. Seitdem sind dessen Weiterentwicklungen, z.B. durch Anpassung der Gewichtung [Zhang et al., 2015; Maier-Hein et al., 2011], Substitution durch Features [Sharp et al., 2002; Bucksch & Khoshelham, 2012] oder weitere Modifikationen [Chetverikov et al., 2002], von wissenschaftlicher Relevanz und bilden eines der Standardverfahren zur Feinregistrierung von Punktwolken.

Neben den verschiedenen ICP-Varianten, welche auf Punktkorrespondenzen basieren, können auch in den Scans korrespondierende Keypoints [Barnea & Filin, 2012; Markiewicz, 2016], Linien [Fangning & Ayman, 2016; Yang et al., 2015], Oberflächen [Previtali et al., 2014; Ge & Wunderlich, 2016; Wujanz et al., 2018b], Zylinder [Moritani et al., 2018] oder andere geometrische Formen zur Registrierung verwendet werden. Außerdem existieren erste Ansätze zur Registrierung basierend auf Deep-Learning-Methoden [Groß et al., 2019; Gojcic et al., 2020].

Eine dritte Registriermethode ist die **zielzeichenbasierte** Registrierung [Becerik-Gerber et al., 2011; Liang et al., 2014]. Hier werden vor der Datenaufnahme in der zu vermessenden Szene Laserscanning-Zielzeichen aufgestellt. Werden die identischen Zielzeichen von mehreren Standpunkten aus gescannt, können ihre Koordinaten als Passpunkte der Registrierung dienen. Sollen alle sechs Registrierparameter (drei Translationen und drei Rotationen) mittels Zielzeichen bestimmt werden, sind mindestens drei Zielzeichen notwendig. Für eine 4-Parameter-Registrierung (drei Translationen, eine Rotationen) reichen mindestens zwei Zielzeichen aus. Zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung werden in der Regel mehr als die mindestens notwendigen Zielzeichen in der Umgebung verteilt. Die Methodik zur Schätzung der Registrierparameter wird im folgenden Abschnitt 3.2.3 näher beschrieben.

Heutige Registrierungen werden meist mit einer Kombination der genannten Methoden gelöst. Beispielsweise werden zwei rotatorische Registrierparameter mittels Kompensator bestimmt und die verbleibenden Parameter über Zielzeichen berechnet oder softwarebasierte Registrierlösungen mittels ICP oder Ebenenkorrespondenzen werden zusätzlich durch zielzeichenbasierte Registrierung gestützt [Wujanz et al., 2019].

### 3.2.3 Parameterschätzung mittels identischer Punkte

Die maßstabsfreie Helmert-Transformation dient als funktionales Modell der Registrierung mittels identischer Punkte. An dieser Stelle ist nicht relevant, ob es sich bei den Punkten um Koordinaten von Zielzeichen (zielzeichenbasierte Registrierung) oder um markante Punkte, welche in den Punktwolken detektiert werden, handelt (keypointbasierte Registrierung). Die folgende Methodik der Parameterschätzung unterscheidet sich nicht.

Der Zusammenhang zwischen den Beobachtungen (Strecke  $r$ , Horizontalrichtung  $\varphi$  und Zenitwinkel  $\theta$ ) der identischen Punkte im Startbezugssystem  $\mathcal{S}$  bzw. Zielbezugssystem  $\mathcal{T}$  und den Parametern der Registrierung ( $\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z$ ) ergibt sich aus der maßstabsfreien Helmert-Transformation (Gl. 1.1) und der Umrechnung von Polar- zu kartesischen Koordinaten (Gl. 3.1) mit

$$\begin{bmatrix} r \sin \varphi \sin \theta \\ r \cos \varphi \sin \theta \\ r \cos \theta \end{bmatrix}^{\mathcal{T}} = \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} r \sin \varphi \sin \theta \\ r \cos \varphi \sin \theta \\ r \cos \theta \end{bmatrix}^{\mathcal{S}} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

wobei sich die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma)$  aus den Rotationsmatrizen der einzelnen Rotationen  $\alpha, \beta, \gamma$  mit  $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\gamma)$  zusammensetzt und deren Einträge fortlaufend mit  $R_{11}$  bis  $R_{33}$  bezeichnet werden:

$$\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \alpha + \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \gamma \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Liegen mehr als die minimale Anzahl an identischen Punkten zur Lösung dieses Gleichungssystems vor, werden die Registrierparameter  $\mathbf{p}$  mithilfe eines kleinste-Quadrate-Ausgleichs im Gauß-Helmert-Modell (dem Allgemeinfeld der Ausgleichsrechnung) gelöst. Hierbei werden die Verbesserungen  $\mathbf{v}$  der Beobachtungen  $\mathbf{l}$  unter der Berücksichtigung der Beobachtungsunsicherheit  $\Sigma_{ll}$  mit der Zielfunktion

$$\mathbf{v}^T \Sigma_{ll}^{-1} \mathbf{v} \rightarrow \min \quad (3.5)$$

minimiert. Für die Registrierung mittels identischer Punkte lassen sich je identischem Punkt in  $\mathcal{S}$  und  $\mathcal{T}$  auf Basis von Gl. 3.2 drei Bedingungsgleichungen  $c_1$  bis  $c_3$  formulieren:

$$c_1 : 0 = R_{11} \cdot (r \sin \varphi \sin \theta)^{\mathcal{S}} + R_{12} \cdot (r \cos \varphi \sin \theta)^{\mathcal{S}} + R_{13} \cdot (r \cos \theta)^{\mathcal{S}} + t_x - (r \sin \varphi \sin \theta)^{\mathcal{T}}, \quad (3.6)$$

$$c_2 : 0 = R_{21} \cdot (r \sin \varphi \sin \theta)^{\mathcal{S}} + R_{22} \cdot (r \cos \varphi \sin \theta)^{\mathcal{S}} + R_{23} \cdot (r \cos \theta)^{\mathcal{S}} + t_y - (r \cos \varphi \sin \theta)^{\mathcal{T}}, \quad (3.7)$$

$$c_3 : 0 = R_{31} \cdot (r \sin \varphi \sin \theta)^{\mathcal{S}} + R_{32} \cdot (r \cos \varphi \sin \theta)^{\mathcal{S}} + R_{33} \cdot (r \cos \theta)^{\mathcal{S}} + t_z - (r \cos \theta)^{\mathcal{T}}. \quad (3.8)$$

Diese nicht linearen Bedingungen  $\mathbf{c}(\mathbf{l}, \mathbf{p}) = 0$  werden mithilfe der Näherungswerte  $\mathbf{l}^0$  und  $\mathbf{p}^0$  sowie der Konfigurationsmatrix

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\mathbf{l}^0, \mathbf{p}^0} \quad (3.9)$$

und der Bedingungsmatrix

$$\mathbf{B} = \left( \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial \mathbf{l}} \right)^\top \Big|_{\mathbf{l}^0, \mathbf{p}^0} \quad (3.10)$$

mit folgender Gleichung approximiert:

$$\mathbf{c}(\mathbf{l}, \mathbf{p}) \approx \mathbf{c}(\mathbf{l}^0, \mathbf{p}^0) + \mathbf{A}\Delta\mathbf{p} + \mathbf{B}^\top\Delta\mathbf{l} = 0. \quad (3.11)$$

Der Widerspruch ergibt sich mit

$$\mathbf{w} = -\mathbf{c}(\mathbf{l}^0, \mathbf{p}^0) + \mathbf{B}^\top\mathbf{v}^0. \quad (3.12)$$

Die ausgeglichenen Registrierparameter, Verbesserungen sowie verbesserten Beobachtungen ergeben sich mit

$$\widehat{\Delta\mathbf{p}} = (\mathbf{A}^\top(\mathbf{B}^\top\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^\top(\mathbf{B}^\top\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{w}, \quad \widehat{\mathbf{p}} = \mathbf{p}^0 + \widehat{\Delta\mathbf{p}}, \quad (3.13)$$

$$\widehat{\mathbf{v}} = \boldsymbol{\Sigma}_{ll}\mathbf{B}(\mathbf{B}^\top\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\mathbf{B})^{-1}(\mathbf{w} - \mathbf{A} * \widehat{\Delta\mathbf{p}}), \quad (3.14)$$

$$\widehat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \widehat{\mathbf{v}}. \quad (3.15)$$

Diese Werte werden anschließend als neue Näherungswerte verwendet und die Berechnungen iterativ wiederholt bis sich in den Parametern keine Änderungen mehr ergeben.

Die Kovarianzmatrix der Parameter  $\boldsymbol{\Sigma}_{pp}$  wird durch Gl. 1.2 beschrieben. Die Kovarianzmatrix der Verbesserungen  $\boldsymbol{\Sigma}_{vv}$  ergibt sich aus

$$\boldsymbol{\Sigma}_{vv} = \boldsymbol{\Sigma}_{ll}\mathbf{B}\mathbf{W}(\mathbf{B}^\top\boldsymbol{\Sigma}_{ll}\mathbf{B} - \mathbf{A}\boldsymbol{\Sigma}_{pp}\mathbf{A}^\top)\mathbf{W}\mathbf{B}^\top\boldsymbol{\Sigma}_{ll}. \quad (3.16)$$

### 3.3 Qualität der Registrierung

Zu den von Wiltschko [2004] entwickelten sieben Qualitätskriterien gehören neben der *Verfügbarkeit*, *Aktualität*, *Vollständigkeit*, *Konsistenz*, *semantischen Genauigkeit* auch die *Korrektheit* und die *metrische Genauigkeit*. Die vorliegende Dissertation bezeichnet, wie bereits auch andere ingenieurgeodätische Veröffentlichungen [Heunecke et al., 2013; Wieser et al., 2016], die Korrektheit als Zuverlässigkeit und die metrische Genauigkeit als Präzision. Sie sind etablierte Qualitätskriterien bei der Bewertung ingenieurgeodätischer Prozesse [Schweitzer & Schwieger, 2014; Heunecke et al., 2013; Niemeier, 2008]. Da es sich bei der Registrierung von Laserscans um einen solchen ingenieurgeodätischen Prozess handelt, werden diese beiden Qualitätsmerkmale in der vorliegenden Dissertation angewendet.

Die Präzision beschreibt die Unsicherheit durch die zufälligen Abweichungen der Registrierung und kann durch die Kovarianzmatrix der Parameter  $\boldsymbol{\Sigma}_{pp}$  (Gl. 1.2) quantifiziert werden. Sie kann zudem systematische Restabweichungen beinhalten, welche nicht durch Mess- oder Auswertestrategien berücksichtigt werden können. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, lassen sich aus der Gleichung für  $\boldsymbol{\Sigma}_{pp}$  zwei Einflussgrößen ableiten, welche die Präzision der Registrierung beeinflussen: Die Unsicherheit der Registrierbeobachtungen  $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$  und die geometrische Konfiguration der Registrierung, repräsentiert durch die Konfigurationsmatrix  $\mathbf{A}$  und die Bedingungsmatrix  $\mathbf{B}$ .

Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen  $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$  beschreibt bei der zielzeichenbasierten Registrierung die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten. Diese Unsicherheiten sind bisher nur wenig bekannt (s. Abschnitt 3.2.2) und hängen, wie in Veröffentlichung A analysiert (s. Abschnitt 5.1), neben dem Scanner, der Atmosphäre

und der Scangeometrie auch vom Design des Zielzeichens sowie von dem Algorithmus zur Bestimmung der Zielzeichenkoordinaten ab. Eine Möglichkeit  $\Sigma_{ll}$  zu bestimmen, ist die Vorwärtsmodellierung aller Abweichungen [Kerekes, 2023]. Hierfür ist umfangreiches Modellwissen zu allen Abweichungsquellen nötig. Existiert dieses nicht oder nur teilweise, kann es zu Abweichungen in der Aufstellung der Kovarianzmatrix der Beobachtungen  $\Sigma_{ll}$  kommen. Um diese Abweichungen zu vermeiden, untersuchen die Veröffentlichungen A – C dieser Dissertation die Beobachtungsunsicherheit empirisch auf Basis von Wiederholungsscans. Hierbei wird zum einen versucht, die Unsicherheit möglichst gut zu quantifizieren. Zum anderen wird durch den relativen Vergleich verschiedener Zielzeichendesigns und Algorithmen die Beobachtungsunsicherheit reduziert.

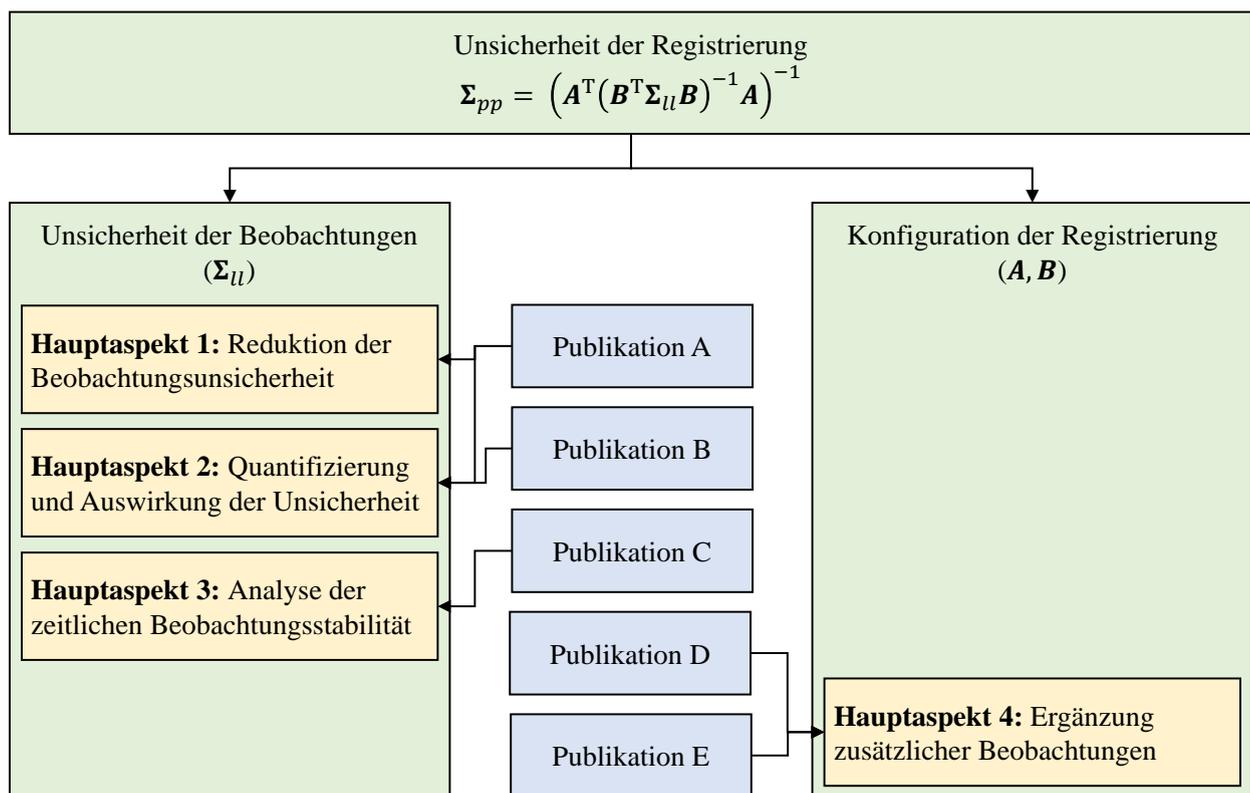
Möglichst korrekte Kenntnisse über die Beobachtungsunsicherheiten  $\Sigma_{ll}$  sind wichtig, um Verzerrungen der Parameterschätzung, abweichende Varianzkomponenten sowie falsche Ausreißeranalysen zu vermeiden. Sie sind ebenfalls essentiell für die Optimierung der geometrischen Netzkonfiguration der Registrierung (**A** und **B**) [Grafarend & Sansò, 1985]. Mithilfe der Netzoptimierung 1. Ordnung wird die geometrische Verteilung der Zielzeichen optimiert; über die Netzoptimierung 3. Ordnung kann die optimale Position zusätzlicher Zielzeichen berechnet werden. Diese Netzoptimierungen nehmen Einfluss auf die Konfiguration der Registrierung und reduzieren so die Unsicherheit der Registrierung [Yang et al., 2018; Fan et al., 2015; Yang et al., 2020].

Die Zuverlässigkeit eines Prozesses beschreibt, wie gut ein Prozess kontrolliert ist [Wiltschko, 2004; Wieser et al., 2016]. Für die zielzeichenbasierte Registrierung bedeutet dies, wie gut Ausreißer in den Beobachtungen detektiert werden können. Maße, welche die Zuverlässigkeit beschreiben und in den Veröffentlichungen dieser Dissertation untersucht werden, sind beispielsweise die Bedingungsichte, Redundanzanteile und minimale aufdeckbare grobe Fehler. Zwar ist das primäre Ziel dieser Arbeit die Reduktion der Beobachtungsunsicherheit, jedoch wird in den Veröffentlichungen D und E auch untersucht, inwieweit die Zuverlässigkeit durch die Ergänzung zusätzlicher Beobachtungen gesteigert werden kann.



## 4. Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen

In diesem Kapitel werden die Veröffentlichungen kurz zusammengefasst, welche die Grundlage für die vorliegende kumulative Dissertation bilden. Aus Abb. 4.1 ist ersichtlich, dass die fünf relevanten Publikationen zwei Forschungsschwerpunkten zuzuordnen sind: Zum einen beschäftigen sich die Veröffentlichungen A, B und C mit der Unsicherheit der Beobachtungen von Registrierungen. Zum anderen widmen sich die Publikation D und E der Ergänzung der Registrierung mit zusätzlichen Beobachtungen. Die Hauptaspekte der relevanten Veröffentlichungen werden in Kapitel 5 gesondert herausgestellt.



**Abbildung 4.1:** Zuordnung der relevanten Veröffentlichungen zu den Hauptaspekten dieser Dissertation und Verdeutlichung ihrer inhaltlichen Bedeutung

### 4.1 Unsicherheit der Beobachtungen zur Registrierung (Publikationen A – C)

Die Veröffentlichungen A – C beschäftigen sich alle auf unterschiedliche Weise mit der Unsicherheit der Beobachtungen der Registrierung. Ziel der drei Publikationen ist es, die Qualität der Registrierung zu verbessern, indem die Beobachtungsunsicherheiten reduziert (Veröffentlichung A), quantifiziert (Veröffentlichungen B, C) und deren Auswirkungen untersucht (Veröffentlichungen B, C) werden.

## Publikation A (peer-reviewed)

- Janßen, J., Medić, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2019b). Decreasing the uncertainty of the target center estimation at terrestrial laser scanning by choosing the best algorithm and by improving the target design. *Remote Sensing*, 11(7), 845. doi.org/10.3390/rs11070845

Die vorliegende Publikation befasst sich mit den Unsicherheiten bei der Koordinatenbestimmung von Zielzeichen, mit dem Ziel diese Unsicherheiten zu analysieren, zu reduzieren und somit die Registrierung von Scans zu verbessern. Die Veröffentlichung fokussiert sich zum einen auf einen Vergleich verschiedener Methoden zur Schätzung der Zielzeichenmittelpunkte und zum anderen auf die Analyse verschiedener Zielzeichendesigns.

Zunächst werden die fünf Einflussfaktoren auf die Unsicherheit der Zielzeichenbestimmung beschrieben. Den allgemeinen Unsicherheitsquellen (Laserscanner, Atmosphäre, Konfiguration und Objekt, s. Abschnitt 3.1.2) wird der Algorithmus zur Zielzeichenbestimmung als weiterer Unsicherheitsfaktor hinzugefügt. Nachdem die Einflüsse des Scanners, der Atmosphäre und der Konfiguration in der vorliegenden Publikation begründet nicht weiter untersucht werden, ergeben sich zwei Erkenntnisse zur Reduktion der Unsicherheit:

1. Die Wahl des Algorithmus, welcher zur Bestimmung des Zielzeichenmittelpunktes verwendet wird, hat einen signifikanten Einfluss auf die Unsicherheit der geschätzten Koordinaten. Gegenüber kommerzieller Software und anderen methodischen Ansätzen zeigt sich deutlich, dass die Bestimmung basierend auf Kreuzkorrelationen die präzisesten Koordinaten für die Zielzeichenmittelpunkte liefert (s. Abschnitt 5.1.1). Aus diesem Grund wird der in der Veröffentlichung beschriebene Kreuzkorrelationsalgorithmus für jede Koordinatenbestimmung von Zielzeichen in der vorliegenden Dissertation verwendet.
2. Die Untersuchungen verschiedener bereits existierender Zielzeichen offenbaren nur kleine Unterschiede in der Unsicherheit der geschätzten Koordinaten (s. Abschnitt 5.1.2). Unter Berücksichtigung verschiedener Materialien, Oberflächen, Reflektivitäten und Muster wird das BOTAS (BOnn TARget mit 8-fach Teilung) vorgestellt, durch dessen Verwendung die Unsicherheit der Koordinatenbestimmung verringert wird (s. Abschnitt 5.1.3). Wichtige Eigenschaften dieses neuen Zielzeichens sind (1) die diffuse Oberfläche, (2) die (im Vergleich zu den meisten kommerziellen Zielzeichen) großen Maße von  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ , wodurch die Unsicherheit in Distanzrichtung reduziert wird, sowie (3) die 8-fach Teilung, durch welche die Präzision in Winkelrichtung verbessert wird. Das in dieser Publikation entwickelte BOTAS wird auch in den Veröffentlichungen C und D verwendet.

Durch die Verwendung des Algorithmus basierend auf Kreuzkorrelationen und des neu vorgestellten Zielzeichens BOTAS werden empirische Standardabweichungen der Zielzeichenkoordinaten im unteren Submillimeterbereich für Messdistanzen bis  $20\text{ m}$  sowie von wenigen Millimetern für Distanzen bis  $100\text{ m}$  erreicht. Auf diese Weise werden die Beobachtungsunsicherheiten gegenüber der Verwendung anderer Algorithmen und Zielzeichendesigns erfolgreich reduziert.

## Publikation B (peer-reviewed)

- Medić, T., Holst, C., Janßen, J., & Kuhlmann, H. (2019a). Empirical stochastic model of detected target centroids: Influence on registration and calibration of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 13(3), 179–197. doi.org/10.1515/jag-2018-0032

Die Veröffentlichung B beschäftigt sich mit verschiedenen Möglichkeiten der stochastischen Modellierung der Koordinatenbestimmung von Zielzeichen und deren Auswirkungen auf die Registrierung anhand eines realen Beispiels. Zur Bestimmung der Registrierung mittels eines kleinste-Quadrate-Ausgleichs (s. Abschnitt 3.2.2), muss die Registrierung sowohl deterministisch als auch stochastisch modelliert werden. Mit dem stochastischen Modell wird die Unsicherheit der Beobachtungen beschrieben, im Fall der zielzeichenbasierten Registrierung entspricht dies der Unsicherheit der Zielzeichenmittelpunkte.

Die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten wird von den Scannerherstellern nur sehr vereinfacht beschrieben, beispielsweise mit einem pauschalen Wert von 2 mm für Abstände bis 50 m. Eine Unterscheidung von Winkel- und Streckengenauigkeit findet nur für die Beschreibung der Einzelpunktgenauigkeit statt. Zielzeichenmittelpunkte werden jedoch aus mehreren einzelnen Scanpunkten abgeleitet, weshalb diese Werte als zu pessimistisch angenommen werden müssen.

In der vorliegenden Veröffentlichung wird, analog zur vorherigen Veröffentlichung A, basierend auf Wiederholungsscans die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten untersucht. Aus den Ergebnissen der Wiederholungen werden Standardabweichungen der Koordinaten für verschiedene Scanabstände und Einfallswinkel berechnet, welche im Anschluss in Form von Tabellen als empirisches stochastisches Modell (ESM) dienen. Die Analyse des stochastischen Modells sowie dessen Anwendung in der Kalibrierung und Registrierung führt zu folgenden Erkenntnissen:

1. Die von den Herstellern angegebenen Unsicherheiten der Zielzeichenkoordinaten sind stark vereinfacht. Die Beschreibung mit einer pauschalen Standardabweichung ist unzureichend. Die Werte eines Einzelpunktes sind zu pessimistisch gegenüber den empirisch ermittelten Werten. Eine Unterscheidung zwischen Distanz- und Winkelgenauigkeit erscheint auf Basis der empirischen Daten sinnvoll (s. Abschnitt 5.2.1).
2. Die Verwendung eines vereinfachten stochastischen Modells kann zu einer Verzerrung der Parameter führen. Für die beispielhafte Registrierung ergeben sich Abweichungen von bis zu 13 mm in den translatorischen und bis zu 18'' in den rotatorischen Parametern. Zudem führen die unzureichenden stochastischen Modelle zu falschen Rückschlüssen in der Netzplanung, -optimierung und -analyse (s. Abschnitt 5.2.2).
3. Abhilfe von den zuvor festgestellten Problemen kann die Verwendung eines ESM schaffen. Dieses kann, wie in der Veröffentlichung gezeigt, durch einfache Versuche für jede Kombination von Scanner und Zielzeichen sowie verschiedene Konfigurationen aufgestellt werden (s. Abschnitt 5.2.2).
4. Verwendet man als stochastisches Modell die Herstellergenauigkeitsangaben eines Einzelpunktes und verbessert dieses Modell durch eine Varianzkomponentenanpassung während der Registrierenausgleichung, so führt dies in den Untersuchungen der Veröffentlichung B zu ähnlichen Registrierparametern wie bei Verwendung des ESM. Allerdings ist zu beachten, dass die Varianzkomponenten bei der Verwendung von wenigen Zielzeichen nur unzuverlässig bestimmt werden können (s. Abschnitt 5.2.2).

Neben der Auswirkung des stochastischen Modells auf die Registrierung wird auch der Einfluss auf die Kalibrierung terrestrischer Laserscans in der Veröffentlichung B untersucht, dieser Teil hat für die vorliegende Dissertation jedoch keine Relevanz. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Wahl des stochastischen Modells werden auch in den folgenden Veröffentlichungen C, D und E angewendet.

## Publikation C (peer-reviewed)

- Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2021). Assessing the temporal stability of terrestrial laser scanners during long-term measurements. In A. Kopáčík, P. Kyrinovič, J. Erdélyi, R. Paar, & A. Marendić (Hrsg.), *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying* (S. 69–84). Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-51953-7\_6

In den beiden vorherigen Publikationen A und B werden die Koordinaten der Zielzeichen sowie deren Unsicherheit als zeitlich konstant angenommen. Die Komponente Zeit wurde bisher vollständig vernachlässigt. Im Zuge der Versuchsdurchführungen für die vorherigen Veröffentlichungen A und B zeigte sich jedoch, dass besonders zu Beginn von Wiederholungsmessungen systematische Koordinatenänderungen auftreten. Um diese bisher unberücksichtigten Trends zu quantifizieren und Rückschlüsse für die Registrierung ziehen zu können, analysiert dieser Beitrag die zeitliche Stabilität von Zielzeichenkoordinaten.

In dieser Publikation werden in mehreren Versuchsreihen über Zeiträume von 5 bzw. 59 Stunden immer wieder dieselben Zielzeichen in gleicher Anordnung gescannt. Anschließend werden die Zielzeichenkoordinaten für alle Wiederholungsscans bestimmt und die Koordinatenänderungen in Abhängigkeit zur Zeit gesetzt. Mögliche Einflussfaktoren und Ursachen werden diskutiert, abschließend werden die Auswirkungen auf die Registrierung besprochen (s. Abschnitt 5.3). Aus der Publikation werden folgende Erkenntnisse gewonnen:

1. Aus den Versuchen über einen Zeitraum von 5 Stunden ist deutlich erkennbar, dass der verwendete Scanner einer Aufwärmphase unterliegt, die sich auch auf die Koordinaten der Zielzeichen signifikant auswirkt. Besonders der Vertikalwinkel und die Distanzmessung sind von dieser Aufwärmphase beeinflusst, welche zwischen 25 und 70 Minuten dauert. Es wird begründet angenommen, dass diese Koordinatenänderungen durch sich ändernde Höhenindexabweichungen und Nullpunktabweichungen verursacht werden, welche wiederum von der Temperaturänderung hervorgerufen werden.
2. Basierend auf den Versuchsreihen mit einer Länge von 59 Stunden ist die zeitliche Stabilität nach abgeschlossener Aufwärmphase des Scanners sehr viel höher. Zwar sind in dem Beitrag Zusammenhänge zwischen der zeitlichen Änderung der Umgebungstemperatur und der Änderung der Zielzeichenkoordinaten erkennbar, diese sind jedoch in ihrer Größenordnung deutlich kleiner als die Auswirkungen der Aufwärmphase.
3. Die Koordinatenänderungen wirken ebenfalls auf die zielzeichenbasierte Registrierung. Im Fall von Wiederholungsscans von einem Standpunkt aus kann die wiederholte Registrierung von Scans die beobachteten Koordinatenänderungen zu Teilen kompensieren. Bei unterschiedlichen Instrumentenstandpunkten werden die Zielzeichen möglicherweise in verschiedenen Messlagen gescannt, wodurch die Registrierung und somit auch die finale Punktwolke negativ beeinflusst werden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird für diese Dissertation die Schlussfolgerung gezogen, für Registrierungen mit hohen Genauigkeitsansprüchen nur Scans zu verwenden, die nach Abschluss der Aufwärmphase des Scanners aufgenommen wurden. Dies wurde in den folgenden Publikationen D und E berücksichtigt.

## 4.2 Ergänzung zusätzlicher Beobachtungen (Publikationen D und E)

Während sich die Veröffentlichungen A – C mit den Beobachtungsunsicherheiten der zielzeichenbasierten Registrierung beschäftigt haben, liegt der Fokus der Publikationen D und E auf der Integration neuer Beobachtungen in die Registrierung.

### Publikation D (peer-reviewed)

- Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2022). Target-based terrestrial laser scan registration extended by target orientation. *Journal of Applied Geodesy*, 16(2), 91–106. doi.org/10.1515/jag-2020-0030

Bei der zielzeichenbasierten Registrierung werden bei der Verwendung von ebenen Zielzeichen die Ebenenparameter dieser mitgeschätzt. In dem bisherigen Modell der zielzeichenbasierten Registrierung werden jedoch allein die Mittelpunktkoordinaten der Zielzeichen berücksichtigt. Wird die Orientierung der Ebenen zwischen zwei Standpunkten nicht verändert, lässt sich diese als zusätzliche Bedingung in die Registrierung integrieren. Die methodische Umsetzung dessen ist in der vorliegenden Veröffentlichung D erarbeitet. Zudem wird in diesem Beitrag analysiert, inwieweit die Einbeziehung der Ebenenorientierung einen Vorteil für die Qualität der Registrierung bietet.

Um die Orientierung der Zielzeichenebenen in die Registrierung zu integrieren, müssen sowohl die Identitätsbedingungen der Ebenenorientierung formuliert als auch das stochastische Modell um die Unsicherheiten der Ebenenorientierung erweitert werden. Für jedes Zielzeichen, welches von zwei Standpunkten aus gescannt wird, können neben den drei bisherigen Koordinatenbedingungen zwei weitere Bedingungen für die horizontale bzw. vertikale Orientierung der Ebene aufgestellt werden (s. Abschnitt 5.4.1). Auf Basis von Simulationen und realen Scanprojekten ergeben sich drei Haupterkennnisse (s. Abschnitt 5.4.2):

1. Der Nutzen der zusätzlichen Beobachtungen für die Präzision der Registrierung hängt hauptsächlich von der geometrischen Netzkonfiguration ab. Bei der in Veröffentlichung D präsentierten ungünstigen Netzkonfiguration werden einzelne Parameter um 90% präziser geschätzt, bei gleichmäßig verteilten Zielzeichen beträgt die Steigerung bis zu 14%. Der prozentuale Präzisionsgewinn ist kaum von der Anzahl der Zielzeichen abhängig. Die Verbesserungen durch die Ebenenorientierungen sind anhand von realen Beispielen auch mittels Punktwolkenvergleichen bestätigt.
2. Bei der Analyse der Zuverlässigkeit wird festgestellt, dass insbesondere im geodätischen Netz innen liegende Beobachtungen der Registrierungen durch die Erweiterung besser kontrolliert werden. Je weniger Zielzeichen für die Registrierung zur Verfügung stehen, desto größer ist der Gewinn für die Zuverlässigkeit der Registrierung. In einem Beispiel der Veröffentlichung D wird der Redundanzanteil durch die zusätzliche Ebenenorientierung von  $r = 0.20$  auf  $r = 0.49$  gesteigert.
3. Bis zu einem Einfallswinkel von  $60^\circ$  überwiegt der Nutzen durch die zusätzlichen Beobachtungen den Genauigkeitsverlust durch den großen Einfallswinkel. Dies bedeutet, dass bis zu diesem Einfallswinkel ein Ausrichten der Zielzeichen während der Umstationierung nicht ratsam ist, da die Integration der Ebenenorientierungen als zusätzliche Beobachtungen in die Registrierung zu präziseren Ergebnissen führt.

Die Erweiterung erfordert keinen zusätzlichen Aufwand im Scanprozess und verbessert die Qualität (Genauigkeit und Zuverlässigkeit) der Registrierung in allen betrachteten Szenarien. Je schlechter jedoch die geometrische Netzkonfiguration ist, desto wichtiger wird die Erweiterung der Registrierung um die Ebenenorientierungen und desto deutlicher werden ihre Vorteile.

## Publikation E (peer-reviewed)

- Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2024). Keypoint-based registration of TLS point clouds using a statistical matching approach. *Journal of Applied Geodesy*, 18(2), 267–284. doi.org/10.1515/jag-2022-0058

Die bisherigen Veröffentlichungen konzentrierten sich ausschließlich auf die zielzeichenbasierte Registrierung. Ein Hauptnachteil gegenüber den meisten Alternativen (z.B. der Registrierung mittels Ebenen [Wujanz et al., 2018b]) ist, dass nur wenige Beobachtungen zur Registrierung beitragen. Um zusätzliche Variablen, beispielsweise Varianzkomponenten (s. Publikation B) oder zeitlich-variable Kalibrierparameter (s. Publikation C) zuverlässig mit schätzen zu können, sind mehr als die üblicherweise verwendete Menge an Zielzeichen nötig. Die vorliegende Veröffentlichung E untersucht, wie sich markante Punkte in der Scanumgebung mit in die Registrierung integrieren lassen, ohne die Vorteile der zielzeichenbasierten Registrierung (d.h. relativ große Abstände zwischen den Instrumentenstandpunkten, Möglichkeit der Analyse von Zuverlässigkeit und Genauigkeit usw.) einzubüßen.

Die in der vorliegenden Veröffentlichung E vorgestellte Methode erkennt Keypoints in 2D-Panoramabildern und berechnet deren Koordinaten mithilfe des Distanzbildes im 3D-Raum. Anschließend wird ein neuer statistischer Matching-Ansatz beschrieben, um Punkte zu identifizieren, die aufgrund ihrer stochastischen Informationen als identisch angesehen werden. Dieser Ansatz umgeht die Verwendung von Keypoint-Deskriptoren für das Matching und kann daher auch mit größeren Entfernungen zwischen den verschiedenen Scannerstandpunkten umgehen. Für diesen Matching-Ansatz sind sehr gute Startwerte für die Registrierung notwendig, welche z.B. über Zielzeichen erreicht werden können. Die mit dem neuen statistischen Matching-Ansatz als identisch identifizierten Punkte werden dann für die Registrierung verwendet. (s. Abschnitt 5.4.1)

Der vorgestellte Registrierungsansatz basiert, wie die zielzeichenbasierte Registrierung, auf Punktidentitäten zwischen den verschiedenen Instrumentenstandpunkten. Er berücksichtigt jedoch wesentlich mehr Beobachtungen. Obwohl die Standardabweichung der einzelnen Beobachtungen etwa achtmal größer ist als bei der zielzeichenbasierten Registrierung, wird dieser Genauigkeitsverlust durch die größere Beobachtungsanzahl bei weitem kompensiert. Die Standardabweichungen der Registrierung sind gleich oder sogar besser als bei der reinen zielzeichenbasierten Registrierung. Betrachtet man die Verkettung mehrerer paarweiser Registrierungen, so zeigt die Varianzfortpflanzung, dass die keypointbasierte Registrierung zu einem Präzisionsgewinn von etwa 25% führt. Zusätzlich wird die Zuverlässigkeit der Registrierung durch die größere Redundanz deutlich erhöht. Wie in diesem Beitrag gezeigt, ist es bei der keypointbasierten Registrierung zudem möglich, die Varianzkomponenten allein auf Basis einer paarweisen Registrierung zu schätzen. (s. Abschnitt 5.4.2)

Die vorliegende Veröffentlichung E zeigt somit erstmals, dass eine Registrierung mittels markanter Punkte mit gleicher oder sogar besserer Genauigkeit möglich ist als bei der zielzeichenbasierten Registrierung, ohne dass dem Aufnahmeprozess weitere Restriktionen hinzuzufügen sind, wie beispielsweise kleinere Abstände der Scannerstandpunkte.

# 5. Herausstellung der wichtigsten Aspekte

Das vorherige Kapitel 4 hat die Veröffentlichungen A – E zusammengefasst. Die inhaltlich wichtigsten Aspekte der Publikationen werden in den folgenden Abschnitten herausgestellt. Die Hauptaspekte 1 – 3 (s. Abschnitte 5.1 – 5.3) beschäftigen sich mit der Reduktion, Quantifizierung sowie Auswirkung der Beobachtungsunsicherheit. Der Hauptaspekt 4 (s. Abschnitt 5.4) führt zusätzliche Beobachtungen in die zielzeichenbasierte Registrierung ein, wodurch auch die geometrische Konfiguration der Registrierung beeinflusst wird. Alle vier Hauptaspekte tragen somit entweder über die Beobachtungsunsicherheit oder über die Konfiguration zur Reduktion der Unsicherheiten der Registrierung bei.

## 5.1 Hauptaspekt 1: Reduktion der Beobachtungsunsicherheit

Bei der zielzeichenbasierten Registrierung bilden die Koordinaten der Zielzeichenmittelpunkte die Beobachtungen der Registrierung. Um die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten reduzieren zu können, müssen die bekannten Einflussfaktoren der Koordinatenbestimmung analysiert werden. Aus Veröffentlichung A ist bekannt, dass die folgenden fünf Einflussfaktoren die Unsicherheitsquellen für die Bestimmung der Zielzeichenkoordinaten sind: Laserscanner, Schangeometrie, Atmosphäre, Zielzeichendesign und Algorithmus.

Die Abweichungen des **Laserscanners** können entweder systematische oder zufällige Abweichungen sein. Zufällige Abweichungen werden durch das stochastische Modell der Beobachtungen  $\Sigma_{ll}$  berücksichtigt. Den systematischen Abweichungen wird durch eine adäquate Instrumentenkalibrierung entgegengewirkt. Restabweichungen, die durch thermische Aufwärmeeffekte entstehen und zu Abweichungen in den Beobachtungen führen, werden in der Veröffentlichung C und in Abschnitt 5.3 detailliert diskutiert.

Der Einfluss der **Schangeometrie** auf die Unsicherheit der geschätzten Zielzeichenkoordinaten wird anhand empirischer Versuchsreihen mit verschiedenen Scandistanzen und Einfallswinkeln im Rahmen der Veröffentlichungen A und B untersucht und quantifiziert (s. Abschnitt 5.2). Auf Basis der Erkenntnisse dieser Untersuchungen wurde bei allen weiteren Messungen, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt wurden, darauf geachtet eine Schangeometrie zu wählen, die zu möglichst kleinen Abweichungen führt.

Der Unsicherheitsfaktor **Atmosphäre** ist im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigbar. Aufgrund der kurzen Scandistanzen von üblicherweise wenigen hundert Metern und der ausreichend guten Korrekturmodelle für Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit, ist der Einfluss auf das TLS und auf die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten von geringer Bedeutung. Refraktive Abweichungen durch die Krümmung des Laserstrahls liegen für die hier behandelten Distanzen im Submillimeterbereich [Friedli et al., 2019]. Aufgrund des stark zeitvarianten Refraktionskoeffizienten lassen sich diese jedoch nicht zuverlässig modellieren [Kahmen, 2005] und werden im folgenden den zufälligen Abweichungen zugeordnet.

Die Einflüsse von Algorithmus und Zielzeichendesign sind in Veröffentlichung A ausführlich untersucht und werden in den beiden folgenden Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 detailliert diskutiert.

### 5.1.1 Algorithmus zur Schätzung der Zielzeichenkoordinate

Die Veröffentlichung A trägt unter anderem erstmals bereits veröffentlichte Ansätze und Algorithmen zur Schätzung von Zielzeichenkoordinaten zusammen, kategorisiert diese und vergleicht ihre Unsicherheiten. Alle

**Tabelle 5.1:** Literaturübersicht und methodische Kategorisierung von Algorithmen zur Schätzung von Zielzeichenkoordinaten.

Kategorie	Methodik	Publikation
A	Schwerpunktbildung	Lichti et al. [2000] Gordon et al. [2001] Valanis & Tsakiri [2004]
B.1	Kantenextraktion	Eling [2009] Chow et al. [2010] Chow et al. [2011]
B.2		Mittlere Intensitäten Ge & Wunderlich [2015] Rachakonda et al. [2017b]
C.1	Kreuzkorrelationen	Abmayr et al. [2008] Liang et al. [2014] Yi et al. [2018]
C.2		mit Template Omidalizarandi et al. [2018] Kregar et al. [2013]

behandelten Verfahren eint, dass sie zur Bestimmung der Koordinate der ebenen Zielzeichen die Intensitäten des reflektierten Lasersignals nutzen. Algorithmen zur Koordinatenschätzung von kugelförmigen Zielzeichen werden aufgrund möglicher systematischer Abweichungen durch Quetsch- und Aufweitungseffekte (s. Abschnitt 5.1.2) nicht untersucht.

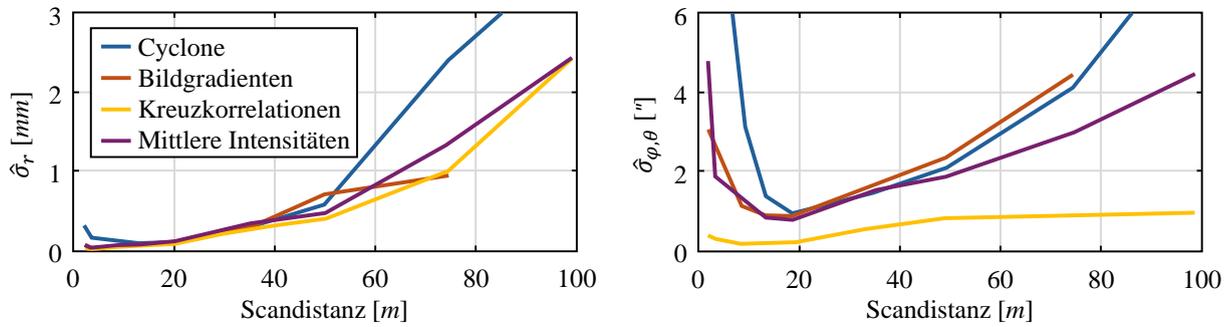
Die aus der Literatur hervorgehenden Verfahren lassen sich methodisch in drei Kategorien gliedern (s. Tab. 5.1). Die Algorithmen der Kategorie A, welche Anfang der 2000er Jahre entwickelt wurden, basieren im Wesentlichen auf Schwerpunktbildungen der Laserscandaten. Aufgrund ihrer hohen Unsicherheiten von mehreren Millimetern bis Zentimetern [Lichti et al., 2000; Valanis & Tsakiri, 2004], werden sie als nicht mehr relevant erachtet. Daher berücksichtigen die Untersuchungen der Veröffentlichung A ausschließlich Algorithmen der Kategorien B und C.

**Kategorie B:** Algorithmen dieser Kategorie nutzen die Schwarz-Weiß-Übergänge der Zielzeichen. Sie extrahieren die Kanten mithilfe von abgeleiteten Gradientenbildern oder auf Basis von Punkten mit mittelstarken Intensitäten, welche stärker als die schwarzen Teilflächen und weniger als die weißen Teilflächen reflektieren.

**Kategorie C:** Diese Algorithmen basieren auf der Berechnung von Bildkorrelationen. Für die Koordinatenschätzung nutzen sie entweder die Symmetrie der Zielzeichen oder Korrelationsberechnungen mit einem Template.

Mit dem in der Publikation A beschriebenen Versuchsaufbau werden unterschiedliche Zielzeichen bei verschiedenen Einfallswinkeln und Distanzen wiederholt gescannt. Anschließend werden die Koordinaten der Zielzeichenmittelpunkte sowohl mit drei methodisch verschiedenen Algorithmen als auch mit der kommerziell erhältlichen Software CYCLONE der Fa. LEICA GEOSYSTEMS geschätzt. Aus den wiederholten Schätzungen der Zielzeichenkoordinaten werden für jeden Algorithmus Standardabweichungen in Abhängigkeit der Scandistanz berechnet und verglichen (s. Abb. 5.1).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Präzision der Koordinatenschätzungen unabhängig vom verwendeten Algorithmus deutlich kleiner ist als vom Hersteller spezifiziert [Leica Geosystems, 2013]. Im Nahbereich bis 20 m Scandistanz liegen die Standardabweichungen im Submillimeterbereich, für Scandistanzen bis 100 m im unteren Millimeterbereich. Eine ausführliche Quantifizierung der Unsicherheit erfolgt in Abschnitt 5.2.1. Für die Standardabweichungen in Streckenrichtung sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Methoden zur Koordinatenschätzung feststellbar. Dies ist damit zu begründen,



**Abbildung 5.1:** Empirische Standardabweichungen in Strecken- (links) und Winkelrichtung (rechts) für verschiedene Algorithmen in Abhängigkeit der Scandistanz.

dass alle untersuchten Algorithmen eine Ebene durch den Scan des Zielzeichens schätzen und diese Zielzelebene maßgeblich für die Festlegung der Koordinate in Streckenrichtung ist. Die Standardabweichungen in Winkelrichtung unterscheiden sich hingegen deutlich. Hier erweist sich der Algorithmus basierend auf Kreuzkorrelationen als am präzisesten. Seine Standardabweichung liegt im Nahbereich deutlich unter  $1''$  und steigt bis  $100\text{ m}$  auf nur knapp über  $1''$  an. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde der Kreuzkorrelationsalgorithmus mit einem Template für alle Koordinatenbestimmungen verwendet, die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt wurden.

### 5.1.2 Zielzeichendesign

Wie in Veröffentlichung A gezeigt, hat das Zielzeichendesign Einfluss auf die Präzision der abgeleiteten Zielzeichenkoordinaten. Daher wurden fünf ebene, kommerziell erhältliche Zielzeichen ( $T1$  bis  $T5$ ) mit unterschiedlichen Designs sowie ein neu entwickeltes Zielzeichen ( $T6$ , s. Abschnitt 5.1.3) empirisch anhand von Wiederholungsscans im Hinblick auf ihre Unsicherheiten untersucht. Die Designparameter der Zielzeichen  $T1$  bis  $T6$  sind in Tab. 5.2 zusammengefasst und Abb. 5.2 zeigt sie im Versuchsaufbau der Veröffentlichung A.

**Tabelle 5.2:** Designparameter der fünf getesteten Zielzeichen ( $T1 - T5$ ) und des neu entwickelten Zielzeichens ( $T6$ ).

Nr.	Hersteller	Geometrie	Material	Oberfläche	Farbe	Reflektivität
$T1$	selbst gedruckt	rund $\varnothing 20\text{ cm}$	Papier (fixiert auf Holz)	rau	schwarz/weiß	diffus
$T2$	Druckhaus Schwerte	eckig $40 \times 40\text{ cm}$	Aluminium- Verbundstoff	medium	schwarz/weiß	medium
$T3$	Leica Geo- systems	rund $\varnothing 15\text{ cm}$	Metall	rau	grau/weiß	diffus
$T4$	Laserscanning Europe	eckig $20 \times 20\text{ cm}$	Aluminium- Verbundstoff	medium	grau/weiß	medium
$T5$	Leibniz Universität Hannover	eckig $15 \times 15\text{ cm}$	Aluminium- Verbundstoff	glatt	schwarz/weiß	glänzend
$T6$	Universität Bonn	eckig $30 \times 30\text{ cm}$	Aluminium- Verbundstoff	rau	schwarz/weiß	diffus

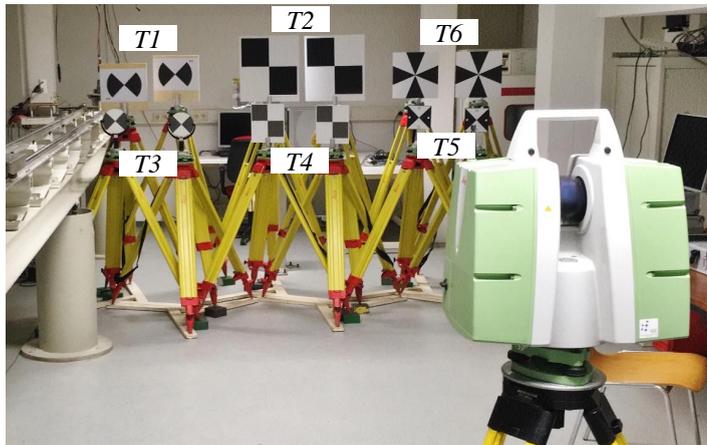


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau zur empirischen Untersuchung der Zielzeichen  $T1$  bis  $T6$ .

Bei der Verwendung von kugelförmigen Zielzeichen können systematische Abweichungen aufgrund der einseitigen Abtastung des Zielzeichens auftreten [Rachakonda et al., 2017b]. Diese systematischen Abweichungen werden als Quetsch- und Aufweitungseffekte bezeichnet. Um diese Abweichungen zu verhindern, werden in der vorliegenden Dissertation ausschließlich ebene Zielzeichen genutzt.

Aus den Wiederholungsscans der verschiedenen Zielzeichendesigns werden, analog zur Untersuchung der Algorithmen, Standardabweichungen für jedes Design in Abhängigkeit der Scandistanz berechnet (s. Abb. 5.3). Die Erkenntnisse zu Zielzeichen  $T6$  werden im folgenden Abschnitt 5.1.3 diskutiert.

Aus den Standardabweichungen der verschiedenen Zielzeichen geht hervor, dass die unterschiedlichen Designs nur zu kleinen Unterschieden in der Unsicherheit der Koordinaten führen. Alle Designs haben Standardabweichungen von unter  $0.2 \text{ mm}$  im Bereich bis  $20 \text{ m}$ , welche bei Scandistanzen bis  $100 \text{ m}$  auf wenige Millimeter anwachsen. Die Standardabweichungen in Streckenrichtung  $\hat{\sigma}_r$  der Zielzeichen  $T2$  (größtes Zielzeichen),  $T3$  und  $T5$  (kleinste Zielzeichen) legen nahe, dass die Präzision bei Distanzen ab  $50 \text{ m}$  von der Größe des Zielzeichens abhängt (s. Abb. 5.3, links): kleine Zielzeichen führen zu großen Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_r$  und große Zielzeichen zu kleinen Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_r$ . Dies liegt daran, dass die Ebene, welche maßgeblich für die Größe der Standardabweichung  $\hat{\sigma}_r$  ist, präziser bestimmt wird, je mehr Scanpunkte auf der Zielzeichenebene liegen.

In Winkelrichtung ist die Präzision der Koordinaten für die verschiedenen Zielzeichen noch kleiner. Auf Basis der vorliegenden Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_{\varphi,\theta}$  ist anzunehmen, dass eine horizontale und vertikale Aus-

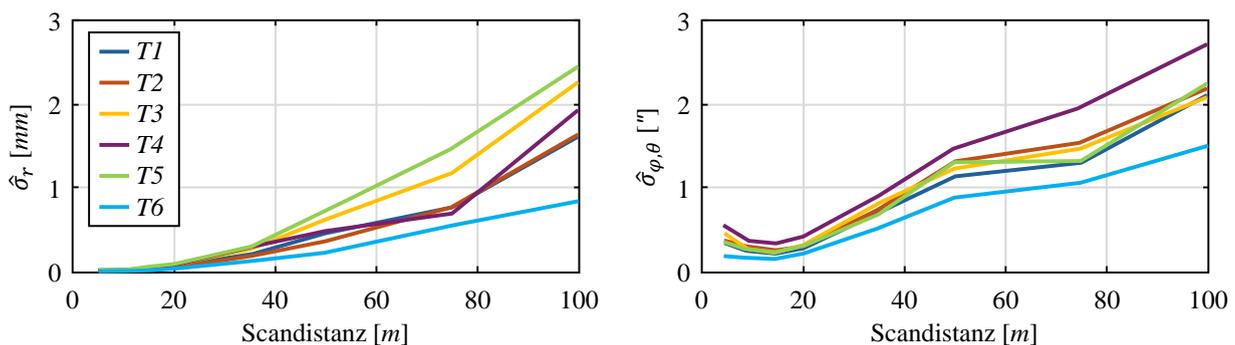


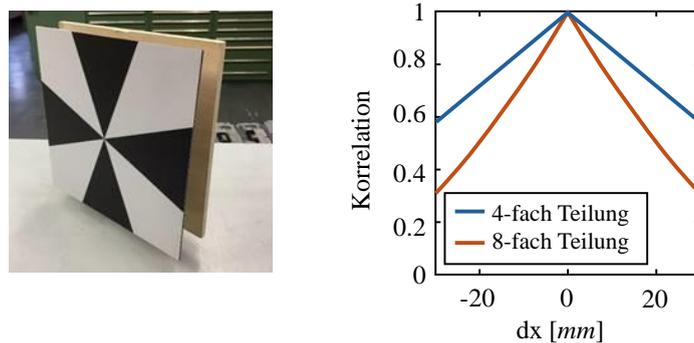
Abbildung 5.3: Empirische Standardabweichungen in Strecken- (links) und Winkelrichtung (rechts) für verschiedene Zielzeichen in Abhängigkeit der Scandistanz bei Einfallswinkeln von  $15^\circ$  bis  $60^\circ$ .

richtung des Schachbrettmusters wie bei dem Zielzeichen  $T4$  zu leicht unsichereren Koordinaten führt (s. Abb. 5.3, rechts). Es wird vermutet, dass dies mit der ebenfalls horizontalen/vertikalen Ausrichtung des Abtastungsmusters des Scanners zusammenhängt, wodurch ein größerer Unsicherheitsbereich der Schwarz-Weiß-Übergänge entsteht. Ein schräges Schachbrettmuster, wie bei den Zielzeichen  $T1$ ,  $T3$  und  $T5$ , reduziert diesen Unsicherheitsbereich.

### 5.1.3 Entwicklung des BOTAS

Basierend auf den Analyseergebnissen der bestehenden Zielzeichen wird ein neues Zielzeichen konzeptioniert, welches zu Koordinaten mit möglichst geringer Unsicherheit führen soll. Der Designparameter Geometrie wird auf ein Quadrat mit einer Größe von  $30 \times 30 \text{ cm}$  festgelegt. Das neue Zielzeichen ist somit größer als die meisten kommerziell erhältlichen Zielzeichen, um kleine Unsicherheiten in Distanzrichtung zu erreichen. Größere Maße werden als nicht mehr handlich erachtet. Auf Basis der Literatur und weiteren Tests wird Aluminium als Material gewählt und die Oberfläche möglichst diffus reflektierend hergestellt.

Ein Hauptunterschied zu den bisher untersuchten Zielzeichen ist das Muster: statt des klassischen Schachbrettmusters weist das neue Zielzeichen eine 8-fach Teilung auf (s. Abb. 5.4, links). Diese 8-fach Teilung bewirkt, dass die Korrelationsfunktion mit dem Template des Zielzeichens in der Mitte steiler zusammenläuft (s. Abb. 5.4, rechts). Da diese Korrelationsfunktion zur Schätzung der Zielzeichenkoordinate verwendet wird, ist das Maximum der Korrelation mit einer geringeren Unsicherheit gegenüber zufälligen Abweichungen bestimmbar und die Präzision der Koordinatenschätzung in Winkelrichtung nimmt zu. Bei der Orientierung des 8-fach Musters wird darauf geachtet, dass die weißen Felder des Musters an den vier Ecken des Zielzeichens angeordnet sind, sodass ihr prozentualer Anteil am Zielzeichen größer ist als der der schwarzen Teilflächen. Weiße Flächen reflektieren den Laserstrahl des Scanners stärker, wodurch die Präzision der Streckenmessung verbessert wird [Wujanz et al., 2018a]. Im Folgenden wird dieses neu entwickelte Zielzeichen als BOTAS (Bonn Target with 8-fold pattern) bezeichnet.



**Abbildung 5.4:** BOTAS-Zielzeichen (links) und Vergleich der Korrelationsfunktion gegenüber einer Verschiebung  $dx$  zwischen einer 4-fach und 8-fach Teilung eines Zielzeichens (rechts).

Der Vergleich der verschiedenen Zielzeichendesigns in Veröffentlichung A zeigt, dass das BOTAS ( $T6$ ) die kleinsten Standardabweichungen in Strecken- und Winkelrichtung hat (s. Abb. 5.3). Mit der verwendeten Scankonfiguration (Scanner: LEICA SCANSTATION P20, Auflösung:  $0.8 \text{ mm}$  auf  $10 \text{ m}$ ) werden Standardabweichungen von  $\hat{\sigma}_r \leq 0.9 \text{ mm}$  und  $\hat{\sigma}_{\varphi, \theta} \leq 1.5''$  für Scandistanzen bis  $100 \text{ m}$  erreicht. Durch die gewählte Größe und Reflektionseigenschaften des BOTAS ( $T6$ ) werden kleinere Standardabweichungen in Streckenrichtung erzielt als bei Verwendung der Zielzeichen  $T1$  bis  $T5$ . Durch das Konzept der 8-fach Teilung des BOTAS wird zudem erreicht, dass die Standardabweichung in Winkelrichtung gegenüber den anderen untersuchten

Zielzeichen ebenfalls reduziert wird. Insgesamt zeigen die Standardabweichungen somit, dass durch die Benutzung des BOTAS die Präzision der Zielzeichenkoordinaten gesteigert wird. Aufgrund der beschränkten Stichprobenanzahl der Untersuchungen ist jedoch keine Signifikanz nachweisbar.

## 5.2 Hauptaspekt 2: Modelle der Beobachtungsunsicherheit

Die Beobachtungsunsicherheit, d.h. die Unsicherheiten der Zielzeichenkoordinaten bei der zielzeichenbasierten Registrierung, wird mithilfe eines stochastischen Modells  $\Sigma_{ll}$  in der Registrierung berücksichtigt. Unvollkommenheiten des stochastischen Modells haben Auswirkungen auf die Netzoptimierung sowie auf die Ausreißerdetektion. Sie können sowohl zu unrealistischen Unsicherheiten der Registrierparameter als auch zu Verzerrungen in der Schätzung dieser Parameter führen. Von Laserscannerherstellern werden unterschiedliche Maße zur Beschreibung der Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten verwendet. Zudem sind die stochastischen Angaben der Hersteller meist stark vereinfacht und vernachlässigen beispielsweise den Einfluss der Distanz, des Einfallswinkels sowie die Wahl des Zielzeichens, des Algorithmus und der Scanauflösung. Wie aus der Publikation A bekannt, können die Unsicherheiten der geschätzten Zielzeichenkoordinaten mithilfe von empirischen Standardabweichungen beschrieben werden. Aus ihnen können, wie in Publikation B erläutert, für bestimmte Scankonfigurationen (Scanner, Zielzeichen, Scanauflösung, usw.) distanzabhängige stochastische Modelle aufgestellt werden.

Aus den Vorüberlegungen zu den unterschiedlichen Möglichkeiten der Quantifizierung der Beobachtungsunsicherheit leiten sich folgende zentrale Fragestellungen im Hinblick auf das in der Registrierung verwendete stochastische Modell ab:

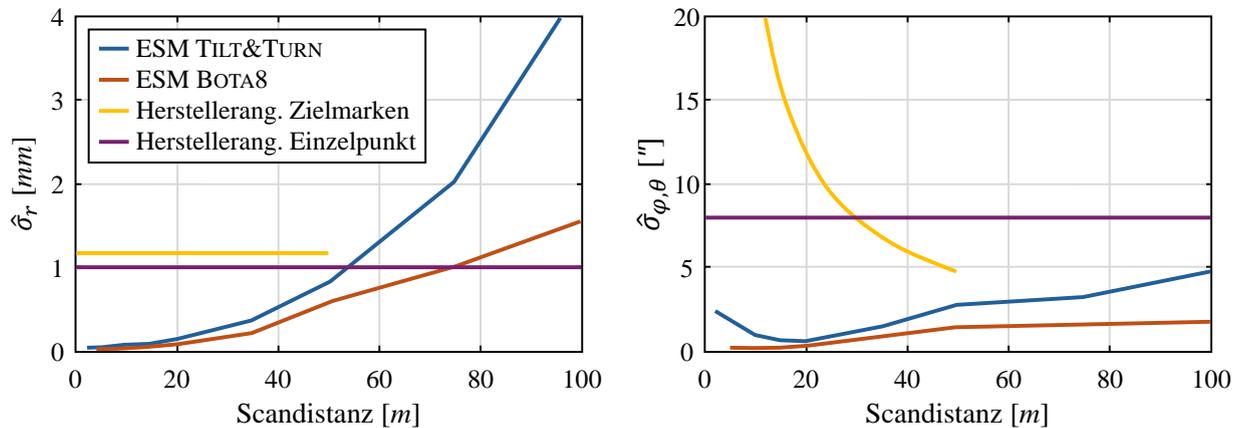
- Wie unterscheiden sich die stochastischen Angaben der Hersteller zu den Zielzeichenkoordinaten von den empirischen Daten aus den durchgeführten Versuchen?
- Welche Auswirkungen haben verschiedene stochastische Modelle auf die Registrierung?

Die erste Fragestellung wird anhand der Daten der Publikationen A und B im folgenden Abschnitt 5.2.1 beantwortet. Im Anschluss wird basierend auf dem Registrierbeispiel der Publikation B die zweite Fragestellung behandelt.

### 5.2.1 Beschreibung und Quantifizierung der Beobachtungsunsicherheit

Mithilfe von Wiederholungsmessungen werden die Standardabweichungen der Zielzeichenkoordinaten für verschiedene Distanzen und Einfallswinkel empirisch ermittelt. In den Veröffentlichungen A und B werden die Zielzeichen mit einer LEICA SCANSTATION P20 gescannt. In den beiden folgenden Absätzen werden ausschließlich Daten mit einer Scanauflösung von 1.6 mm auf 10 m Entfernung betrachtet. Aufgrund der anderen Scanauflösung und somit verschiedener Scandaten unterscheiden sich die quantitativen Werte der Abb. 5.5 von denen der Abb. 5.3.

Die Standardabweichungen der Zielzeichenkoordinaten, welche empirisch aus den Wiederholungsscans der Publikationen A und B berechnet werden, sind in Abb. 5.5 (blau und rot) zusammen mit den Angaben des Herstellers zur Unsicherheit eines Einzelpunktes (lila) sowie von Zielzeichenkoordinaten (gelb) dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Standardabweichungen im Gesamten mit der Distanz zunehmen. Es wird zudem deutlich, dass die beiden stochastischen Modelle des Herstellers die Unsicherheitsbeschreibung stark vereinfachen. Für die Unsicherheit in Distanzrichtung (Abb. 5.5, links) sind die Herstellerangaben bei Verwendung von LEICA TILT&TURN-Zielzeichen bis 50 m erst zu pessimistisch und danach zu optimistisch. Bei Verwendung der BOTAS-Zielzeichen liegt dieser Umkehrpunkt bei ca. 75 m. Für die Unsicherheit in



**Abbildung 5.5:** Gegenüberstellung der empirischen stochastischen Modelle (ESM) zweier Zielzeichendesigns mit den Herstellerangaben (links: Standardabweichung in Streckenrichtung; rechts: Standardabweichung in Winkelrichtung).

Winkelrichtung (Abb. 5.5, rechts) sind die Angaben des Herstellers in jedem Fall zu pessimistisch. Die zu pessimistischen Herstellerangaben führen durch die Varianzfortpflanzung der Gl. 3.13 dazu, dass die Unsicherheit der Registrierung ebenfalls zu pessimistisch angenommen wird, wodurch auch die Netzoptimierung negativ beeinflusst wird.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die stochastischen Modelle des Herstellers im Vergleich zu den empirischen Daten stark vereinfachen und keine adäquate Beschreibung der tatsächlichen Unsicherheiten darstellen. Eine bessere Beschreibung der Unsicherheiten kann beispielsweise durch Tabellen, basierend auf den empirischen stochastischen Modellen, oder durch eine Varianzkomponentenanpassung erfolgen [Medić et al., 2017; Reshetyuk, 2010]. Weitere Ausführungen zu den Auswirkungen der verschiedenen Modelle der Beobachtungsunsicherheit auf die Registrierung finden sich in Abschnitt 5.2.2.

Des Weiteren wird in den Publikationen A und B der Einfluss des Einfallswinkels auf die Standardabweichung der Zielzeichenkoordinaten analysiert. Mit größer werdendem Einfallswinkel nimmt auch die Standardabweichung zu. Außerdem ist aus den beiden Veröffentlichungen ersichtlich, dass es eine Distanz gibt, bei der die Präzision am höchsten ist. Bei Verwendung der LEICA TILT&TURN-Zielzeichen ist dies bei etwa 20 m Entfernung der Fall, bei Verwendung der BOTAS-Zielzeichen bei einer Entfernung von etwa 15 m. Wie in der Veröffentlichung B beschrieben, liegt der Grund für die Präzisionsabnahme in der geringer werdenden Anzahl an Scanpunkten auf dem Zielzeichen bei größer werdenden Einfallswinkeln und Distanzen. Die Erkenntnisse über den Einfluss der Scangeometrie sind eine wichtige Information für den Benutzer bei der Netzplanung der Registrierung: Die Distanzen und Einfallswinkel sollten so geplant werden, dass minimale Beobachtungsunsicherheiten erreicht werden.

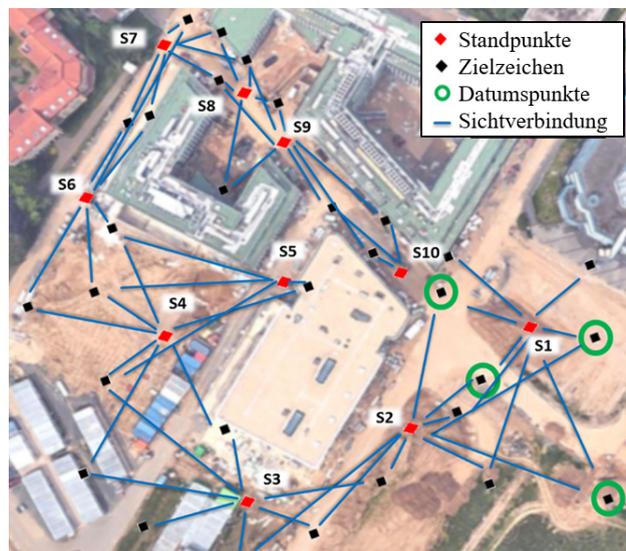
Der Einfluss verschiedener Scanauflösungen wird aus den Untersuchungen der Publikation B ersichtlich. Eine geringere Scanauflösung führt generell aufgrund der geringeren Anzahl an Scanpunkten auf dem Zielzeichen zu einer schlechteren Präzision der Zielzeichenkoordinaten. Bei Distanzen unter 35 m sind keine Unterschiede zwischen der höchsten Scanauflösung (0.8 mm auf 10 m) und der zweithöchsten Scanauflösung (1.6 mm auf 10 m) in der Präzision der Zielzeichenkoordinaten festzustellen. Bei der geringeren der beiden Auflösungen reduziert sich die Scandauer jedoch um den Faktor vier, wodurch ein Kosten- und Zeitgewinn entsteht, ohne dass sich die Unsicherheit der Beobachtungen und somit auch die der Registrierung erhöht. Diese Erkenntnisse zu den verschiedenen Scanauflösungen werden von den Versuchsdaten der Publikation A gestützt.

Insgesamt wird deutlich, dass die vom Hersteller angegebenen Werte zur Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten gegenüber den empirisch festgestellten Unsicherheiten stark vereinfacht sind. Der Einfluss auf die Netzplanung der Registrierung wurde bereits beschrieben. Die Auswirkung der verschiedenen stochastischen

Modelle auf die Registrierung wird im folgenden Abschnitt 5.2.2 quantifiziert. Um die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten besser zu beschreiben, werden empirische distanzabhängige Modelle in Form von Nachschlagetabellen für die Registrierung verwendet. Diese empirischen stochastischen Modelle (ESM) müssen im Vorhinein für feste Kombinationen aus Scanner, Zielzeichen und Scanauflösung bestimmt werden. Die hier diskutierten tatsächlichen Werte und Ergebnisse beruhen ausschließlich auf Versuchen mit der LEICA SCANSTATION P20. Versuchsreihen im Zuge der Publikation A mit einem LEICA BLK360, LEICA HDS6100 und FARO FOCUS3D S120 konnten die Ergebnisse qualitativ bestätigen, sodass sich die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Scanner übertragen lassen. Inwieweit sich quantitative Werte für einzelne Hersteller oder Baureihen generalisieren lassen, ist in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen.

## 5.2.2 Auswirkungen stochastischer Modelle auf die Registrierung

In Veröffentlichung B wird anhand eines Registrierbeispiels der Einfluss der verschiedenen stochastischen Modelle auf die Registrierung untersucht. Als exemplarische Registrierung wird ein Datensatz mit zehn Standpunkten der LEICA SCANSTATION P20, 29 Standorten von LEICA TILT&TURN-Zielzeichen und einer Netzlänge von etwa 900 m betrachtet (s. Abb. 5.6). Der zehnte Standpunkt ist nicht mit dem ersten Standpunkt verknüpft. Durch diese einseitige Verkettung wird der Einfluss der unterschiedlichen stochastischen Modelle auf die Registrierungen verdeutlicht. Für diesen Datensatz werden Registrierungen mit zwei unterschiedlichen Kovarianzmatrizen der Beobachtungen  $\Sigma_{ll}$  durchgeführt. In der ersten Variante wird die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{ll}$  mithilfe der vom Hersteller zur Verfügung stehenden Informationen für die Unsicherheit eines Einzelpunktes aufgestellt. In der zweiten Variante wird die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{ll}$  mittels der entsprechenden Standardabweichungen aus dem empirischen Modell des vorherigen Abschnitts 5.2.1 gefüllt. In beiden Fällen werden die Beobachtungen als unkorreliert angenommen.



**Abbildung 5.6:** Geometrische Netzkonfiguration des untersuchten Registrierdatensatzes aus Publikation B.

Die aus der Verkettung der Registrierungen mithilfe der beiden unterschiedlichen stochastischen Modelle resultierenden Differenzen in den Koordinaten und Orientierungen der Scannerstandpunkte betragen bis zu 13.4 mm bzw. 18". Die a-posteriori Standardabweichungen der Registrierparameter sind bei der Registrierung mit dem ESM bis zu fünf mal kleiner als bei der Registrierung mit den Unsicherheitsangaben des Herstellers. Differenzentests bestätigen, dass die Unterschiede durch die Wahl des stochastischen Modells signifikant sind.

Zusätzlich zu den beiden bereits untersuchten stochastischen Modellen werden die Registrierungen mit Herstellerangaben und anschließender Varianzkomponentenanpassung betrachtet. Gegenüber den Registrierun-

gen mittels ESM ergeben sich hier nur marginale Unterschiede in den Registrierparametern, sie betragen weniger als  $0.2''$  und  $0.3 \text{ mm}$ . Wenn keine Netzplanung benötigt wird, ist das stochastische Modell des Herstellers mit einer Varianzkomponentenanpassung somit für die Registrierung ausreichend. Auch die Kovarianzmatrix der Parameter  $\Sigma_{pp}$  ist nach einer Varianzkomponentenanpassung ähnlich der Kovarianzmatrix mit dem ESM.

Neben den Unterschieden in den Registrierparametern werden für die Registrierung mithilfe der unterschiedlichen stochastischen Modelle auch die a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen untersucht (s. Tab. 5.3). Die a-posteriori Standardabweichungen der Strecken von  $0.22 \text{ mm}$  bis  $0.58 \text{ mm}$  und des Vertikalwinkels von  $1.13''$  bis  $1.24''$  entsprechen in etwa den Werten des ESM (s. Abschnitt 5.2.1). Die a-posteriori Standardabweichungen der Horizontalrichtungen von  $5.12''$  bis  $7.20''$  sind bei allen Registriervarianten deutlich größer als die Werte des ESM. Es ist anzunehmen, dass dies durch Zentrierabweichungen der TILT&TURN-Zielzeichen verursacht wird, da die Zielzeichen beim Standpunktwechsel zum Scanner ausgerichtet werden müssen. Diese Unsicherheit der Zentrierung wird durch das ESM bisher nicht berücksichtigt.

**Tabelle 5.3:** Vergleich der a-priori und a-posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen bei Verwendung der verschiedenen stochastischen Modelle.

Verwendetes stochastisches Modell	Standardabweichung der Beobachtungen	$\hat{\sigma}_r$	$\hat{\sigma}_\varphi$	$\hat{\sigma}_\theta$
ESM	a-priori	$0.41 \text{ mm}$	$1.82''$	$1.59''$
	a-posteriori	$0.58 \text{ mm}$	$5.52''$	$1.24''$
Herstellerangabe Einzelpunkt	a-priori	$1.00 \text{ mm}$	$8.00''$	$8.00''$
	a-posteriori	$0.41 \text{ mm}$	$5.12''$	$1.13''$
Herstellerangabe mit Varianzanpassung	a-priori	$0.22 \text{ mm}$	$7.20''$	$1.13''$
	a-posteriori	$0.22 \text{ mm}$	$7.20''$	$1.13''$

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Wahl des stochastischen Modells einen signifikanten Einfluss auf die Registrierparameter nimmt. Das behandelte Registrierbeispiel zeigt, dass die Verwendung der vereinfachten Herstellerangaben als stochastisches Modell der Registrierung zu signifikanten Unterschieden in den Registrierparametern führen kann. Es wird daher empfohlen, für die Registrierung entweder ein ESM oder ein varianzangepasstes Modell der Herstellerangaben zu verwenden.

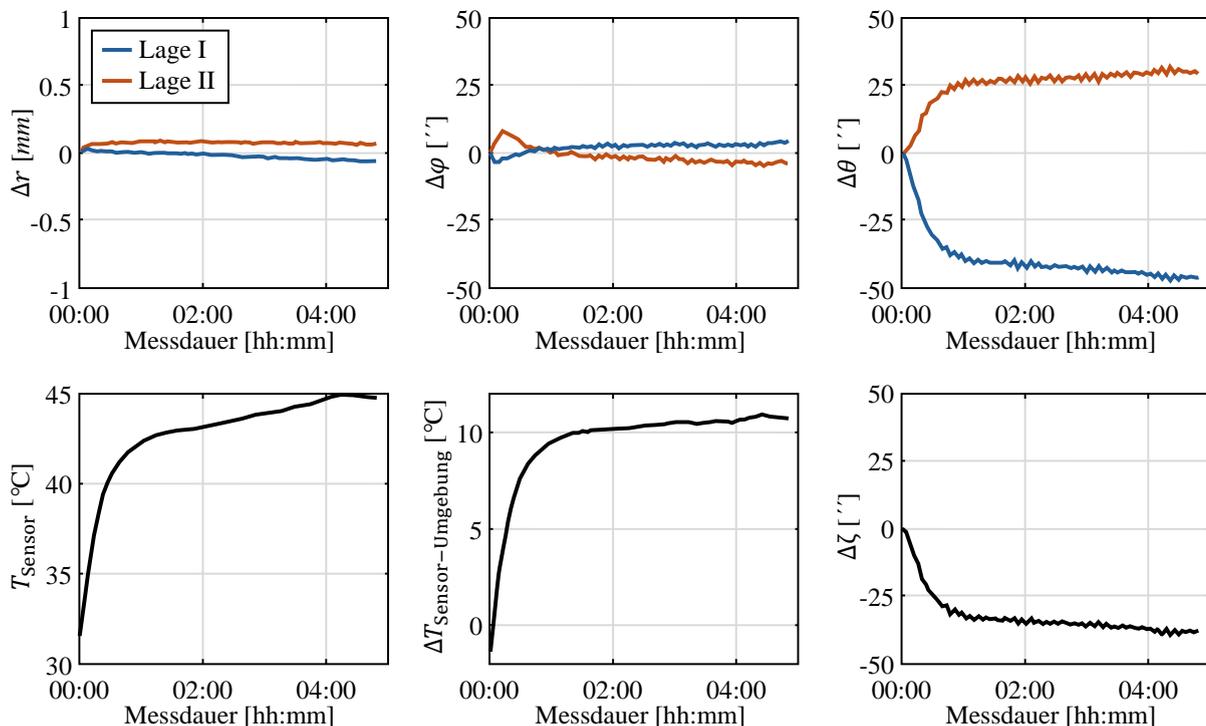
### 5.3 Hauptaspekt 3: Analyse der zeitlichen Beobachtungsstabilität

Beim statischen TLS wird angenommen, dass die Geometrie von Laserscanner und Umgebung bzw. Zielzeichen sich während eines Standpunktes zeitlich nicht verändert. Anders als beim mobilen Laserscanning wird eine Bewegung des Sensors nicht mitgeschätzt. Inwieweit diese Annahme gültig ist, wird in der Publikation C untersucht.

Mit einem Z+F IMAGER 5016 werden zehn BOTAS-Zielzeichen wiederholt über einen Zeitraum von fünf bzw. 59 Stunden gescannt und ihre Koordinaten in Abhängigkeit der Zeit betrachtet. Entgegen der anfangs beschriebenen Annahme sind signifikante Veränderungen der Koordinaten festzustellen. Zudem ist aus den Zielzeichenkoordinaten erkennbar, dass sich diese innerhalb einer Scannerlage in derselben Größenordnung und in dieselbe Richtung bewegen. Werden die Koordinatenänderungen aus beiden Scannerlagen betrachtet, zeigt sich, dass die Koordinaten sich gegensätzlich ändern. Hieraus wird geschlossen, dass die Koordinatenänderungen nicht durch Instabilitäten der Zielzeichen, sondern durch den Laserscanner selbst hervorgerufen

werden. Die Lagenabhängigkeit deutet zudem darauf hin, dass gewisse Kalibrierparameter zeitlich instabil sind. Dies wurde bereits von Medić et al. [2021] für längere Zeiträume untersucht. Eine Verdrehung des Stativs o.ä. mit der Zeit wird aufgrund der Charakteristik der Koordinatenänderungen ausgeschlossen, da sich bei dieser die Zielzeichenkoordinaten in beiden Scannerlagen in die gleiche Richtung ändern würden. Aus der näheren Analyse der Versuchsreihen der Publikation C werden zudem die folgenden zwei Erkenntnisse gewonnen:

1. Die Versuchsreihen mit einer zeitlichen Dauer von über fünf Stunden mit einem nicht aufgewärmten Scanner zeigen, dass die Polarkoordinaten der Zielzeichen besonders in der ersten Stunde starken Veränderungen unterliegen. Exemplarisch ist in Abb. 5.7 der Datensatz des dritten Tages der Publikation C dargestellt. Wie aus der Abbildung hervorgeht, nimmt die Änderung der Polarkoordinaten  $\Delta r$ ,  $\Delta\varphi$  und  $\Delta\theta$  nach dieser Anfangsphase ab; das bedeutet, die zeitliche Stabilität der geometrischen Konfiguration von Scanner und Zielzeichen nimmt zu. Wird die Temperatur des Scanners mitbetrachtet (Abb. 5.7, u.l.), ist ersichtlich, dass die Koordinatenänderungen durch eine Aufwärmphase des Scanners verursacht werden. Diese Aufwärmphase scheint zudem unterschiedlich auf die Polarelemente zu wirken: Die Vertikalwinkel sind im Vergleich zur Horizontalrichtung stärker betroffen, auf die Distanzen scheint die Aufwärmphase sich vor allem in der ersten halben Stunde auszuwirken. Die verschiedenen Vorzeichen der Änderungen im Vertikalwinkel lassen, wie zuvor beschrieben, auf Instabilitäten der Kalibrierung während der Aufwärmphase schließen. Abb. 5.7, u. r. zeigt die aus den Koordinatenänderungen geschätzte Höhenindexabweichung  $\zeta$  in Abhängigkeit der Zeit. Diese beträgt bis zu  $35''$  innerhalb der ersten Stunde und ist somit um ein Vielfaches größer als die festgestellten Standardabweichungen der Zielzeichenkoordinaten (s. Abschnitt 5.2.1).



**Abbildung 5.7:** Aufwärmphase eines Z+F IMAGER 5016: Änderungen der Polarkoordinaten der Zielzeichen (getrennt nach Scannerlage, o. Reihe), Temperaturverlauf der angegebenen Sensortemperatur (u.l.), Differenz zur Umgebungstemperatur (u.m.) sowie die berechnete Änderung der Höhenindexabweichung  $\zeta$  (u.r.).

2. Der Datensatz über einen Zeitraum von 59 Stunden mit einem aufgewärmten Scanner zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen den Koordinatenänderungen der Zielzeichen und der Umgebungs- bzw. Sensortemperatur, wobei die Scannertemperatur annähernd konstant  $11^{\circ}\text{C}$  über der Umgebungstemperatur liegt. Die Koordinatenänderungen sind in ihren Größenordnungen kleiner als die Änderungen während der Aufwärmphase und verlaufen deutlich langsamer. Erneut sind die Änderungen des Vertikalwinkels  $\Delta\theta$  deutlich größer als die des Horizontalwinkels  $\Delta\varphi$ .

Die Versuchsdaten zeigen, dass die Stabilität der Scandaten zu einem großen Teil von den sich ändernden systematischen Abweichungen des Scanners abhängt. Die Verringerung dieser Instabilitäten durch zeit- oder temperaturabhängige Kalibrierparameter ist eine Aufgabe der verbesserten Scannerkalibrierung und wird u.a. bereits in *Medić et al. [2021]* untersucht. Solange jedoch keine verbesserten Kalibriermodelle entwickelt sind bzw. angewendet werden, muss diskutiert werden, inwieweit die Registrierung durch diese Instabilitäten beeinflusst wird. Aufgrund der Komplexität der Thematik und der Abhängigkeit von der tatsächlichen geometrischen Konfiguration wird sich im Folgenden auf ein Szenario mit zwei Standpunkten konzentriert. Es wird hierbei ausschließlich die Auswirkung der sich während der Aufwärmphase ändernden Höhenindexabweichung  $\zeta$  auf die Registrierung betrachtet.

Mit einem Laserscanner werden von zwei Standpunkten aus mehrere Zielzeichen aufgenommen. In dem Beispiel wird angenommen, dass die Zielzeichen vom ersten und zweiten Standpunkt je mit der gleichen Scannerlage gescannt werden. Zwischen den beiden Standpunkten vergehen in etwa drei Minuten, in denen sich die Höhenindexabweichung  $\zeta$  auf Grund der Aufwärmphase um bis zu  $8''$  verändert. Dies entspricht bei Scandistanzen von  $30\text{ m}$  etwa  $1.2\text{ mm}$  Änderung in der Höhe der Zielzeichenkoordinaten. Die unterschiedlichen Vorzeichen der Koordinatenänderungen zwischen der ersten und zweiten Scannerlage führen dazu, dass bei der Registrierung der beiden Standpunkte eine Verkippung der x-y-Ebene entlang der Achse des Lagenwechsels auftritt.

Dieses beispielhafte Szenario zeigt, dass durch die Aufwärmphase des Scanners Abweichungen in der Registrierung auftreten können. Eine rechnerische Berücksichtigung der Abweichungen scheint zwar möglich, ist für den Endnutzer ohne Zugriff auf die Sensortemperatur jedoch nicht praktikabel. Um bei Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen die Abweichungen aus der Aufwärmphase des Scanners möglichst zu eliminieren, wird aus den hier gezeigten Ergebnissen geschlossen, dass der Scanner mindestens 45 Minuten mittels Probescans aufzuwärmen ist, bevor die relevanten Messungen durchgeführt werden. Hierdurch kann die Unsicherheit der Scandaten und somit auch die Unsicherheit der Registrierung deutlich reduziert werden.

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Scans mit dem Z+F IMAGER 5016. Die Einflüsse der Aufwärmphase konnten jedoch auch für andere Scanner, z.B. LEICA SCANSTATION P20, festgestellt werden.

## 5.4 Hauptaspekt 4: Ergänzung zusätzlicher Beobachtungen

Die bisher diskutierten Hauptaspekte dieser Dissertation haben durch die Quantifizierung und Reduktion der Beobachtungsunsicherheiten die Unsicherheit der zielzeichenbasierten Registrierung verringert. Der nun folgende Hauptaspekt befasst sich hingegen mit dem Ansatz der Reduktion von Registrierunsicherheiten durch die Ergänzung zusätzlicher Beobachtungen. Wie aus *Koch [1997]* hervorgeht, können die Werte der Kovarianzmatrix, bzw. die Unsicherheit der Registrierung, durch zusätzliche Beobachtungen nur kleiner werden. Neben dem Ziel die Unsicherheit zu reduzieren, wird als Nebenbedingung formuliert, dass sich der messtechnische Aufwand der Registrierung durch die zusätzlichen Beobachtungen nicht vergrößern darf, d.h. es sollen keine zusätzlichen Messungen oder Equipment nötig sein.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden zwei Arten von zusätzlichen Beobachtungen diskutiert: In der Veröffentlichung D werden die Ausrichtung bzw. Orientierung der Zielzeichenebenen im Raum als Beobachtungen ergänzt. Veröffentlichung E führt identische markante Punkte der Scanumgebung als Beobachtungen in die Registriererausgleichung ein. Hierdurch werden zwar nicht mehr ausschließlich Beobachtungen von Zielzeichen zur Registrierung verwendet, dieser Ansatz zur Registrierung beruht jedoch ebenfalls auf Punktidentitäten und unterscheidet sich nicht vom funktionalen Modell der zielzeichenbasierten Registrierung. Die Beschreibung der beiden zusätzlichen Arten von Beobachtungen sowie ihre methodische Integration in die Registrierung werden in Abschnitt 5.4.1 erläutert. In Abschnitt 5.4.2 wird ihr Mehrwert für die Registrierung thematisiert.

### 5.4.1 Methodische Beschreibung der zusätzlichen Beobachtungen

Um zusätzliche Beobachtungen in die Registrierung zu integrieren, müssen der Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$ , die Kovarianzmatrix der Beobachtungen  $\Sigma_{ll}$  sowie die Konfigurationsmatrix  $\mathbf{A}$  und die Bedingungsmatrix  $\mathbf{B}$  angepasst werden. Der Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  wird mit den neuen Beobachtungen selbst ergänzt, die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{ll}$  wird in ihren Zeilen und Spalten um die zugehörigen Varianzen und Kovarianzen erweitert. Des Weiteren müssen für die neuen Beobachtungen zusätzliche Registrierbedingungen formuliert werden, welche durch die beiden Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  berücksichtigt werden. Da sich die Berechnung und anschließende Integration der Zielzeichenorientierung sowie der markanten Punkte voneinander unterscheiden, werden die beiden neu untersuchten Beobachtungsarten im Folgenden getrennt betrachtet.

#### Orientierung der Zielzeichenebenen

Die Veröffentlichung D zeigt, wie bei der Verwendung von ebenen Zielzeichen die Orientierungen der Zielzeichenebenen als zusätzliche Beobachtungen neben den Zielzeichenmittelpunkten, welche auf Basis von Intensitäten (s. Abschnitt 5.1.1) geschätzt werden, in die Registrierung integriert werden können. Im Unterschied zu den bisher publizierten ebenenbasierten Registriermethoden [Previtali et al., 2014; Wujanz et al., 2018b] werden hier jedoch ausschließlich die Ebenen der Zielzeichen verwendet, der Ansatz bleibt somit unabhängig von der gescannten Umgebung. Einzige Bedingung an diese Registriermethode ist, dass die Zielzeichen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Scannerstandpunkten nicht neu ausgerichtet werden.

Für jedes Zielzeichen wird neben den Polarkoordinaten des Zielzeichenmittelpunktes ein horizontaler Orientierungswinkel  $\psi$  und ein vertikaler Orientierungswinkel  $\omega$  in den Beobachtungsvektor eingeführt. Diese Orientierungswinkel lassen sich aus dem, ohnehin im Algorithmus zur Koordinatenschätzung bestimmten, Normalenvektor der Ebenen berechnen [Jurek et al., 2017]. Die Einträge der Kovarianzmatrix ergeben sich aus der Varianzfortpflanzung der Ebenenschätzung. Korrelationen zwischen der Koordinate des Zielzeichenmittelpunktes und der Ebenenorientierung werden, wie in Publikation D beschrieben, vernachlässigt.

Die Bedingungen der Ebenenorientierungen für die Registrierung können aus der Transformation des Normalenvektors  $\mathbf{n}$  eines Zielzeichens vom Startsystem  $\mathcal{S}$  ins Zielsystem  $\mathcal{T}$

$$\mathbf{n}_{\mathcal{T}} = \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \mathbf{n}_{\mathcal{S}} \quad (5.1)$$

hergeleitet werden. Aus ihr ergeben sich für jedes Paar identischer Zielzeichen zwei zusätzliche Bedingungen der Ebenenorientierungen

$$c_4 : 0 = \arctan \left( \frac{R_{21} \cdot \cos \psi_S \cos \omega_S + R_{22} \cdot \cos \psi_S \sin \omega_S + R_{23} \cdot \sin \omega_S}{R_{11} \cdot \cos \psi_S \cos \omega_S + R_{12} \cdot \cos \psi_S \sin \omega_S + R_{13} \cdot \sin \omega_S} \right) - \psi_T, \quad (5.2)$$

$$c_5 : 0 = \arcsin (R_{31} \cdot \cos \psi_S \cos \omega_S + R_{32} \cdot \cos \psi_S \sin \omega_S + R_{33} \cdot \sin \omega_S) - \omega_T, \quad (5.3)$$

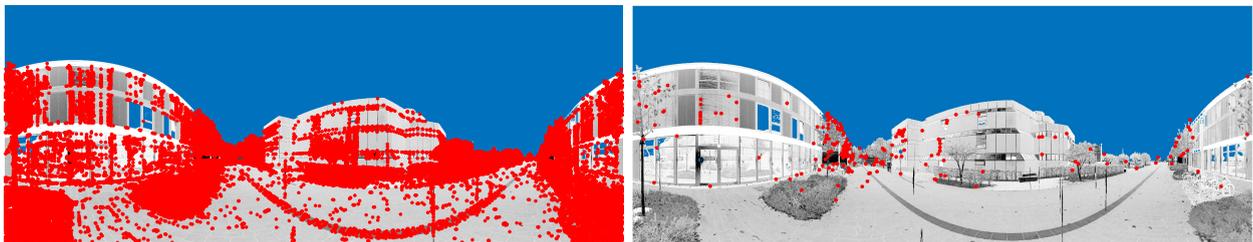
welche die drei bisherigen Bedingungen der Polarkoordinaten  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  für jedes Zielzeichenpaar ergänzen. Auf Basis der ergänzten Bedingungen der Ebenenorientierungen werden dann die Konfigurationsmatrix  $\mathbf{A}$  sowie die Bedingungsmatrix  $\mathbf{B}$  angepasst. Anschließend wird die Registrierausgleichung, wie in der Veröffentlichung D beschrieben, durchgeführt. Im folgenden Abschnitt 5.4.2 wird gezeigt, welchen Mehrwert die Berücksichtigung der Ebenenorientierung für die Präzision und Zuverlässigkeit der Registrierung bringt.

### Markante Punkte der Umgebung

Markante Punkte werden bereits häufig zur Grobregistrierung von Punktwolken verwendet [Liu et al., 2020; Weinmann et al., 2011]. Mit dem in der Veröffentlichung E beschriebenen Verfahren zur Registrierung mittels identischer markanter Punkte ist erstmals eine Feinregistrierung möglich, deren Präzision höher ist als die der reinen zielzeichenbasierten Registrierung. Bevor die Registrierung mittels markanter Punkte durchgeführt werden kann, müssen diese allerdings zuerst aus den Scans berechnet werden. Die Berechnung der markanten Punkte lässt sich in die folgenden Schritte gliedern:

1. **Berechnung der Intensitätsbilder:** Aus den Polarkoordinaten der Scans sowie den Intensitäten des reflektierten Lasersignals wird für jeden Standpunkt ein Intensitätspanorama (Abb. 5.8) berechnet. Die Spalten des Panorambildes entsprechen der Horizontalrichtung  $\varphi$  und die Zeilen dem Vertikalwinkel  $\theta$ , die Auflösung des Bildes wird in der zugehörigen Veröffentlichung D entsprechend der Scanauflösung (3.1 mm auf 10 m) gewählt. Bereiche, in denen wegen zu geringer Reflektion keine Messungen möglich sind, werden in Abb. 5.8 in blau dargestellt.
2. **Detektion markanter Punkte:** Aufgrund der hohen Präzision des Förstner-Operators werden mit dessen Hilfe die markanten Punkte in dem zuvor berechneten Intensitätspanorama detektiert. Mit den gewählten Filtereinstellungen ergeben sich für ein vollständiges Panorama mehrere tausend detektierte Punkte (Abb. 5.8, links). Diese liegen erwartungsgemäß an den Ecken großer Intensitätswechsel, beispielsweise an Gebäude- und Fensterecken, aber auch zu großen Teilen in Vegetationsbereichen (Büsche, Sträucher, etc.). Letzteres ist jedoch unproblematisch für die Registrierung, da das Punkt-Matching (nächster Schritt) bei diesen Punkten nicht erfolgreich ist.
3. **Matching:** Die Zuordnung identischer Punkte wird häufig mithilfe von Deskriptoren gelöst. In Anbetracht der unterschiedlichen Blickwinkel, können mit diesen Ansätzen jedoch nur Registrierungen mit geringen Abständen zwischen den Scannerstandpunkten berechnet werden [Weinmann et al., 2011; Markiewicz & Zawieska, 2020]. In Veröffentlichung D wird eine neue statistische Matching-Methode eingeführt, welche die Zuordnung identischer Punkte auf Basis ihrer Geometrie und anhand statistischer Tests löst.

Mithilfe der Vorregistrierung (Startwerte) werden die markanten Punkte des Startsystems  $\mathcal{S}$  in das Zielsystem  $\mathcal{T}$  transformiert und deren Kovarianzinformationen fortgepflanzt. Anschließend wird für jeden, ursprünglich im Startsystem detektierten Punkt der nächstliegende Punkt der transformierten Punkte



**Abbildung 5.8:** Beispiel eines Intensitätspanoramas mit allen detektierten markanten Punkten (links) und den markanten Punkten, für die das Matching mit dem nächsten Scan-Standpunkt erfolgreich war (rechts).

gesucht. Für die so gefundenen Paare von markanten Punkten wird mittels eines Differenzentests geprüft, ob sie sich unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheit signifikant unterscheiden. Divergieren die getesteten Punkte signifikant, werden die Punktpaare verworfen; unterscheiden sich die Punkte nicht signifikant, werden sie als identisch angenommen und das Punktpaar wird im folgenden Schritt zur Registrierung verwendet.

In Abbildung 5.8 (rechts) sind die markanten Punkte dargestellt, die in dem Registrierbeispiel mit den markanten Punkte des nächsten Standpunktes als identisch getestet wurden. In dem Beispiel ergeben sich 124 Punktpaare, welche in die Registrierung mit eingehen.

4. **Ausgleichung:** Auf Basis der im vorherigen Schritt berechneten Punktidentitäten werden der Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  sowie die zugehörige Kovarianzmatrix der Beobachtungen  $\Sigma_{ll}$  aufgestellt. Als funktionales Modell werden die in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Bedingungen zur Registrierung mit identischen Punkten verwendet. Als Startwert für die Registrierung werden in der ersten Iteration die Registrierparameter der Zielzeichen genutzt. Zudem werden die Varianzkomponenten geschätzt und die Registrierung mit angepassten Varianzen wiederholt.
5. **Iterationen:** Nach dieser Registrierung werden die geschätzten Parameter als neue Startwerte für die nächste Iteration verwendet. In jeder Iteration werden das Matching und die Ausgleichung wiederholt. Dieser Prozess wird durchgeführt bis die geschätzten Registrierparameter konvergieren.

Es wird erwartet, dass durch die deutlich höhere Anzahl an identischen Punkten, welche zur Registrierung verwendet wird, die Präzision und Zuverlässigkeit der Registrierung verbessert werden. Im Hinblick auf das Matching in Schritt drei bleibt festzuhalten, dass für die statistischen Tests korrekte Varianzinformationen benötigt werden, andernfalls können die Tests zu falschen Matching-Ergebnissen führen. Die Varianzinformationen setzen sich aus der Unsicherheit der markanten Punkte sowie der Unsicherheit der Vorregistrierung zusammen. Dies bedeutet, dass die Vorregistrierung theoretisch auch mit anderen Verfahren als der zielzeichenbasierten Registrierung möglich ist. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Unsicherheit der Vorregistrierung bekannt ist und keine groben Fehler beinhaltet.

Das beschriebene Verfahren zur Registrierung mit markanten Punkten wird im folgenden Abschnitt 5.4.2 anhand zweier Testdatensätze hinsichtlich seiner Genauigkeit und Zuverlässigkeit analysiert und mit der reinen zielzeichenbasierten Registrierung verglichen.

### 5.4.2 Auswirkungen der zusätzlichen Beobachtungen auf die Registrierung

Um den Mehrwert der neuen Beobachtungen zu untersuchen, werden in den beiden Veröffentlichungen D und E Registrierungen mit und ohne diese neuen Beobachtungen miteinander verglichen. Quantifiziert wird der Mehrwert anhand verschiedener Qualitätskriterien. Als Maß der Präzision werden in beiden Veröffentlichungen die a-posteriori Standardabweichungen der Parameter betrachtet, welche sich aus der Kovarianzmatrix  $\Sigma_{pp}$  ergeben. Als Maß der Zuverlässigkeit werden Redundanzen untersucht.

#### Orientierung der Zielzeichenebenen

Die Erweiterung der zielzeichenbasierten Registrierung mittels der Orientierung der Zielzeichenebenen wird sowohl anhand verschiedener simulierter Netzgeometrien (s. Abb. 5.9) als auch anhand von zwei echten Datensätzen evaluiert. Hierzu werden die Ergebnisse der reinen zielzeichenbasierten Registrierungen, im Folgenden OR (Original Registrierung) genannt, mit denen der Registrierung inklusive der Ebenenorientierung, im Folgenden ER (Erweiterte Registrierung) genannt, verglichen.

Die Tab. 5.4 zeigt die Standardabweichungen der Registrierparameter für die drei simulierten Netzkonfigurationen sowohl für die OR als auch für die ER. Bei Netzgeometrien (Scanner- und Zielzeichenstandorte), die

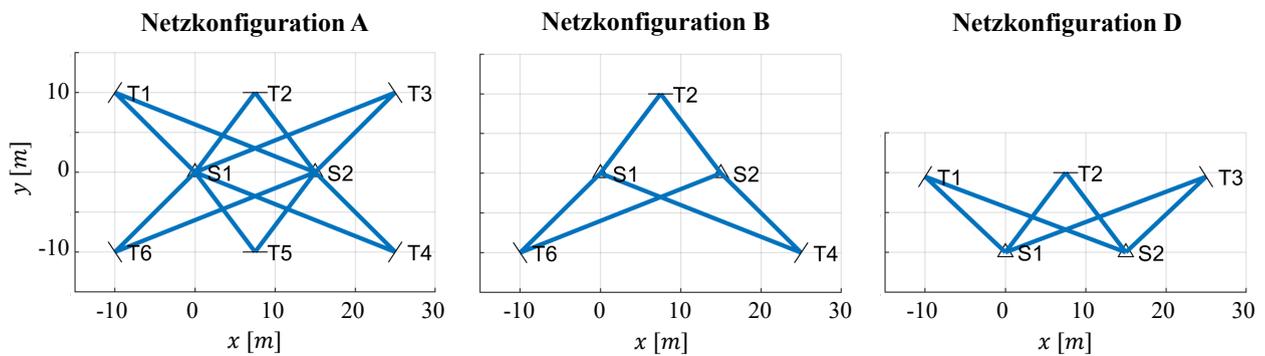


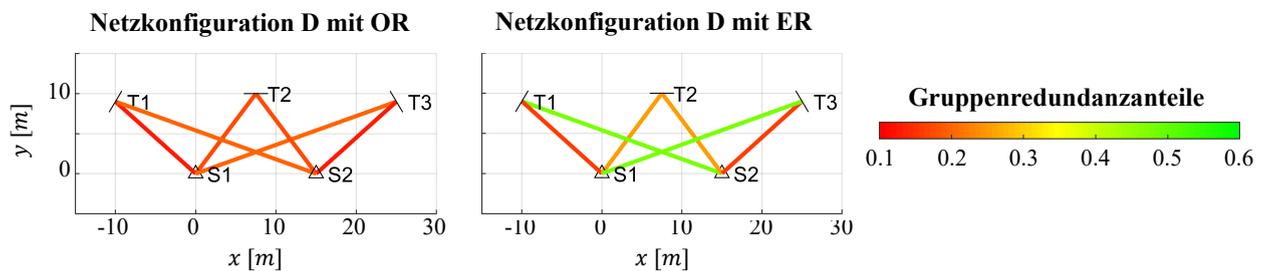
Abbildung 5.9: Geometrische Netzkonfigurationen A, B und D der simulierten Registrierungen.

als schwierig angesehen werden (s. Netzkonfiguration D), wird die Präzision der Registrierung durch diese Erweiterung signifikant verbessert. Besonders die zuvor unsicheren Parameter werden durch die zusätzlichen Ebenenorientierungen präziser bestimmt. In dem simulierten Beispiel D verringern sich die Standardabweichungen der Parameter  $\alpha$  und  $t_z$  um ca. 90%. Werden die weiteren Beispiele aus der Veröffentlichung zu der Analyse hinzugezogen, wird ersichtlich, dass der prozentuale Gewinn der zusätzlichen Beobachtungen wächst, je schlechter die geometrische Konfiguration ist. Die tatsächlichen numerischen Werte der Verbesserungen durch die Erweiterung bleiben abhängig von der jeweiligen geometrischen Verteilung und Orientierung der Zielzeichen und des Scanners.

Tabelle 5.4: Standardabweichungen  $\sigma$  der Registrierparameter für die simulierten Netzkonfigurationen A, B und D mit der reinen zielzeichenbasierten Registrierung (OR) und der Registrierung inklusive Ebenenorientierung (ER).

Parameter	Netzkonfiguration A			Netzkonfiguration B			Netzkonfiguration D		
	$\sigma_{OR}$	$\sigma_{ER}$	Benefit	$\sigma_{OR}$	$\sigma_{ER}$	Benefit	$\sigma_{OR}$	$\sigma_{ER}$	Benefit
	["]	["]		["]	["]		["]	["]	
$\alpha$	7.7	6.7	13%	11.1	9.6	14%	220.0	19.1	91%
$\beta$	7.0	6.6	5%	9.8	9.3	5%	9.6	9.1	6%
$\gamma$	5.0	4.6	9%	7.1	6.5	9%	8.6	7.5	13%
	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	
$t_x$	0.3	0.3	0%	0.4	0.4	0%	0.4	0.4	4%
$t_y$	0.4	0.4	2%	0.5	0.5	2%	0.6	0.5	4%
$t_z$	0.5	0.4	2%	0.6	0.6	2%	10.2	1.1	89%

Durch die Ergänzung der zusätzlichen Beobachtungen wird die Redundanz der Registrierenausgleichung höher, wodurch sich global betrachtet die Zuverlässigkeit der Registrierung erhöht. Für eine detailliertere Analyse werden Gruppenredundanzanteile berechnet, welche die Redundanzanteile der einzelnen Beobachtungen zu einem Zielzeichen in einem Wert zusammenfassen. Diese Gruppenredundanzanteile liegen wie die bereits etablierten Redundanzanteile [Förstner, 1987] zwischen 0 und 1. Je höher dieser Wert ist, desto besser sind die Beobachtungen kontrolliert. Abb. 5.10 zeigt die Gruppenredundanzanteile für die Netzkonfiguration D für die OR und ER, welche zwischen 0.16 und 0.49 liegen. Anhand dieser Abbildung und den weiteren Analysen in der Veröffentlichung D ist festzustellen, dass insbesondere die Beobachtungen zu Zielzeichen, welche quer durch die Netzkonfiguration laufen (s. Abb. 5.10, S1 zu T3 und S2 zu T1), besser kontrolliert werden. In dem vorliegenden Beispiel steigen die Gruppenredundanzanteile dieser Beobachtungen von 0.20 auf 0.48 an. Zielzeichenbeobachtungen am Rand der Netzkonfigurationen (s. Abb. 5.10, S1 zu T1 und S2 zu T3) bleiben weiterhin weniger gut kontrolliert. Im Falle der Netzkonfiguration D verbessern sich die Gruppenredundanzanteile lediglich von 0.13 auf 0.16.



**Abbildung 5.10:** Gruppenredundanzanteile der Netzkonfiguration D für die zielzeichenbasierte Registrierung (OR, links) und für die Registrierung inklusive Ebenenorientierung (ER, rechts).

Voraussetzung für die Integration der Ebenenorientierung in die Registrierung ist, dass sich die Zielzeichenorientierung zwischen zwei Scannerstandpunkten nicht verändern darf. Dies hat zur Folge, dass die Zielzeichen nicht zum Scanner ausgerichtet werden, der Einfallswinkel somit größer wird und sich hierdurch die Unsicherheit der Zielzeichenkoordinaten vergrößert (s. Abschnitt 5.2.1). Wie in Publikation D diskutiert, überwiegt jedoch der Mehrwert der zusätzlichen Ebenenorientierung bis zu Einfallswinkel von über  $60^\circ$  diesen Präzisionsverlust.

Abschließend kann zu der Registriererweiterung mit der Ebenenorientierung der Zielzeichen festgehalten werden, dass sie sowohl die Präzision als auch die Zuverlässigkeit der Registrierung verbessert – insbesondere bei schlechten Netzgeometrien ist der Mehrwert groß. Die Erweiterung stellt lediglich eine methodische Ergänzung der zielzeichenbasierten Registrierung dar und hat keinen Mehraufwand während der Scanaufnahme zur Folge; durch das Wegfallen der Zielzeichenausrichtung wird der Aufwand sogar verkleinert.

### Markante Punkte der Umgebung

In Veröffentlichung E wird mithilfe von zwei Registrierdatensätzen mit zehn bzw. zwölf Scannerstandpunkten (s. Abb. 5.11) der Mehrwert der Registrierung mit markanten Punkten untersucht. Die Scanauflösung der verwendeten LEICA SCANSTATION P50 beträgt für die beiden Datensätze jeweils  $3.1 \text{ mm}$  auf  $10 \text{ m}$  und als Zielzeichen werden LEICA TILT&TURN-Zielzeichen verwendet. Nach der Datenaufnahme wird die reine zielzeichenbasierte Registrierung mit der neuen Registrieremethode mittels markanter Punkte verglichen. In Datensatz 1 werden durchschnittlich 112 markante Punkte zur Registrierung zweier Standpunkte verwendet, in Datensatz 2 sind es durchschnittlich 135 Punkte.

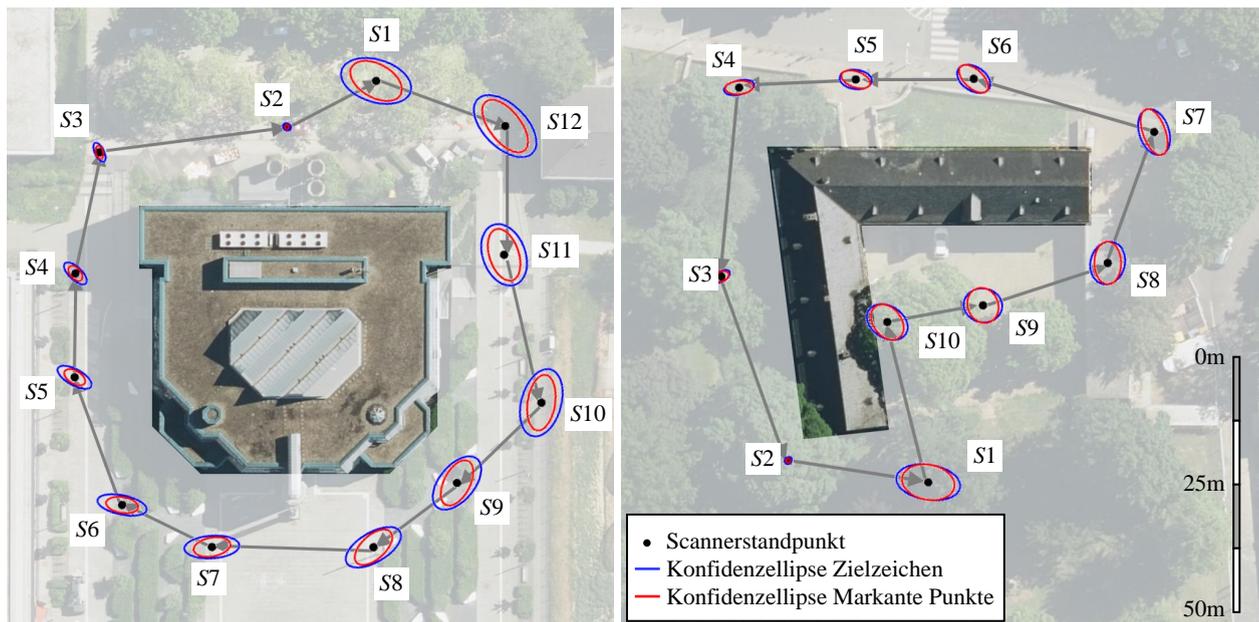
Die Differenzen der geschätzten Parameter zwischen den Registrierungen mittels markanter Punkte und Zielzeichen ist in Tab. 5.5 dargestellt. Sie offenbart mittlere Differenzen von  $9.8''$  bis  $50.4''$  für die Rotationen und  $1.2 \text{ mm}$  bis  $2.8 \text{ mm}$  für die Translationen. In Ermangelung von Soll-Parametern für die Registrierung kann nicht abschließend beurteilt werden, welche Registrierparameter richtiger sind. Um die geschätzten Parameter auch ohne Soll-Registrierung beurteilen zu können, werden die paarweisen Registrierungen, wie in Abb. 5.11 dargestellt, zu einem Ring verkettet und anschließend die Restklaffungen berechnet. Diese sind in Tab. 5.6 zusammengefasst. Aus ihnen geht hervor, dass die Restklaffungen mittels markanter Punkte gegenüber den Restklaffungen der zielzeichenbasierten Registrierung und gegenüber Registrierungen mittels ICP am kleinsten sind. Es wird daher angenommen, dass die Registrierung mittels markanter Punkte für die zwei untersuchten Datensätze die Registrieremethode mit den kleinsten Abweichungen ist.

Für die Registrierungen mittels Zielzeichen sowie mittels markanter Punkte können die Standardabweichungen der Registrierungen verglichen werden. Für die paarweisen Registrierungen der Datensätze unterscheiden sich die Standardabweichungen der Registrierungen nur gering. Um den Mehrwert dieser geringen Unterschiede zu verdeutlichen, wird die Verkettung der Registrierungen betrachtet. Die Unsicherheit, gemessen an den

**Tabelle 5.5:** Differenzen  $\Delta$  der Registrierparameter zwischen Registrierung mittels markanter Punkte und zielzeichenbasierter Registrierung.

Standpunkt	Datensatz 1						Datensatz 2					
	$\Delta\alpha$ ["]	$\Delta\beta$ ["]	$\Delta\gamma$ ["]	$\Delta t_x$ [mm]	$\Delta t_y$ [mm]	$\Delta t_z$ [mm]	$\Delta\alpha$ ["]	$\Delta\beta$ ["]	$\Delta\gamma$ ["]	$\Delta t_x$ [mm]	$\Delta t_y$ [mm]	$\Delta t_z$ [mm]
S1	-37.6	20.6	-14.0	-1.4	-2.5	4.2	-28.8	-22.0	-10.0	0.8	-2.6	-1.7
S2	5.5	-14.5	24.6	2.5	0.6	2.3	35.4	-62.5	50.7	-1.0	-1.9	0.4
S3	-68.8	-40.6	1.2	-3.0	-3.0	0.4	16.8	-8.7	15.0	1.0	-0.4	3.0
S4	-76.4	44.1	6.6	-2.1	-0.7	2.2	-29.1	16.2	-11.7	0.6	-0.2	-2.1
S5	-8.1	-14.0	21.9	2.7	-3.3	0.9	-38.2	-15.9	17.0	2.8	1.6	-2.5
S6	0.4	-25.3	-4.6	0.8	1.1	-1.0	-8.6	1.7	-21.4	2.1	-2.9	0.4
S7	47.8	44.6	-8.4	-1.7	-0.7	6.5	-45.1	31.4	8.9	0.8	-1.9	-1.5
S8	-223.9	69.3	14.0	3.8	-0.9	3.7	-27.0	-8.1	-2.4	0.5	-1.0	-2.3
S9	-34.3	-5.1	-5.1	1.9	1.1	0.5	-39.6	4.4	3.5	0.9	-1.9	-0.7
S10	57.2	-25.7	10.8	0.9	4.7	3.9	-8.6	-4.5	11.7	1.1	-0.7	-0.5
S11	-16.7	-71.1	-2.0	-5.3	-0.2	-0.9						
S12	-28.0	49.6	-4.1	2.0	4.4	-6.7						
Mittel	<b>50.4</b>	<b>35.4</b>	<b>9.8</b>	<b>2.3</b>	<b>1.9</b>	<b>2.8</b>	<b>27.7</b>	<b>17.5</b>	<b>15.2</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>

großen Halbachsen der Konfidenzellipsoiden, ist am Ende der Verkettung bei der Registrierung mit markanten Punkten etwa 25 % kleiner als bei der Registrierung mit Zielzeichen (s. Tab. 5.6). Zusätzlich zu der Unsicherheit der Parameter werden die Unsicherheiten der Beobachtungen mittels Varianzkomponentenschätzung bestimmt. Bei der rein zielzeichenbasierten Registrierung beträgt die Standardabweichung der Distanz im Mittel  $\hat{\sigma}_r = 0.6 \text{ mm}$ , für die Horizontalrichtung  $\hat{\sigma}_\varphi = 6.1''$  und für die Zenitwinkel  $\hat{\sigma}_\theta = 5.8''$ . Bei den Registrierungen mittels markanter Punkte betragen die korrespondierenden Standardabweichungen  $\hat{\sigma}_r = 3.6 \text{ mm}$ ,  $\hat{\sigma}_\varphi = 34.0''$ ,  $\sigma_\theta = 39.7''$ . Es zeigt sich, dass die Beobachtungsunsicherheit der markanten Punkte um etwa den Faktor sechs größer ist als die der Zielzeichen. Um die gleiche Präzision der Registrier-

**Abbildung 5.11:** Darstellung der Verkettung und Konfidenzellipsen (Wahrscheinlichkeitsniveau: 68%, 1000-fach vergrößert) der Datensätze 1 (links) und 2 (rechts).

parameter zu erreichen, werden somit etwa 36-mal so viele markante Punkte wie Zielzeichen benötigt. Da in den beiden betrachteten Datensätzen die durchschnittliche Anzahl der markanten Punkte höher ist, kann hier die Präzision der Registrierung durch die Integration der markanten Punkte gesteigert werden.

**Tabelle 5.6:** Vergleich der Restklaffungen und Unsicherheiten in Lage und Höhe für die Kette an Registrierungen mittels Zielzeichen, ICP und markanter Punkte.

Registrierung	Datensatz 1			Datensatz 2		
	Restklaffung	Unsicherheit		Restklaffung	Unsicherheit	
		Lage	Höhe		Lage	Höhe
Zielzeichen	39.9 mm	5.7 mm	11.9 mm	11.9 mm	4.4 mm	8.7 mm
ICP	110.8 mm	–	–	124.9 mm	–	–
Markante Punkte	12.5 mm	4.3 mm	8.6 mm	7.1 mm	3.6 mm	6.8 mm

Zusammenfassend ist zur Integration der zusätzlichen Beobachtungen festzuhalten, dass durch sie die Präzision und Zuverlässigkeit der Registrierung gesteigert werden. Durch die Einbeziehung der Zielzeichenebenen werden insbesondere Registrierungen mit ungünstigen Scanner-Zielzeichen-Geometrien verbessert. Durch die Ergänzung markanter Punkte wird nicht nur die Registrierunsicherheit reduziert, sondern aufgrund der höheren Beobachtungsanzahl auch die Möglichkeit geschaffen, zusätzliche Parameter (z.B. Varianzkomponenten) mitzuschätzen.

## 6. Fazit und Ausblick

Zur vollständigen und abschattungsarmen Aufnahme eines Messobjektes werden meist mehrere TLS-Standpunkte benötigt. Die Scans der einzelnen Standpunkte müssen anschließend miteinander zu einer Gesamtpunktwolke registriert werden. Die Unsicherheit der Registrierung mittels identischer Punkte, z. B. Zielzeichen, hängt, wie in der vorliegenden Dissertation beschrieben, von zwei Einflussgrößen ab: (1) der Beobachtungsunsicherheit und (2) der geometrischen Netzkonfiguration der Registrierung. Auf Basis von Simulationen, empirischen Laboruntersuchungen sowie realen Registrierdatensätzen untersucht die vorliegende Arbeit Möglichkeiten zur Reduktion der Registrierunsicherheit von TLS-Punktwolken.

Die Veröffentlichungen A bis C behandeln die Unsicherheit der Registrierbeobachtungen. Die Publikationen D und E führen zusätzliche Beobachtungen in die Registrierung ein, wodurch die Konfiguration dieser verbessert wird. Die Erkenntnisse sind in vier Hauptaspekten zusammengefasst:

### 1. Reduktion der Beobachtungsunsicherheit

Die Arbeit untersucht auf Basis von Wiederholungsscans empirisch den Einfluss verschiedener Algorithmen zur Schätzung der Zielzeichenkoordinaten sowie unterschiedliche Zielzeichendesigns. Die Untersuchungen zeigen, dass der Algorithmus mittels Kreuzkorrelationen zu präziseren Koordinaten führt als die anderen Verfahren. Außerdem wird das neue BOTAS-Zielzeichen eingeführt, welches relativ zu den anderen getesteten Zielzeichen zu geringeren Unsicherheiten führt. Durch die Verwendung des Kreuzkorrelationsalgorithmus sowie des BOTAS-Zielzeichens wird die Beobachtungsunsicherheit reduziert und so die zielzeichenbasierte Registrierung verbessert.

### 2. Quantifizierung und Auswirkung der Beobachtungsunsicherheit

Eine genaue Quantifizierung der Beobachtungsunsicherheit ist ein essentieller Schritt zur Optimierung des Registriernetzes. Die Arbeit demonstriert, wie sich die Beobachtungsunsicherheit mithilfe von empirischen stochastischen Modellen für verschiedene Distanzen und Scanner quantifizieren lässt. Die Auswirkungen der verschiedenen Ansätze zur Unsicherheitsbeschreibung werden anhand eines realen Datensatzes gezeigt. Es wird festgestellt, dass die verschiedenen Modelle zu unterschiedlichen Registrierparametern führen. Aus den Untersuchungen lässt sich die Empfehlung ableiten entweder empirische stochastische Modelle für die Beobachtungen zu verwenden oder bei Verwendung der Herstellerangaben eine Varianzkomponentenanpassung anzuschließen.

### 3. Analyse der zeitlichen Beobachtungsstabilität

Einen weiteren Schwerpunkt der Dissertation bildet die Untersuchung der zeitlichen Stabilität von Registrierbeobachtungen. Die Arbeit zeigt erstmals, dass durch die Aufwärmphase des Scanners die Beobachtungen der Registrierung beeinflusst werden – insbesondere die Zenitwinkel. Dieser Aufwärmeffekt stellt zwar eine weitere Unsicherheitsquelle des Scanners dar, die Analyse der Versuchsdaten zeigt jedoch, dass die Instabilität der Beobachtungen scannerinterne Ursachen hat und somit eine Aufgabe der Systemkalibrierung darstellt. Zur Eliminierung der Instabilitäten und zur Reduktion der Beobachtungsunsicherheit wird empfohlen, den Scanner vor der Datenerfassung mittels Probescans aufzuwärmen.

### 4. Integration zusätzlicher Beobachtungen in die Registrierung

Die Integration zusätzlicher Beobachtungen in den Registrierungsprozess trägt erfolgreich zur Verbesserung der Registrierqualität bei. Durch die Einbeziehung von Orientierungsdaten der Zielzeichenebenen wird insbesondere bei ungünstigen Scanner-Zielzeichen-Geometrien die Präzision und Zuverlässigkeit verbessert. Zusätzlich wird gezeigt, dass durch die Ergänzung markanter Punkte nicht nur die Registrierunsicherheiten reduziert werden, sondern auch zusätzliche Parameter, wie Varianzkomponenten,

aufgrund der höheren Beobachtungsanzahl mitgeschätzt werden können. Dies eröffnet, wie im Folgenden beschrieben, viele Perspektiven für zukünftige Forschungsarbeiten.

Zusammenfassend leistet diese Dissertation Beiträge zur Erreichung des in Kapitel 1 definierten Ziels: die Reduktion der Registrierunsicherheit von TLS-Punktwolken. Die Erkenntnisse verbessern die Qualität der registrierten Gesamtpunktwolke und bieten somit allen Anwendungsfeldern, in denen TLS eingesetzt wird, neue Potentiale und Chancen. Durch die Verbesserungen können beispielsweise die BIM-Modelle genauer modelliert werden oder im Bereich der Deformationsanalyse kleinere Signifikanzgrenzen erreicht werden.

Nicht alle in dieser Arbeit untersuchten Aspekte konnten umfänglich geklärt werden. Bei der Quantifizierung der Beobachtungsunsicherheit beispielsweise konzentriert sich die vorliegende Dissertation auf die Varianz der Beobachtungen, d.h. auf die Hauptdiagonalen der Beobachtungskovarianzmatrix. Korrelationen der TLS-Beobachtungen wurden hier nicht behandelt, sie sind Gegenstand anderer Forschungsarbeiten wie Jost [2023] und Kerekes [2023]. Auch die in Veröffentlichung D festgestellten zeitvarianten Instrumentenabweichungen werden in dieser Dissertation nicht abschließend untersucht. Medić et al. [2019b] zeigen bereits, dass eine Kalibrierung von Scannerabweichungen mittels markanter Punkte möglich ist. Die Autoren beziehen sich hierbei jedoch auf eine Kalibrierung von nur einem Standpunkt aus. Dieser Aspekt kombiniert mit den Möglichkeiten aus Veröffentlichung E, der Registrierung mithilfe von markanten Punkten, bietet große Chancen den zeitvarianten Instrumentenabweichungen aus Publikation C entgegenzuwirken. Durch die große Anzahl an Beobachtungen bei der Registrierung mittels markanter Punkte ist es zum Beispiel denkbar, zukünftig einzelne Kalibrierparameter während der Registrierung mitzuschätzen. Diese könnten bei Bedarf sogar mehrfach innerhalb eines Scanprojekts bestimmt werden. Im Gegensatz zu bisherigen Forschungsarbeiten wäre dies durch die Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation erstmals auch für Abweichungen möglich, welche zur Bestimmung mehrere Standpunkte benötigen, wie beispielsweise die Additionskonstante.

## 7. Auflistung weiterer Veröffentlichungen

Neben den in Kapitel 4 zusammengefassten Veröffentlichungen wurden noch weitere Beiträge und Artikel publiziert. Die Publikationen Janßen et al. [2018] und Janßen et al. [2019a] stehen dem Thema dieser Dissertation zwar inhaltlich nahe, sie durchliefen jedoch keinen Begutachtungsprozess. Die Veröffentlichungen Dreier et al. [2021] und Holst et al. [2021] wurden hingegen begutachtet, allerdings stehen sie in keinem unmittelbaren inhaltlichen Zusammenhang mit der vorliegenden Dissertation und es handelt sich bei ihnen um Publikationen mit Koautorenschaften.

- Dreier, A., Janßen, J., Kuhlmann, H., & Klingbeil, L. (2021). Quality analysis of direct georeferencing in aspects of absolute accuracy and precision for a UAV-based laser scanning system. *Remote Sensing*, 13(18), 3564. doi.org/10.3390/rs13183564
- Holst, C., Janßen, J., Schmitz, B., Blome, M., Dercks, M., Schoch-Baumann, A., Blöthe, J., Schrott, L., Kuhlmann, H., & Medić, T. (2021). Increasing spatio-temporal resolution for monitoring alpine solifluction using terrestrial laser scanners and 3D vector fields. *Remote Sensing*, 13(6), 1192. doi.org/10.3390/rs13061192
- Janßen, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2018). Registrierung mit Targets: Wie genau ist das? In *Schriftenreihe DVW: Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS2018)*, Band 93 (S. 75–94)
- Janßen, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2019a). Zielzeichenbasierte Registrierung von Laserscans: Erhöhung der Genauigkeit durch Algorithmus und Zielzeichendesign. In T. Luhmann & C. Schumacher (Hrsg.), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019* (S. 59–70). Wichmann



# Abkürzungen

**BIM** Building Information Modeling

**BOTA8** Bonn Target mit 8fach-Teilung

**ER** Erweiterte Registrierung

**ESM** Empirisch stochastisches Modell

**ICP** Iterative Closest Point Algorithmus

**Lidar** Light Detecting and Ranging

**OR** Original Registrierung

**TLS** Terrestrisches Laserscanning



# Literaturverzeichnis

- Abmayr, T., Härtl, F., Hirzinger, G., Burschka, D., & Fröhlich, C. (2008). A correlation based target finder for terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 2(3), 131–137.
- Akroyd, J., Mosbach, S., Bhave, A., & Kraft, M. (2021). Universal digital twin - a dynamic knowledge graph. *Data-Centric Engineering*, 2, 2–25.
- Alba, M., Fregonese, L., Prandi, F., Scaioni, M., & Valgoi, P. (2006). Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 6.
- Ammar, A., Nassereddine, H., AbdulBaky, N., AbouKansour, A., Tannoury, J., Urban, H., & Schranz, C. (2022). Digital twins in the construction industry: A perspective of practitioners and building authority. *Frontiers in Built Environment*, 8, 834671.
- Bahnert, G. (1986). Zur Genauigkeit der geodätischen Refraktionsbestimmung. *Vermessungstechnik*, 34(10), 345–348.
- Barbarella, M., Fiani, M., & Lugli, A. (2013). Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 398–418.
- Barnea, S. & Filin, S. (2012). Extraction of objects from terrestrial laser scans by integrating geometry image and intensity data with demonstration on trees. *Remote Sensing*, 4(1), 88–110.
- Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Kavulya, G., & Calis, G. (2011). Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. *Automation in Construction*, 20(5), 649–658.
- Besl, P. J. & McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-D shapes. In P. S. Schenker (Hrsg.), *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, Band 1611 (S. 586–606). SPIE.
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keaney, E., Kemp, A., Luck, A., Pawsey, N., Saville, S., Schooling, J., Sharp, M., Smith, T., Tennison, J., Whyte, J., Wilson, A., & Makri, C. (2018). *Gemini Principles*. Technical report.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). Building information modeling: Why? what? how? In A. Borrmann, M. König, C. Koch, & J. Beetz (Hrsg.), *Building Information Modeling* (S. 1–24). Springer.
- Bucksch, A. & Khoshelham, K. (2012). Localized registration of point clouds of botanic trees. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(3), 631–635.
- Catharia, O., Richard, F., Vignoles, H., Véron, P., Aoussat, A., & Segonds, F. (2023). Smartphone lidar data: A case study for numerisation of indoor buildings in railway stations. *Sensors*, 23(4), 1967.
- Chen, M., Wang, S., Wang, M., Wan, Y., & He, P. (2017). Entropy-based registration of point clouds using terrestrial laser scanning and smartphone GPS. *Sensors*, 17(12), 197.
- Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y. (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, 18(5), 1641.
- Chetverikov, D., Svirko, D., Stepanov, D., & Krsek, P. (2002). The trimmed iterative closest point algorithm. In *Object recognition supported by user interaction for service robots*, Band 3 (S. 545–548).
- Chiang, K. W., Tsai, G.-J., & Zeng, J. C. (2021). Mobile mapping technologies. In W. Shi, M. F. Goodchild, M. Batty, M.-P. Kwan, & A. Zhang (Hrsg.), *The Urban Book Series* (S. 439–465). Springer.
- Chow, J., Ebeling, A., & Teskey, B. (2010). Low cost artificial planar target measurement techniques for terrestrial laser scanning. In A. Ebeling & B. Teskey (Hrsg.), *Proceedings of the FIG Congress 2010: Facing the Challenges—Building the Capacity* (S. 11–16).

- Chow, J. C. K., Teskey, W. F., & Lovse, J. (2011). In-situ self-calibration of terrestrial laser scanners and deformation analysis using both signalized targets and intersection of planes for indoor applications. In *Proceedings of the 14th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis, Hong Kong, China* (S. 2–4).
- Costantino, D., Voza, G., Pepe, M., & Alfio, V. S. (2022). Smartphone LiDAR technologies for surveying and reality modelling in urban scenarios: Evaluation methods, performance and challenges. *Applied System Innovation*, 5(4), 63.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (2023). FOR 5455: Deformation analysis based on terrestrial laser scanner measurements (TLS-Defo). <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/490989047>. (letzter Aufruf 2.1.2024).
- Dong, Z., Liang, F., Yang, B., Xu, Y., Zang, Y., Li, J., Wang, Y., Dai, W., Fan, H., Hyypä, J., & Stilla, U. (2020). Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 327–342.
- Dreier, A., Janßen, J., Kuhlmann, H., & Klingbeil, L. (2021). Quality analysis of direct georeferencing in aspects of absolute accuracy and precision for a UAV-based laser scanning system. *Remote Sensing*, 13(18), 3564. doi.org/10.3390/rs13183564.
- Eling, D. (2009). *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. DGK Reihe C, Heft Nr. 641, Leibniz Universität Hannover.
- Fan, L., Smethurst, J. A., Atkinson, P. M., & Powrie, W. (2015). Error in target-based georeferencing and registration in terrestrial laser scanning. *Computers and Geosciences*, 83, 54–64.
- Fangning, H. & Ayman, H. (2016). A closed-form solution for coarse registration of point clouds using linear features. *Journal of Surveying Engineering*, 142(3), 04016006.
- Farsi, M., Daneshkhah, A., Hosseinian-Far, A., & Jahankhani, H. (2020). *Digital Twin Technologies and Smart Cities*. Springer.
- Friedli, E., Presl, R., & Wieser, A. (2019). Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In *Proceedings of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Athens, Greece* (S. 15–17).
- Förstner, W. (1987). Reliability analysis of parameter estimation in linear models with applications to mensuration problems in computer vision. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 40(3), 273–310.
- Ge, X., Hu, H., & Wu, B. (2019). Image-guided registration of unordered terrestrial laser scanning point clouds for urban scenes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(11), 9264–9276.
- Ge, X. & Wunderlich, T. (2015). Target identification in terrestrial laser scanning. *Survey Review*, 47(341), 129–140.
- Ge, X. & Wunderlich, T. (2016). Surface-based matching of 3D point clouds with variable coordinates in source and target system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 111, 1–12.
- Gojčić, Z., Zhou, C., Wegner, J. D., Guibas, L. J., & Birdal, T. (2020). End-to-end globally consistent registration of multiple point clouds. In *Computer Vision and Pattern Recognition: Workshop on Deep Declarative Networks (CVPR 2020)* ETH Zürich.
- Gordon, S., Davies, N., Keighley, D., Lichti, D., & Franke, J. (2005). A rigorous rangefinder calibration method for terrestrial laser scanners. *Journal of spatial science*, 50(2), 91–96.
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M., & Tsakiri, M. (2001). Metric performance of a high-resolution laser scanner. In S. F. El-Hakim & A. Gruen (Hrsg.), *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, Band 4309 (S. 174–184). SPIE.
- Grafarend, E. W. & Sansò, F. (1985). *Optimization and design of geodetic networks*. Springer.
- Grant, D., Bethel, J., & Crawford, M. (2012). Point-to-plane registration of terrestrial laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 72, 16–26.
- Groß, J., Ošep, A., & Leibe, B. (2019). AlignNet-3D: Fast point cloud registration of partially observed objects. In *2019 International Conference on 3D Vision (3DV)* (S. 623–632). IEEE.

- Haddeler, G., Aybakan, A., Akay, M. C., & Temeltas, H. (2020). Evaluation of 3D LiDAR sensor setup for heterogeneous robot team. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 100(2), 689–709.
- Hesse, C. & Ehm, M. (2013). Verfahren und Grenzen der automatischen Registrierung von Punktwolken. In *Schriftenreihe DVW: Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS2013)*, Band 72 (S. 41–65).
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., & Neuner, H. (2013). Auswertung geodäsischer Überwachungsmessungen. In M. Möser, G. Müller, & H. Schlemmer (Hrsg.), *Handbuch der Geodäsie*. Wichmann.
- Holst, C., Janßen, J., Schmitz, B., Blome, M., Dercks, M., Schoch-Baumann, A., Blöthe, J., Schrott, L., Kuhlmann, H., & Medić, T. (2021). Increasing spatio-temporal resolution for monitoring alpine solifluction using terrestrial laser scanners and 3D vector fields. *Remote Sensing*, 13(6), 1192. doi.org/10.3390/rs13061192.
- Janßen, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2018). Registrierung mit Targets: Wie genau ist das? In *Schriftenreihe DVW: Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS2018)*, Band 93 (S. 75–94).
- Janßen, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2019a). Zielzeichenbasierte Registrierung von Laserscans: Erhöhung der Genauigkeit durch Algorithmus und Zielzeichendesign. In T. Luhmann & C. Schumacher (Hrsg.), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019* (S. 59–70). Wichmann.
- Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2021). Assessing the temporal stability of terrestrial laser scanners during long-term measurements. In A. Kopáčík, P. Kyrinovič, J. Erdélyi, R. Paar, & A. Marendić (Hrsg.), *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying* (S. 69–84). Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-51953-7\_6.
- Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2022). Target-based terrestrial laser scan registration extended by target orientation. *Journal of Applied Geodesy*, 16(2), 91–106. doi.org/10.1515/jag-2020-0030.
- Janßen, J., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2024). Keypoint-based registration of TLS point clouds using a statistical matching approach. *Journal of Applied Geodesy*, 18(2), 267–284. doi.org/10.1515/jag-2022-0058.
- Janßen, J., Medić, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2019b). Decreasing the uncertainty of the target center estimation at terrestrial laser scanning by choosing the best algorithm and by improving the target design. *Remote Sensing*, 11(7), 845. doi.org/10.3390/rs11070845.
- Jost, B. (2023). *Strategies for the Empirical Determination of the Stochastic Properties of Terrestrial Laser Scans*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Jurek, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2017). Impact of spatial correlations on the surface estimation based on terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 11(3), 143–155.
- Kahmen, H. (2005). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. Walter de Gruyter.
- Kerekes, G. (2023). *An elementary error model for terrestrial laser scanning*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Kern, F., Siegrist, B., Huxhagen, U., & Mehlig, S. (2010). Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 117, 170–175.
- Kersten, T. P. (2007). Virtual reality model of the northern sluice of the ancient dam in Marib/Yemen by combination of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for archaeological applications. *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), 339–354.
- Koch, K. (1997). *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen (4. Auflage)*. Dümmler.
- Kregar, K., Grigillo, D., & Kogoj, D. (2013). High precision target center determination from a point cloud. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II(5/W2), 139–144.

- Kuhlmann, H. & Holst, C. (2017). Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In W. Freeden & R. Rummel (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie – Handbuch der Geodäsie* (S. 167–212). Springer.
- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., & Niemeier, W. (2013). Ingenieurgeodäsie - Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. *Zeitung für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 6/2013, 391–399.
- Leica Geosystems (2013). Leica ScanStation P20 Datenblatt. [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com). Letzter Aufruf: 04 Feb. 2019.
- Leica Geosystems (2018). Leica RTC360 Technische Daten. [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com). Letzter Aufruf: 29 Dez. 2023.
- Li, X., Yang, B., Xie, X., Li, D., & Xu, L. (2018). Influence of waveform characteristics on lidar ranging accuracy and precision. *Sensors*, 18(4), 1156.
- Liang, Y.-B., Zhan, Q.-M., Che, E.-Z., Chen, M.-W., & Zhang, D.-L. (2014). Automatic registration of terrestrial laser scanning data using precisely located artificial planar targets. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 11(1), 69–73.
- Lichti, D., Stewart, M., Tsakiri, M., & Snow, A. (2000). Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system. *Geomatics Research Australasia*, (S. 1–24).
- Linzer, F., Papčová, M., & Neuner, H. (2021). Quantification of systematic distance deviations for scanning total stations using robotic applications. In A. Kopáček, P. Kyrinovič, J. Erdélyi, R. Paar, & A. Marendić (Hrsg.), *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying* (S. 98–108). Springer.
- Liu, H., Zhang, X., Xu, Y., & Chen, X. (2020). Efficient coarse registration of pairwise TLS point clouds using ortho projected feature images. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 255.
- Maier-Hein, L., Franz, A. M., Dos Santos, T. R., Schmidt, M., Fangerau, M., Meinzer, H.-P., & Fitzpatrick, J. M. (2011). Convergent iterative closest-point algorithm to accommodate anisotropic and inhomogenous localization error. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 34(8), 1520–1532.
- Markiewicz, J. & Zawieska, D. (2020). Analysis of the selection impact of 2D detectors on the accuracy of image-based TLS data registration of objects of cultural heritage and interiors of public utilities. *Sensors*, 20(11), 3277.
- Markiewicz, J. S. (2016). The use of computer vision algorithms for automatic orientation of terrestrial laser scanning data. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3, 315–322.
- Mechelke, K., Kersten, T., & Lindstaedt, M. (2008). Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme-Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. In T. Luhmann & C. Müller (Hrsg.), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008* (S. 317–328). Wichmann.
- Medić, T., Holst, C., Janßen, J., & Kuhlmann, H. (2019a). Empirical stochastic model of detected target centroids: Influence on registration and calibration of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 13(3), 179–197. doi.org/10.1515/jag-2018-0032.
- Medić, T., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017). Towards system calibration of panoramic laser scanners from a single station. *Sensors*, 17(5), 1145.
- Medić, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2019b). Automatic in-situ self-calibration of a panoramic TLS from a single station using 2D keypoints. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4, 413–420.
- Medić, T., Ruttner, P., Holst, C., & Wieser, A. (2023). Keypoint-based deformation monitoring using a terrestrial laser scanner from a single station: Case study of a bridge pier. In *Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring, JISDM2022* (S. 167–175). Editorial de la Universitat Politècnica de València.
- Medić, T., Kuhlmann, H., & Holst, C. (2021). A priori vs. in-situ terrestrial laser scanner calibration in the context of the instability of calibration parameters. In A. Kopáček, P. Kyrinovič, J. Erdélyi, R.

- Paar, & A. Marendić (Hrsg.), *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying* (S. 128–141). Springer.
- Mikhail, E. M. & Ackermann, F. E. (1976). *Observations and least squares*. Harper and Row.
- Moritani, R., Kanai, S., Date, H., Watanabe, M., Nakano, T., & Yamauchi, Y. (2018). Cylinder-based simultaneous registration and model fitting of laser-scanned point clouds for accurate as-built modeling of piping system. *Computer-Aided Design and Applications*, 15(5), 720–733.
- Muralikrishnan, B. (2021). Performance evaluation of terrestrial laser scanners – A review. *Measurement Science and Technology*, 32(7), 072001.
- Muralikrishnan, B., Rachakonda, P., Lee, V., Shilling, M., Sawyer, D., Cheok, G., & Cournoyer, L. (2017). Relative range error evaluation of terrestrial laser scanners using a plate, a sphere, and a novel dual-sphere-plate target. *Measurement*, 111, 60–68.
- Muralikrishnan, B., Rachakonda, P., Shilling, M., Lee, V., Blackburn, C., Sawyer, D., Cheok, G., & Cournoyer, L. (2016). Report on the May 2016 ASTM E57.02 instrument runoff at NIST, Part 1 – Background information and key findings, Nr. 8152. *National Institute of Standards and Technology, Interagency/Internal Report (NISTIR)*.
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden*. Walter de Gruyter.
- Omidalizarandi, M., Paffenholz, J.-A., & Neumann, I. (2018). Automatic and accurate passive target centroid detection for applications in engineering geodesy. *Survey Review*, 51, 318–333.
- Oostwegel, L. J. N., Jaud, S., Muhič, S., & Malovrh Rebec, K. (2022). Digitalization of culturally significant buildings: ensuring high-quality data exchanges in the heritage domain using OpenBIM. *Heritage Science*, 10(1), 10.
- Paffenholz, J.-A. (2012). *Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover.
- Paffenholz, J.-A., Alkhatib, H., & Kutterer, H. (2010). Direct geo-referencing of a static terrestrial laser scanner. *Journal of Applied Geodesy*, 4(3), 115–126.
- Pejić, M., Ogrizović, V., Božić, B., Milovanović, B., & Marošan, S. (2014). A simplified procedure of metrological testing of the terrestrial laser scanners. *Measurement*, 53, 260–269.
- Pomerleau, F., Colas, F., & Siegwart, R. (2015). A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics. *Foundations and Trends in Robotics*, 4(1), 1–104.
- Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., & Scaioni, M. (2014). Laser scan registration using planar features. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 40, 501–508.
- Rachakonda, P., Muralikrishnan, B., Cournoyer, L., Cheok, G., Lee, V., Shilling, M., & Sawyer, D. (2017a). Methods and considerations to determine sphere center from terrestrial laser scanner point cloud data. *Measurement Science and Technology*, 28(10), 105001.
- Rachakonda, P., Muralikrishnan, B., Sawyer, D., & Wang, L. (2017b). Method to determine the center of contrast targets from terrestrial laser scanner data. In *Proceedings of the 32nd ASPE Annual Meeting* (S. 223–229).
- Rachakonda, P., Muralikrishnan, B., Shilling, M., Cheok, G., Lee, V., Blackburn, C., Everett, D., & Sawyer, D. (2016). Targets for relative range error measurement of 3D imaging systems. In *Journal of the CMSC*, Band 12.
- Raj, T., Hashim, F. H., Huddin, A. B., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A survey on lidar scanning mechanisms. *Electronics*, 9(5), 741.
- Rashidi, M., Mohammadi, M., Sadeghlou Kivi, S., Abdolvand, M. M., Truong-Hong, L., & Samali, B. (2020). A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: Review and future directions. *Remote Sensing*, 12(22), 3796.
- Reshetyuk, Y. (2006). Investigation of the influence of surface reflectance on the measurements with the terrestrial laser scanner Leica HDS 3000. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)*, 131(2), 96–103.
- Reshetyuk, Y. (2010). Direct georeferencing with GPS in terrestrial laser scanning. *Zeitschrift für*

- Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), 135(3), 151–159.
- Royo, S. & Ballesta-Garcia, M. (2019). An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. *Applied Sciences*, 9(19), 4093.
- Schäfer, T. (2017). *Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche*. Dissertation, Technische Universität München.
- Schill, F. J. (2018). *Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Schmitz, B., Holst, C., Medić, T., Lichti, D., & Kuhlmann, H. (2019). How to efficiently determine the range precision of 3D terrestrial laser scanners. *Sensors*, 19(6), 1466.
- Schweitzer, J. & Schwieger, V. (2014). Modeling and propagation of quality parameters in engineering geodesy processes in civil engineering. In H. Kutterer, F. Seitz, H. Alkhatib, & M. Schmidt (Hrsg.), *The 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems* (S. 163–168). Springer.
- Sharp, G. C., Lee, S. W., & Wehe, D. K. (2002). ICP registration using invariant features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(1), 90–102.
- Soudarissanane, S. (2016). *The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry*. Dissertation, Delft University of Technology.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 66(4), 389–399.
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7), 829–843.
- Theiler, P. (2015). *Automated Registration of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds*. Dissertation, ETH Zürich.
- Theiler, P. W., Wegner, J. D., & Schindler, K. (2015). Globally consistent registration of terrestrial laser scans via graph optimization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109, 126–138.
- Valanis, A. & Tsakiri, M. (2004). Automatic target identification for laser scanners. In *Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey*.
- Weinmann, M., Weinmann, M., Hinz, S., & Jutzi, B. (2011). Fast and automatic image-based registration of TLS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), 62–70.
- Wiedemann, W. & Holst, C. (2023). Identifying individual rocks within laser scans for a rigorous deformation analysis of water dams. In *Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring, JISDM2022* (S. 327–334). Editorial de la Universitat Politècnica de València.
- Wieser, A., Kuhlmann, H., Schwieger, V., & Niemeier, W. (2016). Ingenieurgeodäsie – eine Einführung. In W. Freeden & R. Rummel (Hrsg.), *Ingenieurgeodäsie – Handbuch der Geodäsie* (S. 1–22). Springer.
- Wiltschko, T. (2004). *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Wujanz, D., Barazzetti, L., Previtali, M., Scaioni, M., et al. (2019). A comparative study among three registration algorithms: Performance, quality assurance and accuracy. *ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 42(2), 779–786.
- Wujanz, D., Burger, M., Tschirschwitz, F., Nietzsche, T., Neitzel, F., & Kersten, T. (2018a). Determination of intensity-based stochastic models for terrestrial laser scanners utilising 3D-point clouds. *Sensors*, 18(7), 2187.
- Wujanz, D., Schaller, S., Gielsdorf, F., & Gründig, L. (2018b). Plane-based registration of several thousand laser scans on standard hardware. *The*

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 1207–1212.
- Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., & Reidl, F. (2013). Objektivierung von Spezifikationen terrestrischer Laserscanner. In *Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie*, Band 20.
- Yang, B., Zang, Y., Dong, Z., & Huang, R. (2015). An automated method to register airborne and terrestrial laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109, 62–76.
- Yang, R., Meng, X., Xiang, Z., Li, Y., You, Y., & Zeng, H. (2020). Establishment of a new quantitative evaluation model of the targets' geometry distribution for terrestrial laser scanning. *Sensors*, 20(2), 555.
- Yang, R., Meng, X., Yao, Y., Chen, B. Y., You, Y., & Xiang, Z. (2018). An analytical approach to evaluate point cloud registration error utilizing targets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 143, 48–56.
- Yi, C., Xing, H., Wu, Q., Zhang, Y., Wei, M., Wang, B., & Zhou, L. (2018). Automatic detection of cross-shaped targets for laser scan registration. *IEEE Access*, 6, 8483–8500.
- Zaczek-Peplinska, J. & Kowalska, M. (2017). Terrestrial laser scanning in monitoring of anthropogenic objects. *Geodesy and Cartography*, 66(2), 347–364.
- Zhang, X., Glennie, C., & Kusari, A. (2015). Change detection from differential airborne LiDAR using a weighted anisotropic iterative closest point algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(7), 3338–3346.
- Zámečnicková, M. & Neuner, H. (2018). Methods for quantification of systematic distance deviations under incidence angle with scanning total stations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 268–284.
- Zogg, H.-M. (2008). *Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System*. Dissertation, ETH Zürich.