

---

# Synergetische Nutzung von statischen und kinematischen Laserscans

Frank GIELSDORF, Benjamin RABISCH, Daniel WUJANZ, Eric BERGHOLZ,  
Christian CLEMEN

## Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Vorzüge des genauen statischen mit dem schnellen kinematischen Scanning optimal verbindet. Die Unterschiede zwischen beiden Techniken werden aufgezeigt. Insbesondere wird auf das Problem der Drift beim kinematischen Scanning eingegangen. Es wird eine alternative Parametrisierung kinematischer Scandaten vorgestellt, welche als Voraussetzung für deren gemeinsame Ausgleichung mit statischen Scandaten dient. Anhand eines Testprojektes, welches mit beiden Verfahren aufgenommen wurde, wird die gemeinsame Auswertung beider Datensätze demonstriert. Es wird eine Möglichkeit, der direkten Referenzierung von Scandaten auf vorhandene Bauwerksgeometrie vorgeschlagen.

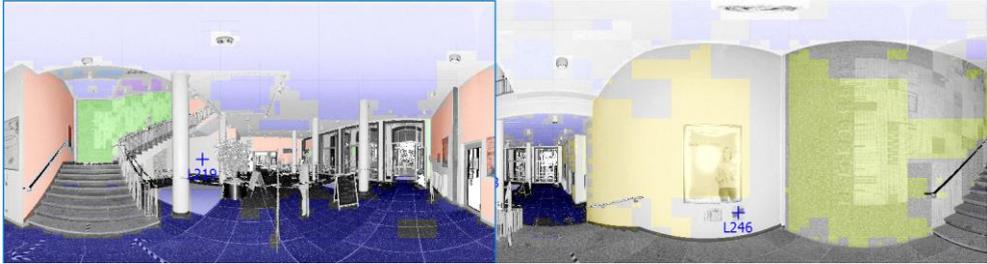
## 1 Vergleich der Verfahren

### 1.1 Statisches Laserscanning

Bei diesem Verfahren wird als Sensor ein Laserscanner genutzt, welcher im Prinzip wie ein extrem schnell messendes Tachymeter funktioniert. Der Scanner steht während der Messung fest auf einem Stativ. Bei den erfassten Messwerten handelt es sich um Kugelkoordinaten  $(\varphi, \zeta, d)$ , die jedoch in den meisten Fällen umgeformt als kartesische Koordinaten  $(x, y, z)$  in Punktwolken abgelegt werden. Ursprung des Koordinatensystems ist das Instrumentenzentrum.

Ein entscheidender Schritt in der Verarbeitung der Punktwolken ist deren Registrierung. Hierbei werden die Objektkoordinaten vom lokalen Koordinatensystem des Scanners in ein übergeordnetes (globales) Koordinatensystem transformiert. Hierfür werden häufig die Koordinaten korrespondierender Targets genutzt, welche in eine verkettete Punkttransformation eingeführt werden. Ein anderes weit verbreitetes Verfahren ist der ICP-Algorithmus (Iterative Closest Points), der direkte Korrespondenzen von Objektpunkten nutzt.

Im Programm SCANTRA (technet 2022) wurde eine paarweise Punktwolkentransformation realisiert, welche auf korrespondierenden Ebenen beruht. Dieses Verfahren vermeidet die beim ICP häufig auftretenden Samplingprobleme und liefert zudem eine wesentlich höhere Genauigkeit als die beiden oben angeführten Methoden (siehe Abbildung 1).



**Abb. 1:** Korrespondierende Ebenen in zwei statischen Laserscans

## 1.2 Kinematisches Laserscanning

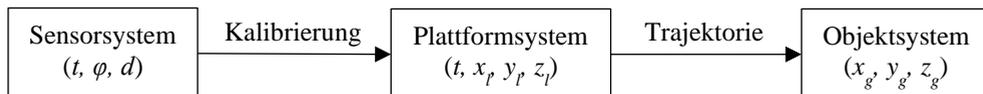
Beim kinematischen Laserscanning nutzt man eine Plattform mit mehreren Sensoren, die im Objektraum bewegt wird. Bei den Sensoren handelt es sich um Profils Scanner, Kameras, IMU (Inertial Measuring Unit) und im Falle des Mobile Mapping auch GNSS-Empfänger, wobei die beiden letztgenannten ausschließlich der Bestimmung der Trajektorie dienen.

Die Transformationsparameter zwischen den einzelnen Sensorsystemen und dem Plattform-Koordinatensystem sind fix und werden vor der Messung durch Kalibrierung bestimmt (KIM 2021). Die Transformationsparameter zwischen dem Plattformsystem und dem Objektkoordinatensystem werden fortlaufend ermittelt und gemeinsam mit dem Zeitpunkt der Messung abgelegt. Diese zeitlich geordnete Sequenz von Transformationsparametern wird üblicherweise als Trajektorie bezeichnet. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Ausschnitt einer solchen Sequenz.

```
%time x y z q0 q1 q2 q3 userfields
1623220971.15523 0.0098 0.0031 0.0406 0.687555 0.130056 -0.163827 0.695351
1623220971.16732 0.0099 0.0030 0.0406 0.687560 0.130035 -0.163804 0.695355
1623220971.17925 0.0099 0.0029 0.0407 0.687598 0.130016 -0.163772 0.695329
1623220971.18526 0.0100 0.0028 0.0408 0.687628 0.130018 -0.163749 0.695304
```

**Abb. 2:** Ausschnitt aus einer Trajektorien-Datei

Für die Transformation eines Koordinaten-Tupels vom Koordinatensystem des Sensors in das übergeordnete Objektkoordinatensystem sind daher zwei Transformationen erforderlich: Zum einen die Transformation vom Sensorsystem in das Plattformsystem und zum zweiten vom Plattformsystem in das Objektkoordinatensystem (siehe Abbildung 3). Die Synchronisation der beiden Transformationsschritte erfolgt dabei über die Zeit. Da für jede Koordinate im Plattformsystem auch ein Zeitstempel erfasst wird, können die Parameter für die Transformation in das Objektkoordinatensystem aus den dazugehörigen Werten der Trajektorie interpoliert werden.



**Abb. 3:** Transformationsschritte

### 1.3 Drift und SLAM-Verfahren

Ein spezielles Problem beim kinematischen Scanning stellt die sogenannte Drift der Trajektorie dar. Die Parameter der Trajektorie entstehen durch fortlaufende Aneinanderreihung von Messwerten, was eine Fehlerfortpflanzung analog einem offenen Polygonzug zur Folge hat.

$$\sigma_{yn} \sim \sqrt{\frac{1}{6}n(2n+1)(n+1)} \quad (1)$$

Formel (1) zeigt die Standardabweichung in Querrichtung der Trajektorie  $\sigma_y$  in Abhängigkeit von der Anzahl der aufdatierten Messwerte  $n$ . Die Funktion  $\sigma_y = f(n)$  ist dynamisch, was dazu führt, dass ohne Korrekturmaßnahmen der Fehler der Trajektorien-Parameter nach einer gewissen Zeit so anwachsen würde, dass er nicht mehr tolerierbar wäre.

In der Praxis nutzt man zwei Möglichkeiten, das Driftproblem zu lösen. Die erste dieser Möglichkeiten besteht darin, die Trajektorie durch Koordinatenbeobachtungen zu stützen. Letztere erhält man beim Mobile Mapping durch den bzw. die auf der Sensorplattform vorhandenen GNSS-Empfänger. Beim kinematischen Scanning mit tragbarer Sensor-Plattform können koordinatenmäßig bekannte Targets direkt aufgehalten werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Drift zu korrigieren, ist die Anwendung eines SLAM-Algorithmus (Simultaneous Localization and Mapping). Ein solcher Algorithmus (JUNG 2015) nutzt redundant erfasste Bereiche des Aufnahmeobjektes, um die Trajektorie zu verbessern. Voraussetzung für das Funktionieren eines solchen SLAM-Algorithmus ist daher eine Trajektorie mit „Schleifen“, bei der in hinreichend kleinen Abständen ein Bereich des Aufnahmeobjektes wiederholt erfasst wird.

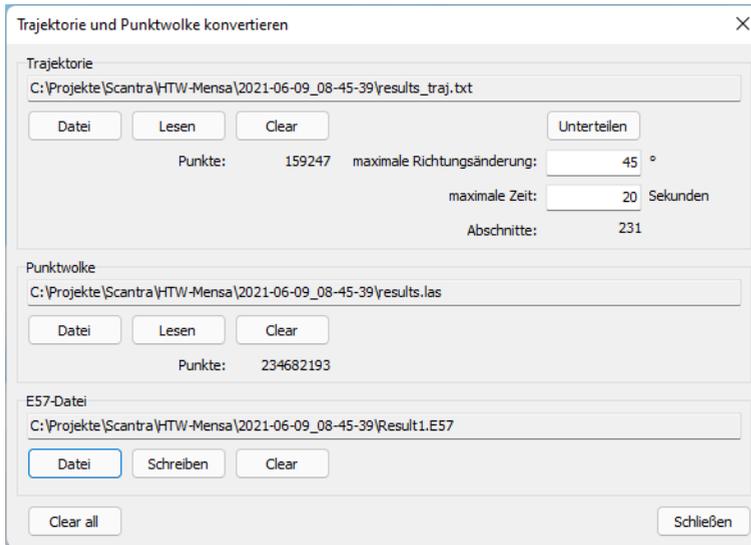
## 2 Alternative Parametrisierung kinematischer Scandaten

Kinematische Scandaten liegen im Allgemeinen in Form einer Trajektorie (\*.txt, \*.ply) und einer Objekt-Punktwolke (\*.las, \*.laz, \*.e57) vor. In dieser Form kann die Punktwolke zwar einer Datumstransformation unterzogen werden, für eine Korrektur von deren innerer Geometrie ist diese Art der Parametrisierung jedoch ungeeignet. Als Voraussetzung für die weiteren Schritte, wird daher eine modifizierte Parametrisierung verwendet.

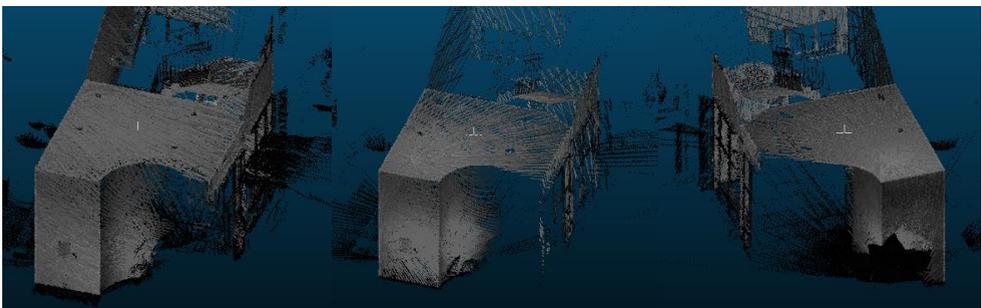
Grundgedanke hierbei ist, dass der durch die Drift verursachte Fehler, welcher in etwa mit der Potenz 1,5 der Zeit anwächst, für kurze Zeitabschnitte der Punktwolke vernachlässigt werden kann. Erst nach einer gewissen Zeit wird der durch die Drift verursachte Fehler relevant. Darauf basiert nun die Idee, die Punktwolke in eine Sequenz von hinreichend

kleinen Zeitabschnitten zu unterteilen, von denen jeder einzelne wie ein statischer Scan betrachtet werden kann.

Zunächst wird hierzu die Trajektorie unterteilt. Für jeden dieser Trajektorien-Abschnitte wird ein etwa in der Mitte liegender Trajektorienpunkt als virtuelles Scannerzentrum gewählt. Die zu diesem Zeitabschnitt gehörenden Objektpunkte werden anschließend, anhand der für den Trajektorienpunkt bekannten Transformationsparameter, in das System des virtuellen Scannerzentrums transformiert.



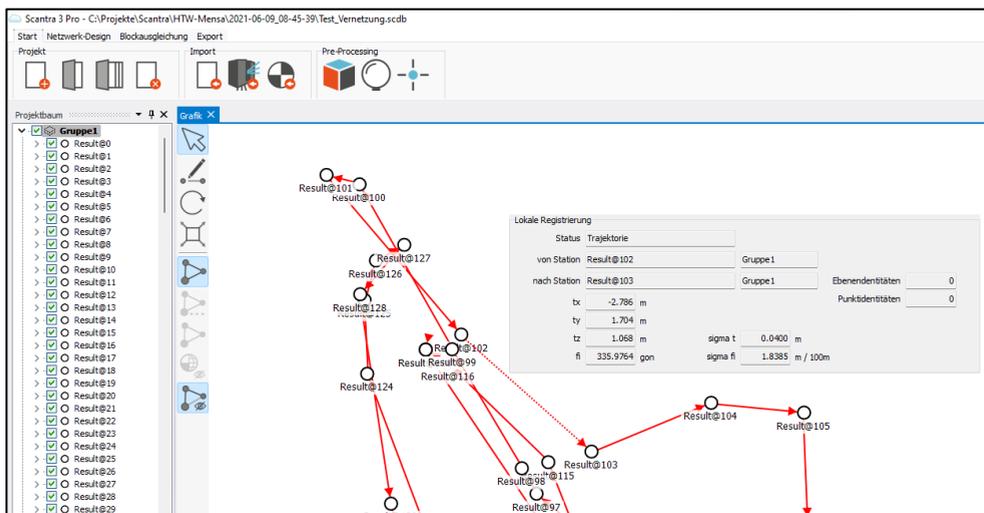
**Abb. 4:** Dialog für die Unterteilung der kinematische Punktwolke



**Abb. 5:** Drei aufeinander folgende quasi-statische Scans

Die so entstehende Sequenz von quasi-statischen Scans kann dann in eine E57-Datei geschrieben werden. Die geometrische Information der Punktwolke in dieser E57-Datei ist zunächst mit jener der ursprünglichen kinematischen Punktwolke identisch, es handelt sich lediglich um eine andere Form der Parametrisierung. Was ist nun damit gewonnen?

Für jeden quasi-statischen Scan innerhalb der Sequenz sind die Parameter für eine Transformation in das Objektkoordinatensystem bekannt. Aus diesen absoluten Transformationsparametern lassen sich leicht paarweise Transformationsparameter zwischen benachbarten quasi-statischen Scans ableiten. Tauscht man nun die absoluten Transformationsparameter gegen die paarweisen Transformationsparameter aus, so ändert das nichts an der inneren Geometrie der Punktwolke. Führt man aber diese paarweisen Transformationen als Beobachtungen in eine Ausgleichung ein, so eröffnet sich damit die Möglichkeit, durch Einführung weiterer Beobachtungen, die innere Geometrie der Punktwolke zu verbessern. Abbildung 5 zeigt eine solche Sequenz quasi-statischer Scans, welche durch beobachtete paarweise Transformationen verbunden sind.

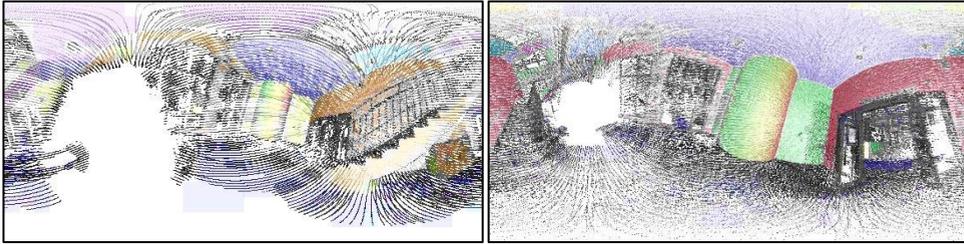


**Abb. 6:** Sequenz quasi-statischer Scans mit paarweisen Transformationen in SCANTRA

Es sei darauf hingewiesen, dass die paarweisen Transformationen hier mit relativ großen Standardabweichungen versehen werden.

### 3 Vernetzung und Korrektur der inneren Geometrie

Um die quasi-statischen Scans zunächst untereinander und später mit statischen Scans verbinden zu können, wird in jedem quasi-statischen Scan eine Ebenen-Detektion durchgeführt. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer solchen Ebenen-Detektion in zwei benachbarten quasi-statischen Scans.



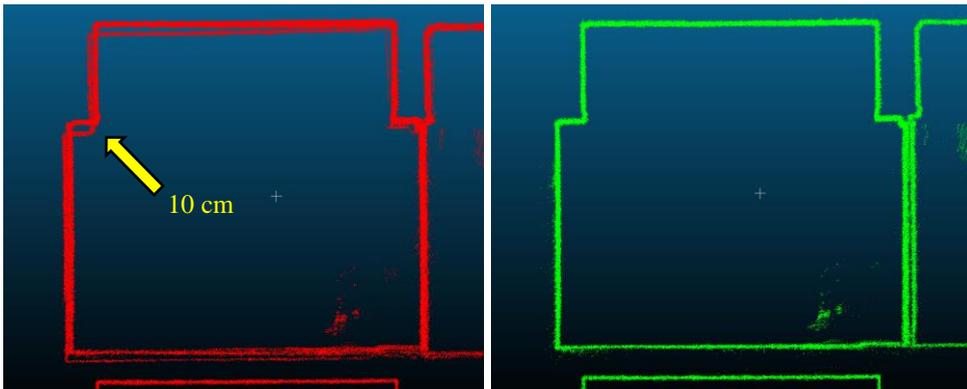
**Abb. 7:** Ergebnis der Ebenen-Detektion in quasi-statischen Scans

Es ist zu erkennen, dass die quasi-statischen Scans in Abbildung 7 korrespondierende Ebenen aufweisen. Um diese Information für eine Ausgleichung nutzen zu können, werden im nächsten Schritt alle Ebenen-Identitäten innerhalb der Scan-Sequenz gesucht. Im Falle von mindestens drei paarweise nicht komplanaren Ebenen-Paaren lassen sich durch Ausgleichung die paarweisen Transformationsparameter der beteiligten Scans berechnen.

Da es Fälle gibt, in denen Ebenen-Paare nur in ein oder zwei Richtungskomponenten vorhanden sind, werden die näherungsweise vorhandenen paarweisen Transformationsparameter  $(t_x, t_y, t_z, q_0, q_x, q_y, q_z)$  als direkt beobachtete Unbekannte mit adäquaten Standardabweichungen in die Ausgleichung eingeführt. Maßgeblich für das Ausgleichungsergebnis sind jedoch die wesentlich genaueren Ebenen-Identitäten.

Das Ergebnis dieser paarweisen Ausgleichung sind in jedem Falle paarweise Transformationsparameter mit vollständiger Kovarianzmatrix, welche in eine nachfolgende Blockausgleichung eingeführt werden können. Der Prozess der Generierung dieser paarweisen Transformationen soll im Folgenden als *Vernetzung* bezeichnet werden. Im vorliegenden Beispiel wurde die Vernetzung über eine Sequenz von 231 semi-statischen Scans durchgeführt. Im Ergebnis entstanden 4.840 paarweise Transformationen.

Gleicht man dieses Netz aus Stationen und Vernetzungs-Transformationen aus, kann damit bereits in einigen Fällen, wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, die innere Geometrie des SLAM-Ergebnisses verbessert werden.



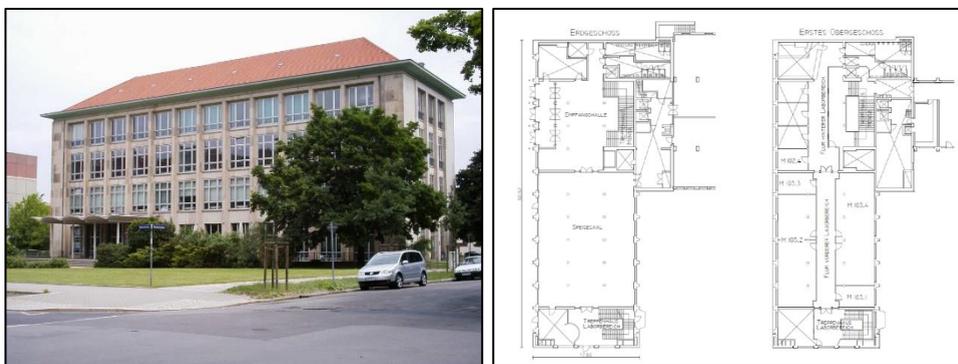
**Abb. 7:** Korrektur des SLAM-Ergebnisses: links vor, rechts nach der Blockausgleichung

## 4 Auswertung von statischen und kinematischen Scans

Die Kombination von statischen und kinematischen Laserscans kann aus verschiedenen Gründen sinnvoll sein. Typische Anwendungsfälle sind etwa die Ergänzung von unweigerlich auftretenden Verschattungen in stativgebundenen Scans mit handgetragenen Systemen (KERSTEN et al. 2018) oder die Stützung von kinematischen Scans mit geometrisch stabileren statischen Punktwolken.

### 4.1 Das Untersuchungsobjekt

Das Untersuchungsobjekt, an dem die weitere Vorgehensweise demonstriert werden soll, wurde von Herrn Benjamin Rabisch im Rahmen seiner Bachelorarbeit an der HTW Dresden aufgenommen. Es handelt sich um die ersten beiden Etagen eines Mensa-Gebäudes.



**Abb. 8:** Untersuchungsobjekt Mensa Reichenbachstraße Dresden

Das Gebäude hat eine Grundfläche von ca. 50 m x 20 m. Es wurde sowohl statisch als auch kinematisch gescannt.

Für das statische Scanning kam ein Faro Focus S150 zum Einsatz. Das statische Scan-Netz bestand aus 85 Stationen. Für die Datumsfestlegung wurden 51 tachymetrische Anschlusspunkte bestimmt, welche mit einer Koordinatenstandardabweichung von  $\pm 1$  mm in die Blockausgleichung eingeführt wurden. Die Auswertung der statischen Messung erfolgte mit dem Programm SCANTRA. Die resultierenden Positionsstandardabweichungen der ausgeglichenen Stationen lagen im Mittel bei 1 mm. Die größte Positionsstandardabweichung von 1,6 mm wies ein Außenscan auf.

Das kinematische Scanning erfolgte mit einem GeoSLAM ZEB Horizon. Die Zeitdauer der Messung betrug 26:33 min, bei einer Länge der Trajektorie von rund 655 m. Die Trajektorie lag als txt-Datei vor und umfasste 159.247 Parameter-Tupel. Die 234,7 Mio. Objektpunkte lagen als laz-Datei vor. Die kinematischen Daten waren bereits das Resultat einer Verarbeitung mit der GeoSLAM Software. Aus diesen Daten wurde eine Sequenz von 231 quasi-statischen Scans gebildet.

## 4.2 Vergleich der inneren Genauigkeit

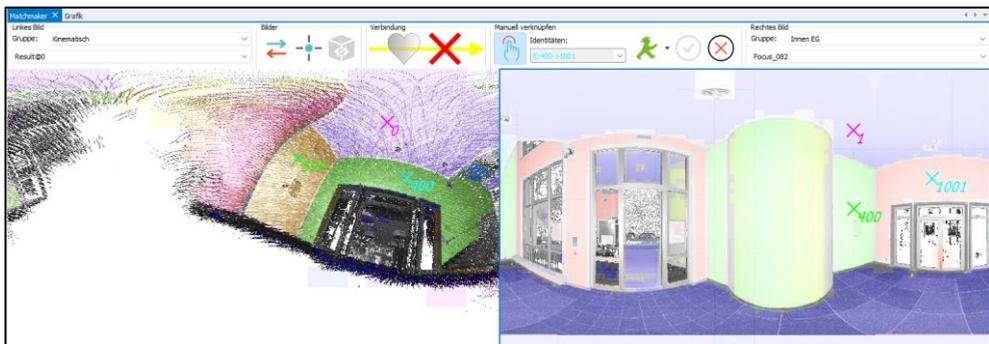
Zunächst wurde über die Sequenz der quasi-statischen Stationen eine Vernetzung durchgeführt. Das sich daraus ergebende Netz mit 231 Stationen und 4.800 paarweisen Transformationen wurde ausgeglichen, mit der ersten Station der Sequenz als Datum. Für die Positionsstandardabweichungen der übrigen Stationen ergab sich im Ergebnis ein quadratisches Mittel von 4,2 mm, bei einem Maximum von 12 mm.

Um zu untersuchen, inwieweit die Vernetzung die innere Geometrie der quasi-statischen Sequenz verändert hatte, wurde eine 3D-Transformation der Stationspositionen vor der Vernetzung auf die Positionen nach der Vernetzung durchgeführt. Das Ergebnis zeigte Restklaffungen von im Mittel 10 mm mit einem Maximum von 30 mm an einem Außenscan.

Für die Ermittlung der inneren Genauigkeit des statischen Scannings, wurde das statische Netz ohne Anschlusspunkte ausgeglichen, wobei ein Scan in der Nähe der Anfangsstation der quasi-statischen Sequenz als Datum gewählt wurde. Das Ergebnis zeigte ein quadratisches Mittel der Positionsstandardabweichungen von 1,3 mm, bei einem Maximum von 2,6 mm.

## 4.3 Kombination von statischen und quasi-statischen Scans

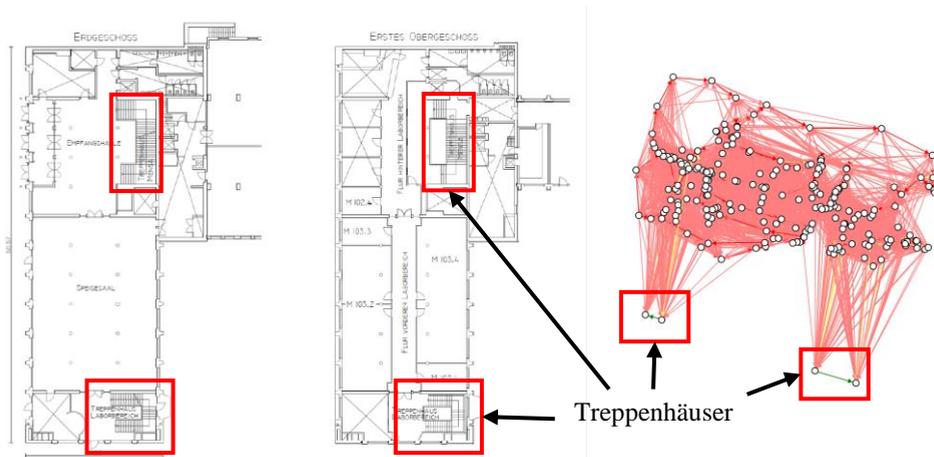
Die Kombination von statischen und quasi-statischen Scans erfolgt genau wie bei der Auswertung rein statischer Scans über identische Ebenen. Hierzu reicht es aus, einen bzw. wenige statische mit quasi-statischen Scans zu verknüpfen (siehe Abbildung 9).



**Abb. 9:** Verknüpfung statischer – quasi-statischer Scan über identische Ebenen

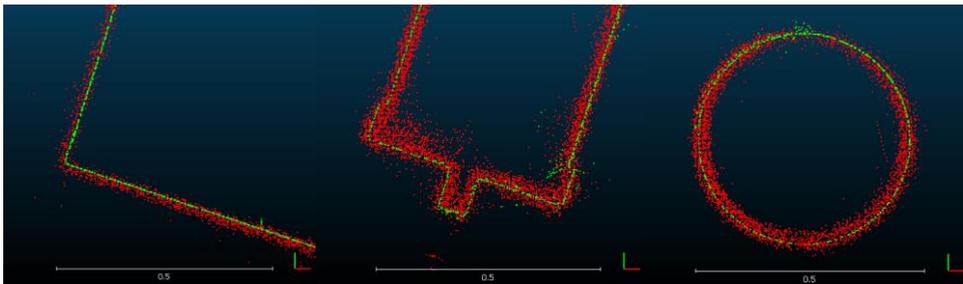
Mit diesen wenigen Verknüpfung gelingt es, das Netz der statischen und quasi-statischen Scans in einem gemeinsamen Datum auszugleichen. Anschließend kann wieder eine Vernetzung, diesmal über statische und quasi-statische Scans, durchgeführt werden. Dieses Verfahren funktioniert selbstverständlich auch für die Verknüpfung mehrerer quasi-statischer Scan-Sequenzen.

Im vorliegenden Beispiel wurden vier statische Scans in den Treppenhäusern als feste Referenz gewählt. Abbildung 10 zeigt die Netztopologie nach der Vernetzung von statischen und quasi-statischen Scans.



**Abb. 10:** Netztopologie statisch – quasi-statisch

Im Ergebnis der Ausgleichung wiesen die Positionen der quasi-statischen Scans im quadratischen Mittel eine Standardabweichung vom 3 mm auf, bei einem Maximalwert von 13 mm. Zu Prüfung des Registrierergebnisses wurden beide Punktwolken – die statische und die quasi-statische – übereinandergelegt.



**Abbildung 11:** Vergleich der statischen mit der quasi-statischen Punktwolke

In Abbildung 11 ist die statische Punktwolke in Grün und die quasi-statische in Rot dargestellt. Sie zeigt Bereiche des aufgemessenen Objektes, die stichprobenartig ausgewählt wurden. Deutlich erkennbar ist die bedeutend größere Streuung des kinematischen Lasers gegenüber dem statischen. Die Abweichungen der Punktwolken sind jedoch mit der Messunsicherheit des kinematischen Sensors erklärbar. Ein von der Drift hervorgerufenen Einfluss ist nicht erkennbar.

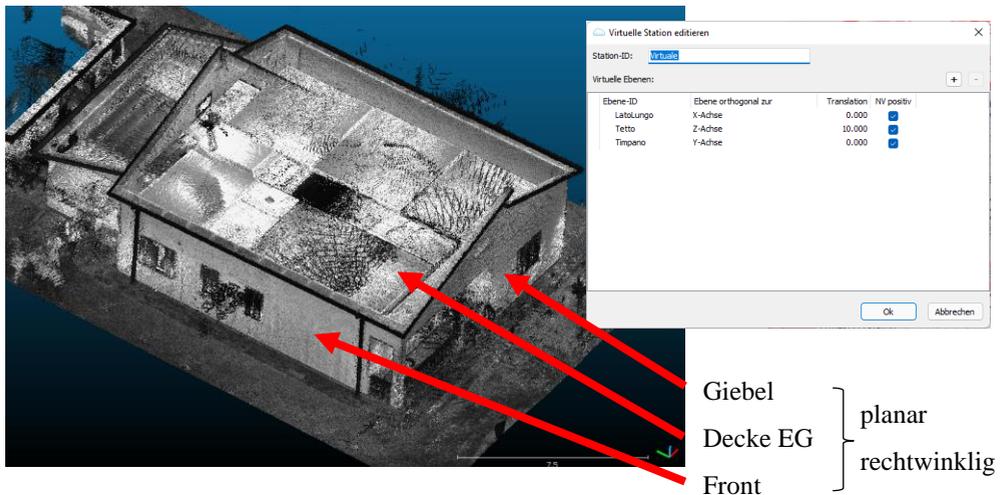
## 5 Bauwerksgeometrie als Referenz

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, wie die Verfahren Tachymetrie sowie statisches und kinematisches Laserscanning miteinander verbunden werden können. Der Aufwand an Hard- und Software ist jedoch beträchtlich und nur bei größeren Projekten wirtschaftlich sinnvoll. Es stellt sich daher die Frage, ob bei kleineren Messobjekten, wie zum Beispiel einer einzelstehenden Villa oder einem kleineren Bürogebäude, ein solcher Aufwand erforderlich ist.

Im oben gezeigten Beispiel dienen Tachymetrie und statisches Laserscanning im Wesentlichen der Bereitstellung einer festen Referenz, an welche die quasi-statischen Scans angeschlossen werden. Diese Referenz bildet zum einen das Datum und dient zum anderen der Korrektur der Drift innerhalb der kinematischen Messung. In diesem Abschnitt soll nun gezeigt werden, dass auch eine bekannte Bauwerksgeometrie als eine solche Referenz genutzt kann.

Als Beispiel dient ein eingeschossiges Wohnhaus mit Außenmaßen von ca. 18 m x 12 m. Auch dieses Objekt wurde mit einem GeoSLAM Horizon aufgenommen. Die Trajektorie umfasst einen Zeitabschnitt von 14:35 min und hat eine Länge von rund 263 m. Die kinematische Punktwolke wurde in eine Sequenz von 181 quasi-statischen Scans unterteilt.

Als Referenz-Ebenen wurden zwei Außenwände des Gebäudes sowie die Decke des Erdgeschosses gewählt. Dabei wurde von der begründeten Annahme ausgegangen, dass die Referenz-Ebenen planar und paarweise zueinander orthogonal sind. Eine solche Annahme müsste im Einzelfall durch Messung überprüft werden.



**Abb. 12:** Definition einer virtuellen Referenzstation

Abbildung 12 zeigt die Definition einer virtuellen Referenzstation im Programm SCANTRA. Einer solchen virtuellen Referenzstation können beliebig viele Ebenen zugeordnet werden,

das vorliegende Beispiel zeigt nur den einfachsten Fall mit drei paarweise zueinander orthogonalen Ebenen. Jede Ebene ist orthogonal zu einer der Koordinatenachsen des Referenzsystems. Eingegeben wird lediglich die Translation (Abstand vom Koordinatenursprung) sowie das Vorzeichen des Normalenvektors.

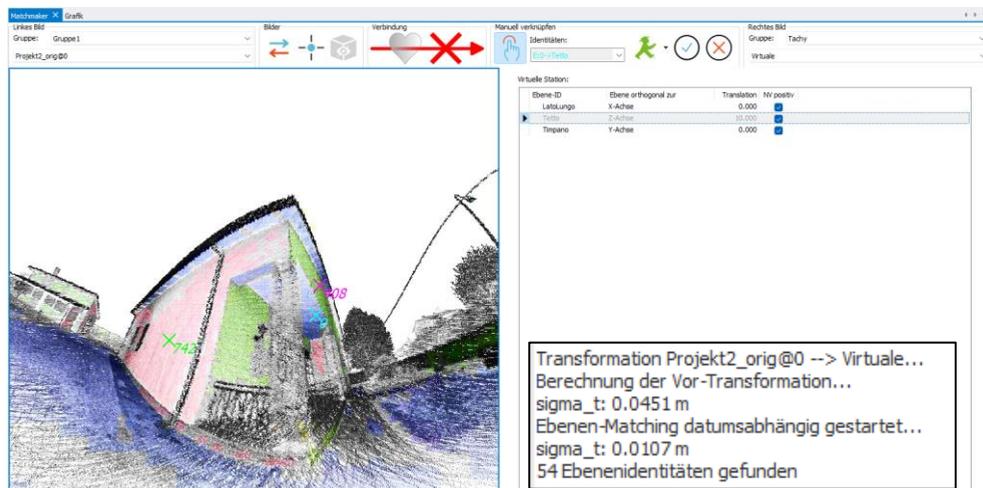


Abb. 13: Verbindung von detektierten Ebenen mit Ebenen der virtuellen Referenzstation

Abbildung 13 zeigt die manuelle Verknüpfung von detektierten Ebenen eines quasi-statischen Scans mit Ebenen der virtuellen Referenzstation. Diese manuelle Verknüpfung ermöglicht die Transformation der gesamten Scan-Sequenz in das Datum der virtuellen Referenzstation. Durch anschließende Vernetzung (siehe Abschnitt 3) werden weitere quasi-statische Scans mit der virtuellen Referenzstation verbunden.

Im Ausgleichungsmodell werden die virtuellen Ebenen **nicht** festgehalten. Stattdessen wird für jede detektierte Ebene, die mit einer Ebene der virtuellen Referenzstation korrespondiert, eine eigene virtuelle Anschlussebene generiert. Die Stochastik dieser Anschlussebene wird durch einen Steuerparameter *PlaneConstructionAccuracy* vorgegeben. Im vorliegenden Beispiel wurde für diesen Parameter ein Wert von 5 cm gewählt. Das heißt, der Translationsparameter der individuellen Anschlussebene hat eine Standardabweichung von 5 cm und der Normalenvektor darf um 5 cm „wackeln“. Durch diese stochastische Modellierung wird erreicht, dass die innere Geometrie der Punktwolke nur im Rahmen einer vorgegebenen Baugenaugigkeit verändert wird.

Diese Art der Referenzierung kann selbstverständlich auch auf statische Scans angewendet werden. Wird der Parameter *PlaneConstructionAccuracy* hinreichend groß gewählt, bleibt die innere Geometrie der Punktwolke unverändert, es erfolgt aber eine optimale Datumsfestlegung im Koordinatensystem des Gebäudes. Wurden die Parameter der virtuellen Ebenen einer Planvorlage entnommen, dann erlauben deren Verbesserungen einen direkten Soll-Ist-Vergleich zu eben dieser Planvorlage.

Im Ergebnis der Ausgleichung des vorliegenden Beispiels betrug das quadratische Mittel der Positionsstandardabweichungen der quasi-statischen Scans 3 mm, bei einem Maximalwert von 19 mm. Diese hohe Genauigkeit der Datumsfestlegung trotz der angenommenen sehr geringen Baugenauigkeit erklärt sich aus der hohen Redundanz von mehreren Tausend Anschlussebenen.

## 6 Ausblick

Unter der Annahme, dass die Drift der Trajektorie in kinematischen Punktwolken innerhalb eines begrenzten Zeitfensters vernachlässigt werden kann, lassen sich diese Punktwolken in Sequenzen quasi-statischer Scans zerlegen.

Durch Vernetzung und Ausgleichung solcher Scan-Sequenzen lassen sich Fehler der kinematischen Vorauswertung korrigieren. Darüber hinaus liefert die Ausgleichung Aussagen zur inneren Genauigkeit der kinematischen Messung. Ergebnis ist also nicht nur die rein geometrische Information, sondern darüber hinaus transparente Qualitätsmaße, welche für eine belastbare Bewertung des Ergebnisses unerlässlich sind.

Sequenzen quasi-statischer Scans lassen sich problemlos sowohl mit statischen Scans als auch untereinander verbinden und gemeinsam ausgleichen.

Als Referenz für Scan-Sequenzen als auch für statische Scans können virtuelle Anschlussebenen genutzt werden. Die stochastische Modellierung dieser Anschlussebenen erlaubt die Einführung einer Baugenauigkeit in das Ausgleichungsmodell, was dafür sorgt, dass die innere Geometrie der Punktwolke nur im Rahmen dieser Baugenauigkeit beeinflusst wird.

## Literatur

Jung, J., Yoon, S., Ju, S., & Heo, J. (2015): Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM. *Sensors*, 15(10), S. 26430-26456.

Kersten, T., Starosta, D., Lindstaedt, M. (2018): Zum Genauigkeitspotential aktueller handgeführter 3D-Scanner. Th. Luhmann, Ch. Schumacher (Eds.), *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik–Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*, S. 114-129.

Kim, H. S., Kim, Y., Kim, C., & Choi, K. H. (2021): Kinematic In Situ Self-Calibration of a Backpack-Based Multi-Beam LiDAR System. *Applied Sciences*, 11(3).

technet (2022): Scantra Produktseite. <https://www.technet-gmbh.com/produkte/scantra/> (Zugriff 14.02.2022).

## **Autoren**

Gielsdorf, Frank  
technet GmbH, Berlin  
frank.gielsdorf@technet-gmbh.com

Rabisch, Benjamin  
Laserscanning Europe GmbH, Magdeburg  
benjamin.rabisch@laserscanning-europe.com

Wujanz, Daniel  
technet GmbH, Berlin  
daniel.wujanz@technet-gmbh.com

Bergholz, Eric  
Laserscanning Europe GmbH, Magdeburg  
info@laserscanning-europe.com

Clemen, Christian  
HTW Dresden, Fakultät Geoinformation  
christian.clemen@htw-dresden.de