



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

**Untersuchung zur Genauigkeit des
terrestrischen Laserscanners
Surphaser 100HSX**

Ausgeführt am
Department für Geodäsie und Geoinformation
der Technischen Universität Wien

von

Thomas Achs
Obere Hauptstraße 57/Top 1
7122 Gols

Begutachter:
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer

Wien, März 2017

.....

Kurzfassung

Das Terrestrische Laserscanning hat sich in den letzten Jahren als eigenständige Messtechnik zur flächenhaften Aufnahme von dreidimensionalen Objekten etabliert. Durch die stetige Weiterentwicklung der Instrumente und die Steigerung der Abbildungsgenauigkeit ergeben sich immer wieder neue und vielfältigere Anwendungsmöglichkeiten, wodurch mittlerweile eine Vielzahl an unterschiedlichen Laserscannern auf dem Markt verfügbar ist. Ein Vergleich von Instrumenten verschiedener Hersteller ist oft schwierig bzw. nur eingeschränkt möglich.

Gerade für die Messpraxis sind jedoch Untersuchungen über Genauigkeit und Verhalten für das Verständnis des verwendeten Instruments von entscheidender Bedeutung. Leider fehlen für Terrestrische Laserscanner noch immer verbindliche Richtlinien zur einheitlichen Spezifikation.

Die Firma „GEOS3D Geodetic and Industrial Surveying GmbH“ arbeitet als Vermessungsdienstleister speziell im Bereich der Industrievermessung mit dem Laserscanner Surphaser 100HSX und ist daher an einem tieferen Verständnis über das Verhalten des Laserscanners im Messalltag interessiert.

Aus diesem Grund sollen in dieser Diplomarbeit verschiedene Systemtest durchgeführt werden um Aufschluss über Genauigkeit und Abbildungsverhalten sowie Antworten auf praxisrelevante Fragen zur erhalten.

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass dem Surphaser 100HSX ein größtenteils positives Abbildungsverhalten bescheinigt werden kann. Der Laserscanner erfüllt nahezu alle vom Hersteller „Basis Software Inc.“ Angegebenen Spezifikationen. Lediglich beim Test der Wiederholgenauigkeit (Kapitel 4.3) treten eindeutige Ungereimtheiten auf. Auch zeigt der getestete Surphaser 100HSX die Tendenz gemessene Referenzstrecken systematisch zu kurz abzubilden, jedoch liegen diese Abweichungen im Bereich der Herstellerangaben.

Abstract

In the last few years terrestrial laserscanning developed into an important method for measuring and mapping three dimensional objects. The continuous development of the instruments and the increase in accuracy constantly extend the scope of application. Various laser scanners are available nowadays and a head-to-head comparison of instruments of different manufactures is often tedious.

Investigating accuracy and general behaviour is crucial for a deeper understanding of the instrument in real work conditions. Unfortunately there is still no mandatory guideline in place to standardize laser scanner specs.

Highly specialized in the field of industrial surveying the company "GEOS3D Geodetic and Industrial Surveying GmbH" is therefore taking great interest in acquiring more information about their Surphaser 100HSX's behaviour in everyday workflow.

The purpose of this thesis is thus to perform several system tests to get a deeper understanding of the accuracy and the instruments general mapping behaviour in real work conditions.

The Surphaser 100HSX performs in most of the executed tests on a high quality level. It achieves to comply with nearly all the specs given by the manufacturer "Basis Software Inc.". There are some significant discrepancies though when testing the Surphaser's capability of repeating measurements of the same test setup (Chapter 4.3). Furthermore the laser scanner tends to systematically measure calibrated distances too short. The deviation of this effect is still within the manufactures specs though.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Terrestrische Laserscanner	6
2.1	Grundlagen.....	6
2.1.1	Impulslaufzeitverfahren.....	10
2.1.2	Phasenvergleichsverfahren	11
2.1.3	Triangulationsverfahren.....	12
2.2	Arbeitsablauf im terrestrischen Laserscanning.....	13
2.3	Vergleich aktueller Laserscanner	15
3	Surphaser 100HSX.....	16
4	Experimente	20
4.1	Grundlagen.....	20
4.1.1	Kalibrier- und Überprüfungsverfahren.....	20
4.1.2	Verwendete Instrumente	24
4.1.3	Verwendete Software	27
4.2	Experiment 1: Test der relativen Distanz-Messgenauigkeit auf ein Surphaser Target.....	30
4.2.1	Motivation und Zielsetzung	30
4.2.2	Versuchsaufbau.....	32
4.2.3	Messung und Auswertung	34
4.2.4	Schlussfolgerung des Experiments	39
4.3	Experiment 2: Test der Wiederholgenauigkeit zwischen mehreren Scans	40
4.3.1	Motivation und Zielsetzung	40
4.3.2	Versuchsaufbau.....	40
4.3.3	Messung und Auswertung	41
4.3.4	Schlussfolgerung des Experiments	46
4.4	Experiment 3: Test des integrierten Neigungssensors	48
4.4.1	Motivation und Zielsetzung	48
4.4.2	Versuchsaufbau.....	48
4.4.3	Messung und Auswertung	50
4.4.4	Schlussfolgerung des Experiments	55
4.5	Experiment 4: Test der Abbildungsgenauigkeit eines Festpunktnetzes....	57
4.5.1	Motivation und Zielsetzung	57
4.5.2	Versuchsaufbau.....	58
4.5.3	Messung und Auswertung	60
4.5.4	Schlussfolgerung des Experiments	66

4.6	Experiment 5: Test der Abbildungsgenauigkeit eines ebenen Objektes ...	67
4.6.1	Motivation und Zielsetzung	67
4.6.2	Versuchsaufbau.....	67
4.6.3	Messung und Auswertung	68
4.6.4	Schlussfolgerung des Experiments	74
4.7	Experiment 6: Test der Genauigkeit der Winkelgeber.....	75
4.7.1	Motivation und Zielsetzung	75
4.7.2	Versuchsaufbau.....	75
4.7.3	Messung und Auswertung	76
4.7.4	Schlussfolgerung des Experiments	81
5	Zusammenfassung und Ausblick	82
6	Abbildungsverzeichnis	85
7	Literaturverzeichnis.....	86

1 Einleitung

Die moderne Messtechnik hat eine Vielzahl an unterschiedlichen Messsystemen und Instrumenten hervorgebracht. Die jeweils zugrundeliegenden Messprinzipien sind ebenso vielfältig wie die möglichen Einsatzbereiche. Ein genereller Vergleich zwischen den verschiedenen Systemen ist daher nicht bzw. kaum möglich.

Bei genauer Betrachtung zeigen sich jedoch bereits Schwierigkeiten Instrumente derselben Geräteklasse, wie z.B. Laserscanner, untereinander zu vergleichen. Zu verschieden sind teilweise die Anwendungsbereiche, für die das jeweilige Instrument konzipiert wurde.

Des Weiteren gibt es auch eine Vielzahl an Herstellern, die ihre Produkte nach eigenen Regeln, in speziellen Messkonfigurationen und Bedingungen testen. Gerade im Bereich von Laserscannern fehlen bisher für Hersteller verbindliche Richtlinien bzw. einheitliche Kenngrößen zur Angabe der Genauigkeit der Instrumente. Die angegebenen Genauigkeitswerte beziehen sich somit auf herstellerspezifische Testszenarien und Auswertestrategien und machen daher einen Vergleich von Instrumenten verschiedener Hersteller nur eingeschränkt möglich.

Eine weitere Problematik besteht in der Tatsache, dass die Spezifikationen der Hersteller zwar die prinzipiell zu erwartende Genauigkeit der Instrumente angeben, jedoch Fragen der alltäglichen Messpraxis nur teilweise bzw. ungenügend beantwortet. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen deshalb verschiedene Experimente entwickelt und durchgeführt werden um einerseits die vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsspezifikationen des Surphaser 100HSX zu überprüfen, sowie andererseits auch praxisrelevante Fragen zu beantworten.

Nach einer allgemeinen Einführung in die Thematik des Terrestrischen Laserscannings in Kapitel 2 und einer genaueren Beschreibung des Surphaser 100HSX in Kapitel 3, werden die Experimente in Kapitel 4 beschrieben und ausgewertet.

2 Terrestrische Laserscanner

2.1 Grundlagen

Laserscanner sind Messgeräte, welche ihre Umgebung und deren Objekte dreidimensional abbilden können. Das Messprinzip des Laserscannings ist dabei intuitiv und einfach zu verstehen: Der Scanner sendet einen stark gebündelten Laserstrahl aus, welcher an der Objektoberfläche gestreut wird. Ein Teil dieser Strahlung wird wieder in Richtung des Laserscanners reflektiert und von einer Empfangseinheit registriert. (siehe Abb. 1)

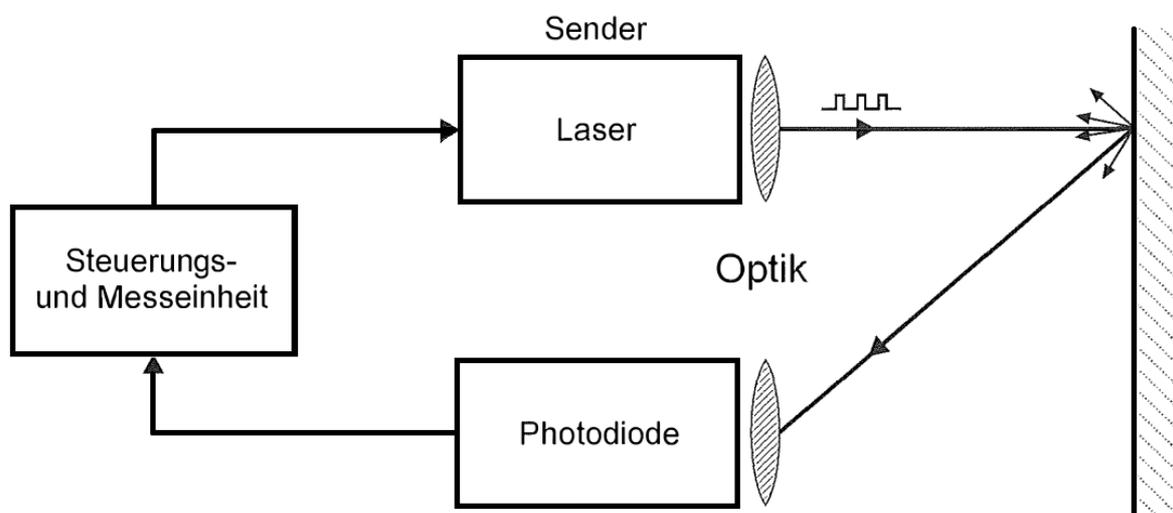


Abbildung 1: Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners [Wagner et al. 2003]

Im Unterschied zu z.B. Tachymetermessungen werden beim Laserscanning jedoch keine repräsentativen Punkte gemessen um das Objekt zu diskretisieren. Die Oberfläche des Objekts wird stattdessen durch den Laserstrahl automatisch in vorgegebenen Winkelschritten inkrementell abgetastet, wodurch ein regelmäßiges Punktraster entsteht (siehe Abb. 2). Für jeden einzelnen dieser Objektpunkte werden Vertikal- und Horizontalwinkel sowie die Distanz gemessen und registriert. Beim Laserscanning handelt es sich somit um ein polares sowie aktives Verfahren. Im Gegensatz zur Photogrammetrie ist man daher nicht an eine ausreichende Beleuchtung des Messobjekts gebunden. Weiters reicht beim Laserscanning bereits ein Instrumentenstandpunkt aus um lokale dreidimensionale Koordinaten der Objektpunkte zu bestimmen.

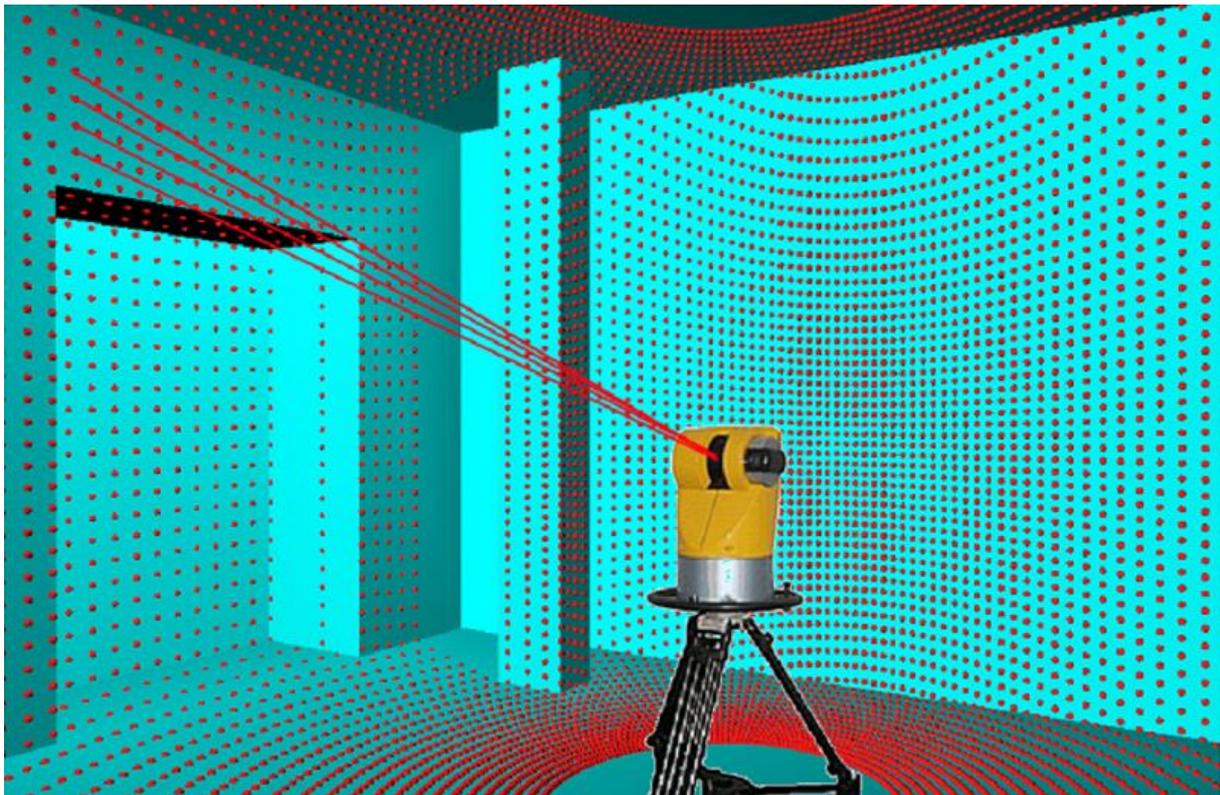


Abbildung 2: Flächenhaftes Abscannen, [Niemeier et al., 2002]

Betrachtet man die Anwendungsmöglichkeiten, so kann grundsätzlich zwischen zwei wichtigen Bereichen unterschieden werden. Beim sogenannten Airborne (luftgestützten) Laserscanning wird die Erdoberfläche von einem bewegten Fluggerät aus großflächig gescannt um aus den Messungen beispielsweise digitale Geländemodelle abzuleiten. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die terrestrische Variante vor allem dadurch, dass während des Abtastvorganges der Laserscanner in der Regel nicht bewegt wird. Der stationäre terrestrische Laserscanner benötigt daher Ablenkmechanismen in zwei Richtungen. [Kraus, 2004]

Die mechanische Ablenkung des Laserstrahls kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen, unter anderem zum Beispiel mit Hilfe von schnell rotierenden Umlenkprismen (siehe Abb. 3) oder Planspiegeln.

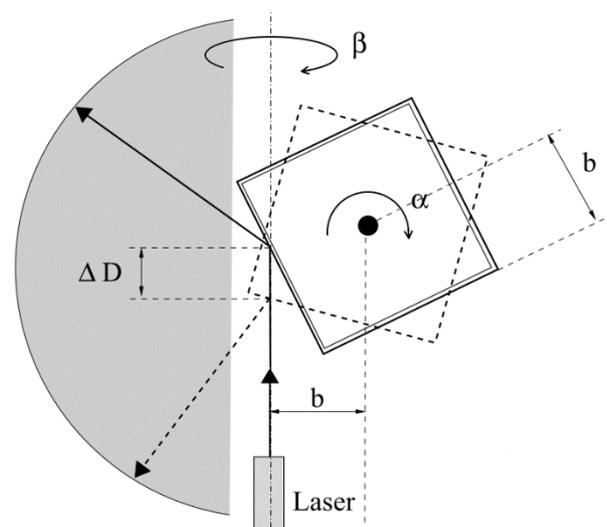


Abbildung 3: Umlenkprisma [Kern, 2003]

Die Messung erfolgt anschließend meist in Form von vertikalen Scanprofilen. (siehe Abb. 4)
 Dabei wird der Winkel des Laserstrahls entlang einer vertikalen Scan-Zeile in konstanten Schritten $\Delta\beta$ so lange variiert bis der gesamte Öffnungswinkel des Profils durchlaufen wurde. Anschließend erfolgt eine Drehung mit vorgegebener konstanter Schrittweite $\Delta\alpha$ um die Stehachse des Instruments und der abgelenkte Laserstrahl durchläuft ein neues vertikales Scanprofil. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange bis das Messvolumen vollständig gescannt wurde.

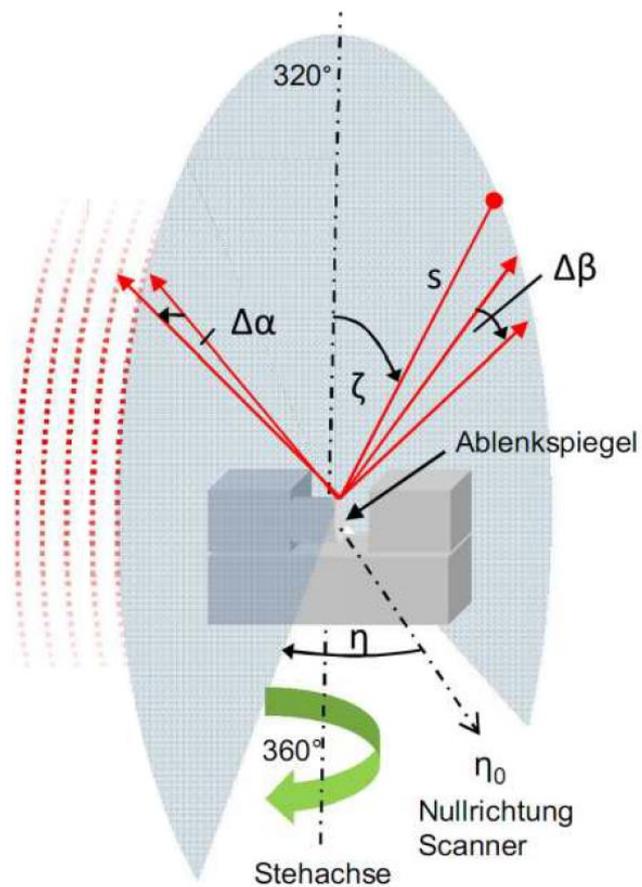


Abbildung 4: Aufnahmeprinzip eines terrestrischen Laserscanners [Eysn, 2009]

Die Öffnungswinkel, welche der Laserstrahl in horizontaler bzw. vertikaler Richtung maximal durchlaufen kann, sind durch den Aufbau des Laserscanners limitiert und werden allgemein „field of view“ (kurz FOV) genannt, in Abbildung 4 beispielsweise $360^\circ \times 320^\circ$.

Für jede eingestellte Strahlrichtung wird die Distanz s zur Objektoberfläche bestimmt und ebenso wie die Ist-Werte der beiden Winkel ζ bzw. η , die i.A. geringfügig von den durch die Schrittweite vorgegebenen Soll-Werten abweichen, vom Laserscanner registriert. [Haring, 2003]

Als Endergebnis eines einzelnen Scans liegt somit eine 3D-Punktwolke im lokalen, Scanner gebundenen Koordinatensystem vor.

Zusätzlich zu den drei Polarkoordinaten werden jedoch auch noch die sogenannten Intensitätswerte für jeden Messpunkt aufgezeichnet. Die Intensität entspricht dabei der Signalstärke des an der Objektoberfläche reflektierten Laserstrahls, welcher von der Empfangseinrichtung des Laserscanners detektiert wird. Sie ist stark von der Oberflächenbeschaffenheit und der Entfernung des Messobjektes abhängig und besonders bei der Bestimmung von signalisierten

Verknüpfungspunkten¹ wichtig. Diese können unter anderem mit Hilfe von speziellen Reflexions- oder Schachbrett-Zielmarken (siehe Abb. 18, Kapitel 4.2.1) realisiert und deren Zentren aufgrund der hohen bzw. stark unterschiedlichen Intensitätswerte leicht identifiziert werden.

Verknüpfungspunkte sind notwendig um mehrere Laserscanner Aufnahmen in ein einheitliches Objektkoordinatensystem transformieren zu können, da jeder einzelne Scan in einem eigenen lokalen Koordinatensystem vorliegt. Die relative Orientierung der einzelnen Punktwolken zueinander erfolgt dabei über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} + m \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \Leftrightarrow \vec{X} = \vec{t} + m \mathbf{R} \vec{x} \quad (1)$$

Die Transformationsparameter bestehen aus 3 Translationen (t_x, t_y, t_z) entlang der Koordinatenachsen, 3 Rotationen (ω, Φ, κ) um die Koordinatenachsen und einem Maßstabsfaktor m . Es sind somit insgesamt 7 unbekannte Parameter zu bestimmen bzw. 6, bei Vernachlässigung des Maßstabsfaktors ($\rightarrow m = 1$). Um das Gleichungssystem bereits mit leichter Redundanz zu lösen sind daher 3 Verknüpfungspunkte in den Scans notwendig. In der Praxis wird jedoch in der Regel auf eine größere Überbestimmung geachtet und mindestens 4 idente Punkte pro Aufnahme gemessen, um auch mögliche Fehlmessungen kompensieren zu können.

Eine weitere Möglichkeit, mehrere Laserscanner-Aufnahmen zueinander zu orientieren, besteht in der Anwendung des ICP²-Algorithmus, der keine dedizierten Verknüpfungspunkte benötigt. Der Algorithmus kommt im Zuge dieser Diplomarbeit jedoch nicht zur Anwendung, es wird daher an dieser Stelle für weiterführende Informationen auf [Besl und McKay, 1992] verwiesen.

¹ Identische Punkte, welche in mehreren Scans sichtbar sind

² **I**terative **C**losest **P**oint

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal von Laserscannern besteht in der Art der Distanzmessung, weshalb im Folgenden auf die unterschiedlichen Verfahren genauer eingegangen wird.

2.1.1 Impulslaufzeitverfahren

Das Messprinzip beruht, wie der Name bereits andeutet, auf der Bestimmung der Laufzeit Δt , die ein ausgesandter Impuls benötigt um die auszumessende Entfernung D zu durchlaufen. Wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt, wird dabei vom Sender ein Laserpuls mit bekannter Fortpflanzungsgeschwindigkeit c ausgesandt, am Messobjekt teilweise reflektiert und das retournierte Signal vom Empfänger registriert. Mit der aus Start- und Endzeitpunkt ermittelten Laufzeitdifferenz Δt sowie der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c kann anschließend die in Hin- und Rückweg doppelt durchlaufene Entfernung D berechnet werden:

$$2D = c \cdot \Delta t \quad \text{bzw.} \quad D = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2)$$

Pulslaufzeitgeräte sind häufig für größere Distanzen ausgelegt, wo in der Regel Auflösungen und Genauigkeiten im Millimeter- bzw. Zentimeter-Bereich ausreichend sind. Da sich elektromagnetische Wellen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, sind hier speziell die Zeitmessbausteine der Instrumente ein limitierender Faktor. Selbst mit einem zeitlichen Auflösungsvermögen von 10 Picosekunden ($= 10^{-11}$ Sekunden) ergibt sich eine Streckenmessgenauigkeit von ca. 1,5mm für eine Einzelmessung.

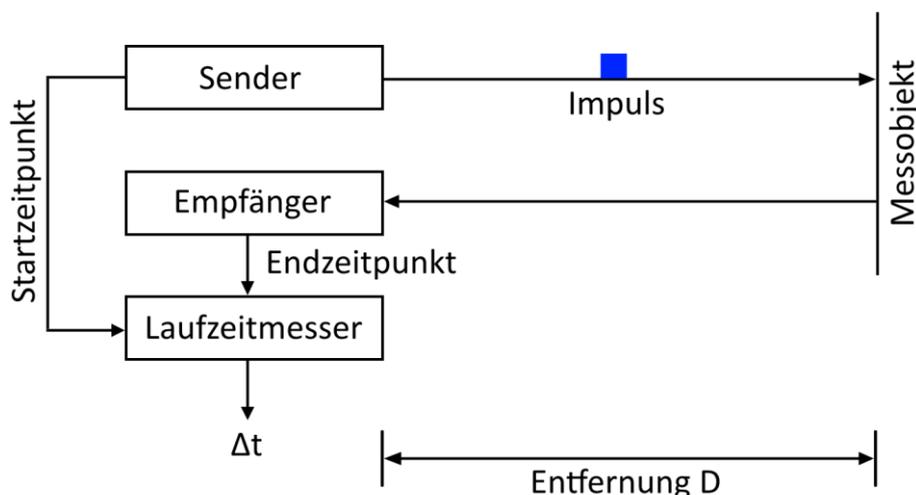


Abbildung 5: Prinzip der Impulslaufzeitmessung

2.1.2 Phasenvergleichsverfahren

Beim Phasenvergleichsverfahren werden keine kurzen Laserpulse als Informationsträger verwendet, es wird stattdessen eine amplitudenmodulierte Trägerwelle kontinuierlich ausgesandt. Auch bei dieser Technik erreicht das reflektierte Signal den Empfänger mit einer zeitlichen Verzögerung Δt , es wird jedoch eine andere physikalische Eigenschaft als die Laufzeit ausgewertet. Die Grundlage des Verfahrens besteht in der Messung der Phasenverschiebung zwischen ausgesandtem und empfangenem (reflektiertem) Signal.

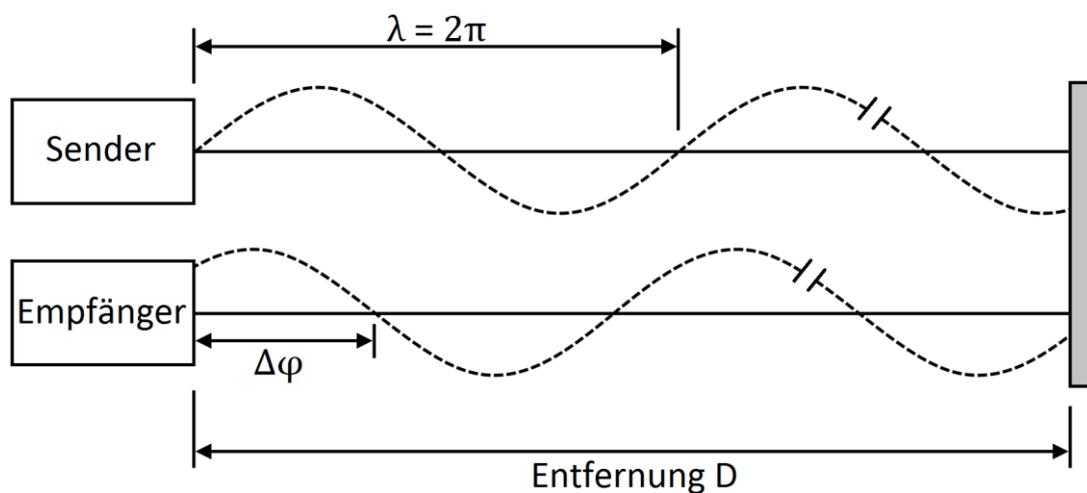


Abbildung 6: Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens

Wie sich aus Abbildung 6 schließen lässt, besteht die Gesamtphase Φ über die (doppelte) Entfernung D somit aus einer Anzahl N an vollständig durchlaufenen Wellenzügen sowie dem gemessenen Phasenreststück $\Delta\varphi$.

$$\Phi = N \cdot 2\pi + \Delta\varphi \quad (3)$$

Mit Hilfe der bekannten Wellenlänge λ erhält man nach Umrechnung der Phasenwerte in tatsächliche Längeneinheiten die gesuchte Entfernung D mit

$$2D = N \cdot \lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda \quad \text{bzw.} \quad D = N \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

Für einen Objektpunkt P können anschließend mittels seiner Bildkoordinaten ξ_2 und η_2 , der Kamerakonstanten c , der Basis B und dem Winkel α_1 seine 3D-Koordinaten wie folgt berechnet werden [Kraus, 2004]:

$$\mathbf{Y}_P = \frac{B}{\tan \alpha_1 - \frac{\xi_2}{c}} \quad \left| \quad \mathbf{X}_P = Y_P \frac{\xi_2}{c} + B \quad \right| \quad \mathbf{Z}_P = Y_P \frac{\eta_2}{c} \quad (5)$$

2.2 Arbeitsablauf im terrestrischen Laserscanning

Der Arbeitsablauf beim Laserscanning unterscheidet sich zum Teil recht deutlich von anderen Messsystemen.

Zum einen erhält man als Messergebnis eine unstrukturierte Punktwolke, welche im Allgemeinen keine markanten bzw. repräsentativen Objektpunkte, wie z.B. an Ecken oder Kanten, enthält. Derartige Geometrien müssen daher erst nachträglich aus den umliegenden Objektpunkten extrahiert werden.

Zum anderen liefern aktuelle Laserscanner mittlerweile derart hohe Messfrequenzen, dass Punktwolken mit mehreren 10 Millionen Punkten innerhalb weniger Minuten erfasst werden können.

Aufgrund dieser beiden Tatsachen ergibt sich beim Laserscanning ein deutlich höherer Nachbearbeitungsaufwand, der durch die teils riesigen Datenmengen auch eine entsprechend leistungsfähige Hardware im Postprocessing notwendig macht.

Nach [Pfeifer et al., 2007] können bei einem Laserscanning-Projekt folgende 10 Arbeitsschritte unterschieden werden:

1. Kalibrierung im Labor
2. Festlegung der erforderlichen Auflösung, Genauigkeit und des Modelltyps
3. Wahl der Standpunkte
4. Datenerfassung vor Ort
5. Kontrolle der Datenerfassung
6. Projektbegleitende Kalibrierung
7. Relative Orientierung
8. Absolute Orientierung
9. Modellerstellung
10. Qualitätskontrolle

Die Kalibrierung im Labor (Schritt 1) erfolgt im Normalfall durch den Hersteller vor der Instrumentenübergabe bzw. in regelmäßigen zeitlichen Intervallen und muss dementsprechend nicht vor jedem Messeinsatz durchgeführt werden. Die Festlegung der genauen Spezifikationen des Endprodukts (Schritt 2) findet in Übereinstimmung mit den Anforderungen und Wünschen des Auftraggebers statt. Die Instrumentenstandpunkte (Schritt 3) werden in der Regel vor Ort direkt vor der eigentlichen Messung (Schritt 4) gewählt. Eine Wahl im Vorhinein ohne genaue Objekt- und Umgebungskennntnisse ist im Allgemeinen nicht zielführend.

Nach der Aufnahme der Daten erfolgt die Kontrolle auf korrekte und vollständige Erfassung des Messobjekts (Schritt 5). Dieser Arbeitsschritt erfolgt visuell mit Hilfe der zugehörigen Scansoftware, wobei darauf geachtet wird, dass es zu keinen ungewünschten Abschattungen oder offensichtlichen Fehlmessungen gekommen ist. Eine (zumindest) grobe relative Orientierung der Scans kann bei dabei sehr hilfreich bzw. sogar notwendig sein.

Die Schritte 6 bis 8 umfassen die Kalibrierung des Laserscanners auf Basis der aufgenommenen Daten, die relative Orientierung der einzelnen Standpunkte zueinander und die Überführung in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Speziell Schritt 7 ist hierbei hervorzuheben, da eine relative Orientierung im Großteil aller Projekte notwendig ist.

Der größte Arbeitsaufwand ist bei der Erstellung des Modells zu betreiben. Während in den zuvor genannten Arbeitsschritten die Daten lediglich transformiert bzw. korrigiert wurden, erfolgt in Schritt 9 die eigentliche Erschaffung geometrischer Elemente (Punkte, Linien und Flächen) aus der unstrukturierten Punktwolke.

Der abschließende Arbeitsschritt (Schritt 10) entspricht der Qualitätskontrolle, ob die in Schritt 2 formulierten Anforderungen auch erfüllt werden konnten.

Das nachfolgende Kapitel 2.3 zeigt in Tabelle 1 eine Übersicht über die Eigenschaften und Leistungsmerkmale aktuell erhältlicher Laserscannermodelle. Die Liste an Instrumenten erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.3 Vergleich aktueller Laserscanner

	Faro Focus 150	Leica Scanstation P30	Maptek I-Site 8200SR	Riegl VZ-400i	Trimble TX8	Z+F Imager 5010C	Surphaser 100HSX
Allgemein							
Bauart	Panorama	Panorama	Kamera	Kamera	Panorama	Panorama	Panorama
Messverfahren	Phasendifferenz	Impulslaufzeit	Impulslaufzeit	Impulslaufzeit	Impulslaufzeit	Phasendifferenz	Phasendifferenz
Gesichtsfeld vert./hori. [°]	300 / 360	290 / 360	125 / 360	100 / 360	317 / 360	320 / 360	270 / 360
Scanbereich [m]	0,6 - 150	0,4 - 120	1 - 500	0,5 - 800	0,6 - 120m	0,3 - 187,3	1 - 50m
Max. Messrate (Pkte/sec)	976.000	1.000.000	K.A.	500.000	1.000.000	1.016.000	1.200.000
min. Winkelinkrement	0,009°	K.A.	0,025°	0,0015°	K.A.	0,0004°	0,01°
Temperaturbereich [°C]	+5 bis +40	-20 bis +50	0 bis +50	0 bis +50	0 bis +40	-10 bis +45	+5 bis +45
Länge, Breite, Höhe [mm]	230x183x103	238x358x395	378x216x415	206 ³ x309	386x335x242	286x170x395	381x120x219
Gewicht [kg]	4,2	12,25	11,9	9,7	10,7	9,8	11
Schutzart	IP54	IP54	IP65	IP64	IP54	IP53	K.A.
Laser							
Laserklasse	1	1	1	1	1	1	3R
Wellenlänge [nm]	1550	1550	NIR ⁴	NIR ⁴	1500	1500	685
Strahldivergenz [mrad]	0,3	< 0,23	0,25	0,35	K.A.	< 0,30	K.A.
Genauigkeit							
Distanzgenauigkeit	±1mm	1,2mm + 10ppm	6mm	5mm @ 100m	<2mm	≤1mm	0,35mm @ 5m
Winkelgenauigkeit	19"	8"	K.A.	K.A.	16,5"	25"	15"
3D Punktgenauigkeit	2mm @ 10m	3mm @ 50m	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
Rauschen ⁵	<0,4mm @ 10m	0,4mm @ 10m ⁶	6mm	3mm @ 100m	<2mm @ 120m	<0,4mm @ 10m	<0,4mm @ 10m

Tabelle 1: Vergleich aktuell verfügbarer Laserscanner

³ Der Riegl VZ-400i besitzt eine zylindrische Form, die 206mm entsprechen dem Zylinderdurchmesser

⁴ NIR = Nahes Infrarot (780nm bis 3µm Wellenlänge)

⁵ Bei 10% Reflektivität des Messobjekts

⁶ Bei 78% Reflektivität des Messobjekts

3 Surphaser 100HSX

Der Surphaser 100HSX (siehe Abb. 8) ist seinem Aufbau nach der Kategorie der sogenannten Panoramascanner zuzuordnen. Mit einem Messbereich von 1 bis 50 Metern laut Herstellerangaben ist er somit für den (erweiterten) Nahbereich konzipiert.



Abbildung 8: Surphaser 100HSX

Die Distanzmessung erfolgt nach dem Phasenvergleichsverfahren (siehe Kapitel 2.1.2), wobei ein continuous-

wave Laser mit einer Wellenlänge von 685 Nanometer (→ Farbton Rot) zum Einsatz kommt. Der Laser fällt dabei in die Klasse 3R und ist daher bereits mit einem geringen Gefahrenpotential für das menschliche Auge ausgestattet. Leider gibt es von Herstellerseite keine Angaben bezüglich der Strahldivergenz.

Die Mehrdeutigkeitsgrenze des Systems liegt bei 90 Metern und entspricht somit in etwa dem doppelten angegebenen Messbereich. Der Surphaser besitzt ein horizontales Gesichtsfeld, wie für Panoramascanner üblich, von 360°, vertikal können 270° abgedeckt werden. Die maximal wählbare Punktdichte beträgt sowohl horizontal als auch vertikal 89 Punkte pro Winkelgrad, was in etwa einem Auflösungsvermögen von 0,01° entspricht.

In einer Objektentfernung von 10 Metern weisen die einzelnen Messpunkte in höchster Auflösung somit einen Abstand von ca. 1,9 mm zueinander auf.

In weiterer Folge dieser Diplomarbeit werden die Abkürzungen LPD⁷ für die Auflösung in horizontaler und PPD⁸ für die Auflösung in vertikaler Richtung verwendet.

⁷ LPD = **L**ines **P**er **D**egree

⁸ PPD = **P**oints **P**er **D**egree

Der Surphaser 100HSX kann in 3 verschiedenen Messmodi betrieben werden:

- 1) **High Quality (HQ)**: für geringe Distanzen bis 35 Meter optimiert und entspricht dem höchsten Genauigkeitsmodus
- 2) **High Sensitivity (HS)**: für größere Distanzen bis 50 Meter bzw. dunkle Objekte optimiert
- 3) **2 Pass**: eine Kombination aus 1) und 2)

Sämtliche Experimente dieser Diplomarbeit erfolgen im HQ-Modus, weshalb sich alle weiteren Genauigkeitsangaben auf diesen Modus beziehen und auf eine genauere Betrachtung der beiden anderen Modi verzichtet wird.

Der Hersteller nennt für die Distanzmessgenauigkeit des Surphaser 100HSX einen Wert von $< 0,35\text{mm}$ auf eine Entfernung von 5 Metern. Genauigkeitsangaben für andere Distanzbereiche waren leider auch auf Nachfrage nicht verfügbar. Auch das Rauschverhalten wird lediglich für eine Entfernung von 10 Metern angegeben und beträgt bei einer Reflektivität der Objekt Oberfläche von 90% $0,07\text{mm}$ bzw. $0,41\text{mm}$ bei 10% Reflektivität.

Als Genauigkeit der Winkelgeber werden sowohl in horizontaler also auch vertikaler Richtung 15 Winkelsekunden genannt.

Optional kann der Surphaser 100HSX auch mit einem Neigungssensor ausgestattet werden, der eine Horizontiergenauigkeit von 5 Winkelsekunden aufweist. Ist dies der Fall, registriert und verspeichert der Laserscanner die Verkippungen um die die X- bzw. Y-Achse automatisch für jeden Scan. Die gemessene Punktwolke kann dann bei Bedarf im Postprocessing mit Hilfe der Werte des Neigungssensors horizontalisiert werden.

Die Steuerung des Surphaser 100HSX erfolgt im Normalfall mittels Laptop über die mitgelieferte Scansoftware „SurphExpress“. Die Verbindung zwischen Steuereinheit und Laserscanner kann dabei wahlweise über ein gängiges LAN-Kabel bzw. drahtlos über WLAN erfolgen.

Der Surphaser 100HSX kann weiters auch im Akkubetrieb und somit ohne direkten Netzzugang verwendet werden. Stattet man das Instrument zusätzlich mit einer handelsüblichen Speicherkarte aus, besteht die Möglichkeit den Laserscanner sogar als vollständig autarkes System zu betreiben. Die Scanparameter werden in

diesem Fall bereits vor der Messkampagne (z.B. im Büro) mit Hilfe der Steuereinheit festgelegt, im Feld reicht anschließend ein einzelner Knopfdruck aus um die Messung zu starten, die Messdaten werden dabei auf der Speicherkarte abgelegt.

Der Surphaser 100HSX speichert die Scandaten im proprietären C3D-Format, welches mit Hilfe der Scansoftware „SurphExpress“⁹ gelesen und bearbeitet werden kann. Die Software bietet verschiedene Filter- und Prozessierungseinstellungen, wobei im Rahmen dieser Diplomarbeit auf eine allgemeine Filterung der Daten verzichtet wird.

Sind mehrere Punktwolken von verschiedenen Instrumentenstandpunkten vorhanden, bietet SurphExpress die Möglichkeit diese relativ zueinander zu orientieren. Da die Software jedoch nur wenige Kennwerte über die Qualität der erfolgten Orientierung liefert, wird dieses Feature nicht genutzt. Stattdessen werden lediglich die Koordinaten der Mittelpunkte der verwendeten Laserscanner Zielmarken mit Hilfe von SurphExpress ermittelt und exportiert. Die tatsächliche Orientierung erfolgt anschließend mittels Ähnlichkeitstransformation im Programm „Spatial Analyzer“ (siehe Kapitel 4.1.3).

Bei den verwendeten Laserscanner Zielmarken handelt es sich um sogenannte Flachtargts mit schwarz-weißem Schachbrettmuster (siehe Kapitel 4.2.1). SurphExpress ermittelt bei aktivierter „Improve“-Funktion (siehe Abb. 9) die Koordinaten der Zentren mit Hilfe der stark unterschiedlichen Intensitätswerte der schwarzen bzw. weißen Flächen.

Leider wurden vom Hersteller keine detaillierteren Informationen zum Funktionsprinzip des „Improve“-Algorithmus zur Verfügung gestellt.

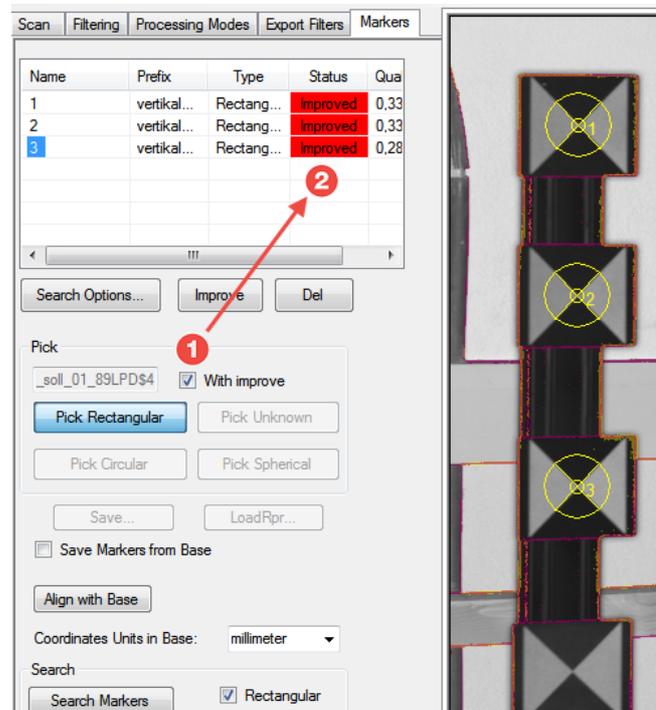


Abbildung 9: Extraktion der Koordinaten der Zielmarken-Mittelpunkte mittels „Improve“

⁹ Verwendete Version 3.12 Build Number 17 Revision 95

Technische Daten

Allgemein	
Distanz-Messmethode:	Phasenvergleich
Gewicht	11kg
Maße (Länge x Breite x Höhe)	381mm x 120mm x 219mm
Gesichtsfeld (vert. / hori.)	270° / 360°
Messrate (Punkte/Sekunde)	208.000 – 1.200.000
Min. Punktdichte (Punkte pro Grad)	24 / 10 (vertikal / horizontal)
Max. Punktdichte (Punkte pro Grad)	89 / 89 (vertikal / horizontal)
Scanbereich	1 – 35m bzw. 50m ¹⁰
Temperaturbereich	+ 5°C bis + 45°C
Laser	
Wellenlänge	685nm
Typ	Continous wave
Klasse (IEC EN60825-1:2007)	Class 3R
Genauigkeit	
Winkelgenauigkeit ^{11,12}	15"
Distanzgenauigkeit ^{11,12}	< 0,35 mm @ 5m
Messrauschen ^{11,13}	
90% Reflektivität	0,07 mm @ 10m
10% Reflektivität	0,41 mm @ 10m
Neigungssensor	5"

Tabelle 2: Technische Daten Surphaser 100HSX

¹⁰ 35 Meter im HQ-, 50 Meter im HS-Messmodus

¹¹ Alle Angaben zu Genauigkeit und Rauschen für 1 Sigma

¹² Ermittelt mit Kontrast-Target Best-Fit bei einer Messrate von 208.000 Pkte/sek.

¹³ Messrauschen (Distanz) – lokale Distanzabweichung, 1 Sigma, 90% Lambert'sche Oberfläche

4 Experimente

4.1 Grundlagen

4.1.1 Kalibrier- und Überprüfungsverfahren

Die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit terrestrischer Laserscanner konnte in den letzten Jahren von den Herstellern stetig gesteigert werden, wodurch sich immer mehr und vielfältigere Anwendungsmöglichkeiten für das Laserscanning ergeben. Trotz der gesteigerten Qualität der Instrumente muss sich jedoch jeder Betreiber darüber vergewissern, dass das eingesetzte Messgerät die geforderte Leistung erbringt. Insbesondere darf die maximal zulässige Messabweichung nicht überschritten werden. Dies kann auf Dauer nur durch vergleichbare Abnahmekriterien und eine regelmäßige Überwachung der Messinstrumente gewährleistet werden. Die Verantwortung dafür liegt zum einen beim Gerätehersteller und zum anderen beim Betreiber des Laserscanners. [VDI/VDE¹⁴ 2634, 2002]

In den vergangenen 10 Jahren kam es in diesem Zusammenhang zu einer größeren Anzahl von Veröffentlichungen, was die Bedeutung des Themas unterstreicht. Dabei ist grundsätzlich strikt zwischen zwei Herangehensweisen zu unterscheiden:

a) Kalibrierung

Unter Kalibrierung versteht man die Herstellung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen den ausgegebenen Werten eines Messgerätes und dem „wahren“ Referenzwert. Das mathematische Modell kann dabei mehrere Parameter enthalten um z.B. die verschiedenen systematischen Abweichungen des Systems zu beschreiben. Mit Hilfe der Kalibrierfunktion können anschließend die Messwerte rechnerisch korrigiert werden. Eine Kalibrierung hat daher immer eine Qualitäts- bzw. Genauigkeitssteigerung zum Ziel.

¹⁴ Verein Deutscher Ingenieure/Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik

b) Prüfung

Im Rahmen einer Prüfung wird dagegen anhand von vereinbarten Kenngrößen festgestellt, inwieweit das Prüfobjekt (hier ein Laserscanner) speziellen Anforderungen genügt. Mit dem Prüfen ist immer eine Entscheidung verknüpft (= Forderung erfüllt oder nicht erfüllt) und liefert somit eine Aussage über die Verwendbarkeit des Messsystems.

Da im Zuge dieser Diplomarbeit die Überprüfung und Untersuchung des Surphaser 100HSX im Vordergrund steht, wird in weiterer Folge nicht genauer auf das Thema „Kalibrierung“ eingegangen und an dieser Stelle auf entsprechende Arbeiten wie [Lichti, 2007] oder [Reshetyuk, 2006] verwiesen.

Noch gibt es keine verbindlichen Prüf-Richtlinien, jedoch entwickelte [Heister, 2006] einen Vorschlag, angelehnt an [VDI/VDE 2634, 2002], zur Prüfung von flächenhaftantastenden optischen 3D-Messsystemen, welcher von [Kern, 2010] konkretisiert und erweitert wurde.

[Kern, 2010] verwendet dabei insgesamt vier Kenngrößen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit von terrestrischen Laserscannern:

1) Kenngröße Antastabweichung

Die Antastabweichung R ist ein Maß für das lokale Abweichungsverhalten des Laserscanners. Sie beschreibt somit das üblicherweise zu erwartende Rauschen an einer Objektoberfläche.

Zur Bestimmung der Kenngröße werden stichprobenartig an mindestens zwölf beliebigen Positionen innerhalb des Messvolumens L_0 (Abb. 10) kalibrierte Prüfkugeln gemessen.

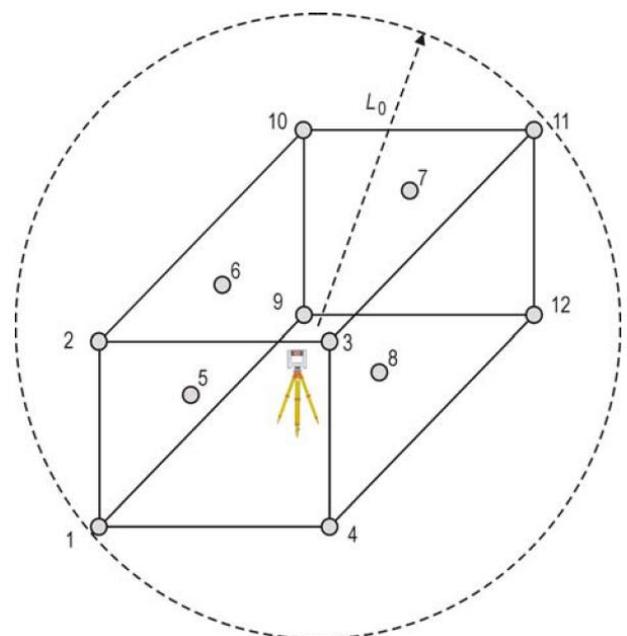


Abbildung 10: Messaufbau Antastabweichung [Kern, 2010]

Für jede Position wird aus den Messungen eine Kugel mit freiem Radius berechnet. Die Antastabweichung R ist dann die Standardabweichung der orthogonalen Abstände r_i der Messpunkte von der approximierten Oberfläche des Prüfkörpers:

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (6)$$

2) Kenngroße Kugelradienabweichung

Die Kugelradienabweichung R_K ergibt sich als mittlere Abweichung aller Einzelabweichungen v_i der gemessenen und geschätzten k Kugelradien von ihren laut Kalibrierschein gegebenen Sollwerten.

$$R_K = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_i \quad \text{mit} \quad v_i = \text{Soll}_{\text{Radius},i} - \text{Ist}_{\text{Radius},i} \quad (7)$$

Die Kenngroße ist ein Maß für die systematische Formabweichung im Lokalen und kann ohne Mehraufwand aus den Beobachtungen zur Bestimmungen der Antastabweichung berechnet werden.

3) Kenngroße Abstandsabweichung

Zur Bestimmung der Abstandsabweichung ΔL werden spezielle Prüfkörper in Form von Kugelstäben eingesetzt. Dabei handelt es sich um zwei (oder mehrere) Antastkugeln, die durch einen geradlinigen Stab verbunden sind (\rightarrow hantelförmiger Prüfkörper). Die kalibrierte Distanz zwischen den Mittelpunkten der Kugeln ist bekannt. Die eingesetzten Kugelstäbe werden in mindestens sieben unterschiedlichen

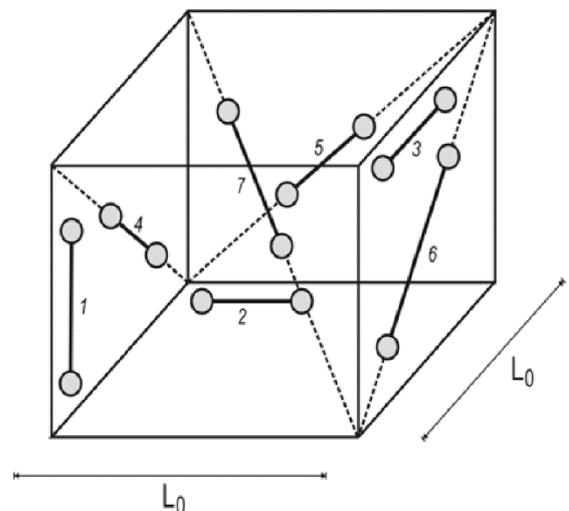


Abbildung 11: Messaufbau Abstandsabweichung [Kern, 2010]

Aufstellungen im Messvolumen positioniert und vermessen. (siehe Abb. 11)

Die Abstandsabweichung ΔL berechnet sich anschließend als Mittelwert der absoluten Differenzen zwischen gemessener (l_{ist}) und kalibrierter Länge (l_{soll}):

$$\Delta L = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p |\Delta L_i| \quad \text{mit} \quad \Delta L_i = l_{soll,i} - l_{ist,i} \quad (8)$$

Die Kenngröße Abstandsabweichung ΔL beschreibt somit die Maßtreue des Laserscanners im Messvolumen.

4) Kenngröße Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen lässt sich mittels eines Böhler-Sterns bestimmen [Böhler et al., 2003]. Ein Böhler-Stern besteht aus zwei parallel im Abstand b angeordneten ebenen Flächen. Die Vorderfront weist dabei regelmäßige Öffnungen in der Form von Kreissektoren mit dem Zentriwinkel γ auf. (Abb. 12)

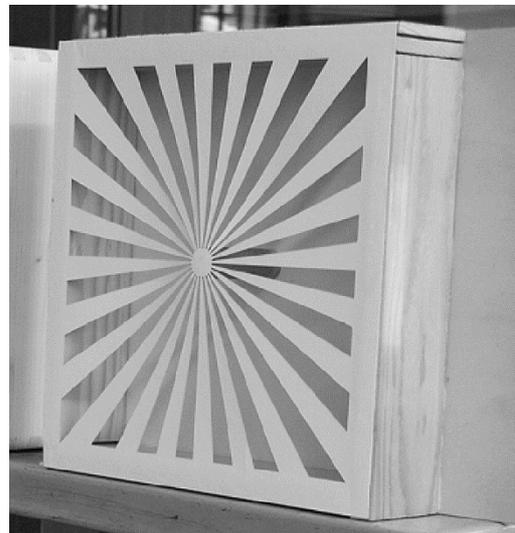


Abbildung 12: Böhler-Stern mit $\gamma = 7,5^\circ$ und $b = 62\text{mm}$ [Kern und Huxhagen, 2008]

Das Auflösungsvermögen AV ist definiert als diejenige minimale Spaltenbreite am Böhler-Stern, bei dem die Punktwolkenmenge (im Abstand r_i vom Zentrum) in die zur Vorderfront und in die zur Rückseite gehörigen Teilmengen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α getrennt werden kann. Für die genaue mathematische Definition und die Durchführung wird auf den tatsächlichen Richtlinien-Entwurf [Kern, 2010] verwiesen.

Die Kenngrößen nach [Kern, 2010] stellen eine gute Möglichkeit zur regelmäßigen Überprüfung der generellen Funktionstüchtigkeit und den Genauigkeitshaushalt des verwendeten Messsystems dar. Da diese Diplomarbeit jedoch auf die Beantwortung von konkreten Fragestellungen des täglichen Messeinsatzes in der

Praxis abzielt, erfolgt die Überprüfung des Surphaser 100HSX nicht nach dem vorgestellten Richtlinien-Entwurf. Stattdessen wird eine praxisorientiertere Herangehensweise gewählt, wozu eigene, an [Eysn, 2009] angelehnte, Experimente entwickelt werden.

4.1.2 Verwendete Instrumente

Für die Ermittlung der für einige Experimente notwendigen Sollwerte kommen zwei unterschiedliche Instrumente zur Anwendung, die in weiterer Folge kurz vorgestellt werden.

Lasertracker – Leica AT401

Wie man bereits in Abbildung 13 erkennt, sind Lasertrackersysteme in Aufbau und Funktionsweise handelsüblichen Tachymetern relativ ähnlich. Auch Lasertracker sind polare Messsysteme, welche die Distanz, Horizontal- sowie Vertikalwinkel messen. Im Unterschied zu Tachymetern erstreckt sich der Messbereich jedoch lediglich auf wenige Hundert Meter. So wird für den Leica AT401 beispielsweise ein typisches Arbeitsvolumen von 320 Metern angegeben.

Aufgrund des verminderten Messbereichs können Lasertracker mit hochgenauen Distanzmesssensoren ausgestattet werden, während die Genauigkeit der Winkelgeber eine untergeordnete Rolle spielt und in der Regel um den Faktor 2 bis 3 schlechter als bei Präzisionstachymetern ist. Die Entfernungsmessung erfolgt dabei interferometrisch oder wie im Falle des AT401 mit Hilfe eines Absolutdistanzmeters. Als Reflektoren werden im Allgemeinen Kugelprismen (siehe Abb. 14/links) zur punktuellen Abtastung des Messobjektes verwendet. Dabei handelt es sich im Prinzip um eine hochgenau gefertigte Metall-Kugel mit einem Prisma im Kugelzentrum, welches den einfallenden Laserstrahl in sich reflektiert. Wie es der Name bereits vermuten lässt, verfolgt der Lasertracker den Reflektor automatisch und kann somit im Einmannbetrieb verwendet werden.



Abbildung 13: Leica AT 401, mit Sensoreinheit (1) und Controller (2)

Zur Herstellung von Festpunkten kann der Reflektor in magnetische Prismenhalter (siehe Abb. 14/rechts) eingesetzt werden, welche man am bzw. um das Messobjekt positioniert.



Abbildung 14: Leica BRR¹⁵-Kugelprisma (links), magnetischer Prismenhalter (rechts)

Der AT401 besitzt standardmäßig 3 unterschiedliche Messmodi: Fast-, Standard- bzw. Precise-Mode. Der Unterschied zwischen den einzelnen Modi besteht in der Messdauer einer Einzelpunktmessung. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Lasertrackermessungen immer mit einem Leica 15 Zoll BRR-Kugelprisma, im höchsten Genauigkeitsmodus (Precise-Mode) und in zwei Lagen durchgeführt. Der AT401 erreicht in dieser Konfiguration laut Hersteller eine 3D-Punktgenauigkeit von $\pm 15\mu\text{m} + 6\mu\text{m}/\text{m}$. Die Genauigkeitswerte sind dabei als Maximum Permissible Error (MPE) zu verstehen, typische Messergebnisse entsprechen in etwa der Hälfte des MPE.

Der Leica AT401 kommt in den Experimenten 1, 2, 3, 4 und 6 zum Einsatz. Lediglich in Experiment 5 erfolgt die Messung der Sollgeometrie mit Hilfe des CimCore Infinite 2.0 Messarms.

Messarm – CimCore Infinite 2.0

Messarme zählen zu den portablen Koordinatenmessmaschinen. Sie verdanken ihren Namen ihrem armähnlichen Aufbau. Messarme bestehen in der Regel aus zwei längeren Armteilen und einem schwenkbaren Sensorkopf an dessen Ende sich ein sogenannter Messtaster befindet. Die verschiedenen Messarmteile sind jeweils mit Hilfe von mehreren Gelenken bzw. Achsen miteinander verbunden, wodurch der Messtaster an jeden beliebigen Punkt im Messvolumen gedreht werden kann. Die Berechnung der Koordinaten der Messspitze erfolgt polar mit Hilfe der

¹⁵ **B**reak **R**esistent **R**eflector

registrierten Stellwinkel der verschiedenen Gelenke bzw. Achsen und den kalibrierten Längen der verschiedenen Messarmteile.

Die Punktbestimmung erfolgt somit ähnlich einem fliegenden Polygonzug, weshalb Messarme, aufgrund der schlechteren Fehlerfortpflanzungseigenschaften, im Allgemeinen etwas ungenauer als stationäre Koordinatenmessmaschinen sind.

Der verwendete CimCore Infinite 2.0 (siehe Abb. 15) verfügt über insgesamt 6 Freiheitsgrade und deckt ein Messvolumen von 2,8 Meter ab. Die 3D-Punktgenauigkeit der verwendeten Instrumentenkonfiguration wird vom Hersteller mit 29 μ m angegeben.



Abbildung 15: Messarm CimCore Infinite 2.0 mit den Armteilen (1) und (2) sowie Sensorkopf mit Messtaster (3)

Beide verwendeten Messgeräte weisen somit eine um mindestens den Faktor 10 höhere Genauigkeit als der Surphaser 100HSX auf. Die Messwerte des Leica AT401 bzw. CimCore Infinite 2.0 können daher als Soll- bzw. Referenzwerte herangezogen und in weiterer Folge als fehlerfrei angesehen werden.

Für weiterführende Spezifikationen der verwendeten Instrumente sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Datenblätter sowie die Internetseiten der Hersteller verwiesen.

4.1.3 Verwendete Software

Neben der Scan-Software SurphExpress (siehe Kapitel 3) werden im Rahmen dieser Diplomarbeit noch weitere Programme zur Auswertung der Messergebnisse verwendet.

Spatial Analyzer (Version: 2016.09.01)

Spatial Analyzer (SA) ist eine kommerzielle Messsoftware (der Firma „New River Kinematics“), welche Schnittstellen für viele verschiedene Messsysteme und Instrumente bietet. Die Software ist prinzipiell für den Einsatz in der Industrievermessung und somit für Koordinatenmessmaschinen wie Lasertracker und Messarme konzipiert und optimiert.

Alle in den Experimenten verwendeten Sollmessungen wurden in SA aufgenommen und ausgewertet. Das Programm bietet dabei eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Berechnung geometrischer Primitive aus den gemessenen Objektpunkten. In Abbildung 16 ist die Berechnung einer Best-Fit Ebene für Experiment 5 dargestellt.

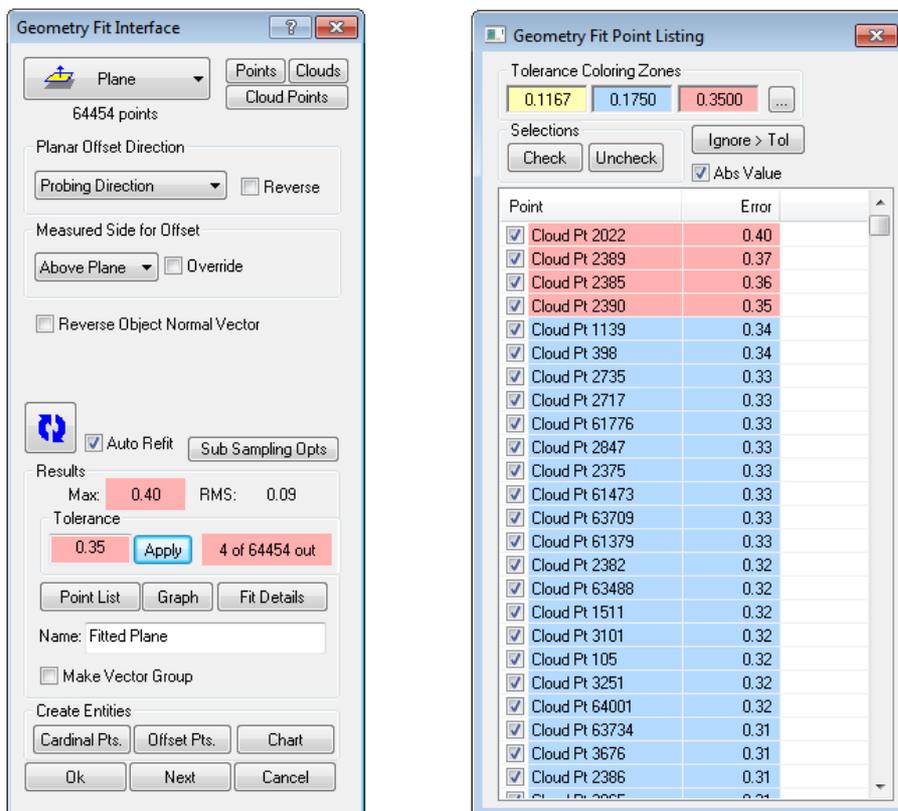


Abbildung 16: Dialogfenster mit Kennzahlen (links) und Punktliste mit Abweichungen (rechts)

Auch sämtliche Ähnlichkeitstransformationen in Experiment 4 wurden in SA berechnet. Die Software bietet hier die Möglichkeit jeden einzelnen der 7 Transformationsparameter in die Berechnung ein- bzw. auszuschließen. Auch einzelne Punkte können für die Lösung des Gleichungssystems bei Bedarf ignoriert werden. SA liefert als Ergebnis die Werte der Lösungsparameter, eine Liste der beteiligten Punkte samt deren Abweichungen, sowie einige grundlegende Kennzahlen über die „Qualität“ der Transformation.

Results (2)

	X	Y	Z	Mag.
Count	10	10	10	10
Max Error	0.23	0.12	0.16	0.25
RMS Error	0.11	0.06	0.07	0.14
StdDev Error	0.11	0.07	0.07	0.15
Max Error (all)	0.23	0.12	0.16	0.25
RMS Error (all)	0.11	0.06	0.07	0.14
	Unknowns	7	Equations	30

Transformation

Translation (mm)	-2298.26	-6005.34	-79.50	6430.59
Fixed XYZ Rotation (deg)	-0.0714	-0.0189	-9.6457	
Euler XYZ Rotation (deg)	-0.0735	-0.0067	-9.6457	
Axis-Angle Rotation (deg)	-0.007546	-0.001336	-0.999971	9.6460
Scale Factor				1.000046

Matrix

	0.985908	0.167563	-0.000117	-2298.262391
	-0.167563	0.985907	0.001283	-6005.342623
	0.000331	-0.001246	1.000045	-79.496141
	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Columns (3)

Na...	Nom X	Nom Y	Nom Z	dX	dY	dZ	dMag
1	-3324.10	-3712.70	254.88	0.08	0.02	-0.06	0.10
2	-2766.54	-1229.21	195.56	0.16	0.04	-0.03	0.17
3	-1424.38	2642.53	-160.96	-0.08	0.06	-0.04	0.10
4	1071.97	2078.69	-378.77	-0.23	0.08	0.03	0.25
5	4800.28	776.77	19.65	0.03	-0.02	-0.04	0.05
6	4408.93	-3051.38	-98.60	-0.01	-0.02	-0.05	0.05
7	3274.46	-6029.84	-83.24	-0.02	-0.01	0.06	0.07
8	-1478.20	-1053.05	-1067.95	0.12	0.07	0.16	0.22
9	3286.79	-2022.03	-981.92	0.02	-0.10	0.04	0.11
10	-139.35	-5713.91	-761.98	-0.07	-0.12	-0.07	0.15

Abbildung 17: Ähnlichkeitstransformation mit den gewählten Parametern (1), Ergebnisse und Kennzahlen (2) sowie eine Punktliste mit den jeweiligen Abweichungen (3)

CloudCompare (Version: 2.5.3)

CloudCompare ist eine Open-Source Visualisierungs- und Analyse-Software für 3D-Punktwolken, wie sie beim Laserscanning auftreten. Die Software wurde ursprünglich entwickelt um zwei Punktwolken einfach und schnell miteinander vergleichen und die Unterschiede visualisieren zu können. CloudCompare wurde

stetig weiterentwickelt und verfügt mittlerweile auch über fortgeschrittene Methoden und Algorithmen z.B. zur Registrierung oder statistischen Analyse der 3D-Punktwolken.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Software jedoch lediglich zur manuellen Datenselektion (siehe Kapitel 4.6.3) sowie zu Visualisierungszwecken verwendet.

Matlab (Version: R2011a)

Matlab ist eine kommerzielle Software der Firma MathWorks für Vektor- und Matrizenalgebra, in der verschiedenste mathematische Problemstellungen programmiert und gelöst werden können.

Die Software kam vor allem bei der Auswertung der Experimente zum Einsatz, wobei eigene Programme und Algorithmen erstellt wurden um einige Ergebnisse und Daten genauer zu analysieren und aufzubereiten.

4.2 Experiment 1: Test der relativen Distanz- Messgenauigkeit auf ein Surphaser Target

4.2.1 Motivation und Zielsetzung

Wie bei vielen Aufgabenstellungen mit anderen Messgeräten tritt auch bei Laserscanner Projekten häufig der Fall auf, dass das zu vermessende Objekt nicht von einem einzigen Standpunkt aus erfasst werden kann. Um das Messobjekt in seiner Gesamtheit abbilden zu können, sind deshalb im Normalfall mehrere Standpunkte notwendig. Da der Scanner mit einem lokalen, Instrument gebundenen Koordinatensystem arbeitet, ist die relative Orientierung der einzelnen Scans zueinander unbekannt. Um die verschiedenen Standpunkte in ein einheitliches Koordinatensystem transformieren zu können, sind somit weitere Informationen notwendig, welche z.B. aus einem lokalen Festpunktfeld (siehe Kapitel 4.5) ermittelt werden müssen.

Diese Festpunkte können z.B. durch spezielle Laserscanner Targets realisiert werden. Basis Software Inc. stellt hierzu eigene hochpräzise Flachtargets zur Verfügung. (siehe Abb. 18)



Abbildung 18: Surphaser Flachtarget Front

Die Targets können über eine Halbkugel¹⁶ auf der Rückseite (siehe Abb. 19) in entsprechende magnetische Kugelnester eingesetzt werden. Die Front besteht, wie für Scanner-Targets üblich, aus einem monochromen Muster, dessen Zentrum mit dem Mittelpunkt der Halbkugel übereinstimmt. Der Kugeldurchmesser beträgt 1,5 Zoll und stimmt somit mit jenem der verwendeten Lasertracker Reflektoren (siehe Kapitel 4.1.2) überein.



Abbildung 19: Surphaser Flachtarget, Halbkugel auf der Rückseite

Da es in der Industrievermessung auch regelmäßig zu langgezogenen, Tunnelartigen Scans (z.B. in Wasserkraftwerken: Scan von Teilungsrohren mit einem Durchmesser von 5m) kommt, ist es für die Praxis wichtig zu wissen, ob bzw. welchen Einfluss die Distanz und der Auftreffwinkel des Lasers auf das Target auf die Genauigkeit haben.

Konkret soll also die Frage beantwortet werden bis zu welcher Distanz und Neigung noch auf die ermittelten Koordinaten der Targets vertraut werden kann.

¹⁶ Da die Vorderseite des Targets eine Stärke von einigen Millimetern aufweist, ist es natürlich keine exakte Halbkugel, sondern lediglich ein etwas kleinerer Abschnitt davon.

4.2.2 Versuchsaufbau

Version 1

Zum Test der relativen Genauigkeit des Surphasers wird ein Standardtarget in verschiedenen Distanzen positioniert und jede Aufstellung sowohl mit dem Lasertracker (Sollmessung) als auch mit dem Laserscanner vermessen (siehe Abb. 20). Des Weiteren wird das Target an jeder Position um vorgegebene Winkel gegenüber der Aufnahme­richtung verkippt.

Um außerdem den Fehlereinfluss der Winkelgeber auf das Ergebnis möglichst gering zu halten, soll der Winkelbereich im Scanvolumen konstant bleiben. Deshalb werden die Positionen grob (auf wenige cm genau) entlang einer Geraden gewählt. Realisiert werden die verschiedenen Positionen durch Aufkleben der Kugelnester auf den Messpfeilern bzw. Stativen zwischen den Pfeilern. Die 6 verschiedenen Distanzen zu den einzelnen Positionen betragen ca. 2.5m, 5.0m, 7.5m, 10m, 15m und 20m und die Verkippungen 85° ¹⁷, 65° , 45° und 25° . Insgesamt liegen somit 24 Messungen des Targets vor.

Sowohl der Laserscanner als auch der Lasertracker befinden sich in der Messkonfiguration auf einem eigenen Messpfeiler und werden während des Experiments nicht bewegt.

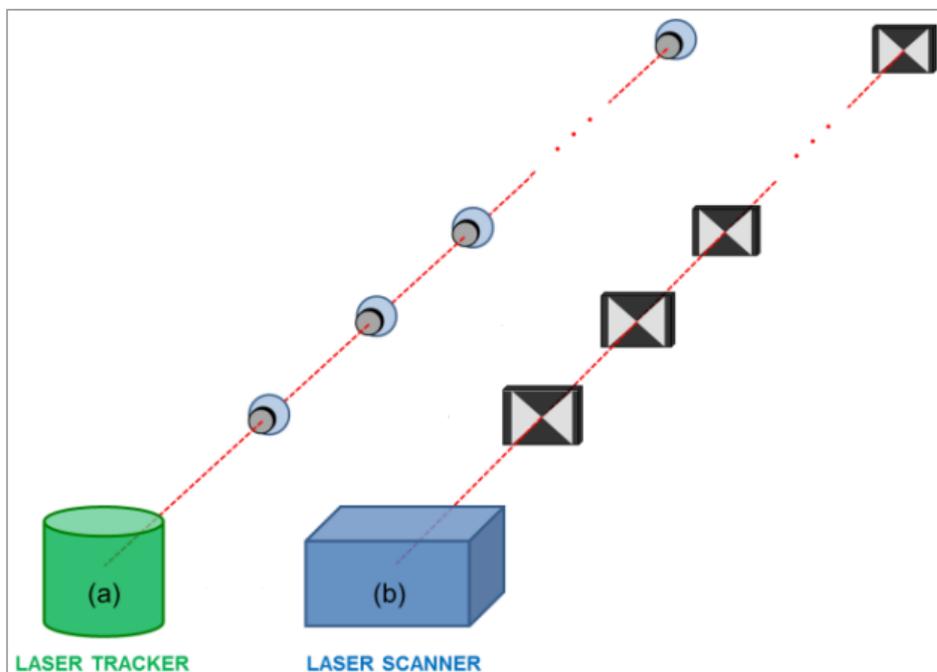


Abbildung 20: Versuchsaufbau Version 1 [Basis Software Inc., 2013]

¹⁷ 85° werden gewählt, da bei orthogonaler Stellung häufig Überstrahlungseffekte durch zu hohe Intensitäten auftreten, wodurch das Target-Zentrum nicht bestimmt werden kann

Version 2

Nachdem sich bei einem späteren Experiment die Wiederholgenauigkeit (siehe Kapitel 4.3) des Laserscanners als ungenügend herausgestellt hatte, musste der Test in leicht abgeänderter Form ein zweites Mal ausgeführt werden. Um die Unabhängigkeit von der Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten werden alle 6 Aufstellungen (2,5 bis 20 Meter) gleichzeitig für eine einzelne Verkippung in einem Scan erfasst. Das Messergebnis sind somit 4 Scans (85° , 65° , 45° und 25°) mit jeweils 6 sichtbaren Targets in 2.5m, 5.0m, 7.5m, 10m, 15m und 20m Entfernung.

Dieser neue Versuchsaufbau hat jedoch zwei Nachteile. Einerseits ist von der Unvollkommenheit der 6 verschiedenen Targets auszugehen. Bei einem einzelnen Target hätten sich etwaige systematische Fehler (z.B. Offset zwischen Target Zentrum und Mittelpunkt der Halbkugel) bei anschließender Differenzbildung größtenteils aufgehoben. Bei Verwendung von 6 unterschiedlichen Targets ist dies nicht der Fall.

Des Weiteren müssen bei diesem Versuchsaufbau alle 6 Targets gleichzeitig sichtbar sein, weshalb es nicht möglich ist den abgedeckten Winkelbereich im Scanvolumen konstant zu halten.

Um diesen beiden Nachteilen teilweise entgegenzuwirken wurde noch eine dritte Version konzipiert und gemessen.

Version 3

Bei diesem Aufbau werden insgesamt 4 Targets jeweils in 85° , 65° , 45° und 25° geneigter Stellung auf einem beweglichen Prüfobjekt positioniert. (siehe Abb. 21) Anschließend wird das Objekt entlang einer Geraden in den 6 verschiedenen Distanzen zum Laserscanner platziert und ausgerichtet. Somit können der Winkelbereich im Scanvolumen konstant gehalten und die Anzahl der verwendeten Targets auf 4 reduziert werden.

Das Messergebnis sind somit insgesamt 6 Scans mit jeweils 4 Targets.



Abbildung 21: Messobjekt – Versuchsaufbau Version 3

Um der bereits angemerkten ungenügenden Wiederholgenauigkeit zwischen den einzelnen Scans Rechnung zu tragen, werden 2 weitere Targets (in weiterer Folge Festpunkte genannt) fix im Messvolumen positioniert und für jede Aufstellung jeweils mitgescannt. Aus diesen beiden Festpunkten kann im Anschluss die Verdrehung der Punktwolken berechnet und korrigiert werden.

Da sowohl Version 2 als auch 3 sehr ähnliche Ergebnisse liefern, wird in weiterer Folge nur die Messung und Auswertung des dritten Versuchsaufbaus behandelt.

4.2.3 Messung und Auswertung

Messung

Sowohl Laserscanner als auch Lasertracker sind während der gesamten Messdauer stabil auf zwei Messpfeilern montiert.

Der erste Arbeitsschritt besteht in der Messung der 4 Targets mittels Tracker um deren relative Lage zueinander festzustellen. Diese Sollmessung erfolgt in einem Abstand von ca. 3 Metern im sogenannten „Precise-Mode“ in zwei Lagen und wird zweifach durchgeführt. Diese Sollgeometrie dient als Referenz zur Kontrolle aller nachfolgenden Trackermessungen in größerer Entfernung.

Der Messablauf des tatsächlichen Experiments läuft für jede der 6 Aufstellungen nachfolgendem Schema ab:

- 1) Das Prüfobjekt wird mit Hilfe des Trackers so entlang einer vordefinierte Gerade eingerichtet, dass die 4 aufgeklebten Targets die jeweils korrekte Neigung gegenüber der Sichtachse Scanner - Messobjekt aufweisen.
- 2) Messung der 4 Targets mittels Lasertracker
- 3) Scan der 4 Targets sowie der 2 Festpunkte in höchster Auflösung (89 LPD x 89 PPD)
- 4) Vergleich der Lasertrackermessung mit der Sollgeometrie

Auswertung

Die Koordinaten der Target-Zentren werden mit der systemeigenen Software SurphExpress ermittelt, als ASCII-Datei extrahiert und in Matlab importiert. Der nächste Schritt besteht in der Berechnung der Drift-Werte zwischen den einzelnen Scans. Über das Skalarprodukt lässt sich der eingeschlossene Winkel φ zwischen zwei Vektoren \vec{a} und \vec{b} einfach berechnen:

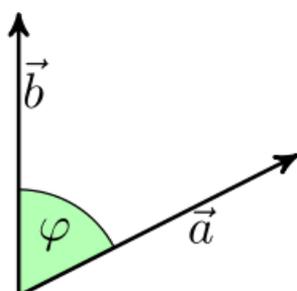

$$\cos \varphi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \quad (9)$$

Abbildung 22: Vektoren mit eingeschlossenem Winkel

Als Referenz dient Messobjekt-Position P01¹⁸ (→ 2,5m Entfernung zum Scanner), alle weiteren Aufstellungen und deren Drift werden auf diesen bezogen.

Der Drift wird für beide Festpunkte berechnet und der Mittelwert gebildet, anschließend werden die Punktwolken um den jeweiligen Winkel in das Referenzsystem P01 gedreht¹⁹.

Da sich nun alle Koordinaten im gleichen System befinden, kann mit der eigentlichen Berechnung der Distanzen zwischen den Markern der gleichen Neigung begonnen werden. Dazu werden die Distanzen aller möglichen Kombinationen pro Neigungswinkel berechnet. Da es 6 Aufstellungen sind, ergeben sich somit für jede Verkippung insgesamt $\frac{6!}{(6-2)! \cdot 2!} = 15$ mögliche Distanzen.

Die Berechnung erfolgt sowohl für die Trackermessungen (= Soll) als auch für die extrahierten Koordinaten der Scans (= Ist).

Anschließend wird ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt, der die 15 Abweichungen in Form von vier unteren 6x6 Dreiecksmatrizen liefert. Zur besseren Übersichtlichkeit sollen hier exemplarisch nur die Abweichungen für Standpunkt P01 (2,5m) dargestellt werden.

P01 zu	85°	65°	45°	25°	Std. Abw.
P02 (5m)	0,06	0,07	-0,02	0,05	0,05
P03 (7,5m)	0,05	0,03	0,00	0,02	0,03
P04 (10m)	0,19	0,16	0,15	0,12	0,16
P05 (15m)	0,30	0,33	0,27	0,43	0,34
P06 (20m)	0,37	0,40	1,08	0,58	0,67

Tabelle 3: Abweichungen bezogen auf Standpunkt P01 (2,5m) in [mm]

¹⁸ Die einzelnen Positionen werden mit P01 (2,5m) bis P06 (20m) abgekürzt

¹⁹ Anm.: bei der Mittelbildung wurde darauf geachtet, dass es zwischen beiden Werten keine signifikanten Abweichungen gab

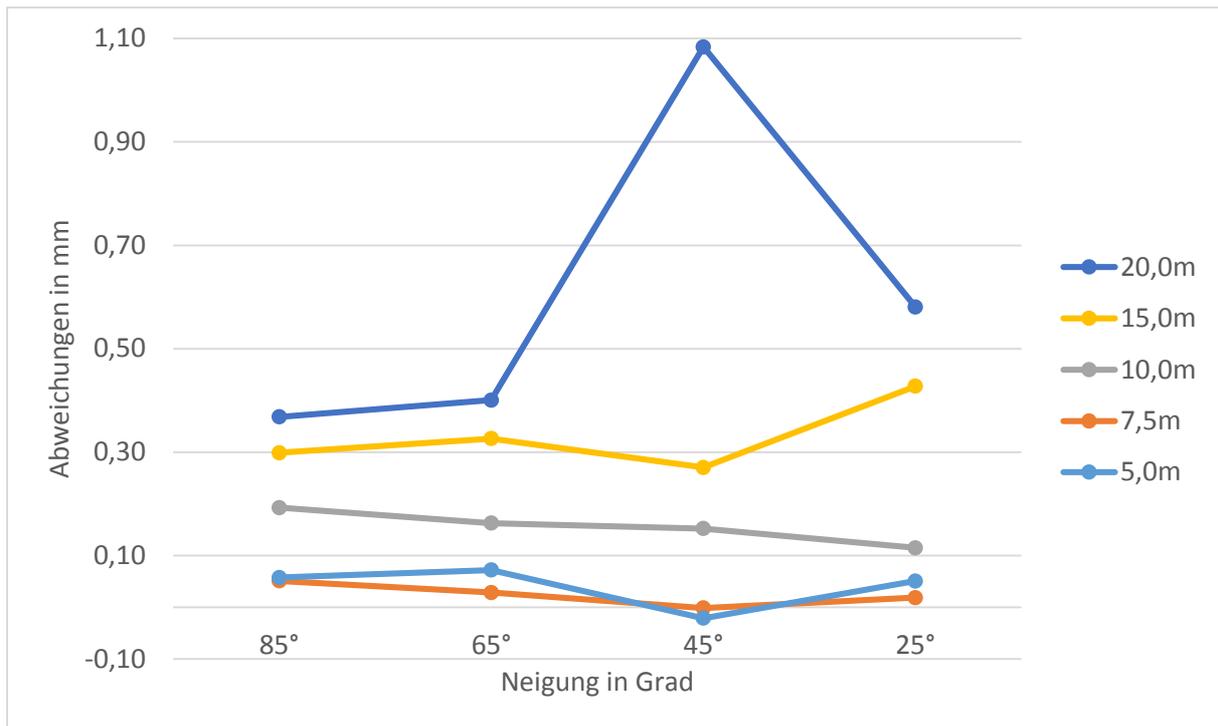


Abbildung 23: Abweichungen in [mm] bei unterschiedlicher Neigung in [°]

Wie aus Tabelle 3 bzw. Abb. 23 leicht zu erkennen ist, spielt die Neigung keine bzw. eine untergeordnete Rolle. Vor allem bis zu einer Distanz von 10 Metern zeigt sich kein Genauigkeitsverlust auf Grund der Verkippung. Danach ist ein leicht aufsteigender Trend erkennbar, was sehr wahrscheinlich auf die bereits extrem geringe Punktdichte zurückzuführen ist. So werden in 20m Entfernung und 25° Neigung selbst bei höchster Scanauflösung nur noch 165 Punkte auf dem Target gemessen, bei 2,5m Entfernung sind es hingegen fast 10.000. (siehe Abb. 24b)

Man erkennt außerdem, dass lediglich eine einzige Abweichung (in Tabelle 3 orange hinterlegt) kleiner Null ist. Von allen 60 Differenzen sind insgesamt ebenfalls nur 5 im negativen Bereich. Der Surphaser 100HSX misst die Distanzen daher durchschnittlich eher zu kurz. Ein Verhalten, das sich auch in späteren Experimenten wiederholt.

Auffällig ist weiters der sprunghafte Anstieg der Abweichung bei P06 (20m) mit 45° Neigung (in Tabelle 3 rot hinterlegt), was auf eine Fehlmessung schließen lässt. Um diese Vermutung zu bestätigen, werden die 4 Punkte von P06 mittels Best-Fit in die Tracker-Sollgeometrie transformiert. Auch hier zeigt sich eine eindeutige Abweichung von 0,85mm für die 45°-Messung, weshalb von einer Fehlmessung auszugehen ist.

Auch die Wiederholung der Berechnung des Target-Zentrums aus den Scans liefert keine Verbesserung. Der Grund für die Fehlmessung kann leider nicht ermittelt werden, da die eigentlichen Scanpunkte keinerlei Auffälligkeiten zeigen.

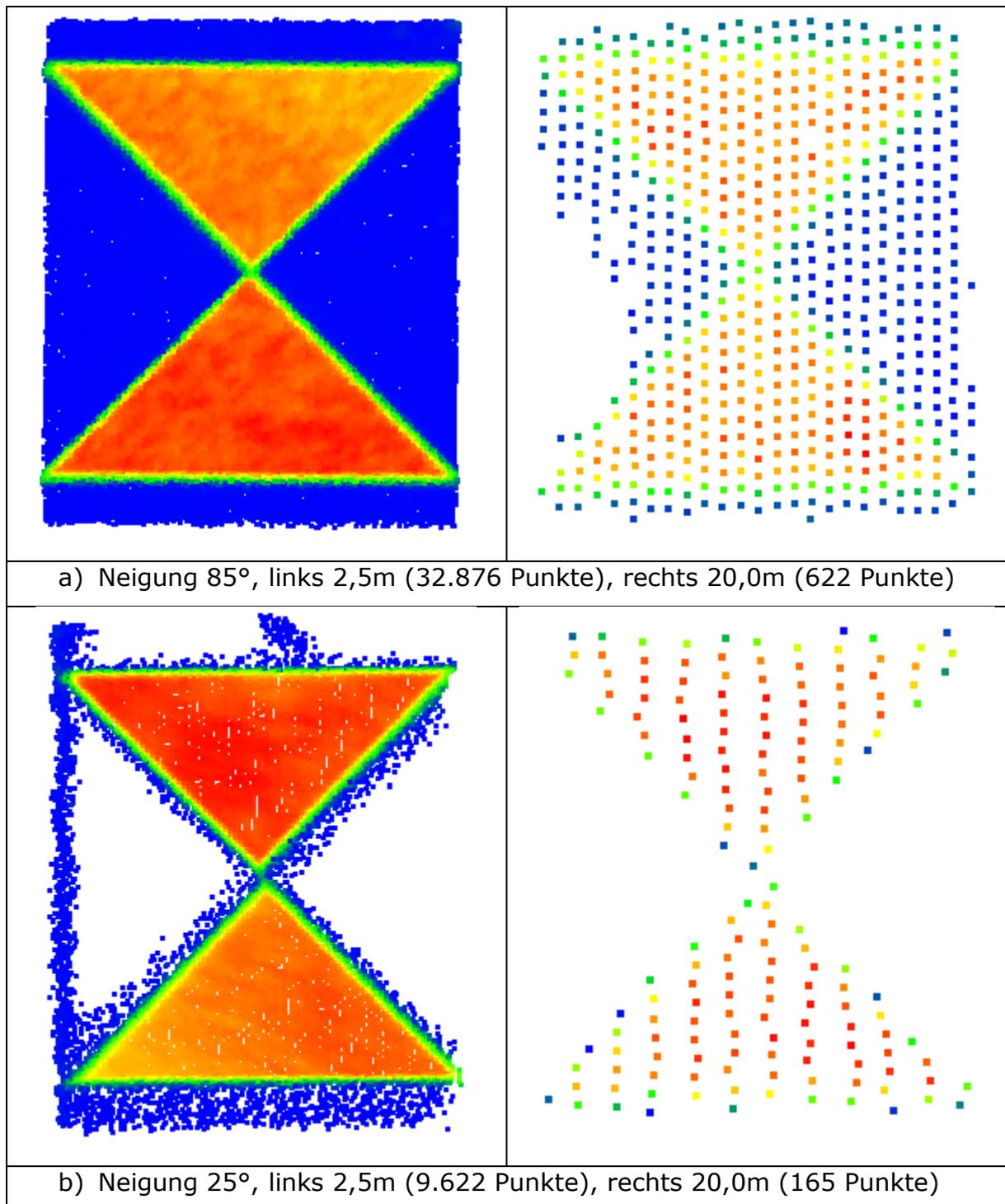


Abbildung 24: Punktdichte bei a) 85° Neigung und b) 25° Neigung

Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Verkippungen noch etwas genauer zu betrachten, werden zusätzlich die Doppeldifferenzen gebildet.

	85° - 65°	85° - 45°	85° - 25°	65° - 45°	65° - 25°	45° - 25°
Maximum	0,04	0,08	0,08	0,09	0,05	0,11
Minimum	-0,06	-0,05	-0,29	-0,08	-0,23	-0,19
Std.Abw.	0,04	0,04	0,16	0,05	0,12	0,11

Tabelle 4: Doppeldifferenzen

Auch bei diesem Vergleich zeigen sich die geringen Unterschiede zwischen den verschiedenen Neigungen der Targets. Bis zu einer Entfernung von 10 Metern sind sogar alle Doppeldifferenzen kleiner $\pm 0,10\text{mm}$. Da bei den Doppeldifferenzen mit 45° Neigung die Werte der Fehlmessung in 20 Metern Entfernung ignoriert werden, sind die entsprechenden Maxima, Minima und Standardabweichung mit Vorsicht zu betrachten und wahrscheinlich 0,05 bis 0,10mm höher anzunehmen.

Abschließend ist noch anzumerken, dass die relative Distanz-Messgenauigkeit erwartungsgemäß mit zunehmender Entfernung vom Scanner abnimmt. Sie bleibt jedoch bei jeder Aufstellung recht deutlich unter den Genauigkeitsangaben des Herstellers ($< 0,35\text{mm @ 5m}$).

4.2.4 Schlussfolgerung des Experiments

Das Experiment zeigt, dass der Surphaser 100HSX selbst bei Targets mit extremer Neigung gegenüber der Scanrichtung keinen merklichen Genauigkeitsverlust hinnehmen muss. Speziell bis zu einer Entfernung bis 10 Metern muss in der Praxis somit nicht darauf geachtet werden die Targets möglichst frontal zu scannen. Gewisse Einschränkungen gibt es jedoch für den Bereich $>10\text{m}$, wobei es hier weniger zu Problemen mit der eigentlichen Genauigkeit kommt, als mit der bereits sehr niedrigen Punktdichte auf dem Target. Durch die geringe Anzahl kann es vermehrt zu Fehlmessungen kommen bzw. eine Ermittlung des Target-Zentrums unmöglich machen. Bei Messentfernungen von $>10\text{m}$, sollte daher auf eine geringe Neigung der Targets gegenüber der Aufnahmerichtung geachtet werden.

4.3 Experiment 2: Test der Wiederholgenauigkeit zwischen mehreren Scans

4.3.1 Motivation und Zielsetzung

Der Großteil der Aufgabenstellungen in der Industrievermessung ist relativer Natur. Es ist also entscheidend, dass die Punktwolken in sich eine hohe relative Genauigkeit aufweisen und die Distanzen innerhalb der Scans korrekt abgebildet werden, während ihre absoluten Positionen im Raum eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Nichtsdestotrotz gibt es immer wieder Projekte bei denen es von entscheidender Bedeutung ist, dass der Scanner auch nach mehrmaligen Scans die Punktwolken mit hoher Präzision an der gleichen Stelle im Raum positioniert. Als konkretes Beispiel soll hier das Einbringen von Beton in Tübbings²⁰ genannt werden bei dem mittels Scanner ein quasi Echtzeit-Deformationsmonitoring realisiert werden musste. Um die Scans vor bzw. nach dem Auffüllen des Betons vergleichen zu können, ist es notwendig, dass die Punktwolken vom Scanner auch tatsächlich korrekt im Raum positioniert werden.

Ein weiteres Beispiel ist die getrennte Aufnahme der Targets eines Festpunktfeldes (in hoher Auflösung) und des eigentlichen Scans (in niedriger Auflösung) um die Scandauer zu reduzieren. Auch hier ist es von entscheidender Bedeutung, dass der Scanner die Punktwolken von Scan zu Scan nicht falsch positioniert.

Dieses Experiment soll klären wie präzise der Surphaser 100HSX bei mehrmaliger Wiederholung einer Messung unter gleichen Gegebenheiten eine vorgegebene Messkonfiguration abbildet und absolut im Raum positioniert.

4.3.2 Versuchsaufbau

Um die Wiederholgenauigkeit zu überprüfen, werden sowohl der Scanner als auch mehrere Targets fix auf Messpfeilern positioniert und während des gesamten Experiments nicht mehr bewegt.

Target #1 befindet sich in einem Abstand von ca. 2,8m, Target #2 in ca. 5,8m Entfernung zum Surphaser 100HSX.

²⁰ Tübbing = vorgefertigtes Betonbauteil der Außenschale zB. eines Tunnels

Die beiden Ortsvektoren zu den Targets schließen einen Winkel von 60° ein. (siehe Abb. 25) Um zu starke Reflexionen zu vermeiden, werden die Flachtargets mit einer Neigung gegenüber der Scanrichtung von ca. 85° positioniert. Zusätzlich zu den Flachtargets werden auch noch zwei weitere Kugeltargets auf den Pfeilern montiert und ebenfalls mitgescannt.

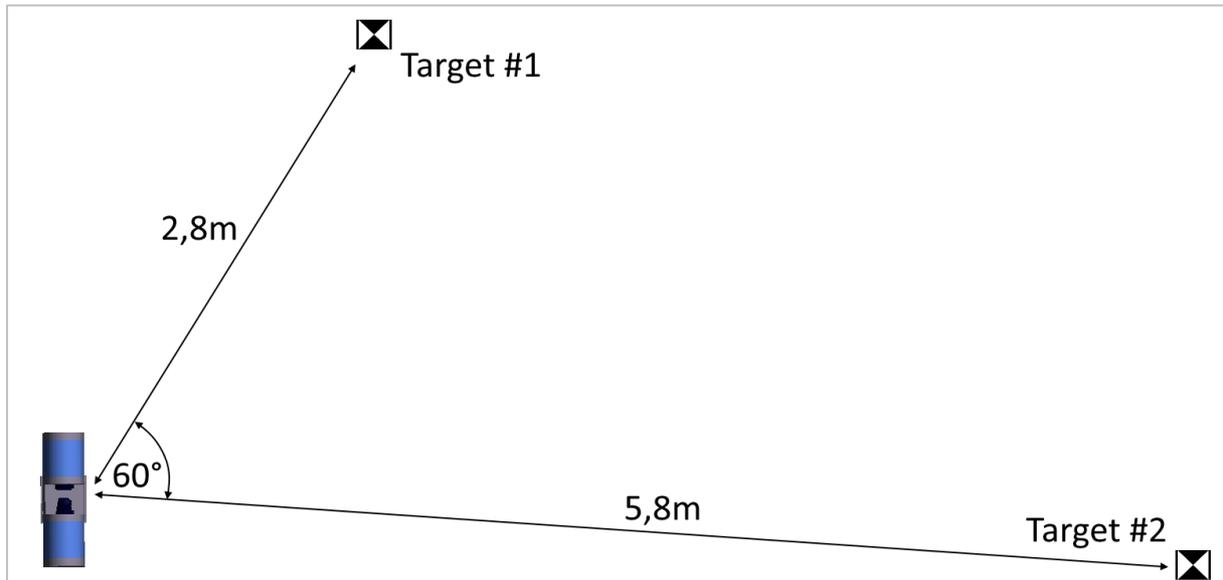


Abbildung 25: Versuchsaufbau, die Kugeltargets sind nahezu an gleicher Position wie die beiden Flachtargets und daher nicht eingezeichnet

4.3.3 Messung und Auswertung

Messung

Mit Hilfe einer Heißklebepistole werden die Kugeltargets und die Magnetnester für die Flachtargets fixiert. Nach einer entsprechenden Abkühlungsdauer für den Heißkleber werden die beiden Position der Flachtargets mit dem Lasertracker vermessen. Die Bestimmung eines Sollwertes mit dem Tracker ist für die dieses Experiment zwar nicht notwendig, wird allerdings trotzdem durchgeführt um einen Vergleich zwischen Wiederholgenauigkeit und relativer Genauigkeit zu ermöglichen.

Nach einer ausreichenden Aufwärmphase des Scanners wird die Messkonfiguration in einem zeitlichen Intervall von jeweils ca. 10 Minuten insgesamt 7 Mal gemessen. Die Aufnahmen erfolgen in höchster Auflösung (89 LPD x 89 PPD), jedoch nicht als 360° -Scan, sondern lediglich für die Bereiche um die Targets.

Die gesamte Messdauer des Experiments betrug 64 Minuten.

Auswertung

Nach der Extraktion der Zentren der Flach- und Kugeltargets mittels SurphExpress, erfolgt die weitere Verarbeitung der Daten mit Matlab, wofür ein eigener Auswertalgorithmus geschrieben wurde.

Um die Wiederholgenauigkeit zu untersuchen werden in nachfolgender Tabelle die Koordinaten der einzelnen Epochen für Target #1 dargestellt sowie die Standardabweichung für jede Koordinate berechnet.

	Epoche							
	1	2	3	4	5	6	7	Std.Abw.
X	-1588,56	-1588,90	-1589,07	-1589,57	-1589,65	-1589,61	-1590,13	0,54
Y	-2319,36	-2319,14	-2319,09	-2318,74	-2318,65	-2318,69	-2318,36	0,35
Z	-379,12	-379,11	-379,14	-379,13	-379,14	-379,13	-379,12	0,01

Tabelle 5: Koordinaten von Target #1 in [mm]

Wie man in Tabelle 5 erkennt, gibt es deutliche Unterschiede in den Werten der Standardabweichung für die einzelnen Koordinatenrichtungen. Die Z-Koordinate entspricht dabei der Höhenkomponente, während die X- und Y-Werte somit die Lagekoordinaten darstellen.

Die Koordinaten in Z-Richtung streuen lediglich im niedrigen Hundertstel Millimeter Bereich, sowohl X- also auch Y-Koordinaten jedoch im Zehntel Millimeter Bereich. Es zeigt sich somit eine deutliche Unregelmäßigkeit in den Lagekoordinaten. Da die Punktwolken der Scans in keiner Weise bearbeitet wurden, liegt das lokale Scanner-Koordinatensystem, in dem die Messungen vorliegen, beliebig im Raum, wodurch der Fehler auf beide Lage-Komponenten aufgespalten wird.

Um diese hohe Streuung genauer zu untersuchen und um die Möglichkeit einer einzelnen Fehlmessung (Ausreißer) auszuschließen, werden in einem ersten Schritt die Abweichungen der Messungen aller Epochen zu einem Referenzwert berechnet. Als Referenz dient Epoche 1.

	Epoche						
	1	2	3	4	5	6	7
X	0,00	-0,34	-0,51	-1,01	-1,09	-1,05	-1,57
Y	0,00	0,22	0,28	0,62	0,72	0,68	1,01
Z	0,00	0,00	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	0,00

Tabelle 6: Abweichungen der Koordinaten zu Referenz Epoche 1 in [mm]

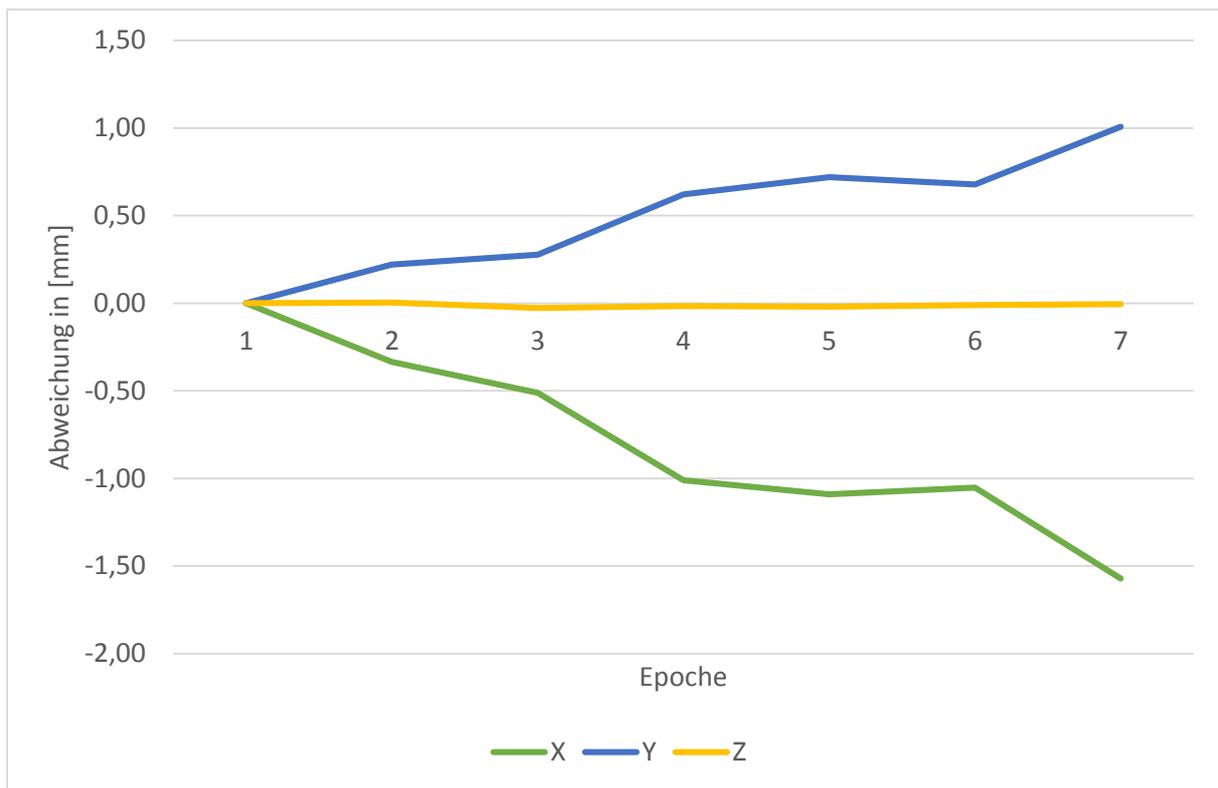


Abbildung 26: Abweichungen zu Referenz Epoche 1 in [mm]

Wie man in Tabelle 6 bzw. Abb. 26 erkennt, liegt keine einzelne Fehlmessung vor, welche die Standardabweichung verfälschen könnte, viel mehr werden die Abweichungen zum Referenzwert in den Lagekoordinaten tendenziell mit jeder Epoche größer. Die Differenzen in X- und Y-Richtung zeigen außerdem einen nahezu identischen Verlauf, wenn auch mit unterschiedlichen Vorzeichen. Es liegt also die Vermutung nahe, dass es in den Lagekoordinaten zu einer Art Driftbewegung kommt.

Prinzipiell ist eine Verschiebung entlang (d.h. in der Distanzmessung) oder quer, bzw. einer Kombination aus beiden, zur Aufnahme-Richtung möglich.

Eine Drift in der Distanzmessung ist relativ unwahrscheinlich und konnte auch in Experiment 1 (Kapitel 4.2) nicht beobachtet werden. Die Targets waren bei der Messung zudem nicht auf gleicher Höhe wie der Scanner, weshalb sich eine

Verschiebung entlang der Scanrichtung auch in den Z-Koordinaten zeigen müsste. Um diese Möglichkeit aber vollständig auszuschließen, werden die kartesischen Koordinaten mit

$$s = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (10)$$

in die gemessene Distanz rückgerechnet.

Berechnet man die Standardabweichung über alle Epochen ergibt sich für die einzelnen Targets:

	Ø Entfernung	Std. Abw.	Extremwerte
Target 1	2836,71	0,03	Maxima: 0,07 Minima: -0,08
Target 2	5856,68	0,02	
Target 3 – Kugel	2943,06	0,03	
Target 4 – Kugel	5972,75	0,04	

Tabelle 7: Kennzahlen der Distanzmessung Scanner – Target in [mm]

Wie vermutet, zeigen sich hier weder in der Standardabweichung noch bei den Extremwerten signifikante Unregelmäßigkeiten in der Distanzmessung, weshalb von einer horizontalen Drift orthogonal zur Scanrichtung auszugehen ist.

Rechnet man nun die Abweichungen aus Tabelle 6 mit Hilfe des Skalarprodukts (siehe Formel (9)) in entsprechende Winkel²¹ um, zeigt sich folgendes Bild für die vier Targets (Werte in Winkelsekunden ["]) angegeben):

	Epoche						
	1	2	3	4	5	6	7
Target 1	-	29,2	42,1	86,2	95,0	91,0	135,6
Target 2	-	29,3	43,1	87,6	96,2	92,2	137,3
Target 3 – Kugel	-	28,7	41,7	86,8	95,4	90,7	136,3
Target 4 – Kugel	-	29,7	43,6	87,7	96,7	92,1	137,4
Mittelwert	-	29,2	42,6	87,1	95,8	91,5	136,7

Tabelle 8: Abweichungen zu Referenz Epoche 1 in Winkelsekunden ["]

²¹ 1 Grad [°] = 60 Winkelminuten ['] = 3600 Winkelsekunden ["]

Wie man in Tabelle 8 sieht, ergibt sich für alle 4 Targets ein sehr ähnliches Bild. Die Zentren der Targets erfahren mit jeder Epoche eine Driftbewegung in die gleiche Richtung. Lediglich Epoche 6 zeigt eine gegenläufige Bewegung. Der durchschnittliche Drehwinkel von Epoche zu Epoche beträgt 24,3", wobei es jedoch zu relativ starken Unregelmäßigkeiten kommt. Da alle Scans mit gleichen Einstellungen, Bedingungen und gleichem Prozedere durchgeführt wurden, ist es nicht ersichtlich warum zwischen den Epochen 4-6 eine derart geringe Bewegung auftritt, während es zwischen anderen Epochen zu Maximalwerten von teilweise über 44" kommt. Auch auf eine ausreichende Aufwärmphase wurde geachtet und ist somit als Fehlereinfluss auszuschließen

Die Winkelmessgenauigkeit des Surphasers wird vom Hersteller mit 15" angegeben, was deutlich unter der aufgetretenen Drehbewegung liegt. Es kann somit ausgeschlossen werden, dass es sich hierbei um zufällige Abweichungen im Rahmen der Messgenauigkeit handelt.

Nachdem bei der Wiederholgenauigkeit eine eindeutige Drift festgestellt wurde, soll nun noch überprüft werden, ob es auch bei der relativen Genauigkeit (also der Distanz zwischen den Targets) zu signifikanten Abweichungen kommt.

In diesem Zusammenhang wird für jede Epoche sowohl die Distanz zwischen den beiden Flach- als auch den beiden Kugeltargets berechnet. Für die Flachtargets liegt außerdem eine Lasertracker-Sollmessung vor, weshalb hier zusätzlich ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden kann (siehe Tabelle 9/a), während die Distanz zwischen den Kugeltargets lediglich mit einer Referenzepoche (Epoche 1) verglichen wird. (siehe Tabelle 9/b)

a) **Referenz: Lasertracker (d = 5071,52mm)**

Epoche	1	2	3	4	5	6	7	Std. Abw.
Flachtarget	0,29	0,27	0,24	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26

b) **Referenz: Epoche 1 (d = 5071,23mm)**

Epoche	1	2	3	4	5	6	7	Std. Abw.
Flachtarget	-	0,02	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
Kugeltarget	-	0,02	-0,03	-0,04	-0,03	0,04	0,00	0,03

Tabelle 9: a) Soll-Ist-Vergleich mit Lasertrackermessung; b) Vergleich zu Referenzepoche 1 in [mm]

Wie man in Tabelle 9/a erkennt, zeigt sich beim Vergleich mit der Lasertrackermessung eine relativ konstante Abweichung im Bereich von 0,26mm. Gerechnet wurde jeweils Referenz- minus Istwert, das bedeutet, der Surphaser bildet die Distanz zwischen den Targets im Vergleich zur Trackermessung jeweils zu kurz ab. Dieses Verhalten deckt sich somit mit den Erkenntnissen aus Experiment 1 (Kapitel 4.2). Auch dort kann ein eindeutiger Trend zur Abbildung verkürzter Distanzen beobachtet werden. Im Gegensatz zu Experiment 1 zeigen sich nun jedoch deutlich größere Abweichungen (für die relativ geringe Messentfernung von unter 6 Metern), was auf den größeren Scanbereich²² und den damit einhergehenden Ungenauigkeiten in der Winkelmessung zurückzuführen ist. Die Abweichungen zu den Sollwerten bleiben aber auch hier durchwegs unter der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit von 0,35mm auf 5 Meter Entfernung.

Vergleicht man die Distanzen der einzelnen Scans (Epochen) untereinander (siehe Tabelle 9/b zeigt der Surphaser 100HSX eine hervorragende relative Genauigkeit. Die Abweichungen bewegen sich alle im niedrigen 1/100 Millimeter-Bereich.

4.3.4 Schlussfolgerung des Experiments

Der Surphaser 100HSX kann beim Test der Wiederholgenauigkeit nicht überzeugen. Bei mehrmaliger Wiederholung der Messung einer vorgegebenen Messkonfiguration unter gleichen Gegebenheiten und Einstellungen zeigt der Scanner bei der absoluten Positionierung der Punktwolke im Raum eine eindeutige Driftbewegung im Uhrzeigersinn²³.

Zwischen den einzelnen Epochen kam es zu einer durchschnittlichen Drehung der Scans von jeweils 24 Winkelsekunden. Am Ende des Experiments zeigte das ermittelte Target-Zentrum bereits eine Abweichung von mehr als 136" gegenüber der Referenzepoche 1. Die Genauigkeit der Winkelgeber des Surphasers wird vom Hersteller mit 15" angegeben. Die ermittelten Abweichungen liegen teilweise deutlich über diesem Wert und können somit nicht durch zufällige Messfehler erklärt werden.

²² In Experiment 1 wurde auf eine möglichst gleichbleibende Scanrichtung geachtet.

²³ Bei Blickrichtung von oben auf den Scanner

Weiters fällt die Unregelmäßigkeit der Driftbewegung auf. Während es zwischen einigen Epochen nur zu geringfügigen Unterschieden kommt, treten bei anderen Differenzen von bis zu 44 Winkelsekunden. Die Messungen erfolgten unter gleichen Bedingungen und Einstellungen in einem zeitlichen Abstand von ca. 10 Minuten. Es ist daher aus diesem Experiment nicht ersichtlich wodurch es zu diesen Unregelmäßigkeiten kam.

Die vorgegebene Geometrie wird zwar in jeder Epoche präzise abgebildet (→ hohe relative Genauigkeit), jedoch nicht korrekt absolut im Raum positioniert.

Auf Grund dieser unzureichenden Wiederholgenauigkeit sowie der Unbeständigkeit der Driftbewegung ist der Surphaser 100HSX nicht dazu geeignet die eingangs in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Aufgabenstellungen zu bewerkstelligen.

4.4 Experiment 3: Test des integrierten Neigungssensors

4.4.1 Motivation und Zielsetzung

Der Surphaser 100HSX kann optional mit einem Neigungssensor ausgestattet werden. Ist dies der Fall werden bei jedem Scan zusätzlich die Parameter der Neigung gegenüber der Lotrichtung ermittelt und registriert. Im Post-Processing ist es sodann möglich mit Hilfe dieser zusätzlichen Neigungsmessungen die Punktwolke zu horizontieren.

Bei der anschließenden Orientierung und Positionierung des Scans sind somit bereits zwei Dreh-Parameter bekannt.

Das Gleichungssystem der Helmert-Transformation vereinfacht sich dadurch auf drei Translationen, einen Maßstab und lediglich eine Rotation um Z-Achse. Da nur noch 5 Unbekannte zu ermitteln sind, wären bereits 2 Festpunkte ausreichend um das Gleichungssystem zu lösen und die Punktwolke korrekt im Raum zu positionieren.

Da zusätzliche Informationen in die Auswertung einfließen, wird das gesamte System auch robuster gegenüber einzelnen Fehlmessungen in den Festpunkten wodurch auch die Ausreißerdetektion erleichtert wird.

Auch bei der Orientierung mittels ICP²⁴ liefert der Neigungssensor wertvolle Informationen für die Ermittlung der notwendigen Näherungswerte der Transformationsparameter.

Wie man sieht kann durch die Verwendung eines Neigungssensors die Flexibilität des Messsystems erhöht und die möglichen Einsatzbereiche vergrößert werden.

Mit diesem Experiment soll geklärt werden, wie genau der Surphaser 100HSX die Punktwolke horizontieren kann und bis zu welcher Verkippung der Neigungssensor noch brauchbare Ergebnisse liefert.

4.4.2 Versuchsaufbau

Um den integrierten Neigungssensor zu testen, wird im Messkeller ein Festpunktfeld mit folgenden Eigenschaften geschaffen:

²⁴ **I**terative **C**losest **P**oint

- 1) alle Punkte liegen in einem Horizont und realisieren somit eine horizontale Bezugsebene
- 2) alle Punkte sind in gleicher Entfernung und in regelmäßigen Abständen um den Scanner positioniert

Um diese Anforderungen zu realisieren, muss sich somit der Scanner-Standpunkt in der Mitte eines horizontal liegenden Kreises befinden, wobei die Festpunkte gleichmäßig entlang dieses Kreises verteilt sind.

Der Messkeller der Uni Innsbruck liefert dazu ideale Voraussetzungen, da die oben beschriebene Geometrie bereits durch 6 Messpfeiler in Form eines Hexagons vorhanden ist. Die Festpunkte sind somit in 60° Abständen um den im Zentrum stehenden Scanner positioniert. Da ein Messpfeiler als Laserscanner-Standpunkt dient, wird die horizontale Bezugsebene lediglich aus insgesamt 5 Festpunkten realisiert. (siehe Abb. 27)



Abbildung 27: Versuchsaufbau – Scanner im Zentrum des Festpunktfeldes

Die Oberkanten der Messpfeiler liegen bereits bis auf wenige Millimeter auf gleicher Höhe. Die horizontale Bezugsebene kann daher einfach mit Hilfe von auf den Pfeilern montierten Standard-Reflektorträgern realisiert werden. Die Dreifüße dieser Träger weisen einen vertikalen Justierbereich von einigen Millimetern auf. Für das Experiment sind die exakten Lagekoordinaten nicht von Bedeutung weshalb die Targets einfach über die Stellschrauben der Dreifüße in die passende Höhe gehoben bzw. gesenkt werden können.

Leider stand zum Zeitpunkt des Experiments kein Nivelliergerät zur Verfügung, weshalb die Horizontierung der Targets mit dem Lasertracker durchgeführt werden musste. Da die Lasertrackermessung jedoch lediglich einen Bezugsebene für die Auswertung liefert, ist die Horizontiergenauigkeit des Leica AT401 durchaus ausreichend um zu testen, ob der integrierte Neigungssensor auch bei schief stehendem Scanner ähnliche Resultate liefert und die Punktwolke horizontiert.

4.4.3 Messung und Auswertung

Messung

Nach einer ausreichenden Aufwärmphase wird der Lasertracker mittels der integrierten elektronischen Libelle horizontiert. Die auf den Messpfeilern montierten Reflektorträger werden mit Magnetnestern ausgestattet und anschließend über die Stellschrauben der Dreifüße mit Hilfe des Leica AT401 auf dieselbe Höhe gebracht.

Anschließend werden alle Positionen der Magnetnester mit dem Lasertracker noch in zwei Messdurchgängen im höchsten Genauigkeitsmodus („Precise-Mode“) und beiden Lagen vermessen.

Der Laserscanner wird im Zentrum der Targets auf einem Stativ positioniert und mittels Dosenlibelle horizontiert. In weiterer Folge werden die 5 in den Magnetnestern eingesetzten Targets mit einer Auflösung von 40 LPD x 40 PPD gescannt. Anschließend wird der Surphaser nach jedem Scan mittels einer der drei Stellschrauben des Dreifußes weiter aus seiner Horizontierung gedreht.

Um die Messung zu beschleunigen, erfolgt kein gesamter 360° Rundumscan. Stattdessen werden lediglich die Ausschnitte mit den Flachtargets gescannt.

Auswertung

In einem ersten Schritt wird im Programm Spatial Analyzer (SA) aus den Lasertrackermessungen eine ausgleichende Ebene erzeugt, welche im Anschluss als Referenz dienen soll. Die Trackermessungen zeigen eine hervorragende Planarität, die maximale Abweichung zu der Best-Fit Ebene beträgt, ebenso wie der RMS²⁵, lediglich 0,01mm. Berechnet man den Winkel der Ebenennormalen gegenüber der Z-Achse des lokalen, horizontalen Trackerkoordinatensystems ergibt sich ein Wert von unter 1 Winkelsekunde. Die Targets konnten somit sehr gut horizontalisiert werden.

Im nächsten Schritt werden wiederum mit Hilfe von SurphExpress die Zentren der Flachtargets aus den Scans sowohl mit als auch ohne Neigungskompensation extrahiert und in Spatial Analyzer importiert. In SA können anschließend ausgleichende Ebenen für jeden einzelnen Scan berechnet werden. Es zeigt sich, dass auch der Surphaser die planare Geometrie der Targets sehr gut abbildet:

	Scan 01	Scan 02	Scan 03	Scan 04	Scan 05	Scan 06	Scan 07
Max	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02
RMS	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01

Tabelle 10: Kennwerte der Ebenen-Fits der Scandaten in [mm]

Die maximalen Abweichungen von den jeweiligen ausgleichenden Ebenen liegen durchgehend im niedrigen 1/100-Millimeter Bereich. Es treten keinerlei Ausreißer oder Fehlmessungen auf, der Surphaser bildet die vorgegebene Geometrie durchwegs hervorragend ab.

Um den Winkel zwischen zwei Ebenen zu berechnen wird wieder Formel (9) herangezogen. Die beiden Vektoren \vec{a} und \vec{b} entsprechen nun den Normalenvektoren der jeweiligen Ebenen. Als Bezugs- bzw. Referenzebene dient die Best-Fit-Ebene der Lasertrackermessung.

Scan 01 erfolgte mit horizontalisiertem Scanner und in weiterer Folge wurde der Surphaser nach jedem Scan mittels einer Stellschraube des Dreifußes verkippt.

²⁵ → **Root Mean Square** = $\sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$

Wertet man die Punktwolken ohne die Informationen des integrierten Neigungssensors aus, ergeben sich die tatsächlichen Verkippungen des Scanners:

	Scan 01	Scan 02	Scan 03	Scan 04	Scan 05	Scan 06	Scan 07
in [°]	0,0004	0,0084	0,0732	0,1769	0,4499	0,8996	5,7758
in [']	0,024	0,506	4,394	10,612	26,994	53,976	346,549

Tabelle 11: Neigung der Scan-Ebenen gegenüber der Referenzebene in Grad [°] bzw. Winkelminuten [']

Tabelle 11 zeigt, dass die Neigung des Scanners kontinuierlich bis ca. 1° (Scan 06) erhöht wurde. Scan 07 (siehe Abb. 28) stellt, mit einer Verkippung von beinahe 6°, eine Extremsituation dar, die in der Praxis so vermutlich nicht auftritt. Nichtsdestotrotz soll mit diesem Scan überprüft werden, ob der Neigungssensor auch noch bei extremer Schrägstellung verwertbare Ergebnisse liefert.



Abbildung 28: Scan 07, maximale Neigung (5,8°) des Scanners

Werden die Punktwolken mit Hilfe der Messungen des integrierten Neigungssensors zuerst horizontiert und anschließend ausgewertet, ergeben sich folgende Verkippungen des Scanners:

	Scan 01	Scan 02	Scan 03	Scan 04	Scan 05	Scan 06	Scan 07
in [°]	0,0003	0,0005	0,0008	0,0008	0,0015	0,0018	0,0085
in [']	0,020	0,028	0,050	0,049	0,092	0,106	0,511
in ["]	1,22	1,67	3,02	2,93	5,54	6,34	30,66

Tabelle 12: Neigung der Scan-Ebenen gegenüber der Referenzebene nach Horizontierung der Punktwolken

Da es sich um sehr kleine Neigungswinkel handelt, sind die Ergebnisse in Tabelle 12 zur besseren Übersichtlichkeit auch noch in Winkelsekunden angegeben (Zeile 3). Die Genauigkeit des Neigungssensors wird laut Hersteller mit 5" angegeben. Wie man sieht, arbeitet der Sensor durchaus in diesem Bereich. Auch eine relative starke Verkippung von ca. 1° (Scan 06) horizontiert der Neigungssensor noch bis auf 6,34" genau. Hier sei ein weiteres Mal darauf hingewiesen, dass die horizontale Referenzebene mittels Lasertracker realisiert wurde, der eine Horizontiergenauigkeit ähnlich dem Surphaser aufweist. Vor diesem Hintergrund sind die geringen Überschreitungen der Herstellerangaben von 5" in Scan 05 und Scan 06 durchaus vertretbar.

Vergleicht man die Scans untereinander mit Scan 01 als Referenz, sinkt die Verkippung in Scan 06 auf 5,31 Winkelsekunden. Der integrierte Neigungssensor arbeitet somit durchaus innerhalb der angegebenen Genauigkeitsgrenzen.

Es ist jedoch auch eine Abhängigkeit von der ursprünglichen Schrägstellung des Scanners zu erkennen. Mit steigender Verkippung, wächst dementsprechend auch in ähnlichem Maße die Abweichung zur Referenzebene, siehe Abb. 29.

Zu Abbildung 29 ist anzumerken, dass die Neigungen zur besseren Darstellung vor der Horizontierung in Grad (blau) und nach der Horizontierung in Winkelsekunden (orange) angegeben sind.

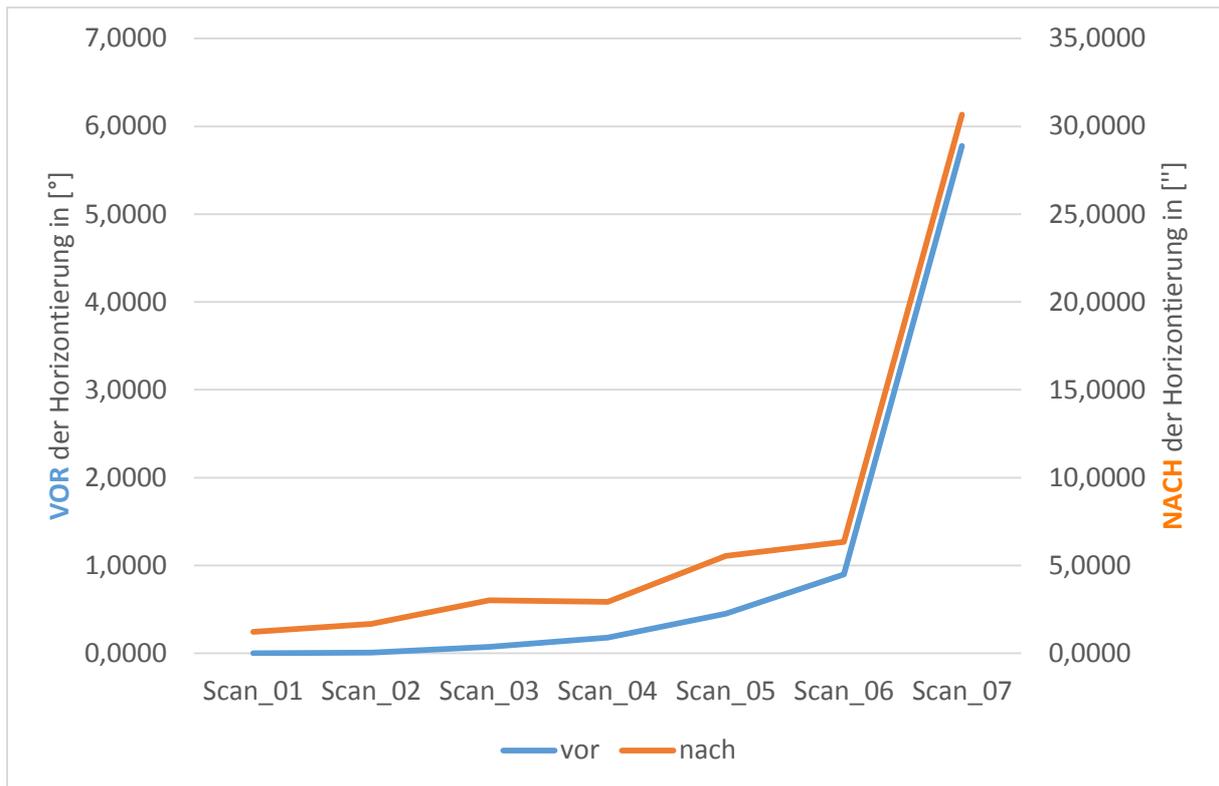


Abbildung 29: Neigung gegenüber der Referenzebene vor („blau“) und nach („orange“) der Horizontierung

Betrachtet man Scan 07, zeigt sich, dass der Neigungssensor die Punktwolke nur noch auf ca. 30,7'' genau horizontiert. Dieser Wert ist angesichts der extremen Schrägstellung des Surphasers von beinahe 6° jedoch durchaus akzeptabel. Der Neigungssensor liefert somit auch in Extremsituationen noch brauchbare Näherungswerte für eine anschließende Orientierung mittels Festpunkten oder ICP.

Abschließend sollen noch die tatsächlichen Abweichungen in den Koordinaten betrachtet werden. Hier kommt der Vorteil des Versuchsaufbaus zu tragen. Da es sich um eine Horizontalebene handelt, müssten bei korrekt arbeitendem Neigungssensor die Zentren der Flachtargets ähnliche Z-Koordinaten aufweisen.

Da sich die Targets während der Messung nicht exakt auf gleicher Höhe wie der Scanner befanden (Offset von ca. 10 cm), sind in Tabelle 13 die auf den Schwerpunkt reduzierten Z-Koordinaten dargestellt. Dadurch können im Folgenden direkt die Abweichungen in der Höhenkomponente abgelesen werden:

Pkt	Scan 01	Scan 02	Scan 03	Scan 04	Scan 05	Scan 06	Scan 07
1	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,05	0,36
2	0,02	0,03	0,04	0,02	-0,01	-0,02	0,09
3	-0,03	-0,04	-0,02	-0,06	-0,10	-0,10	-0,36
4	0,00	0,00	-0,03	0,00	0,02	0,00	-0,25
5	0,00	0,01	-0,03	0,03	0,08	0,08	0,15
Std.Abw.	0,02	0,03	0,04	0,04	0,07	0,07	0,30
Max.	0,02	0,03	0,04	0,03	0,08	0,08	0,36
Min.	-0,03	-0,04	-0,03	-0,06	-0,10	-0,10	-0,36

Tabelle 13: auf den Schwerpunkt reduzierte Z-Koordinaten der Zentren der Flachtargets in [mm]

Die Entfernung zwischen dem Scanner und jedem der 5 Flachtargets beträgt, mit wenigen Zentimetern Abweichung, ca. 3 Meter. Die Werte in Tabelle 13 beziehen sich somit auf diesen Entfernungsbereich.

Wie man erkennt, können die Punktwolken bei geringer Schrägstellung des Scanners (Scan 01 bis Scan 04) auf wenige Hundertstel Millimeter horizontalisiert werden, die Standardabweichung ist in diesen Fällen kleiner 0,04mm.

Erst bei Verkippungen im Bereich von $\frac{1}{2}^\circ$ bis 1° (Scan 05 und Scan 06) werden Maximal- bzw. Minimalwerte in der Größenordnung von ca. $\pm 0,10$ mm und eine Standardabweichung von 0,07mm erreicht. Auch Scan 07 liefert mit einer Standardabweichung von 0,30mm noch gute Näherungswerte für eine anschließende Orientierung.

4.4.4 Schlussfolgerung des Experiments

Die Genauigkeit des Neigungssensors wird vom Hersteller Basis Software mit 5 Winkelsekunden angegeben. Das durchgeführte Experiment zeigt, dass diese Angaben vom Surphaser 100HSX durchaus eingehalten werden.

Ist der Scanner bei der Messung grob horizontalisiert (Neigung $< 1^\circ$), kann der Neigungssensor die Schrägstellung auf ca. 5" kompensieren. Auf eine Entfernung von 10 Metern entspricht dies einer Abweichung von ca. 0,25mm. Erst bei

größeren Verkippungen des Scanners (Neigung $> 1^\circ$) werden die Herstellerangaben nicht mehr eingehalten.

Der Surphaser 100HSX ist standardmäßig mit keiner Libelle ausgestattet. Für Projekte bei denen die Horizontierung der Punktwolken notwendig bzw. gewünscht ist, muss der Surphaser daher z.B. auf reguläre Dreifüße, wie sie von Tachymetersystemen her bekannt sind, montiert werden. Da diese Dreifüße in der Regel über Libellen mit einer Horizontiergenauigkeit von $< 10'$ verfügen, ist eine grobe Horizontierung des Scanners einfach zu realisieren und somit die Problematik einer zu großen Schrägstellung (Neigung $> 1^\circ$) in der Praxis nicht gegeben.

Sollten dennoch Messungen mit extremen Verkippungen des Scanners durchgeführt werden, liefert der Neigungssensor zumindest gute Näherungswerte für eine anschließende Orientierung der Punktwolke.

Der Neigungssensor des Surphaser 100HSX liefert somit eine den Herstellerangaben entsprechende Horizontiergenauigkeit von 5 Winkelsekunden und kann in der Praxis bei grober Vorhorizontierung des Scanners ohne Einschränkungen eingesetzt werden.

4.5 Experiment 4: Test der Abbildungsgenauigkeit eines Festpunktnetzes

4.5.1 Motivation und Zielsetzung

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 erwähnt, kann der überwiegende Teil der Projekte in der Industrievermessung nicht von einem einzigen Standpunkt aus gemessen werden. Auf Grund von Abschattungen, der Dimension bzw. der Form des Prüfobjektes ist es in den meisten Fällen notwendig mehrere Scans von verschiedenen Standpunkten aus zu erstellen. Die Orientierung dieser Scans zueinander ist für die Praxis somit von überragender Bedeutung.

Grundsätzlich gibt es dazu zwei unterschiedliche Methoden:

1) Erstellen eines 3D-Festpunktfeldes

Es wird vor Ort ein Netz aus signalisierten Punkten, in welchem der Scanner bewegt werden kann, eingerichtet. Von jedem Standpunkt aus müssen genügend Festpunkte (mind. 3) sichtbar sein und bei der tatsächlichen Aufnahme mitgescannt werden.

2) Iterative Closest Point (ICP)

Bei diesem Algorithmus werden keine „externen“ Targets, sondern die Punktwolken an sich dazu verwendet um die Orientierungsparameter der Scans zu ermitteln. Dabei wird iterativ versucht die Abstände zwischen den Punktwolken zu minimieren indem für jeden Punkt des einen Scans der nächstliegende Punkt des zweiten Scans ermittelt und deren Abweichungen berechnet werden. Damit das Verfahren konvergiert, müssen die beiden Punktwolken bereits näherungsweise vororientiert sein. Weitere Informationen findet man in [Besl und McKay, 1992].

Einer der Vorteile eines 3D-Festpunktfeldes liegt in der schnelleren und einfacheren Berechnung der Transformationsparameter, da hier nur kleine Ausschnitte des Scans (= Targets) verwendet werden, während der ICP-Algorithmus mit der gesamten Punktwolke rechnet. Da Projekte in der Industrievermessung im Normalfall international weit verstreut sind und somit längere Reisewege notwendig machen, ist es unabdingbar bereits vor Ort die Orientierung der einzelnen Scans auf Fehler und Probleme zu überprüfen. Daher erfolgt in der Praxis meist eine Orientierung über ein räumliches Festpunktfeld,

weshalb der Scanner in diesem Experiment auch nur auf seine Abbildungsgenauigkeit bei der Aufnahme eines Netzes getestet wird.

Es soll also die Frage beantwortet werden, ob der Surphaser 100HSX ein räumliches Festpunktfeld von verschiedenen Standpunkten aus geometriegetreu erfasst und somit mit ausreichender Genauigkeit in diesem Netz positioniert werden kann.

Weiters sollen die Messungen genutzt werden um die Erkenntnisse aus den Experimenten 2 (Test der Wiederholgenauigkeit) und 3 (Test des integrierten Neigungssensors) zu verifizieren.

4.5.2 Versuchsaufbau

Bei der Erstellung eines 3D-Festpunktfeldes sind einige grundlegende Aspekte zu beachten.

Zum einen ist auf eine ausreichende Anzahl an Punkten zu achten. Um zwei beliebig orientierte Punktwolken ineinander transformieren zu können, sind im Allgemeinen 3 Translationen, 3 Rotationen sowie eine maßstäbliche Anpassung notwendig. Um das daraus entstehende Gleichungssystem mit 7 unbekanntem Parametern aufzulösen, sind somit mindestens 3 Festpunkte erforderlich. Um auf jedem Instrumenten-Standpunkt eine ausreichende Überbestimmung zu erreichen, ist daher bereits beim Aufbau eines Festpunktfeldes auf eine gute Sichtbarkeit der Punkte zu achten.

Weiters sind die einzelnen Punkte des Referenznetzes möglichst homogen im Messvolumen zu verteilt, um zu vermeiden, dass eine spezielle Scanrichtung begünstigt wird.

Das Instrument sollte außerdem nur innerhalb des Festpunktfeldes bewegt werden. Das Referenznetz ist somit so zu dimensionieren und anzuordnen, dass es nach Möglichkeit auch das gesamte Messvolumen abdeckt.

Nach diesen 3 Vorgaben wird ein 3D-Festpunktfeld bestehend aus 10 Targets erstellt. Die Festpunkte 1 bis 7 sind gleichmäßig entlang der Wände positioniert, die Punkte 8 bis 10 etwas tiefer an den Messpfeilern angebracht. (siehe Abb. 30)



Abbildung 30: Intensitätsbild des 3D-Festpunktfeldes von Standpunkt 1

Das gesamte Netz erstreckt sich über einen Bereich von 7,5 mal 8 Meter, in der Höhe unterscheiden sich die Marker bis zu 1,5 Meter.

Es werden Messungen an 3 verschiedenen Standpunkten durchgeführt. Einer der Standpunkt ist dabei zentral in der Mitte des Referenznetzes gelagert, die beiden anderen jeweils an den diagonal gegenüberliegenden Rändern des Messvolumens. (siehe Abb. 31)

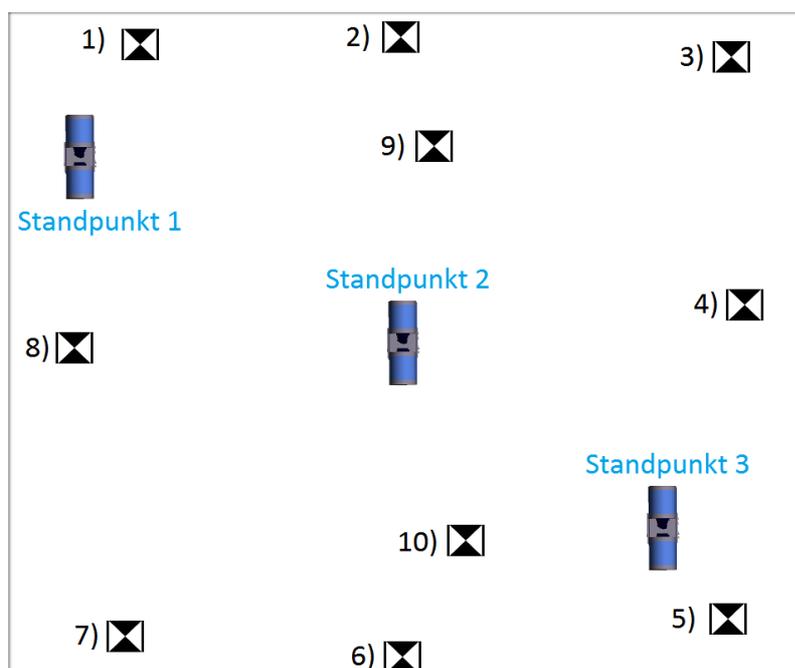


Abbildung 31: Übersichtsplan des Versuchsaufbaus

4.5.3 Messung und Auswertung

Messung

Die Magnetnester für die Flachtargets werden mit einer Heißklebepistole an den vorgesehenen Positionen montiert. Nach einer ausreichenden Aufwärmphase für die Instrumente erfolgt zuerst die Messung des Festpunktfeldes mit dem Leica AT401. Als erster Standpunkt wird das Zentrum des Netzes gewählt. Die Messung erfolgt auf einem Industriestativ im höchsten Genauigkeitsmodus des Lasertrackers („precise mode“) und zwei Lagen und wird jeweils doppelt durchgeführt. Als zweiter Standpunkt wird für den Tracker der Messpfeiler direkt vor Target Nr. 4) gewählt und die Messung mit gleichen Einstellungen wiederholt.

Anschließend werden die Magnetnester mit den Flachtargets besetzt. Wie in Kapitel 4.2.1 erwähnt, besteht Rückseite der Targets aus einer Halbkugel, weshalb sie in den Magnetnestern beliebig gedreht und in einem gewissen Ausmaß verkippt werden können. Im Zuge dieser Arbeit wurde nicht überprüft, wie genau die Mittelpunkte dieser Halbkugeln auch tatsächlich mit den Zentren des Schachbrett Musters der Frontseite übereinstimmen. Um einen möglichen Fehlereinfluss aus dieser Unvollkommenheit der Flachtargets zu vermeiden, wird bereits beim Einsetzen darauf geachtet, dass die Targets zwischen den einzelnen Scans nicht mehr verdreht werden müssen und somit exakt die gleiche Stellung im Magnetnest aufweisen.

Das Festpunktfeld wird anschließend von den 3 Standpunkten aus (siehe Abb. 31) mit einer Auflösung von 40 LPD x 40 PPD gescannt. Die Messung wird dabei als vollständiger 360° Rundumscan durchgeführt und für jeden Standpunkt zweimal wiederholt. Die Wiederholung der Messung hat dabei zweierlei Gründe. Einerseits soll einfach eine Ersatzmessung zu Kontrollzwecken zur Verfügung stehen um sicherzustellen, dass es nicht in einem der Scans zu einer zufälligen Fehlmessung gekommen ist. Der zweite Grund besteht darin, dass die Wiederholgenauigkeit (Kapitel 4.3) nochmals überprüft werden soll. Zum Unterschied zu Experiment 2 wird im jetzigen Fall nämlich ein voller 360° Rundumscan durchgeführt.

Nach Abschluss der Messungen stehen somit 4 Sätze an Trackermessungen und 6 Scans für die Auswertung zur Verfügung.

Auswertung

Beim Vergleich der Trackermessungen untereinander zeigt sich die sehr hohe Präzision des Leica AT401. Berechnet man eine Best-Fit-Transformation zwischen den Wiederholungsmessungen auf einem Standpunkt bzw. zwischen den Messungen beider Standpunkte, ergibt sich eine Standardabweichung von lediglich 0,01 mm und auch die maximale Abweichung beträgt nur 0,02 mm.

Da die Genauigkeit des Surphaser 100HSX im Zehntel-Millimeter-Bereich liegt, könnte somit jede der vier Trackermessungen als Referenz herangezogen werden. Nichtsdestotrotz erfolgt mit Hilfe von Spatial Analyzer eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen damit nicht willkürlich eine der vier Messungen ausgewählt wird. Da die Abweichungen jedoch derart gering und nicht signifikant sind, wird an dieser Stelle auf eine genaue Darstellung der Ergebnisse der Ausgleichung verzichtet.

In weiterer Folge dienen die ausgeglichenen Trackermessungen als Referenznetz und werden als fehlerfrei betrachtet.

Die mit Hilfe von SurphExpress extrahierten Koordinaten der Targets werden für alle 6 Scans in Spatial Analyzer importiert, wo auch die weitere Auswertung der Scandaten erfolgt, da die Software über sehr intuitive und übersichtliche Funktionen zur Best-Fit Transformation verfügt.

Bevor genauer auf die Auswertung der Daten eingegangen wird, sind noch zwei Problemfälle in den Daten zu erwähnen.

Zum einen kam es in Scan 03 (Standpunkt 2) zu einer Überstrahlung von Target Nr. 7, weshalb das Zentrum nicht ermittelt werden konnten. (siehe Abb. 32)

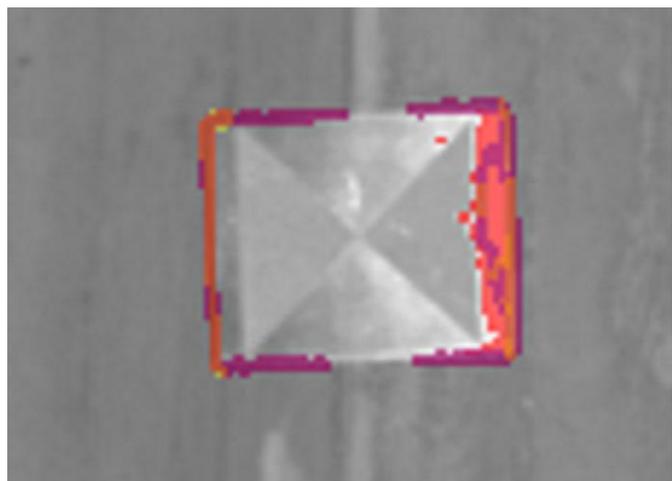


Abbildung 32: Scan 03 – Target Nr. 7 überbelichtet, Zentrum nicht ermittelbar

Zum anderen wird in beiden Scans des Standpunktes 3 (Scan 05 und 06) das Target Nr. 5 von der Berechnung der Best-Fit Transformation ausgeschlossen, da der Punkt jeweils Abweichungen von ca. 1mm liefert. Der Grund für die niedrige Genauigkeit liegt in der geringen Entfernung von lediglich 1,7 Metern, womit offensichtlich der Mindestabstand zwischen Laserscanner und Target unterschritten wird. Negativ fällt dabei auf, dass der Hersteller den Arbeitsbereich des Surphaser 100HSX jedoch sehr wohl ab 1 Meter angibt.

Die Scans 03, 05 und 06 werden im Folgenden somit mit lediglich 9 Festpunkten ausgewertet.

Der erste Teil der Auswertung besteht aus einem Soll-Ist-Vergleich, wobei das mittels Lasertracker ermittelte Festpunktfeld als Referenznetz dient.

Spatial Analyzer bietet bei der Best-Fit Transformation die Möglichkeit jeden der sieben Freiheitsgrade aus der Berechnung auszuschließen. Wird zum Beispiel der Maßstab festgehalten und auf den Wert 1 gesetzt, so zeigt sich das bereits in vorhergehenden Experimenten aufgetretene Verhalten des Scanners Distanzen etwas zu kurz abzubilden:

		(a)		(b)	
		Maßstab fest (= 1)		Maßstab berechnet	
		Max.	Std.Abw.	Max.	Std.Abw.
Standpunkt 1	Scan 01	0,40	0,29	0,29	0,18
	Scan 02	0,33	0,25	0,25	0,15
Standpunkt 2	Scan 03	0,47	0,35	0,35	0,19
	Scan 04	0,50	0,38	0,34	0,22
Standpunkt 3	Scan 05	0,22	0,17	0,18	0,13
	Scan 06	0,25	0,17	0,19	0,12

Tabelle 14: Kennzahlen der Best-Fit Transformation ohne (a) und mit (b) Maßstab

Wie man sieht verbessern sich die Ergebnisse durch die Berechnung des Maßstabes teilweise deutlich. Die ermittelte Maßstabszahl ist dabei immer > 1 , was bedeutet, dass der Scanner das Festpunktfeld gegenüber dem Laserscanner jeweils zu klein abbildet.

Tabelle 15 (b) zeigt, dass sich der Surphaser 100HSX mittels einer vollständigen 7-Parameter Transformation mit einer Standardabweichung im Bereich von 0,10 bis 0,20 Millimeter sehr genau positionieren lässt. Die etwas hohen maximalen

Abweichungen stammen dabei meist nur von einzelnen Targets in den Scans. Lediglich Scan 04 (Standpunkt 2) fällt dabei etwas aus der Reihe und weist insgesamt 3 Targets mit Abweichungen von >0,25mm auf.

Bei entsprechender Analyse und etwas feinerer Ausreißerdetektion in den Messungen könnten somit eventuell auch noch genauere Ergebnisse erzielt werden, worauf in dieser Arbeit jedoch verzichtet wird.

Das Abbildungsverhalten des Surphaser 100HSX in einem 3D-Festpunktfeld mit dem eines Instruments höherer Genauigkeit, wie dem Leica AT401, zu vergleichen, bietet interessante Einblicke in die Möglichkeit beide Messsysteme für spezielle Projekte zu kombinieren. In den meisten Fällen dient das Referenznetz jedoch lediglich der relativen Orientierung der einzelnen Punktwolken zueinander und nicht der Kombination verschiedener Systeme. Es ist daher vor allem die Genauigkeit mit der mehrere Scans zu einem Gesamtobjekt zusammengeführt werden können von entscheidender Bedeutung. Nachfolgend werden deshalb die einzelnen Punktwolken ineinander transformiert, die Ergebnisse sind in den Tabelle 15 und 16 dargestellt. Als Referenznetz dient somit nicht mehr die Lasertrackermessung, sondern jeweils ein Scan, wobei alle möglichen Kombinationen durchgerechnet werden.

<u>Max. Abweichung</u>		Standpunkt 1		Standpunkt 2		Standpunkt 3	
		Scan 01	Scan 02	Scan 03	Scan 04	Scan 05	Scan 06
Standpunkt 1	Scan 01	-					
	Scan 02	0,24	-				
Standpunkt 2	Scan 03	0,32	0,31	-			
	Scan 04	0,39	0,33	0,09	-		
Standpunkt 3	Scan 05	0,39	0,41	0,40	0,38	-	
	Scan 06	0,37	0,39	0,34	0,33	0,10	-

Tabelle 15: maximale Abweichung nach der Best-Fit Transformation

<u>Standardabweichung</u>		Standpunkt 1		Standpunkt 2		Standpunkt 3	
		Scan 01	Scan 02	Scan 03	Scan 04	Scan 05	Scan 06
Standpunkt 1	Scan 01	-					
	Scan 02	0,12	-				
Standpunkt 2	Scan 03	0,21	0,22	-			
	Scan 04	0,24	0,23	0,05	-		
Standpunkt 3	Scan 05	0,26	0,23	0,24	0,27	-	
	Scan 06	0,25	0,22	0,23	0,26	0,07	-

Tabelle 16: Standardabweichung nach der Best-Fit Transformation

Die grün hinterlegten Felder in Tabelle 15 bzw. 16 zeigen die Transformationsergebnisse von Scans des gleichen Standpunktes. Die Wiederholungsmessung wurde dabei direkt nach Fertigstellung des ersten Scans gestartet. Der Surphaser liefert dabei sehr gute Ergebnisse mit Abweichungen von $< 0,10$ mm. Lediglich auf Standpunkt 1 kommt es bei Target Nr. 8 zu einer größeren Abweichung von $0,24$ mm. Ignoriert man diesen Punkt sinken beide Kennwerte ebenfalls unter $0,10$ mm.

Bei den Ergebnissen zwischen den einzelnen Standpunkten zeigen sich im Vergleich mit den Trackermessungen als Referenz interessanterweise höhere Abweichungen. Die Standardabweichung steigt dabei von einem Bereich von $0,10 - 0,20$ mm um ca. ein Zehntel auf $0,20 - 0,30$ mm. Und auch die maximalen Abweichungen belaufen sich jetzt durchwegs auf Werte $> 0,30$ mm.

Diese etwas geringere Positioniergenauigkeit lässt sich vermutlich dadurch erklären, dass die Laserscannermessungen eben um die „wahren Werte“, welche durch die Trackermessungen genau genug repräsentiert werden, streuen. Daher kommt es zwischen den einzelnen Punktwolken zu etwas größeren Abweichungen.

Nichtsdestotrotz liegt der Surphaser 100HSX auch hier mit Standardabweichungen im Bereich von $0,20 - 0,30$ mm innerhalb der vom Hersteller spezifizierten Werte und zeigt eine gute Positioniergenauigkeit.

ad. Experiment 2: Test der Wiederholgenauigkeit

Vergleicht man die beiden Punktwolken eines Standpunktes miteinander zeigt sich auch hier wieder die Driftbewegung des Scanners von einem Scan zum nächsten. Die Messungen wurden dabei direkt nacheinander ohne zeitliche Pause als 360° Rundumscan durchgeführt und zeigen ähnliche Ergebnisse wie Experiment 2. (siehe Abb. 33)

Es kann somit ausgeschlossen werden, dass die Drift von der Wahl des Scanbereichs (360° Rundum- gegenüber Teilscan) abhängt bzw. verursacht wird.

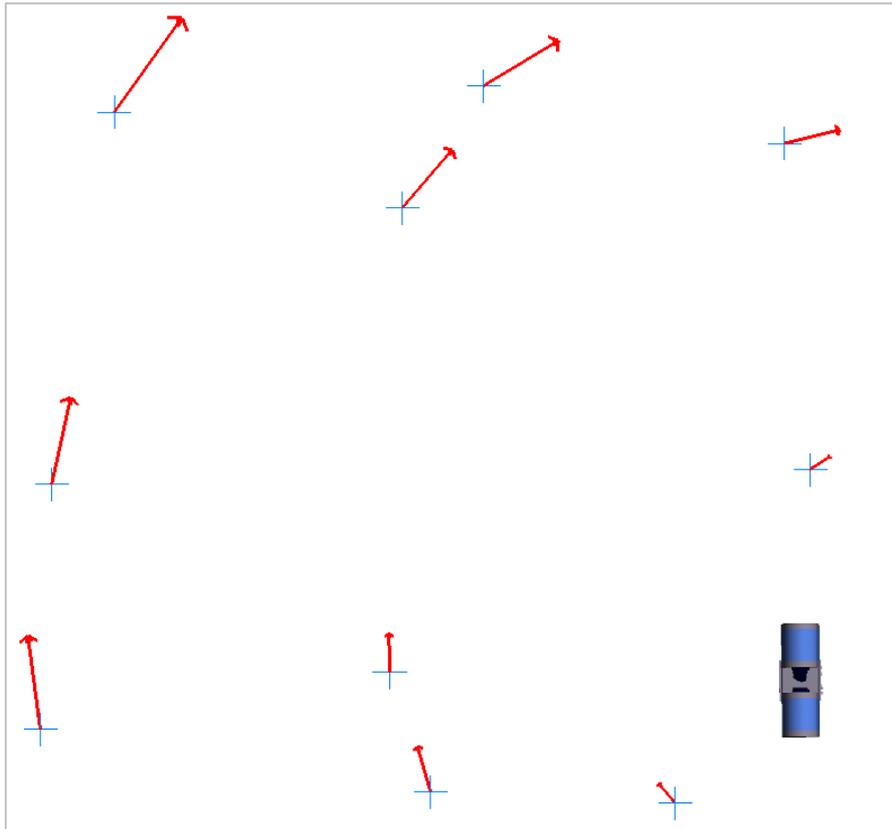


Abbildung 33: Driftbewegung Standpunkt 1, Abweichungen 0,25 bis 1,23 mm

ad. Experiment 3: Test des integrierten Neigungssensors

Mit Hilfe des 3D-Festpunktfeldes kann ein weiterer kleiner Test des Neigungssensors durchgeführt werden indem man die Freiheitsgrade der Best-Fit Transformation reduziert und die Rotationen um die Horizontalachsen (X- und Y-Achse) nicht zulässt. Es erfolgt somit eine 5-Parameter Transformation für die bereits durch den Scanner horizontierte Punktwolke.

Bei korrekt arbeitendem Neigungssensor müsste diese Transformation ähnliche Ergebnisse liefern wie ein vollständiges Best-Fit mit allen 7 Freiheitsgraden.

		7-Parameter		5-Parameter		Abweichungen	
		Max.	Std.Abw.	Max.	Std.Abw.	Max.	Std.Abw.
Standpunkt 1	Scan 01	0,29	0,18	0,28	0,19	0,01	-0,01
	Scan 02	0,25	0,15	0,26	0,16	-0,01	-0,01
Standpunkt 2	Scan 03	0,35	0,19	0,36	0,22	-0,01	-0,03
	Scan 04	0,34	0,22	0,34	0,24	0,00	-0,02
Standpunkt 3	Scan 05	0,18	0,13	0,26	0,20	-0,08	-0,07
	Scan 06	0,19	0,12	0,21	0,17	-0,02	-0,05

Tabelle 17: Vergleich 7-Parameter gegenüber 5-Parameter Transformation, sowie Abweichungen zwischen beiden Transformationen in [mm]

Auch in diesem Test bestätigen sich die guten Ergebnisse des Neigungssensors. Wie man in Tabelle 17 sieht, bewegen sich die Unterschiede zwischen den beiden Transformationen im niedrigen Hundertstel Millimeter Bereich. Dabei ist anzumerken, dass der Scanner vor der Messung bereits grob mit Hilfe der Dosenlibelle des Dreifußes horizontalisiert wurde. Nichtsdestotrotz liefert der Neigungssensor gute Ergebnisse und ermöglicht die Orientierung mit lediglich 5 Parameter.

4.5.4 Schlussfolgerung des Experiments

Das Experiment zeigt, dass der Surphaser 100HSX ein 3D-Festpunktfeld gut abbilden und dadurch präzise im Raum positioniert werden kann. Mit Standardabweichungen im Bereich von 0,10 bis 0,30 mm bleiben die Ergebnisse auch unter den Genauigkeitsangaben des Herstellers.

Man erkennt jedoch auch, dass es beinahe in jedem Scan zu einzelnen Targetmessungen kommt, welche größere Abweichungen als die restlichen Festpunkte aufweisen („Ausreißer“). Es ist daher bei der Planung und dem Aufbau eines Referenznetzes auf eine gute Verteilung und vor allem eine ausreichende Anzahl an Punkten zu achten um eventuelle Fehlmessungen kompensieren zu können.

Als negativer Kritikpunkt ist der Mindestabstand zwischen Scanner und Messobjekt zu nennen. Dieser wird vom Hersteller mit 1 Meter angegeben. Während des Experiments lieferte der Surphaser 100HSX jedoch bei einem Objektabstand von 1,7m Abweichungen von ca. 1mm und damit eines Vielfachen der eigentlichen Genauigkeit des Scanners. Der vom Hersteller angegebene Arbeitsbereich des Surphasers 100HSX kann somit nicht bestätigt werden.

Des Weiteren zeigt der Scanner auch in einem Festpunktfeld ein ähnliches Verhalten bezüglich Wiederholgenauigkeit und Qualität des Neigungssensors wie in den Experimenten 2 und 3. (siehe Kapitel 4.3 bzw. 4.4) Die Ergebnisse dieser Experimente können somit bestätigt werden.

4.6 Experiment 5: Test der Abbildungsgenauigkeit eines ebenen Objektes

4.6.1 Motivation und Zielsetzung

Einer der großen Vorteile des Laserscannings liegt in der Tatsache, dass Messobjekte nicht nur punktuell (wie z.B. mit einem Lasertracker), sondern flächenmäßig aufgenommen werden können. Es ist somit möglich das gesamte Objekt und nicht nur einzelne Objektpunkte einer Qualitätskontrolle zu unterziehen. Dies ist im Bereich der Industrievermessung speziell in der Automobil- und auch Flugzeugbranche notwendig, wo die einzelnen Karosserieteile strenge Abweichungstoleranzen erfüllen müssen.

Dabei wird das Bauteil gescannt und über vordefinierte Bohrungen im Objekt orientiert. Anschließend erfolgt ein Soll-Ist-Vergleich zwischen der gemessenen Punktwolke und den Modelldaten laut CAD. Um brauchbare Ergebnisse zu erhalten, ist es somit von entscheidender Bedeutung, dass der Scanner die Objektflächen auch korrekt abbildet.

In diesem Experiment soll die Abbildungsgenauigkeit des Surphaser 100HSX auf ein flächenhaftes Objekt überprüft werden. Um den Auswerteprozess so einfach wie möglich zu gestalten, wird auf das Scannen einer tatsächlichen Freiformfläche verzichtet und stattdessen ein ebener Prüfkörper verwendet. Außerdem kann dadurch das Rauschverhalten des Scanners leicht überprüft werden.

Dieses Experiment soll somit die Frage beantworten, ob der Surphaser 100HSX ein ebenes Objekt in unterschiedlichen Entfernungen und Orientierungen korrekt abbilden kann und dabei die Herstellerangaben zum Rauschverhalten eingehalten werden.

4.6.2 Versuchsaufbau

Um einen möglichst praxisnahen Aufbau des Experiments zu erreichen, wird als Prüfobjekt eine Aluminium-Flanschplatte verwendet, wie sie auch tatsächlich in der Automobilindustrie zur Anwendung kommt. Solche Flanschplatten haben eine Dimension von 640 x 310 x 30 Millimeter und dienen dabei als Adapter zwischen Industrierobotern und den unterschiedlichen Roboterwerkzeugen.

Zum Test der Abbildungsgenauigkeit wird die Platte im Messkeller der Uni Innsbruck in verschiedenen Entfernungen positioniert und gescannt. Neben der steigenden Distanz zum Scanner wird außerdem die Verkippung des Prüfkörpers gegenüber der Aufnahme­richtung variiert.

Die Messungen erfolgen in einem Abstand zum Scanner von 3.5m, 5.0m, 7.5m, 9.5m, 12.5m, 15.0m und 20.0m, sowie jeweils in 85°, 65°, 45° und 25° Neigung gegenüber der Scanrichtung. Die Aufnahme­richtung wird dabei möglichst konstant gehalten.

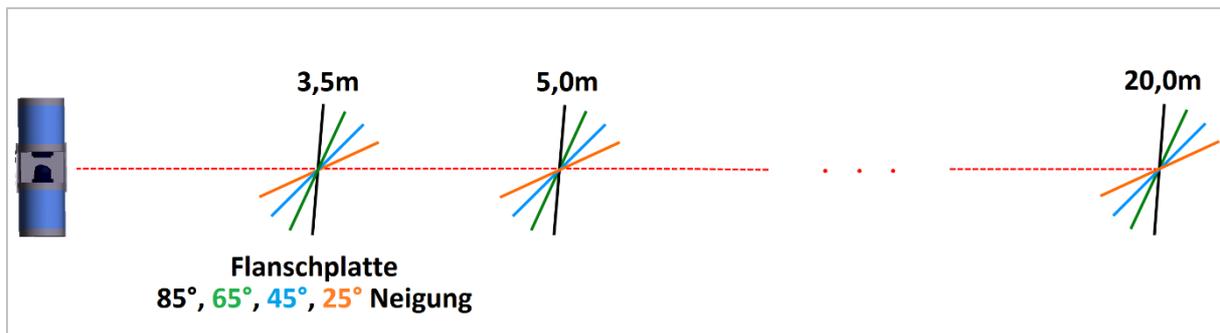


Abbildung 34: Übersichtsplan des Versuchsaufbaus

4.6.3 Messung und Auswertung

Messung

Die Flanschplatten der Automobilindustrie werden von hoch präzisen CNC²⁶-Fräsen gefertigt und weisen dementsprechend eine hohe Genauigkeit von deutlich unter 0,10mm auf. Zur Überprüfung der Ebenheit der Platte steht ein CimCore Infinite 2.0 Messarm zur Verfügung, wobei die Ebene mit einem Raster von insgesamt 28 Punkten (siehe Abb. 36) abgetastet wird.

Da die Flanschplatte aus gefrästem Aluminium besteht, spiegelt die geschliffene Oberfläche relativ stark und muss vor dem Scan noch aufbereitet werden. Dazu steht ein speziell für Laserscanning entwickeltes Entspiegelungsspray zum Mattieren der Oberfläche zur Verfügung. Das Spray bildet dabei eine weiße, hauchdünne und gleichmäßige Partikelschicht, die nach der Messung wieder leicht entfernt werden kann. (siehe Abb. 35)

²⁶ CNC = **C**omputerized **N**umerical **C**ontrol → rechnergestützte numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen

Mit Hilfe des Lasertrackers wird ausgehend vom Laserscanner-Standpunkt eine Gerade im Raum definiert entlang welcher die Platte in den vorgegebenen Entfernungen positioniert und orientiert werden kann.

Nach jeder Ausrichtung mit dem Lasertracker wird die Flanschplatte gescannt, wobei mit zunehmender Entfernung sukzessive die Scanauflösung erhöht wird. Bis einschließlich der Scans in 7,5 Meter Entfernung wird mit 40 LPD x 40 PPD gescannt, ab 9,5 Meter mit 50 LPD x 50 PPD und ab 12,5 Meter in höchster Auflösung von 89 LPD x 89 PPD.

Am Ende der Messung stehen somit insgesamt 28 Scans in unterschiedlichen Entfernungen und Orientierungen zur Verfügung.

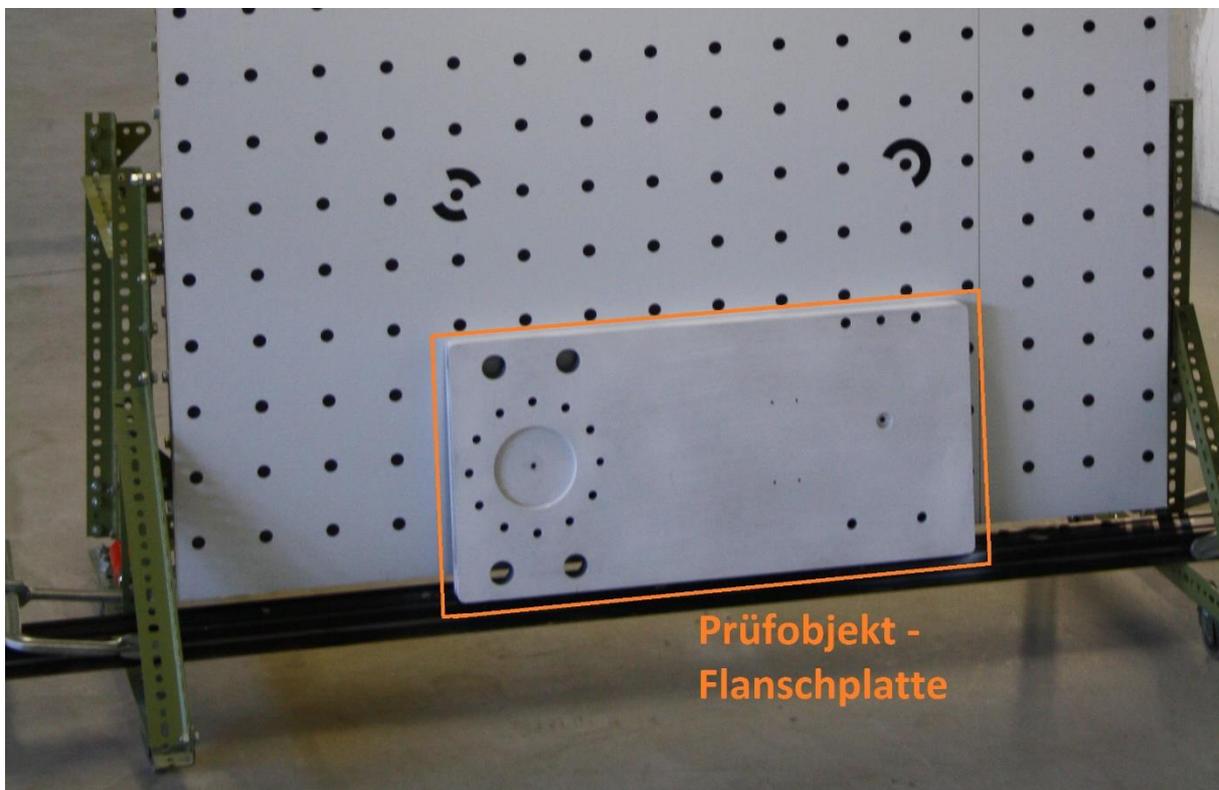


Abbildung 35: mattierte Flanschplatte nach Aufbereitung mit dem Entspiegelungsspray

Auswertung

Die aus den Messarm-Daten gerechnete ausgleichende Ebene zeigt eine Standardabweichung von 0,04mm. Betrachtet man die Abweichungen der einzelnen Punkte von dieser Best-Fit Ebene zeigt sich eine leichte Wölbung der Oberfläche. (siehe Abb. 36)

Die Minimalwerte (-0,07mm) der Abweichungen liegen dabei seitlich an den Rändern, die Maximalwerte treten in der Plattenmitte auf und belaufen sich auf +0,05mm. Die Flanschplatte kann somit als ausreichend plan angesehen werden.

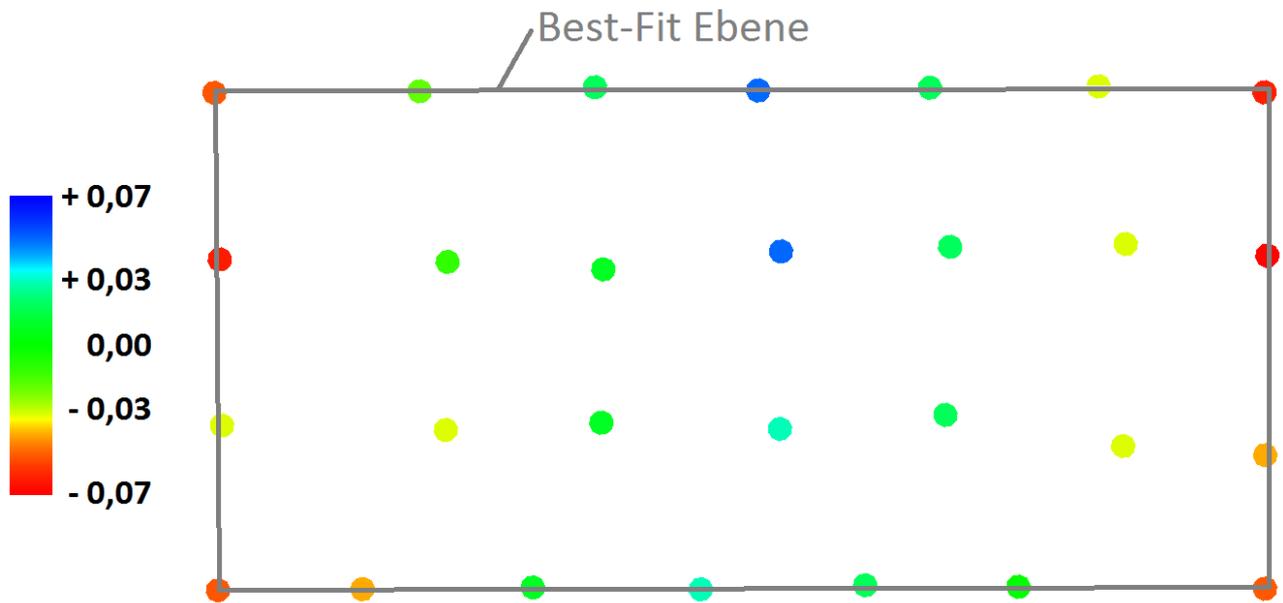


Abbildung 36: Ebenheitsprüfung der Flanschplatte mittels Messarm, Best-Fit Ebene (grau) und Abweichungen in [mm]

Da es beim Laserscanning in der näheren Umgebung von Kanten und Bohrungen vermehrt zu Fehlmessungen kommt, werden die Messungen um diese Bereiche von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. (siehe Abb. 37)

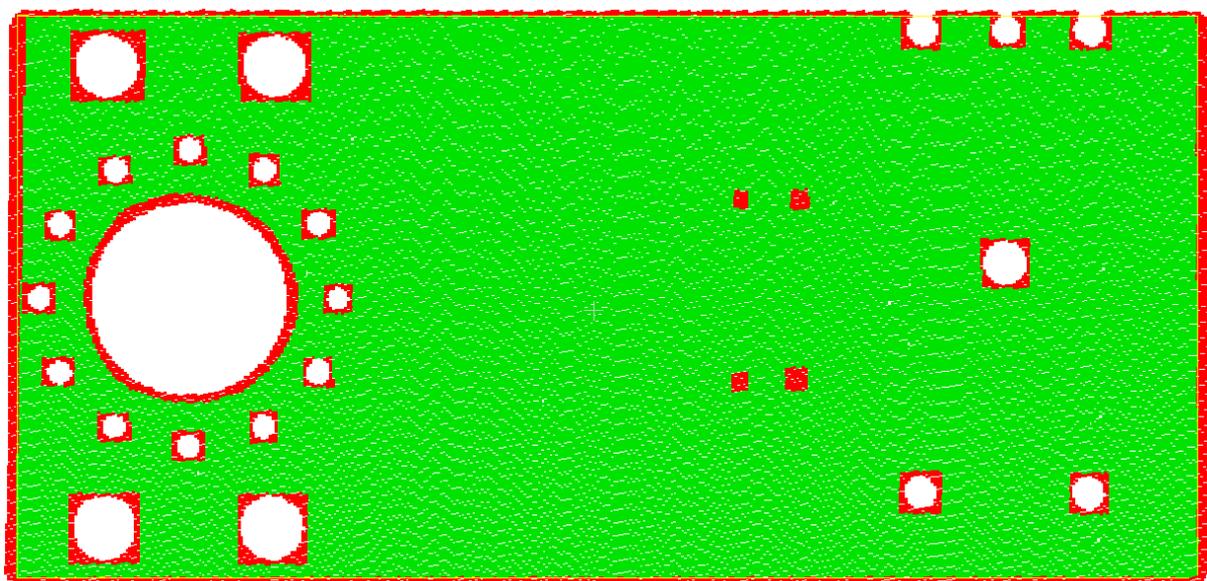


Abbildung 37: Datenselektion – rote Bereiche fließen nicht in die Auswertung ein

Die Punktwolken werden als pts-Dateien aus SurphExpress exportiert und in CloudCompare importiert, wo die tatsächliche Datenselektion stattfindet.

Nach der Auswahl der Daten werden die ausgedünnten Punktwolken in Spatial Analyzer importiert und die Berechnung der ausgleichenden Ebenen für jeden der 28 Scans durchgeführt. Tabelle 18 und Abbildung 38 zeigen die ermittelten Standardabweichungen der Best-Fit Ebenen:

	3,5m	5,0m	7,5m	9,5m	12,5m	15,0m	20,0m
85°	0,09	0,09	0,10	0,10	0,13	0,14	0,21
65°	0,09	0,10	0,10	0,10	0,13	0,16	0,22
45°	0,08	0,09	0,10	0,10	0,13	0,15	0,22
25°	0,08	0,09	0,09	0,10	0,13	0,15	0,21

Tabelle 18: Standardabweichungen des Ebenen-Best-Fit in [mm]

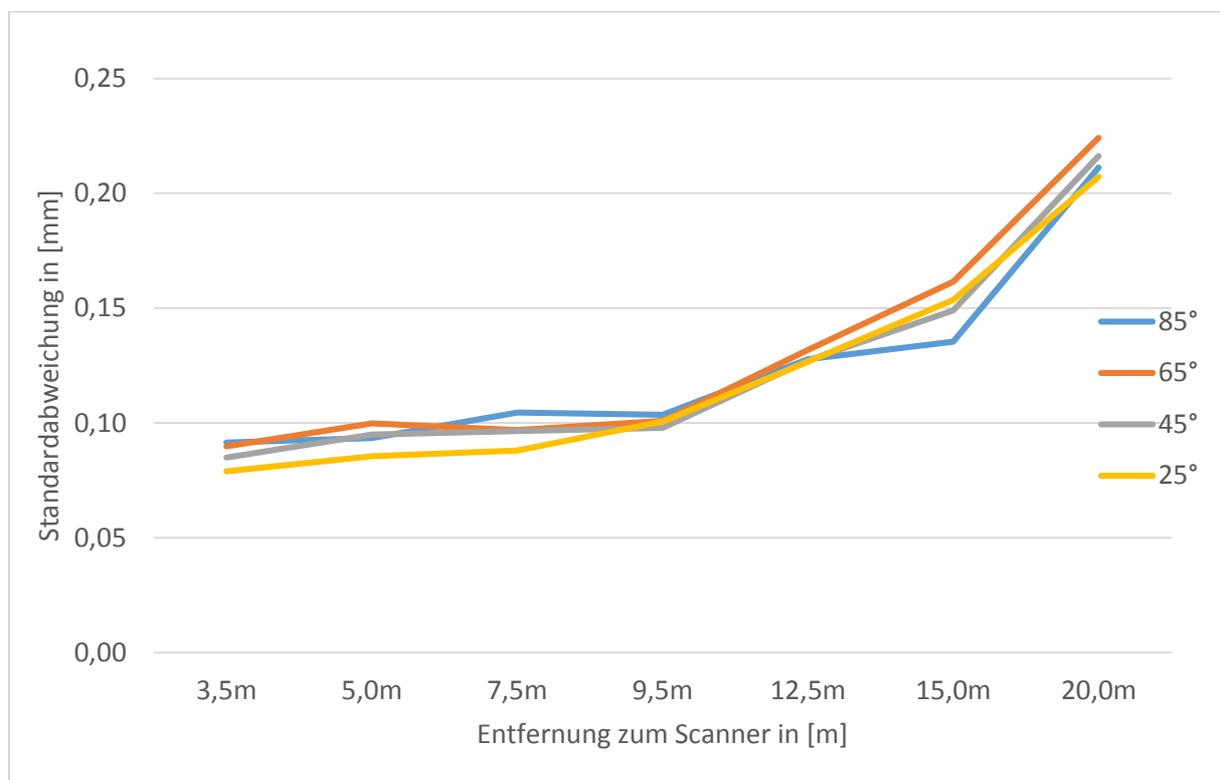


Abbildung 38: Standardabweichungen des Ebenen-Best-Fit in [mm]

Die Ergebnisse zeigen, dass die Neigung der Flanschplatte gegenüber der Aufnahme-richtung faktisch keine Auswirkung auf die Abbildungsgenauigkeit hat. Die Ebene wird auch bei starker Verkippung mit gleicher Genauigkeit als solche erkannt. Die maximalen Unterschiede zwischen den Standardabweichungen bei gleicher Entfernung betragen lediglich 2 Hundertstel Millimeter. (siehe in Tabelle 18 orange hinterlegte Werte)

Weiters erkennt man, dass der Surphaser 100HSX im Messbereich bis einschließlich 9,5m beinahe gleichbleibend gute Ergebnisse liefert. Die

Standardabweichungen liegen bei allen vier gemessenen Distanzen in einem Bereich von 0,08 bis 0,10mm. Der Hersteller gibt das Rauschverhalten des Surphasers mit 0,07mm bei einer Entfernung von 10 Metern und einer Reflektivität des Prüfkörpers von 90% an. Da die Reflektivität der entspiegelten Flanschplatte nur geschätzt werden kann und sehr wahrscheinlich unter 90% liegt, ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht möglich. Die ermittelten Werte bewegen sich aber durchaus im Rahmen der Herstellerangaben.

Betrachtet man die Verteilung der einzelnen Abweichungen von der jeweiligen Best-Fit Ebene, zeigt sich ebenfalls das sehr konstante Abbildungsverhalten des Surphaser 100HSX bis ca. 10 Meter. Da die Neigung der Flanschplatte nahezu keinen Einfluss auf die Verteilung hat, werden in Abbildung 39 und 40 beispielhaft nur die Daten für 85° dargestellt.

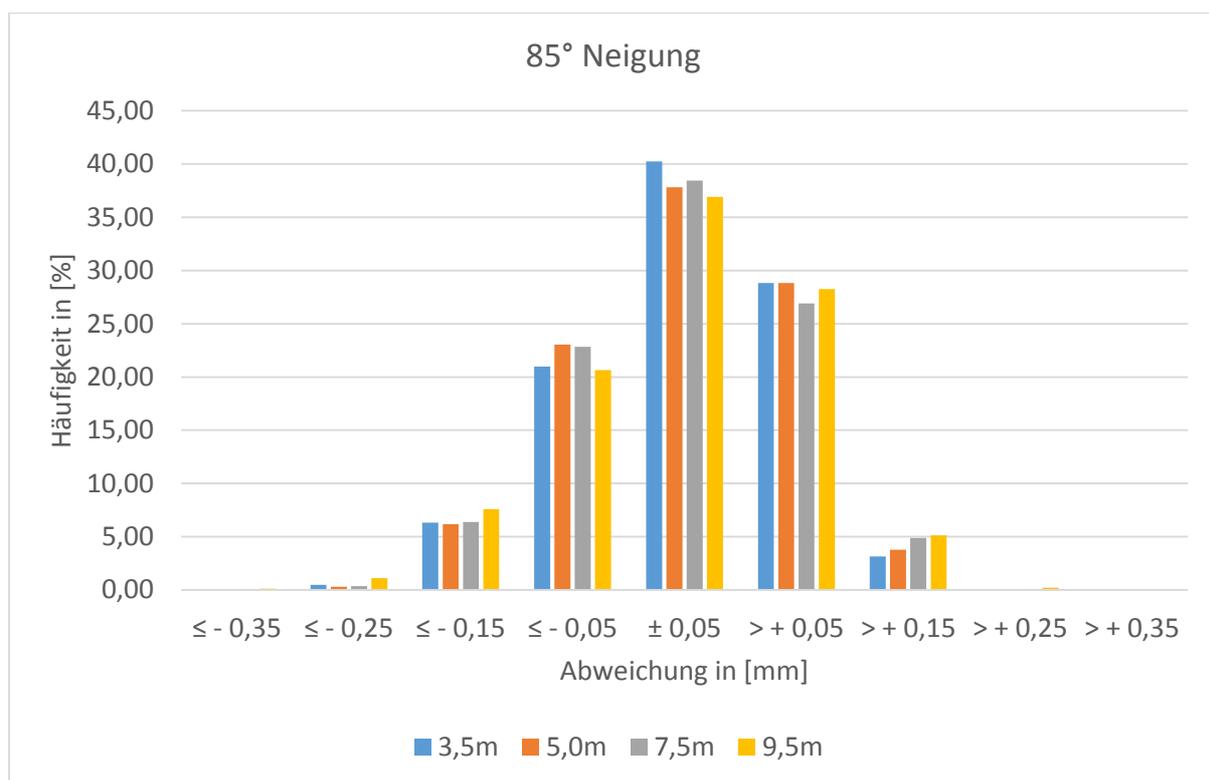


Abbildung 39: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zur jeweiligen Best-Fit Ebene bis zu einer Entfernung von 9,5m

Wie man sieht, liefert der Laserscanner bis zu einer Entfernung von 9,5m eine bis auf wenige Prozentpunkte nahezu idente Verteilung der Abweichungen.

Anders verhält es sich mit den Scans zwischen 12,5 und 20,0 Metern:

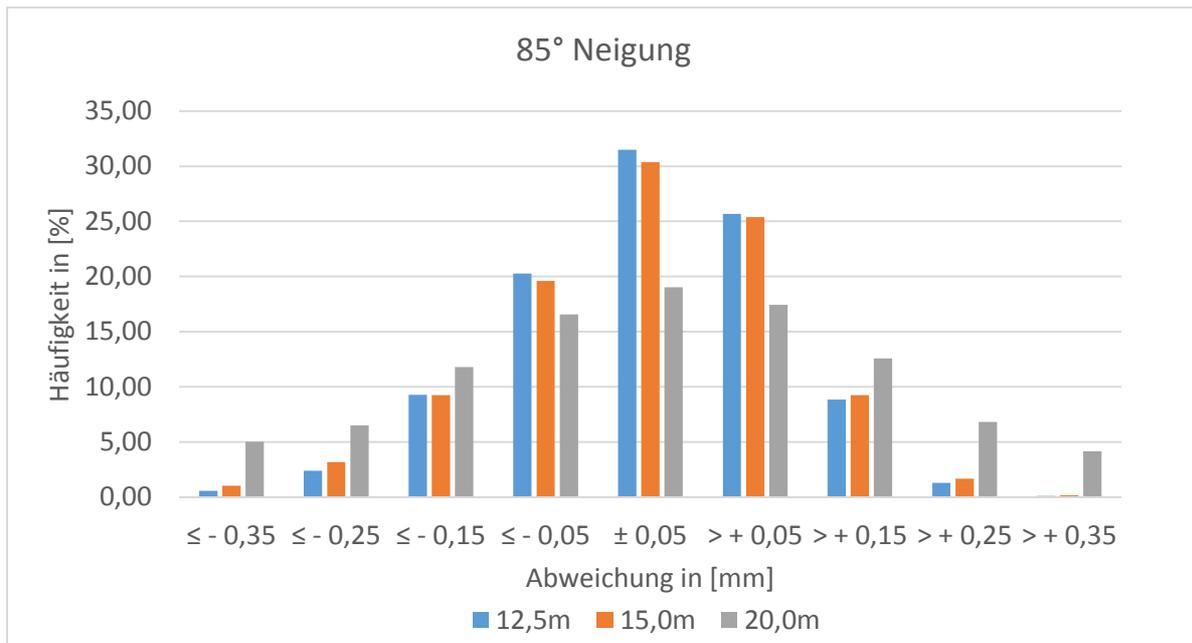


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zur jeweiligen Best-Fit Ebene ab einer Entfernung von 12,5m

In Abbildung 40 sind bereits eine deutliche Verbreiterung der Verteilungskurve und ein kontinuierlicher Anstieg der Streuung mit steigender Entfernung zu erkennen. Das Maximum der Verteilung, bei $\pm 0.05\text{mm}$, fällt bei Objektentfernungen größer 10 Meter bereits um beinahe 10% gegenüber den Werten in Abbildung 39 ab. Speziell die 20 Meter Messung (siehe Abb. 40 grau) sticht dabei hervor. Sie besitzt eine deutlich flachere Verteilungskurve als die Scans bei 12,5m bzw. 15,0m. Das Maximum fällt gegenüber diesen Entfernungen um weitere 11 bzw. 12% ab und bereits über 20% der Abweichungen liegen in einen Bereich größer bzw. kleiner $\pm 0,25\text{mm}$. Leider gibt es vom Hersteller keine Angaben zum Rauschverhalten des Surphaser 100HSX auf größere Distanzen als 10 Meter. Mit einer Standardabweichung von 0,21mm auf 20 Meter liegen die Ergebnisse jedoch im erwarteten Bereich. Der Scanner zeigt somit auch auf größere Entfernungen ein durchaus akzeptables Rauschverhalten.

Abschließend soll noch überprüft werden, ob der Surphaser auch einen ähnlichen Flächenverlauf der Flanschplatte liefert wie er mit dem Messarm ermittelt wurde. Dazu werden für Scan 01 ($\rightarrow 3,5\text{m}/85^\circ$) die Abweichungen von der Best-Fit Ebene entsprechend der einfachen Standardabweichung ($\pm 0,09\text{mm}$) farblich codiert und in Abbildung 41 geplottet. Die Farbe Blau entspricht dabei Werten größer $+ 0,09\text{mm}$ und Rot Werten kleiner $- 0,09\text{mm}$. Die restlichen Abweichungen (grün) befinden sich somit innerhalb der Standardabweichung.

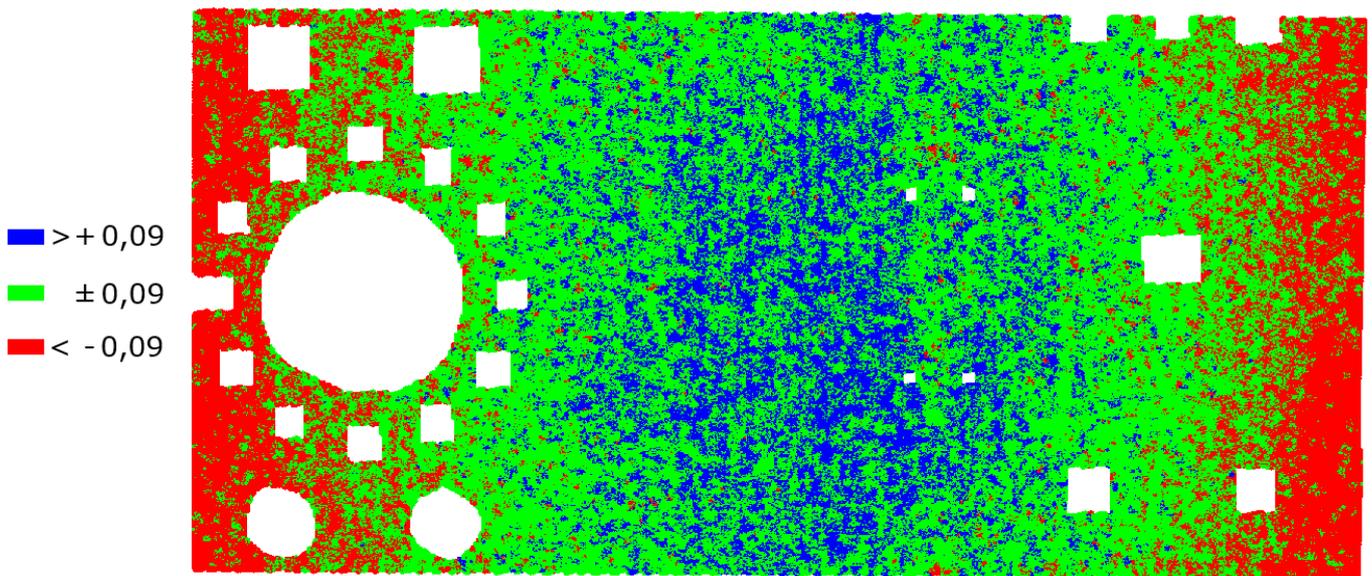


Abbildung 41: Abweichungen zur Best-Fit Ebene für Scan 01, Entfernung 3.5m, Neigung 85°

Im Fehlerbild ist die leichte Wölbung der Flanschplatte, mit einer Erhebung in der Mitte und seitlich abfallenden Rändern, eindeutig zu erkennen. Der Surphaser 100HSX ist somit in der Lage auch die geringfügige Verformung der Platte, von wenigen Hundertstel Millimeter, zu registrieren und abzubilden. Die Wölbung ist auch bei jeder Entfernung und Neigung erkennbar, wenn auch in geringerer räumlicher Auflösung und speziell bei Distanzen größer 10m stärker verrauscht.

4.6.4 Schlussfolgerung des Experiments

Der Surphaser 100HSX liefert eine gute Genauigkeit bei der Abbildung eines ebenen Objektes. Speziell in einem Entfernungsbereich bis ca. 10 Metern zeigt der Laserscanner eine gleichbleibend ausgezeichnete Leistung. Berücksichtigt man die geringere Reflektivität der vermessenen Flanschplatte, so liegen die ermittelten Standardabweichungen von 0,08 – 0,10mm durchaus im Rahmen des vom Hersteller angegebenen Rauschverhaltens von 0,07mm auf 10 Meter Entfernung. Bei größeren Distanzen fehlen leider Referenzwerte des Herstellers, mit einer Standardabweichung von 0,21mm für die 20 Meter Messung liegen die Ergebnisse jedoch ebenfalls im erwarteten und akzeptablen Bereich.

Der Surphaser ist weiters in der Lage geringe Formabweichungen des Prüfkörpers zu registrieren und darzustellen, wobei auch die Neigung des Prüfobjektes keine signifikanten Genauigkeitsverluste verursacht.

4.7 Experiment 6: Test der Genauigkeit der Winkelgeber

4.7.1 Motivation und Zielsetzung

In den bisherigen Experimenten wurde der Surphaser 100HSX bereits eingehend getestet und zeigte dabei großteils ein sehr gutes Messverhalten. Sowohl die Distanzmessgenauigkeit als auch das Rauschverhalten erfüllen die vom Hersteller angegebenen Werte.

Um akkurate Messergebnisse zu erhalten, sind aber auch exakt und gleich präzise arbeitende Horizontal- und Vertikalwinkelgeber notwendig. Basis Software gibt für beide Teilkreise eine Messgenauigkeit von 15 Winkelsekunden an.

In diesem Experiment soll nun getestet werden, ob der Surphaser 100HSX die Horizontal- und Vertikalwinkel auch tatsächlich mit gleicher Genauigkeit ermittelt, oder ob es eventuell zu systematischen Fehlern in den Aufnahmen kommt.

4.7.2 Versuchsaufbau

Für das Experiment werden insgesamt 10 Flachtargets auf einer ca. 2 Meter langen Aluleiste montiert. Die Targets sind dabei entlang einer Geraden in Intervallen von ca. 20 Zentimeter positioniert.

Der Scanner bleibt während des gesamten Experiments stabil auf einem Betonpfeiler montiert. Anschließend wird die Targetleiste in verschiedenen Entfernungen und Höhen zum Surphaser positioniert und sowohl in horizontaler als auch vertikaler Lage gescannt. Es werden 7 unterschiedliche Positionen im Messvolumen realisiert und vermessen, wodurch sich somit insgesamt 14 Scans ergeben. (siehe Abb. 42)

Die verschiedenen Standpunkte decken dabei einen Entfernungsbereich von ca. 2,3 bis 6,7 Metern rund um den Scanner ab und weisen Höhenunterschiede von bis zu 1,7 Metern auf.

Weiters wird die Targetleiste in den Stellungen H1 und V1 auch mit dem Lasertracker vermessen um Sollwerte für die Distanzen zwischen den einzelnen Targets zu erhalten.

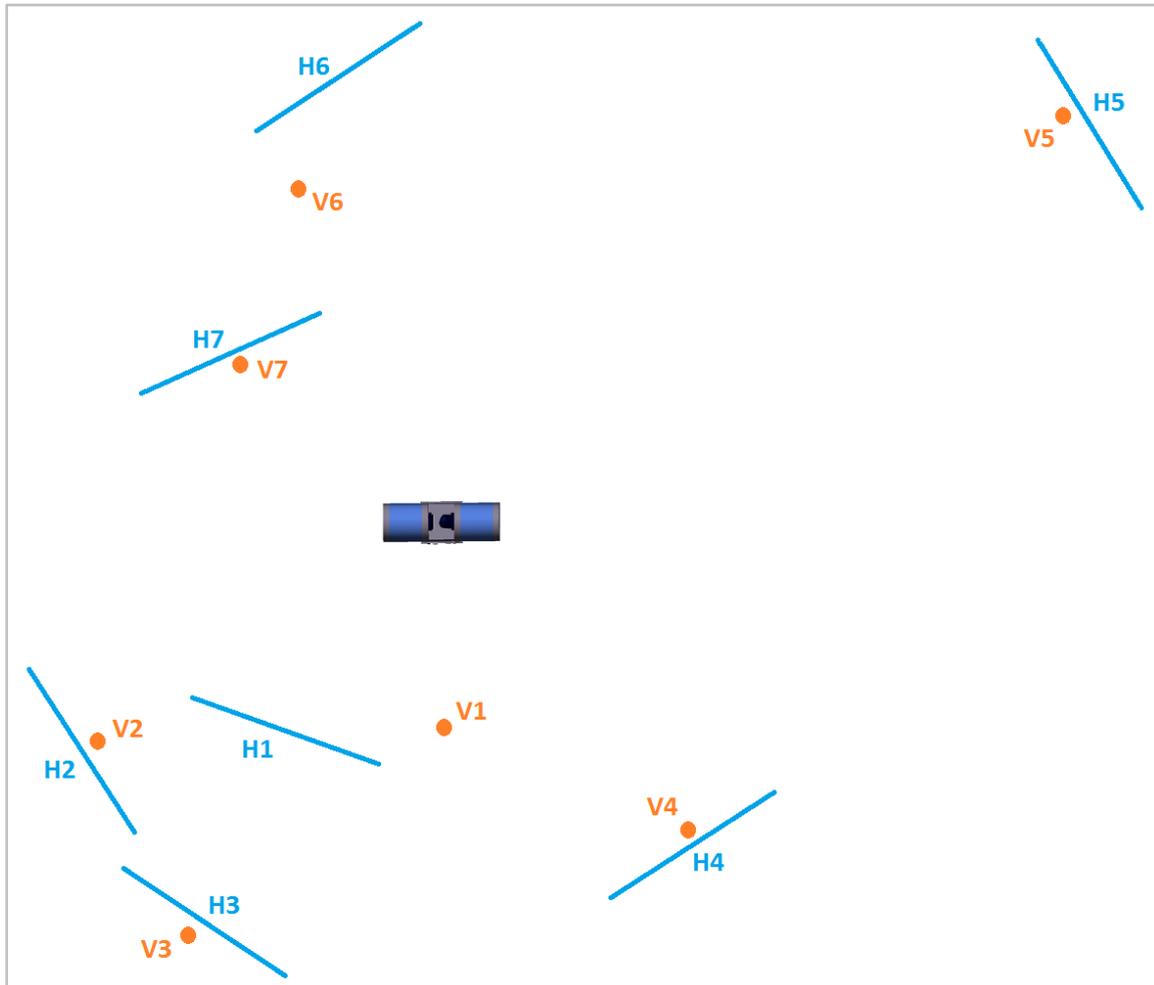


Abbildung 42: Übersichtsplan des Versuchsaufbaus, horizontale Stellungen H1 bis H7 (blau), vertikale Stellungen V1 bis V7 (orange)

4.7.3 Messung und Auswertung

Messung

Da die Leiste aus Aluminium besteht und daher eine gewisse Reflektivität aufweist, wird sie vollständig mit schwarzem Lack besprüht um mögliche Störeinflüsse durch Überstrahlungseffekte während der Messung zu vermeiden. Anschließend werden 10 Magnetnester in ca. 20cm Abständen auf die Leiste geklebt und nach einer ausreichenden Aufwärmphase der Instrumente jeweils mit dem Lasertracker als auch mit dem Laserscanner vermessen.

Bei der Trackermessung tritt jedoch die Problematik auf, dass die Reflektorkugel von Nest zu Nest bewegt und jeweils eingesetzt werden muss. Um korrekte Ergebnisse zu erhalten, ist es daher von entscheidender Bedeutung, dass es während dieses bzw. durch diesen Vorgang zu keiner Bewegung der Targetleiste kommt. Aus diesem Grund wird der Prüfkörper vor der Messung mit Hilfe zweier Schraubzwingen, wie in Abb. 43 gezeigt, fixiert.

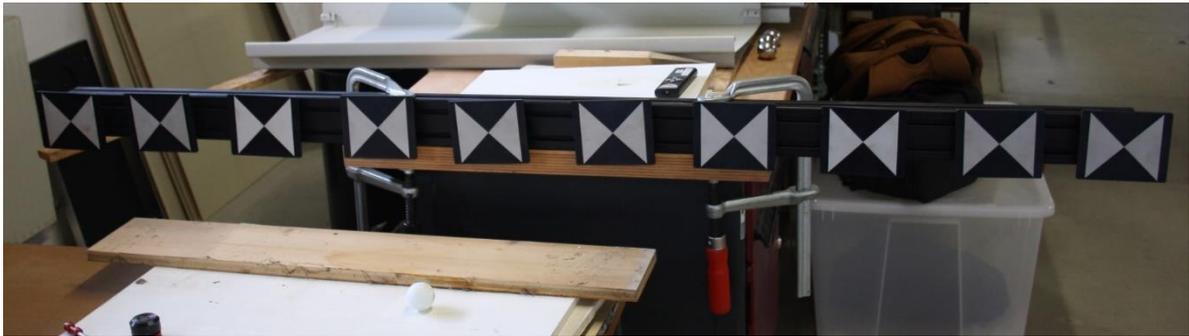


Abbildung 43: Befestigung und Messung der Targetleiste in horizontaler Position H1

Das gleiche Prozedere wird auch für die vertikale Stellung der Targetleiste durchgeführt. (siehe Abb. 44)

Die Trackermessung erfolgt in dreifacher Ausführung im höchsten Genauigkeitsmodus („precise mode“) und in beiden Lagen.

Für die Laserscannermessung wäre eine Fixierung der Targetleiste nicht notwendig, da hier genügend Flachtargets zur Verfügung stehen um alle Magnetnester gleichzeitig zu bestücken. Um den Ablauf des Experiments zu vereinfachen und zu beschleunigen, werden daher in weiterer Folge die Standpunkte H2 bis H7 bzw. V2 bis V7 nur noch gescannt und auf zusätzliche Trackermessungen verzichtet.

Da durch die Fixierung mittels Schraubzwingen ein Zwang auf die Prüfleiste ausgeübt wird, muss in weiterer Folge jedoch zuerst überprüft werden, ob sich die Trackermessungen für H1 und V1 überhaupt als Referenzwerte eignen.



Abbildung 44: Befestigung und Messung der Targetleiste in vertikaler Position V1

Die Laserscannermessungen werden als Teilscans mit einer Auflösung von 50 LPD x 50 PPD durchgeführt.

Auswertung

Die dreifach mittels Lasertracker gemessenen Koordinaten der Targets unterscheiden sich nur um wenige Hundertstel Millimeter (max. 0,03mm) voneinander, weshalb die Mittelwerte gebildet werden um einen einzelnen Solldatensatz zu erhalten.

Anschließend können aus diesen Referenzdaten die Distanzen zwischen den Targets in allen möglichen Kombinationen berechnet werden. Da es sich um 10 Messpunkte handelt, ergeben sich somit insgesamt $\frac{10!}{(10-2)! \cdot 2!} = 45$ Möglichkeiten.

Vergleicht man nun die berechneten Distanzen der horizontalen Stellung mit jenen der vertikalen, ergeben sich Abweichungen im Bereich von $\pm 0,05$ mm. Auf eine Messentfernung von ca. 2,5m müsste der Lasertracker eigentlich genauere Ergebnisse liefern, weshalb davon auszugehen ist, dass die Lagerung und Fixierung durchaus zu leichten Verformungen der Aluleiste führt. Da die Abweichung von $\pm 0,05$ mm jedoch noch immer deutlich unter der Genauigkeit des Surphasers 100HSX liegt, werden die ermittelten Distanzen dennoch als Referenzwerte verwendet.

Im nächsten Schritt werden auch für die Laserscannermessungen alle möglichen Distanzen zwischen den Flachtargets pro Standpunkt berechnet und anschließend der Soll-Ist-Vergleich mit den Referenzwerten des Trackers durchgeführt.

	Max.	Min.	Std. Abw.	Mittel		Max.	Min.	Std. Abw.	Mittel
H1	0,19	-0,10	0,08	0,04	V1	0,17	-0,09	0,08	0,06
H2	0,28	-0,13	0,15	0,10	V2	0,24	-0,15	0,09	0,05
H3	0,09	-0,07	0,05	0,02	V3	0,24	-0,11	0,12	0,08
H4	0,30	-0,20	0,15	0,09	V4	0,36	-0,17	0,16	0,11
H5	0,18	-0,08	0,07	0,04	V5	0,18	-0,06	0,09	0,07
H6	0,16	-0,10	0,07	0,03	V6	0,18	-0,16	0,11	0,07
H7	0,19	-0,20	0,08	-0,03	V7	0,26	-0,04	0,11	0,09

Tabelle 19: Kennzahlen des Soll-Ist-Vergleichs der verschiedenen Standpunkte der Aluleiste in [mm]

Die Kennzahlen in Tabelle 19 zeigen, dass die Messungen in horizontaler als auch in vertikaler Lagerung ähnliche Ergebnisse liefern. Vor allem bei der Standardabweichung treten nur geringfügige Unterschiede auf. Die Werte bewegen sich mit Ausnahme von Scan H2 durchwegs in einem relativ engen Bereich um 0,10mm, wobei allerdings zwei Besonderheiten anzumerken sind.

Zum einen kam es sowohl bei Scan H1 als auch bei Scan V6 (in Tabelle 19 orange hinterlegt) zu einer ungenauen Bestimmung eines einzelnen Flachtargets auf Grund von Überstrahlungseffekten. Wie man im Intensitätsbild von Scan H1 (siehe Abb. 45) erkennt, ist Target Nr. 2 etwas überbelichtet und der Schwarz-Weiß Kontrast somit verringert, wodurch es zu einer etwas ungenauen Bestimmung des Zentrums kommt. Die Abweichungen zu den Soll-Distanzen betragen dabei für Target Nr. 2 durchwegs 0,2 bis 0,3mm. Um eine zu starke Verfälschung der Kennzahlen zu verhindern, sind diese Messungen nicht in Tabelle 19 berücksichtigt. Für die Scans H1 und V6 (→ Target Nr. 5 überbelichtet) fließen daher lediglich 9 Punkte bzw. 36 Distanzen in die Auswertung ein.

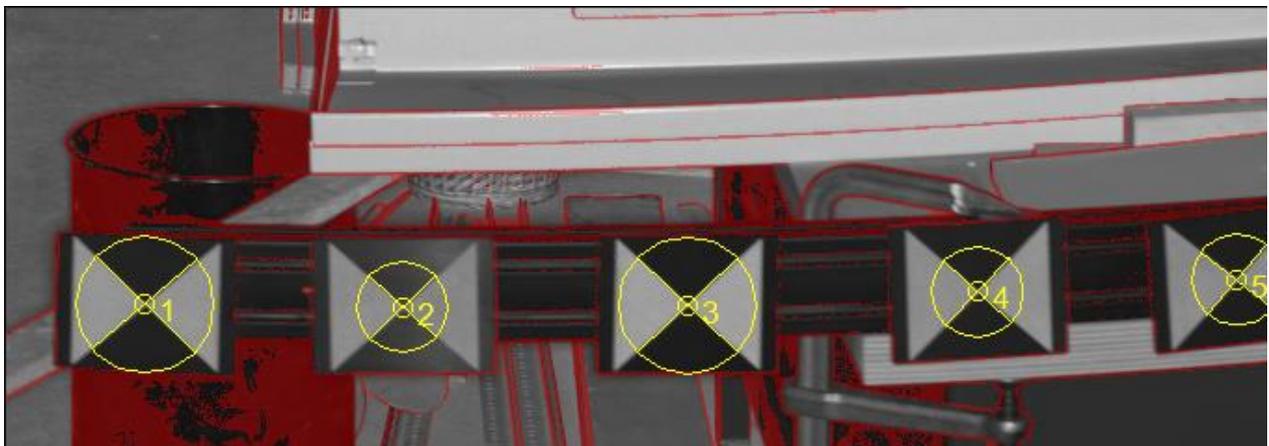


Abbildung 45: Intensitätsbild von Scan H1, Target Nr. 2 überbelichtet

Zum anderen fällt Standpunkt 4 (in Tabelle 19 rot hinterlegt) sowohl bei horizontaler (H4) als auch vertikaler Lagerung (V4) mit hohen Abweichungen auf. Betrachtet man wiederum das Intensitätsbild des Scans, erkennt man, dass die Wahl des Standpunktes relativ ungünstig getroffen wurde. Die Targetleiste wurde nämlich direkt über bzw. vor einem weißen und stark spiegelnden Hintergrund positioniert, wodurch es vermutlich zu Störeinflüssen bei der Messung kam. Die

starken Reflexionen sind in Abbildung 46 unter den Targets Nr. 6 bis 8 deutlich zu erkennen.

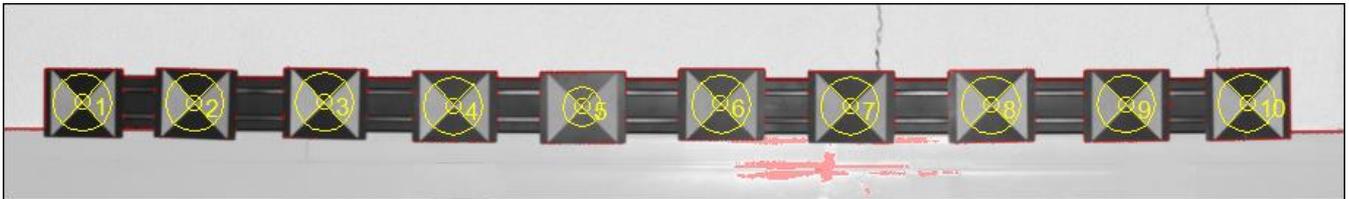


Abbildung 46: Intensitätsbild von Scan H4, starke Reflexionen unter der Targetleiste (rot = zu hohe Intensität)

Betrachtet man die Mittelwerte der Abweichungen in Tabelle 19 so zeigt sich, dass sich die Werte bei horizontaler Lage mit Ausnahme von H7 (-0,03mm) durchgehend im positiven Bereich bewegen. Der Surphaser 100HSX misst die Distanzen zwischen den Targets also im Durchschnitt eher zu kurz. Diese Tendenz verstärkt sich leicht bei der Messung der Targetleiste in vertikaler Lage. Die Mittelwerte verschieben sich hier um einige Hundertstel Millimeter weiter in den positiven Bereich, was auch sehr schön bei Betrachtung der Häufigkeitsverteilung zu erkennen ist.

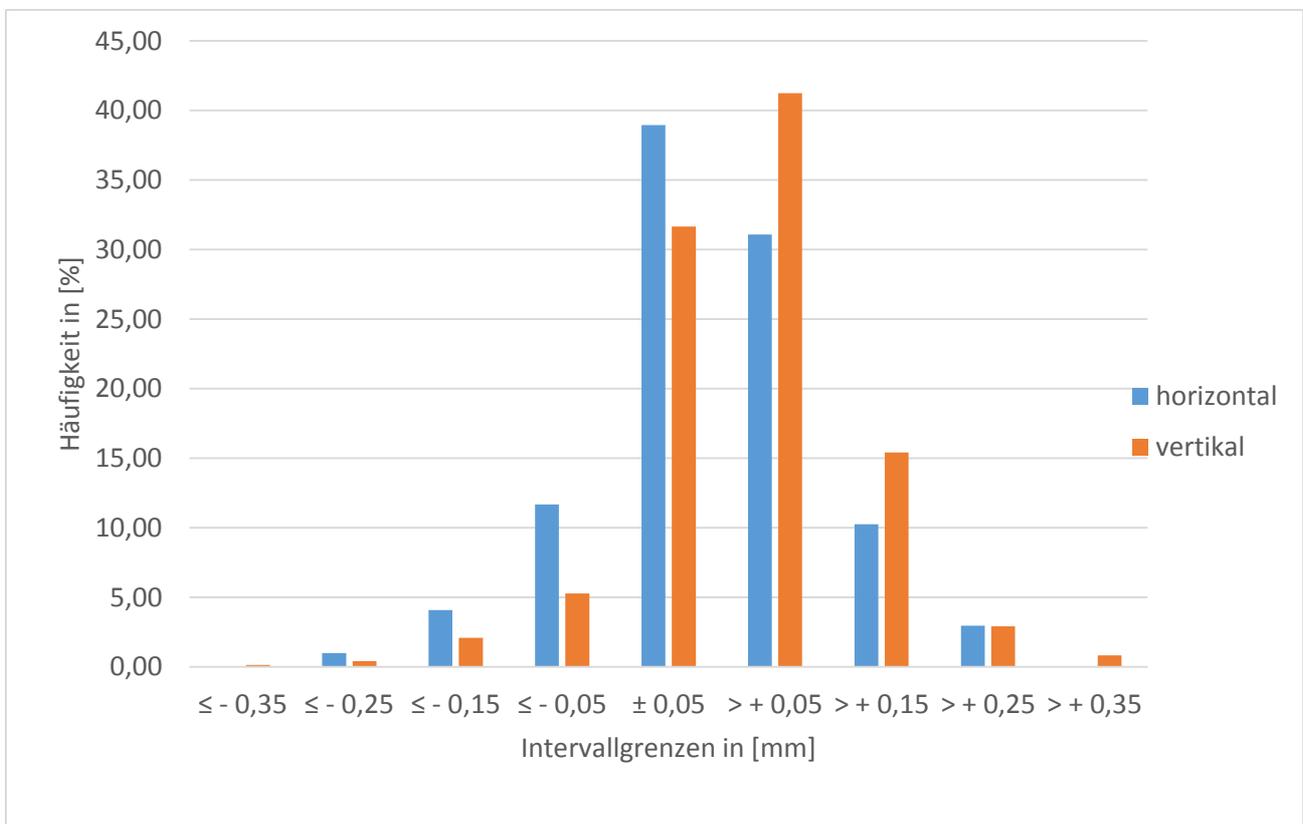


Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen horizontal (blau) und vertikal (orange)

Da die Standardabweichungen in horizontaler bzw. vertikaler Lage nur geringe Unterschiede aufweist, ist auch die Breite der Häufigkeitsverteilung sehr ähnlich. Das Maximum der Verteilung liegt bei vertikaler Lage jedoch bereits eindeutig im positiven Bereich von + 0,05 bis + 0,15mm.

4.7.4 Schlussfolgerung des Experiments

Das Experiment zeigt, dass die Winkelgeber des Surphaser 100HSX durchaus ähnliche Genauigkeiten liefern. Es ist zwar ein leichter Genauigkeitsverlust bei vertikaler Lage der Targetleiste erkennbar, dieser beläuft sich jedoch auf wenige Hundertstel Millimeter und somit deutlich unter der generellen Abbildungsgenauigkeit des Scanners. Weiters haben bereits die Trackermessungen gezeigt, dass die Aluleiste nicht 100% formstabil ist und die unterschiedliche Lagerung im Raum zu leichten Verformungen führt.

Aus diesen Gründen wird die Abbildungsgenauigkeit der beiden Winkelgeber als ausreichend erachtet und die leicht unterschiedlichen Ergebnisse nicht als systematische Fehler interpretiert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Um ein tieferes Verständnis über Genauigkeit und generelles Verhalten des Surphaser 100HSX zu erhalten, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit mehrere Experimente konzipiert und durchgeführt. Die Systemtests sollten dabei einerseits die Herstellerangaben überprüfen und andererseits auch praxisrelevante Fragen des Messalltages beantworten.

Dabei wurden folgende Punkte untersucht:

- 1) Die relative Distanz-Messgenauigkeit auf ein Standardtarget
- 2) Die Wiederholgenauigkeit
- 3) Der integrierte Neigungssensor
- 4) Die Abbildungsgenauigkeit eines räumlichen Festpunktfeldes
- 5) Die Abbildungsgenauigkeit eines ebenen Objektes
- 6) Die Genauigkeit der Winkelgeber

Der Surphaser 100HSX kann dabei in den meisten Experimenten mit durchwegs hervorragenden Leistungen überzeugen:

- Die relative Distanz-Messgenauigkeit liegt stets im Rahmen der Herstellerangaben von $< 0,35\text{mm}$.
- Bis zu einer Distanz von 10 Metern spielt die Neigung der Flachtargets gegenüber der Scanrichtung praktisch keine Rolle. Es muss somit nicht darauf geachtet werden die Targets möglichst frontal zu scannen. Für Entfernungen größer 10 Metern sollte hingegen aufgrund der rasch abnehmenden Punktdichte auf dem Target auf eine geringere Neigung geachtet werden.
- Der integrierte Neigungssensor liefert bei grober Vorhorizontierung ($< 1^\circ$) den Herstellerangaben entsprechende Ergebnisse von ca. 5 Winkelsekunden. Bei stärkeren Verkippungen (z.B. $> 5^\circ$) ermittelt der Sensor zumindest noch gute Näherungswerte für eine anschließende Orientierung mittels Ähnlichkeitstransformation bzw. ICP.

- Der Surphaser 100HSX zeigt grundsätzlich ein gutes Abbildungsverhalten bei der Messung eines 3D-Festpunktfeldes. Jedoch kommt es dabei häufiger zu Fehlmessungen einzelner Festpunkte. Es ist daher bei der Planung des Netzes auf eine gute Verteilung und vor allem eine ausreichende Anzahl an Festpunkten zu achten um einzelne Fehlmessungen kompensieren zu können.
- Der Laserscanner ist in der Lage ein beliebig im Raum positioniertes ebenes Objekt als solches abzubilden und auch geringfügige Formabweichungen des Prüfkörpers zu registrieren. Das Rauschverhalten entspricht dabei den Herstellerangaben.
- Sowohl der Horizontal- als auch der Vertikalwinkelgeber arbeiten in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich und erfüllen die Spezifikationen des Herstellers.

Als negativer Kritikpunkt ist hingegen vor allem die absolute Wiederholgenauigkeit zu nennen. Bei mehrfachem Scannen desselben Testaufbaus weist der Surphaser 100HSX eine eindeutige Driftbewegung auf. Der Laserscanner ist nicht in der Lage zwei hintereinander aufgenommene Punktwolken korrekt zu positionieren. Die Driftbewegung weist dabei eine starke Unregelmäßigkeit auf und ist daher kaum zu modellieren bzw. kompensieren.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft Messvolumen bzw. konkret den Mindestabstand eines messbaren Objektes vom Laserscanner. Laut Hersteller liegt der Scanbereich des Surphaser 100HSX zwischen 1 bis 35 (bzw. 50) Metern. Bei der Messung eines Standardtargets in einer Entfernung von ca. 1,7m zeigten sich jedoch bereits Abweichungen von 1mm und somit deutlich über der eigentlichen Messgenauigkeit des Surphasers. Der angegebene Scanbereich kann somit nicht bestätigt werden.

Abschließend ist auch noch anzumerken, dass der Surphaser 100HSX Strecken tendenziell zu kurz misst, was auf einen Maßstabsfehler schließen lässt. Die Abweichungen liegen jedoch noch im Rahmen der Herstellerangaben.

Ausblick

Die durchgeführten Experimente wurden derart konzipiert um generelle Aussagen zu Genauigkeit und Abbildungsverhalten des Surphaser 100HSX in praxisrelevanten Problemstellungen treffen zu können. Eine genaue Identifikation der Fehlerquellen bzw. eine Kalibrierung des Laserscanners waren nicht Ziel dieser Diplomarbeit.

Die vorgestellten Testszenarien können daher in vielerlei Hinsicht erweitert werden. Für Experiment 6 (Kapitel 4.7) liegt es nahe einen stabileren Messaufbau als mit der verwendeten Aluleiste zu konzipieren und die Laserscannermessungen auch in „zwei Lagen“ durchzuführen um dadurch ein allgemeines Fehlermodell bestimmen zu können. [Muralikrishnan et al., 2013]

In den Experimenten konnte außerdem ein Maßstabsfehler beobachtet werden, eine Steigerung der Distanz-Messgenauigkeit des getesteten Surphaser 100HSX durch eine entsprechende Kalibrierung ist daher durchaus möglich. Verschiedenste Methoden und Ansätze zur sogenannten „self-“ bzw. „on-the-job calibration“ findet man unter anderem in [Lichti, 2007] oder [Reshetyuk, 2009]. In diesem Zusammenhang liegt z.B. auch eine Vergrößerung der Messfläche der in Experiment 5 (Kapitel 4.6) verwendeten Aluplatte nahe um periodische Distanzfehler, wie sie bei Laserscannern typischerweise auftreten, erkennen zu können. [Dorninger et al., 2008]

Abschließend sollte auch die Problematik mit der Wiederholgenauigkeit gemeinsam mit dem Hersteller geklärt werden. Leider war im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht genügend Zeit hier in engeren Kontakt mit Basis Software Inc. zu treten.

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners - [Wagner et al. 2003]

Abb. 2: Flächenhaftes Abscannen - [Niemeier et al., 2002]

Abb. 3: Umlenkprisma - [Kern, 2003]

Abb. 4: Aufnahmeprinzip eines terrestrischen Laserscanners - [Eysn, 2009]

Abb. 5: Prinzip der Impulslaufzeitmessung
[<http://www.laserscanning-europe.com/de/content/impulsverfahren>]

Abb. 6: Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens - [Eysn, 2009]

Abb. 7: Aufnahmeprinzip des Lichtschnittverfahrens - [Kraus, 2004]

Abb. 8: Surphaser 100HSX - [<http://www.surphaser.com>]

Abb. 10: Messaufbau Antastabweichung - [Kern, 2010]

Abb. 11: Messaufbau Abstandsabweichung - [Kern, 2010]

Abb. 12: Böhler-Stern mit $\gamma = 7,5^\circ$ und $b = 62\text{mm}$ - [Kern und Huxhagen, 2008]

Abb. 13: Leica AT 401, mit Sensoreinheit (1) und Controller (2)
[<http://www.leica-geosystems.com>]

Abb. 14: Leica BRR -Kugelprisma (links), magnetischer Prismenhalter (rechts)
[<http://www.leica-geosystems.com>]

Abb. 15: Messarm CimCore Infinte 2.0 mit den Armteilen (1) und (2) sowie
Sensorkopf mit Messtaster (3) - [CimCore Infinite 2.0 Systembroschüre]

Abb. 20: Versuchsaufbau Version 1 - [Basis Software Inc., 2013]

Abb. 22: Vektoren mit eingeschlossenem Winkel
[<https://de.wikipedia.org/wiki/Skalarprodukt>]

7 Literaturverzeichnis

Basis Software Inc. (2013). *Ranging Tests on the Surphaser Laser Scanner*. na

Besl, P.J., McKay, N.D., (1992). *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, February 1992. S. 239-256.

Böhler, W., Vicent, M. B., & Marbs, A. (2003). *Investigating laser scanner accuracy*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(Part 5), 696-701.

Dorning, P., Nothegger, C., Pfeifer, N., & Molnár, G. (2008). *On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners*. Journal of Applied Geodesy, 2(4), 191-204.

Eysn, L. (2009). *Untersuchung und praktische Erprobung des terrestrischen Laserscanners FARO Photon 80*. - Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Ingenieurgeodäsie.

Haring, A. (2003). *Modellierung terrestrischer Laserscannerdaten*. - Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.

Heister, H. (2006). *Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. In: Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006). Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg 2006, S. 15-34.

Hirtl, N. (2009). - *Genauigkeitsuntersuchung Terrestrischer Laserscanner zur Dokumentation von Restaurierungsarbeiten*. - Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.

Kahmen, H. (2006). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. Walter de Gruyter.

Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig.

Kern, F. (2010): *Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laserscanner-Systemen* (Entwurf V.1.0.1), Offenes Forum Terrestrisches Laserscanning, http://www.laserscanning.org/documents/TLSRichtlinie_07.pdf, Stand 09.02.2010.

Kern, F., & Huxhagen, U. (2008). *Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)*. Schriftenreihe des DVW, Band 54, 111-124.

Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie. Band1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage.

Lichti, D. D. (2007). *Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61(5), 307-324.

Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., ... & Milligan, S. (2013). *Volumetric performance evaluation of a laser scanner*. In Proc. ASPE 28th Annual Meeting.

Niemeier, W., Thomsen, S., & Schäfer, M. (2002). *3-D Geometrieerfassung mit Terrestrischen Laser-scannern*. Photogrammetrie und Laserscanning Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility-Management, 15-26.

Pfeifer, N., Haring, A., & Briese, C. (2007). *Automatische Auswertung im terrestrischen Laserscanning*. na.

Reshetyuk, Y. (2006, May). *Calibration of terrestrial laser scanners for the purposes of geodetic engineering*. In 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, Austria.

Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* (Doctoral dissertation, KTH).

Verein Deutscher Ingenieure/Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (2002). *Richtlinie 2634, Blatt 2*, Beuth Verlag, Berlin.

Wagner, W., Ullrich, A., & Briese, C. (2003). *Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche*. VGI-Österreichische Zeitschrift für Vermessung und, 91, 223-235.

Witte, B., Sparla, P. (2015). *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. - Wichmann Verlag.

Wölfelschneider, H. (2009). *Physikalische Prinzipien der Laserscannertechnologie*. Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009): yes, we scan!; Beiträge zum 91. DVW-Seminar am 19. und 20. November 2009 in Fulda