
TLS-Punktwolkenregistrierung

Fachautoren: Daniel Wujanz, technet GmbH, Berlin
Susanne Lipkowski, Hochschule Bochum
Nikolaus Studnicka, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Horn (AT)
Bianca Gordon, Leica Geosystems AG, Heerbrugg (CH)

Weitere Beteiligte: DVW Arbeitskreis 3, Messmethoden und Systeme (Arbeitsgruppe TLS und flächenhafte Verfahren)
DVW Arbeitskreis 4, Ingenieurgeodäsie

Beschlussfassung: Beschlossen vom DVW Arbeitskreis 3/4 am 28.09.2022
Beschlossen vom DVW Präsidium am 05.10.2022

**Dokumentenstatus
verabschiedet**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Was ist Registrierung?	2
2.1	Das Problem der Unsicherheitsfortpflanzung	5
2.2	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Risiken	6
3	Grundlagen, Vorbereitung und Wissenswertes.....	7
3.1	Wie viel Überlappung brauche ich?	7
3.2	Das Korrespondenzproblem	8
3.3	Punktwolkenvorverarbeitung durch Filtern.....	9
4	Welches Registrierverfahren brauche ich?	12
5	Registrierverfahren.....	13
5.1	Manuelle Vorausrichtung.....	13
5.2	Zielmarkenbasierte Registrierung.....	14
5.3	Vorausrichtung durch zusätzliche Sensoren.....	16
5.3.1	Strategien zur Vorausrichtung mittels Zusatzsensoren.....	16
5.3.2	Automatische Registrierung durch Vorausrichtung mittels SLAM	18
5.4	Der ICP-Algorithmus («Cloud-to-Cloud-Registrierung»)	19
5.5	Voxelbasiertes automatisches Registrierverfahren	20
5.6	Registrierung mit geometrischen Primitiven	23
6	Qualitätssicherung im Laserscanning	24
6.1	Das Konzept der Redundanz	24
6.2	Berechnung von numerischen Qualitätsmaßen	25
6.2.1	Residuen aus abgeleiteten Punkten bzw. Targets.....	26
6.2.2	Residuen zwischen Punktwolken	27
6.2.3	Blockausgleichung	29
6.3	Grenzen von etablierten Qualitätsmaßen	32
6.3.1	„Unlautere Beschönigung“ von Laserscanningnetzen	33
6.3.2	Geodätische Qualitätsmaße im Laserscanning	35
6.4	Visuelle Kontrolle	36
7	Best Practice	38
7.1	Zubehör und vorbereitende Maßnahmen	38
7.2	Strategie beim Scannen	39



7.3	Bearbeiten von Großprojekten	41
7.4	Arbeiten mit Gruppen oder Clustern	42
7.5	Anschluss an übergeordnete Referenzsysteme	43
	Überführung in Zielkoordinatensysteme	44
	Glossar	45
	Sachwortverzeichnis	50
	Literatur	51

1 Einleitung

Dreidimensionale Daten erzeugen - kann heutzutage jeder. Die Handhabung und die Bedienung von Messinstrumenten im Laserscanningbereich wurden zunehmend vereinfacht. Doch dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, wie komplex und anspruchsvoll die Prozessierung der erzeugten Punktwolken ist.

Beim terrestrischen Laserscanning (kurz TLS) werden in vielen Genauigkeitsabschätzungen von Punktwolken oft lediglich herstellerspezifische Angaben zur Winkel- und Streckenmessung berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ist bestenfalls bei der Betrachtung eines einzigen Laserscans anwendbar. In diesem Fall beinhaltet das Unsicherheitsbudget ausschließlich Komponenten, die durch den Laserscanner selbst hervorgerufen werden. In den meisten Anwendungsfällen sind für eine komplette Aufnahme von Objekten stets mehrere Scanstandpunkte notwendig. Hier erhöht sich das Unsicherheitsbudget durch den Einfluss der sogenannten Registrierung, bei dieser werden Transformationsparameter zwischen den einzelnen Scans berechnet und in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Fatalerweise wird die Registrierung heutzutage oft als eine Nebensächlichkeit behandelt, die keine vertiefenden Kenntnisse erfordert.

Dieser Leitfaden soll eine Hilfestellung für Anwender bieten, Kernfragen rund um die Registrierung von Punktwolken zu beantworten. Zu diesen gehören beispielsweise:

- Was ist Registrierung?
- Welche Registrierverfahren gibt es?
- Welche Registrierverfahren bieten sich in welchen Fällen an?
- Was muss bereits bei der Scanaufnahme beachtet werden?
- Wie wirkt sich die Registrierung auf die Genauigkeit meiner erzeugten Punktwolken aus?

Im vorliegenden Leitfaden werden verschiedene Aspekte rund um die Registrierung von TLS-Punktwolken behandelt. Die Ausführungen beschränken sich auf die Registrierung von statisch erfassten Laserscans. Auf die Verarbeitung mobil erfasster Punktwolken wird nicht eingegangen. Der Leitfaden richtet sich sowohl an im terrestrischen Laserscanning erfahrene Anwender als auch an Personen, die mit der TLS-Thematik noch wenig vertraut sind.

Die folgenden Ausführungen widmen sich zunächst grundlegenden Erläuterungen und Betrachtungen zur Registrierung, ihrer Genauigkeit sowie den elementaren Voraussetzungen und Herausforderungen. Anschließend werden unterschiedliche Schritte, Methoden und Algorithmen von Registrierverfahren behandelt. Um die Ergebnisse bewerten zu können, werden zusätzlich Möglichkeiten für eine Genauigkeits- bzw. Qualitätsbeurteilung vorgestellt.

Abschließend geben Best-Practice-Hinweise wertvolle Hilfestellungen für eine erfolgreiche und qualitativ gute Registrierung in der Praxis.

2 Was ist Registrierung?

Definition:

Die Registrierung ist die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade, um eine Punktwolke aus einem beliebigen lokalen Koordinatensystem in ein gemeinsames Koordinatensystem (z. B. ein Projektkoordinatensystem) zu transformieren.

Jeder mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführte Scan ist auf sein definiertes Sichtfeld beschränkt. Daher sind in der Regel mehrere Standpunkte erforderlich, um ein zu dokumentierendes Objekt möglichst lückenlos zu erfassen. Abbildung 1 zeigt eine von unterschiedlichen Standpunkten erfasste Büste. Jeder Scan beinhaltet in Abhängigkeit vom Standpunkt einen anderen Teilbereich des Objektes. Da jeder Scan innerhalb eines beliebigen lokalen Laserscannerkoordinatensystems erfolgt, müssen sogenannte Transformations- oder Registrierungsparameter berechnet werden. Diese ermöglichen es, mehrere Scans in ein einheitliches Koordinatensystem zu überführen und somit einen zusammenhängenden Datensatz zu erzeugen.

Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, die bereits untereinander registrierten Scans in ein übergeordnetes Koordinatensystem, z.B. ein Landessystem, zu überführen. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 7.5 näher diskutiert.

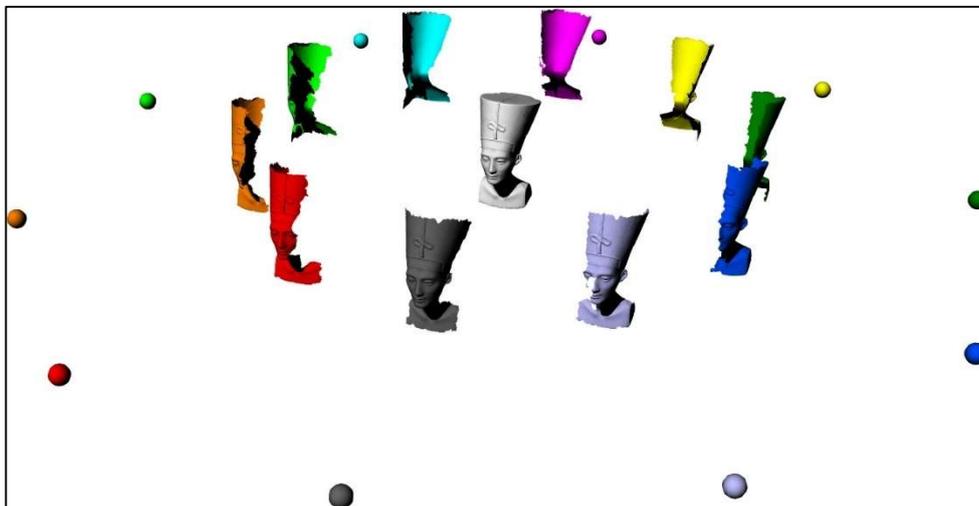


Abbildung 1: Zu erfassendes Objekt (hellgrau), Laserscannerstandpunkte (farbige Kugeln) und daraus resultierende Scans (dargestellt durch farbige Triangulationsnetze) (Wujanz & Neitzel 2016)

Bildlich gesehen kann man sich einen Scan als (in sich starres) Puzzlestück vorstellen. Sind Registrierungsparameter zwischen Scans bekannt, kann eine Punktwolke in das lokale Koordinatensystem einer anderen Punktwolke transformiert werden. Ein 2D-Beispiel ist in Abbildung 2 in Form eines Puzzles dargestellt. Das allgemeine Ziel des Puzzelns besteht darin, ein Bild zusammzusetzen, das aus einzelnen Teilen besteht. Dies ist vergleichbar mit

einzelnen Punktwolken eines Objektes beim terrestrischen Laserscanning. Um die einzelnen Teile bzw. Punktwolken zusammen zu setzen, kann ein einzelnes Teil um den Ursprung seines lokalen Koordinatensystems gedreht sowie entlang X und Y verschoben werden. Diese drei Parameter werden auch als Freiheitsgrade bezeichnet. Analog zum Puzzeln ist die Registrierung ein sequenzieller Prozess, bei dem der letzte Scan an den/die jeweils bereits registrierte(n) Scan(s) angefügt wird.

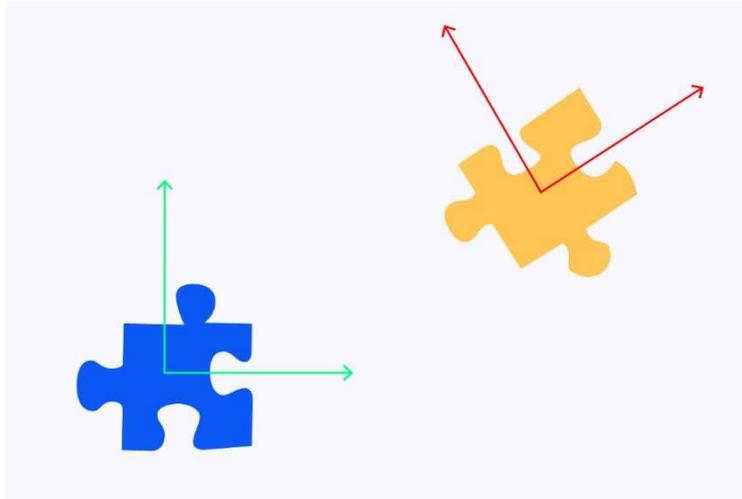


Abbildung 2: Lokale Koordinatensysteme zweier Puzzleteile bzw. Scans
(Liebler, i3mainz, CC BY SA 4.0 nach Wujanz 2019b)

Im Falle von Laserscans müssen i.d.R. sechs Freiheitsgrade bestimmt werden, da Verschiebungen und Rotationen auf die drei Kardinalachsen X, Y und Z angewendet werden müssen. Optional kann zusätzlich ein Maßstabsfaktor mitgeschätzt werden. Die untenstehende Gleichung zeigt, wie die Registrierung zwischen Scan A und Scan B berechnet wird. Als Registrierungsparameter liegen der Translationsvektor \mathbf{t} (die relative Verschiebung zwischen beiden Koordinatensystemen) und die Rotationsmatrix \mathbf{R} vor. Mit diesen Registrierungsparametern kann der Scan B in das Koordinatensystem des Scans A überführt werden.

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \mathbf{t} + \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die folgende Abbildung zeigt eine aus 196 Scans zusammengesetzte Punktwolke. Hier kann man erkennen, wie komplex die lagerichtige Zusammensetzung der einzelnen Laserscanpositionen sein kann. Bereits im Feld kann dem Anwender die erfolgreiche Registrierung angezeigt werden (siehe Abbildung 4). Dafür ist eine sogenannte "Onboard-Registrierung" bereits im Laserscanner oder der Steuerungssoftware des Laserscanners auf z. B. einem Tablet notwendig.



Abbildung 3: Eingefärbte Punktwolke aus 196 einzelnen Laserscans

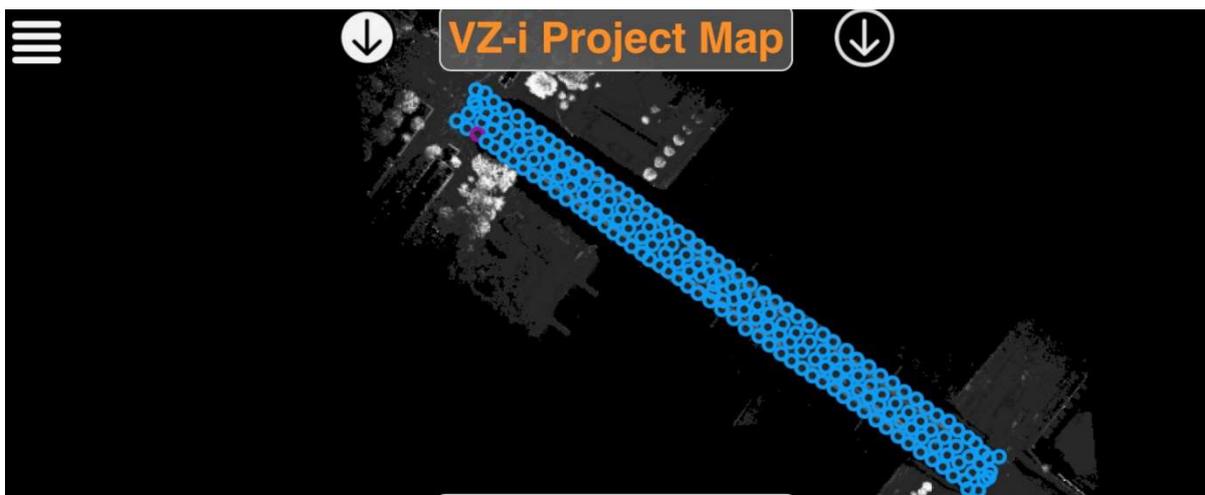


Abbildung 4: Anzeige im Feld: erfolgreich registrierte Punktwolken einzelner Laserscanpositionen

Wie wir später sehen werden, gibt es viele Wege zur Berechnung oder Messung von Registrierungsparametern. Unabhängig von der gewählten Strategie ist es jedoch offensichtlich, dass die Genauigkeit der Registrierung einen unmittelbaren Einfluss auf das finale Ergebnis hat. Es mag trivial klingen, aber der Lösungsraum wird bei Problemen mit sechs Freiheitsgraden im Vergleich zu Problemen mit drei Freiheitsgraden viel größer und dementsprechend komplexer, wie das Beispiel der Puzzleteile bereits gezeigt hat. Infolgedessen müssen die Benutzer jeglicher Registrierungssoftware mit unvermeidlichen Falschregistrierungen zurechtkommen.

2.1 Das Problem der Unsicherheitsfortpflanzung

Eine Gemeinsamkeit zwischen Sensoren und Menschen besteht darin, dass man alles, was man tut, immer leicht falsch macht. Bei Sensoren wird diese Unvollkommenheit als Rauschen bzw. Präzision, Unsicherheit oder Genauigkeit bezeichnet, auch wenn diese Begriffe unterschiedliche Bedeutungen haben. Neben der Kenntnis der Genauigkeit des verwendeten Laserscanners ist es ebenso wichtig, die wesentlichen Faktoren zu kennen, die das Messergebnis beeinflussen, und sie quantifizieren zu können. Schauen wir uns ein einfaches Beispiel an.

Wir stellen uns vor, ein Kunde bittet uns, die Entfernung zwischen Berlin und Mainz mit einer Genauigkeit von besser als zwei Millimetern zu bestimmen. Um Kosten zu sparen, verwenden wir ein einfaches Maßband. Da die Länge des Maßbandes nur einen Meter beträgt, müssen wir die Entfernung in kleinen Schritten bestimmen. Dies wird erreicht, indem wir wiederholt einen einzigen Meter messen und das Maßband an das virtuelle Ende der vorherigen Länge legen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Bestimmung der Entfernung zwischen Berlin und Mainz mittels Maßbands (Liebler, i3mainz, CC BY SA 4.0 nach Wujanz 2019b)

Wenn der Kunde einen Nachweis verlangt, dass wir die geforderte Genauigkeit erfüllt haben, beziehen wir uns einfach auf eine Auflösung und Genauigkeit von einem Millimeter, also auf die unseres "Messgerätes". Hierbei haben wir jedoch neben anderen Einflussfaktoren die Unsicherheit des wiederholten Anlegens des Maßbandes vernachlässigt.

Beim terrestrischen Laserscanning wird häufig eine ähnliche Vereinfachung verwendet, um potenzielle Kunden zu überzeugen. Der Einfluss der Registrierung wird hierbei nicht beachtet. Empfehlenswert wäre es, dass in der Geodäsie bekannte Konzept der Unsicherheitsfortpflanzung zur Erfassung und Quantifizierung aller Einflussfaktoren anzuwenden (Helmert 1872).

Aus diesem Grund betrachten Geodäten Probleme immer aus zwei Perspektiven: einer funktionalen und einer stochastischen. Die Aussage "*Die Entfernung beträgt 137 m...*" ist für Sie nur ein Teil der Wahrheit. Die Aussage wird erst dann vollständig, wenn man "*... und mit einer*

Genauigkeit von 3 mm" hinzufügt. Die Genauigkeit eines Wertes hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: Von der Genauigkeit des Sensors und von der Unsicherheitsfortpflanzung bei der Berechnung des Wertes.

Gehen wir zurück zum Beispiel des Puzzles und stellen uns vor, dass jedes Teil einen Laserscan darstellt. Abbildung 6 veranschaulicht das Ergebnis einer Registrierung aus der funktionellen Perspektive, d.h. durch das Puzzle selbst in der Mitte, sowie der stochastischen Sicht, die durch halbtransparente Puzzlesteine hervorgehoben wird. Es ist offensichtlich, dass direkt benachbarte Teile gut zusammenpassen, so dass man davon ausgehen kann, dass die relativen Qualitätsmaße zwischen zwei Scans ebenso präzise Werte widerspiegeln. Was diese Zahlen nicht sagen, ist, wie sich die Unsicherheit akkumuliert, je mehr Teile zum Puzzle hinzugefügt werden.

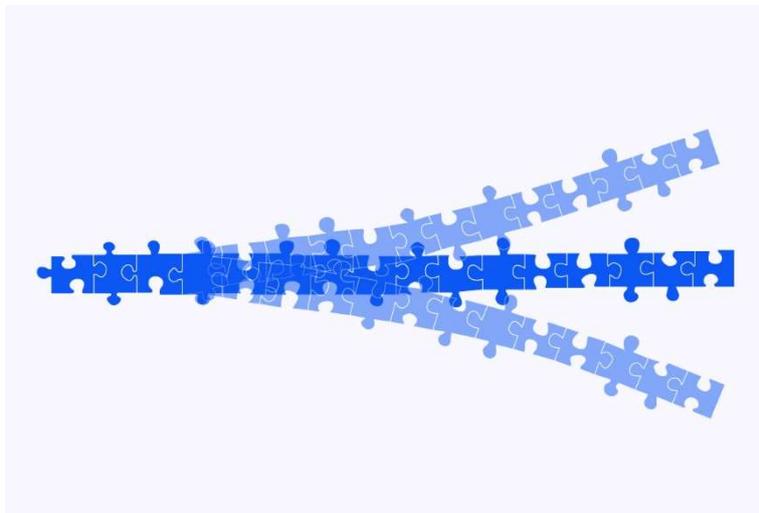


Abbildung 6: Auswirkung der Unsicherheitsfortpflanzung am Beispiel eines Puzzlespiels (Liebler, i3mainz, CC BY SA 4.0 nach Wujanz 2019b)

Die Aufgabe der Unsicherheitsfortpflanzung im Zusammenhang mit der Registrierung von Laserscans ist somit die Bestimmung der resultierenden Unsicherheit, die durch die Netzkonfiguration unter Berücksichtigung diverser Unsicherheitsfaktoren entsteht. Im Wesentlichen zeigen diese Qualitätsmaße die geometrische Stabilität des Netzes an, die erforderlich ist, um z. B. nachzuweisen, dass die registrierten Laserscans genau genug sind, um eine gescannte Struktur im Hinblick auf eine bestimmte Bautoleranz oder die spezifizierte Genauigkeit eines Kunden zu verifizieren. Die Aufgabe bei der Durchführung der Registrierung besteht also darin, ein Netz so zu entwerfen, dass es die vorgegebenen Anforderungen erfüllt.

2.2 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Risiken

Werfen wir einen Blick auf den wirtschaftlichen Einfluss der Registrierung im Projektmaßstab, der in Abbildung 7 dargestellt ist. Die Abbildung zeigt vier typische Phasen in Laserscanning-Projekten, ausgehend von einer gründlichen Planung und Datenerfassung. Sobald die Daten erfasst sind, beginnt die primäre Datenverarbeitungsphase, z. B. mit der Konvertierung der Dateiformate, der Filterung und natürlich der Registrierung. Im zweiten Schritt werden die eigentlichen Ergebnisse erstellt, z. B. durch das Digitalisieren von Objekten in der Punktwolke

oder die Durchführung von Deformationsmessungen zwischen zwei verschiedenen Epochen. Die vertikale Achse der Abbildung veranschaulicht die Möglichkeit der Einflussnahme auf das Ergebnis sowie die entsprechenden Kosten zur Herbeiführung von Veränderungen.

Der unangenehme Effekt der Registrierung ist, dass sie (a) Abweichungen erzeugen kann, die die Messgenauigkeit des Laserscanners selbst übersteigt, und (b) dass die Registrierung systematische Abweichungen verursacht, die sich auf alle anderen verbundenen Punktwolken auswirken. Daher ist es elementar, falsche Registrierungen oder Spannungen im Netz so früh wie möglich zu erkennen, um kostspielige Revisionen zu vermeiden.

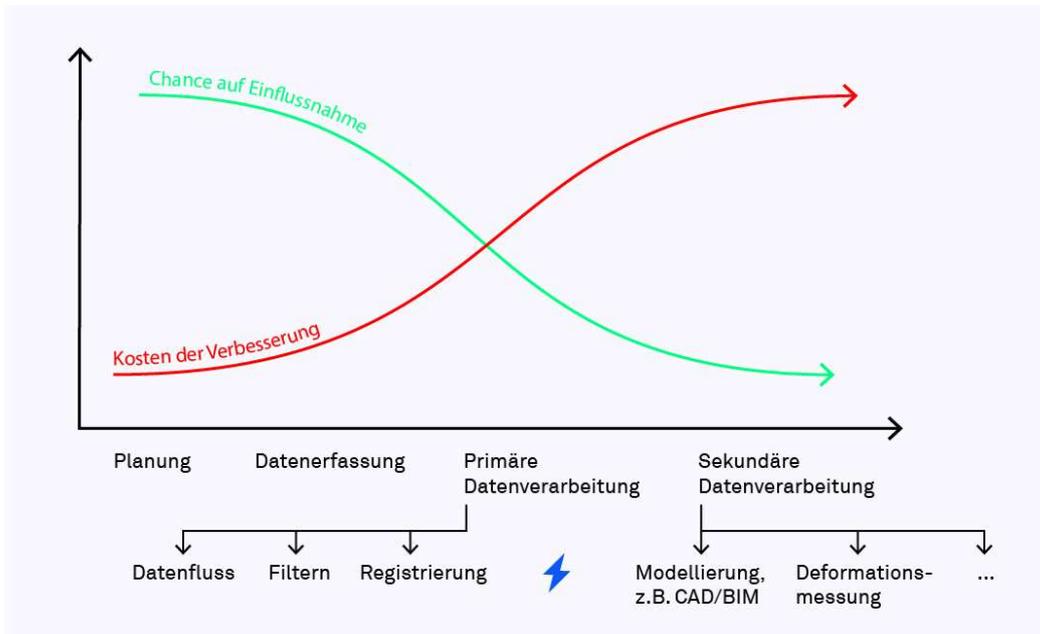


Abbildung 7: Einfluss der Registrierung in der Prozesskette des Laserscanningprojekts (Liebler, i3mainz, CC BY SA 4.0 nach Wujanz 2019b)

3 Grundlagen, Vorbereitung und Wissenswertes

Im Allgemeinen können Laserscans referenziert werden, indem redundant erfasste Bereiche innerhalb von Punktwolken verwendet werden (auch als (Ko-) Registrierung bezeichnet), anhand derer Registrierungsparameter berechnet werden können, oder indem ihre Orientierung und Lage in Bezug auf ein übergeordnetes Koordinatensystem durch zusätzliche Sensorik im Laserscanner gemessen wird. Im Folgenden werden verschiedene Strategien zur Registrierung aufgeführt und deren grundsätzlichen Funktionsweisen sowie individuelle Vor- und Nachteile erläutert.

3.1 Wie viel Überlappung brauche ich?

Es ist offensichtlich, dass eine Überlappung zwischen Punktwolken benötigt wird, um sie registrieren zu können. Die entscheidende Frage ist: Wie viel? Diese Frage wird in der Praxis kontrovers diskutiert, wobei belastbare Aussagen nicht getroffen werden können. Um zu verstehen, warum letzteres der Fall ist, schauen wir uns zwei Beispiele an, bei denen

großflächige Überlappungen vorliegen, wie in Abbildung 8 dargestellt. Der Tisch stellt eine Punktwolke dar (die als Referenzkoordinatensystem betrachtet wird), während das Stück Papier eine andere Punktwolke darstellt.

Im Kapitel 2 haben wir festgestellt, dass drei unbekannte Rotations- und drei Translationsparameter benötigt werden, um eine 3D-Registrierung durchzuführen. Das Szenario auf der linken Seite von Abbildung 8 enthält genügend geometrische Informationen, um drei Freiheitsgrade zu lösen. Dennoch kann das Stück Papier in zwei Kardinalrichtungen verschoben und um die vertikale Achse, die parallel zur Flächennormalen des Tisches verläuft, gedreht werden. Das zweite Beispiel auf der rechten Seite zeigt einen ähnlichen Fall, enthält aber mehr "geometrischen Kontrast": Das Stück Papier wurde in einem 90°-Winkel gefaltet und ist nun auf die Tischkante "ausgerichtet". Es wird offensichtlich, dass uns der höhere Grad an geometrischer Information erlaubt, fünf Freiheitsgrade zu lösen. Der verbleibende Freiheitsgrad ist die Verschiebung entlang der Kante.

Diese Beispiele zeigen, dass sich der überlappende Bereich nicht einfach quantifizieren lässt. Es ist nicht möglich aus der Quantifizierung abzuleiten, ob sinnvolle Registrierungsparameter ermittelt werden können. Für die Registrierung werden geometrische Informationen benötigt, die annähernd in drei zueinander orthogonalen Richtungen verteilt sind.

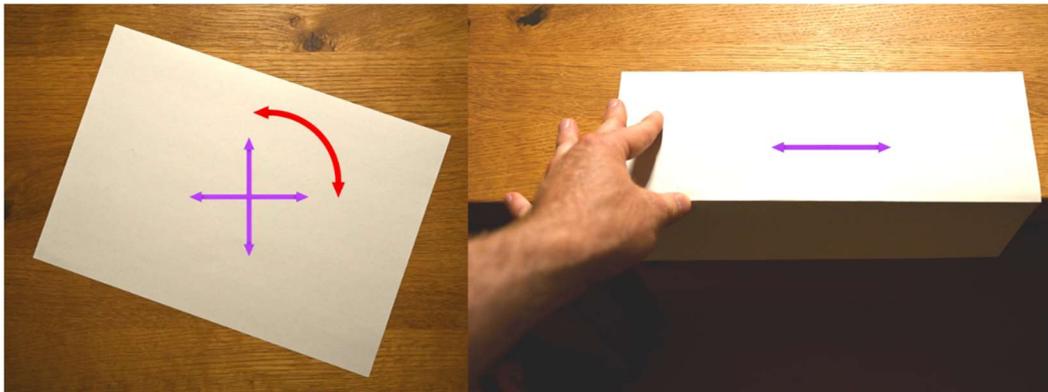


Abbildung 8: Überlappung zwischen zwei Datensätzen, die es ermöglicht, drei (links) bzw. fünf (rechts) Freiheitsgrade zu bestimmen (Wujanz 2019c)

Wie viel Überlappung für eine erfolgreiche Registrierung benötigt wird, erschließt sich meist erst dem erfahrenen TLS-Anwender. Dem eher unerfahrenen TLS-Anwender wird daher empfohlen, am Anfang eher kleine Abstände zwischen den einzelnen Laserscanpositionen zu wählen.

3.2 Das Korrespondenzproblem

Stellen wir uns vor, wir bitten zehn Geodäten, die Büste der Nofretete zu scannen. Wir werden zehn verschiedene geometrische Beschreibungen erhalten, die alle übereinstimmend das gleiche Objekt beschreiben, und doch sind diese nicht direkt vergleichbar.

Abbildung 9 verdeutlicht diesen Effekt anhand von drei verschiedenen Scanlinien, die aus leicht unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen wurden. Es ist offensichtlich, dass die von verschiedenen Standpunkten aufgenommenen Punkte zu unterschiedlichen

Punktastungen führen. Wir stellen uns vor, wir verbinden alle Punkte aus einem Datensatz miteinander. Wir erhalten damit drei verschiedene Triangulationen der Scans. Wenn wir diese Ergebnisse dann in ein gemeinsames Koordinatensystem transformieren, erhalten wir das ganz rechts abgebildete Ergebnis. Es scheint, als hätte sich das Objekt verformt, während die Scans aufgenommen wurden. Dieser Effekt wird Aliasing genannt. Er ist beim Laserscanning unvermeidlich.

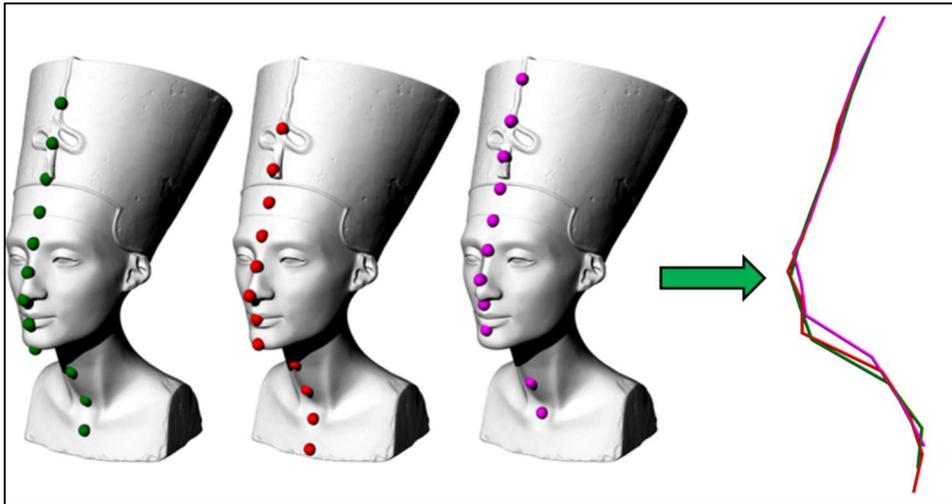


Abbildung 9: Entstehung von Pseudo-Deformationen aufgrund von Aliasing (Wujanz 2019)

Das obige Beispiel hat gezeigt, dass Aliasing ein unlösbares Problem ist, da man mit einem Laserscanner in der Regel nie wieder genau die gleichen Punkte treffen wird, selbst wenn man zweimal vom gleichen Standpunkt und mit identischen Einstellungen scannt. Daher ist Aliasing eine eher schlechte Nachricht für die Berechnung von Registrierungsparametern, da wir das Konzept der Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen, das in der Geodäsie weit verbreitet und etabliert ist, in Frage stellen müssen. Das bedeutet auch, dass die lokale Punktauflösung einen unmittelbaren Einfluss auf das Ergebnis hat. Wie wir später sehen werden, gibt es einige Konzepte, die in der Lage sind, die Auswirkungen von Aliasing zu kompensieren.

3.3 Punktwolkenvorverarbeitung durch Filtern

Noch bevor die Laserscans registriert werden, empfiehlt es sich, dass die einzelnen Laserscans der unterschiedlichen Positionen „bereinigt“ werden (außer die Registrierung erfolgt bereits im Laserscanner). Laserscans können durch folgende Parameter gefiltert (also Punkte gelöscht oder maskiert) werden:

- **Amplitude (oder Reflektanz) eines Punktes:** Die Stärke des rückgestreuten Laserstrahls (Laserimpuls) wird meist „Amplitude“ genannt. Sie ist also grundsätzlich von der Messentfernung abhängig. Man kann sie auch auf die Entfernung normieren und in Dezibel (dB) angeben. In diesem Fall spricht man von der Reflektanz (oder engl. Reflectance). Diese ist dann von der Entfernung weitgehend unabhängig. Besonders niedrige Werte können auf sehr kleine Ziele (Schwebeteilchen in der Luft), weit entfernte Ziele, schlecht reflektierende Ziele oder Spiegelungen hinweisen. Bei schlecht

reflektierenden Zielen (wie beispielsweise der schwarzen Dampflokomotive in der folgenden Abbildung), sollte der untere Schwellwert nicht zu hoch gesetzt werden, sonst werden zu viele Punkte an der schwarzen Oberfläche gelöscht. Wenn der Wert der Reflektanz den Wert von 0 dB übersteigt, wird meist ein retroreflektierendes Ziel vermessen. Es kann sich aber auch um eine Totalreflexion an einer Glasscheibe handeln. Ein Beispiel für eine anhand der Amplitude gefilterte Punktwolke zeigt Abbildung 10.



Abbildung 10: Rote Punkte signalisieren stark reflektierende Ziele (hier: Reflektorstreifen auf den Schutzwesen), grüne Punkte signalisieren schwach reflektierende Ziele.

- **Mischsignale (auch „Geisterpunkte“ oder „Mixed Pixels“):** Trifft ein ausgesendeter Laserstrahl Kanten und andere Unstetigkeiten und wird der Laser demzufolge von verschiedenen Oberflächen reflektiert, führt dies zu einem Distanzmesswert, der eine ungenaue Mittelung der einzelnen gemessenen Distanzen darstellt. Messpunkte, die aus solchen Mischsignalen resultieren, scheinen in der Punktwolke zwischen realen Gegenständen zu schweben und werden oft als "Geisterpunkte" oder „Mixed Pixels" bezeichnet. Sie können beim Impulslaufzeitverfahren anhand der Pulsform des rückgestreuten Laserimpulses herausgefiltert werden. Sollte ein ausgesendeter Laserimpuls zwei hintereinanderliegende Ziele treffen (z. B. die Speichen eines Fahrrades, siehe Abbildung 11 **Error! Reference source not found.**), dann wird der aus dem rückgestreuten Laserimpuls (oder Doppelimpuls) resultierende Punkt meistens zwischen den Zielen zum Liegen kommen. Seine Pulsform wird sich in diesem Fall von der Pulsform einer Einfachreflexion unterscheiden. Die Pulsabweichung kann mit dem Deviation-Wert (engl. Deviation für Abweichung) klassifiziert werden, so dass man mithilfe dieses Wertes Punkte zwischen realen Zielen während der Punktwolkenfilterung eliminieren kann. Beispiele für in Punktwolken detektierte Mischsignale zeigen die Abbildungen 11 und 12.



Abbildung 11: Oben: Alle Punkte mit einem Deviation-Wert werden markiert. Unten: Diese Punkte wurden gelöscht und mit dem Reflektanzwert grau schattiert eingefärbt.

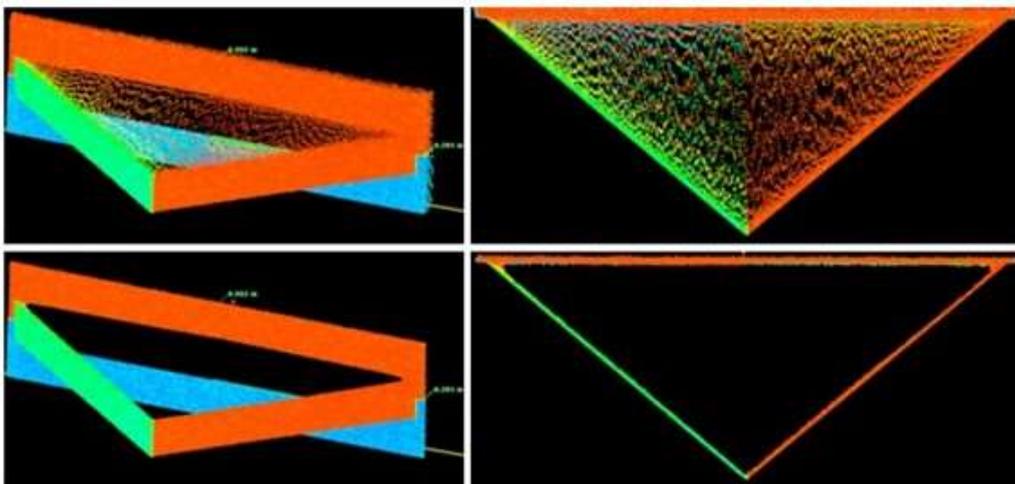


Abbildung 12: Oben: „Mixed Pixels“ an einer Kante (links: Schrägansicht, rechts: Draufsicht). Unten: Durch Filterung konnten die „Mixed Pixels“ eliminiert werden.

- Eine **Entfernungsschranke** (engl. „Range Gate“) kann ungewünschte Punkte im unmittelbaren Umfeld des Laserscanners eliminieren, wenn der Laserscanner zum Beispiel auf einem Roboterwagen montiert ist und Punkte des Roboterwagens selbst unerwünscht sind (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Der Laserscanner ist auf einem Radroboter montiert. Dabei misst er auch Teile des Roboters selbst. Diese Punkte können mit einem Entfernungsfiler (0 m – 1,8 m) markiert und entfernt werden.

- **Fliegende Punkte** können mit speziellen Algorithmen gelöscht werden.
- **Bewegte Ziele** (gehende Menschen, fahrende Autos) sind meist nur in einem Laserscan enthalten, jedoch nicht in einem benachbarten Laserscan. Somit können diese automatisch mit speziellen Verfahren erkannt und eliminiert werden (siehe Abbildung 14).

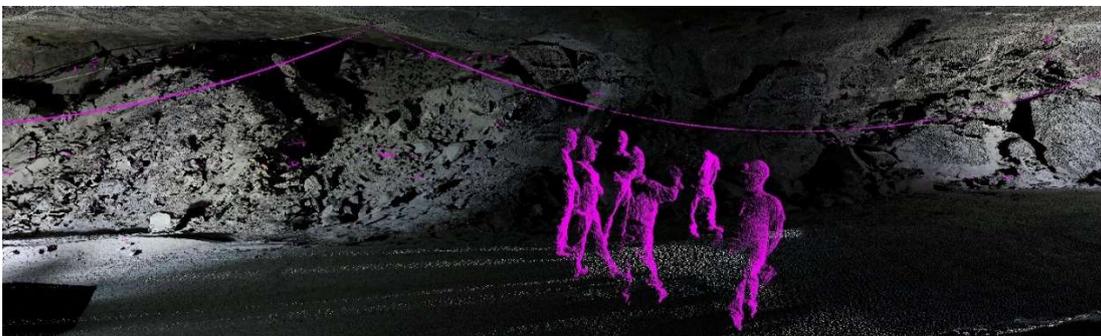


Abbildung 14: Sich in der Punktwolke bewegende Ziele (Menschen und Leitungen) wurden erkannt und signalisiert (violett)

- **Spiegelungen** (vor allem an Fensterscheiben) können derzeit hauptsächlich nur manuell aus den Datensätzen entfernt werden

4 Welches Registrierverfahren brauche ich?

Wie in allen technischen Disziplinen kann keine eindeutige Antwort auf die in der Überschrift gestellte Frage gefällt werden. So wie es am Markt nicht den einen Laserscanner für alle Anwendungszwecke gibt, gibt es somit auch nicht ein Registrierverfahren (oder eine aus mehreren Algorithmen bestehende Lösung), das für alle möglichen Aufgaben perfekt funktioniert. Somit muss die Antwort auf die Frage „Alle!“ lauten, denn in der Praxis sind meist verschiedene Lösungen, selbst innerhalb eines Projekts, denkbar.

Abhängig von der Messumgebung, sowie vom Messobjekt selbst, muss das Registrierungsverfahren individuell gewählt werden. Hierzu ist es zwingend erforderlich, die Funktionsweise der Registrierungsverfahren wenigstens in groben Zügen zu kennen. Im Kapitel 5 werden einzelne Registrierungsverfahren beschrieben, sowie Vor- und Nachteile beleuchtet. Wichtig ist es zu verstehen, dass eine zuverlässige Registrierung von Messdaten nicht mit der Berechnung von paarweisen Registrierparametern endet. Diese Berechnung ist nur ein Zwischenergebnis eines übergeordneten Prozesses.

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, können alle Registrierungsverfahren versagen. Daher ist von einer qualitativen Bewertung basierend auf relativen Qualitätsmaßen, die auf einzelnen Registrierungen basieren, abzusehen. Stattdessen muss überprüft werden, ob die erzielten Ergebnisse frei von Fehlern, Widersprüchen und Spannungen sind. Diese Ergebnisse basieren auf redundanten Informationen – genau so, wie es im Vermessungswesen bei der Prozessierung von Messdaten seit über 200 Jahren üblich ist (Legendre 1805, Gauß 1809).

Übertragen auf die Ermittlung von Registrierparametern bedeutet dies, Laserscannerstandpunkte so zu wählen, dass das Messobjekt redundant aufgenommen wird, und somit eine Vernetzung zwischen verschiedensten Laserscannerstandpunkten erzielt wird. Durch diese Vernetzung kann die Zuverlässigkeit der ermittelten Registrierparameter wesentlich gesteigert werden. Dieser zweite Teil des Prozesses wird als Netz- oder Blockausgleichung (Jäger et al. 2005, S. 237 ff.) bezeichnet. In diese fließen alle Beobachtungen ein, z. B. tachymetrische Anschlusspunkte, Inklinometerbeobachtungen und Registrierungen. Das Ergebnis der Blockausgleichung hilft also, fehlerhafte Beobachtungen im Netz zu identifizieren und zu eliminieren, die sonst kostspielige Revisionen in der Produktions- oder Nachbearbeitungsphase verursachen würden, siehe Abschnitt 2.2. Sobald die Blockausgleichung keine signifikanten Diskrepanzen mehr aufweist, kann der Registrierungsprozess als abgeschlossen betrachtet werden

5 Registrierungsverfahren

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Verfahren für die Registrierung vorgestellt, die entweder alleinstehend oder in Kombination Verwendung finden. In der Regel unterliegt die Registrierung einem kaskadierenden Prozess, bei dem die relative Lage und Orientierung von Punktwolken schrittweise verfeinert wird. Welche Algorithmen eingesetzt werden oder welche Prozessfolge durchlaufen wird, hängt unter anderem vom Objekt selbst und / oder den vorliegenden Begebenheiten im Feld ab. So können beispielsweise Vorausrichtungen der Punktwolken mit Hilfe von GNSS unter freiem Himmel bestimmt werden, nicht aber in Innenräumen, wo unter anderem etwa inertielle Messeinheiten eingesetzt werden. Im Allgemeinen lässt sich die Registrierung in zwei Hauptansätzen unterteilen. Ein Ansatz umfasst Registrieralgorithmen, bei denen die Registrierparameter basierend auf redundant erfassten Bereichen innerhalb zweier Punktwolken bestimmt werden. Hiervon unterscheidet sich das als direkte (Geo-) Referenzierung (siehe Abschnitt 7.5) bezeichnete Registrierungsverfahren grundlegend, da die Registrierparameter direkt mit Hilfe von Sensoren ermittelt werden.

5.1 Manuelle Vorausrichtung

Die einfachste Methode zur Vorausrichtung von Punktwolken ist die manuelle Vorausrichtung. Sie wird dann herangezogen, wenn kein automatischer Algorithmus die Laserscans

zueinander ausgerichtet. Dies kann entweder ganz am Anfang des Registrierprozesses stehen, oder eine fehlgeleitete Registrierung korrigieren. Da dieser manuelle Eingriff vor allem bei mehreren hundert Scanpositionen sehr zeitaufwändig ist, sollte die manuelle Vorausrichtung die Ausnahme und nicht die Regel sein. Es gilt, den letzten Laserscan so nahe zum vorhergehenden zu schieben bzw. zu drehen, dass der nachfolgende ICP-Algorithmus (vgl. Abschnitt 5.4) die Punktwolken „millimetergenau“ zusammenschieben kann. Dafür stehen in der Regel drei Werkzeuge zur Verfügung: (i) Verschieben in der x-/y-Ebene, (ii) Rotieren in der x-/y-Ebene und (iii) Anheben in z-Richtung. Die in der

Abbildung 15 gezeigten Symbole zeigen in gelber Farbe das gerade aktive Werkzeug (beispielhaft aus der Software RiSCAN PRO entnommen).

Es wird hier vorausgesetzt, dass die Laserscanpositionen hinreichend genau nivelliert sind, also nicht mehr in die x-y-Ebene gekippt werden müssen. Für die Messung der Laserscanneigung werden üblicherweise Neigungssensoren verwendet. Wenn auch dieser Freiheitsgrad für den Anwender freigegeben wird, so besteht die Gefahr, dass ganze Projekte verkippt werden.

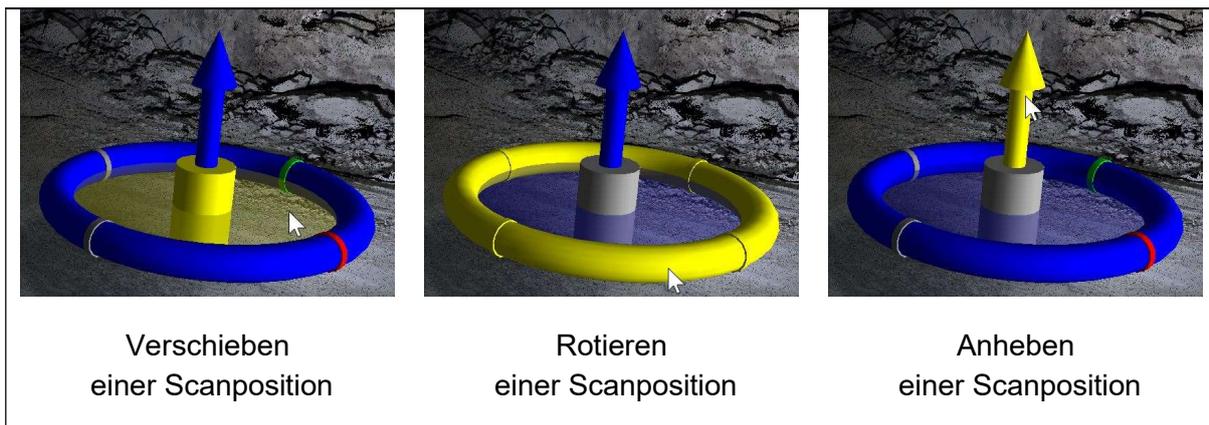


Abbildung 15: Beispiele für Werkzeuge zur manuellen Vorausrichtung von Scanpositionen

5.2 Zielmarkenbasierte Registrierung

Bei der zielmarkenbasierten Registrierung werden künstliche Zielzeichen verwendet, um die Transformationsparameter zwischen den einzelnen Laserscans zu bestimmen. Dies ermöglicht es, die im Laserscannerkoordinatensystem vorliegenden dreidimensionalen Punktwolken in ein einheitliches übergeordnetes System zu transformieren.

Die künstlichen Zielzeichen müssen vor der Scanaufnahme innerhalb der aufzumessenden Szene platziert werden. Um die Transformationsparameter zwischen zwei Laserscannerstandpunkten bestimmen zu können, müssen mindestens drei identische Zielzeichen von beiden Standpunkten aus aufgemessen werden. Der Anwender selbst beeinflusst die Güte und Zuverlässigkeit der zu berechnenden Transformationsparameter maßgeblich durch die Positionierung der Zielzeichen in der Laserscanumgebung. Hierbei müssen verschiedene Faktoren

berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Entfernungen zu den Zielzeichen, der Auftreffwinkel des Laserstrahls (bei einigen Zielzeichen relevant), die Sichtbarkeit, etc.

Ganz entscheidend ist aber die Anordnung der Zielzeichen zueinander (Netzgeometrie). Die Planung des Zielzeichennetzes ist nicht trivial. Die Position der Zielzeichen muss so gewählt werden, dass sie eine gute dreidimensionale Verteilung aufweisen (nicht auf einer geraden Linie liegen) und von verschiedenen Laserscannerstandpunkte sichtbar sind. Abhängig vom Messobjekt muss die Anzahl und die Position der Laserscannerstandpunkte gewählt werden. Um eine zeitoptimierte vollständige Objektaufnahme gewährleisten zu können, ist eine gute Standpunktplanung die beste Grundlage. Erst diese ermöglicht es optimale und zuverlässige Lösungen mit der geforderten Genauigkeit zu erhalten.

Verwendet werden üblicherweise planare oder sphärische Zielzeichen. Zur Bestimmung der Zielzeichenzentren von planaren Zielzeichen werden bei der überwiegenden Mehrheit der Algorithmen in kommerziellen Implementierungen Verfahren eingesetzt, die auf Bildkorrelationen basieren. Werden planare Zielzeichen auf gekrümmten Flächen wie z. B. Rohren flächenhaft befestigt oder aus sehr schrägen Einfallswinkeln abgetastet, kann dies zu fehlerhaft detektierten Zielzeichenzentren führen. Der Anwender muss dafür Sorge tragen, dass nur einwandfreie Zielzeichen genutzt werden. In Abbildung 16 sind Beispiele für unzureichende Zielzeichen dargestellt, die so für die Registrierung nicht verwendet werden dürfen.

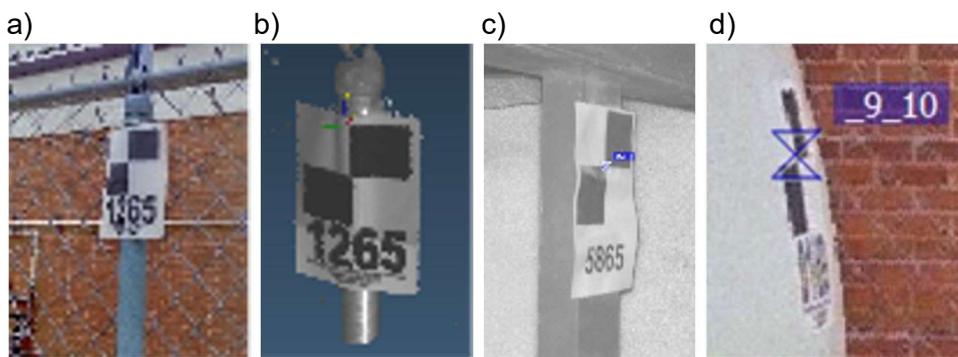


Abbildung 16: Beispiele für unzureichende Zielzeichen:
(a-c) Planarität der Zielzeichen nicht gegeben, (d) Einfallswinkel zu flach

Ein großer Vorteil von künstlichen Zielmarken besteht darin, dass diese tachymetrisch aufgemessen werden können. Sind die Koordinaten der verwendeten künstlichen Zielzeichen in einem übergeordneten Koordinatensystem bekannt, können einzelne oder bereits registrierte Scans in dieses Koordinatensystem transformiert werden.

Soll die Registrierung verschiedener Laserscanpositionen allein auf Basis von künstlichen Zielzeichen erfolgen, so kann das Anbringen der Zielzeichen viel Zeit in Anspruch nehmen, da eine Mindestanzahl von identischen Zielzeichen zwischen den zu registrierenden Laserscanpositionen sichtbar sein muss. Diese Tatsache stellt für einige Messobjekte eine schier unlösbare Aufgabe dar. Aus rein wirtschaftlicher Sicht ist es daher empfehlenswert, Zielmarken für die Registrierung von umfangreichen Laserscanprojekten lediglich als unterstützende Registrierungsmöglichkeit zu verwenden.

5.3 Vorausrichtung durch zusätzliche Sensoren

Das automatische Finden von Startwerten für die Registrierung ist nicht trivial. Diese sind für die Registrierung jedoch von besonderer Bedeutung, da **alle** Registrierungsverfahren in lokalen Minima enden können, wenn ungeeignete Startwerte gewählt wurden. Was bedeutet das? Man erhält einen Satz von Registrierungsparametern, der bereits falsch ausgerichtete Scans falsch ausrichtet, und das ist nicht zielführend. Die wahrscheinlich größte Revolution im terrestrischen Laserscanning war die Ausstattung der Scanner mit zusätzlichen Sensoren, die es ermöglichen, aus Messdaten Unterschiede in der Lage und Ausrichtung zwischen den Scans abzuleiten. Abbildung 17 zeigt zwei Standpunkte mit zwei unterschiedlichen lokalen Koordinatensystemen, was folglich zu Unterschieden in der Orientierung und Position führt.

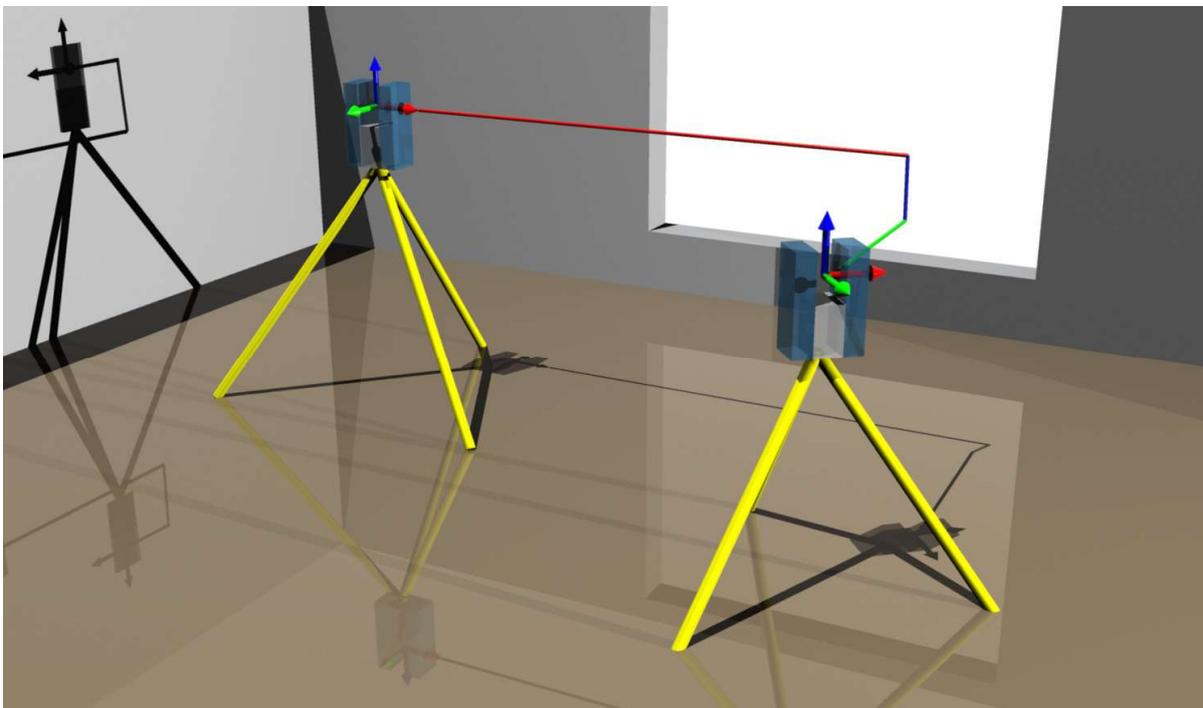


Abbildung 17: Zwei Standpunkte mit unterschiedlichen Orientierungen und Positionen (Wujanz 2020a)

5.3.1 Strategien zur Vorausrichtung mittels Zusatzsensoren

Frühe Entwicklungen nutzten häufig GNSS-Techniken (Reshetyuk 2010), um Standpunktpositionen in einem übergeordneten Koordinatensystem oder zusätzlich Orientierungsunterschiede zu bestimmen (Paffenholz 2012). Da die Satellitennavigation auf die direkte Sicht zu Satelliten angewiesen ist, waren diese Strategien zwar für Aufgaben im Außenbereich nützlich, aber für die Datenerfassung im Innenbereich nicht sehr hilfreich. Inzwischen werden im Laserscanning zusätzliche Sensoren, wie Beschleunigungssensoren, Gyroskope, Barometer, Kompass und Kameras verwendet, um sowohl im Außenbereich als auch in Innenräumen eine Vorausrichtung ableiten zu können.

Tabelle 1: Im terrestrischen Laserscanning verwendete Sensoren zur Vorausrichtung

Sensor	Gemessene Größe, Bemerkung	Genauigkeit
GNSS	Absolute Position (nur im Freien)	DGNSS (L2 RTK): wenige Zentimeter GNSS (L1): einige Meter
Beschleunigungs-sensoren	Gravitationsfeld, Rotationen um die x- und y-Achse	Robust ca. 0,01°
3-Achsen-Magnetfeldkompass	Erdmagnetfeld, Rotation um die z-Achse	Mehrere Grad, abhängig vom Metall in der Umgebung
Inertialmesseinheit (IMU)	Relative Posenbestimmung im Bezug zur vorherigen Laserscannerposition	Typisch: 30cm bei 10-20 sec. andauernder Bewegung beim Positionswechsel (danach starke Drift)
Barometer	Hilfreich, wenn die GNSS-Höhe nicht exakt genug gemessen wurde.	Ca. 1 Meter

Die direkte (Geo-)Referenzierung ist in der Regel weit weniger genau als die durch Registrierung erzielten Ergebnisse. Der Grund dafür ist, dass Sensoren Einschränkungen in Bezug auf die Genauigkeit haben. Die verwendeten Sensoren sind jedoch gut genug, um eine ausreichende Vorausrichtung und damit Näherungswerte für eine anschließende ICP-Registrierung zu liefern, so dass lokale Minima vermieden und die Anzahl der Iterationen bei ICP-Algorithmen reduziert werden. Zudem kann durch die Vorausrichtung ein automatisierter Registrierungsablauf erreicht werden (siehe Abschnitt 5.3.2).

Ein weiterer Vorteil der Verwendung zusätzlicher Sensoren zur Berechnung von Vorausrichtungen hängt mit der Kombinatorik/den Permutationen zusammen. Betrachten wir ein Standardnetzwerk mit 1000 Scans. Das Überprüfen aller möglichen Kombinationen ergibt 499500 Kombinationen, was rechnerisch sehr anspruchsvoll wäre. Die Frage ist also, wie man den Lösungsraum reduzieren kann. Die erste Möglichkeit wäre, einen Suchradius zu definieren, in dem eine andere Station als direkter Nachbar betrachtet wird. Allerdings könnten zwei Laserscans einen Meter voneinander entfernt sein und trotzdem keine Überlappung haben, weil sich eine Wand zwischen den beiden Standpunkten befindet. Daher könnte man die grob registrierten Laserscans in eine Baumstruktur sortieren (Samet 2006), um zu klären, ob es überlappende Bereiche zwischen den Laserscans gibt, die für die Registrierung verwendet werden können.

5.3.2 Automatische Registrierung durch Vorausrichtung mittels SLAM

Neuere Strategien in der automatischen Vorausrichtung setzen auf Visual-SLAM-Algorithmen (SLAM steht für den englischen Begriff „Simultaneous Localization And Mapping“). Hierzu werden während der Bewegung des Laserscanners von einem Standpunkt zum nächsten Standpunkt fortlaufend Bilder der im Laserscanner eingebauten Kameras ausgewertet. Zu Beginn werden auf dem Startstandpunkt automatisch optisch markante Merkmale in den Kamerabildern detektiert, so dass anhand ihrer 3D-Position in der zuvor erfassten Punktwolke per Rückwärtsschnitt die Startposition bestimmt werden kann. Während der Laserscanner zum nächsten Standpunkt transportiert wird, werden diese Merkmale in den Bildern mittels «Feature-Tracking» für eine fortlaufende Positionsbestimmung verfolgt. Zusätzlich werden in der Bewegung ständig weitere Merkmale detektiert und verfolgt und schließlich ihre 3D-Position durch Vorwärtsschnitt bestimmt, um 3D-Merkmale, die die Sichtfelder der Kameras verlassen, durch neue zu ersetzen (siehe Abbildung 18). Somit wird sichergestellt, dass bis zur Aufstellung des Laserscanners auf dem nächsten Standpunkt für den gesamten Bewegungsablauf stets genügend 3D-Positionen zur Positionsbestimmung mittels Rückwärtsschnitt verfügbar sind. Die Positionsbestimmung anhand der Kamerabilder kann in einer Kalman-Filterung durch die Daten einer IMU gestützt werden. Bei Ankunft an der nächsten Standpunktposition werden alle Messdaten abschließend einer globalen Bündelblockausgleichung unterzogen (Leica Geosystems, 2020).

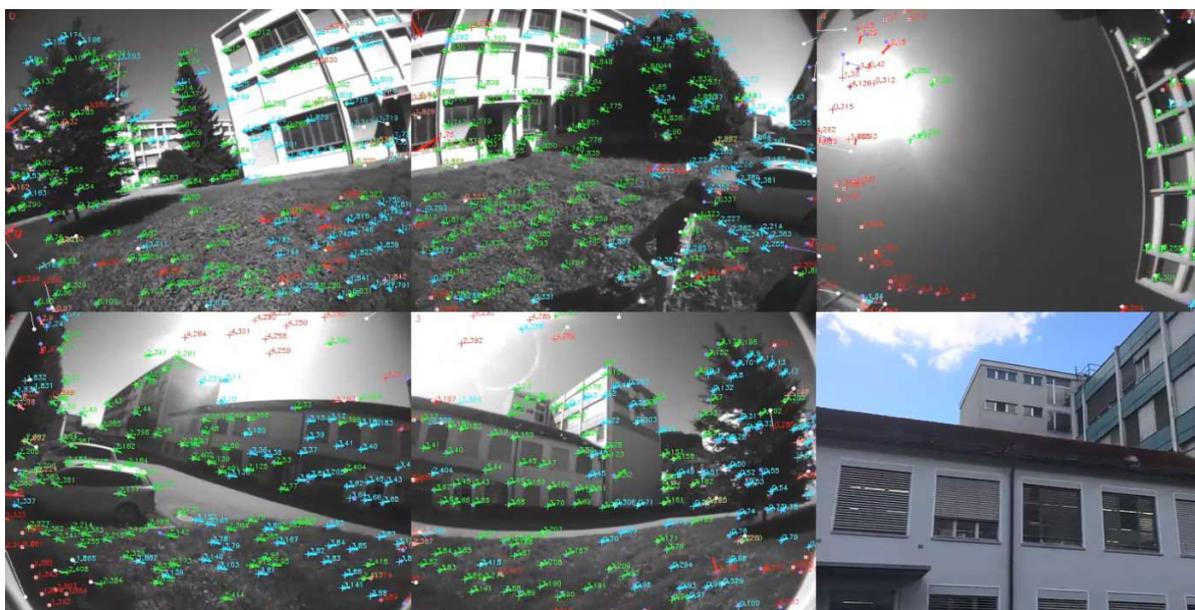


Abbildung 18: Im Visual-SLAM-Kamerabildern detektierte und verfolgte Merkmale (Visualisierung des im Hintergrund laufenden Algorithmus: Grüne Punkte stehen für mittels der hier betrachteten Kamera verfolgte Merkmale, blaue Punkte für mittels einer benachbarten Kamera verfolgte Merkmale. Rote Punkte stehen für als Ausreißer detektierte Merkmale.)

Auf diese Weise können für jede Punktwolke auf einem neuen Standpunkt automatisch Registrierungsparameter zu Laserscans vorhergehender Standpunkte bestimmt werden, die ausreichend genau sind, um in einem nächsten Schritt den gesamten Punktwolkenverband automatisch zu registrieren, z. B. mittels ICP.

Durch die Unterstützung der IMU und in Kombination mit einem automatischen merkmalsbasierten Registrierungsalgorithmus ist das Registrierungsverfahren mittels Visual-SLAM auch in dunklen Messumgebungen zuverlässig einsetzbar.

5.4 Der ICP-Algorithmus («Cloud-to-Cloud-Registrierung»)

Die vielseitigste Registrierungsart ist der Iterative Closest Point Algorithmus (ICP), der in der Praxis auch als Cloud-to-Cloud-Registrierung bezeichnet wird. Die Grundlage des ICP-Algorithmus sind redundant erfasste Regionen zweier Laserscans, auf deren Basis die Registrierungsparameter berechnet werden. Der Algorithmus zielt auf eine Minimierung der Abstände überlappender Anteile der Laserscans durch Variation von Position und Rotation des anzupassenden Laserscans in einem iterativen Prozess. Dieser endet, wenn ein Konvergenzkriterium erfüllt wird. Das ICP-Verfahren minimiert also die Punktabstände in Überlappungsbereichen von Laserscans.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Strategie gegenüber der zielzeichenbasierten Registrierung ist die tatsächliche Nutzung der redundanten Informationen in den überlappenden Regionen von zwei oder mehr Laserscans. ICP-basierte Algorithmen sind auf eine ausreichende Vorausrichtung von zwei Datensätzen angewiesen, andernfalls besteht die Gefahr, dass der Optimierungsalgorithmus in ein lokales Minimum konvergiert und damit zu fehlerhaften Ergebnissen führt.

Das allgemeine Konzept dieses ICP-Algorithmus ist in Abbildung 19 dargestellt, wobei die Ausgangssituation in den roten Kästen dargestellt ist. Es gibt drei generelle Möglichkeiten, die Vorausrichtung zu erreichen, nämlich (i) durch manuelle Bestimmung einiger weniger Korrespondenzen, (ii) durch Messung der individuellen Lage und Orientierung zweier Laserscans durch Nutzung von Zusatzsensorik (siehe Abschnitt 5.3.2), die heute häufig in modernen Laserscannern zu finden ist, und (iii) durch Verwendung von Vorausrichtungsalgorithmen.

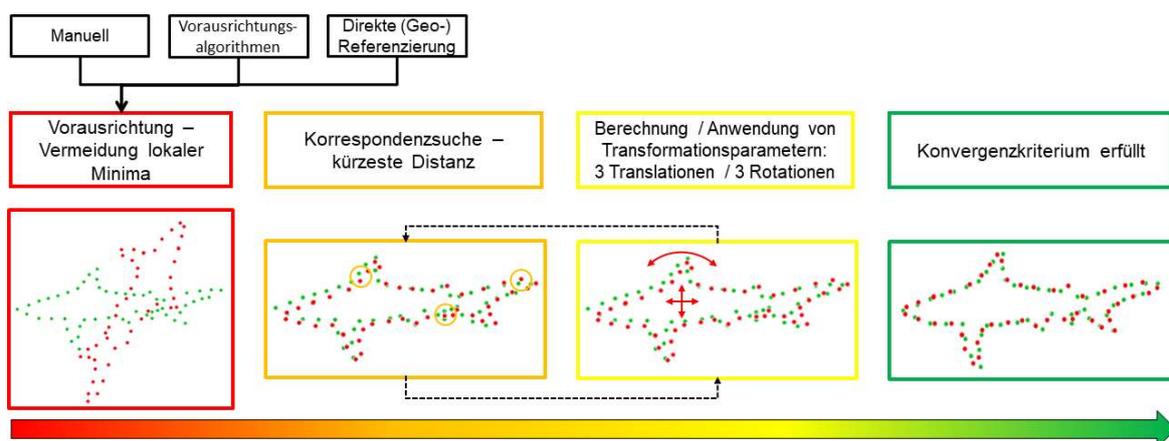


Abbildung 19: Ablauf einer Registrierung mittels ICP-Algorithmus (nach Wujanz 2019c)

Der nächste Schritt (orange in Abbildung 19) ist die Korrespondenzsuche. Je nach Implementierung werden Korrespondenzen entweder durch die kürzesten Abstände zwischen einem Punkt zu einem anderen (Besl & McKay 1992) oder von einem Punkt zu einer Ebene

(Chen & Medioni 1992) bestimmt. Auf der Grundlage dieser Informationen werden Registrierungsparameter berechnet und auf einen der Datensätze angewendet (gelb in Abbildung 19). Die schwarz gestrichelten Pfeile zwischen den orangen und gelben Kästen zeigen an, dass diese Schritte iterativ wiederholt werden, bis ein Konvergenzkriterium erfüllt ist und die endgültige Lösung gefunden wurde. Eine Folge der Iterationen ist, dass im Verlauf des Algorithmus verschiedene Korrespondenzen hergestellt werden.

Ein häufiges Problem bei ICP-basierten Algorithmen ist die Qualitätssicherung, das in Abbildung 20 veranschaulicht wird. Als Eingabe dienen zwei völlig unterschiedliche Datensätze, die mit einer kommerziellen Lösung erfasst wurden. Die Einstellungen des Algorithmus sind links unten in der Abbildung 20 zu finden. Die Stichprobengröße gibt an, für wie viele Punkte der ICP versuchen soll, Korrespondenzen zu finden. Dieser Wert beschränkt sich in der Regel auf wenige tausend Punkte, um die Laufzeit und den Speicherverbrauch gering zu halten. Der zweite Wert bestimmt den größten Abstand zwischen zwei Punkten aus zwei Datensätzen, die eine Korrespondenz bilden können. Es ist offensichtlich, dass die resultierenden Qualitätsmaße des ICP immer kleiner als dieser Wert sind. Die rechte Seite zeigt das generierte Ergebnis, das offensichtlich unsinnig ist, obwohl das numerische Qualitätsmaß, das das mittlere Residuum der korrespondierenden Punkte ist, auf ein sehr genaues Ergebnis schließen lässt. Dieses Beispiel verdeutlicht eine Eigenschaft des ICP-Algorithmus: Er findet immer eine Lösung, aber nicht unbedingt die richtige. In der Praxis wird daher meist eine visuelle Kontrolle angewendet. Das bloße Betrachten von Daten ist jedoch recht subjektiv und kann lediglich stichprobenartig durchgeführt werden.

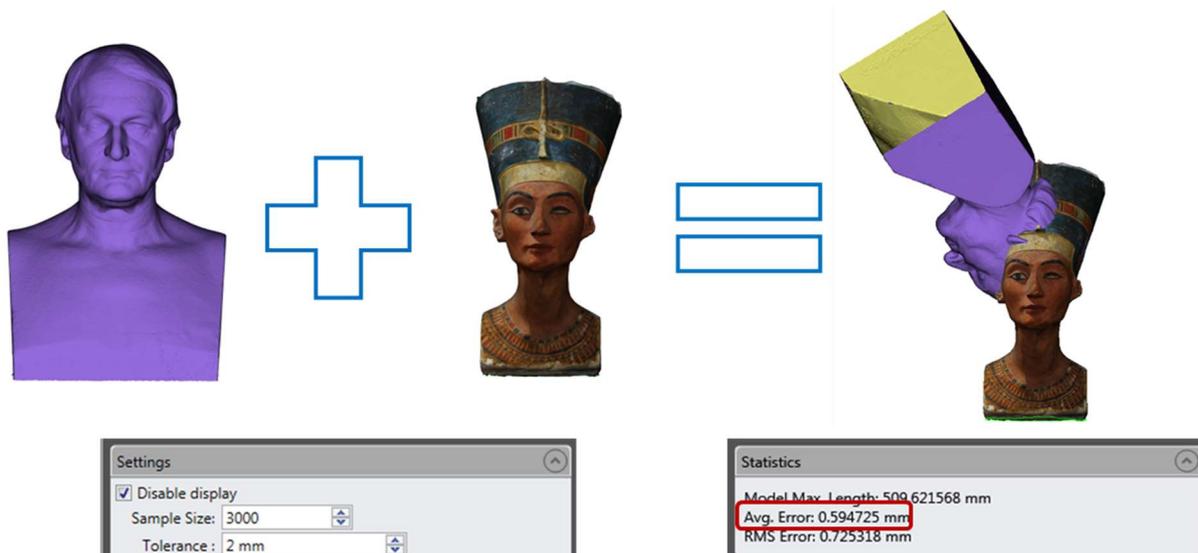


Abbildung 20: Die Problematik der numerischen Qualitätssicherung mit ICP (Wujanz 2019c)

5.5 Voxelbasiertes automatisches Registrierungsverfahren

In der Praxis zeigt sich, dass mit zunehmender Größe des Messgebiets das Positionieren und Anbringen von Zielmarken aufgrund des hohen Zeitbedarfs unwirtschaftlich ist. Um effizient große Gebiete mit einem Laserscanner zu vermessen, sollte deshalb möglichst auf

Zielmarken verzichtet werden (bis auf ein paar wenige, die der Genauigkeitsüberprüfung dienen). Dies macht ein automatisches Registrierungsverfahren notwendig, da viele Laserscans unmöglich manuell zusammengesetzt werden können. Bevor das präzise ICP-Verfahren (siehe Abschnitt 5.4) angewendet werden kann, muss der zu registrierende Laserscan a priori hinreichend genau automatisch zu den bereits registrierten Laserscans ausgerichtet werden. Dabei ist es wichtig, dass dies in einem möglichst robusten Prozess bewerkstelligt wird, also unabhängig vom Umgebungslicht, vom GNSS-Empfang oder von der Zielbeschaffenheit. Die hier vorgestellte Methode erfordert lediglich eine hinreichende Überlappung der einzelnen Laserscans.

Im sogenannten voxelbasierten automatischen Registrierungsverfahren wird im ersten Schritt das Datenvolumen der Laserscans auf den notwendigen Teil reduziert. Ein Laserscan mit typisch mehr als 20 Millionen Messpunkten wird zu einem Voxel-Datensatz mit ein paar wenigen hunderttausend Voxeln reduziert. Hierbei repräsentiert ein Voxel (Würfel) eine Vielzahl von Messpunkten des aufgenommenen Laserscans. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Voxelgrößen haben sich in der Praxis als zielführend erwiesen. Sie werden einmalig in einem Laserscanprojekt bestimmt und sind grob von der Laserscanreichweite, also von den Umgebungsbedingungen, abhängig. Dieser Voxel-Datensatz kann als „räumliches Signal“ aufgefasst werden und stellt die Basis für den Übergang mittels der Fouriertransformation aus dem räumlichen Bereich in den sogenannten Spektralbereich dar. Die entscheidende Eigenschaft der Fouriertransformation für diesen Anwendungsfall ist, dass sich eine Verschiebung und Drehung eines Datensatzes im Spektralbereich so darstellt, dass sich die Drehung nur im Betrag der Fouriertransformierten des transformierten Datensatzes zeigt (Ullrich 2017)

Tabelle 2: Voxelgrößen für die automatische Registrierung von Laserscanpositionen

Szene	Voxelgröße
Kleiner Innenraum	5 cm
Großer Innenraum	10 cm
Städtischer Außenbereich	25 cm
Außerstädtischer Außenbereich	50 cm

Dieses Verfahren erlaubt bei hinreichend großen Überlappungen eine robuste Bestimmung der sechs Freiheitsgrade der neu bestimmten Laserscanposition in Bezug auf die bereits zuvor registrierten Daten. In diesem ersten Schritt kann so eine Registrierengenauigkeit von weniger als einer Voxelgröße erreicht werden, also ein paar Zentimetern. Die „Millimeter-Genauigkeit“ der Registrierung wird durch einen modifizierten ICP-Algorithmus erreicht. Wenn alle Scans eines Projektes korrekt registriert wurden, kann eine abschließende Blockausgleichung die Restabweichungen minimieren.

Die Schritte der voxelbasierten, automatischen Registrierung werden in Abbildung 21 visualisiert.

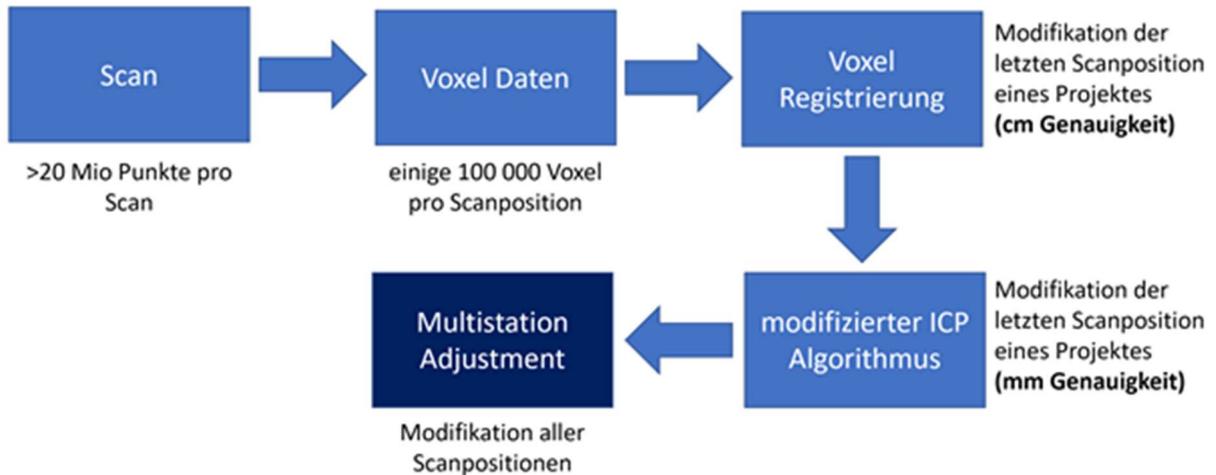


Abbildung 21: Schritte des voxelbasierten automatischen Registrierverfahren

Da der beschriebene Prozess automatisiert abläuft, kann er (bis auf die Blockausgleichung) auch im Laserscanner selbst realisiert werden. Der resultierende Voxeldatensatz kann bereits beim Scannen angezeigt werden und dient so dem Operator als Orientierungshilfe, wie die folgende Abbildung zeigt.

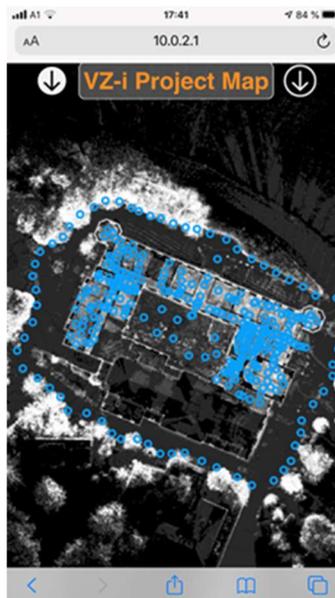


Abbildung 22: Das im Laserscanner ablaufende voxelbasierte automatische Registrierverfahren erlaubt die Darstellung von Laserscandaten und -positionen bereits beim Scannvorgang.

Im städtischen Außenbereich hat sich eine Distanz zwischen aufeinanderfolgenden Laserscanpositionen von etwa zehn Schritten als optimal herausgestellt. So entsteht eine

dichte, überlappende und fast die gesamte Oberfläche beschreibende Punktwolke. Die Scanlücken sind minimal und das sogenannte Straßenmobiliar kann vollständig aufgenommen werden. Im Inneren von Gebäuden ist dieser Abstand zum Teil wesentlich geringer. Auf Freilandflächen und Autobahnen haben sich registrierbare Scanketten mit Distanzen zwischen den einzelnen Laserscanpositionen von bis zu 40 Metern als zuverlässig erwiesen.

5.6 Registrierung mit geometrischen Primitiven

Nachdem künstliche Zielzeichen für die Registrierung eingesetzt wurden, ist es an der Zeit, zu einigen natürlicheren Informationen überzugehen. Natürlich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass geometrische Primitive (z. B. Kugeln, Zylinder (Moritani et al. 2019), Ebenen (z. B. Previtali et al. 2014, Wujanz et al. 2018) und weitere), die in einer Szene inhärent gegeben sein können, zur Berechnung der Registrierungsparameter verwendet werden. Der erste Schritt dieses Verfahrens ist ein Segmentierungsprozess, bei dem einzelne Punkte einem Primitiv zugeordnet werden. Abbildung 23 zeigt eine Industrieszene in Form eines Intensitätsbildes nach der Segmentierung. In diesem Fall wurden Ebenen erkannt, die in Abhängigkeit von der Richtung ihrer Flächennormalen eingefärbt sind.

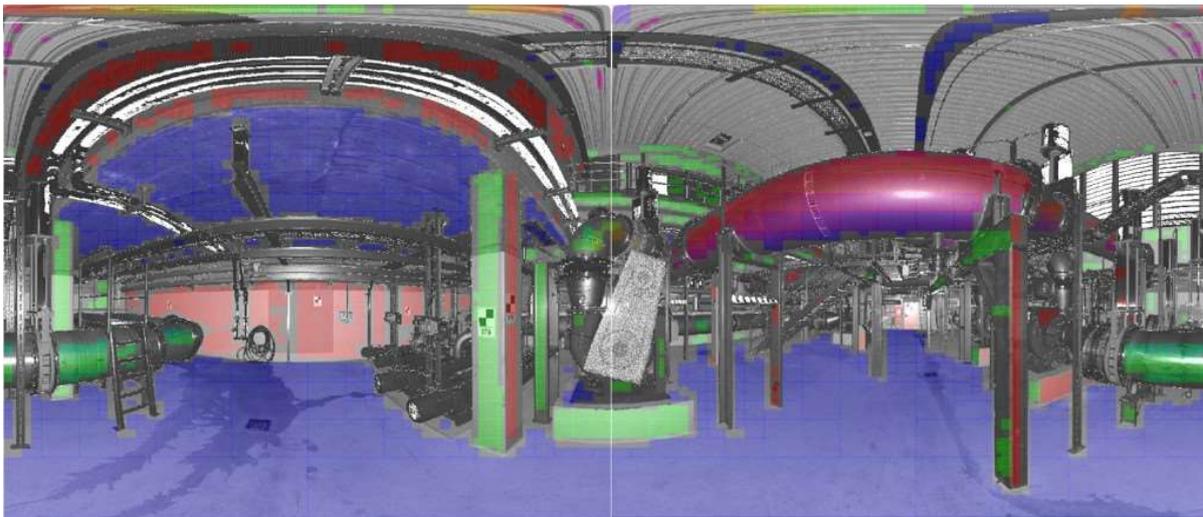


Abbildung 23: Erkannte Ebenen, in Abhängigkeit von der Richtung ihrer Flächennormalen eingefärbt (Wujanz 2020a)

Alle segmentierten Punkte werden dann verwendet, um Parameter in Abhängigkeit vom jeweiligen Geometrieobjekt (Primitiv) zu schätzen. Anschließend müssen Korrespondenzen zwischen den erkannten geometrischen Objekten hergestellt werden, um Registrierungsparameter zwischen den Laserscans zu berechnen. Im Gegensatz zum ICP (siehe Abschnitt 5.4) sind diese Verfahren nicht iterativ und damit weit weniger abhängig von den gewählten Einstellungen. Da jede Anpassung zusätzlich stochastische Maße liefert, können diese Werte zur Gewichtung einzelner Primitive bei der Registrierung verwendet werden, so dass präzisere Teile einer Szene einen höheren Einfluss auf das Ergebnis haben als weniger präzise Teile. Die Verwendung von geometrischen Primitiven für die Registrierung hat mehrere Vorteile, wobei der erste die Reduzierung der Komplexität ist. Anstatt Millionen von Punkten werden nur hunderte oder tausende von Primitiven verarbeitet, obwohl die ursprünglichen

Informationen berücksichtigt werden. Der zweite Vorteil ist eine deutliche Erhöhung der Genauigkeit, da ausgeglichene Parameter genauer und zuverlässiger sind als einzelne Punkte, die z. B. im ICP-Algorithmus verwendet werden. Ein dritter Aspekt, der für diese Ansätze spricht, ist ihre Invarianz gegenüber Unterschieden in der Punktabtastung (siehe Aliasing in Abschnitt 3.2). Doch wo Licht ist, ist auch Schatten: Enthält die Szene keine ausreichende Anzahl gut verteilter korrespondierender Primitive, wird diese Strategie versagen. Geometrische Primitive finden sich typischerweise in von Menschenhand geschaffenen Strukturen wie Gebäuden, Fabriken oder Brücken.

6 Qualitätssicherung im Laserscanning

Eine abschließende visuelle Kontrolle von prozessierten Messdaten ist im Vermessungswesen, unabhängig vom gewählten Messmittel, nicht in Frage zu stellen. Was jedoch kritisch zu hinterfragen ist, ist die im Laserscanning gängige Praxis, als einzige Maßnahme der Qualitätssicherung eine visuelle Plausibilitätsprüfung durchzuführen. Zwar lassen sich grobe Registrierabweichungen meist visuell erkennen, jedoch erlauben es die schiere Menge an Punkten und die eingeschränkte Perspektive bei der Betrachtung von dreidimensionalen Daten nicht, kleine subtile Abweichungen zu erkennen, die spätestens dann zum Problem werden, wenn sie sich in sichtbaren Diskrepanzen äußern. Dieses Vorgehen lässt sich mit dem Misstrauen vieler Nutzer gegenüber numerischen Qualitätsmaßen erklären (siehe z. B. Abbildung 20), die, so die verbreitete Meinung, nicht aussagekräftig sind. Daher werden in diesem Kapitel zunächst verschiedene Metriken zur numerischen Qualitätssicherung diskutiert und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

6.1 Das Konzept der Redundanz

Die Voraussetzung für eine belastbare Qualitätssicherung ist in der Vermessung, wie auch in vielen anderen technischen Disziplinen, Redundanz. Schauen wir uns dies zunächst an einem Beispiel an.

Die Räder eines normalen Autos sind normalerweise mit fünf Radmutter an der Nabe befestigt, während an Rennautos jedes Rad durch genau eine Zentralsicherung gesichert ist. Verliert man eine der Zentralsicherungen, verliert man auch ein Rad inklusive aller unangenehmen Folgen.

Bei der Verarbeitung von Messungen war und ist daher Redundanz bzw. eine Überbestimmung der Schlüssel, um (a) Messungen zu kontrollieren bzw. zu verifizieren und (b) die Qualität eines Netzes zu verbessern - unabhängig davon, welcher geodätische Sensor zur Erfassung der Daten verwendet wurde. Ein urbaner Mythos, der in der Laserscanning-Community häufig genannt wird, ist, dass man seine Registrierungen mit einem Instrument höherer Genauigkeit kontrollieren muss. Wir sollten diese Logik daher durchdenken:

Zum Beispiel kontrolliert man terrestrische Laserscans durch Messungen eines Tachymeters. Aber woher weiß man, dass diese Messungen korrekt sind? Nach der oben genannten Logik müsste man zur Kontrolle tachymetrischer Beobachtungen einen Lasertracker mit einer höheren Genauigkeit als die der Totalstation verwenden. Aber woher weiß man, dass die Lasertracker-Messungen korrekt sind...?

Während der allgemeine Gedanke nachvollziehbar ist - man erhöht die Redundanz innerhalb eines Netzwerks durch zusätzliche Beobachtungen - gibt es immer wirtschaftliche Einschränkungen. Man kann nicht jede einzelne Station im Netzwerk zur Qualitätssicherung einmessen, denn dies wäre schlicht unrentabel. Will man das Netz z. B. durch sorgfältig gewählte tachymetrische Passpunkte stabilisieren, um z. B. einer geforderten Genauigkeit zu genügen, dann ist dies ein ganz anderes Problem, auf das wir zu einem späteren Zeitpunkt eingehen werden. Zunächst einmal ist es unser Ziel, ein Netz zu erstellen, das frei von Abweichungen zwischen benachbarten Laserscans ist. Möglichkeiten, die Redundanz eines Laserscannetzwerks durch zusätzliche Beobachtungen zu erhöhen, sind:

1. GNSS-, tachymetrische und/oder Nivellement-Messungen einzuführen
2. Weitere paarweise Registrierungen hinzuzufügen
3. Daten von Neigungsmessern einbinden

Abbildung 24 zeigt ein Scanprojekt, das auf einem öffentlich verfügbaren Datensatz basiert (siehe Link zu Leica Geosystems (2018), auf «Indoor multi-setup data» klicken), wobei Kreise Scanstandpunkte und Pfeile Registrierungen markieren. Das Netz auf der linken Seite enthält keine redundanten Registrierungen. Daher ist es nicht möglich, zu überprüfen, ob das Netz fehlerhafte Registrierungen enthält. Derselbe Datensatz wurde anschließend in einer redundanten und damit selbstkontrollierenden Konfiguration verarbeitet, bei der jeder Scan durch mindestens zwei Registrierungen verbunden ist.

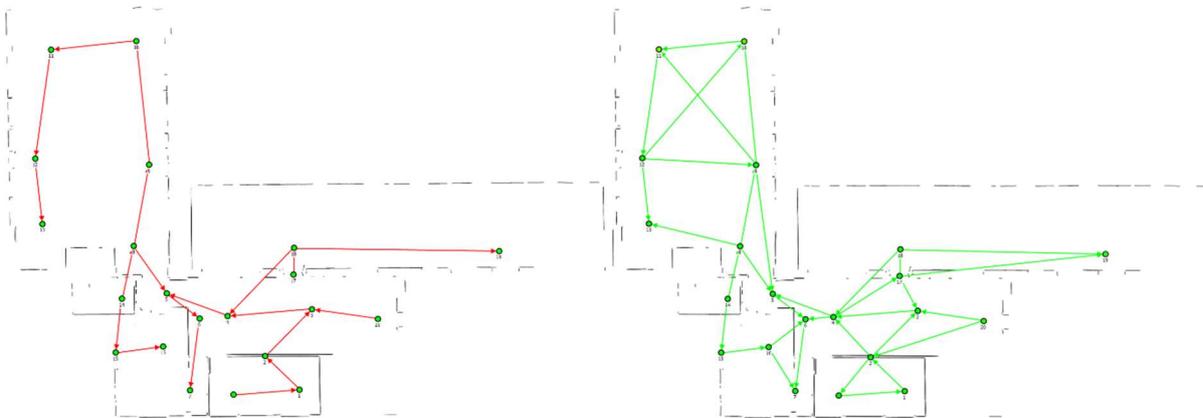


Abbildung 24: Unkontrollierte Netzkonfiguration (links) und selbstkontrollierende Netzkonfiguration (rechts) (Leica Geosystems 2018).

6.2 Berechnung von numerischen Qualitätsmaßen

Das Übersehen von Registrierungsabweichungen kann finanziell sehr schmerzhaft und zudem rufschädigend sein. Die Qualitätssicherung der Registrierung allein auf visueller Kontrolle basieren zu lassen, ist nicht ratsam, da diese zu einer anwenderbezogenen und somit subjektiven Qualitätsbeurteilung führt. Vielmehr ist es ratsam, Abweichungen in der Registrierung durch zuverlässige und aussagekräftige Qualitätsmaße aufzudecken, unabhängig vom gewählten Registrierungsverfahren. Das Ableiten von „aussagekräftigen Qualitätsmaßen“ kann im Laserscanningkontext jedoch eine große Herausforderung darstellen.

Ein Wissenschaftsbereich, der im Laufe der Jahrhunderte viele aussagekräftige Qualitätsmaße entwickelt hat, ist die Geodäsie bzw. das Vermessungswesen. Deshalb ist es sehr verwunderlich, dass die überwiegende Mehrheit der gesamten Laserscanning-Industrie „Qualität“ mit nur einem einzigen Maß in Verbindung bringt, nämlich den Residuen. Das Hauptproblem ist, dass Residuen auf unterschiedliche Weise berechnet werden können. Man muss also verstehen, welche Art von Residuen man betrachtet, was sie aussagen und, was am wichtigsten ist, was sie nicht aussagen.

Beträge von Residuen sind, geodätisch ausgedrückt, datumsunabhängig. Das bedeutet, dass diese Qualitätsmaße immer gleichbleiben, auch wenn die Punktwolken beliebig verschoben werden oder rotiert werden. Zu beachten ist, dass sich (a) Residuen auf paarweise Registrierungen beziehen können, bei denen die Residuen zwischen zwei Laserscans minimiert werden (Besl & McKay 1992) oder (b) Residuen aus einer Blockausgleichung stammen können (Pulli 1999), bei der die unvermeidlichen Diskrepanzen zwischen allen redundanten paarweisen Registrierungen minimiert werden. Das größte Problem ist jedoch, dass sich in der Registrierung von Laserscans drei Strategien zur Berechnung von Residuen zwischen Laserscans durchgesetzt haben, die im Folgenden diskutiert werden, nämlich:

1. Residuen zwischen diskreten Punkten (Zielzentren), siehe 6.2.1
2. Residuen zwischen den Laserscans selbst, siehe 6.2.2
3. Residuen zwischen redundanten Registrierungsparametern (Blockausgleichung), siehe 6.2.3

6.2.1 Residuen aus abgeleiteten Punkten bzw. Targets

Künstliche Zielmarken sind in der Praxis weit verbreitet, da ihre Qualitätsmaße aussagekräftig und leicht zu interpretieren sind. Da der allgemeine Arbeitsablauf und die metrische Interpretation im Allgemeinen mit geodätischen Beobachtungen vergleichbar sind, fühlen sich diese Zahlen für viele Menschen, insbesondere für Vermesser, recht vertraut an. Grundsätzlich dienen Zielmarken der paarweisen Registrierung von Laserscans und/oder der Überführung derselben in ein übergeordnetes System. Zunächst wird der lokale (paarweise) Fall betrachtet.

Abbildung 25 veranschaulicht ein Szenario mit drei Stationen, die mit drei Kugeln registriert wurden. Die Farben der Kugeln zeigen, von welchem Standpunkt aus sie erfasst wurden. Da das Kugeltripel von drei Stationen erfasst wurde, sind in Abbildung 25 neun Kugeln zu sehen. Die Qualitätsmaße nach einer zielmarkenbasierten Registrierung sind Residuen (auch Restklaffen genannt). Diese beschreiben die verbliebenen Spannungen zwischen den einzelnen Zielmarkenzentren nach der Überführung in ein gemeinsames Koordinatensystem.

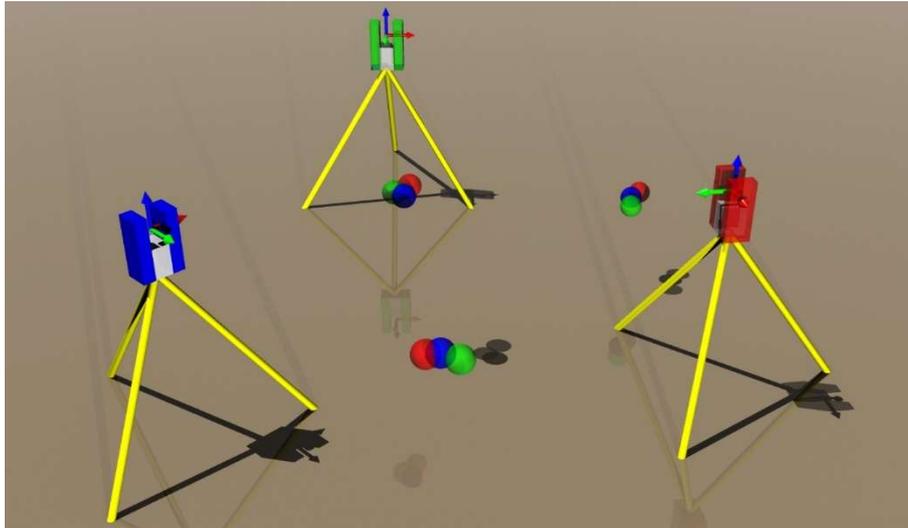


Abbildung 25: Registrierung von drei Laserscans über lokale Zielmarken

Zur Überführung von erfassten Laserscans in ein übergeordnetes Koordinatensystem, müssen für die einzelnen Zielzeichen übergeordnete Koordinaten mit Hilfe geodätischer Messungen bestimmt werden. Diese erhöhen zusätzlich die Redundanz eines Netzes und sind als unabhängige Kontrollinstanz von großem Wert. Allerdings ist deren Einbringung immer mit zusätzlichem Aufwand verbunden, was sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit eines Projektes auswirkt. Folglich stellt sich in der Praxis die Frage, wie viele Anschlusspunkte bei welcher Genauigkeit zum Erreichen einer Qualitätsvorgabe benötigt werden.

6.2.2 Residuen zwischen Punktwolken

Residuen zwischen überlappenden Punktwolken können prinzipiell auf zwei Arten berechnet werden. Eine Gemeinsamkeit beider Strategien ist, dass nicht alle im Überlappungsbereich liegende Punkte für die Berechnung der Qualitätsmaße herangezogen werden, sondern lediglich eine Auswahl. In der Regel umfasst diese wenige tausend Punkte, um die benötigte Laufzeit sowie die Speicherauslastung auf ein angemessenes Maß zu reduzieren. Die geometrische Verteilung der gewählten Punkte bleibt dem Benutzer in der Regel verborgen, wobei ein regelmäßiges Raster die optimale Lösung darstellt (Wujanz 2012).

Zur Veranschaulichung der beiden Strategien wird im Folgenden ein Beispiel verwendet, dass in Abbildung 26 zu sehen ist. In dieser ist ein Schnitt durch zwei registrierte Punktwolken zu sehen, die durch grüne und orange Kugeln hervorgehoben sind. Die digitalisierte Fläche ist durch eine graue Linie dargestellt. Es ist in diesem Kontext unerheblich, wie die Laserscans registriert wurden.

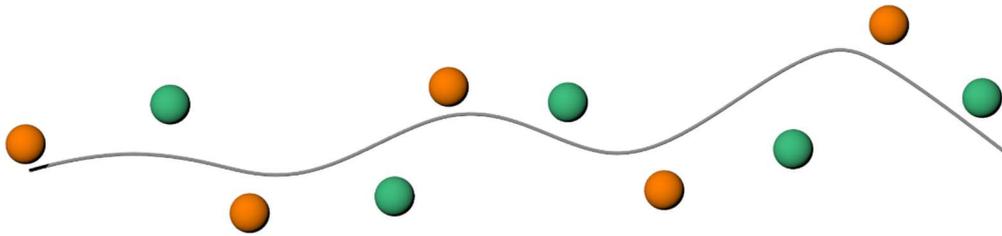


Abbildung 26: Schnitt durch zwei registrierte Punktwolken
(Wujanz 2021a)

Die erste Strategie basiert auf der Bildung von Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen. Für jeden ausgewählten Punkt aus der ersten Punktwolke wird der nächstgelegene Punkt aus der zweiten Punktwolke bestimmt. Im vorliegenden Beispiel wurden vier grüne Kugeln ausgewählt, um die Qualitätsmaße für diese Registrierung zu berechnen. Die Auswahl erfolgte für das in Abbildung 27 dargestellte Beispiel von links nach rechts, ausgehend von der ersten grünen Kugel. Es ist offensichtlich, dass eine umgekehrte Reihenfolge zu anderen Korrespondenzen und somit anderen Qualitätsmaßen führen würde.

Die bestimmten Korrespondenzen sind in der folgenden Abbildung durch gelbe Verbindungen hervorgehoben. Ihre Länge gibt die Größe der einzelnen Residuen an. Als letzter Schritt wird ein einzelner numerischer Wert berechnet, z. B. der Mittelwert aller Residuen. Für den vorliegenden Fall beträgt dieser Wert im Durchschnitt 7,8 mm (Residuen von links nach rechts: 7,8 mm, 7,0 mm, 7,4 mm und 9,0 mm).

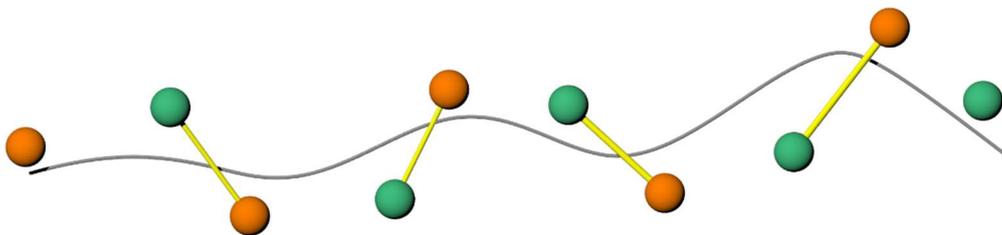


Abbildung 27: Bildung von Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen
(Wujanz 2021a)

Es ist offensichtlich, dass die Auswirkung der lokalen Punktverteilung einen großen Einfluss auf die zuvor berechneten Qualitätsmaße hat. Daher wird das in Abbildung 26 und Abbildung 27 gezeigte identische Szenario nun durch die Berechnung von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen nochmals durchlaufen, wie in Abbildung 28 dargestellt. Im ersten Schritt wurde der orange Datensatz trianguliert, was durch die hellgrau eingefärbten geraden Segmente verdeutlicht wird. In der Regel wird die Triangulation nur lokal, um ausgewählte Punkte herum ausgeführt. Anschließend werden die grünen Punkte nach Möglichkeit auf die entsprechenden Dreiecke projiziert. Der Abstand zwischen einem grünen Punkt und dem projizierten Lotfußpunkt stellt das resultierende Residuum dar. In diesem Beispiel beträgt die "Qualität" der Registrierung 3,4 mm (Residuen von links nach rechts: 5 mm, 3,5 mm, 2,6 mm und 2,5 mm), ausgehend vom berechneten arithmetischen Mittelwert. Wenn man sich nur die Zahlen ansieht, könnte man annehmen, dass die Qualität dieser Registrierung in etwa doppelt so genau ist wie die der ersten, obwohl die vorliegenden Registrierparameter identisch sind.

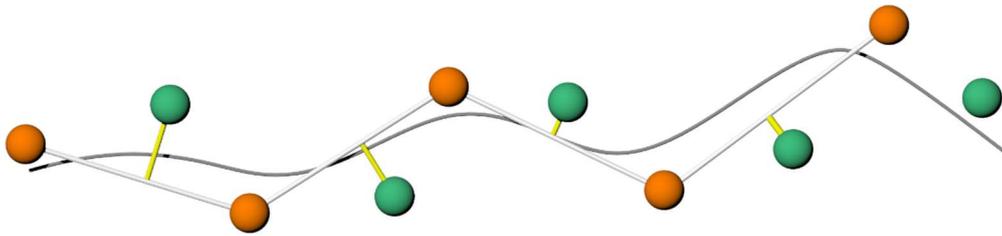


Abbildung 28: Bildung von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen
(Wujanz 2021a)

Im nächsten Beispiel, das in Abbildung 29 dargestellt ist, wurde der grüne Datensatz in Bezug auf seine ursprüngliche Lage gedreht und verschoben, um die Auswirkungen eines unscheinbaren Parameters zu demonstrieren. Manchmal wird dieser Wert z. B. als maximaler Suchabstand (bei einigen Cloud-2-Cloud-Implementierungen), als Korrespondenzschwelle oder als Toleranz bezeichnet und ist in einigen Fällen in den Eigenschaften des angewandten Registrierungsalgorithmus einstellbar. Dieser Parameter gibt den größten Abstand zwischen zwei Punkten aus zwei verschiedenen Punktwolken an, die eine Korrespondenz bilden können. Im Folgenden wird dieser Parameter mit 3,0 mm angesetzt. Die Residuen in diesem Beispiel (von links nach rechts) sind 12,0 mm, 2,6 mm, 2,9 mm und 12,7 mm. Folglich werden zwei Residuen verworfen, da sie größer als der festgelegte Schwellenwert sind, was durch die beiden roten Linien hervorgehoben wird. Folglich beträgt die "Qualität" der Registrierung 2,75 mm. Wenden wir nun denselben Parameter auf das in Abbildung 28 dargestellte Beispiel an, so "verbessern" sich die Qualitätsmaße von 3,4 mm auf 2,55 mm, was natürlich ärgerlich ist.

Kurz gesagt: Wenn dieser Abstand auf 1 mm eingestellt wird, wird das resultierende Qualitätsmaß kleiner als 1 mm sein.

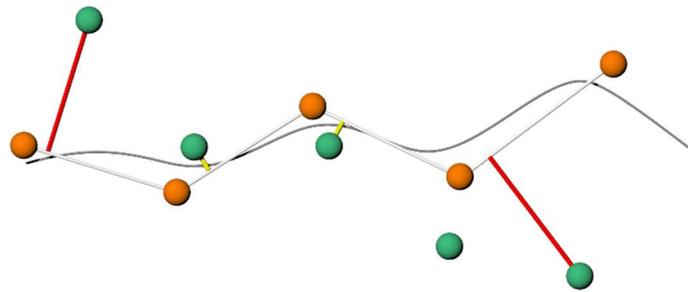


Abbildung 29: Bildung von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen
mit Nutzung einer Korrespondenzschwelle (Wujanz 2021a)

6.2.3 Blockausgleichung

Beim Blockausgleich im Laserscanningkontext werden die sechs Freiheitsgrade aller registrierten Laserscannerpositionen gleichzeitig so optimiert, dass, je nach Ausgangslage der Daten:

- Laserscandaten von benachbarten Laserscannerpositionen übereinstimmen
- GNSS-Messungen mit den Laserscannerpositionen übereinstimmen

- Messungen von Neigungssensoren mit der Ausrichtung der Laserscannerposition übereinstimmen
- Laserscandaten mit extern eingemessenen Kontrollpunkten übereinstimmen

Als Resultat wird im Allgemeinen ein ausführlicher Bericht erstellt. Dort werden unter anderem die Abweichungen der Normalabstände ebener Flächenstücke der einzelnen Scans zueinander angegeben. Das Lesen eines seitenlangen Berichtes erfordert zum Teil Detailwissen.

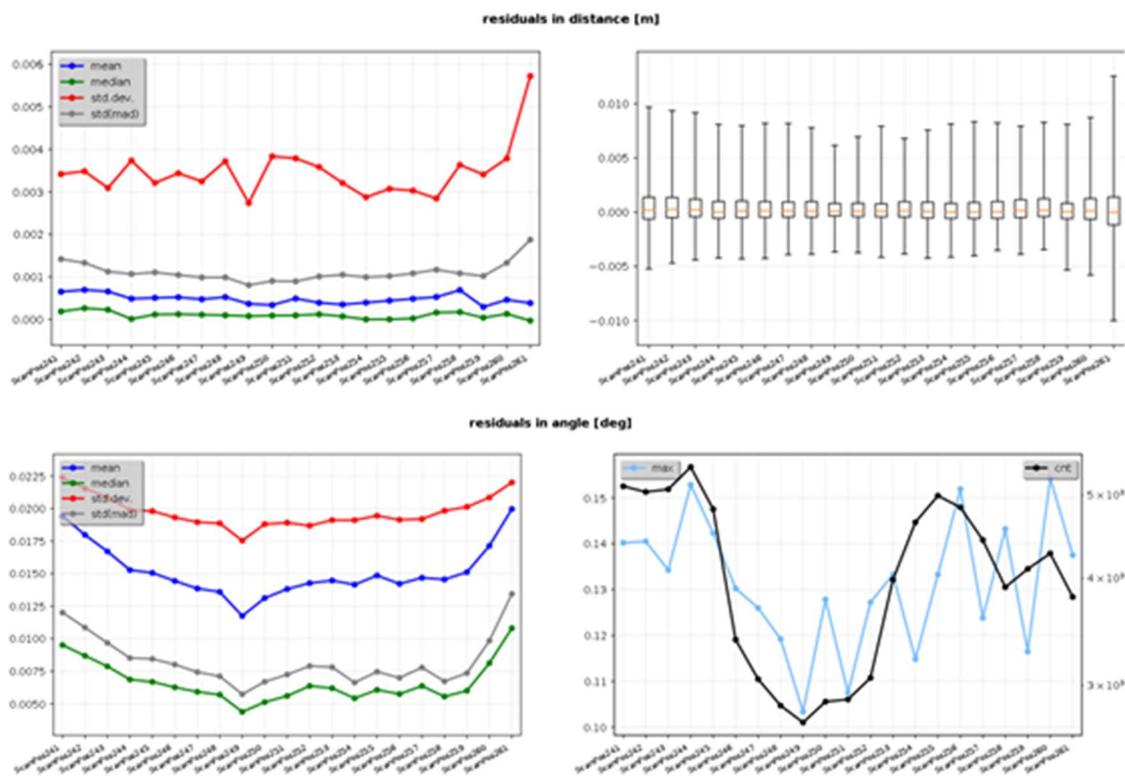


Abbildung 30: Beispiel einer Darstellung der Residuen nach dem Blockausgleich

Um aber die Genauigkeit eines gesamten Scanprojektes objektiv zu beschreiben, sollten ein paar wenige Passmarken sowohl vom Laserscanner gescannt, als auch mit einem Messgerät vergleichbarer oder höherer Genauigkeit (zum Beispiel eines Tachymeters) eingemessen werden. Für eine Beurteilung der Qualität des Blockausgleichs wird abschließend die Standardabweichung der Residuen für diese Referenzpunkte ausgegeben. Diese Tabelle ist im Allgemeinen leicht zu lesen und wird auch von Sachverständigen rasch akzeptiert.

	dX [m]	dY [m]	dZ [m]	dist. [m]
Minimum deviation	-0.0041	-0.0053	-0.0095	0.0047
Maximum deviation	0.0079	0.0074	0.0101	0.0118
Mean deviation	0.0005	-0.0004	0.0003	0.0084
Standard deviation	0.0040	0.0047	0.0064	---
Median abs. dev. (std)	0.0040	0.0053	0.0075	---

Abbildung 31: Angabe der Standardabweichung der Residuen für gescannte Referenzpunkte, die auch von einer Totalstation eingemessen wurden. (Quelle: RIEGL Software „RiSCAN PRO“)

Abbildung 32 illustriert den Unterschied zwischen einer paarweisen Registrierung und einer Blockausgleichung. Als Beispiel dafür dient wieder ein Puzzle, wobei einzelne Teile einzelne Laserscans repräsentieren. Für das vorliegende Netz wurden die Laserscans der Reihenfolge nach verkettet, so dass durch die Imperfektion der Registrierungen ein offenes Polygon entsteht. Im linken Teil der Abbildung ist das Netz vor dem Schleifenschluss zu sehen. Der mittlere Teil zeigt die letzte paarweise Registrierung, die zum Schleifenschluss führen sollte. Da das Ergebnis einer paarweisen Registrierung nur einen Einfluss auf zwei lokale Koordinatensysteme ausübt, wird der letzte Laserscan der Serie in Form eines gelben Puzzlestücks einfach auf dem Ersten verschoben – die bestehende Lücke bzw. Diskrepanz bleibt somit bestehen. Führt man jedoch alle Registrierparameter in eine Blockausgleichung ein, so werden die Widersprüche zwischen allen Registrierungen minimiert, so dass der gewünschte Schleifenschluss entsteht. Fügt man dem Netz weitere Laserscans hinzu, so steigt die Kontrolliertheit des Netzes, wodurch fehlerhafte Registrierungen meist einfacher lokalisiert werden können. Des Weiteren steift das Netz aus, genau wie dies auch beim Puzzle der Fall wäre, wodurch die Genauigkeit des Netzes verbessert wird.

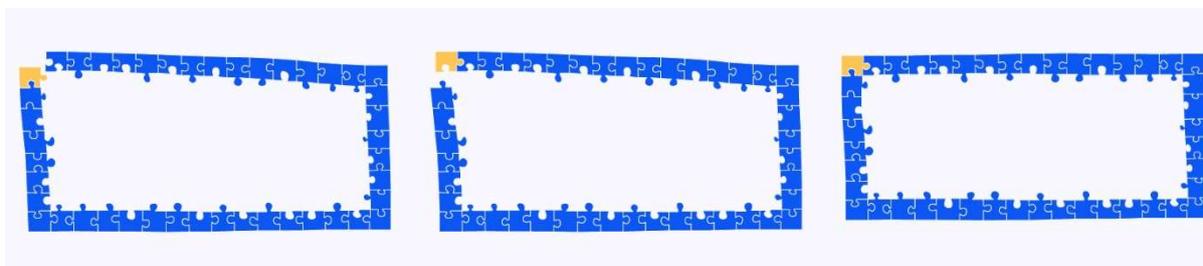


Abbildung 32: Vorletzte paarweise Registrierung in einem „Scanning-Netz“ (links), letzte paarweise Registrierung (Mitte) und Ergebnis nach einer Blockausgleichung (rechts) (Lieber, i3mainz, CC BY SA 4.0 nach Wujanz 2022)

Prinzipiell kann eine Blockausgleichung auf zwei Arten gelöst werden. Zum einen über eine iterative Anpassung der Punktwolken (Pulli 1999), was eine sehr fehleranfällige Lösung darstellt, oder zum anderen über die Nutzung der Registrierparameter selber. Mathematisch gesehen werden in einer Blockausgleichung nach der letztgenannten Lösung sogenannte Bedingungen verwendet. Eine Bedingung, die bereits aus der Schule bekannt ist, ist, dass die innere Winkelsumme in einem ebenen Dreieck immer 180° ergeben muss. Eine in der

Vermessung gängige Bedingung wird beim Messen von Höhenunterschieden, dem sogenannten Nivellement, verwendet. Beginnt man eine Messung von einem Startpunkt aus, so erhält dieser zunächst eine bestimmte Höhe. Anschließend bestimmt man die Höhen von Neupunkten und schließt in einer Schleife wieder auf dem Startpunkt ab. Die Bedingung lautet, dass die Summe der positiven und negativen Höhen innerhalb einer solchen Schleife gleich 0 sein muss. Obwohl beim Nivellieren nur ein Freiheitsgrad bestimmt wird und bei der Registrierung sechs, kann dasselbe Konzept verwendet werden. Dies bedeutet, dass innerhalb einer Schleife eines Laserscanningnetzes nicht nur die Start- und Endposition übereinstimmen muss, sondern auch die Orientierung.

6.3 Grenzen von etablierten Qualitätsmaßen

Zu Recht gelten mit herkömmlichen geodätischen Messmitteln eingebrachte Anschlusspunkte als „Goldstandard“ der Qualitätssicherung im Laserscanning. Daher werden in Abschnitt 6.3.1 zunächst Grenzen dieser Strategie aufgezeigt. In Abschnitt 6.3.2 werden zur Überwindung dieser Grenzen in der Geodäsie weitverbreitete Metriken vorgestellt, die eine ideale Ergänzung zu den omnipräsent im Laserscanning eingesetzten Qualitätsmaßen darstellen.

Zur Veranschaulichung dient im Folgenden eine Vermessung, die mit einem statischen Laserscanner im Rahmen einer Toleranzprüfung auf einer Industriebaustelle durchgeführt wurde, die sich über eine Fläche von ca. 150 x 210 m erstreckt. Zur Erfassung der Baustelle wurden 370 Laserscans erfasst, die über 528 paarweise Registrierungen verknüpft wurden. Zusätzlich wurden 63 Tachymeterpunkte eingemessen, an die 327-mal von unterschiedlichen Standpunkten angeschlossen wurde. Die Genauigkeitsforderung betrug 10 mm. Nach der Durchführung einer Blockausgleichung ergaben sich folgende Widersprüche:

- Zwischen Registrierungen: Mittel: 0,2 mm, Median: 0,4 mm, Max: 3,7 mm
- Zu Anschlusspunkten: Mittel: 3,3 mm, Median: 2,7 mm, Max: 7,7 mm

Bei reiner Betrachtung der Residuen zu den Anschlusspunkten wäre man geneigt anzunehmen, dass die Genauigkeitsforderung von 10 mm deutlich erfüllt wurde. Diese Annahme lässt allerdings zwei wesentliche Aspekte außer Acht. Zunächst ist festzustellen, dass aus wirtschaftlichen Gründen natürlich nicht alle Laserscans tachymetrisch eingemessen und überprüft wurden. Somit ist zunächst nicht klar, ob alle Laserscans korrekt registriert wurden. Des Weiteren ist nicht klar, wo die tachymetrischen Anschlusspunkte im Laserscanningnetz verteilt sind und wie diese sich auf das Netz auswirken. Beide Aspekte werden später in Abschnitt 6.3.2 wieder aufgegriffen.

Abbildung 33 zeigt die Netzkonfiguration des gemessenen Laserscanningnetzes. Kreise beschreiben einzelne Scans, während Pfeile paarweise Registrierungen darstellen. Auf die Lage der tachymetrischen Anschlusspunkte wird später eingegangen.

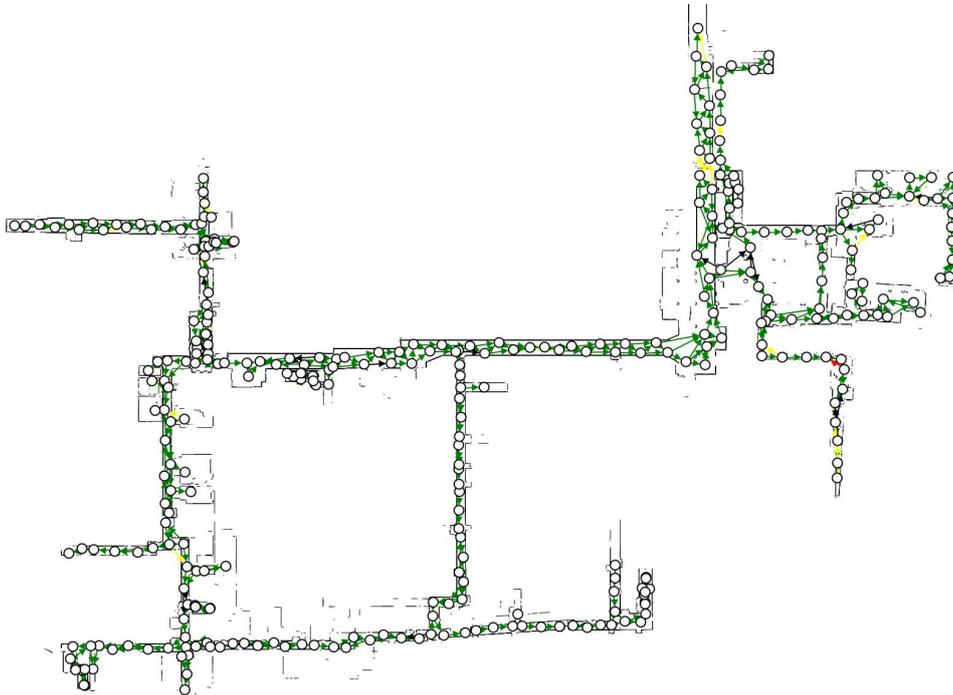


Abbildung 33: Übersicht über das gemessene Laserscanningnetz

6.3.1 „Unlautere Beschönigung“ von Laserscanningnetzen

In diesem Abschnitt werden drei einfache Möglichkeiten beschrieben, wie Qualitätsnachweise „schön“ gerechnet werden können. Dabei ist es unerheblich, ob statische oder kinematische Laserscans verarbeitet werden. Nehmen wir für das vorliegende Beispiel im Folgenden an, dass Widersprüche zur Tachymetrie über 10 mm vorlägen.

Die erste Strategie basiert auf der gezielten Reduktion der Redundanz mit dem Fokus auf den geodätischen Anschlusspunkten. Dazu werden einfach alle Punktidentitäten zwischen Tachymetrie und Laserscans aufgelöst, die den geforderten Wert überschreiten. Im linken Teil von Abbildung 34 kennzeichnen rote Dreiecke deaktivierte Anschlusspunkte, während grüne Dreiecke verwendete Anschlusspunkte hervorheben. Es ist offensichtlich, dass es ein Leichtes ist, auch „Genauigkeiten“ um 1 mm zu erreichen, solange man nur immer weiter ausdünnst. Folge dieser Maßnahme ist eine allgemeine Destabilisierung des Netzes, die in der Regel zu Extrapolationseffekten führt. Beide negativen Einflüsse spiegeln sich nicht in den resultierenden Residuen wider. Diese suggerieren weiterhin ein hochgenaues Ergebnis.

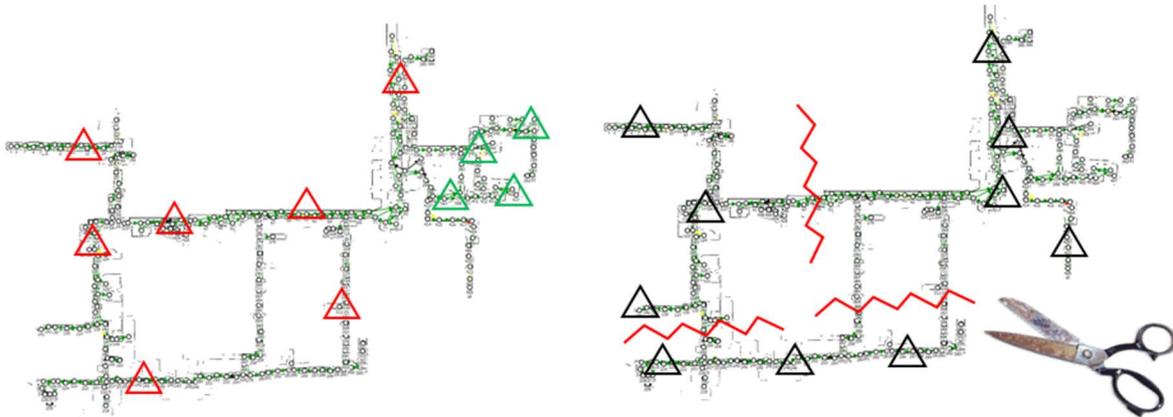


Abbildung 34: Reduktion von Anschlusspunkten (links) und Registrierungen (rechts)

Bei der zweiten Strategie wird ebenfalls gezielt die Redundanz innerhalb des Netzes reduziert, allerdings nun durch Auflösen von paarweisen Registrierungen oder dem Splitten von kinematischen Laserscans. Treten Spannungen im Netz auf, die sich negativ auf die Widersprüche an den Anschlusspunkten auswirken, kann entweder zwischen zwei Anschlusspunkten oder alternativ innerhalb einer bestehenden Schleife getrennt werden. Ergebnis dieser Methode sind einzelne Blöcke zusammenhängender statischer und/oder kinematischer Punktwolken, die über mindestens drei Anschlusspunkte pro Block im geodätischen Datum hängen. Auch hier gaukeln die resultierenden Widersprüche nach „erfolgreicher“ Anwendung dieser Methode ein ausreichend genaues Ergebnis vor. Folge dieser Maßnahme sind unsaubere Übergänge zwischen den einzelnen Blöcken. Es sei erwähnt, dass dieser Effekt unbebewusst auch in vielen kommerziell verfügbaren Softwarelösungen für die Registrierung von statischen Laserscans auftritt. Und zwar dann, wenn die Software nicht in der Lage ist, größere Scanprojekte gemeinsam auszugleichen. In diesem Fall werden die Projekte entweder in Sub-Projekte aufgeteilt, die noch prozessiert werden können oder in Gruppen oder sogenannte Cluster eingeteilt. Der rechte Teil von Abbildung 34 visualisiert die genannte Methode. Dreiecke kennzeichnen wieder geodätische Anschlusspunkte, während die roten Zickzack-Linien die Trennstellen einzelner Blöcke darstellen.

Eine dritte Methode der unlauteren Einflussnahme auf die Ergebnisse ist eine inadäquate Gewichtung. Erwähnenswert ist hierbei, dass in vielen Softwarelösungen diese Manipulation nicht von Seiten des Nutzers bewusst herbeigeführt wird, sondern von Herstellerseite in Form fester Gewichte einzelner Beobachtungen. Zur Veranschaulichung dieser Methode gehen wir von einem kinematischen Scanningprojekt aus. Mittels GNSS wurden in einem Außenbereich Anschlusspunkte gemessen. Deren Genauigkeit liegt bekanntlich deutlich unter jener tachymetrischer Beobachtungen. Um kleine Residuen an den Anschlusspunkten zu erhalten, wählt man z. B. *a priori*-Gewichte der GNSS-Punkte im Submillimeterbereich, während die Widersprüche zwischen den beiden Datenquellen in das Laserscanningnetz gedrückt werden. Je optimistischer, also höher, die Genauigkeit angenommen wird, desto größer wird der auf das Netz ausgeübte Zwang. Als Folge dieser Maßnahme wird die Punktwolke verbogen. Dies sieht man mitunter in Projekten mit GNSS-Anschlusspunkten, deren

Höhengenauigkeit merklich schlechter ist als die der Lage, in Form von nicht-planaren Böden.

6.3.2 Geodätische Qualitätsmaße im Laserscanning

Nicht umsonst gibt es in der Geodäsie Qualitätsmaße jenseits der Residuen. Im Folgenden werden daher geeignete Maße und deren Aussagekraft vorgestellt. Das Einbringen von geodätisch koordinierten Anschlusspunkten ist, wie gesagt, eine verlässliche Methode, um etwa die Referenzierung von statischen Laserscans zu überprüfen. Allerdings wäre es unwirtschaftlich, jeden einzelnen Laserscan einzumessen. Zur Überbrückung von Anschlusspunkten stehen daher zahlreiche kommerzielle Lösungen zur Verfügung, mit denen Laserscans, basierend auf deren Überlappungsbereichen, registriert werden können. Eine in der Praxis häufig eingesetzte Lösung hierfür ist der ICP-Algorithmus (Besl & McKay 1992).

Um sich aber vor den zuvor vorgestellten, unlauteren Methoden zu schützen, können Redundanzanteile berechnet werden. Diese geben Auskunft über das Maß der Kontrolliertheit der paarweisen Registrierparameter. Sind zwei Laserscans lediglich durch eine Registrierung verbunden, so sind die Redundanzanteile gleich null. Ein solches Szenario ist unbedingt zu vermeiden, da keine verlässliche Aussage über die Richtigkeit des Registrierungsergebnisses getroffen werden kann. In Abbildung 35 sind die Redundanzanteile für das Beispielnetz berechnet worden. Grüne Pfeile sprechen für eine gute, rote hingegen für eine schwache Kontrolliertheit. Maßnahmen, die beiden Registrierungen zu kontrollieren, wären das Berechnen einer weiteren paarweisen Registrierung (sofern die Messkonfiguration dies erlaubt) oder die Einführung eines geodätischen Anschlusspunktes am toten Ende des Zuges. Ein weiterer Grund für niedrige Redundanzanteile ist die geometrische Beschaffenheit des Überlappungsbereiches zwischen zwei Laserscans. Gehen wir von einem zylinderförmigen Tunnel aus. Selbst wenn die erfassten Laserscans mit mehr als einer Registrierung eingebunden wurden, so ist sowohl die Translation entlang der Tunnelachse als auch die Rotation um ebenjene nur schwach bestimmt. Redundanzanteile geben Auskunft darüber, wie vertrauenswürdig und belastbar abgeleitete Qualitätsmaße, zum Beispiel Residuen, sind.

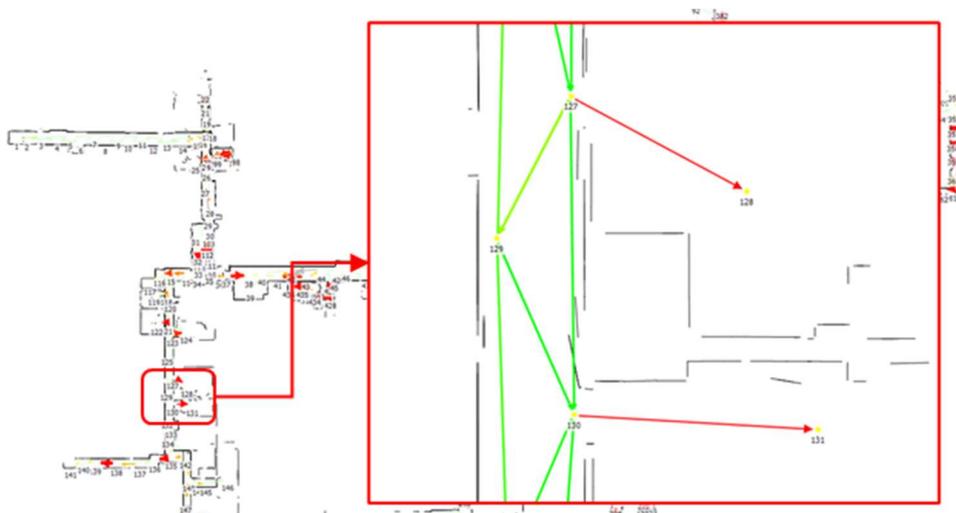


Abbildung 35: Redundanzanteile eines statischen Scanningnetzes

Um die Folgen der Ausdünnung von Redundanz zu zeigen, eignet sich als Kriterium die Stationierungsgenauigkeit. Diese gibt Auskunft darüber, wie genau ein statischer Laserscan oder Teile eines kinematischen Scans in Bezug auf ein geodätisches Datum positioniert werden konnten. Als Datum können zum Beispiel lokale Koordinatensysteme von Einzelscans, geodätische Anschlusspunkte oder ein Planungsmodell, wie etwa ein CAD oder BIM, fungieren. Durch Unsicherheitsfortpflanzung kann die Stationierungsgenauigkeit für jeden Laserscan oder Teilscan berechnet werden. Die Qualität der Stationierung hängt von vielen Faktoren ab, ist daher aber auch aussagekräftig. Einflüsse sind etwa die gesamte Netzkonfiguration der paarweisen Registrierungen, Qualität und Lage von Anschlusspunkten, individuelle Gewichtung der Beobachtungen und der Güte der Kalibrierung des eingesetzten Laserscanners.

Berechnet man die Stationierungsgenauigkeit für das zu Beginn des Abschnitts eingeführte Beispiel, so zeigt sich, dass die geforderte Genauigkeit von 10 mm nicht eingehalten werden kann. Dies ist an der Farbgebung im rechten Teil von Abbildung 36 zu sehen. Rot eingefärbte Scans weisen eine Stationierungsgenauigkeit oberhalb der geforderten Genauigkeit auf. Dies erscheint bei Betrachtung der mittleren Residuen von 3,3 mm zur Tachymetrie zunächst merkwürdig, wird aber plausibel, wenn die Lage der tachymetrischen Anschlusspunkte berücksichtigt wird. Diese ist durch das blaue Vieleck hervorgehoben. Es ist ersichtlich, dass die Verteilung der Passpunkte unvorteilhaft gewählt wurde. Die aufgetretenen Extrapolationsfehler können im linken Teil von Abbildung 36 anhand eines Puzzles nachvollzogen werden.

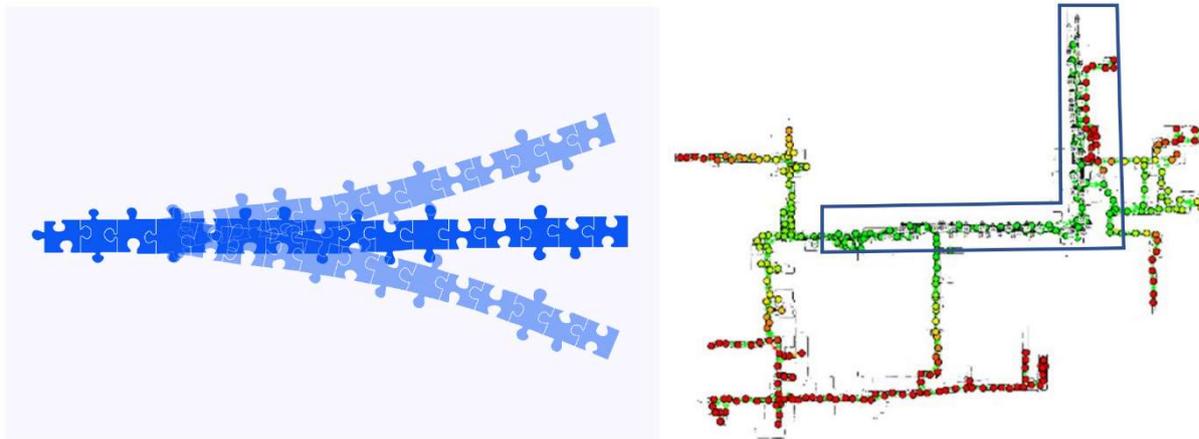


Abbildung 36: Unsicherheitsfortpflanzung eines Puzzles (links) und eines Laserscanningnetzes (rechts)

6.4 Visuelle Kontrolle

Die visuelle Kontrolle der zusammengesetzten Punktwolke sollte vor dem Exportieren in eine weitere Software stehen. Es empfiehlt sich die Punktwolke in der orthogonalen Projektion (also mit parallelen Sichtstrahlen) darzustellen und einen "Schnitt" durchzuführen. Die folgende Abbildung zeigt die markierten Punkte in der Draufsicht einer Brücke. Darunter

wurden nur diese Punkte aus der horizontalen Sicht entlang der Brückenachse dargestellt. Hier kann man erkennen, dass die Laserscans hinreichend gut zueinanderpassen.

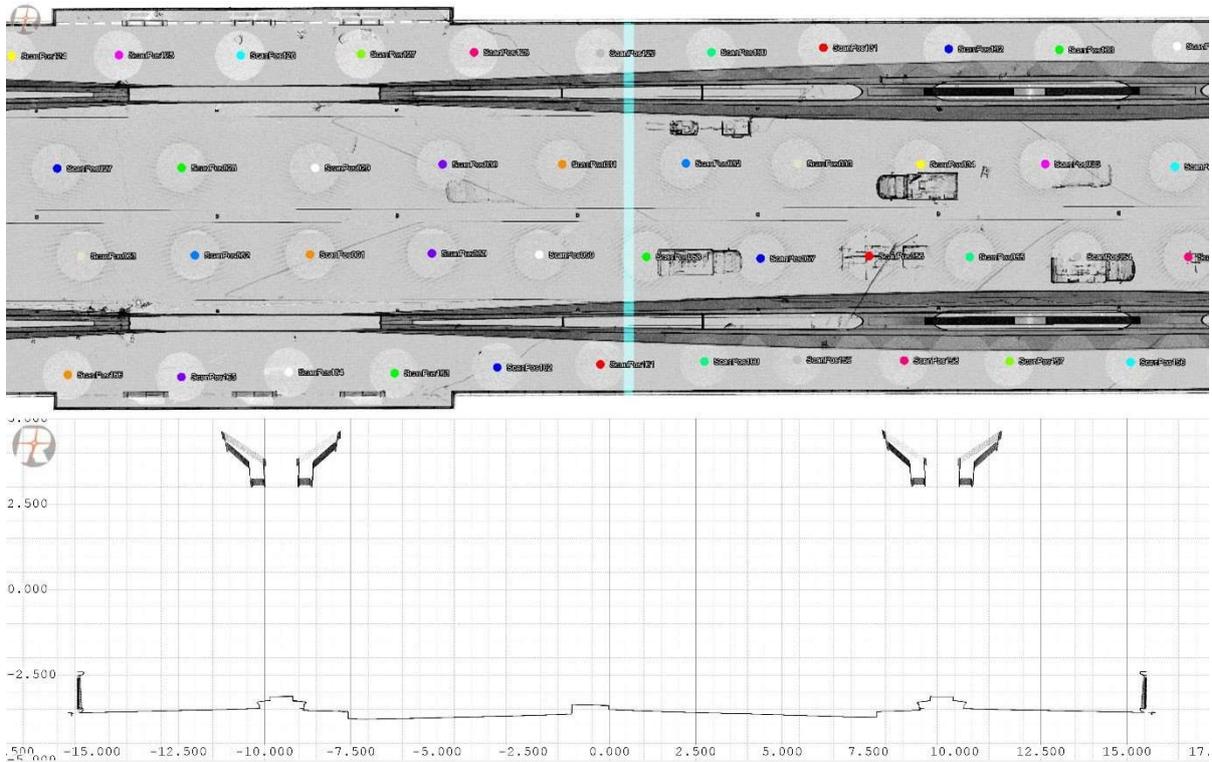


Abbildung 37: Visuelle Kontrolle eines Brückenscans: Draufsicht der gescannten Brücke mit markierten Punkten (oben) und horizontale Ansicht der Punkte entlang der Brückenachse (unten)

Bei dieser Gelegenheit kann zusätzlich die Kalibrierung der Fotokamera kontrolliert werden. Dabei wird die Punktwolke mit dem Foto überlagert und an geeigneten Objekten, wie der Gitterbegrenzung des Fußwegs, die exakte Ausrichtung kontrolliert.

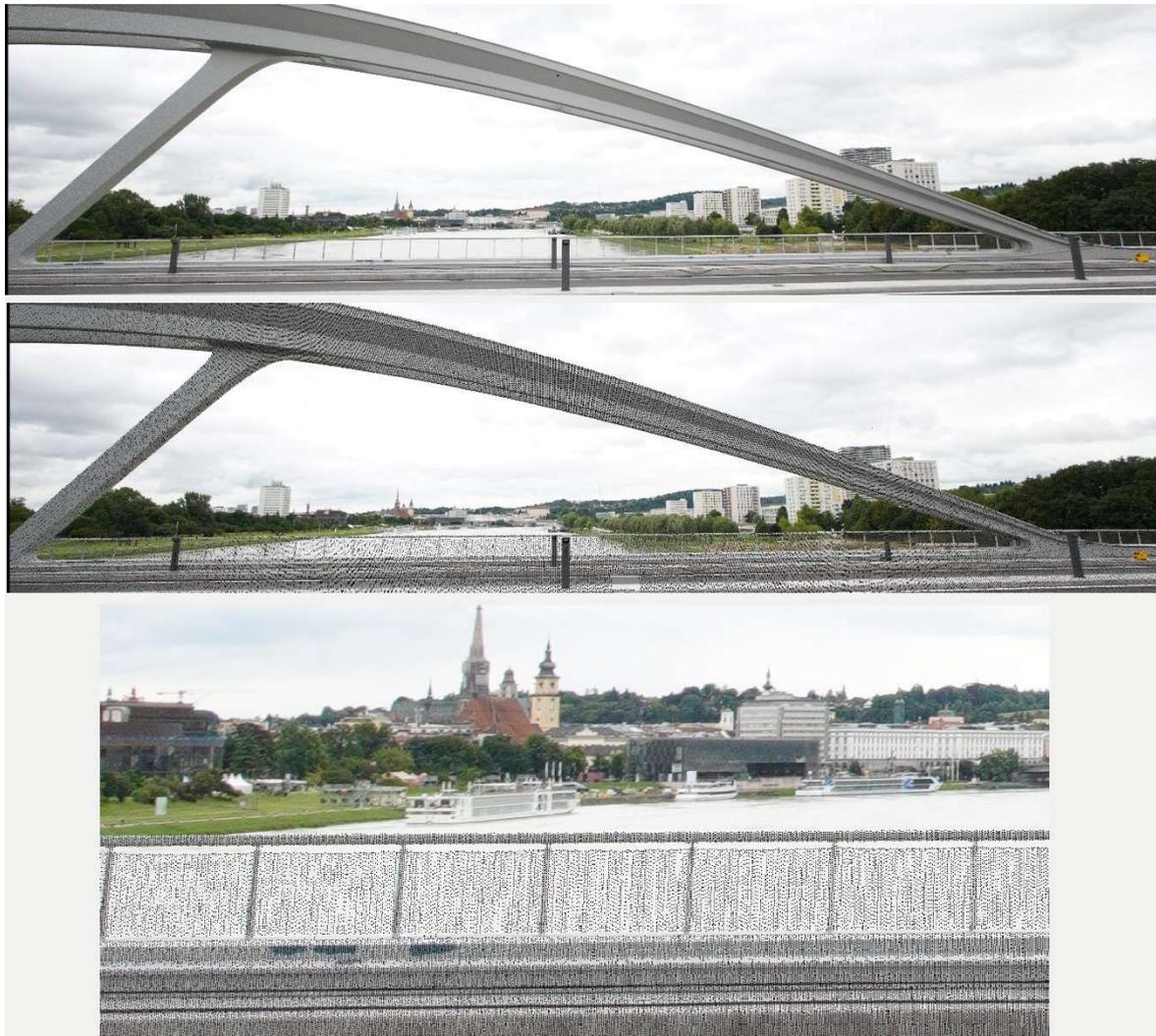


Abbildung 38: Visuelle Kontrolle der (äußeren) Kalibrierung der Kamera: Foto (oben), Foto mit überlagerter Punktwolke (Mitte), Detail Foto mit überlagerter Punktwolke (unten)

7 Best Practice

Bevor man professionell Scanprojekte aufnimmt, sollte man sich mit der Messtechnik und den Kundenanforderungen auseinandergesetzt haben. Die ersten Projekte sollten möglichst klein sein, damit man seinen besten Ablauf trainieren und gegebenenfalls korrigieren kann. Die mit der Zeit entwickelte Erfahrung befähigt dann zu größeren Projekten. Natürlich sind die Details von Person zu Person und von Scanner zu Scanner verschieden. Die folgende Zusammenfassung gilt demnach nur als Vorschlag.

7.1 Zubehör und vorbereitende Maßnahmen

Bevor man vor Ort mit einem Scanprojekt beginnt, sollte man sich folgende Fragen stellen:

- Welches Stativ ist geeignet (ein leichtes Indoor-Stativ mit Gummifüßen, oder ein Outdoor-Stativ mit spitzen Füßen)?

- Wie viele Scanpositionen sind voraussichtlich für das Projekt notwendig? Daraus ergibt sich die voraussichtliche Einsatzzeit und die Anzahl der notwendigen Akkus. 80% aller Probleme beim Scannen sind entladene Akkus.
- Eine vorherige Begehung des zu scannenden Areals hat den Vorteil, dass man sich danach orientieren kann. Andererseits verliert man kostbare (Scan-)Zeit.
- Vor allem bei sehr großen Projekten empfiehlt es sich, eine zweite Person mitzunehmen. So kann man Organisationsaufgaben und die Scanaktivitäten trennen.
- Man sollte vor dem Scannen möglichst genau die geforderten Ergebnisse der Vermessung kennen. Vor allem die geforderte Genauigkeit des Scanprojektes, die Abgrenzung des Scanobjektes und die Auflösung der Punktwolke können ausschlaggebend sein. „So genau wie möglich“ oder „die höchste Auflösung am Objekt“ sind oft nicht sinnvoll.

Es empfiehlt sich eine Checkliste zu entwickeln, die in etwa so aussehen könnte:

Tabelle 3: Checkliste zur Vorbereitung einer Messkampagne

Ausrüstung	Anmerkung
Laserscanner	Gereinigt und einsatzbereit
Akkus	z. B. 6 Stück geladen
Ladegerät	Mit Verteilersteckdose, damit vor Ort während dem Scannen die entleerten Akkus geladen werden können
Stativ / Stative	Für Messung im Außenbereich: Ein klassisches Vermessungsstativ mit Dornen; Für Messung in Innenbereich: Ein leichtes Karbonstativ mit Gummifüßen
Fotokamera	Für Dokumentationszwecke, zum Einfärben der Punktwolke
Mobiltelefon	Aufgeladen, eventuell mit Powerbank, auch zur Dokumentation des Projektes als Hilfestellung für die anschließende Verarbeitung der Daten
RTK GNSS Antenne auf dem Scanner	Falls für dieses Projekt notwendig; Basisstation oder Korrekturdaten via Internet

7.2 Strategie beim Scannen

Vor Ort ist es vorteilhaft die erste Scanposition im Freien zu wählen. Damit ist die Georeferenzierung mit einer aufgesetzten GNSS-Antenne normalerweise gewährleistet.

Wenn Passmarken verwendet werden (für eine Referenzmessung mit einer Totalstation), so sollten diese **vor** dem Scannen angebracht sein, evt. bereits tachymetrisch eingemessen sein. Nur im Ausnahmefall kann man sie auch später mit dem Scanner neu vermessen.

Handelt es sich um ein freistehendes Gebäude, so ist es vorteilhaft, wenn man die ersten Scanpositionen um das Gebäude herum wählt.

Im Freien gilt als Faustregel: Alle 10 Meter eine Scanposition, bei einem Abstand von der Fassade von ca. 10 Metern. Natürlich ist dies von der Größe bzw. Höhe des Gebäudes abhängig. Im Inneren sind die Abstände entsprechend kürzer.

Der Überlappungsbereich zwischen den Scanpositionen sollte groß genug gewählt werden, damit die Registrierung der Scandaten robust funktioniert. Sollte dies nicht gewährleistet sein, so kann man ein Vielfaches jener Zeit, die eine zusätzliche Scanposition gekostet hätte, im Büro für eine erfolgreiche Registrierung verlieren.

Sollte ein Fassadenplan im Maßstab von 1:100 angefertigt werden, so ist ein Punktabstand am Objekt von ca. einem Zentimeter anzustreben. Daraus ergibt sich das Messprogramm und der Abstand zwischen den Scanpositionen.

Es sollte ein gutes Verhältnis zwischen Scanzeit pro Scanposition, Auflösung am Objekt und Anzahl von Scanpositionen gewählt werden. Es ist nicht vorteilhaft von ein paar wenigen Scanpositionen extrem hochauflösende Scans aufzunehmen. Besser sind etwas mehr Scanpositionen mit einer etwas geringeren Punktauflösung am Objekt. Dadurch werden Scanschatten minimiert.

Beim Scannen des Gebäudeinneren empfiehlt es sich, das Gebäude durch einen Eingang zu betreten, eine Scanposition nach der anderen abzuarbeiten und durch einen anderen Ausgang wieder zu verlassen. Die wichtigsten Scans sind jene, die in einem Türrahmen durchgeführt werden. Sie messen zur Hälfte den vorherigen Raum und zur anderen Hälfte den nächsten Raum. Diese Überlappungsbereiche der Scans sind für die Registrierung von großem Vorteil. Es ist darauf zu achten, dass die Scanschatten unter dem Scanner durch die nächste Scanposition ergänzt werden.

Gelangt man in eine Sackgasse (z. B. das Ende eines Tunnels), so sollte man an eine bereits bekannte Position (also an eine bereits registrierte Scanposition oder eine leicht zu registrierende Scanposition) zurückkehren und dort weiterscannen. Diese Scanpositionen können auch „Ankerpositionen“ genannt werden. Falls nicht von der Scanner-Firmware unterstützt, empfiehlt es sich ein kleines Notizbuch mitzunehmen und diese großen Sprünge im Ablauf zu dokumentieren. Eventuell kann man sie auch mit Fotos des mitgeführten Mobiltelefons dokumentieren.

Bezüglich der Fotoaufnahmen sind im Allgemeinen manuell belichtete Fotos zu empfehlen. So ist gewährleistet, dass alle Fotos gleichartig belichtet werden. Dabei sind folgende Parameter zu beachten: Belichtungszeit, Blende, ISO-Empfindlichkeit und Weiß-Abgleich. Manchmal empfiehlt sich das Scannen in der Nacht bei künstlicher Beleuchtung mit langer

Belichtungszeit, weil hier auch über ein ganzes Projekt konstante Belichtungsverhältnisse erreicht werden können.

Wenn die Scanaufnahme über mehrere Tage dauert, ist es ratsam, die erste Scanposition des Folgetages im Anschluss an die letzte Position des vorherigen Tages zu wählen. So ist die Übersichtlichkeit beim späteren Zusammensetzen der Scanprojekte in den meisten Fällen einfacher und übersichtlicher.

Falls möglich sollte ohne Publikum gescannt werden, da sonst anschließend alle „bewegten Ziele“ aus den Scandaten entfernt werden müssen (siehe Abschnitt 3.3).

7.3 Bearbeiten von Großprojekten

Die Definition eines „Großprojekts“ ist vielfältig und für viele Anwender auch sehr unterschiedlich. Wir wollen uns hier auf Projekte beschränken, die über mehrere Tage aufgenommen werden müssen und aus mehreren hundert Scans bestehen. Es empfiehlt sich hier strategisch vorzugehen und sich eine eigene Checkliste anzulegen:

Tabelle 4: Checkliste zur Bearbeitung von Großprojekten

Welche Ergebnisse sollen aus dem Projekt generiert werden?	Punktwolke, Planerstellung aus der Punktwolke, 3D-BIM-Modell, ...
Wieviel Ressourcen stehen für die Aufnahme zur Verfügung?	Anzahl der Scantage, Anzahl der Personen, Anzahl der Laserscanner, ...
Ist die Vermessung von Kontrollpunkten gefordert?	Wenn ja, werden diese vorher vermessen? Wie werden sie signalisiert? Sind sie gut über das Projekt verteilt?
Wie sieht vor Ort die Infrastruktur aus?	Kann man Akkus laden? Hat man einen absperrbaren Raum für Messgeräte? ...
Existieren bereits Pläne?	Ein Übersichtsplan erleichtert die Orientierung vor Ort. Vermarktete Kontrollpunkte können berücksichtigt werden.
Welche Auflösung der Punktwolke wird gefordert, bzw. ist sinnvoll?	Daraus kann man eine durchschnittliche Distanz zwischen Scanpositionen schätzen. Auch ist der mittlere Abstand zu einer zu vermessenden Fassade bestimmbar.

Die Aufteilung, an welchen Tagen man welche Scanpositionen aufnimmt, ergibt sich oft von selbst. Nichtsdestotrotz können Scanpositionen oft zusammengefasst werden. Bei einer Domvermessung können zum Beispiel folgende Bereiche voneinander getrennt im Weiteren prozessiert werden: Außen der Domplatz, Kirchenraum, Dachboden, Keller oder Katakomben.

Bei den Übergängen von einem zum anderen Bereich empfiehlt es sich, genügend Verbindungsscans durchzuführen und diese möglichst über Kontrollpunkte in ihrer Lage zu fixieren.

Ein anderes interessantes Beispiel ist die Vermessung eines Ortskerns mit vielen Straßen. Hier können die Scans der Straßenkreuzungsbereiche mit Kontrollpunkten eingemessen und „eingefroren“ werden, damit dann von Kreuzung zu Kreuzung die Registrierung von Scans relativ rasch durchgeführt werden kann.

Beim sogenannten „Einfrieren“ von Scans bleiben diese bezüglich ihrer Lage und Orientierung unverändert, während sich alle anderen Scans in dieses starre Gerüst einfügen müssen. Diese Vorgehensweise ist nicht nur bei sehr großen Projekten sinnvoll, sondern auch bei Deformationsmessungen.

Die maximale Anzahl von Scanpositionen ist hauptsächlich von der Nachverarbeitungssoftware und dem Computer abhängig. Meist gibt es dazu keine konkreten Angaben. Es ist zu empfehlen, die Scanpositionen von Projekt zu Projekt langsam zu steigern. Ab 1000 Scanpositionen dauern die einzelnen Prozessierungsschritte erheblich lange. Hier wird ein hoher Automatisierungsgrad der Software immer wichtiger. Die meiste Zeit verliert man bei den manuellen Arbeiten, wie manuelle Registrierung von zu wenigen Laserscans oder beim manuellen Reinigen von Scans (z. B. wegen Spiegelungen und bewegten Objekten).

Es wird dringend geraten, alle Scans in einem Projekt zu registrieren und eine Blockausgleichung durchzuführen. Manchmal ist dies wegen der Größe des Scanprojektes aber nicht möglich.

7.4 Arbeiten mit Gruppen oder Clustern

Bei der Bearbeitung von komplexen Projekten oder solchen mit sehr vielen Scans, ist es sinnvoll, diese in Gruppen oder sogenannte Cluster zu unterteilen. Im Hochbau würde man ein Projekt typischerweise in einzelne Geschosse, Treppenhäuser oder anderweitige architektonische Einheiten gliedern, die dann sequenziell prozessiert werden. Sind alle Einheiten eines Projektes einzeln bearbeitet worden, gilt es schließlich, alle Gruppen bzw. Cluster zu einem zusammenhängenden Datensatz zusammenzufügen. Abschließend muss unbedingt eine finale Blockausgleichung durchgeführt werden, bei der die Widersprüche aller beteiligten Scans minimiert werden. Hier ist anzumerken, dass nicht alle Softwarelösungen diese Aufgabe wirklich lösen können. Ist dies nicht der Fall, so werden meist Scans innerhalb einer Gruppe optimiert und anschließend die einzelnen Gruppen zueinander. Ein wesentlicher Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass die innere Geometrie innerhalb einer Gruppe festgehalten wird. Dies bedeutet, dass diese Scans wie ein unveränderlicher Einzelscan behandelt werden. Folglich kommt es bei dieser Vorgehensweise zu unumgänglichen Spannungen an den Gruppengrenzen.

Dieser Effekt ist im linken Teil von Abbildung 39 dargestellt, in dem zwei Cluster zu sehen sind. Da die innere Geometrie der Cluster festgehalten wird, kommt es an deren Grenzen zu den genannten Spannungen. Führt man die Scans einer Blockausgleichung zu, so dürfen sich alle Scans „bewegen“ und die gesamten Widersprüche innerhalb eines Projektes werden optimiert, wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist.

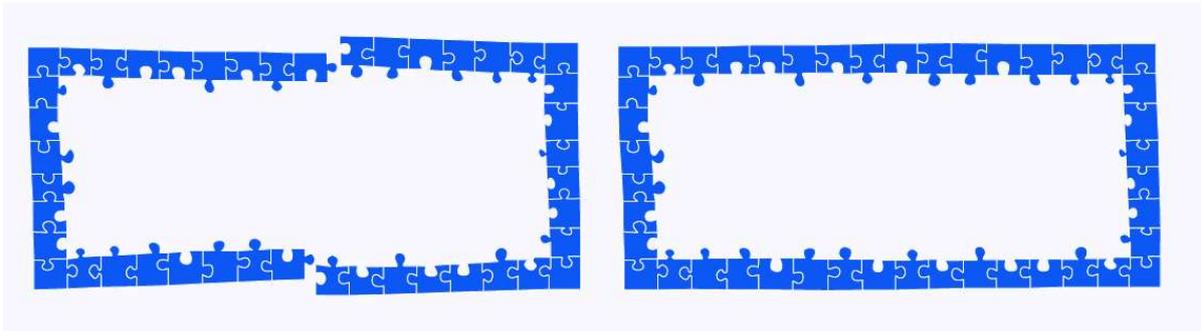


Abbildung 39: Clusteroptimierung (links) vs. Blockausgleichung über alle Scans (rechts)
(Liebler, i3mainz, CC BY SA 4.0)

Daher sollte man sich stets genau informieren, welche Strategie die verwendete Software einsetzt. Sollte die Software lediglich eine Clusteroptimierung durchführen, so sollten die Clustergrenzen strategisch günstig gelegt werden, so dass möglicherweise sichtbare Übergänge in der fertig registrierten Punktwolke in nicht kritischen Arealen liegen.

7.5 Anschluss an übergeordnete Referenzsysteme

Wir haben bisher mehrere Koordinatensysteme kennengelernt:

- Das Koordinatensystem beschreibt die Koordinaten der einzelnen gemessenen Laserscan Messungen von einer Laserscannerposition. Ursprünglich in Polarkoordinaten, werden sie üblicherweise als kartesische Koordinaten gespeichert. Meist liegt der Koordinatenursprung im Laserscanner und ist im jeweiligen Bedienungshandbuch definiert.
- Das Projektkoordinatensystem beschreibt das Koordinatensystem eines Laserscanprojektes, welches aus mehreren Laserscanpositionen besteht. Meist definiert das Laserscannerkoordinatensystem der ersten Position das Projektkoordinatensystem.
- Ein übergeordnetes Koordinatensystem ermöglicht es mehrere Laserscanprojekte zueinander in Bezug zu setzen. Üblicherweise werden durch die GNSS-Messung der Laserscanpositionen die Projekte in das WGS84-Koordinatensystem übergeführt. Sein Koordinatenursprung liegt im Massenmittelpunkt des als Modell der Erde gewählten Referenzellipsoids. Die Registrierung als Anschluss an ein übergeordnetes, absolutes Koordinatensystem bezeichnet man als Georeferenzierung.

Der EPSG-Code ist ein System weltweit eindeutiger Codes für Koordinatenreferenzsysteme und andere geodätische Datensätze, wie Referenzellipsoide oder Projektionen. Die Informationen zu den EPSG-Codes liegen in einer Online-Datenbank vor. (epsg.org)

Prinzipiell gibt es drei Gründe, die für den Anschluss von registrierten Laserscans an übergeordnete Referenzsysteme sprechen:

1. Überführung in Zielkoordinatensysteme
2. Stabilisierung des Laserscanningnetzes
3. Steigerung der Redundanz / unabhängige Kontrolle mit einem anderen Messmittel.

Überführung in Zielkoordinatensysteme

Bei der Übergabe von Laserscanningprojekten an den jeweiligen Kunden ist neben dem Abgabeformat zumeist ein bestimmtes Zielkoordinatensystem einzuhalten. Der Begriff Zielkoordinatensystem kann dabei vielfältig interpretiert werden und z. B. lokale Baustellen- oder Schiffskoordinatensysteme, Landes- oder Globalsysteme sowie Werkskoordinatensysteme bedeuten. Prinzipiell bedeutet dies, dass das Laserscanningnetz mit Hilfe identischer Punkte, die zum einen im Zielkoordinatensystem, als auch im Laserscannerkoordinatensystem vorliegen müssen, transformiert wird. Als Qualitätsmaß wird in der Praxis gerne auf die mittlere GröÙer der Punktresiduen nach der Transformation verwiesen. Diese Zahl ist allerdings nur bedingt aussagekräftig, da die Lage der verwendeten Punkte maßgeblich die GröÙe der Punktresiduen beeinflusst.

Glossar

3D-Laserscanning: ist die kontrollierte Ablenkung eines Laserstrahls in Verbindung mit einem Laser-Entfernungsmesser in zahlreiche Richtungen. Diese Methode, die oft als 3D-Objektscanning oder 3D-Laserscanning bezeichnet wird, liefert Punktwolken, die die Oberflächen des abgetasteten Objekts beschreiben. Die Ablenkung des Laserstrahls kann je nach Laserscanningsystem mit abgestimmten Drehraten der ablenkenden Rotationsachsen erfolgen und damit ein regelmäßiges Punktraster liefern oder in zueinander beliebigen Drehraten erfolgen. Man unterscheidet zwischen statischen Messungen (siehe auch *Terrestrisches Laserscanning*) und Messungen mit bewegtem Laserscanner (kinematisches Laserscanning). Im Vergleich zum kinematischen Laserscanning ist das statische Laserscanning zwar langsamer, jedoch auch genauer.

Absolute Orientierung: Die absolute Orientierung stellt in der Photogrammetrie die Relation zu einem übergeordneten Koordinatensystem her, z. B. ein Landeskoordinatensystem bzw. ein Koordinatensystem, das durch Passpunktkoordinaten definiert werden kann.

Amplitude: Die Amplitude des Echosignals, das den Laserscanner erreicht, hängt von einer Reihe von Parametern ab, darunter Systemparameter, aber auch Zielparameter wie dem Reflexionsgrad und der Entfernung des Ziels. Durch eine sorgfältige Kalibrierung liefern manche Laserscanner für jedes detektierte Echosignal einen Amplitudenwert, der die Amplitude des optischen Echosignals widerspiegelt. Die Amplitude wird relativ zu der Amplitude eines Echosignals an der Erfassungsschwelle des Gerätes angegeben.

Augensichere Wellenlänge: Oberhalb von 1400 nm Wellenlänge wird die optische Strahlung großflächig in der Hornhaut absorbiert. Sie bietet einen Schutz für die Retina des Auges. Aus diesem Grund heißt der Wellenlängenbereich von 1500 nm bis 2000 nm auch „augensicher“. Unsichtbares Laserlicht mit einer Wellenlänge von 1550 nm (Faserlaser, Er-dotiert) hat sich im Laserscanning breit durchgesetzt.

Blockausgleichung: Der Begriff der Blockausgleichung im TLS-Kontext bezieht sich auf den Gesamtausgleich aller zusammengehörigen, zuvor paarweise registrierten Punktwolken zur Bestimmung der 6 Freiheitsgrade unter Berücksichtigung sämtlicher zusätzlich verfügbarer Information (z. B. GNSS- oder Inklinometermessungen, Kontrollpunktkoordinaten). Wenn man von kalibrierten Laserscannern ausgeht, wird bei der Blockausgleichung im lokalen Koordinatensystem der Freiheitsgrad des Maßstabs als konstant vorausgesetzt.

Bündelblockausgleichung: Die Bündelblockausgleichung (auch Bündeltriangulation genannt) ist ein aus der Photogrammetrie stammendes Ausgleichungsverfahren zur simultanen Orientierung von beliebig im Raum angeordneten Kamerabildern. Als Messwerte dienen die Koordinaten von Objektpunkten, die in mehreren Bildern abgebildet sind und somit als korrespondierende Punkte gemessen werden können. Resultat der Berechnung sind neben den Orientierungsparametern der Bilder die Koordinaten der Objektpunkte sowie eventuell weitere modellierte Parameter zusätzlich integrierter Messsysteme.

Diffuse Reflexion: Diffuse Reflexion ist die Reflexion von Licht an einer Oberfläche. Ein einfallender Strahl wird gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert. Bei LIDAR wird häufig die Lambertsche Reflexion als Modell für diffuse Reflexion verwendet. Raue Oberflächen (Rauheit in der Größenordnung der Laserwellenlänge), z. B. rohes Mauerwerk, lassen sich gut als diffus reflektierende Ziele modellieren.

Ein retroreflektierendes Ziel ist ein Ziel mit einer hohen Richtwirkung der reflektierten Laserstrahlung. Beispiele für retroreflektierende Ziele sind Reflexionsfolien, Verkehrsschilder und "Katzenaugen".

Echosignal (Impulslaufzeitverfahren): Ähnlich wie in der Akustik, in der ein Echo eine Reflexion des Schalls von einem entfernten Objekt bezeichnet, ist das Echosignal beim Laserscanning die Reflexion des ausgesendeten Laserpulses, der mit einer Verzögerung, der Laufzeit, am Laserab tastgerät ankommt. Der Begriff Echosignal kann sich auf das optische Signal beziehen, das am Gerät ankommt, aber auch auf das elektrische Signal innerhalb der Empfängerelektronik des Geräts.

Genauigkeit: Die Genauigkeit eines Laserentfernungsmessers ist der Grad der Annäherung der gemessenen Entfernung an die tatsächliche (wahre) Entfernung eines Ziels. Genauigkeit ist nicht zu verwechseln mit Präzision.

Georeferenzierung: Die Georeferenzierung ist die Transformation in ein übergeordnetes, absolutes Koordinatensystem und somit eine besondere Art der Registrierung.

ICP: Der Iterative-Closest-Point-Algorithmus (auch „*Cloud2Cloud*“ genannt) ist ein Registrieralgorithmus, der ohne Zielmarken oder extrahierte Merkmalspunkte funktioniert. Voraussetzung dafür ist eine bereits erfolgte Vorausrichtung, die entweder manuell, aus anderen Algorithmen oder Sensorbeobachtungen abgeleitet werden kann. Dieses Verfahren zielt auf eine Minimierung der Abstände überlappender Anteile der Punktwolke durch Variation von Position und Rotation des anzupassenden Datensatzes. Der Algorithmus optimiert die relative Lage und Orientierung zweier Datensätze in einem iterativen Prozess. Dieser endet, wenn ein Konvergenzkriterium erfüllt wird.

Impulsformabweichung (Pulse Shape Deviation): Durch Echodigitalisierung und Wellenformverarbeitung durch digitale Signalverarbeitung kann man die sogenannte „Pulse Shape Deviation“ erhalten. Neben der Zielweite und der Amplitude wird die Impulsform des Echosignals mit der Impulsform verglichen, die die sogenannte Systemantwort darstellt. Die Impulsformabweichung ist eines der zusätzlichen Attribute zu jedem Punkt der Punktwolke. Niedrige Werte zeigen an, dass die Impulsform des Echosignals nicht wesentlich von der Systemantwort abweicht. Hohe Werte deuten auf Echosignale mit deutlich abweichender Impulsform hin, die z. B. durch die Zusammenführung von Echopulsen mehrerer Ziele entstehen können, die vom Laserstrahl in nur geringfügig unterschiedlicher Entfernung getroffen wurden. Die Impulsformabweichung kann damit als Qualitätsmaß für die Zuverlässigkeit einer Einzelmessung angesehen werden. Bei der automatischen Filterung wird oft eine obere Schranke für die maximal zulässige Abweichung gewählt.

Impulslaufzeit (auch Time-Of-Flight, kurz TOF): Die Zeit, die der ausgesendete Laserimpuls benötigt, um die Zieloberfläche zu erreichen, plus die Zeit, die das Echosignal benötigt, um den Empfänger des Laserscanners zu erreichen. Die Entfernung zum Ziel wird im TOF-Laserentfernungsmessgerät aus der Impulslaufzeit berechnet, basierend auf der Kenntnis der Geschwindigkeit der Impulse in der Luft (Ausbreitungsmedium).

IMU (Inertialmesseinheit, engl.: Inertial Measurement Unit): Eine IMU besteht aus seiner Kombination von mehreren Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren. In manchen Fällen wird eine IMU noch durch Magnetometer ergänzt. IMUs werden zur Bewegungserfassung verwendet.

Laserklasse: Laserklassen dienen zur Bewertung der Sicherheit von Laserinstrumenten. Unterschieden werden vier Laserklassen, die in der Abstufung 1 bis 4 das Gefährdungspotential beurteilen. Laserklasse 1 bedeutet: Sicher, Laserklasse 2 bedeutet: Die zugängliche Laserstrahlung liegt nur im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) auch für das Auge ungefährlich.

Laser-Radar-Querschnitt (LRQ): Der Laser-Radar-Querschnitt ist eine Zieleigenschaft. Er eignet sich zur Berechnung der erwarteten Echosignalamplitude, wenn die Systemparameter und die Entfernung des Ziels bekannt sind. Der LRQ ist das Produkt aus drei Komponenten: Der tatsächlichen Fläche, die mit dem Laserstrahl wechselwirkt (für Ziele, die kleiner als die Laserausleuchtzone sind), dem Reflexionsgrad des Ziels und der Richtwirkung der Reflexion. Die Richtwirkung ist bei diffus reflektierenden Zielen recht gering, bei retroreflektierenden Zielen jedoch sehr hoch.

LIDAR (Light Detection And Ranging): LIDAR ist ein Verfahren zur optischen Entfernungsmessung.

Präzision: Die Präzision eines Messsystems ist der Grad der gegenseitigen Annäherung zwischen den Ergebnissen von Messungen, die nacheinander unter gleichen Messbedingungen ausgeführt wurden. Präzision ist nicht mit der Genauigkeit einer Messung zu verwechseln.

Punktwolke: Eine unsortierte Menge von Punkten mit Koordinatenwerten in einem definierten Koordinatensystem, die z. B. durch Laserscanning erfasst wurde. Neben der geometrischen Information (Koordinatenwerte) enthält eine Punktwolke i. d. R. auch radiometrische Information in Form von Intensitäten (vgl. Radiometrie) und optional Farbwerte aus passiv arbeitenden Kameras, die für die Visualisierung genutzt werden können. Des Weiteren kann sie Informationen wie z. B. Zeitstempel, Amplitude, Reflexionsgrad, Pulsformabweichung oder Signal-Rausch-Verhältnis enthalten.

Eine Punktwolke entfaltet ihren Informationsgehalt nur im Kontext mit anderen Punkten – die Betrachtung eines Einzelpunkt führt zu keinem Erkenntnisgewinn.

Radiometrie: Neben geometrischen Informationen erfassen Laserscanner sogenannte radiometrische Informationen. Während (passive) Fotokameras Grauwerte basierend auf der Intensität von reflektiertem Sonnenlicht bestimmen, messen Laserscanner die reflektierte Signalstärke im schmalbandigen Wellenlängenbereich der Laserdiode. Die Signalstärke hängt im Wesentlichen von der Aufnahmekonfiguration, den atmosphärischen Begebenheiten und den Oberflächeneigenschaften des Objektes ab. Radiometrische Größen werden auch als Intensitäten oder Reflektanzen bezeichnet und ergänzen die geometrische Information um visuelle Information.

Reflexionsgrad (Reflektanz, engl.: Reflectance): Der Reflexionsgrad ist eine Zieleigenschaft und bezieht sich auf den Anteil der einfallenden optischen Leistung, der von diesem Ziel bei einer bestimmten Wellenlänge reflektiert wird. Der Reflexionsgrad ist immer eine positive reelle Zahl. Manche Laserscanner liefern für jedes erkannte Messobjekt einen Reflexionswert als zusätzliches Attribut. Der gelieferte Reflexionsgrad ist ein Verhältnis der tatsächlichen Amplitude dieses Messobjekts zur Amplitude eines weißen, flachen Messobjekts im gleichen Bereich, das orthogonal zur Strahlachse ausgerichtet ist und dessen Größe größer ist als die Laserausleuchtzone. Der tatsächliche Reflexionswert wird in Dezibel (dB)

angegeben. Negative Werte deuten auf diffus reflektierende Ziele hin, während positive Werte in der Regel retroreflektierende Ziele darstellen.

Registrierparameter (oder Registrierungsparameter): Das Ergebnis einer Registrierung bzw. Referenzierung sind i. d. R. sechs Zahlenwerte, drei Verschiebungen (entlang der x/y/z-Achsen) und drei Rotationen (um die x/y/z-Achsen), die den mathematischen Übergang vom Startkoordinatensystem einer Punktwolke in ein Zielkoordinatensystem beschreiben. Wenn ein weiterer Laserscanner z. B. für Detailaufnahmen hinzugefügt werden soll, oder für die Georeferenzierung, sollte auch „der Maßstab“ als Freiheitsgrad berücksichtigt werden.

Relative Orientierung: Eine relative Orientierung bezeichnet in der Photogrammetrie die Relation zwischen zwei lokalen Bildkoordinatensystemen. Die relative Orientierung eröffnet die Möglichkeit zur Messung von 3D-Koordinaten in 2D-dimensionalen Bildern. Allerdings sind die resultierenden Koordinaten noch unmaßstäblich und somit nicht metrisch. Abschließend wird daher die absolute Orientierung durchgeführt, die schließlich die Messung von maßstäblichen Koordinaten ermöglicht.

Residuum: Restabweichung einer Beobachtung zum geschätzten Modell nach einer Ausgleichung.

Retro-Reflexion: Reflexion hauptsächlich in die Richtung des einfallenden Laserstrahls (auch Katzenaugeneffekt genannt). Verkehrszeichen und Katzenaugen auf Fahrräder haben retro-reflektierende Eigenschaften.

SLAM (Simultaneous Localization And Mapping): SLAM ist ein Verfahren des Computersehens (Computer Vision) bzw. der Robotik zur automatischen Navigation. Hierbei erstellt z. B. ein Roboter eine dreidimensionale Karte seiner Umgebung und bestimmt zusätzlich simultan die eigene aktuelle Position und Orientierung innerhalb dieser Umgebung.

Spiegelnde Reflexion: Die Reflexion von Lichtstrahlen an einem glatten Spiegel (oder Glasscheiben) wird direkte oder spiegelnde Reflexion genannt. Diese Ablenkung von Laserstrahlen ist beim Laserscanning unerwünscht, da in der resultierenden Punktwolke nicht die Spiegeloberfläche enthalten ist. Stattdessen erscheint in der Punktwolke die Oberfläche des gespiegelten Objektes fälschlicherweise hinter der Spiegeloberfläche.

Strahldurchmesser: Der Strahldurchmesser eines Laserstrahls ist der Durchmesser senkrecht zur Strahlachse. Da Strahlen typischerweise keine scharfen Kanten haben, kann der Durchmesser auf viele verschiedene Arten definiert werden, zum Beispiel mit der $1/e^2$ -Definition, die für sogenannte Gaußsche Strahlen, d. h. solche mit gaußförmiger Leistungsdichteverteilung, gebräuchlich ist. Im Abstand des halben Strahldurchmessers von der Achse ist die Leistungsdichte auf einen $1/e^2$ -Bruchteil der maximalen Leistungsdichte auf der Strahlachse gesunken. Es gibt auch die folgenden Definitionen: $1/e^2$ Vollwinkel, $1/e$ Vollwinkel, $1/e^2$ Halbwinkel oder FWHM („full width at half maximum“).

Terrestrisches Laserscanning (TLS, engl.: Terrestrial Laser Scanning): Von seiner statischen Position aus tastet ein Laserscanner systematisch seine Umgebung ab, indem der emittierte Laserstrahl mit einem rotierenden Spiegel vertikal sowie durch Drehung um die Stehachse des Laserscanners horizontal abgelenkt wird. Gleichzeitig wird durch Verfahren der elektrooptischen Distanzmessung der Abstand zur vom Laserstrahl abgetasteten Oberfläche gemessen. Auf diese Weise werden pro Sekunde hunderttausende bis zu

Millionen Messpunkte erfasst. Diese kontrollierte Ablenkung eines Laserstrahls erfolgt also rasterförmig im polaren Koordinatensystem. Das terrestrische Laserscanning liefert Punktwolken, die die Oberflächen des abgetasteten Objekts beschreiben. In den meisten Fällen ist der Laserscanner auf einem Dreibeinstativ montiert, er kann aber auch auf einem stillstehenden Fahrzeug usw. befestigt sein.

Transformationsparameter: Siehe *Registrierparameter*.

Vorausrichtung: Ermittlung von Näherungswerten der Registrierungsparameter, die eine anschließende Registrierung (z. B. mittels ICP) erlauben. Wie der Name erahnen lässt, sind die erzielten Ergebnisse nicht genau genug, um als finales Ergebnis angesehen zu werden.

Voxel: Ein Voxel ist ein kubisches Volumenelement. Es wird zur Strukturierung von dreidimensionalen Datenmengen (Punktwolken) verwendet. Der dreidimensionale Raum wird in einzelne Würfel unterteilt. Die Kantenlänge dieser Würfel ist abhängig von der Zielstellung und der Verteilung der Daten im dreidimensionalen Raum. Die Datenmenge, die von einem Voxel umschlossen wird, ist diesem zugeordnet.

Sachwortverzeichnis

- Aliasing, 9
- Barometer, 17
- Beschleunigungssensor, 17
- Blockausgleich, 29
- Datum, 35
- Deviation-Wert, 10
- Filtern, 9
- Fouriertransformation, 21
- Freiheitsgrad, 3
- Genauigkeit, 5
- geometrische Primitiven, 23
- GNSS, 17
- ICP-Algorithmus, 19
- IMU, 17
- Inertialmesseinheit, 17
- Intensitätsbild, 23
- Kompass, 17
- Koordinatensystem, 2
- Kosten, 6
- künstliche Zielzeichen, 23
- Manuelle Vorausrichtung, 13
- Netzgeometrie, 15
- Präzision, 5
- Punktauflösung, 9
- Punktwolke, 2
- Qualitätsmaß, 25
- Redundanz, 24
- Registrierungsparameter, 2
- Residuum, 26
- Rotation, 3
- Rotationsmatrix, 3
- SLAM, 17
- Standpunkt, 2
- Stationierungsgenauigkeit, 35
- Transformationsparameter, 2
- Translation, 3
- Überlappung, 7
- Unsicherheit, 5
- Unsicherheitsfortpflanzung, 4, 5
- Vernetzung, 13
- Verschiebung, 3
- Voxel, 20
- Zielmarke, 14
- Zielzeichen, 14

Literatur

- Besl, P. J., McKay, N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes. Robotics-DL tentative, International Society for Optics and Photonics, Seiten 586-606.
- Chen, Y., Medioni, G. (1992): Object modelling by registration of multiple range images. Image and vision computing, 10(3), Seiten 145-155.
- DVW e.V. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung terrestrischer Laserscanner. Merkblatt Nr. 7 des DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. <https://dvw.de/veroeffentlichungen/standpunkte/1149-verfahren-zur-standardisierten-ueberpruefung-von-terrestrischen-laserscannern-tls> (letzter Zugriff am 18.03.2022)
- Gauss, C. F. (1809): Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium auctore Carolo Friderico Gauss. sumtibus Frid. Perthes et IH Besser.
- Gruber, O. von, (1924): Einfache und Doppelpunkteinschaltung im Raum. Verlag Georg Fischer, Jena, Deutschland.
- Helmert, F. R. (1872): Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate: mit Anwendungen auf die Geodäsie, die Physik und die Theorie der Messinstrumente (Vol. 1). Teubner Publishing.
- Jäger, R., Müller, T., Saler, H., Schwäble, R. (2005): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Legendre, A. M. (1805): Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes. F. Didot.
- Leica Geosystems (2018): Indoor Multi-Setup-Data Set. <https://shop.leica-geosystems.com/blk360-dataset-downloads> (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Leica Geosystems (2020): White Paper: Leica RTC360 - SLAM in Terrestrial Laser Scanning. <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/slam-in-terrestrial-laser-scanning-white-paper> (letzter Zugriff am 18.03.2022)
- Moritani, R., Kanai, S., Date, H., Watanabe, M., Nakano, T., Yamauchi, Y. (2019): Cylinder-based Efficient and Robust Registration and Model Fitting of Laser-scanned Point Clouds for As-built Modeling of Piping Systems. Proc. Cad, 16, Seiten: 396-412.
- Paffenholz, J.-A. (2012): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors. Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C (Dissertationen), Nr. 689. München.
- Previtali M., Barazetti, L., Brumana, R., Scaioni, M. (2014): Scan registration using planar features. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(5), 501.
- Pulli, K. (1999): Multiview registration for large data sets. In: Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No. PR00062), Seiten 160-168. IEEE.
- Reshetyuk, Y., 2010. Direct georeferencing with GPS in terrestrial laser scanning. ZfVZeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 135(3): Seiten: 151-159.
- Samet, H. (2006): Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures. Kaufmann, San Francisco, California, USA. 1024 Seiten.
- Ullrich, A. Fürst, Ch. (2017): Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. Beiträge zum 165. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2017 in Fulda.

- Wujanz, D., Neitzel, F. (2016): Model based viewpoint planning for terrestrial laser scanning from an economic perspective. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41.
- Wujanz, D., Schaller, S., Gielsdorf, F., Gründig, L. (2018): Plane-based registration of several thousand laser scans on standard hardware. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 42(2).
- Wujanz, D. (2019a). Araneo: Bestimmung eines erweiterten Unsicherheitsbudgets für die Deformationsmessung basierend auf terrestrischen Laserscans. avn, 03 2019
- Wujanz, D. (2019b): Taming errors... pt. 1: The importance of registering terrestrial laser scans. Veröffentlicht auf LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-1-importance-registering-terrestrial-daniel-wujanz> (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2019c): Taming errors... pt. 2: The correspondence problem, sufficient overlap and Cloud2Cloud registration. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-2-correspondence-problem-sufficient-overlap-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2019d): Taming errors... pt. 3: On artificial targets for scan registration. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-3-artificial-targets-scan-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2020a): Taming errors... pt. 4: Geometric primitives and direct (Geo-) referencing. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-4-geometric-primitives-direct-geo-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2020b): Taming errors... pt. 5: Compensators and the eternal question. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-5-compensators-eternal-question-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2020c): Taming errors... pt. 6: The Men Who Stare At Points. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-6-men-who-stare-points-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2020d): Taming errors... pt. 7: Redundancy is not a crime. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-7-redundancy-crime-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2021a): Taming errors... pt. 8: The difference between residuals, residuals and residuals. Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-8-difference-between-residuals-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2021b): Taming errors... pt. 9: The difference between residuals, residuals and residuals (cont.). Veröffentlicht auf LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/taming-errors-pt-9-difference-between-residuals-cont-daniel-wujanz?trk=portfolio_article-card_title (letzter Zugriff am 18.03.2022).
- Wujanz, D. (2022): Vorlesungsmaterial zum Thema Registrierung von Laserscans. Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt.

Impressum

Herausgeber
DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement

Geschäftsstelle
Rotkreuzstr. 1 L
D-77815 Bühl
Telefon: +49 7223 / 9150-850
Fax: +49 7223 / 9150-851
E-Mail: geschaefsstelle@dvw.de