



Peter Bauer, Bsc

# **Formbestimmung von Holzelementen mittels Oberflächenmessung**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ. Prof. Dr. Dipl.-Ing. Werner Lienhart

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

# Danksagung

Ich möchte mich bei folgenden Personen für ihre Unterstützung während dieser Masterarbeit recht herzlich bedanken:

Bei der *holz.bau forschungs gmbh* für die gute Zusammenarbeit und besonders bei Frau Dipl.-Ing. Katarina Bratulic.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Andreas Wurm für die Bereitstellung der Messinstrumente und die freundliche Unterstützung während den Versuchen bei *Geos3D*.

Bei meinen Studienkollegen, Jakob Lidl und Fabian Buchmayer, für die Hilfe bei den Versuchen und die angeregten Diskussionen im Büro.

Bei meiner Familie und meinen Freunden für ihr Interesse und ihre Hilfe.

Bei meinem Betreuer, Prof. Dr. Werner Lienhart, für seine Ratschläge und seine gute Unterstützung während allen Phasen dieser Arbeit.

# Kurzfassung

Diese Masterarbeit ist eine Kooperation mit der *holz.bau forschungs gmbh* und soll einen Arbeitsablauf definieren, mit dem dreidimensionale Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit von Brettschichthölzern erhoben werden können. Das besondere Augenmerk liegt dabei in der praktischen Anwendung des Messkonzepts und in der einfachen Integration in den Fertigungsprozess. Dabei soll das gesuchte System Unebenheiten an einer Holzoberfläche im Submillimeterbereich detektieren. Diese Information wird zur Erforschung der Schraubpressverklebung herangezogen werden, da der benötigte Pressdruck während der Klebung direkt von diesen Unebenheiten abhängt.

Es wird die derzeitige Prüfmethode der *holz.bau forschungs gmbh* untersucht und den modernen Messverfahren aus der Industriemesstechnik gegenübergestellt. Mit einer scannenden Totalstation werden im Messlabor eine Einzelpunktaufnahme, eine dynamische Messung und ein Scan untersucht. In den Daten des Laserscans zeigte sich ein Eindringen der berührungslosen Distanzmessung in das Holz. Was ursprünglich dafür genutzt wurde, um automatisch die Holzgüte zu bestimmen, führt bei Oberflächenmessungen zu erheblichen Problemen. Die Versuche wurden mit einem Industrie Scanner Surphaser 100HSX wiederholt und bestätigten eine signifikante Verfälschung der Messungen durch den Tracheid Effekt.

Es hat sich gezeigt, dass die effizienteste Methode das kontinuierliche Verfolgen und das Messen eines Kugelprismas mit einer Totalstation ist. Um Genauigkeiten entlang der Flächennormale im Submillimeterbereich zu erhalten, muss der Einfluss der Distanzmessung auf die vertikale Komponente durch möglichst parallele Visuren minimiert werden.

## Abstract

This master thesis is a cooperation with the *holz.bau forschungs gmbh* and it should define a workflow for the collection of three dimensional information of the surface properties of glulam timber beams. The main goal is to establish a system for practicable usage and for an easy implementation into the manufacturing process. The measurements should be taken with submillimeter-accuracy to present data for the investigation of the screw glueing process. These surface irregularities are the main impact on the required preassure during the glueing.

In this thesis, the current inspection system at the *holz.bau forschungs gmbh* is investigated and compared to modern systems used in metrology. In the measurment laboratory of the TU Graz investigations to the single measurement mode, the dynamic mode and the scan mode of a scanning total station are carried out. In the scans data it can be seen, that the laserbeam penetrates the wood. What originates in the automated inspection of wood damage now causes problems in the inspection of the surface of timber objects. Investigations with the scanner Surphaser 100HSX confirm the impact of the tracheid effekt on modern day laser scanner.

As it turned out it is the most efficient way to measure the surface of timber objects to track the trajectory of a spherical prism with a total station. The influence of the distance measurement on the vertikal component is minimized by assuring a horizontal line of sight. By this method a submillimeter-accuracy can be achieved.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Schraubpressverklebung . . . . .	1
1.1.1	Fehlereinflüsse auf die Klebefuge . . . . .	2
1.1.2	Forschung auf dem Gebiet der Schraubpressverklebung . . . . .	2
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	3
1.3	Normen im Holzbau . . . . .	3
1.3.1	Definition von Toleranz im Hochbau . . . . .	3
1.3.2	Regelung von Prüfmethode der Ebenheit im Hochbau . . . . .	4
1.3.3	Fertigungstoleranzen von Holzelementen und Genauigkeitsanforderungen . . . . .	5
1.4	Tracheid Effekt . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundzüge der Sensorik für polare Messsysteme</b>	<b>7</b>
2.1	Einführung in das Prinzip einer Winkelmessung . . . . .	7
2.2	Automatische Feinzielung mit motorisierten Totalstationen bei Leica Instrumenten . . . . .	7
2.3	Einführung in verschiedene Technologien der Distanzmessung . . . . .	7
2.3.1	Impulsverfahren . . . . .	8
2.3.2	Phasenvergleichsverfahren . . . . .	8
2.3.3	Wellenform-Digitalisierungstechnologie . . . . .	9
2.3.4	Interferometer . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Messmethoden zur Oberflächenmessung</b>	<b>10</b>
3.1	Derzeitige Methode der <i>holz.bau forschungs gmbh</i> . . . . .	10
3.2	Systeme aus der Industriemesstechnik . . . . .	11
3.2.1	Lasertracker . . . . .	11
3.2.2	Laserscanner . . . . .	12
3.2.3	Multistation . . . . .	13
3.2.4	Koordinatenmessgerät . . . . .	14
3.2.5	Messarm . . . . .	15
3.2.6	Alignment mit optischen Systemen . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Grundlagen zum Raumbezug von 3D Koordinaten</b>	<b>17</b>
4.1	Koordinatensysteme . . . . .	17
4.1.1	Absolute Koordinatensysteme . . . . .	17
4.1.2	Objektbezogene Koordinatensysteme . . . . .	18
4.2	Transformation zwischen Koordinatensystemen . . . . .	18
4.3	Deformationsanalyse mit Punktwolken . . . . .	18
4.4	Schätzung einer mathematischen Fläche durch eine Punktwolke . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Auswahl der Methoden zur Oberflächenmessung</b>	<b>21</b>
5.1	Laserscanning . . . . .	21
5.2	Automatisches Verfolgen und kontinuierliches Messen eines Kugelprismas . . . . .	21
5.3	Realisierung eines Bezugs zwischen den einzelnen Experimenten . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Test mit 50 cm Holzelementen und Leica MS60</b>	<b>25</b>
6.1	Versuchshypothesen . . . . .	25
6.2	Aufbau und Ablauf der Versuche im Labor der TU Graz . . . . .	25
6.2.1	Holzproben . . . . .	26

6.2.2	Das Messlabor . . . . .	27
6.3	Oberflächenauflösung von Messmethoden mit Probe I (stark gebogen) . . . . .	27
6.4	Detaillierte Untersuchung des Scans von Probe I (stark gebogen) . . . . .	29
6.5	Test auf Eindringen von reflektorlosen Messungen in Probe II . . . . .	30
6.6	Untersuchung des Eindringverhaltens von berührungslosen Messungen . . . . .	31
6.7	Wiederholbarkeit der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas . . . . .	35
6.8	Zusammenfassung der Versuche mit der Multistation MS60 . . . . .	36
<b>7</b>	<b>Test mit 50 cm langen Holzelementen und dem Surphaser 100HSX</b>	<b>38</b>
7.1	Versuchshypothese . . . . .	38
7.2	Aufbau und Ablauf der Versuche im Büro von Geos3D . . . . .	38
7.3	Auswertung der Messungen mit dem Surphaser 100HSX . . . . .	39
7.4	Abtastung der Probe III mit dem Lasertracker AT402 . . . . .	40
7.5	Scan von Probe II und Probe III mit dem Surphaser 100HSX . . . . .	41
7.6	Zusammenfassung der Versuche bei Geos3D . . . . .	43
<b>8</b>	<b>Genauigkeitsuntersuchung einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas mit der MS60</b>	<b>45</b>
8.1	Abschätzung der nötigen Genauigkeit der Distanzmessung . . . . .	45
8.2	Atmosphärische Korrekturen . . . . .	45
8.3	Nullpunktkorrektur . . . . .	46
8.4	Ausrichtung des Prismas . . . . .	47
8.5	Die Kugelgestalt des Taylor-Hobson Prismas . . . . .	49
8.6	Evaluierung der Genauigkeit einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas . . .	50
8.6.1	Aufbau des Messschlittenversuchs im Messlabor . . . . .	50
8.6.2	Ergebnisse aus dem Messschlittenversuch im Messlabor . . . . .	51
8.7	Zusammenfassung der Genauigkeitsuntersuchung . . . . .	53
<b>9</b>	<b>Test mit 4 m Holzelementen unter Realbedingungen</b>	<b>55</b>
9.1	Konzept einer Referenzmessung mit Digitalnivellier DNA03 . . . . .	55
9.1.1	Abschätzung des Einflusses eines Ziellinenfehlers auf das Flächennivellement .	57
9.1.2	Nivellierüberprüfung nach Förstner . . . . .	57
9.2	Aufbau und Ablauf der Versuche im Labor für Bauphysik . . . . .	58
9.3	Messung von Stichmaßen mit 2 m Richtlatte . . . . .	59
9.4	Ergebnisse mit 4 m Brettschichtholzrippe (BSH Rippe) für die kontinuierliche Messung eines Kugelprismas . . . . .	60
9.5	Ergebnisse mit einem 4 m langen und stark deformierten Holzbrett . . . . .	61
9.6	Untersuchung der Richtlatte zur Ebenheitsprüfung . . . . .	63
9.7	Zusammenfassung der Versuche am Labor für Bauphysik . . . . .	64
<b>10</b>	<b>Messung von BSH Rippen und Brettsper Holzplatte (BSP Platten) bis zu 10 m Länge in einem Holzbetrieb</b>	<b>66</b>
10.1	Aufbau und Ablauf der Messungen in einem Holzbetrieb . . . . .	66
10.2	Untersuchung von Datenlücken im Messfile . . . . .	67
10.3	Ergebnisse der Messung in dem Holzbetrieb . . . . .	68
10.4	Zusammenfassung der Messungen und Anmerkungen zum Messablauf . . . . .	70

<b>11 Zeitliche Gegenüberstellung und Wirtschaftlichkeit</b>	<b>72</b>
11.1 Gegenüberstellung von untersuchten Messmethoden . . . . .	72
11.2 Zeitaufwand der Messungen mit Taylor-Hobson Prisma . . . . .	73
<b>12 Zusammenfassung der Versuche und Ausblick</b>	<b>75</b>

## Abkürzungsverzeichnis

**TU Graz** Technische Universität Graz

**ATR** *automated target recognition*

**BSH Rippe** Brettschichtholzrippe

**BSP Platte** Brettsperrholzplatte

**Leica** Leica Geosystems AG

**WFD** Wellenform-Digitalisierungstechnologie

# 1 Einleitung

Die Konstruktion von Bauwerken oder Werkstücken und die Messtechnik sind untrennbar miteinander verbunden. Seit der Mensch die Mittel besitzt einen Baum zu fällen und ihn zu verarbeiten, hat er mit Schnüren und Zollstöcken versucht seine Form und seine Länge zu bestimmen.

Über die Jahrhunderte hinweg haben sich die Werkstücke und die Baustoffe verändert. Hütten wurden zu Hochhäusern in gigantischen Ausmaßen und Wasserräder zu Turbinen, deren Fertigung Präzision im Submillimeterbereich verlangt. Mit den komplexer werdenden Bauteilen musste sich auch die Messtechnik weiterentwickeln, um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden.

Eine Konstante in der Geschichte der Baustoffe stellt nach wie vor das Holz dar. Als einer der ältesten und nachhaltigsten Baustoffe, die wir kennen, erfüllt es noch heute die Anforderungen einer modernen Bautechnik. Die Entwicklung hat aber auch vor dem Holz nicht halt gemacht. Mit ihm werden Hochhäuser errichtet und Hüllen für Smartphones hergestellt. Wie jeder Baustoff wird es ständig weiterentwickelt und verbessert. Man forscht an neuen Techniken in der Produktion von Holzprodukten, der Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse und an innovativen Wegen, einzelne Holzteile miteinander zu verbinden.

Eine solche Verbindung zwischen mehreren Holzelementen ist das zentrale Thema dieser Masterarbeit. Die Forschungsarbeit zum Thema *Formbestimmung von Holzelementen mittels Oberflächenmessung* ist Teil eines größeren Projekts der *holz.bau forschungs gmbh* zum Thema Schraubpressverklebung. Die Technische Universität Graz (TU Graz), die Joanneum Research Forschungsgesellschaft und zahlreichen Unternehmen aus der Holzindustrie haben sich zu dieser Forschungsgesellschaft zusammengeschlossen. Sie beschäftigen sich mit der Prüfung und Erforschung von Holzbauteilen und Holzverbindungen seit dem Jahr 2003.

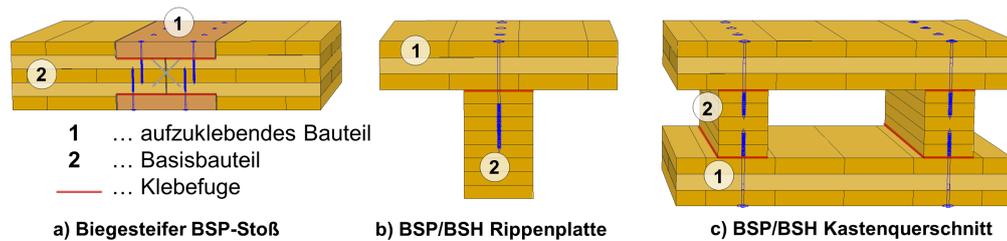
## 1.1 Schraubpressverklebung

Mit der Schraubpressverklebung können mehrere Holzelemente miteinander verbunden werden, um ein neues Bauteil zu formen. Es muss Druck auf die Holzelemente ausgeübt werden, damit die vollflächige Benetzung der Klebeflächen, sowie die geforderte Klebefugendichte gewährleistet werden kann. Die vollflächige Benetzung und die Dicke der entstehenden Klebefuge sind die entscheidenden Parameter für die Tragfähigkeit des zusammengesetzten Bauteils.

Der Druck der auf die Klebefuge ausgeübt wird, muss daher auch in der Lage sein geringe Unebenheiten der Bauteile auszugleichen. Die Schraubpressverklebung stellt eine einfache Methode dar, den benötigten Druck über Schrauben auf die Holzelemente aufzubringen. Diese Methode ist damit eine Alternative zur herkömmlichen Methode, den Druck über hydraulische oder pneumatische Pressen aufzubringen.

Die wichtigsten Parameter für eine erfolgreiche Schraubpressverklebung sind das Holz der Bauelemente, die Schrauben über die der Druck aufgetragen wird und der Klebstoff, der die Fuge zwischen den Elementen füllen muss.

In Abbildung 1 werden die einzelnen Komponenten der Schraubpressverklebung dargestellt. Das Bauteil besteht aus einem *Basisbauteil*, in dem die Gewinde der Schrauben, die in blau dargestellt werden, ihren Halt finden. Das *aufzuklebende Bauteil* wird über die Schraubenköpfe auf das *Basisbauteil* gepresst. Dadurch entsteht der Pressdruck auf die in rot dargestellten Klebefuge. Die Länge



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung von Varianten der Schraubpressverklebung [ BRATULIC und AUGUSTIN (2016)]

der zusammengesetzten Bauteile kann bis zu 15 m erreichen. Die Breite der Klebefuge hängt von der Breite des *aufzuklebbenden Bauteils* ab. Übliche Abmessungen liegen im Bereich von 10 cm bis 30 cm. Als Bauteile können unterschiedliche Werkstoffe verwendet werden. In dieser Arbeit werden BSP Platten und BSH Rippen aus Fichtenholz untersucht.

### 1.1.1 Fehlereinflüsse auf die Klebefuge

Im Gegensatz zu Stahl oder Beton ist Holz ein lebendiger Rohstoff, der gewachsen ist. Bei der Verarbeitung von Holz ist man mit individuellen Eigenheiten aus dem Leben des Baumes konfrontiert, welche das Ergebnis einer Klebung beeinflussen und somit berücksichtigt werden müssen. Zu diesen Eigenheiten zählen unter anderem die Holzdicke, der Feuchtigkeitsgehalt und Oberflächenanomalien, wie die Jahresringe und Astlöcher.

Neben den physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Holz bestimmt auch die geometrische Form der einzelnen Holzelemente die Tragfähigkeit des fertigen Bauteiles. Verformungen und Windungen im Holzbalken wirken sich auf den notwendigen Druck bei der Pressung aus. Können die Verformungen mit dem Pressdruck nicht kompensiert werden, wirken sich diese auf die Dicke der Klebefuge aus. Bei der Verwendung von Klebstoffen für allgemeine Zwecke liegt die maximal zulässige Dicke der Klebefuge bei 0.3 mm. Die Oberfläche muss in den letzten 24 Stunden davor gehobelt oder geschliffen werden. (BRATULIC und AUGUSTIN, 2016, S. 1-3)

### 1.1.2 Forschung auf dem Gebiet der Schraubpressverklebung

Im Gegensatz zu hydraulischen Pressen wird bei der Schraubpressverklebung der Druck nicht gleichmäßig auf die Klebefläche aufgebracht. Der Pressdruck der Schrauben hängt von der Anordnung der Schrauben, der Gewindelängen und dem Schraubenkopf ab. Die Schrauben dienen nur dem Zweck der Pressdruckaufbringung und haben nach der Aushärtezeit des Klebstoffs keine statische Aufgabe mehr. Bei der Auswahl des Klebstoffes müssen der niedrigere Pressdruck und die ungleiche Druckverteilung berücksichtigt werden. Es wird empfohlen *fugenfüllenden Klebstoff* zu verwenden, da dieser Klebstoff für größere Klebefugendicken geeigneter ist. (BRATULIC und AUGUSTIN, 2016, S. 1-3)

Vom Abstand und damit der Anzahl der verwendeten Schrauben hängen die Kosten und der Arbeitsaufwand für die Schraubpressverklebung ab. Daher ist es das Ziel der *holz.bau forschungs gmbh* die Anordnung der benötigten Schrauben zu optimieren.

Die Schrauben können dann optimal gesetzt werden, wenn der benötigte Pressdruck für die Klebung flächendeckend bekannt ist. Der Pressdruck wird über Modelle berechnet, in denen die geometri-

sche Form als Parameter einfließt. Aus dieser Fragestellung heraus ist diese Masterarbeit hervorgegangen. Aussagen über die Deformationen und Verwindungen der Bauteile zu treffen, um einen wesentlichen Parameter für diesen Optimierungsprozess zu liefern.

## 1.2 Aufgabenstellung

Derzeit gibt es noch kein effizientes Verfahren zur flächendeckenden Formbestimmung von Holzoberflächen im Submillimeterbereich. Diese Masterarbeit soll die Möglichkeiten aus der Industriemesstechnik zusammenfassen, ein geeignetes Messverfahren auswählen und für die Anwendung im Holzbau anpassen.

Verschiedene Methoden aus der Industriemesstechnik sollen untersucht werden. Sie werden hinsichtlich ihrer Eignung für den Baustoff Holz und die Anwendbarkeit für dieses Aufgabengebiet bewertet. Auch sollen die Vor- und Nachteile einer Aufnahme als Einzelpunkt und Punktwolke behandelt werden.

Für ein geeignetes Messverfahren soll ein Arbeitsablauf erarbeitet werden, der die Anforderungen der Schraubpressverklebung erfüllt. Die Gegebenheiten vor Ort in den Produktionen und eine Mobilität des Messsystems müssen berücksichtigt werden. Die Dokumentation des Arbeitsablaufes und die Aufbereitung und Darstellung der erhobenen Daten stellen das Endprodukt dieser Masterarbeit dar.

Für das ausgewählte Messverfahren soll die Genauigkeit im Labor bestimmt werden. Diese Genauigkeit soll in Feldversuchen unter Realbedingungen verifiziert werden.

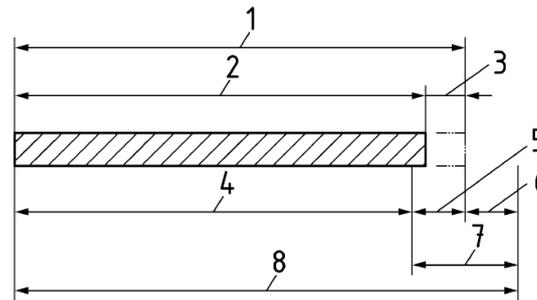
## 1.3 Normen im Holzbau

Jedes Fachgebiet unterliegt einem breiten Spektrum an Normen. Diese Normen definieren Arbeitsabläufe, Begriffe und Werkstücke. Sie sind dafür zuständig Sachverhalte zu vereinheitlichen, um eine Interoperabilität sicherzustellen. Auch garantieren sie für ein Mindestmaß an Qualität.

### 1.3.1 Definition von Toleranz im Hochbau

In der praktischen Anwendung ist man damit konfrontiert, dass Messwerte und Bauteile mit Unschärfen behaftet sind. Es ist dadurch unerlässlich, diese Unschärfen im Ergebnis zu berücksichtigen und zu verdeutlichen. In der Messtechnik existiert ein statistischer Zugang zu diesem Problem. Durch Laborversuche versucht man die Unschärfen der Messinstrumente über Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu beschreiben. Mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung kann man ein Konfidenzintervall definieren, in dem die Messwerte mit einer Prozentangabe streuen werden. In der Ingenieurgeodäsie ist die Verwendung eines Vertrauensniveaus von 95 Prozent üblich. (MÖSER u. a., 2012, S.46)

Im Hochbau wird diese Unschärfe über das Mindestmaß und das Höchstmaß definiert. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, ist die Maßtoleranz die Spannbreite zwischen dem kleinsten zulässigen Maß und dem höchsten zulässigen Maß. Das Istmaß ist das Ergebnis einer Messung, wobei das Nennmaß die Solllänge laut Plan definiert. Als Grenzabweichung werden die Differenzen zwischen dem Nennmaß und dem Höchst- und Mindestmaß bezeichnet. (ÖNORM-DIN18202, 2013–12–15, S.5)



**Legende**

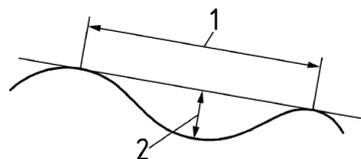
1	Nennmaß	5	Grenzabweichung (-)
2	Istmaß	6	Grenzabweichung (+)
3	Maßabweichung	7	Maßtoleranz
4	Mindestmaß	8	Höchstmaß

**Abbildung 2:** Maßabweichung und Grenzabweichung (ÖNORM-DIN18202, 2013-12-15, S.6)

### 1.3.2 Regelung von Prüfmethoden der Ebenheit im Hochbau

Bei der Prüfung der Ebenheit von Bauteilen können zwei Ansätze verfolgt werden:

*”Die Ebenheit wird durch Einzelmessungen mit einer Richtlatte oder durch Messen der Abstände zwischen rasterförmig angeordneten Messpunkten und einer Bezugsfläche geprüft.”* (ÖNORM-DIN18202, 2013-12-15, S.19)



**Legende**

1	Messpunktabstand
2	Stichmaß zur Ermittlung der Ebenheitsabweichung

**Abbildung 3:** Stichmaß nach(ÖNORM-DIN18202, 2013-12-15, S.6)

In Abbildung 3 wird das Stichmaß schematisch dargestellt. Zur Prüfung wird eine Richtlatte mit bekannter Länge herangezogen. Zu beiden Enden liegt die Richtlatte am zu prüfenden Bauteil auf. Es wird der Abstand zwischen dem Bauteil bzw. dessen Oberfläche und dem Richtlattenmittelpunkt bestimmt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Messung einen definierten Grenzwert nicht überschreitet.

Eine weitere Möglichkeit ist das Messen eines Punktrasters. Für die Prüfung wird eine Bezugsebene definiert, die der Soll-Form des Bauteils entspricht. Das Prüfkriterium hier sind die Abstände der einzelnen Punkte zu der Bezugsfläche.

*”Die Wahl des Messverfahrens bleibt dem Prüfer überlassen. Das angewandte Messverfahren und die damit verbundene Messunsicherheit sind anzugeben und bei der Beurteilung zu berücksichtigen.”* (ÖNORM-DIN18202, 2013-12-15, S.15)

Aus diesem Textabschnitt geht hervor, dass keine weiteren Angaben zur Realisierung der Prüfmethode gemacht werden. In welcher Art und Weise die Prüfung nun umgesetzt wird, ist dem Prüfer überlassen. Als entscheidendes Qualitätsmerkmal muss die Messunsicherheit des Prüfverfahrens angegeben werden.

### 1.3.3 Fertigungstoleranzen von Holzelementen und Genauigkeitsanforderungen

Ein Brettschichtholz ist ein industrielles Produkt, das mit einer genormten Unsicherheit produziert wird. Wesentliche Bestimmungen zu diesem Holzprodukt sind in der EN14080:2013 zu finden.

Die Wahl des Prüfverfahrens hängt von der Genauigkeitsanforderung an die Prüfmethode ab. Aus diesem Grund ist es unerlässlich die Toleranzen zu definieren, mit der Unebenheiten von Bauteilen erkannt werden sollen. In dieser Norm wird sich auf die in Kapitel 1.3.2 erwähnte Prüfmethode mittels Richtlatte und Stichmaß bezogen.

*”Längskrümmung, gemessen als maximal zulässiger Stich über eine Länge von 2 000 mm, ohne Berücksichtigung einer Überhöhung [...] - 4 mm” (ÖNORM-EN14080, 2013-08-01, S.38)*

Die Aufgabenstellung geht aber über die reine Prüfung der einzelnen Holzelemente hinaus. Das Interesse besteht an der Klebefuge selbst. Geringe Unebenheiten können mit Druck durch die Pressung zwar überwunden werden, doch haben sie Auswirkungen auf die benötigte Druckstärke sowie die Druckverteilung. Um den mittels Schrauben realisierbaren Pressdruck weiter erforschen zu können, sollen Unebenheiten in der Größenordnung der zulässigen Klebefugendicke detektiert werden.

Bei den Klebstoffsystemen gibt es eine große Bandbreite an Möglichkeiten. Die Unterschiede in der zulässigen Klebefugendicke reichen von einem Millimeter bis hin zu wenigen Zehntel Millimetern. Bei den Versuchen der *holz.bau forschungs gmbh* wurde ein Klebstoffsystem verwendet, das für eine maximale Fugendicke von 0.3 mm vorgesehen ist. (ÖNORM-B1995-1-1, 2015-06-15, S.200-201)

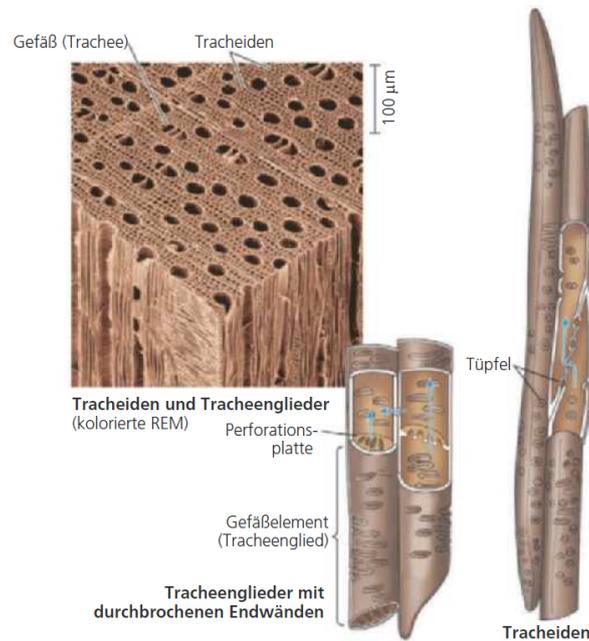
Diese Schranke von 0.3 mm wird daher für die weiteren Überlegungen in dieser Arbeit als Richtwert herangezogen.

## 1.4 Tracheid Effekt

Holz ist ein gewachsener organischer Rohstoff. Es hat kein homogenes Gefüge, sondern es besteht aus den verschiedenen Zellen, die ein Baum zum Leben und zum Wachsen benötigt. Betrachtet man eine Holzoberfläche unter dem Mikroskop, so besitzt das Werkstück keine glatte Oberfläche. Die Oberfläche setzt sich aus einer Vielzahl von Röhrcen und Öffnungen zusammen. Diese Öffnungen sind bei Laubholz die Tracheiden und die Tracheen. Diese Zelltypen sind stark verholzt und sind im funktionsfähigen Zustand bereits tot. Während des Lebens der Pflanze dienen diese Zellen dem Transport von Wasser und Nährstoffen und stützen das Eigengewicht der Pflanze. Tracheen haben einen größeren Durchmesser als Tracheiden, dringen aber nicht sehr tief in das Holz ein, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. Tracheiden im Gegensatz dazu sind dünner und länglicher. Verbunden werden diese Zellen miteinander über durchlässige Zellwände, sogenannte Tüpfel. (CAMPBELL und REECE, 1996, S.1000-1001)

Nadelholz ist entwicklungsgeschichtlich älter als Laubholz, daher hat die Pflanze einen einfache-

ren Aufbau. Für die Festigkeit der Pflanze und die Leitung von Nährstoffen stehen hier keine eigenen Zellen, wie beim Laubholz, zur Verfügung. Es wird hier nur zwischen Frühholztracheiden (dünnwandig) und Spätholztracheiden (dickwandig) unterschieden. Die Großzahl an Zellen ist parallel zum Stamm in der Pflanze orientiert. Einige Zellbänder verlaufen aber orthogonal dazu vom Stamm nach außen. [ (SCHICKHOFER, 2006, S. 32-36)]



**Abbildung 4:** Tracheiden und Tracheen bei Laubholz (CAMPBELL und REECE, 1996, 1001)

Trifft Licht auf eine Holzoberfläche auf, beeinflusst diese inhomogene Oberfläche die Rückstreuung des Lichtes. Das Licht dringt über die Tracheiden in das Holz ein und wird dort gestreut. Wie tief das Licht eindringt, hängt von der Ausrichtung der Fäden ab, in welchem Winkel sie in der Produktion abgeschnitten wurden.

Im Patent von Matthiews und Beech aus dem Jahre 1976 wurde erstmals ein Zusammenhang zwischen der Rückstreuung des Lichts und Beeinträchtigungen in der Holzgüte festgestellt. Über diesen sogenannten Tracheid Effekt können gewisse Aussagen über Astlöcher, Verunreinigungen oder andere Beschädigungen getroffen werden. Seit diesem Zeitpunkt gibt es Systeme für die automatische Sortierung von Holz, die auf dem Tracheid Effekt basieren. Der Aufbau besteht aus mehreren Linienlasern, die im Holz gestreut werden und die Rückstreuung von Kamerasystemen erfasst wird. Läuft das Brett während der Produktion am Förderband unter dem System durch, kann ein Bild des Rückstrahlverhaltens des gesamten Bretts erstellt werden. [(ASTRAND, 1996, S.59) und (ASTRAND und ASTRÖM, 2000, S.6-23)].

## 2 Grundzüge der Sensorik für polare Messsysteme

Im folgenden Kapitel werden das Prinzip einer Winkelmessung erläutert und verschiedene Technologien der Distanzmessung vorgestellt. Ein Verständnis der verschiedenen Komponenten einer Messmethode ist essentiell für das Verständnis des Messsystems an sich.

### 2.1 Einführung in das Prinzip einer Winkelmessung

Die Winkelmessung in Instrumenten geschieht über einen Teilkreis. Dies ist eine scheibenförmige Skala, die an einem fest mit dem Untergrund verbundenen Bauteil fixiert ist. Die Drehachse fällt mit dem Mittelpunkt der Scheibe zusammen. Wird der bewegliche Teil des Instruments verdreht, kann der Winkel über diese Skala bestimmt werden. Bei älteren Baureihen von Theodoliten muss die Ablesung von der Skala optisch über eine Lupe erfolgen. Mit dem Einzug der Elektronik in die Vermessungsgeräte wurde auch diese Ablesung automatisiert. Heutzutage sind diese Teilkreise aus Glas gefertigt und mit einem Strichcode graviert. Die Ablesung geschieht über einen oder mehrere Winkelencoder. Dabei wird der entsprechende Teil des Strichcodes beleuchtet und auf einen Zeilensensor projiziert. Dieser Zeilensensor dekodiert die Projektion in eine Winkelinformation.

### 2.2 Automatische Feinzielung mit motorisierten Totalstationen bei Leica Instrumenten

Zuerst wird überprüft ob sich das Ziel im Sichtfeld der automatischen Feinzielung befindet, ansonsten wird vom Gerät eine Grobsuche gestartet. Bei Instrumenten der Firma Leica wird die Technologie der automatischen Feinzielung *automated target recognition* (ATR) genannt. Es wird Infrarotlicht aktiv ausgesendet, vom Teleskop wieder aufgenommen und über einen Strahlteiler zu einem CMOS Sensor weitergeleitet. Befindet sich ein Prisma im Blickfeld, strahlt es das Infrarotlicht mit hoher Intensität zurück und erscheint als Lichtfleck am CMOS Sensor. Störeinflüsse, wie zum Beispiel Sonnenlicht, können durch die Differenzbildung von Infrarotbildern eliminiert werden. [LEICA-GEOSYSTEMS (2015a)]

Im einfachsten Fall kann aus den Spaltensummen und Zeilensummen der Infrarotintensitäten der Mittelpunkt errechnet werden. Das Intensitätsmuster wird auf Plausibilität überprüft. Wird ein entsprechendes Intensitätsmuster am CMOS Sensor detektiert, werden Ablagen zwischen dem Mittelpunkt des Musters und der Ziellinie berechnet. Die Totalstation korrigiert ihre Ausrichtung um diese Ablagen und steuert das Prisma an. Bei der Ansteuerung gibt es eine Toleranz, wie genau das Prisma angefahren werden muss. Dies soll bewirken, dass bei kleinen Bewegungen des Prismas das Instrument nicht ständig in Bewegung ist. Innerhalb der Toleranz werden die Restklaffungen als Ablagen direkt an die Winkelablesung angebracht. (DEUMLICH und STAIGER, 2002, S.369-370)

### 2.3 Einführung in verschiedene Technologien der Distanzmessung

Eine wichtige Komponente in vielen Messverfahren ist die Distanzmessung. In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die verbreitetsten Technologien gegeben werden.

Grundsätzlich besteht eine Distanzmessung immer aus vier Komponenten und zwar aus dem Sender, einem ausgesandten Signal, einem Reflektor und einem Empfänger. Das Signal wird meist im Infrarotbereich ausgesendet und ist durch die Atmosphäre beeinflusst. Die Veränderung atmosphärischer Rahmenbedingungen wie dem Luftdruck, der Temperatur oder des partiellen Wasserdampfdrucks wirken sich auf die Dichte des Mediums aus durch die das Signal gesandt wird. Eine veränderte

Dichte wirkt sich auf die Geschwindigkeit des Lichts aus und beschleunigt die Ausbreitung bzw. verlangsamt diese. Daher kann dies zu einer Fehlmessung führen, wenn die Atmosphäre nicht in Korrekturtermen berücksichtigt ist. [(MÖSER u. a., 2012, S.253-256)]

Ein Prisma eignet sich als Reflektor, denn im Gegensatz zu einem Spiegel, wird bei einem Prisma das Licht in die selbe Richtung zurückgeworfen, aus der es eingefallen ist. Daher ist keine exakte Ausrichtung nötig, um ein Signal am Empfänger zu erhalten und eine Messung durchzuführen. Das Prisma entspricht in seiner Wirkungsweise der Kombination mehrerer ebener Spiegel, die das Licht nacheinander reflektieren. Daher legt das Licht einen Weg im Prisma zurück, der vom Signal und dem Prisma selbst abhängig ist. Dieser individuelle Wert wird Prismenkonstante genannt und dieser ist für die jeweilige Kombination aus Messgerät und Reflektor zu bestimmen.

Auch besteht die Möglichkeit die Distanzmessung ohne Prisma durchzuführen und die natürlichen Reflexionseigenschaften von Objekten auszunutzen. Hier wird das Signal meist im sichtbaren Bereich ausgesendet. Es ist bei dieser Methode mit einem weniger intensiven Signal am Empfänger zu rechnen und dadurch auch mit einer drastischen Verkürzung der Reichweite der Distanzmessung. Ein entscheidender Faktor ist hier, dass die Oberflächenbeschaffenheiten in Zusammensetzung und Geometrie direkt in die Genauigkeit der Messung mit einfließt. Eine allgemeingültige Aussage über die Genauigkeit kann nicht getätigt werden. [(MÖSER u. a., 2012, S.256)]

### 2.3.1 Impulsverfahren

Das Impulsverfahren stellt das einfachste Prinzip einer Distanzmessung dar. Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird ein Impuls ausgesendet. Dieser wird von einem Reflektor zurückgeworfen und von einem Empfänger aufgenommen. Die Zeit, die zwischen Senden und Empfangen des Impulses vergeht, wird aufgezeichnet. Diese Laufzeit kann über die Lichtgeschwindigkeit in eine Distanz umgerechnet werden.

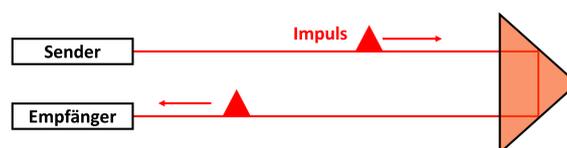


Abbildung 5: Schematischer Ablauf einer Laufzeitmessung

### 2.3.2 Phasenvergleichsverfahren

Beim Phasenvergleichsverfahren wird eine Trägerwelle ausgesendet und von einem Prisma wieder reflektiert. Gemessen wird im Instrument das ankommende Phasenreststück, also der noch fehlende Anteil an der letzten ausgeführten Schwingung.

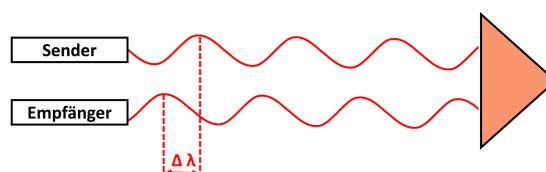


Abbildung 6: Schematischer Ablauf einer Phasenmessung

Abbildung 6 zeigt das Schema einer Phasenmessung und dass sich die Distanz aus dem Phasenreststück und der Anzahl an vollendeten Schwingungen ergibt. Die Anzahl an vollendeten Schwingungen werden Ambiguitäten genannt und werden über eine zweite langwellige Trägerwelle bestimmt. Dieses langwellige Signal wird Grobmaßstab genannt.

### **2.3.3 Wellenform-Digitalisierungstechnologie**

Die Wellenform-Digitalisierungstechnologie (WFD) stellt eine Kombination der Laufzeitmessung und des Phasenvergleichsverfahren dar. Das Prinzip beruht auf einem Start- und einem Stoppimpuls, wie bei der Laufzeitmessung. Jedoch wird nicht ein einzelner Impuls ausgesendet, sondern eine Vielzahl an Impulsen mit einer Frequenz bis zu 2 MHz. Die Impulse, mit denen die Laufzeit gestoppt wird, werden aus mehreren ankommenden Impulsen digitalisiert. Eine WFD Messung kann daher nicht als eine einzige Messung gesehen werden, sondern als eine Kombination mehrerer Signale. [LEICA-GEOSYSTEMS (2014)]

### **2.3.4 Interferometer**

Das Interferometer ist ein Messinstrument zur Bestimmung von Distanzen mit einer Genauigkeit im Mikrometerbereich. Der Aufbau besteht aus einer Laserdiode, aus der ein Laserstrahl ausgesendet wird. Der Laser trifft auf einen Strahlteiler und das Signal wird auf einen Messarm und einen Referenzarm aufgeteilt. Am Ende jedes Arms befindet sich ein Spiegel, der das Signal wieder zum Strahlteiler zurück reflektiert. Im Strahlteiler werden die Signalkomponenten wieder vereinigt und zu einem Photodetektor weitergeleitet, der das Signal wieder aufnimmt. Ist der Messarm und der Referenzarm gleich lang, kommt das gleiche Signal am Photodetektor an, wie aus der Laserdiode ausgesendet wurde. Wird der Messarm verändert, überlagert sich das Licht im Strahlteiler und bildet ein Interferenzmuster. Anhand der Beobachtung der Veränderung des Interferenzmusters kann bestimmt werden, wie weit der Messarm bewegt wird.

### 3 Messmethoden zur Oberflächenmessung

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Messmethoden zur Oberflächenmessung. Dabei wird die Messmethode untersucht, die derzeit bei der *holz.bau forschungs gmbh* zur Oberflächenmessung genutzt wird. Dieser Methode werden moderne Methoden aus der Industriemess-technik gegenübergestellt.

#### 3.1 Derzeitige Methode der *holz.bau forschungs gmbh*

Zur Überprüfung der Ebenheit von Holzelementen wird derzeit eine Richtlatte aus Aluminium mit drei Aussparungen für Messinstrumente verwendet. Die Richtlatte besitzt eine Länge von 1980 mm und die mittlere Aussparung ist 8 mm zur Mitte der Latte versetzt. Dieses Messverfahren ist die Realisierung des in Kapitel 1.3.2 behandelten Stichmaßes und entspricht somit der ÖNORM-EN 14080 2013-08-01.

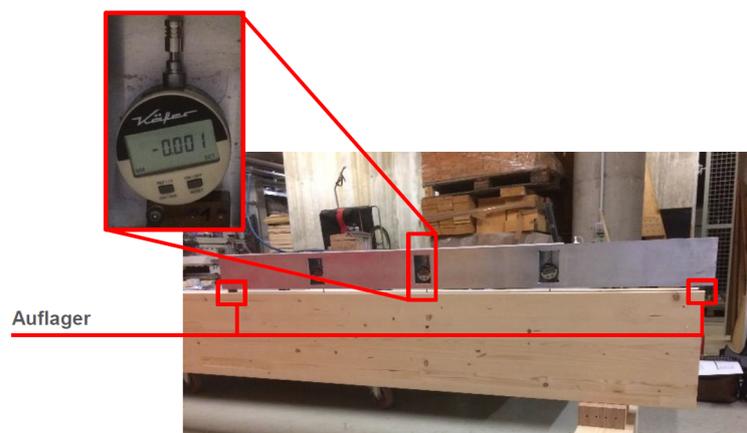


Abbildung 7: Messlatte zur Ebenheitsprüfung

In Abbildung 7 sind drei Aussparungen mit digitalen Messuhren der Firma Käfer zu sehen. Die Messuhren besitzen einen Wegaufnehmer und eine digitale Anzeige. Über diesen Wegaufnehmer wird das Stichmaß gemessen. Vor jeder Messung muss dieses System geeicht werden. Hierzu wird die Aluminiumlatte auf eine ebene Oberfläche gesetzt und die Messuhren werden auf den Wert Null eingestellt. Werden nun Messungen am Objekt durchgeführt, entsprechen die Ablesungen der Messuhren den Differenzen der gemessenen Objektoberfläche zu der Referenzoberfläche bei der Eichung. Die Güte der Messungen hängt entscheidend von der Ebenheit der Referenzebene ab.

Die einzelnen Aufstellungen werden über die drei Messuhren zu einer Messlinie verbunden. Mit jeder Aufstellung werden gleichzeitig drei Punkte gemessen. Durch überlappende Aufstellungen kann ein Bezug zwischen den Punkten hergestellt werden. Bei der Verknüpfung von Aufstellungen, müssen die überlappenden Punkte eindeutig einander zugeordnet werden können. Bautechnische Ungenauigkeiten bei der Realisierung der Punktabstände auf der Richtlatte führen zu einer Genauigkeitsminderung in der Messlinie. Durch das gleichbleibende Aufsetzen der Richtlatte ist diese Messmethode ebenfalls anfällig für systematische Einflüsse. Die Systematik einer fehlerhaften Eichung der Richtlatte pflanzt sich mit der Anzahl an Aufstellungen fort. Die Genauigkeit einer notwendigen Zweilagennmessung, um die systematischen Effekte zu eliminieren, hängt wieder von der bautechnischen Realisierung der Richtlatte, der Punktzuordnung und somit der Wiederholbarkeit ab.

## 3.2 Systeme aus der Industriemesstechnik

Die Messmethoden in der Industriemesstechnik zeichnen sich durch einen hohen Genauigkeitsanspruch aus. Die meisten Anwendungen erfordern eine Präzision im Submillimeterbereich. Das Bezugssystem wird in vielen Anforderungen relativ zu einer Basis oder zum Objekt gewählt. Das Augenmerk liegt auf der inneren Geometrie der Werkstücke und nicht auf deren absolute Lage im Raum. Dadurch unterscheidet sich die Industriemesstechnik von den ingenieurgeodätischen Aufgaben, wie dem Tunnel- oder Kraftwerkbau.

### 3.2.1 Lasertracker

Der Lasertracker ist ein polares Messsystem für den Nahbereich. Mit einem Horizontalwinkel, einem Vertikalwinkel und einer Distanzmessung werden 3D Koordinaten berechnet.



Abbildung 8: AT402 von Leica Geosystems mit Achsenbeschriftung

In Abbildung 8 ist das Schema eines polaren Messsystems dargestellt. Das Gerät besteht aus drei Komponenten: Der Limbus ist über den Untersatz fest mit dem Stativ oder einer Oberfläche verbunden. Auf dem Limbus sitzt die Alhidade, sie ist um die Stehachse beweglich. Ein graduiertes Teilkreis aus Glas am Limbus ermöglicht Horizontalwinkelmessungen. In der Alhidade sitzt das Fernrohr mit den Installationen für die Distanzmessung und die Zielverfolgung. Zwischen der Alhidade und dem Fernrohr ist ein Teilkreis für den Vertikalwinkel. Das Fernrohr kann um die Kippachse gedreht werden.

Der Lasertracker zeichnet sich durch seine präzise Distanzmessung aus. Die Distanz wird mit einem Interferometer bestimmt. Dadurch ist es möglich, Messungen im Mikrometerbereich zu tätigen. Allerdings weist dieses Messverfahren einige Einschränkungen auf. Die Messungen können nur in Relation zu einer Basis getätigt werden, die vor der eigentlichen Messung registriert werden muss. Wird der Messstrahl während der Messung unterbrochen, so wird auch der Bezug zur Basis gestört und diese muss erneut angefahren werden. In modernen Systemen wurde diese Technologie verbessert, um diese Einschränkungen zu entfernen. Man spricht bei dieser Weiterentwicklung des klassischen Interferometers von einem *Absolute Distance Measurement*.

Die Messungen des Lasertrackers erfolgen nicht direkt am Objekt sondern auf einen Reflektor oder auf eine Probe. Ein gängiger Reflektortyp ist der *Corner Cube Reflektor*. Dabei handelt es sich um drei senkrecht aneinander gefügte Planspiegel, die in einem Kugelgehäuse verklebt sind.

Dieser Reflektor ist in drei Größen erhältlich, mit einem Durchmesser von 75 mm, 1.5 Zoll oder 0.5 Zoll. Mit einer Probe ist es möglich, Punkte auch indirekt zu messen, wenn sie schwer zugänglich sind, oder von anderen Bauteilen verdeckt werden. (LÖFFLER, 2002, S.169-177)

Als Beispiel für dieses Messsystems, wird aufgrund der Verfügbarkeit in dieser Masterarbeit, der AT402 von Leica angeführt.

**Tabelle 1:** Spezifikationen der Unsicherheiten des Leica AT402 [ HEXAGON (2015)]

Kategorien	Typische Werte
Winkelmessung	$\pm 7.5\mu\text{m} + 3\mu\text{m}/\text{m}$
Distanzmessung	$\pm 5\mu\text{m}$

In Tabelle 8 sind die Spezifikationen des Leica AT402 Lasertrackers abgebildet. Die Unsicherheiten der Winkelmessung und der Distanzmessung befinden sich im Mikrometerbereich. Rechnet man diese Angabe der Winkelmessung in ein Winkelmaß um, so entspricht dies einer Unsicherheit von 0.3 mgon bis 0.2 mgon auf 4 m bis 30 m. Der AT402 kann einen Reflektor oder eine Probe automatisch verfolgen. Die Messungen werden über einen Auslöser als Einzelmessungen getätigt. Die Genauigkeitsspezifikationen des Leica AT403 Lasertracker sind ident mit dem AT402, jedoch sind mit dem AT403 auch kontinuierliche Messungen möglich.

### 3.2.2 Laserscanner

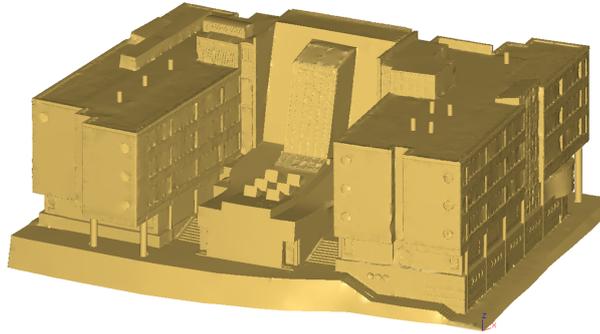
Der Laserscanner ist ein Messinstrument, das es ermöglicht in kurzer Zeit eine große Anzahl an Punkten zu messen. Das Messprinzip basiert wie beim Lasertracker auf einer Polarpunktbestimmung. Die Installationen für die Distanzmessung befinden sich nun in der beweglichen Alhidade, denn das Zielfernrohr wird durch einen Spiegel ersetzt. Je nach Bauform rotiert der Spiegel oder führt eine wippende Bewegung aus. Dieser Spiegel führt den Laserstrahl der Distanzmessung in die Ziellinie und zum Objekt. Der Vertikalwinkel repräsentiert die Verdrehung des Spiegels. Über dieses Prinzip können Punkte mit einer Messrate bis zu einer Million Hertz gemessen werden. Professionelle Laserscanner erreichen im Normalfall eine Genauigkeit von mehreren Millimetern. Die einzelnen Punkte werden reflektorlos am Objekt gemessen, daher hängt die Punktgenauigkeit stark von der Oberfläche ab. Eine ungünstige Ausrichtung, ein rauer Verputz, ein schwach reflektierendes Material, oder eine poröse Oberfläche, können zu groben Fehlern führen.



**Abbildung 9:** Scan der Steyrergasse 30 der TU Graz

In Abbildung 9 wird das Ergebnis eines Scans eines Gebäudes dargestellt. Während des Scans wird das Objekt im Raster abgetastet. Die Punkte sind am gesamten Objekt verteilt und beinhalten keine topologischen Informationen. Man spricht von einer Punktwolke. Um Geometrien und Aussagen

aus dem Scan abzuleiten, müssen die Punkte über Flächen miteinander verbunden werden. Diesen Arbeitsschritt nennt man modellieren. Die einzelnen Punktwolken einer Messkampagne können über Passpunkte miteinander verknüpft werden.



**Abbildung 10:** Modell der Steyrergasse 30 der TU Graz

Man erkennt in Abbildung 10 das Modell des gescannten Gebäudes. Die Punktwolke ist nun ein mathematisches Objekt mit dem Operationen durchgeführt werden können. Die Modellierung ist ein essentieller Teil bei der Verarbeitung von Punktwolken. Durch die schnelle Aufnahme vor Ort und die intensive Nachbearbeitung verlagert sich die Arbeitszeit vom Außendienst in den Innendienst.

Laserscanner unterscheiden sich in der Bauform je nach Anwendungsgebiet. Die Bestimmung der Ebenheit von Holzelementen erfordert eine hohe Genauigkeit im Submillimeterbereich. In den Fabrikhallen sind die Holzträger zugänglich, was eine Aufstellung direkt beim Objekt ermöglicht. Eine Reichweite des Scanners von wenigen Metern ist für diese Anwendung ausreichend. Als Vertreter der professionellen Nahbereichsscanner wird hier der Surphaser HSX von Basis Software Inc. angeführt.

**Tabelle 2:** Spezifikationen des Surphaser 100HSX [ Basic-Software-Inc. (2013)]

Kategorien	IR 100HQ	IR 100HS
Empfohlene Arbeitsdistanz	1 m -35 m	1 m - 50 m
Rauschen in der Distanz bei 90 % Reflektivität	0.07 mm @ 10 m	0.16 mm @ 10 m
Rauschen in der Distanz bei 10 % Reflektivität	0.41 mm @ 10 m	0.30 mm @ 10 m

Die Tabelle 2 zeigt die Spezifikationen der Genauigkeit für verschiedene Versionen von Industrie Scannern. Der Surphaser SR 100 zeichnet sich durch eine sehr hohe Genauigkeit aus und ist auf 7 m in der Reichweite beschränkt. Die Geräte Surphaser IR 100HQ und IR 100HS sind baugleich. Der Unterschied in der Reichweite und der Genauigkeit ist auf variable Software zurückzuführen.

### 3.2.3 Multistation

Die Multistation ist eine Kombination aus einer motorisierten Totalstation und einem Laserscanner. Im Gegensatz zu Lasertrackern, muss eine Totalstation große Distanzen bis zu mehreren Kilometern abdecken können. Hierfür wird in den Totalstationen eine Laufzeitmessung oder eine Phasenmessung verwendet. Die Phasenmessung erreicht eine Genauigkeit von wenigen Millimetern und ist ein guter Kompromiss zwischen Reichweite und Distanz. Die Totalstation gilt als Allrounder für alle Vermessungsaufgaben. Zu einer Multistation wird eine Totalstation, wenn eine Funktion zum Laserscanning integriert ist.

In dieser Masterarbeit eignet sich der Einsatz einer Multistation, da mit diesem Instrument alle Möglichkeiten der Polarpunktaufnahme untersucht werden können. Man kann Einzelmessungen tätigen, ein Prisma dynamisch verfolgen lassen oder ein ganzes Objekt einscannen. In dieser Vielzahl an Möglichkeiten und der Kombination der Messmethoden liegt auch der Vorteil dieses Instruments. Man kann die Punktwolke um signifikante Objektpunkte erweitern und am Instrument durch einen koordinativen Anschluss orientieren.

**Tabelle 3:** Spezifikationen MS60 Leica [ LEICA-GEOSYSTEMS (2015b)]

Genauigkeit (Hz, V)	manuell, automatisch	1" (0.3 mgon)
Reichweite Distanzmessung	mit GPR1 Prisma	1.5 m bis 10000 m
Reichweite Distanzmessung	ohne Prisma	1.5 m bis 2000 m
Genauigkeit Distanzmessung	mit GPR1 Prisma	1 mm + 1.5 ppm / typisch 1.5 sek.
Genauigkeit Distanzmessung	ohne Prisma	2 mm + 2 ppm / typisch 1.5 sek.
Messpunktgröße bei 50m	ohne Prisma	8 mm x 20 mm
Max. Reichweite / Rauschen	1000 Hz Scanning	300 m / 1.0 mm bei 50m
Max. Reichweite / Rauschen	250 Hz Scanning	400 m / 0.8 mm bei 50m
Max. Reichweite / Rauschen	62 Hz Scanning	500 m / 0.6 mm bei 50m
Max. Reichweite / Rauschen	1 Hz Scanning	1000 m / 0.6 mm bei 50m
Motorisierung	Piezzo Antrieb	Max. 200 gon pro sek.

Die Tabelle 3 ist ein Auszug aus dem Datenblatt der Multistation Leica MS60. Vergleicht man die Genauigkeiten der Distanzmessung mit der eines Lasertrackers ist die Genauigkeit der MS60 deutlich niedriger. Vergleicht man die Frequenz der Punktaufnahme mit einem Laserscanner ist die Messrate deutlich niedriger. Ihre Stärke ist aber die Kombination der Möglichkeiten von beiden Messsystemen.

### 3.2.4 Koordinatenmessgerät

Koordinatenmessgeräte sind das verbreitetste Verfahren, um die Geometrie von Werkstücken zu erfassen. Aufgrund der leichten Verständlichkeit des Prinzips und der hohen Genauigkeit haben sie den Weg in viele Fertigungsprozesse gefunden.

In Abbildung 11 wird ein Koordinatenmessgerät der Firma Zeiss abgebildet. Bei dieser Bauart wird ein 3D Koordinatensystem in der Fertigungshalle realisiert. Die Halterung mit dem Tastkörper kann über Schlitten und Führungsschienen im Raum bewegt werden. Diese Führungsschienen sind mit Wegabnehmern ausgestattet und bilden die Achsen des Koordinatensystems. Das Werkstück wird im Inneren der Maschine platziert. Der Messbereich wird durch die Längen der Führungsschienen begrenzt. Mit einem solchen Gerät erreicht man eine Genauigkeit von wenigen Mikrometern. Aufgrund der hohen Verbreitung gibt es viele Bauformen für unterschiedliche Anwendungen und Größen. Große Koordinatenmessmaschinen besitzen die Kapazität für einen Lastkraftwagen.

(LÖFFLER, 2002, S.269-273)

Eine Koordinatenmessmaschine könnte auch in den Fertigungsprozess von Holzträgern eingebunden werden. Die Dimension des Holzträgers verlangen aber nach einer entsprechenden Baugröße der Einrichtung. Dies könnte die Wirtschaftlichkeit und die Einsatzmöglichkeiten verringern. Wird

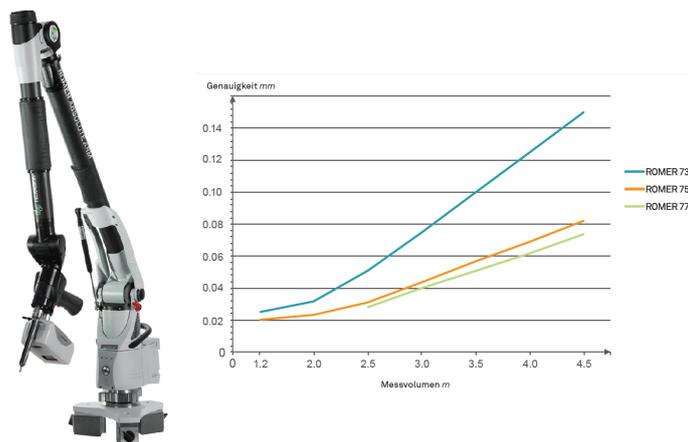


**Abbildung 11:** Koordinatenmessmaschine der Firma Zeiss [Bild: [www.zeiss.at/messtechnik](http://www.zeiss.at/messtechnik)]

ein kleineres System gewählt, das auf dem Förderband installiert wird und der Träger vorbeigeführt wird, muss die Genauigkeit der Lagerung hinterfragt werden. Hier kann es zu einer Genauigkeitsminderung kommen.

### 3.2.5 Messarm

Der Messarm basiert auf dem Prinzip eines Polygonzugs. Die Gelenke des Messarmes sind mit Stangen verbunden. Die Längen dieser Verbindungsstücke sind durch die Konstruktion bekannt und repräsentieren die Distanzen in einem Polygonzug. Die Richtungen werden durch die Winkelmessungen in den Gelenken bestimmt. Durch dieses Prinzip können die Koordinaten des Tastkörpers durch polares Anhängen bestimmt werden. Eine präzise Messung der Winkel in den Gelenken und dem Wegfallen einer Distanzmessung führt zu einer hohen Genauigkeit. [HEXAGON (2017)]



**Abbildung 12:** Romer Messarm von Hexagon [HEXAGON (2017)]

Der Romer Messarm wird hier in Abbildung 12 als Beispiel angeführt. Die erreichbare Genauigkeit hängt von der Auslenkung und von der Version ab. Diese Abbildung zeigt, dass der Messarm bis auf eine Länge von 4.5 m ausgelenkt werden kann. Dabei verschlechtert sich die Genauigkeit der Version 73 auf maximal 0.14 mm. Es kann gesagt werden, dass für die Messung kleinerer Abschnitte auf Holzträgern, ein Messarm eine mögliche und portable Lösung ist. Aber übersteigt die Dimension des Objekts die Reichweite des Messarms, ist die adäquate Messung großer Dimensionen

mit diesem Verfahren nicht möglich, da unterschiedliche Aufstellungen nur schwer miteinander verknüpft werden können.

### 3.2.6 Alignment mit optischen Systemen

Das Alignment mit optischen Systemen realisiert eine Bezugsrichtung im Raum. Relativ zu dieser Bezugsline können Bauteile ausgerichtet werden oder Ablagen zu Zwischenpunkten gemessen werden. Die einfachste Realisierung eines optischen Alignements ist das Fluchtfernrohr. Bei dieser Methode wird das Fernrohr auf ein Ziel ausgerichtet. Die Bezugslinie ist damit durch das Fadekreuz des Fernrohrs und dem Mittelpunkt des Ziels definiert. Bewegt man das Ziel entlang einer gekrümmten Oberfläche, so bewegt es sich von der Bezugslinie und dem Sehstrahl weg. Wird das Ziel mit einer Mikrometerschraube angehoben oder abgesenkt, bis es sich wieder in der Visur befindet, hat man die Abweichung zur Bezugslinie in diesem Punkt bestimmt. Mit einem solchen System können Genauigkeiten bis zu 0.2 mm auf eine Distanz von 30 m erreicht werden. (LÖFFLER, 2002, S.117)

Eine weitere Möglichkeit zur Realisierung einer Bezugsrichtung ist die Autokollimation. Bei dieser Methode kann ein Spiegel orthogonal zu einer Bezugslinie ausgerichtet werden. Moderne Systeme verwenden einen Laserstrahl zur Definition der Bezugslinie. Trifft ein Laserstrahl orthogonal auf einen Spiegel auf, wird er zum Ausgangspunkt zurück reflektiert. Ist der Spiegel verkippert, trifft der Laserstrahl nicht mehr am Ausgangspunkt auf. Der Auftreffpunkt ist, um die Verkippung des Spiegels, versetzt zum Ausgangspunkt. Dieser Versatz wird an der Sendeeinheit über ein CCD Array bestimmt. Für die Ausrichtung des Spiegels muss der Spiegel um den gemessenen Versatz korrigiert werden.

Bewegt man den Spiegel entlang einer Oberfläche, so führen Unebenheiten zu Abweichungen in der Ausrichtung des Spiegels. Diese Abweichungen in der Auslenkung, können in Unebenheiten umgerechnet werden. Ein Beispiel eines solchen Systems ist der Digitale Ultra-Zweiachsen Autokollimator der Firma Taylor-Hobson. Mit diesem Instrument können Verkippungen mit einer Genauigkeit von 0.2 Arcsekunden bestimmt werden. [TAYLOR-HOBSON (2015)]

Durch die fehlende Distanzmessung können keine 3D Geometrien gemessen werden. Es ist eine Aussage über die Häufigkeit und Größe der Unebenheiten nur entlang einer Messlinie möglich. Messlinien können nicht miteinander in Verbindung gebracht werden.

## 4 Grundlagen zum Raumbezug von 3D Koordinaten

Die Messungen und das Bestimmen von Koordinaten, sind nur ein Teil im Arbeitsablauf in jeder geodätischen Aufgabe. Ebenfalls wichtig ist der Raumbezug der Koordinaten, die Prozessierung der Daten und das Vergleichen der Daten zu einem Referenzwert. Erst durch diese Schritte können Informationen aus den Daten gewonnen werden.

### 4.1 Koordinatensysteme

Mit einem Koordinatensystem beschreibt man eindeutig einen Punkt im Raum. Die häufigsten Koordinatensysteme in der Messtechnik sind kartesische Koordinatensysteme. In diesen Systemen bilden orthogonale Achsen jeweils eine Koordinatenebene. Die Anzahl an Achsen definiert die Ordnung des Koordinatensystems. Unterschieden wird zwischen einem linksdrehenden und einem rechtsdrehenden System. Der Unterschied besteht in der Definition der Hauptachse  $X$ .

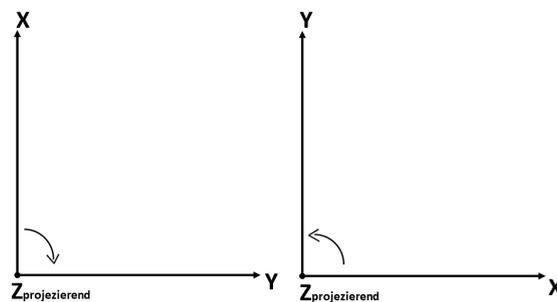


Abbildung 13: geodätisches System (links) und mathematisches System (rechts)

Wie in Abbildung 13 ergibt sich der Drehsinn durch die Drehung der  $X$ -Achse in die  $Y$ -Achse mit Blickrichtung vom Ursprung zur  $Z$ -Achse. Die linksdrehenden Koordinatensysteme sind historisch bedingt häufig in der Landesvermessung gebräuchlich. Hier spielt die Nordrichtung eine übergeordnete Rolle und wird daher als Hauptachse angesehen.

#### 4.1.1 Absolute Koordinatensysteme

Absolute Koordinatensysteme stellen einen großflächigen Raumbezug her. Sie können die Position der Erde im Sonnensystem beschreiben, die Lage eines Landes auf der Erdoberfläche oder die Lage eines Gebäudes innerhalb der Landesgrenzen. Definiert werden diese Koordinatensysteme durch einen Ursprung und zwei Achsen. Die dritte Achse ergibt sich aus der Bedingung der Orthogonalität der Achsen zueinander. Für globale Koordinatensysteme wird der Erdmittelpunkt als Ursprung gewählt. Dabei muss zwischen dem Gravitationszentrum und dem geometrischen Zentrum unterschieden werden. Die Rotationsachse der Erde bildet die  $Z$ -Achse. Für ein erdfestes Koordinatensystem bildet die  $X$ -Achse die Verbindung zwischen dem Ursprung und dem Schnitt des Nullmeridians mit der Äquatorebene. Für ein raumfestes Koordinatensystem wird die  $X$ -Achse von der Schnittgeraden der Äquatorebene mit der Rotationsebene der Erde um die Sonne gebildet. Der sogenannte Frühlingspunkt bildet eine Konstante im Sonnensystem.

Absolute Koordinatensysteme auf der Erdoberfläche werden überwiegend durch den Äquator und die Nordrichtung definiert. (HOFFMANN-WELLENHOF u. a., 2003, S.19-27)

### 4.1.2 Objektbezogene Koordinatensysteme

In der Industriemesstechnik steht das Objekt im Vordergrund, denn die Aufgaben sind hier die Überprüfung von Toleranzen, die Steuerung und Zusammenführung von Bauteilen und die Erfassung von Schwingungen. Bei diesen Messungen ist die absolute Lage nebensächlich, sondern es ist wichtig, dass ein Bezug zum Objekt zwischen den Messepochen besteht.

Zu diesem Zweck wird ein Koordinatensystem für das Objekt definiert. Wie in Kapitel 4.1.1 bereits erwähnt wird ein kartesisches Koordinatensystem durch drei Punkte im Raum ausreichend beschrieben. Dies können die Eckpunkte des Werkstücks sein, markante Punkte auf der Oberfläche oder auch markierte Punkte im Raum, die einen Bezug zum Objekt besitzen (z.B. im Fertigungsprozess).

## 4.2 Transformation zwischen Koordinatensystemen

Mit Rotationen und Translationen stellt man einen Bezug zwischen unterschiedlichen Koordinatensystemen her. Die Orthogonalität der Systeme bleibt bei der Helmert-Transformation erhalten. Drei Drehwinkel um die jeweiligen Achsen  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , drei Translationen  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  und ein Maßstab  $(m)$ , überführen ein kartesisches Koordinatensystem A in ein Koordinatensystem B. Die Parameter für die Transformation können über Identpunkte in beiden Systemen bestimmt werden. (HOFFMANN-WELLENHOF u. a., 2003, S.19-27)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^{(B)} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + m \cdot R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^{(A)} \quad (1)$$

Die Drehmatrix R besteht aus den Einzeldrehungen um die jeweiligen Achsen:

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad R(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad R(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Wird eine Helmert-Transformation von einem Links- in ein Rechtssystem durchgeführt, muss dies beim Vorzeichen der Y-Achse berücksichtigt werden.

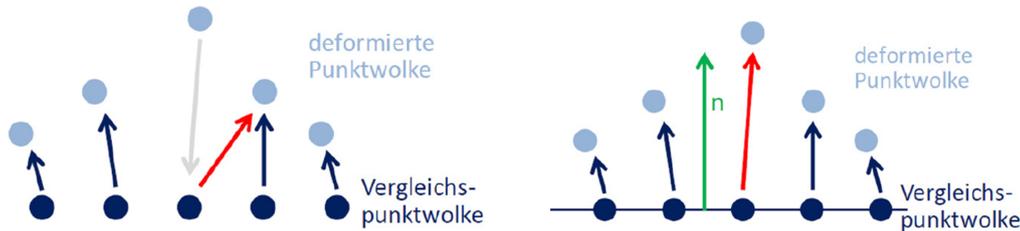
## 4.3 Deformationsanalyse mit Punktwolken

Als Deformationsanalyse versteht man das Aufdecken einer Veränderung zwischen zwei Messepochen. Grundvoraussetzungen für eine solche Analyse sind das selbe Koordinatensystem der Messepochen und die exakte Zuordnung der untersuchten Punkte in beiden Systemen. Bei der Messung von einzelnen Punkten ergibt sich die exakte Zuordnung schon durch den Charakter der Stabilisierung des Messpunktes. Ein Prisma oder eine Zieltafel markieren einen Punkt im Raum, der sich reproduzieren lässt.

Bei der hochfrequenten und reflektorlosen Erfassung von Punkten, ist der klassische Zwei-Epochen-test durch Fehlen von Identpunkten nicht mehr anzuwenden. Über die Geometrie der Punktwolke und der Punkte zueinander müssen erst idente Punkte gefunden werden.

Die einfachste Methode ist der Cloud-to-Cloud-Vergleich (C2C). Dabei wird die geometrische Distanz für die Suche korrespondierender Punkte genutzt. Einem Punkt wird der nächste Nachbar

in einer anderen Epoche zugeordnet. Gibt es grobe Deformationen in der Punktwolke, kann diese Abstandsberechnung zu Fehlern führen und die Analyse verfälschen. Die Berechnung eines lokalen Normalvektors um einen definierten Bereich, kann diese Zuordnung stützen. Korrespondierende Punkte werden dann entlang dieser Flächennormale gesucht, wie in Abbildung 14 dargestellt wird.



**Abbildung 14:** C2C Vergleich ohne (links) und mit (rechts) lokaler Modellierung (HOLST u. a., 2016, S.43)

Wird eine gesamte Punktwolke vermascht und die Flächennormalen aus dem globalen Modell berechnet, spricht man von einem Mesh-to-Cloud-Vergleich (M2C). Die Daten der Epoche Zwei liegen immer noch als Punktwolke vor. Werden beide Punktwolken vermascht und die Differenzen über die Flächennormalen berechnet, spricht man von einem Mesh-to-Mesh Vergleich (M2M). (HOLST u. a., 2016, S.39-47)

#### 4.4 Schätzung einer mathematischen Fläche durch eine Punktwolke

Eine Ebene wird im Raum durch drei Punkte beschrieben. Eine Punktwolke besteht aus tausenden von Punkten und könnte nahezu unendlich viele Dreierkombinationen bilden, um Ebenen zu berechnen. Will man die Ebene finden, welche die Punktwolke am besten repräsentiert, muss man alle Punkte in die Berechnung miteinbeziehen. Nun muss man ein überbestimmtes Gleichungssystem lösen, in dem die Information noch durch Messrauschen auf diesen Daten verzerrt wird. Eine zufriedenstellende Lösung ist die Schätzung der Ebene durch die Daten in der Weise, dass die Quadrate der Differenzen zwischen der Ebene und den Punkten minimal werden und dass die Summe der Differenzen Null ergibt. Ein bewährtes Modell für einen Kleinsten-Quadrate-Schätzer ist das Gauß-Markov Modell

$$\vec{l} = A \cdot \vec{x} + \vec{e} \quad (3)$$

In Formel 3 ist das Gleichungssystem für einen Beobachtungsvektor  $l$  angeführt. Dieser Vektor wird gebildet aus einer Matrix  $A$ , die das funktionale Modell enthält, einem Parametervektor  $x$  und die Residuen  $e$ . Der funktionale Zusammenhang ist der mathematische Hintergrund zwischen dem Beobachtungsvektor und den Parametern. Der funktionale Zusammenhang einer Ebene wird in Formel 4 dargestellt.

$$Z(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \quad (4)$$

Befüllt man nun Formel 3 mit dem funktionalen Zusammenhang aus Formel 4 ergibt sich Formel 5.

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \vec{e} \quad (5)$$

Die Schätzung der Parameter wird in Formel 6 für ein lineares Gleichungssystem beschrieben. Die Matrix  $P$  ist eine Kovarianzmatrix und steuert die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen. (NIEMEIER, 2008, S. 133-135)

$$\vec{x} = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot \vec{l} \quad (6)$$

Ist der funktionale Zusammenhang nicht linear, muss das Modell linearisiert werden. Im Sinne einer Taylor Approximation werden die partiellen Ableitungen des Modells nach den entsprechenden Parametern berechnet. Die Designmatrix  $A$  wird aus diesen partiellen Ableitungen gebildet. Wie bei einer Taylor Approximation benötigt man einen Entwicklungspunkt als Startwert für das Modell. Die Lösung muss iterativ berechnet werden. In Formel 6 muss von der direkten Berechnung der Parameter auf die Schätzung von Zuschlägen zu Startwerten übergegangen werden.

Über Formel 7 kann die Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter berechnet werden.

$$\sum(\hat{x}) = (\hat{e} \cdot \hat{e}) / (n - m) \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (7)$$

mit

$$\hat{e} = \vec{l} - A \cdot \vec{x} \text{ und } \text{size}(A) = [n, m] \quad (8)$$

## 5 Auswahl der Methoden zur Oberflächenmessung

Im Kapitel 3.2 wurden mehrere Systeme aus der Industriemesstechnik vorgestellt. Aufgrund der dargelegten Unterschiede und Besonderheiten war eine Auswahl zu treffen.

### 5.1 Laserscanning

Das Laserscanning ist ein Verfahren, welches in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen hat. Durch die Weiterentwicklung der Computer und den ständig wachsenden Arbeitsspeichern und Prozessoren ist eine adäquate Verwaltung und Prozessierung der Daten möglich geworden. Durch die Handlichkeit der Systeme und der raschen Datenakquisition, haben sich die Laserscanner rasch über den geodätischen Bereich hinaus verbreitet.

Genau wegen diesem Wachstum und der großen Verbreitung, muss diese Technologie auch kritisch hinterfragt werden. Denn die Punktwolke als schnelles Ergebnis, gute Herstellerangaben und die mannigfaltigen Anwendungsmöglichkeiten laden dazu ein, die Begriffe, wie Genauigkeit und Präzision, etwas zu vernachlässigen.

Diese Vielseitigkeit stellt aber auch das Potential dieser Technologie dar und da das Augenmerk dieser Arbeit auf der Erfassung von Objektoberflächen liegt, darf dieses Verfahren hier nicht fehlen. Es muss auf seine Eignung getestet werden. Es werden unterschiedliche Bauweisen von Scannern verwendet, um Aussagen unabhängig von der Technologie der Distanzmessung tätigen zu können.

### 5.2 Automatisches Verfolgen und kontinuierliches Messen eines Kugelprismas

Diese Methode vereint die Punktdichte des Laserscannings mit der höheren Genauigkeit einer Distanzmessung auf ein Prisma. Das Ergebnis ist die Trajektorie des bewegten Prismas. Hierfür wird das Prisma in einem Tastkörper montiert und über eine Oberfläche bewegt, damit die gemessene Trajektorie von den Unebenheiten der Oberfläche beeinflusst wird. Dieser Tastkörper muss so konstruiert sein, dass sein Mittelpunkt mit dem des eingelassenen Prismas zusammenfallen. Eine mögliche Bauart eines solchen Tastkörpers ist das Kugelprisma der Firma Taylor-Hobson. Bei den Messungen für diese Masterarbeit liegt kein original Kugelprisma der Firma Taylor-Hobson vor, sondern ein Nachbau aus dem Katalog *geodesie industrielle - J.Baechler & Fils*. Jedoch wird es im Katalog auch als Bauart nach Taylor-Hobson angeführt. Aus diesem Grund wird in der weiteren Arbeit das verwendete Kugelprisma auch als "Taylor-Hobson Prisma" bezeichnet werden. Dieser Prismentyp wird, im weiteren Text, immer in Verbindung mit dem automatischen Verfolgen und dem kontinuierlichen Messen, durch die MS60 angeführt werden.



Abbildung 15: Kugelprisma der Bauart "Taylor-Hobson"

Das Gehäuse des Prismas in Abbildung 15 ist eine Kugel mit einem Durchmesser von 88.9 mm.

Das Prisma ist vom Typ ein Standard GPR1 Prisma, das gewöhnlich auch für Netzmessungen, Monitoring und Katastermessungen eingesetzt wird. Wie aus der Tabelle 3 im Kapitel 3.2.3 bekannt, besitzt eine Distanzmessung im Einzelmodus eine Genauigkeit von 1 mm, zuzüglich einer Distanz abhängigen Komponente von 1.5 ppm auf ein GPR1 Prisma. Die Winkelgenauigkeit ist mit 3 cc um einiges höher. Stellt man nun diese Spezifikationen den Anforderungen an eine Klebefuge aus Kapitel 1.3.3 gegenüber, befindet sich nur die Winkelgenauigkeit in einem Bereich, der für die Ebenheitsprüfung von Holzelementen interessant ist. Daher gilt es den Einfluss der Distanzmessung im Messkonzept so gering wie möglich zu halten.

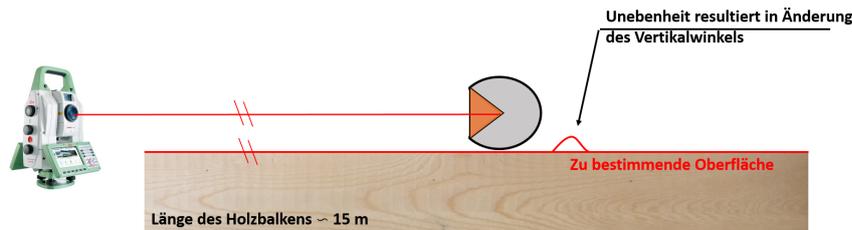


Abbildung 16: Messkonzept mit Kugelprisma

In Abbildung 16 wird gezeigt, dass sich das Messkonzept an dem optischen Alinement im Kapitel 3.2.6 orientiert. Grundüberlegung ist, eine möglichst parallele Visur, mit der zu messenden Holzoberfläche. Die Dicke der Klebefuge hängt von den Amplituden der Unebenheiten ab, daher ist man an der vertikalen Auslenkung interessiert. Die Winkelmessung besitzt den größten Einfluss auf diese Komponente. Die Unsicherheit der Distanzmessung beeinflusst in erster Linie die horizontale Lagegenauigkeit des Punktes. Die Anforderungen an die horizontale Lagegenauigkeit sind um eine Potenz niedriger.

Man muss während der Messung eine annähernd horizontale Visur sicherstellen, denn mit einer größeren Auslenkung der Visur gegenüber der Oberfläche, nimmt auch der Einfluss der Distanzmessung auf die vertikale Komponente wieder zu. Die Abweichung dieser Visur soll  $\pm 5^\circ$  nicht übersteigen, worauf in Kapitel 8.1 genauer eingegangen wird.

### 5.3 Realisierung eines Bezugs zwischen den einzelnen Experimenten

Der Bezug der Daten zwischen den Experimenten wird über Markierungen am Objekt hergestellt. Jedes Testobjekt wird mit mindestens vier Transformationspunkten ausgestattet, um die rechteckige Form der Oberfläche zu repräsentieren und um eine Überbestimmung in der Transformation zu gewährleisten. Die Punkte werden mit einem Kreuz ersichtlich gemacht. Der Mittelpunkt wird mit einer Körnung versehen, um die Wiederholbarkeit zu steigern. Vor jedem Experiment werden diese Transformationspunkte über ein Prisma als Einzelpunkte bestimmt.

In Abbildung 17 werden die Experimente durch Punktwolken in blau und in gelb dargestellt. Sie befinden sich in allgemeinen Lagen im Raum und können über die Transformationspunkte (rot) ineinander gedreht werden. Bei der Transformation werden nur 6 Parameter geschätzt, da der Maßstab als konstant angesehen wird. Die Punktwolken befinden sich nun in einem gleichen Koordinatensystem. Die Genauigkeit der Transformation hängt von der Bestimmung der Transformationspunkte ab.

In Abbildung 18 liegen die beiden Punktwolken in einem gleichen Koordinatensystem vor. In Ka-

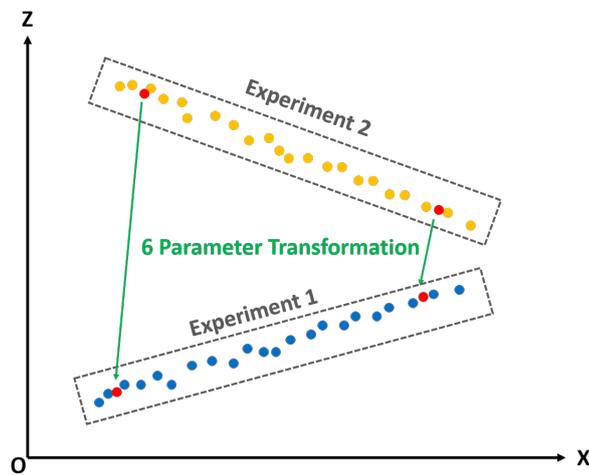


Abbildung 17: Transformation zweier Punktwolken

pitel 4.3 wurde beschrieben, dass der Vergleich oder die Reduktion von Punktwolken über die Flächennormalen des gemessenen Objekts passiert. Um die Flächennormale in dieser Arbeit zu vereinfachen, werden die Punktwolken in eine annähernd horizontale Lage gedreht. Damit fallen alle Flächennormalen der Ebenen mit der Höhe zusammen. Korrekturen entlang der Flächennormale können nun als einfache Höhenkorrekturen gesehen werden.

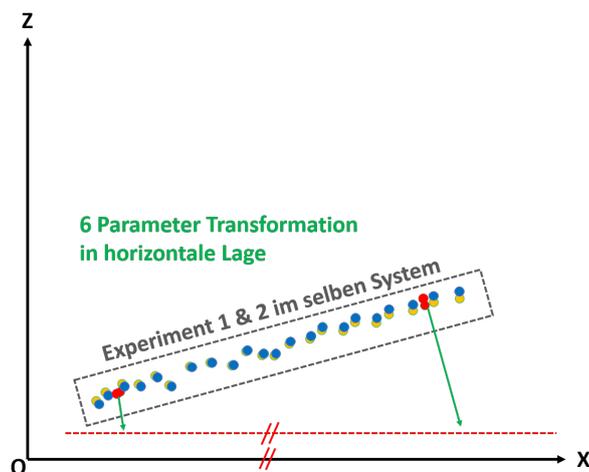


Abbildung 18: Transformation zweier Punktwolken in horizontale Lage

In Abbildung 19 befinden sich die Daten in annähernd horizontaler Lage. Beide Punktwolken sind durch Ungenauigkeiten in den Transformationen und durch Konstanten in der Punktaufnahme noch systematisch versetzt. Es werden Ebenen geschätzt und die Daten um diese reduziert. Dadurch können systematische Resteffekte vermindert werden. Der Fehler der in der vertikalen Komponente gemacht wird, wenn die Reduktion als Höhenkorrektur angebracht wird, ist durch die annähernd horizontale Lage vernachlässigbar klein.

Für die Ebenheitsprüfung wird angenommen, dass es sich um großflächige Deformationen an der Oberfläche handelt. Daher spielt die horizontale Punktlagegenauigkeit weniger Rolle als die Höhe. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich Deformationen wenige Millimeter um den gemessenen Punkt, nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Für die weiteren Analysen der Punktwolken wird, wie in Kapitel 4.3, ein Mesh-to-Mesh Vergleich durchgeführt. Die beiden Punktwolken werden über eine Delaunay Triangulation interpoliert. Wird nur die Punktwolke mit der geschätzten Ebene verglichen, um die Ebenheit zu überprüfen, wird ein Cloud-to-Mesh-Vergleich durchgeführt.



Abbildung 19: Reduktion der Punktwolken um geschätzte Ebenen

## 6 Test mit 50 cm Holzelementen und Leica MS60

Die Tests mit den Holzelementen bis zu 50 cm stellen die erste Versuchsreihe dar, bei der das Verhalten der einzelnen Messmethoden, in Bezug auf den Werkstoff Holz, untersucht wurde. Die Versuche wurden in kontrollierter Umgebung, im Messlabor der TU Graz, mit der Multistation MS60 von Leica durchgeführt. Jedes Experiment baut auf dem vorherigen Experiment auf, da die abgeleiteten Erkenntnisse in den Aufbau des nächsten Experimentes miteinbezogen werden.

### 6.1 Versuchshypothesen

Die Versuchshypothesen ergeben sich aus der Fragestellung der Experimente. Sie sind Vermutungen, wie ein Experiment verlaufen wird und müssen am Ende des Experiments bestätigt oder verworfen werden. Die Experimente werden so ausgerichtet, dass eine Aussage möglich ist.

Für die Oberflächenmessung wird die Ebene mit einzelnen Punkten abgetastet. Der Punktabstand bestimmt die Auflösung der Oberfläche. Es ist zu klären, ob eine Einzelpunktmessung, mit einem vertretbaren Punktabstand von ca. 20 cm, die Oberflächenbeschaffenheit adäquat repräsentiert.

Es soll in den Experimenten gezeigt werden, dass mit einer horizontalen Visur einer Totalstation relative Genauigkeiten im Submillimeterbereich, in der vertikalen Komponente erreicht werden können.

Für die Scan Funktion der Leica MS60, sind die Genauigkeiten für eine Distanz von 50 m spezifiziert. Es ist zu überprüfen, ob sich die Genauigkeit erhöht, wenn man die Distanz drastisch verkürzt und möglichst orthogonale Auftreffwinkel für eine optimale Reflexion sicherstellt.

### 6.2 Aufbau und Ablauf der Versuche im Labor der TU Graz

Für die Durchführung der Experimente wurden die Messpfeiler im Labor der Technischen Universität herangezogen. Die Messpfeiler können als stabil und unbeweglich, für die Dauer des Experimentes, betrachtet werden. Die Fixierung der Testobjekte auf den Pfeilern wurde über Klammern realisiert. Unter die Klammern wurden Dämpfungen aus Papier gelegt, um die Oberfläche nicht durch den Pressdruck zu verformen.



**Abbildung 20:** Fixierung des Objekts auf einem Messpfeiler in horizontaler Lage (links) und vertikaler Lage (rechts)

Abbildung 20 zeigt die unterschiedliche Ausrichtung der Testobjekte für die Experimente, mit den unterschiedlichen Messmethoden. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, musste für die kontinuierliche Messung des Kugelprismas, die Visur parallel zur Objektfläche sein. Dafür musste das Objekt, wie im linken Foto, horizontal ausgerichtet sein. Die Halterungen verdeckte einen Bereich der Oberfläche, der dadurch nicht gemessen werden kann.

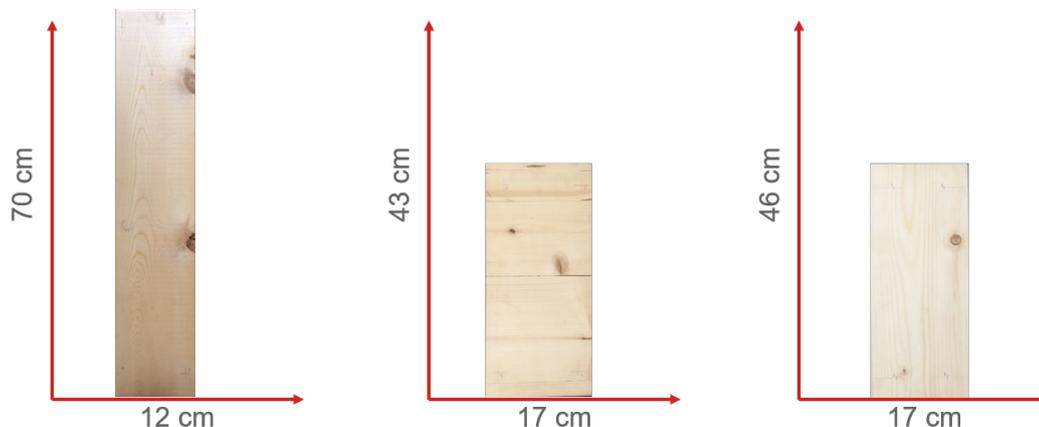
Für die Messung mit einem Laserscanner, sind flache Auftreffwinkel nicht geeignet. Zum einen nimmt der Laserspot eine größere Fläche ein und verfälscht dadurch die Messung, zum anderen wird auch das rückgestreute Signal schwächer. Daher ist ein optimales Ergebnis bei einer orthogonalen Ausrichtung der Objektoberfläche zum Sehstrahl zu erwarten. Diese Konfiguration ist im rechten Bild zu sehen.

Der Bezug zwischen den Experimenten wurde über Markierungen an den Proben hergestellt. Diese Transformationspunkte wurden vor den Experimenten mit einem Miniprisma der Firma Leica eingemessen. Das Prisma besaß eine Durchmesser von 25.4 mm und eine Additionskonstante von -16.9 mm. Für die Messungen von horizontalen Oberflächen war das Prisma in einem Gehäuse für einen Lotstock eingebettet. Der Lotstock versetzte das Prisma um 10 cm zur Holzoberfläche. Für die Messung von vertikalen Oberflächen, konnte das Prisma aus dem Gehäuse geschraubt werden und direkt am Holz angehalten werden. Dafür befindet sich eine Stahlspitze am hinteren Ende für genaues Auflegen. Die Stahlspitze ist 2 cm vom Prismenmittelpunkt entfernt und muss bei der Additionskonstante berücksichtigt werden.

Beim Aufhalten des Mini Prismas, musste der Reflektor auf die Visur ausgerichtet werden, um Fehler in der Anzielung zu vermeiden. Der markierte Punkt wurde manuell angezielt und das Prisma für die Distanzmessung entsprechend eingerichtet.

### 6.2.1 Holzproben

Die *holz.bau forschungs gmbh* hat Holzproben zur Verfügung gestellt. Diese Holzproben sind Reststücke von Brettschichthölzern aus Fichtenholz.



**Abbildung 21:** Verwendetes Holzproben in den Versuchen

Die Testobjekte werden in Abbildung 21 dargestellt. Links im Bild befindet sich die Probe I. Dieses Objekt ist ein 2 cm dickes Brett mit einer starken Krümmung. Die Oberfläche weist ersichtliche Bearbeitungsspuren der Hobelmaschine auf. Es zeichnet sich ein gerilltes Muster mit einer Rillbreite von 1 cm ab. Die Rillen sind nicht stark ausgeprägt und mit der Hand gerade noch zu ertasten.

Das mittlere Brett ist Probe II. Dieses Objekt ist ein 9 cm dickes Brettschichtholz aus drei geklebten Lamellen. Durch die Quermaserung des Holzes, ist dieses Objekt für geringe Verformungen in Längsrichtung anfällig. Die Brettschichtbauweise verhindert Deformationen im Ausmaß von Probe I. Die geringen Deformationen und unterschiedlichen Anomalien in der Dichte der Oberfläche (Jahresringe und Astlöcher) machen Probe II zu einem guten Testobjekt.

Das rechte Brett ist Probe III. Dieses Objekt ist ebenfalls ein Brettschichtholz mit einer Dicke von 9 cm. Die Maserung verläuft hier in Längsrichtung. Diese Ausrichtung gewährleistet minimale Verformungen. Kein Holzstück kann als exakte Ebene angesehen werden, da jede Maschine im Fertigungsprozess einer Streuung unterliegt. Die Probe III repräsentiert aber sehr gut das Limit in der Fertigungsgenauigkeit.

### 6.2.2 Das Messlabor

Das Messlabor der TU Graz befindet sich im Keller der Steyrergasse 30. Es besitzt eine Länge von 33.2 m, eine Breite von 6.3 m und eine Höhe von 3.5 m mit einem schwingungs isolierten Fundament, um äußere Einflüsse abzuschirmen. Die Raumtemperatur wird bei 20°C gehalten mit Abweichungen von  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Die Luftfeuchte im Raum liegt bei 50 % mit einer Schwankungsbreite von  $\pm 10 \%$ .



Abbildung 22: Messlabor der Technischen Universität Graz

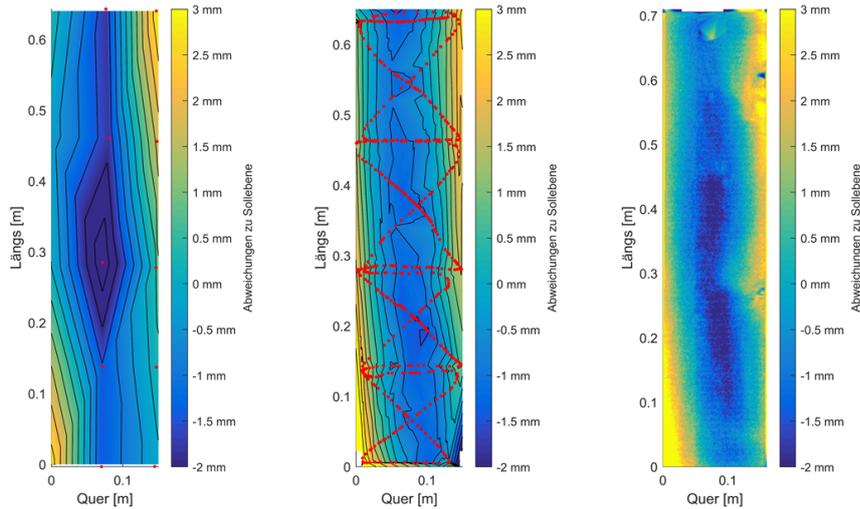
Im Messlabor gibt es neun fix verbaute Messpfeiler. Sie sind mit einem Abstand von ca. 6 m zueinander ausgerichtet.

### 6.3 Oberflächenauflösung von Messmethoden mit Probe I (stark gebogen)

Diese Versuchsreihe ist die erste Untersuchung im Labor und soll klären, ob eine Einzelpunktmessung, eine kontinuierliche Messung eines Kugelprismas oder ein Scan die Oberflächencharakteristiken ausreichend beschreiben. Die Probe I wird aufgrund der starken Verformungen für dieses Experiment verwendet, damit in den Daten die Charakteristiken deutlich hervortreten. Die Verformungen von mehreren Millimetern sollen eine optische Aussage erleichtern, ohne auf die Methoden der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie hier zurückgreifen zu müssen.

Die Messungen werden in unterschiedlichen Lagen und mit variierender Distanz durchgeführt. Wie erwartet wird für den Scan das vielversprechende Ergebnis aus nächster Nähe und bei orthogonaler Ausrichtung der Oberfläche erzielt. Je flacher der Laser auf der Oberfläche des Bretts auftrifft, desto größer wird die eingenommene Fläche des Laserspots. Dies wirkt auf die Messung wie ein Tiefpassfilter und lässt Effekte verschwimmen. Die Einzelpunktmessung und die kontinuierliche Messung eines Kugelprismas werden, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, mit einer horizontalen Oberflächenausrichtung durchgeführt.

Ín Abbildung 23 werden die Ergebnisse für die einzelnen Messmethoden dargestellt. Die gemessenen Punkte werden als rote Kreise dargestellt, um die Güte der Interpolation beurteilen zu können. Die



**Abbildung 23:** Einzelpunktmessung (links), kontinuierliche Messung eines Kugelprismas (mitte) und Scan (rechts) mit Probe I

Farbgebung und die Höhengschichtlinien im Intervall von 0.5 mm ergeben sich aus einer Delaunay Triangulation und einer geschätzten Referenzebene durch die Datenpunkte.

Betrachtet man das Ergebnis (links) für die Einzelpunktmessung, so erkennt man die Verwindung des Bretts. Durch die großen Punktabstände wird die Form der Verwindungen nur schlecht beschrieben. Die wenigen 15 Datenpunkte bekommen eine viel höhere Bedeutung und Fehler in den einzelnen Punkten wirken sich schwerer aus. Die Oberfläche des Holzes besteht aus vielen kleinen Erhebungen und Senkungen durch die Jahresringe. Wird ein Messpunkt nicht repräsentativ in einer minimalen Senke gewählt, kann nicht zwischen einem vernachlässigbaren Defekt oder einer großflächigen Störung unterschieden werden. Hinzu kommt die Wahl des Messmittels. Als Reflektor wird hier ein Lotstock mit Miniprisma verwendet. Der Lotstock wird über eine Metallspitze am Holz aufgesetzt. Der Druck kann sich nicht verteilen und wirkt komprimiert auf den Aufsetzpunkt. Bei weichen Holzpartien muss mit einem Einsinken der Spitze in das Holz gerechnet werden.

Die kontinuierliche Messung eines Kugelprismas (mitte) zeigt ein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Form des Bretts kommt klar aus den Daten heraus und sie besitzt einen höheren Detailgrad als bei der Einzelpunktmessung. Die 508 gemessenen Punkte werden mit 10 Hertz aufgenommen. Die hohe Punktdichte entlang der Trajektorie lässt lokale Artefakte erkennen und der Einfluss eines einzelnen Punktes auf die gesamte Vermaschung wird weniger. In diesem Experiment wird das Kugelprisma entlang der Oberfläche bewegt, sodass die Trajektorie die Form einer Sanduhr annimmt. Es wird damit versucht, einen Kompromiss zwischen Längs- und Querauflösung zu finden. Dieses Muster wird in den folgenden Experimenten auf Längslinien abgeändert werden. Bei einer BSH Rippe von mehreren Metern Länge ist die zu erwartende Deformation in Längsrichtung höher als die Deformation in Querrichtung. Aus diesem Versuch geht hervor, dass sich die Druckverteilung der Taylor-Hobson Kugel für ein weiches Brett gut eignet. Die erreichbare Oberflächenauflösung ermöglicht es Aussagen über die Ebenheit der Fläche zu treffen.

Während des Scans (rechts) werden 105597 Punkte mit 1000 Hertz aufgenommen. Die Oberflächenauflösung beträgt ca. 1 mm. Das Scanbild liefert einen sehr hohen Detailgrad der Oberfläche.

Die Astlöcher, Erhebungen und Senkungen lassen sich klar lokalisieren. Man kann im Scan auch quergestreifte Artefakte erkennen aber ob dieses Muster tatsächlich den vorhandenen Deformationen durch die Verarbeitung entspricht, wird im nächsten Kapitel 6.4 näher untersucht.

## 6.4 Detaillierte Untersuchung des Scans von Probe I (stark gebogen)

Die detaillierte Untersuchung des Scans von Probe I erfolgt an einem repräsentativen Längsschnitt durch das Brett. Es wird ein Profil durch die Mitte des Bretts ausgewählt, da hier der Effekt am stärksten hervortritt.

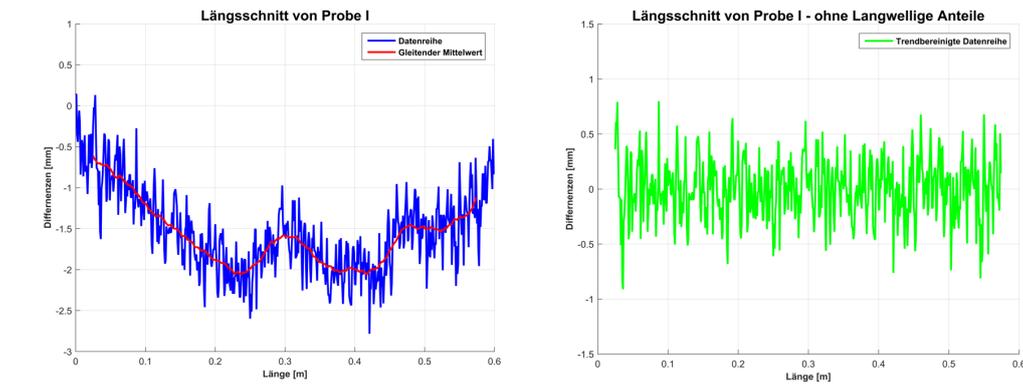


Abbildung 24: Längsschnitt durch den Scan von Probe I (Schnitt durch die Mitte)

In Abbildung 24 werden die Bearbeitungsschritte der Zeitreihenanalyse beschrieben. Zuerst werden die großflächigen Deformationen am Brett reduziert. Der Trend wird mit einem gleitenden Mittelwert, in der linken Grafik rot dargestellt, modelliert. Bildet man die Differenz zwischen dem gleitenden Mittelwert und der Zeitreihe, erhält man, im rechten Bild dargestellt, die trendbereinigte Zeitreihe.

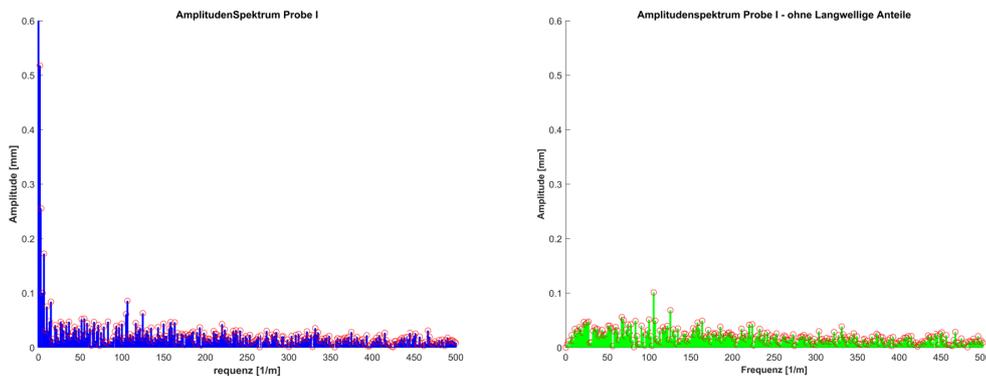
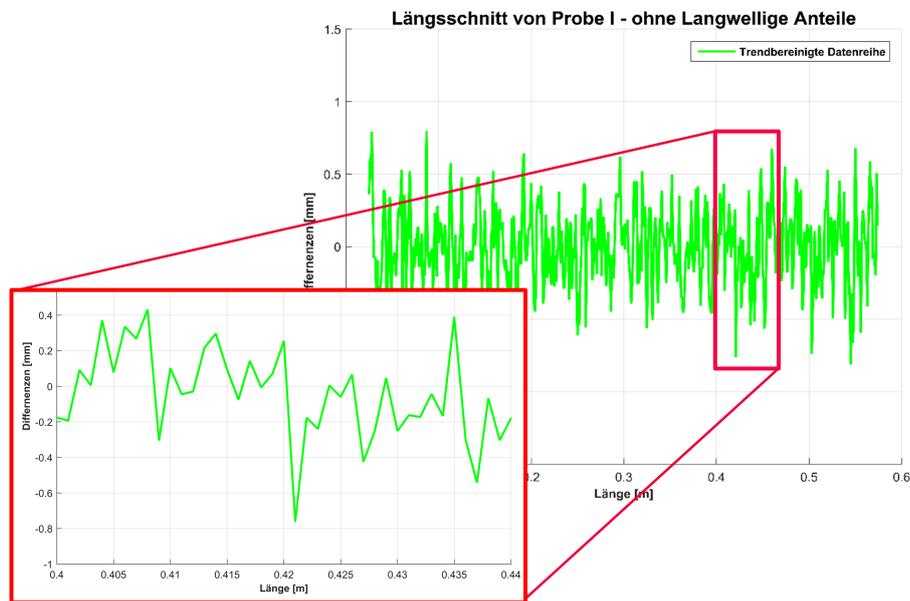


Abbildung 25: Längsschnitt durch den Scan von Probe I (Schnitt durch die Mitte)

Die Fouriertransformation zerlegt ein Signal in seine einzelnen Komponenten und stellt es als Amplitudenspektrum dar. Die Werte repräsentieren die Amplituden aller Schwingungen, aus denen sich das Signal zusammensetzt. In Abbildung 25 werden die Amplitudenspektren des Profils und des trendbereinigten Profils dargestellt. Das Spektrum des Profils zeigt einen hohen Anteil im niedrigen Frequenzbereich. Dies ist der Trend der Zeitreihe, der im rechten Bild nicht mehr vorhanden ist. In beiden Grafiken ist ein eindeutiger Peak bei einer Frequenz von 105 Wiederholungen pro Meter vorhanden. Rechnet man diese Frequenz in eine Wellenlänge um, ergibt das 9.5 mm. Diese Wellenlänge deckt sich mit der Rillenbreite der Bearbeitungsspuren, es handelt sich daher um den gleichen Effekt.

Die Fourieranalyse ergibt 0.1 mm als Amplitude dieses Effekts. Betrachtet man aber visuell die Vergrößerung der Datenreihe in Abbildung 26, so liegt eine Systematik mit einer größeren Amplitude als 0.1 mm vor.



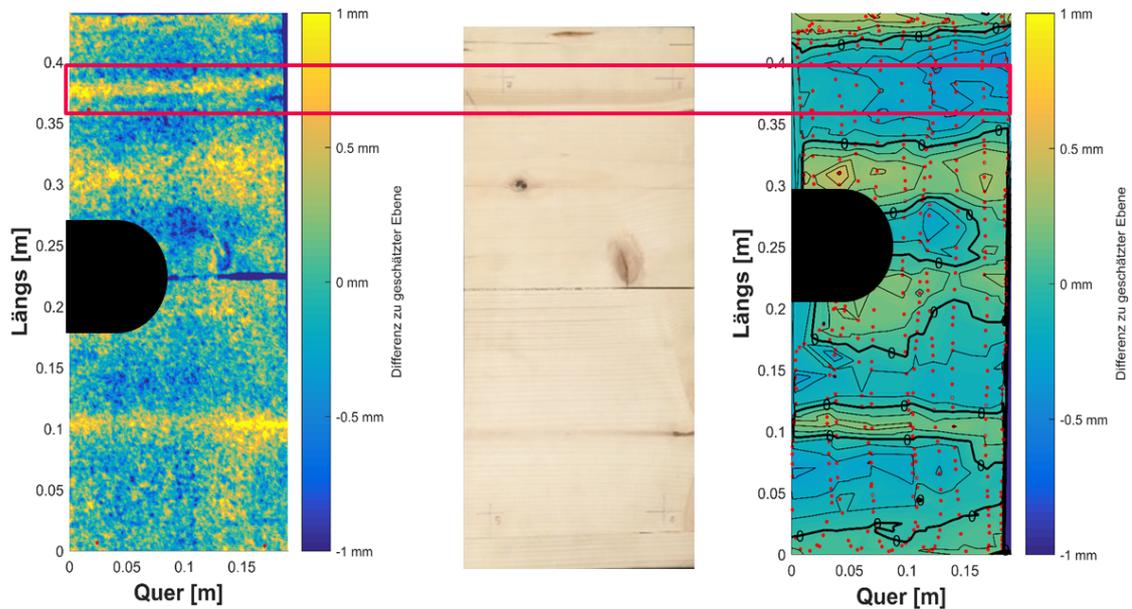
**Abbildung 26:** Vergrößerung der Trend bereinigten Daten von Probe I

Aus der Datenreihe wird ein 4 cm langes Teilstück vergrößert, in dem ein Muster mit der Frequenz des Effekts hervorgeht. Aus den vorliegenden Daten ist eine größerer Amplitude als die 0.1 mm nicht gänzlich auszuschließen ist. Es wird vermutet, dass durch die Bearbeitung ein Eindringen des Laserstrahls in Teilregionen der Holzoberfläche begünstigt wird. Die Eindringtiefe könnte über die Länge des Profils derart variieren, dass es keinen Anteil zur Amplitude in der Fourieranalyse beiträgt. Diese Vermutung kann nur in einem eigenen Versuchsaufbau überprüft werden.

## 6.5 Test auf Eindringen von reflektorlosen Messungen in Probe II

In Kapitel 6.4 wurde die Vermutung dargelegt, dass es aufgrund verschiedener Oberflächenbeschaffenheit, wie bei dem Tracheid Effekt in Kapitel 1.4 zum Eindringen des Lasers in das Holz kommen kann. Zur Überprüfung dieser Hypothese wird die Probe II mit dem Taylor-Hobson Prisma kontinuierlich eingemessen und auch gescannt. Werden die selben Oberflächen deformationen mit beiden Messmethoden gleichermaßen erkannt, kann ein Eindringen des Laserstrahls ausgeschlossen werden. Die Probe II besitzt Deformationen an der Oberfläche, die bei beiden Messmethoden über dem Rauschlevel liegen und daher signifikant detektierbar sein sollten. Ebenso variiert die Dichte der Oberfläche durch Äste und Jahresringe.

Die Ergebnisse in Abbildung 27 belegen die Vermutung. Vergleicht man die Artefakte aus dem Scan mit der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas, so erkennt man viele Parallelen in der Form und in der Lage der Oberflächenstörungen. Dabei handelt es sich um tatsächliche Unebenheiten, die sich am Brett belegen lassen. Einen eindeutigen Unterschied sieht man ab einer Länge von 0.35 cm des Bretts. Im Scan tritt ein Ast klar als geometrische Störung hervor. Die Messungen mit der Taylor-Hobson Kugel sind von der Oberflächendichte nicht beeinflusst und weisen an selber Stelle eine Senke aus. Das Anlegen eines Stahllineals an das Brett bestätigt die Oberflächenform, wie sie mit der Erfassung mittels Prisma gemessen wurde. Die unterschiedliche Dichteverteilung an

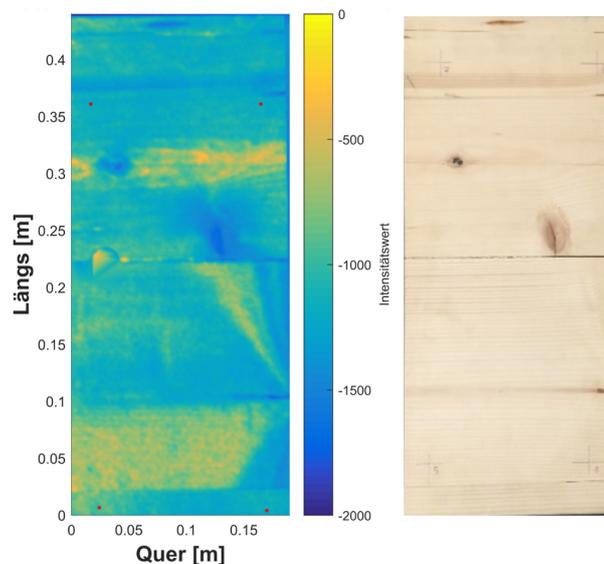


**Abbildung 27:** Scan (links) und Farbfoto (mitte) und kontinuierliche Messung eines Kugelprismas (rechts) von Probe II

der Oberfläche kann zu Abweichungen bis zu 1 mm zwischen den beiden Messmethoden führen. Es bestätigen sich die Erfahrungen der Holzindustrie in Bezug auf den Tracheid Effekt nun auch für berührungslose Messverfahren.

## 6.6 Untersuchung des Eindringverhaltens von berührungslosen Messungen

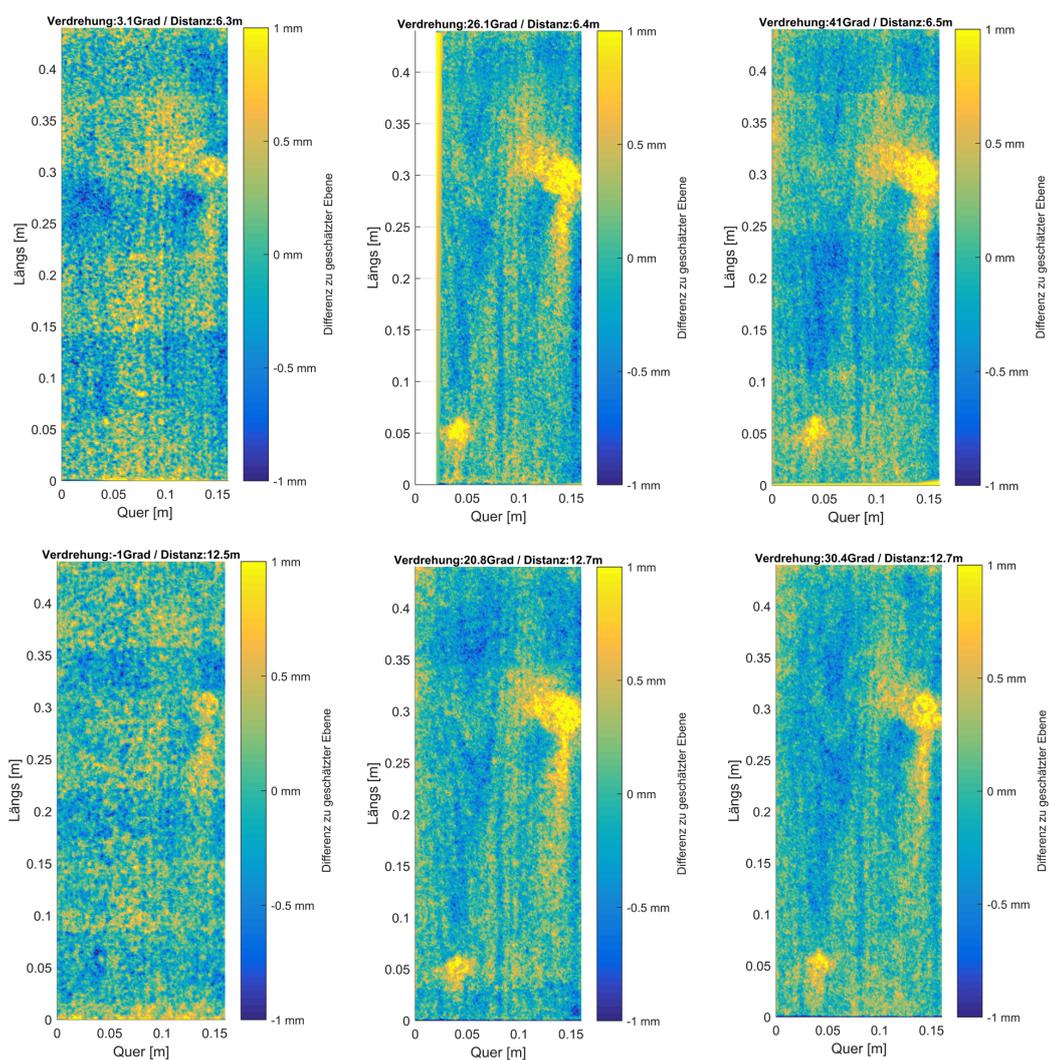
Der Versuch in Kapitel 6.5 hat eindeutig gezeigt, dass die Genauigkeit des Laserscans von der Dichteverteilung der Oberfläche abhängig ist. In Kapitel 1.4 wurde bereits dargelegt, dass bei dem Tracheid Effekt die Tracheidfäden den Laser in das Holz eindringen lassen und der Laser im Inneren des Holzes gestreut wird.



**Abbildung 28:** Intensitätsbild von Probe II

Diese Rückstreuung wird benutzt, um Verunreinigungen im Holz während des Fertigungsprozesses automatisch zu detektieren. Es wird nun überprüft, ob man diese unterschiedliche Rückstreuung in der Dichteverteilung in den Daten erkennen kann und als Korrekturfunktion an die Messungen anbringen kann. Zu jeder Messung eines Laserscanners gibt es einen Intensitätswert. Dieser Wert gibt Auskunft über die Signalstärke, die vom Objekt wieder zum Scanner zurück gestreut wird.

Vergleicht man das Intensitätsbild und das RGB Bild von Probe II in Abbildung 28, lassen sich die gleichen Effekte in der Oberfläche zuordnen. Das Intensitätsbild gibt Aufschluss über die Zusammensetzung des Bretts und zeigt klar die einzelnen Klebefugen, die Astlöcher, die Jahresringe und dichtere Oberflächenpartien. Die Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen dem Eindringen und dem Intensitätswert erfordert einen weiteren Versuchsaufbau.



**Abbildung 29:** Scans von Probe III bei variierender Verdrehung und Distanz

Hierfür wird die Probe III verwendet. Sie eignet sich für diese Fragestellung, da die Oberfläche möglichst eben ist und doch von Jahresringen und Astlöchern durchzogen ist. Der Vergleich mit einem Stahllineal zeigt, dass auf der Oberfläche Deformationen im Ausmaß von  $\pm 0.1$  mm zu erwarten sind. Diese Deformationen liegen deutlich unter der zu erwartenden Eindringtiefe von bis zu 1 mm, daher kann die Unebenheit des Bretts für den folgenden Versuch vernachlässigt werden. Das Brett wird in unterschiedlichen Distanzen und in unterschiedlichen Ausrichtungen gescannt, um den Einfluss dieser Parameter miteinzubeziehen. Die gemessenen Deformationen am Brett werden

mit den entsprechenden Intensitätswerten in einem Koordinatensystem eingetragen. Existiert ein Zusammenhang, wird dieser durch Systematiken in der entstehenden Grafik sichtbar werden.

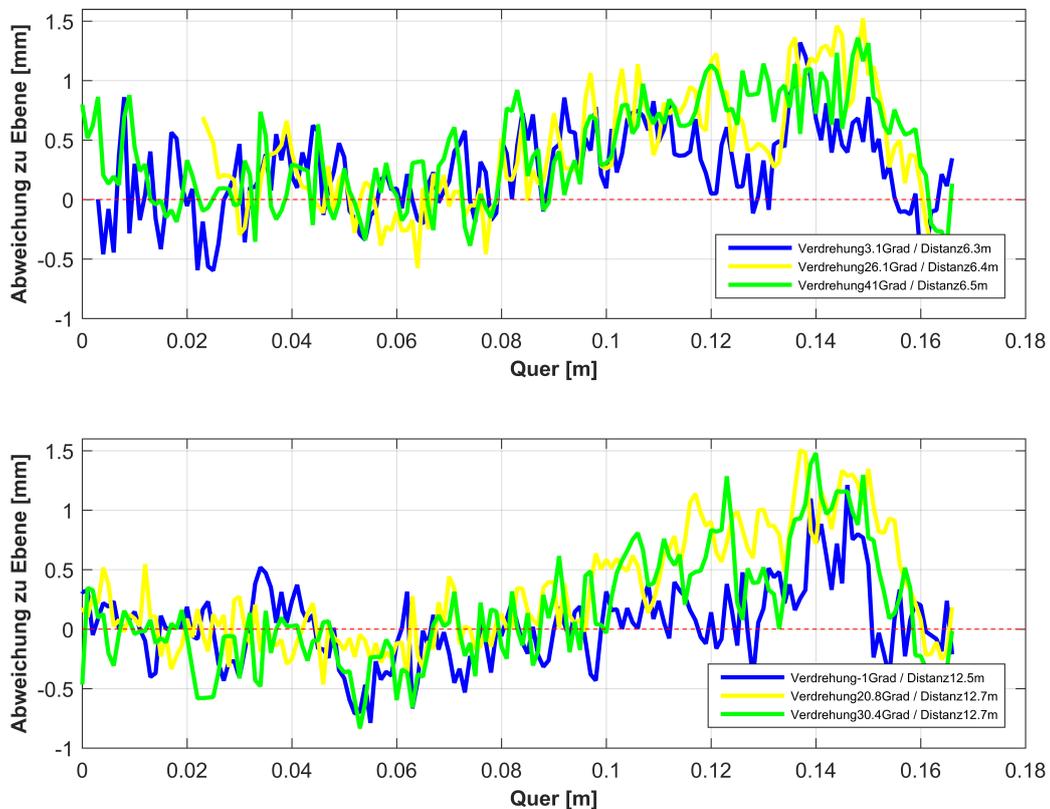
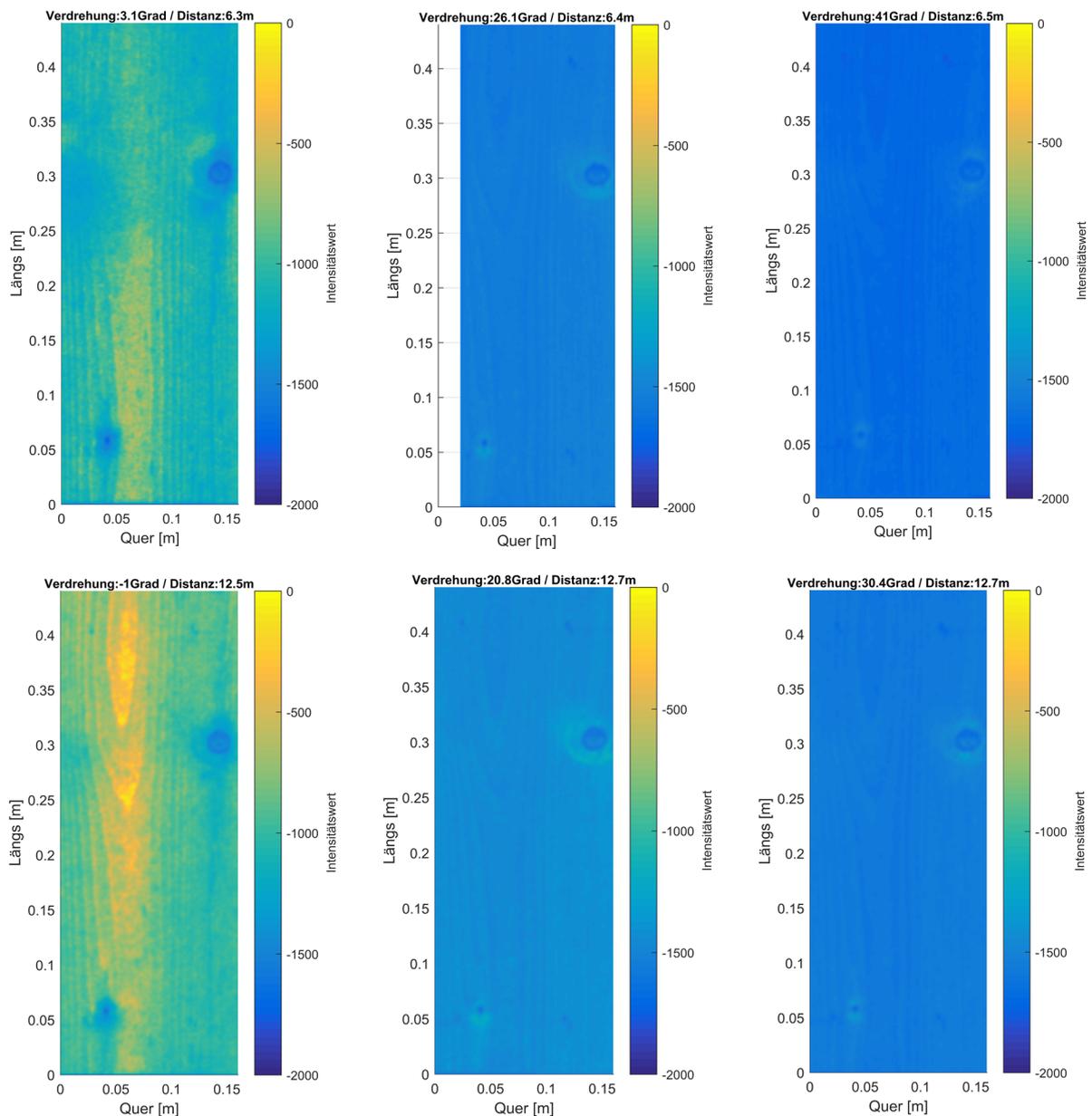


Abbildung 30: Querschnitte der Scans von Probe III bei variierender Verdrehung und Distanz

In Abbildung 29 werden die Scan Ergebnisse mit Probe III bei unterschiedlichen Verdrehungen und Distanzen dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede zwischen den Drehungen erkennbar. Die Unterschiede in den Abmessungen der Darstellungen variieren durch die Bearbeitung der Ränder der Punktwolke. Die Astlöcher sind in allen Scans erkennbar und stellen bei allen Verdrehungen die größten Artefakte dar. Im Scan tauchen bei unterschiedlichen Ausrichtungen linienförmige Artefakte auf. Die Form und die veränderte Gestalt bei unterschiedlichen Ausrichtungen lassen Bearbeitungsspuren als Ursache ausschließen. Diese Artefakte sind in den Intensitäten nicht zu erkennen.

Durch die Scans in Abbildung 29 werden in Abbildung 30 Querprofile bei einer Länge von 31 cm angelegt. Bei dieser Länge wird der auffällige Ast bei 14 cm bis 15 cm in Querrichtung genau durchschnitten. Diese Profile zeigen deutlich die unterschiedliche Ausprägung der Artefakte je nach Verdrehung und Distanz. Ein eindeutiger Zusammenhang kann aus diesen Daten nicht abgeleitet werden. Klar sind in diesen Daten die scheinbar hohen Oberflächenunebenheiten zu erkennen, welche aufgrund von Messungen mit einem Stahllineal unplausibel sind.

Betrachtet man in Abbildung 31 das Verhalten der Intensitäten, so fällt auf, dass bei größerer Verdrehung die Werte sich verändern. Bei einem annähernd orthogonalen Auftreffen des Lasers verteilen sich die Messungen über das gesamte Intensitätsspektrum. Wird das Brett gedreht, verkürzt sich die Bandbreite der Messwerte und verschiebt sich ins negative. Die Astlöcher erhalten bei je-

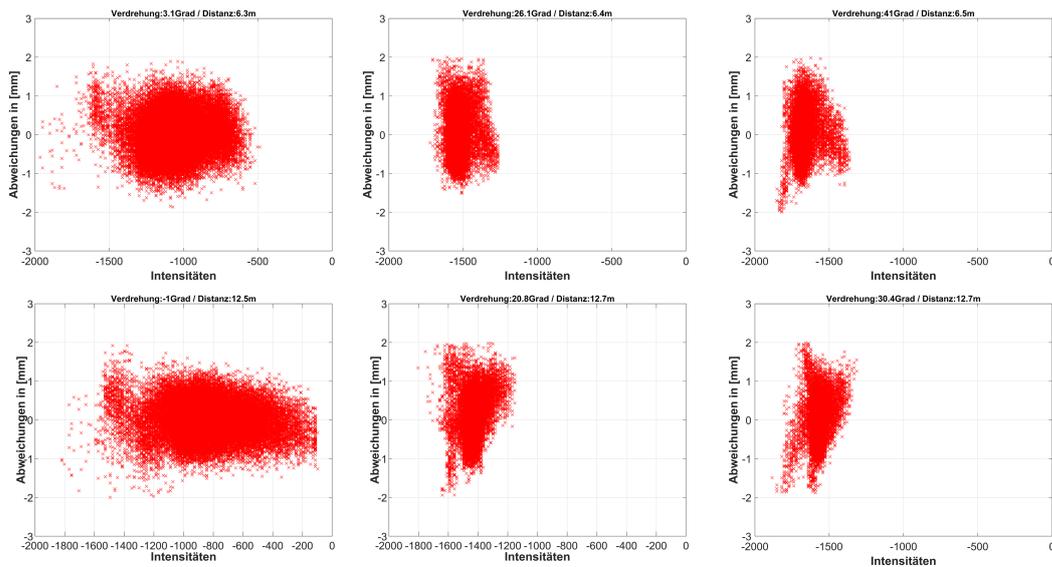


**Abbildung 31:** Intensitätsbilder der Scans von Probe III bei variierender Verdrehung und Distanz

der Verdrehung einen konstant niedrigen Intensitätswert. Ein Unterschied in den Intensitätswerten ergibt sich auch bei einer Änderung der Distanz.

Das Gegenüberstellen von Abweichungen und Intensitätswerten führt zu Abbildung 32. Hier ist die Verschiebung des Spektrums mit zunehmender Verdrehung zu sehen. Die Punktwolken sind einem hohen Rauschen unterworfen, wodurch kein Korrekturwert mit ausreichender Genauigkeit für einen Intensitätswert bestimmt werden kann.

Es kann gesagt werden, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Intensitätswert und der Eindringtiefe gibt. Hinzu kommen noch Abhängigkeiten von der Distanz, der Verdrehung und der Oberflächenbeschaffenheit an sich. Durch das hohe Rauschen in den Daten, die Komplexität des Verhaltens der Intensitätswerte und die offensichtliche Mehrdeutigkeit einer Änderung in den Intensitätswerten wird von der Ausarbeitung einer Korrekturfunktion in dieser Masterarbeit abgesehen. Es muss noch geklärt werden, ob das Eindringen des Laserstrahls in das Holz ein Effekt ist, der alle



**Abbildung 32:** Abweichungen zu Sollebene mit Intensitäten bei variierender Verdrehung und Distanz

Arten von Laserscannern betrifft, oder ob dies mit der *Wave Form Digitizing* Technologie der Leica Multistation MS60 zusammenhängt. Das Experiment mit der Probe III wird mit einem Surphaser 100HSX, einem Phasenscanner, in Tirol bei der Firma *Geos3D* wiederholt. Hierfür sei an dieser Stelle auf Kapitel 7 verwiesen.

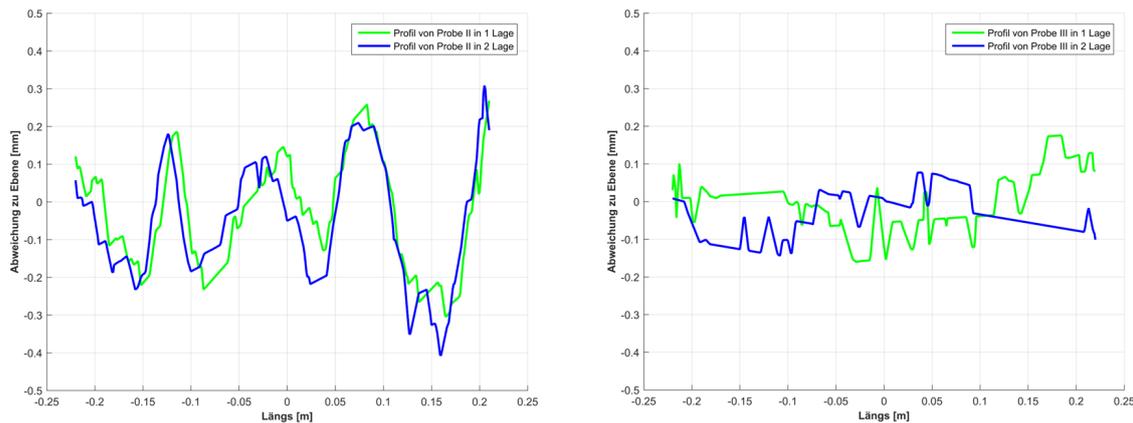
## 6.7 Wiederholbarkeit der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas

Die Wiederholbarkeit der kontinuierlichen Bestimmung von Polarpunkten durch die Messung auf ein Taylor-Hobson Kugelprisma ist ein entscheidendes Kriterium für die Anwendung dieser Messmethode. Wie in Kapitel 1.3.2 beschrieben, muss für ein Prüfverfahren die Messunsicherheit angegeben werden.

In diesem Versuch soll gezeigt werden, wie genau ein Messergebnis in einer zweiten Epoche reproduziert werden kann. Dazu werden die beiden Proben II und III herangezogen. Die Proben werden jeweils in zwei Epochen eingemessen. Zwischen den Epochen wird jede Probe um  $180^\circ$  um die Z-Achse gedreht, diese Methode soll systematische Effekte aufdecken. Über die Transformationspunkte können die Experimente wieder in ein einheitliches System gebracht werden.

In Abbildung 33 sind die beiden Versuche dargestellt. Im linken Bild ist der Versuch mit Probe II zu sehen. Man kann erkennen, dass in beiden Epochen die Oberflächencharakteristiken mit den gleichen Ausprägungen erkannt wurden. Die Höhenunterschiede der vertikalen Komponente weichen nur um maximal 0.1 mm zwischen den Epochen ab. Die Auswirkung von ungleichen Stützpunkten der Triangulation zeigt sich in der Längskomponente. Hier scheint es, als gebe es einen Versatz zwischen einzelnen Unebenheiten .

Im rechten Bild ist der Versuch mit Probe III zu sehen. Man kann erkennen, dass hier die Profile stärker voneinander abweichen. Ohne vorherige Evaluierung der Messkomponenten, kommt es hier zu Abweichungen von bis zu  $\pm 0.2$  mm. Das Ergebnis dieses Versuchs führt zu einer weiteren Untersuchung des Verfahrens, um systematische Fehler im Messverfahren aufzudecken und auszu-



**Abbildung 33:** Zwei Messepochen mit gegenüberliegenden Standpunkten der Probe II und der Probe III bei 13 m

schließen.

Es zeigt sich beim Versuch mit Probe II, dass das Messverfahren in der Lage ist, eine Wiederholbarkeit von  $\pm 0.1$  mm in der vertikalen Komponente zu erreichen. Der Versuch mit Probe III hat hingegen ergeben, dass die Zuverlässigkeit des Messsystems durch genaue Untersuchung der einzelnen Komponenten der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas noch gesteigert werden muss.

## 6.8 Zusammenfassung der Versuche mit der Multistation MS60

Im Messlabor der TU Graz wurden Versuche mit Brettschichtholzproben durchgeführt, um die Messmodi der Multistation MS60 zu untersuchen. Die Versuche zielten darauf ab, die Anwendbarkeit von geodätischen Messverfahren im Fertigungsprozess von Holzelementen zu überprüfen.

Die Aufnahme der Oberfläche als Einzelpunkte hat gezeigt, dass die Erfassung mit dieser Methode sehr anfällig für Fehler ist. Durch das Einsinken des Prismas kann es zu Deformationen im weichen Holz kommen. Diese Fehler können sich hier stärker auswirken, da geringe Punktdichten vorherrschen. Wird die Auflösung kleiner, so wird das Areal der Oberfläche, das von einem Punkt repräsentiert wird, größer.

Neben den Deformationen durch das Prisma, kann es auf der Holzoberfläche zu kleinen Beschädigungen während dem Transport oder während der Lagerung kommen. Diese Effekte sind meistens lokale Effekte mit minimaler Ausbreitung und geringer Tiefe. Bei der Qualitätsüberprüfung des Holzes und für die Erforschung der Schraubpressverklebung liegt das Augenmerk auf den großflächigen Deformationen am Brett. Deformationen mit einer kleinen Ausdehnung von mehreren Millimetern können vernachlässigt werden. Fallen ein Messpunkt und eine kleinräumige Deformation zusammen, wird die Größe des Effekts durch die Auflösung in den Daten überschätzt.

Nach den Versuchen kann gesagt werden, dass man mit einer Einzelpunktmessung keine ausreichende Auflösung erzielen kann, die in vertretbarer Zeit während des Fertigungsprozesses umgesetzt werden kann. Die Holzproben haben gezeigt, dass für die adäquate Beschreibung des Holzbretts und der zu erwartenden Oberflächenanomalien mindestens ein Punktabstand von 1 cm nötig ist.

Das kontinuierliche Messung eines Kugelprismas erreichte eine Auflösung bis zu 1 mm entlang der

Trajektorie und ist daher von der Punktverteilung besser als die Einzelpunktmessung. Die Oberfläche muss in Längslinien abgefahren werden, da in dieser Richtung die größte Deformation zu erwarten ist. Versuche von zwei verschiedenen Aufstellungen haben gezeigt, dass mit der Methode der parallelen Visur eine Wiederholbarkeit von besser als  $\pm 0.1$  mm in der vertikalen Komponente möglich ist. Die Versuche haben aber auch gezeigt, dass die Zuverlässigkeit der Methode noch gesteigert werden muss und dass es noch zu groben Abweichungen kommen kann. Um die Zuverlässigkeit zu steigern und die Genauigkeit evaluieren, müssen noch die einzelnen Komponenten der Messung hinterfragt werden. Zu diesem Zweck werden weiter Versuche zu dieser Methode in Kapitel 8 durchgeführt werden.

Die Untersuchung der Laserscanning Funktion der MS60 hat ein Eindringen des Laserstrahls in das Holz aufgezeigt. Je nach Zusammensetzung der Holzoberfläche kann es dadurch zu Abweichungen von 2 mm kommen. Die Versuche lassen darauf schließen, dass die Eindringtiefe von der Dichte der Holzoberfläche, der Ausrichtung der Holzoberfläche und der Distanz zum Scanner abhängt. Aus den Erfahrungen der Holzindustrie mit dem Tracheid Effekt ist bekannt, dass noch andere physikalische Parameter wie z.B. die Holzfeuchte hier eine Rolle spielen. Die Komplexität dieses Effekts und die hohe Streuung in den Daten der MS60 verhindern die Berechnung einer Korrekturfunktion mit ausreichender Genauigkeit.

Es bleibt nun zu klären, ob das Eindringen in die Holzoberfläche ein spezifisches Problem einer einzelnen Technologie ist, oder ob dieser Effekt bei unterschiedlichen Arten von Scannern gleichermaßen auftritt. Die MS60 benutzt die in Kapitel 2.3.3 beschriebene Technologie namens *Waveform Digizing* für die Distanzmessung. In einem Versuch muss geklärt werden, ob sich ein Scanner mit einem Phasenvergleichsverfahren ähnlich verhält. Hierzu werden in Kapitel 7 Messungen mit einem Industriescanner bei der Firma *Geos3D* getätigt.

## 7 Test mit 50 cm langen Holzelementen und dem Surphaser 100HSX

Die Erkenntnisse über das Eindringverhalten von berührungslosen Messungen mit der MS60 im Kapitel 6.6 sollen in diesem Abschnitt mit einem Industriescanner einer unterschiedlichen Bauart weiter untersucht werden. Die Versuche wurden vor Ort bei der Firma Geos3D in Telfs durchgeführt. Geos3D ist ein Unternehmen, das sich auf hoch genaue Industrievermessung spezialisiert hat. Für die Messungen werden der Industriescanner Surphaser 100HSX und ein Lasertracker AT402 zur Verfügung gestellt.

### 7.1 Versuchshypothese

Bei Geos3D wurde ein Versuchsaufbau analog zu dem Versuch in Kapitel 6.6 nachgestellt. Es soll überprüft werden, ob die gleichen Effekte bei einem Phasenscanner zu sehen sind.

### 7.2 Aufbau und Ablauf der Versuche im Büro von Geos3D

Aufgrund von logistischen Problemen war es nicht möglich, einen Lasertracker und einen Industriescanner im Messlabor der TU Graz zu testen. Die Messungen mussten bei den Messinstrumenten vor Ort durchgeführt werden. Die Experimente waren angelehnt an die Versuche aus Kapitel 6.6, jedoch musste auf die örtlichen Gegebenheiten Rücksicht genommen und das Messkonzept adaptiert werden.

Der größte Unterschied bestand in der Realisierung eines einheitlichen Koordinatensystems. In dem Versuch im Messlabor wurde die Probe zwischen den Experimenten bewegt und nicht das Gerät. Die Multistation hat es möglich gemacht, das Brett zu scannen und auch die Transformationspunkte zu messen. Ein Scanner wie der Surphaser 100HSX kann keine Einzelpunktmessung durchführen, daher konnten auch die Transformationspunkte nicht bestimmt werden. Die Realisierung des Koordinatensystems wurde von der Objektoberfläche über Zieltafeln in den Raum verlagert. Die Zieltafeln konnten in jedem Scan identifiziert werden und damit die Standpunktkoordinaten im Raum bestimmt werden. Voraussetzung dafür war die koordinative Bestimmung der Zieltafeln mit dem Lasertracker. Da nur ein Industriestativ verfügbar war, konnten nicht beide Geräte zugleich aufgebaut sein. Die Holzprobe blieb während des Experiments unverändert am Platz, während unterschiedliche Lagen und Auftreffwinkel durch eine Bewegung des Instruments bewerkstelligt wurden.

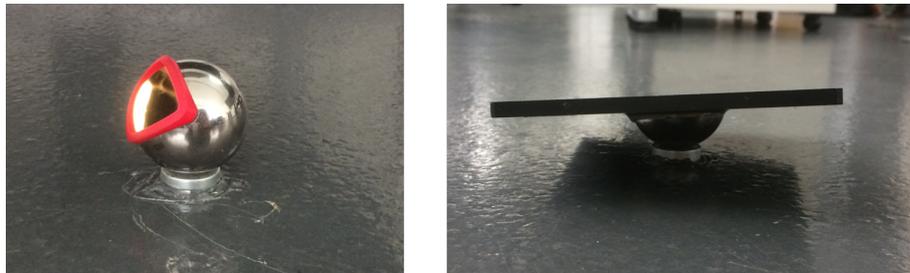
Aus diesen Bedingungen ergab sich folgender Ablauf: Bestimmung des Bezugssystems mit Lasertracker, Einmessen der Lage des Objektes und Bestimmung der Oberfläche des Objekts mit Einzelpunktmessung. Danach wurde der Lasertracker abgebaut und durch den Industriescanner ersetzt. Mehrerer Standpunkte repräsentierten unterschiedliche Fragestellungen.

In Abbildung 34 ist die ca. 10 m lange Teststrecke zu sehen. In der Mitte des Flurs wurde der Industriescanner an einem Industriestativ befestigt. Im Raum sind weiß-schwarze Zieltafeln zu sehen. Sie waren gleichmäßig im Raum verteilt, sodass eine Sichtbarkeit von mindestens vier Zieltafeln in jedem Experiment gewährleistet war. Vom Laserscanner führten mehrere Kabel zu einem Laptop, da das Gerät von einer eigenen Software angesteuert wurde. Am Ende des Raumes ist ein Schrank zu sehen, auf diesem wurden die Proben mit Schraubzwingen befestigt. Da sich zum Zeitpunkt der Versuche kein Personal im Raum befunden hatte, das durch Schritte Schwingungen erzeugen konnte oder durch Krafteinwirkung den Schrank bewegen konnte, konnte diese Fixierung als unbeweglich angesehen werden.

Wie in Abbildung 35 gezeigt, wurden die Referenzpunkte mit Magneten realisiert. Diese runden



**Abbildung 34:** Versuchsaufbau im Büro von Geos3D



**Abbildung 35:** Bestimmung der Referenzpunkte mit Lasertracker (links) und Anbringen der Zieltafeln (rechts)

magnetischen Halterungen wurden mit einer Heißklebepistole im Raum angebracht. Die Aussparung in der Mitte reichte aus um einen *Corner Cube Reflector* in der Fassung zu halten. Für den Laserscan gibt es eigene Zieltafeln, deren Halterungen einem Kugelprisma nachempfunden sind. Die eigentliche Tafel kann über eine Halbkugel aus Metall ebenfalls in der selben Fassung montiert werden. Die Halbkugel ist so konstruiert, dass der Mittelpunkt der Zieltafel mit dem Mittelpunkt des *Corner Cube Reflector* zusammenfällt.

### 7.3 Auswertung der Messungen mit dem Surphaser 100HSX

Der Surphaser 100HSX wird in den Versuchen extern von einem Laptop angesteuert. Die Bedienung des Instruments geschieht im Programm *SurphExpressStandard*. Als erster Schritt wird ein *preview scan* mit niedriger Auflösung von der Umgebung erstellt. In diesem *preview scan* kann ein Scanbereich für die eigentliche Messung definiert werden, um die benötigte Zeit und die Speichergröße zu minimieren.

Das Scannen der Proben und der Zielmarke dauerte pro Aufstellung circa drei bis fünf Minuten. Der fertige Scan kann im selben Programm über die Zielmarken orientiert werden. Dafür gibt es eine Funktion mit der die Zielmarken automatisch erkannt werden. Die Koordinaten der Zielmarken werden über eine Textdatei geladen.

**Tabelle 4:** Ergebnisse der freien Stationierungen

Station	Standardabweichung
Station 1	0.4 mm
Station 2	0.4 mm
Station 3	0.4 mm
Station 4	0.4 mm
Station 5	0.4 mm
Station 6	0.4 mm
Station 7	0.5 mm
Station 8	0.4 mm
Station 9	0.3 mm

Aus den erkannten Zielmarken kann im Anschluss eine freie Stationierung gerechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 4 zu sehen. Alle Zahlenwerte wurden aus dem Berechnungsprotokoll übernommen. Es ist zu sehen, dass man für die Standardabweichung der Klaffungen bei der freien Stationierung einen Wert von 0.4 mm erwarten kann. Dieser würde in das Gesamtergebnis einfließen, wenn die Scans miteinander verbunden werden. Wird eine 20 m lange BSH Rippe mit dem Surphaser 100HSX gescannt, ist die Erfassung des gesamten Objekts von einem Standpunkt aus nicht möglich. Gescannte Teilstücke müssten zu einem Scan vereinigt werden. Die Punktwolken würden um die Fehler aus der freien Stationierung zueinander klaffen.

#### 7.4 Abtastung der Probe III mit dem Lasertracker AT402

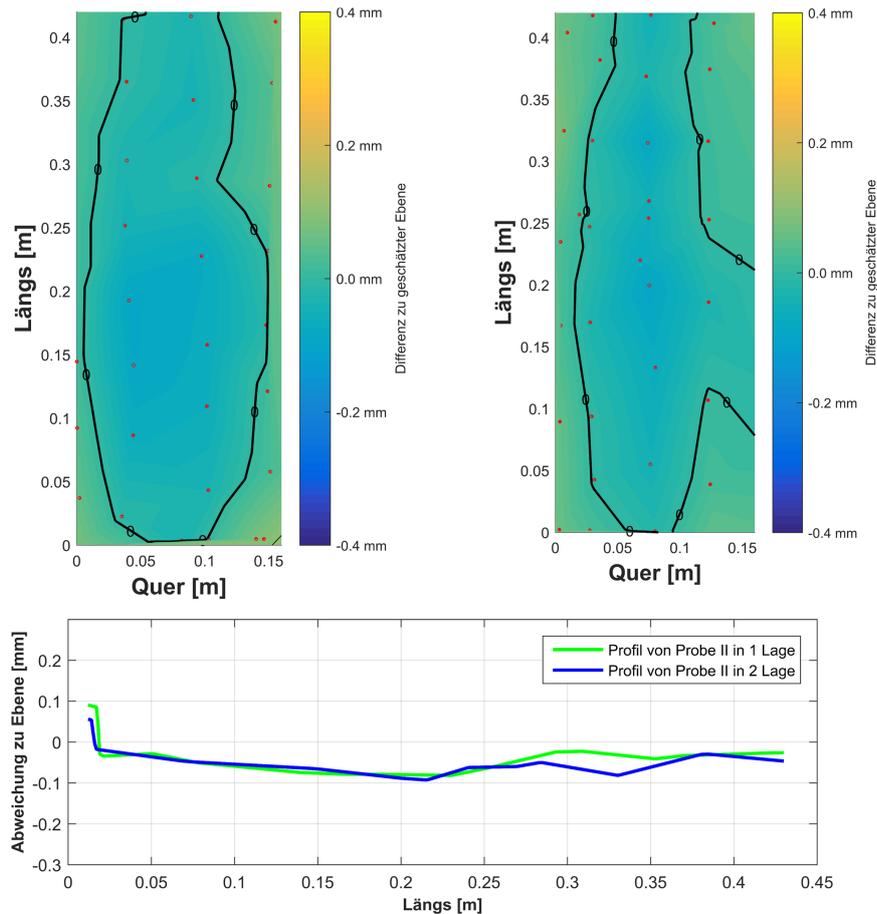
Bevor die Messungen mit dem Laserscanner getätigt werden, wird noch das Experiment aus Kapitel 6.7 mit dem Lasertracker wiederholt. Die Probe III wird zweimal um je 180° um die Z-Achse verdreht eingemessen. Abgetastet wird die Oberfläche mit einem *Corner Cube Reflector* mit einem Durchmesser von 1.5 Zoll. Da die Distanzmessung interferometrisch bestimmt wird, befindet sich deren Genauigkeit in der gleichen Größenordnung, wie der Winkelmessung. Aus diesem Grund muss beim Aufbau des Instruments nicht auf die Ausrichtung der Visur zur Oberfläche Rücksicht genommen werden.

Die Genauigkeit des Lasertrackers im Mikrometerbereich soll die Form der Oberfläche von Probe III endgültig klären. Für die bisherigen Annahmen wurde die Oberfläche mit einem Stahllineal abgeschätzt.

In Abbildung 36 sind die Messergebnisse der beiden Lagen für Probe III dargestellt. Aufgrund der Punktverteilung ergeben sich Unterschiede in dem Erscheinungsbild des Effekts. Die Ausprägung und die Form sind jedoch in beiden Epoche die gleiche. Das Brett ist leicht in Querrichtung gekrümmt. Die Amplitude des Effekts beträgt ca. 0.1 mm. In den Grafiken ist nur die Höhenschichtlinie der Höhe 0 dargestellt, da keine Unebenheit der Oberfläche eine Abweichung von 0.1 mm von der Sollebene erreicht.

Die Abtastung hat als Einzelmessung stattgefunden, da nur das Gerät AT402 zur Verfügung war. Verwendet man das Gerät AT403 und führt eine kontinuierliche Messung auf ein Prisma aus, kann gesagt werden dass sich ein Lasertracker für die Messung von Holzoberflächen eignet. Die höheren

Anschaffungskosten dieser Methode müssen aber für den Einzelfall abgewogen werden.

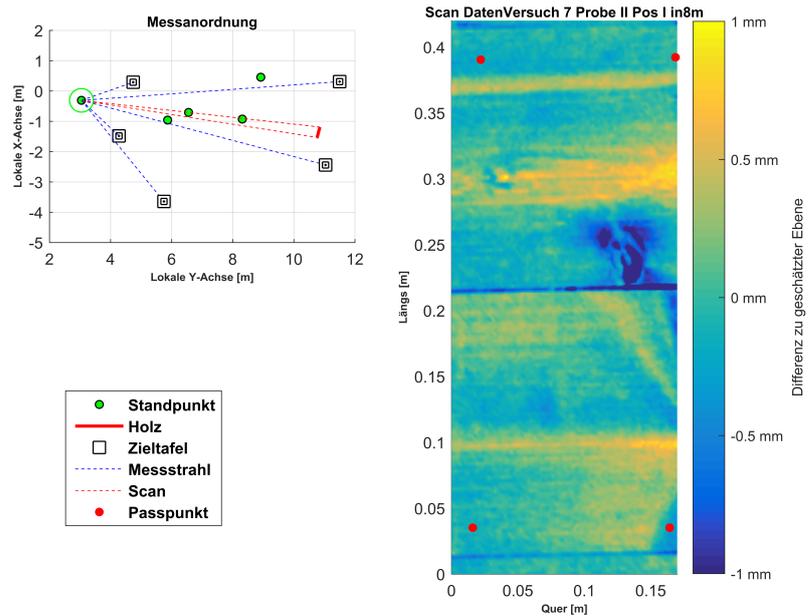


**Abbildung 36:** Einzelpunktmessung mit Lasertracker auf Probe III in zwei Lagen (oben) und Längsprofile durch die Mitte (unten)

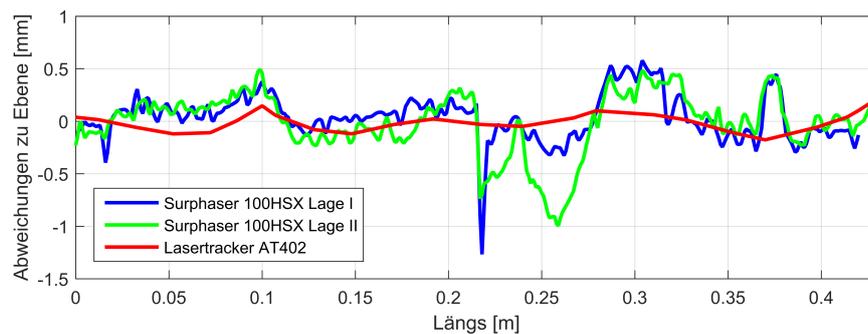
## 7.5 Scan von Probe II und Probe III mit dem Surphaser 100HSX

Die Scans mit dem Industriescanner Surphaser 100HSX werden in unterschiedlichen Distanzen und unterschiedlichen Ausrichtungen durchgeführt. In diesem Kapitel werden zwei repräsentative Ergebnisse für den Fall einer möglichst orthogonalen Visur bei einer realitätsnahen Distanz von 8 m angeführt. Für Grafiken der übrigen Versuche sei an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen. In Abbildung 37 wird das Ergebnis für den Scan von Probe II gezeigt. Ab einer Länge von 35 cm bei der Probe II zeigen sich dieselben Effekte, wie sie auch in Abbildung 27 bei dem Scan mit der Multistation MS60 von Leica zu sehen waren. Dieser Effekt wurde in Kapitel 6.5 als Eindringen des Lasers in das Holz identifiziert. Es zeigt sich in diesem Versuch, dass es auch bei einer Messung mit einem Phasenscanner zu Fehler im Millimeterbereich in der Oberflächenmessung kommen kann. Vergleicht man die beiden Scans, zeigt sich das höhere Messrauschen der MS60. Die Messungen mit dem Industriescanner besitzen einen höheren Detailgrad und schärfere Konturen. Die Effekte durch die Oberflächenbeschaffenheit treten deutlicher hervor.

Durch den gezeigten Datensatz werden in Abbildung 38 Schnitte durch die Mitte von Probe II gelegt und mit dem Lasertracker AT402 verglichen. Die Profile aus den Scandaten weisen die selben Artefakte in der Oberfläche auf wie die MS60. Da die Aufnahmesituation zwischen den um 180° Verdrehten Situationen nicht exakt reproduziert werden konnte, kommt es zu leicht unterschiedlichen Ausprägungen. Der Lasertracker zeigt eindeutig eine abweichende Oberfläche bei einer Länge



**Abbildung 37:** Scan der Probe II aus einer Distanz von 8 m mit dem Surphaser 100HSX



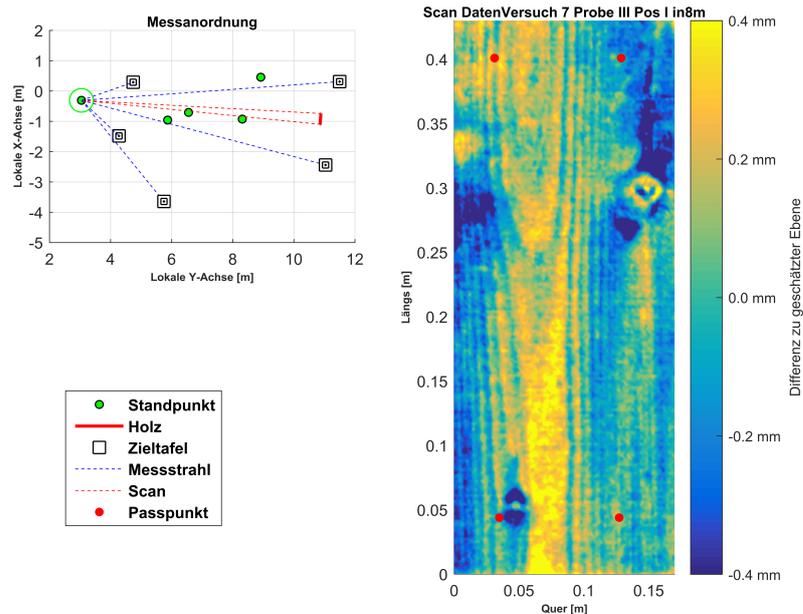
**Abbildung 38:** Längsschnitte durch die Mitte von Probe II in einer Distanz von 8 m

von 0,2 m bis 0,3 m und das charakteristische Artefakt bei einer Länge von 0,37 m. Die Senke an dieser Stelle kann damit bewiesen werden.

Das Eindringverhalten ist auch in dieser Versuchsreihe eindeutig von der Ausrichtung der Oberfläche zum Messstrahl und der Distanz zwischen Instrument und dem Objekt und der Dichte der Oberfläche abhängig. Analog zu Kapitel 6.6 werden die Abweichungen der Oberfläche mit den Intensitäten verglichen. Hierfür wird wieder die Probe III herangezogen, da hier die Effekte durch die tatsächliche Unebenheit am geringsten sind. In Kapitel 7.4 wurde mit dem Lasertracker gezeigt, dass die Unebenheiten 0,1 mm nicht übersteigen. Daher können diese bei einer zu erwartenden Eindringtiefe von 1 mm vernachlässigt werden.

Die Grafik in Abbildung 39 zeigt das Ergebnis des Scans von Probe III. Trotz der tatsächlichen Oberflächenunebenheit sind Abweichungen bis zu 1 mm zu erkennen. Die Abweichungen sind kein Rauschen, sondern zeigen eine eindeutige Systematik. Die Jahresringe und die Astlöcher treten eindeutig hervor.

In Abbildung 40 ist durch das geringere Messrauschen des Surphaser 100HSX eine Systematik zu



**Abbildung 39:** Scan der Probe III aus einer Distanz von 8 m mit dem Surphaser 100HSX

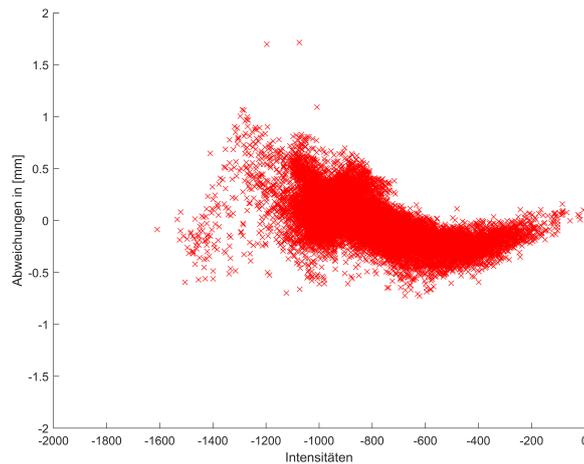
erkennen. Mit schlechter werdender Intensität wird auch die Streuung in den Daten größer. Betrachtet man die Form der Daten, kann man eine quadratische Abhängigkeit erahnen. Die Bestimmung dieser Korrekturfunktion ist aber auch hier mit keiner ausreichenden Genauigkeit möglich. Ändert man die Ausrichtung der Oberfläche, so verschlechtern sich auch automatisch die Intensitäten der Messungen. Hier ist das gleiche Verhalten wie der MS60 zu beobachten.

Es kann daher gesagt werden, dass das Eindringen des Lasers in das Holz nicht das Problem einer einzigen Technologie ist, sondern bei Laserscannern mit WFD und Phasenvergleichsverfahren in gleicher Form auftritt.

## 7.6 Zusammenfassung der Versuche bei Geos3D

Der Lasertracker war bei den Versuchen bei *Geos3D* eine gute Möglichkeit, um die Ebenheit von Objekten zu überprüfen. Obwohl schon gezeigt wurde, dass die Einzelpunktmessung mit zu niedriger örtlicher Auflösung Effekte verzerrt und durch eine zu hohe Auflösung unwirtschaftlich wird, besticht der Lasertracker doch durch seine Genauigkeit. Es wurden Unebenheiten in Probe III im Ausmaß von 0.1 mm erkannt und in einer zweiten Messung mit 180° Verdrehung reproduziert. Die Unabhängigkeit der Visur zur Objekt Oberfläche ist ein klarer Vorteil gegenüber der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas mit einer Totalstation. Die Verwendung eines Lasertrackers mit kontinuierlichem Messmodus wie den AT403 wäre eine zufriedenstellende Lösung. Der Nachteil eines solchen Systems sind aber die hohen Anschaffungskosten bzw. auch die begrenzte Verfügbarkeit als Leihgerät. Eine moderne Totalstation ist einfacher in der Handhabung und weiter verbreitet. Aus diesem Grund wird eine Lösung mit einer Totalstation in dieser Masterarbeit favorisiert. Die Anschaffung eines Lasertrackers in einem Holzbetrieb oder die Vergabe jeder einzelnen Messung an eine Spezialfirma ist nicht wirtschaftlich. Die Anmietung einer Totalstation stellt dagegen eine wirkliche Alternative dar.

Die Versuche haben gezeigt, dass auch bei einem Industriescanner mit dem Eindringen des Laserstrahls in Holz gerechnet werden muss. Obwohl ein Laserscanner von der Schnelligkeit und der



**Abbildung 40:** Gegenüberstellung der Ergebnisse des Scans von Probe III mit den entsprechenden Intensitäten

Punktdichte ideal für die Anwendung gewesen wäre, muss er dennoch als mögliche Messlösung verworfen werden. Das Eindringen in das Holz übersteigt die tatsächlichen Deformationen an der Holzoberfläche. Dabei kann nicht zwischen Deformation und Eindringen ohne eine Referenzlösung unterschieden werden. Die starke Änderung der Intensität eines Scans durch die Oberflächenbeschaffenheit, aber auch durch die Ausrichtung und die Distanz, lassen keine eindeutige Lösung zu. Der Einsatz des Scanners im Sinne der Überprüfung der Holzgüte wie in Kapitel 1.4 ist denkbar. Für die Oberflächenmessung im Submillimeterbereich ist dieses Verfahren nicht geeignet.

## 8 Genauigkeitsuntersuchung einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas mit der MS60

Die Genauigkeit einer Messmethode ist ein entscheidendes Kriterium für die Interpretation der Ergebnisse. Die Genauigkeit entscheidet über die Signifikanz von Effekten. Werden zufällige Fehler als Systematiken interpretiert, so werden falsche Rückschlüsse über das Systemverhalten gezogen. Es ist daher nötig, die einzelnen Komponenten zu untersuchen, um Fehler zu minimieren. Die größten Fehlereinflüsse bei einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas liegen in der Distanzmessung. Obwohl versucht wird, durch die parallele Visur den Einfluss der Distanzmessung zu minimieren, wird diese Komponente immer einen Einfluss auf die vertikalen Abweichungen haben. Daher wird danach getrachtet die größten Fehlerquellen in der Distanzmessung auszuschließen.

### 8.1 Abschätzung der nötigen Genauigkeit der Distanzmessung

Bevor Korrekturen an Messungen angebracht werden, muss überlegt werden, ob die Korrekturen von der Größenordnung her eine Signifikanz im Ergebnis besitzen. Dafür ist die nötige Genauigkeit der jeweiligen Messung und die zu erwartenden Korrekturen abzuschätzen.

Der Einfluss der Distanzmessung lässt sich durch eine parallele Visur minimieren. Um den Einfluss der Distanz zu erfassen, muss zuerst die Abweichung in der Visur abgeschätzt werden. Diese hängt von der Einrichtung des Statives zur Objektoberfläche ab. Die Höhe der Oberkante des Holzes wird in den Experimenten mit einem Zollstock gemessen. Nach Addition der Zielhöhe und Subtraktion der Instrumentenhöhe wird das Stativ auf die entsprechende Höhe aufgestellt.

$$\text{tangens}(\alpha) = \text{Gegenkathete}/\text{Ankathete} \quad (9)$$

$$\text{sinus}(\alpha) = \text{Gegenkathete}/\text{Hypotenuse} \quad (10)$$

Unter Berücksichtigung von Formel 10 und Formel 9 und der Annahme, dass das Instrument für eine gültige Distanzmessung mindestens 2 m entfernt stehen muss, muss die Höhe des Statives auf 17 cm genau zur Ausrichtung der Objektkante eingerichtet sein, um eine Verkippung der Visur kleiner als  $\pm 5^\circ$  zu gewährleisten. Diese Größenordnung ist auf einem ebenen Hallenboden durchaus realistisch. Geht man nun von einer Verkippung von maximal  $5^\circ$  und von einem Fehler von maximal 0.1 mm in der vertikalen Komponente aus, ergibt sich daraus ein zulässiger Fehler in der Distanzmessung von 1 mm. Korrekturen, welche kleiner als dieser zulässige Fehler sind, können vernachlässigt werden.

### 8.2 Atmosphärische Korrekturen

In Kapitel 2.3 wurde schon die Abhängigkeit der Distanzmessung von Parametern wie der Temperatur, dem Luftdruck und dem partiellen Wasserdampf in der Luft beschrieben. Die atmosphärische Korrektur wirkt sich wie eine Maßstabsänderung aus und wird mit der Distanz größer. Daher wird die Korrektur als *part per million (ppm)* angegeben. Für die Abschätzung der Effekte kann näherungsweise angenommen werden, dass sich die Distanz bei einer Temperaturänderung um  $1^\circ\text{K}$  um 1 ppm ändert. Das selbe gilt für eine Änderung von 3.4 hPa Luftdruck oder für 17 hPa für den partiellen Wasserdampf druck. (MÖSER u. a., 2012, S.264-265)

Wird davon ausgegangen, dass es sich um Distanzen von maximal 25 Metern handelt, so ist bei 1 ppm eine Änderung von 0.025 mm zu erwarten. Eine hohe Änderung der Umgebungstemperatur

während der Messung ist in einer Fertigungshalle für Holzbauteile nicht zu erwarten, denn die Atmosphäre sollte in einem Holzbetrieb konstant gehalten werden. Die Temperatur und der Luftdruck werden vor der Messungen einmal erfasst, um die Differenzen zu den Kalibrierwerten zu bestimmen. Eine Korrektur mit einem Modell über den Verlauf der Atmosphäre während den Messungen kann hier vernachlässigt werden, wenn keine grobe Störung stattgefunden hat.

### 8.3 Nullpunktkorrektur

Die Nullpunktkorrektur resultiert aus den Laufzeitverzögerungen im Prisma und im optischen System des Instruments. Die Größe dieses Effekts variiert abhängig vom verwendeten Instrument und vom benutzten Prisma. Sie ist für jede Kombination von Prisma und Instrument individuell zu bestimmen und kann mehrere Millimeter betragen.

Es gibt zwei Möglichkeiten den Nullpunkt eines Messsystems zu bestimmen. Es können Streckenmessungen auf einer Prüfvorrichtung getätigt werden und mit den Sollwerten eines übergeordneten Messsystems verglichen werden. Eine weitere Möglichkeit ist Streckenmessungen von mehreren Standpunkten in allen Kombinationen zu messen. Die Additionskonstante kann dann aus diesen Messungen geschätzt werden.

Für die Bestimmung der Nullpunktkorrekturen wurden Streckenmessungen in allen Kombinationen im Labor der TU Graz getätigt. Der genormte Aufbau einer Kalibrierungsstrecke soll zwischen 900 m und 2200 m und aus 7 Messpfeilern bestehen. Die 21 Teilstrecken sollen annähernd gleichmäßig über die Länge verteilt sein und redundant gemessen werden. [ (MÖSER u. a., 2012, S.260-261)

Die Kalibrierungslänge von 2200 m ist für eine Anwendung im Bereich der Ebenheitsprüfung nicht nötig. Es wurde versucht, die gesamte Arbeitslänge von 25 m abzudecken. Die bautechnischen Limitierungen im Messlabor ließen auch nur einen Aufbau mit 4 Standpunkten auf Messpfeilern zu. Ein Aufbau mit 7 Pfeilern in der freien Natur wurde aufgrund des logistischen Aufwands und den unkontrollierbaren Umwelteinflüssen verworfen.

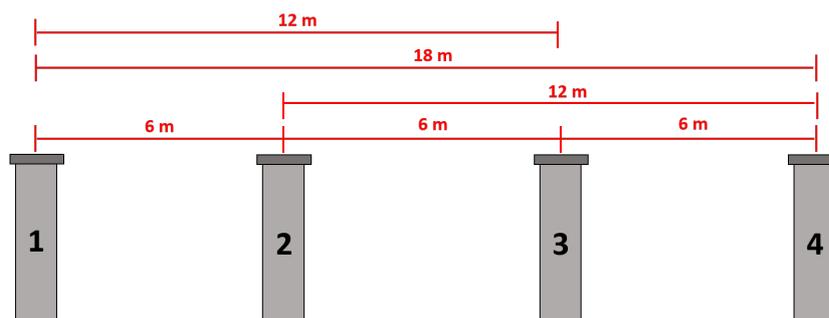


Abbildung 41: Schematischer Aufbau der Kalibrierungsstrecke für die Nullpunktkorrektur

In Abbildung 41 ist das Schema der Kalibrierungsstrecke dargestellt. Es wurden zwölf Distanzen zwischen den vier Pfeilern gemessen. Diese Distanzen mussten um den Zenitwinkel korrigiert werden. Eine relevante horizontale Abweichung zwischen den Pfeilern ist aufgrund der Bauweise des Labors auszuschließen. Bei diesen zwölf Distanzen wurden Teilstücke doppelt gemessen (Hin und Retour), diese wurden auf sechs verbleibende Teilstücke gemittelt. Mehrere Teilstücke können durch Addition der übrigen Teilstücke gebildet werden. Dadurch summiert sich auch die Additionskonstante auf und kann aus den Daten über ein Gauß-Markov Modell geschätzt werden. Der Beobachtungsvektor

$\vec{l}$  besteht aus den sechs gemittelten Teilstrecken. Der Parametervektor  $\vec{x}$  besteht aus den drei Distanzen zwischen den Pfeilern und der Additionskonstante  $c$ . Daraus ergibt sich der Zusammenhang in Formel 11.

$$\begin{bmatrix} d_{13_{12m}} \\ d_{14_{18m}} \\ d_{24_{12m}} \\ d_{12_{6m}} \\ d_{23_{6m}} \\ d_{34_{6m}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{12_{6m}} \\ D_{23_{6m}} \\ D_{34_{6m}} \\ C \end{bmatrix} \quad (11)$$

Der funktionale Zusammenhang kann über die Formel 6 im Kapitel 4.4 ausgeglichen werden. Es ergibt sich eine Additionskonstante von -1.0 mm zur eingestellten Leica Konstante (0.0 mm) auf ein GPR1 Prisma. Für die Konstante wurde eine Standardabweichung von 0.2 mm errechnet. Es kann daher von einem signifikanten Ergebnis gesprochen werden.



**Abbildung 42:** Prüfstrecke mit MS60 (links) und Halterung für Taylor-Hobson Prisma (rechts)

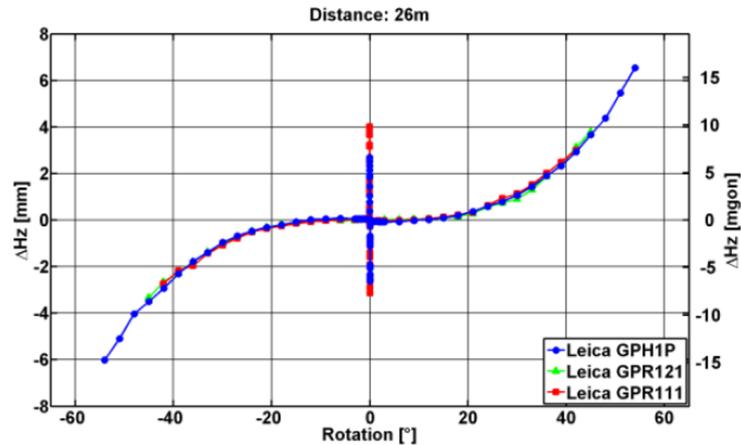
In Abbildung 42 ist im linken Bild die Prüfstrecke im Messlabor zu sehen. Im rechten Bild ist der Aufbau für das Taylor Hobson Prisma zu sehen. Es besteht aus einer Metallschale, in die das Prisma gelegt werden kann. Der Mittelpunkt der Schale und der Kugelmittelpunkt fallen zusammen. Die Metallschale wird auf einen Untersatz über eine Herzschraube mit dem Pfeiler verschraubt. Der Aufbau wird noch mit schwarzen Samt verkleidet, um ungewollte Rückstrahlungen durch die polierte Fassung zu verhindern.

#### 8.4 Ausrichtung des Prismas

Ein Prisma reflektiert Licht zurück in die Richtung aus der es gekommen ist. Aufgrund der Konstruktion des Reflektors hat die Ausrichtung des Prismas in Relation zum Sehstrahl Auswirkungen auf die Genauigkeit der Messungen. Dieser Effekt wurde im *Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme* der TU Graz im Messlabor untersucht. [LACKNER und LIENHART (2016)]

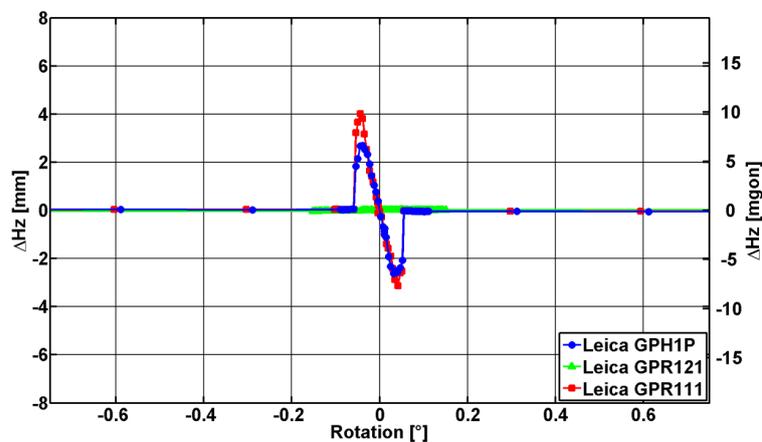
Es wurden mehrere Bauarten von Prismen im Intervall von  $1^\circ$  bis  $3^\circ$  auf einer Länge von  $\pm 50^\circ$

getestet. So auch mehrere Varianten von Rundprismen wie dem GPR1. Im Versuchsaufbau wurde eine Halterung für ein Prisma auf einem Leica TM1100 angebracht. Das Prisma wurde von einer zweiten Totalstation, einem Leica TS 15 automatisch mit ATR eingemessen. Die Drehung des Prismas und die Messungen wurden mit einer Auswerterroutine koordiniert. Der Bereich um  $0^\circ$  Verdrehung wurde mit einer höheren Auflösung von  $0.05^\circ$  bis  $0.005^\circ$  gemessen.



**Abbildung 43:** Ergebnis der Überprüfung für Varianten des Rundprismas bei 26 m [LACKNER und LIENHART (2016)]

In Abbildung 43 werden die Ergebnisse des Versuchs für Rundprismen bei einer Distanz von 26 m dargestellt. Es sind Abweichungen von mehreren Millimetern zu erkennen. Bei einer Verdrehung von  $\pm 30^\circ$  sind die Abweichungen im Horizontalwinkel unter 1 mm, was für viele geodätische Anwendungen ausreichend ist. Die Ebenheitsprüfung der Holzelemente mit der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas verlangt eine Genauigkeit von  $\pm 0.1$  mm in der Winkelmessung. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Messung des Horizontalwinkels mit ATR gleich verhält wie die Messung des Vertikalwinkels, da es in der Realisierung keine Unterschiede gibt. Daher kann aus den vorliegenden Ergebnissen geschlossen werden, dass eine Verdrehung des Kugelprismas unter  $\pm 10^\circ$  zu vernachlässigen ist. Die Tests wurden bei 5 m und 26 m durchgeführt und zeigten dieselbe Abhängigkeit von der Verdrehung



**Abbildung 44:** Ergebnis der Überprüfung für Varianten des Rundprismas bei 26 m (Vergrößert)[LACKNER und LIENHART (2016)]

Der Bereich um  $0^\circ$  Verdrehung weist eine Eigenheit auf. Bei einer nahezu exakten Ausrichtung des Prismas auf die Totalstation kommt es zu ungewollten Reflexionen an der Vorderscheibe des

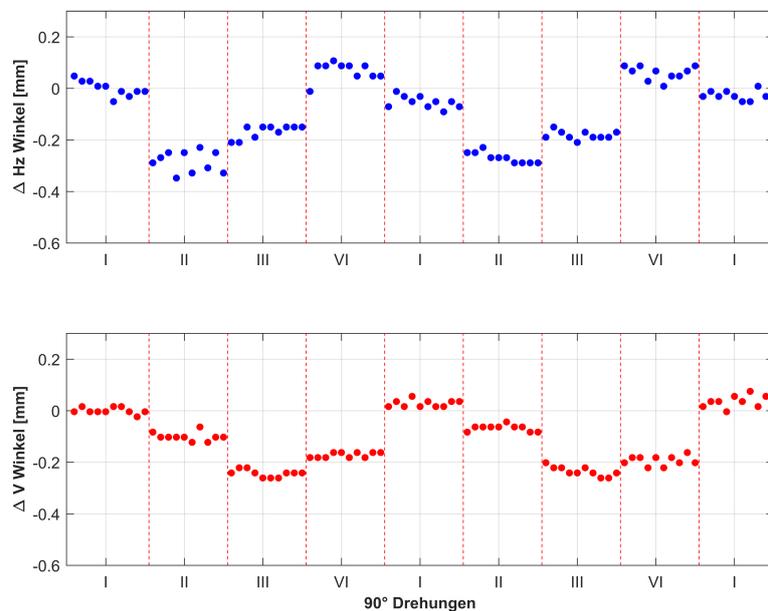
Reflektors. Dieser Effekt tritt bei einer Verdrehung von  $\pm 0.06^\circ$  auf. Verkürzt man die Distanz auf 5 m so tritt der Effekt bei  $\pm 0.3^\circ$  auf. In Abbildung 44 ist zu sehen, dass nicht alle Prismen von dieser Rückreflexion betroffen sind. Das GPR121, hier in grün dargestellt, ist mit einer Antireflex Beschichtung ausgestattet.

Im Produktkatalog, in dem das Taylor-Hobson Prisma bestellt wurde, wird als eingesetztes Prisma ein GPR1 von Leica angegeben. Bei diesem Präzisionsprisma handelt es sich um ein beschichtetes Prisma.

## 8.5 Die Kugelgestalt des Taylor-Hobson Prismas

Die Kugelform des Taylor-Hobson Prismas bewerkstelligt einen konstanten Abstand zwischen Kugeloberfläche und dem Prismenmittelpunkt. In diesem Versuch wird die Fertigungsgenauigkeit des Gehäuses überprüft. Weicht die Form von der Kugelgestalt ab und wird das Prisma während der Messung gedreht, kann es dadurch zu Abweichungen in den Daten kommen.

Für den Test wird der Aufbau für das Taylor-Hobson Prisma aus Abbildung 42 mit dem Untersatz und der Kugelfassung herangezogen. Das Prisma wird in der Fassung in Intervallen von  $90^\circ$  verdreht. Die Drehung erfolgt im Uhrzeigersinn um die Ziellinie. Jede Kugelposition wird mit der Leica MS60 zehn Mal automatisch mit ATR als Einzelmessung eingemessen. Es wird darauf geachtet, dass nach jeder Messung die Totalstation verdreht wird, um ein neues Ansteuern der Totalstation durch das ATR zu bewirken. Durch dieses Vorgehen sollen Systematiken des Instruments ausgeschlossen werden. Das Kugelprisma wird zweimal um die eigene Achse gedreht und die letzte Position ist die Startposition. Daraus ergeben sich neun Drehungen.



**Abbildung 45:** Verdrehung der Kugel in  $90^\circ$  Intervallen um die Ziellinie und Abweichungen in Relation zur ersten Position

In Abbildung 45 geht eine Systematik aus den Daten hervor. Es ist eine Schwingung ersichtlich, die bei einem nicht zentrischen Prismenmittelpunkt auftritt. Bei der Verdrehung des Prismas kann es zu Abweichungen zwischen 0.1 mm und -0.3 mm kommen. Zwischen den Zeitreihen des Horizontalwinkels und des Vertikalwinkels ist auch die Verschiebung von  $90^\circ$  zu sehen, welche zu er-

warten war. Es ist in diesem Versuch nicht möglich, zwischen Abweichungen in der Kugeloberfläche oder einem nicht zentrischen Prismenmittelpunkt zu unterscheiden. Diese Abweichungen können aber während einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas vernachlässigt werden, wenn sich der Aufsetzpunkt der Kugel nicht ändert. Damit ist ein konstanter Bezugspunkt gegeben und die Abweichungen fallen durch die Schätzung einer Ebene gemeinsam mit den übrigen Konstanten weg.

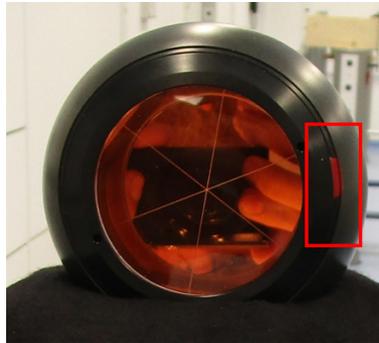


Abbildung 46: Taylor-Hobson Kugelprisma mit roter Markierung

Realisiert wird dies durch eine rote Markierung am Prismenrand. Diese rote Markierung muss während der gesamten Messung eine konstante Ausrichtung aufweisen, wie in Abbildung 46 dargestellt ist.

## 8.6 Evaluierung der Genauigkeit einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas

Die Genauigkeit der automatischen Zielerfassung (ATR) bei der Leica MS60 ist mit der Genauigkeit einer Winkelmessung von einer Sekunde angegeben. Als Typ wird im Datenblatt (Tabelle 5) eine Messung mit einer Messdauer von 2 Sekunden angegeben. Es kann daher von einer statischen Einzelpunktmessung ausgegangen werden. Die Genauigkeit einer kontinuierlichen und dynamischen Messung wird nicht explizit angegeben und muss daher in einem Versuch überprüft werden.

Tabelle 5: Spezifikationen der Automatischen Zielerfassung - ATR Plus der MS60 [LEICA-GEOSYSTEMS (2015b)]

Reichweite der Zielerfassung / Zielverfolgung	Rundprisma(GPR1)	1500 m / 1000 m
Genauigkeit / Messzeit	(Hz, V)	1" (0.3mgon) / typ. 2 sek.

### 8.6.1 Aufbau des Messschlittenversuchs im Messlabor

Für diesen Versuch wird der Aufbau aus Abbildung 42 mit einem Messschlitten ausgestattet. Der Messschlitten von der Firma Wild ist auf eine Anwendung im geodätischen Bereich ausgelegt. Er besitzt die gängige Steckverbindung die in konventioneller Vermessungsausrüstung verbaut ist um ihn an einem Untersatz zu befestigen. Ein Adapter für weitere Steckverbindungen ist an dem beweglichen Teil fest verbaut. Der Schlitten wird über eine Mikrometerschraube angetrieben, dadurch ist es möglich ihn mit einer Genauigkeit von 0.01 mm zu bewegen.

In Abbildung 47 ist der Aufbau mit dem Messschlitten dargestellt. Die Bewegungsrichtung des Schlittens zeigt in Richtung der Handkurbel. Für den Versuch wurde der Messschlitten im rechten Winkel zur Visur verschoben. Dadurch wurde eine Abweichung im Horizontalwinkel bewirkt. Die Ausrichtung des Aufbaus geschah über eine Dosenlibelle. Durch die geringen Änderungen des Schlittens, sind Fehler in der Horizontierung und der Ausrichtung, die unter der Genauigkeit einer



**Abbildung 47:** Aufbau mit Messschlitten

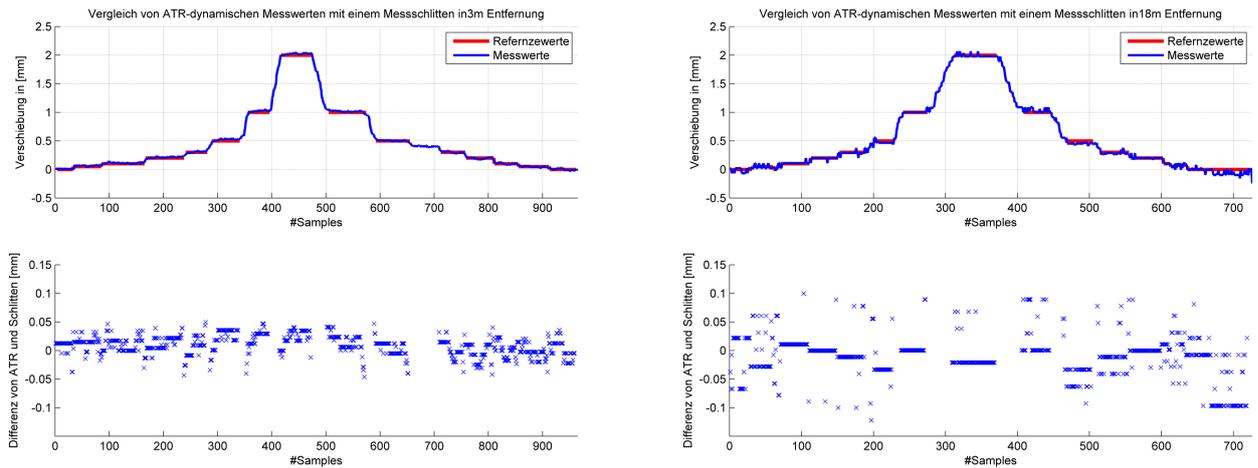
Dosenlibelle sind, zu vernachlässigen. Mit diesem Messkonzept wird in erster Linie die Horizontalwinkelmessung überprüft. Aufgrund des identen Prozesses kann von dem Horizontalwinkel, durchaus auf das Verhalten des Vertikalwinkels geschlossen werden.

Mit dem Messschlitten wurde eine Treppenfunktion erzeugt. Der Schlitten wurde stufenweise um 0 mm, 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 1 mm und 2 mm verschoben. Die ungleiche Verteilung der Stufen sollte das Verhalten des ATR im Submillimeterbereich genauer darstellen. Es ist üblich, bei dieser Art von Überprüfung die Treppenfunktion in umgekehrter Reihenfolge wieder in die Ausgangsposition anzufahren. Durch dieses Vorgehen sollen Systematiken und Drifts in den Daten ausgeschlossen werden. Die Versuchsreihe wurde in drei unterschiedlichen Distanzen durchgeführt, in 3 m, 6 m und 18 m Entfernung. Damit wurde das Verhalten des ATR entlang einer BSH Rippe simuliert.

Es können nur die Differenzen zwischen den Messungen bei den einzelnen Stationen der Treppenfunktion untersucht werden. Die Referenzwerte wurden bei Stillstand jenen Messungen gegenübergestellt, die eindeutig einander zugeordnet werden konnten. Abweichungen während der Bewegung des Schlittens können aufgrund der manuellen Bedienung nicht untersucht werden. Da es sich in der Oberfläche um großflächige Effekte handelt, sind keine abrupten Änderungen zu erwarten und damit erweist sich diese Testmethode als geeignetes Verfahren.

### **8.6.2 Ergebnisse aus dem Messschlittenversuch im Messlabor**

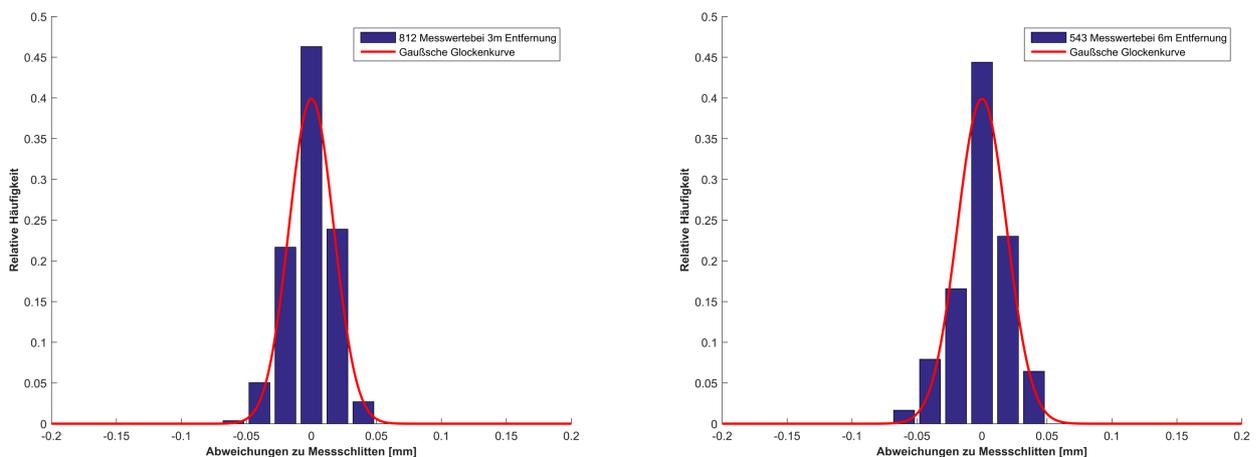
In Abbildung 48 werden nur die Ergebnisse der Messungen bei 3 m und bei 18 m angeführt. Im linken Bild werden die Ergebnisse für Messungen bei 3 m dargestellt, es ist zu sehen, dass sich die Abweichungen in einem Bereich zwischen  $\pm 0.05$  m bewegen. Die Standardabweichung in diesen Daten ist bei 0.02 mm. Betrachtet man die Messungen an sich, erkennt man, dass auch die erste Stufe bei 0.05 m der Treppenfunktion in den Daten ersichtlich ist. Zwischen dem 650-Wert und



**Abbildung 48:** Ergebnisse mit dem Messschlitten für 3 m (links) und 18 m (rechts)

dem 700. Wert wurde eine Stufe falsch angefahren. Diese Werte werden für die Analyse verworfen. Verändert man die Distanz auf 6 m so bleibt die Größenordnung der Differenzen gleich. Es liegt wieder eine Standardabweichung von 0.02 m in den Daten vor.

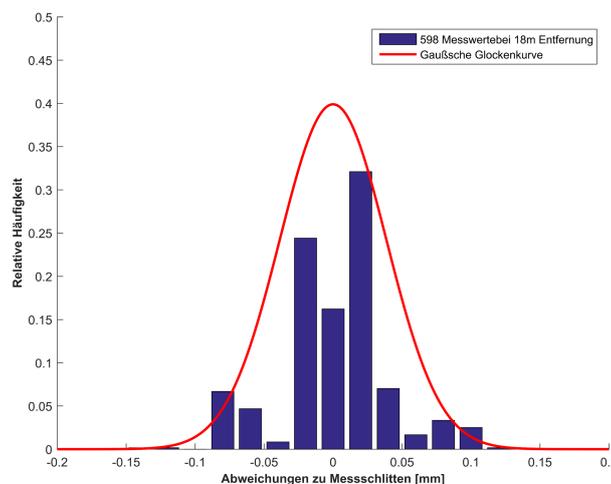
Wird die Distanz auf 18 m erhöht, erkennt man in den Daten eine höhere Streuung. Im rechten Bild sind bei den Messungen bei 0 mm Verschiebung die größten Abweichungen zu sehen. Die Stufe 0.05 mm geht im Rauschen der Daten unter. Die weiteren Stufen gehen aber deutlich aus den Daten hervor. Die Differenzen liegen in einem Bereich zwischen  $\pm 0.1$  m, wobei es zu einer erhöhten Anzahl an größeren Abweichungen gekommen ist, die in einem normalverteilten Rauschen mit dieser Häufigkeit nicht auftauchen würden. Dies kann an Systematiken des ATR liegen, oder auch an einem Fehler bei der Bedienung der Mikrometerschraube. Da die Messwerte aber in einem Genauigkeitsbereich liegen, der für die Ebenheitsprüfung ausreichend ist, wird von einer weiteren Untersuchung bzw. weiteren Messreihen desselben Versuchs abgesehen. Die Verteilungen der Abweichungen werden in Histogrammen in den Abbildungen 49 und 50 gezeigt.



**Abbildung 49:** Histogramm der Differenzen für 3 m (links) und 6 m (rechts)

In den Histogrammen für die Messungen bei 3 m und 6 m ist eine annähernde Normalverteilung zu sehen. Auf der Ordinate werden die relativen Häufigkeiten aufgetragen, dieser Wert ist eine Prozentangabe über die Häufigkeit der Klasse. Auf der Abszisse werden die Abweichungen und

resultierenden Klassen aufgetragen. Darüber wird eine skalierte Gauß'sche Glockenkurve geplottet. Die Gauß'sche Glockenkurve repräsentiert Häufigkeiten in einer Normalverteilung.



**Abbildung 50:** Histogramm der Differenzen für 18 m

In Abbildung 50 ist das Ergebnis des Versuchs bei 18 m dargestellt. Die Verteilung weicht von der Form der Gauß'schen Glockenkurve ab, denn wie bereits dargelegt, gibt es eine erhöhte Anzahl an Differenzen über  $\pm 0.05$  mm. Aus diesem Grund kann die Genauigkeit nicht über ein Quantil aus der Normalverteilung definiert werden, da die Messungen nicht der Normalverteilung folgen. Das Intervall von  $\pm 0.1$  mm bildet aber in den Daten einen natürlichen Bruch. Von 598 Messungen überschreiten nur 3 Messungen diese Grenze, das sind 0.5 Prozent aller Messungen. Es kann gesagt werden, dass bei einer kontinuierlichen ATR Messung die Stufen einer Treppenfunktion mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.1$  mm erkannt werden können. Die Stufen repräsentieren die langwelligen Unebenheiten in der Oberfläche einer BSH Rippe.

Dieses Ergebnis deckt sich mit einer Untersuchung der Auflösung des ATR bei Trajektorien von bewegten Zielen am *Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme* der TU Graz aus dem Jahre 2016. Damals wurde, im Zuge der Erforschung von Hochfrequenzmessungen für das Brücken Monitoring ein GPR1 Prisma auf einer motorisierten Schiene angebracht und automatisch mit einer MS60 verfolgt. Die Untersuchung ergab eine Auflösung des ATR von 0.3 mgon, was mit der erreichbaren Auflösung von 1/10 Pixel und der Pixelgröße von 3 mgon/Pixel des CMOS Sensors übereinstimmt.[LIENHART u. a. (2016)]

## 8.7 Zusammenfassung der Genauigkeitsuntersuchung

Die Versuche mit dem Messschlitten haben gezeigt, dass sich die Genauigkeit des ATR bei einer kontinuierlichen Messung eines bewegten Kugelprismas mit der Distanz verändert. Vernachlässigt man alle weiteren Einflüsse und bezieht sich rein auf die Messgenauigkeit des Instruments, dann kann gesagt werden dass man auf einer Länge von 18 m, was einer Länge eines Holzelements nahe kommt, eine Genauigkeit von 0.1 mm in der Winkelmessung erwarten kann. Bei einer Länge von 3 m liegt die Genauigkeit bei 0.05 mm. Getestet wurde im Versuch eine Änderung des Horizontalwinkels, wobei hier auf das Verhalten des Vertikalwinkels geschlossen werden kann.

Diese Genauigkeit kann in der vertikalen Komponente der Ebenheitsprüfung nur erreicht werden, wenn der Einfluss der Distanzmessung niedrig gehalten wird und die größten Fehlereinflüsse in der Distanzmessung eliminiert werden. Geht man von einer maximalen Verkippung der Visur von

5° aus, darf die Distanzmessung einen maximalen Fehler von 1 mm aufweisen. Die Einflüsse der Atmosphäre können dadurch vernachlässigt werden, da eine Änderung um mehrere Grad Celsius während der Messung durch die annähernden Laborbedingungen in den Holzbetrieben ausgeschlossen werden kann. Im Labor der TU Graz wurde eine signifikante Additionskonstante von -1.0 mm bestimmt. Diese muss zur Leica Konstante (0.0 mm) für ein Rundprisma bei den Messungen angebracht werden.

Ein wichtiges Kriterium für die Messung ist die Ausrichtung des Prismas in Relation zur Visur. Das Prisma darf maximal 10° verkippt sein, um die Messung nicht in einem Bereich über 0.1 mm zu beeinflussen. Das eingebaute Prisma in der Bauform von Taylor-Hobson ist ein GPR1 Präzisionsprisma der Firma Leica. Dieser Prismentyp besitzt eine Anti-Reflex Beschichtung, daher muss auf eine ungewollte Rückreflexion der Frontscheibe nicht geachtet werden.

Es wurde durch einen Versuch bestimmt, dass der Kugelmittelpunkt und der Prismenmittelpunkt nicht exakt zusammenfallen. Bei einer Drehung des Prismas ist mit einem Versatz bis zu 0.3 mm zu rechnen. Während der Messung darf sich daher der Berührungspunkt mit der Holzoberfläche nicht ändern. Auf diese Weise wird eine konstante Reflektorhöhe zwischen den Messungen gewährleistet.

Daher wird empfohlen die Messungen mit dem Taylor-Hobson Kugelprisma innerhalb einer Distanz von 20 m durchzuführen. Dabei soll eine parallele Visur zur Objektoberfläche sichergestellt werden, die eine Verkipfung von 5° nicht übersteigt. Bei der Führung des Kugelprismas soll darauf geachtet werden, dass das Prisma nicht um mehr als 10° zur Ziellinie verkippt wird und sich der Aufsetzpunkt nicht ändert. Die entsprechende Prismenkonstante muss eingestellt werden und die Auswirkung einer Änderung der Atmosphäre muss unter 50 ppm bleiben.

## 9 Test mit 4 m Holzelementen unter Realbedingungen

Nachdem die Genauigkeit einer kontinuierlichen Messung auf ein bewegtes Ziel mit ATR in Kapitel 8 evaluiert wurde, wird das Messsystem unter realistischen Bedingungen getestet. Ein Versuch nahe an der realen Situation soll noch nicht entdeckte Schwächen im System aufzeigen. Aus den Erkenntnissen dieser Versuchsreihe soll ein Arbeitsablauf hervorgehen, der in Holzbetrieben angewendet werden kann. Über die *holz.bau forschungs gmbh* werden die Versuche am Labor für Bauphysik der TU Graz in der Infeldgasse durchgeführt. Das Labor für Bauphysik bietet ein vergleichbares Umfeld zu einer Fertigungshalle eines Holzbetriebes.



Abbildung 51: Foto der Versuchshalle am BTZ [Foto: Bratulic]

Für die Versuche wurden eine 4 m lange BSH Rippe und ein gleichlanges Brett zur Verfügung gestellt. Die Proben weisen im Querschnitt die gewünschten Maße auf. Die Länge der Proben wurde aufgrund des eingeschränkten Platzes auf 4 m reduziert. Das Brett wurde absichtlich mit einem elektrischen Hobel beschädigt, da an der BSH Rippe keine Deformationen erwartet wurde und zumindest eine Probe einen Effekt zeigen sollte. Es war von Interesse, in welcher Weise diese Beschädigung erkannt wird, und wie sie sich auf die Messungen auswirkt.

Den geodätischen Messungen werden Messungen mit einer 2 m langen Richtlatte mit integrierter Messuhr gegenübergestellt. Es soll geklärt werden, welche Informationen man aus diesen Methoden gewinnen kann und wie die Ergebnisse zu einer dreidimensionalen Erfassung der Oberfläche mit der MS60 passen. Als Referenz sollen die Testobjekte mit einem digitalen Nivellier eingemessen werden. Die hohe Genauigkeit dieser Methode soll systematische Effekte aufdecken.

### 9.1 Konzept einer Referenzmessung mit Digitalnivellier DNA03

Um die Güte der Messungen und die evaluierte Genauigkeit einer kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas unter realen Bedingungen zu überprüfen, wird ein unabhängiges Messsystem herangezogen. Ein geeignetes Mittel, um präzise Höhenunterschiede zu messen ist das Nivellierinstrument. Das Grundprinzip eines Nivellements wird in Abbildung 52 verdeutlicht. Der eindimensionale Charakter der Information kann nur über eine Hilfskonstruktionen in einen dreidimensionalen Kontext gebracht werden. Auch bietet das Nivellement keine flächendeckende Information. Daher liefert diese Methode wie auch die Einzelpunktmessung keine ausreichende Auflösung mit einem vertretbaren Zeitaufwand.

Der Höhenunterschied wird aus der Differenz zwischen zwei Lattenablesungen errechnet und ist daher eine relative Messung. Das Instrument wird über eine Dosenlibelle horizontalisiert und das Fernrohr ist in der Vertikalen nicht verstellbar. Minimale Fehler in der Aufstellung werden durch einen Kompensator im Gerät ausgeglichen. Damit realisiert die Visur eine horizontale Linie in der Natur. Die Ablesung der Lattenhöhe kann analog über eine Skala erfolgen oder bei digitalen Nivellieren automatisch. Für die automatische Lattenablesung wird die Skala der Nivellierlatte durch

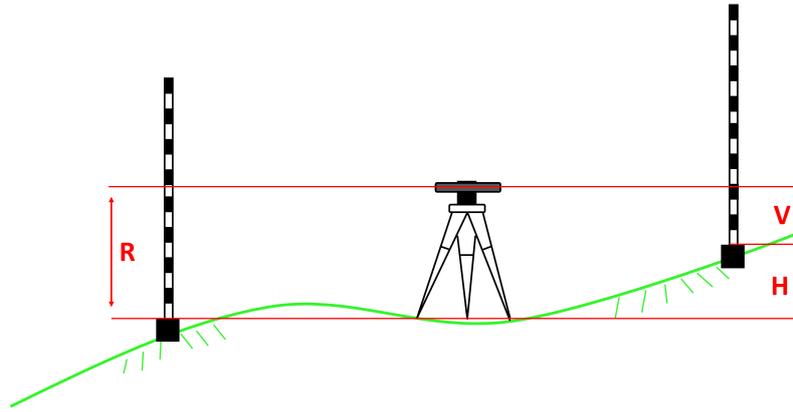


Abbildung 52: Prinzip eines Nivellements

einen Strichcode ersetzt.

Im Messlabor der TU Graz wurde die Genauigkeit des Digitalnivellier DNA03 von Leica auf eine 3 m Latte überprüft. Die Nivellierlatte wurde bei mehreren Distanzen auf einem Vertikalkomparator gemessen. Ein Komparator bezeichnet eine verstellbare Messeinrichtung, bei der die Verschiebung mit einem übergeordneten Messsystem bestimmt wird. Die Messungen eines Geräts können mit den Verschiebungen verglichen und überprüft werden. Durch die höhere Genauigkeit des übergeordneten Messsystems können absolute Abweichungen bestimmt werden. In diesem Test wurde die Verschiebung des Horizontalkomparators mit einem Interferometer bestimmt. [WOSCHITZ (2014)]

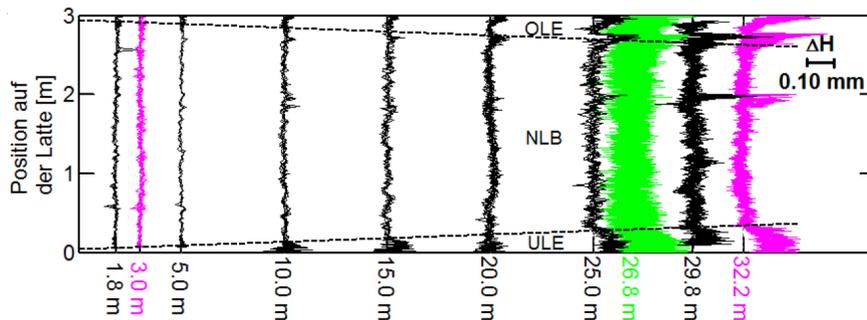


Abbildung 53: Abweichungen zu einem Höhenkomparator mit DNA03 [WOSCHITZ (2014)]

In Abbildung 53 sind die Ergebnisse aus dem Versuch mit dem Vertikalkomparator dargestellt. Es geht aus diesen Versuchen hervor, dass die Standardabweichung der Höhe bei einer Distanz von 14 m bei 0.012 mm liegt. Eine Höhenablesung besteht immer aus zwei Lattenablesungen, daher muss man nach dem Gesetz der Varianzfortpflanzung diesen Wert noch mit einem Faktor von  $\sqrt{2}$  versehen. Damit erhält man eine Genauigkeit des Höhenunterschieds bei einer Visurweite von 15 m von 0.05 mm.

Jede optische Messung ist durch die Atmosphäre und einen Ziellinenfehler beeinflusst. Um diesen Einfluss bei einem Nivellement gering zu halten, wird das Gerät in der Mitte zwischen den Latte aufgestellt. Wenn die Umwelteinflüsse konstant sind, wirken sie sich gleichermaßen auf beide Ablesungen aus und dann fallen sie bei der Differenzbildung heraus. Das Aneinanderreihen von Aufstellungen aus der Mitte um weite Distanzen zu überbrücken wird Liniennivellement genannt.

Die Messung aus der Mitte ist bei der Ebenheitsprüfung von Holzelementen nicht anzuwenden, da die BSH Rippe selbst das Aufstellen verhindert. Es werden mehrere Messungen in einem Raster von einem einzigen Standpunkt aus getätigt. Durch unterschiedliche Visurweiten fallen systematische Fehler wie der Ziellinenfehler oder wie atmosphärische Fehler nicht zur Gänze heraus. Die atmosphärischen Fehler können in der kontrollierten Umgebung des Bautechnik Zentrums vernachlässigt werden. Der Einfluss des Ziellinenfehlers auf das Flächennivellement muss zuerst abgeschätzt werden.

### 9.1.1 Abschätzung des Einflusses eines Ziellinenfehlers auf das Flächennivellement

Bei einer 4 m langen BSH Rippe wird eine Aufstellung des Instruments aus der Mitte vor dem Objekt gewählt. Das Gerät wird 2 m entfernt von der BSH Rippe aufgestellt, um die minimale Messweite von 1.8 m nicht zu unterschreiten. Daraus ergeben sich die größten Unterschiede in der Visurweite zwischen den Messungen in der Mitte und an den Rändern der BSH Rippe. Über den Satz des Pythagoras ergibt sich eine Visurweite von 2.8 m zum Rippenrand und somit eine maximale Differenz von 0.8 m bei dieser Versuchsanordnung. Eine Dreiecksauflösung zeigt, dass die Genauigkeit einer Höhendifferenz von 0.05 mm hier gewährleistet werden kann, wenn der Ziellinenfehler 13 Altsekunden nicht überschreitet. Das Gerät muss vor der Messung auf diesen Wert geprüft werden.

### 9.1.2 Nivellierüberprüfung nach Förstner

Eine gängige Methode der Nivellierüberprüfung ist die Methode nach Förster. Sie basiert auf dem Ansatz, dass der Ziellinenfehler sich bei größerer Distanz stärker auswirkt. Dafür wird eine 30 m lange Prüfstrecke abgesteckt und in drei gleiche abschnitte Unterteilt. An den jeweiligen Enden werden Nivellierlatten positioniert.

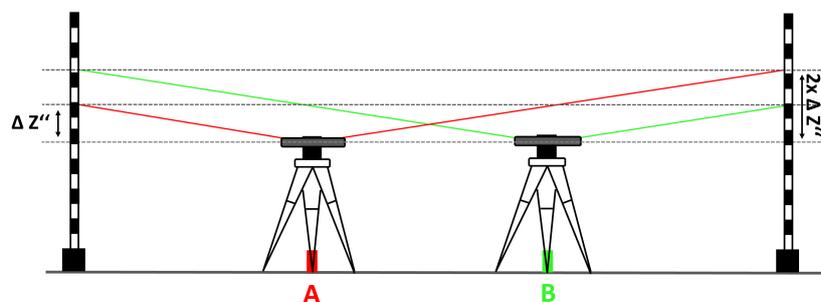


Abbildung 54: Nivellierprobe nach Förstner

In Abbildung 54 ist das Prinzip dieser Nivellierprobe verdeutlicht. Zuerst wird das Gerät auf den Standpunkt A gestellt und es werden beide Latten gemessen. Bei der Messung auf die weiter entfernte Latte ist der Ziellinenfehler  $Z''$  doppelt so groß, wie bei der Messung auf die nähere Latte. Werden die gleichen Messungen nun vom Standpunkt B wiederholt, zeichnet sich der gleiche Einfluss des Ziellinenfehlers aus den Messungen ab. Durch die bekannten Visurweiten und die Messung von zwei Standpunkten kann der Ziellinenfehler aus den Daten bestimmt werden. Das Verfahren hat den Vorteil, dass die Nivellierlatten nicht am Stand gedreht werden müssen und damit immer ein konstanter Bezug gegeben ist. (DEUMLICH und STAIGER, 2002, S.284-285)

Diese Nivellierüberprüfung wurde vor den Messungen im Bautechnikzentrum am Gelände der

TU Graz durchgeführt. Aufgrund des limitierten Platzes im Bautechnikzentrum konnte die Nivellierüberprüfung nicht vor Ort durchgeführt werden, dadurch weicht die Atmosphäre während des Versuches geringfügig von der Atmosphäre bei der Prüfung ab. Es wurde darauf geachtet, dass die Einflüsse während der Prüfung durch Schattenwurf der Häuser, durch Windstille und durch homogenen Untergrund gering gehalten wurden und der Temperaturunterschied nicht zu groß war. Die Umweltbedingungen genügte aber der Abschätzung der Größenordnung des Ziellinenfehlers. Die Probe wurde mit einer 2 m langen Invarlatte durchgeführt.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Nivellierprobe nach Förstner

Z ALT [Altsekunden]	Z NEU [Altsekunden]
-10.7''	-4.9''
-10.7''	-5.4''

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der zwei Nivellierproben angeführt. Im Gerät war der Wert von -10.7'' bereits gespeichert. Die erste Probe ergab einen neuen Ziellinenfehler von -4.9''. Dieser neue Wert wich um 5.8'' vom gespeicherten Wert ab. Eine zweite Probe ergab einen Ziellinenfehler von -5.4''. Damit unterschieden sich die beiden neuen Werte um 0.5''. Sowohl die Abweichungen zum verspeicherten Wert, als auch die Abweichungen der neuen Werte zueinander, liegen klar unter der Schranke von  $\pm 13''$ . Damit genügt die Genauigkeit der Messmethode den Anforderungen, besser zu sein als  $\pm 0.1$  mm.

## 9.2 Aufbau und Ablauf der Versuche im Labor für Bauphysik

Die Messungen wurden im Erdgeschoß des Bautechnik Zentrums der TU Graz durchgeführt. Zentrales Element der Untersuchung bildete eine BSH Rippe mit einer Länge von 4 m und einer Breite von 20 cm. Wie in Abbildung 55 zu sehen ist, war die BSH Rippe über Unterlagshölzer aufgebockt worden, um eine horizontale Visur zu gewährleisten. Das Stativ war über ein Maßband zur Holzoberfläche ausgerichtet worden. Die Unterlagshölzer waren notwendig, da die Rippenhöhe den Spielraum des Stativs unterschritten hatte. Das Miniaturstativ erlaubt Aufstellungen mit einer minimalen Instrumentenhöhe von 75 cm. Zur Stabilisierung wird ein Stativstern verwendet, der für dieses Stativ mit Bohrungen modifiziert wurde.



**Abbildung 55:** Aufstellung mit MS60 (links) und DNA03 (rechts) im BTZ

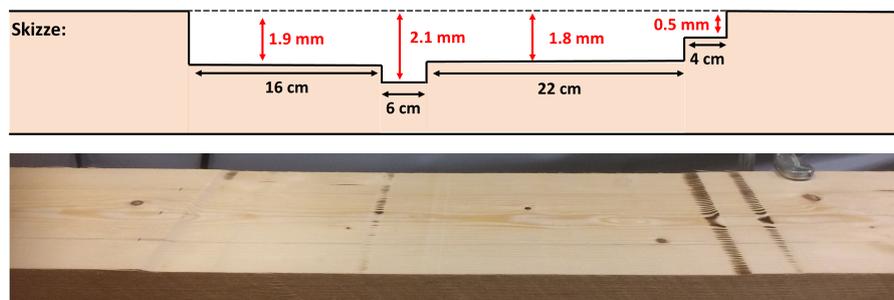
Für das Nivellement wurde auf eine konstruierte Miniaturinvarlatte zurück gegriffen. Die Festigkeit der Holzoberfläche ließ die Verwendung einer 2 m langen Invarlatte mit Lattenfuß nicht zu. Die Gefahr war zu groß, dass das Gewicht der Latte Deformationen am Holz verursacht. Die Latte

mit angebrachtem Lattenfuß ist in Abbildung 56 zu sehen, das Invarband besitzt keinen absoluten Höhenbezug zum Aufsetzpunkt.



**Abbildung 56:** Miniaturinvarlatte

Als zweites Objekt wurde nach der BSH Rippe noch ein Holzbrett untersucht. Am Holzbrett wurden mit einer elektronischen Hobelmaschine stufenweise Deformationen aufgebracht, wie in Abbildung 57 dargestellt ist. Das Holzbrett wies in Länge und Breite die gleichen Maße auf wie die BSH Rippe. Anhand der Deformationen sollten Rückschlüsse auf das Verhalten der Messmethode gezogen werden, wenn es zu groben Unebenheiten kommt. Außerdem sollte eine der Proben Deformationen aufweisen, da vermutet wurde, dass die BSH Rippe nicht verformt ist. Mit dem Auge waren keine Unebenheiten zu erkennen.



**Abbildung 57:** Künstliche Deformationen am Holzbrett

Zur Vergleichbarkeit der Experimente wurden an beiden Proben mit Bleistift drei Messlinien in Längsrichtung markiert. Entlang dieser Linien wurden im Abstand von 50 cm Punkte markiert. Dadurch entstanden drei Messlinien mit jeweils sieben Messpunkten. Diese Punkte wurden als Einzelpunktmessung erfasst, nivelliert, und mit der Richtlatte der *holz.bau forschungs gmbh* übermessen. Der Lagebezug des Nivellements wurde über die Markierungen realisiert. Das Brett erhielt an der Stelle der Deformation auf jeder Stufe noch je einen Messpunkt pro Linie.

### 9.3 Messung von Stichmaßen mit 2 m Richtlatte

Die Deformationen an der BSH Rippe und am Brett wurden auch mit der von der *holz.bau forschungs gmbh* angewendeten Methode gemessen. Der Aufbau der Methode wurde in Kapitel 3.1

bereits beschrieben. Zum Zeitpunkt der Messungen war nur eine Messuhr Käfer (mittlere Position) einsatzbereit. Die beiden anderen Messuhren zeigten während der Wiederholungsmessungen auffällige Ergebnisse. Die Richtigkeit dieser Daten wurde angezweifelt und daher vom weiteren Messablauf aufgeschossen. Die Nullmessung mit der Richtlatte geschah auf der Metalloberfläche einer Druckerpresse wie in Abbildung 58 zu sehen ist. Von dieser Oberfläche konnte ausgegangen werden, dass sie mit ausreichender Genauigkeit gefertigt worden war.



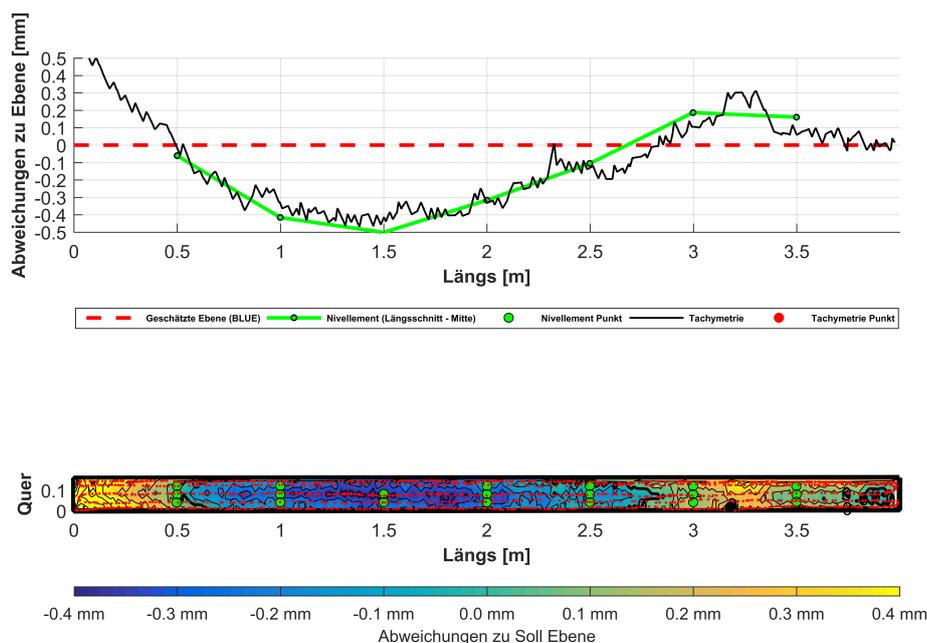
**Abbildung 58:** Eichung der Messlatte in der Druckerpresse

Messungen in zwei Lagen auf der Druckfläche zeigten keine systematischen Effekte auf. Durch Abweichungen in der Fertigungsgenauigkeit der Richtlatte waren die Abstände zwischen der Messuhr und den Auflagern nicht die selben. Dies zeigt sich im Auflegen der Richtlatte auf den Messlinien. Die Unterschiede zwischen Markierungen und Auflagern konnten bis zu 8 mm betragen. Für die Vergleichbarkeit der Richtlatte mit dem Nivellement mussten in der Auswertung dann die korrekten Höhen für die Auflagern aus den Nivellementdaten interpoliert werden. Die Messung des Brettschlags mit der Richtlatte fehlte. Die erhöhte Dichte an Messpunkten war mit der Richtlattenführung nicht vereinbar. Die Auflagern waren dann zu weit von den Stützpunkten entfernt und der Bezug der Daten zueinander war gänzlich verloren. Die Auswertung der Messungen am Brett war daher nicht möglich.

#### **9.4 Ergebnisse mit 4 m BSH Rippe für die kontinuierliche Messung eines Kugelprismas**

Die BSH Rippe wird von zwei Aufstellungen gegenseitig eingemessen. Über die gemessenen Nivellementpunkte werden die beiden Aufstellungen in ein gemeinsames Koordinatensystem gebracht. Für die Darstellung werden auch die Abmessungen der BSH Rippe mit der Totalstation erfasst.

In Abbildung 59 werden die Ergebnisse des Versuchs dargestellt. In der oberen Grafik ist ein mittlerer Schnitt in Längsrichtung durch das Brett dargestellt. Punkte der Totalstation werden den Nivellementpunkten gegenübergestellt. Die dargestellte Linie stammt aus der Dreiecksvermaschung der gemessenen Punkte mit der MS60, da mit dem Taylor-Hobson Prisma keine exakte Linie manuell realisiert werden kann. Die Längsinformation des Nivellements stammt ebenfalls aus den Messungen mit der MS60. Die Nivellementdaten werden über denselben Winkel in das Koordinatensystem transformiert wie die MS60 Messungen. Jedoch wird auf die Schätzung einer eigenen Ebene nach kleinsten Fehlerquadraten verzichtet, da die Datenmenge zu gering für ein repräsentatives Ergebnis ist. Die Daten werden relativ zur geschätzten Ebene aus dem ersten Experiment berechnet und anschließend um eine Konstante zu den Daten korrigiert.



**Abbildung 59:** Vergleich der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas mit dem Nivellement einer BSH Rippe

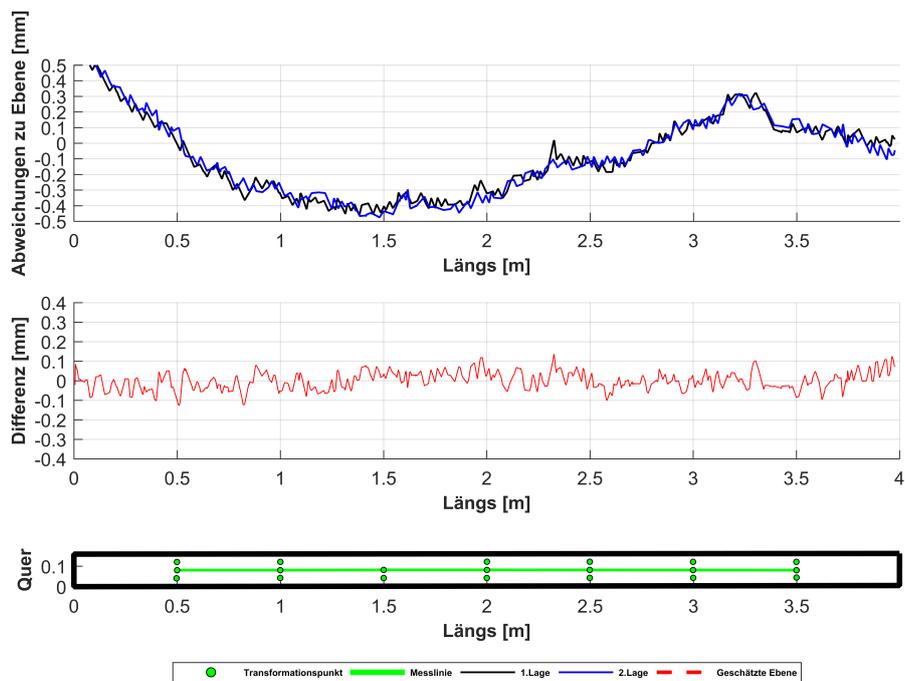
Es ist zu sehen, dass die BSH Rippe Deformationen in der Größenordnung von  $\pm 0.5$  mm aufweist. Vergleicht man die Nivellementpunkte mit den Punkten der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas, so werden in beiden Fällen ähnliche Oberflächendeformationen erkannt. Die Differenzen zwischen den Methoden liegen bei 0,1 mm. Damit liegen sie im Genauigkeitsbereich der kontinuierlichen ATR Messung auf ein bewegtes Ziel und sind nicht signifikant. Das Nivellement bestätigt dadurch die Daten der MS60.

In der unteren Grafik ist die Information über die gesamte Oberfläche dargestellt. Aufgrund dieser Information scheint eine Deformation der Rippe durch die Lagerung als unwahrscheinlich. Die Unterleghölzer wurden in gleichen Abständen zu den Rippenrändern aufgestellt. Das Absinken des Bretts ab 3,2 m Länge und die asymmetrische Biegung legen eine Deformation an der BSH Rippe selbst nahe.

Zur Bestimmung der Wiederholbarkeit der Ergebnisse sind in Abbildung 60 die Daten aus zwei gegenüberliegenden Standpunkten dargestellt. Die beiden Datensätze zeigen in der oberen Grafik dieselben Deformationen auf. Bildet man die Differenz der Datensätze, so erkennt man in der unteren Grafik, dass sich die Differenzen im Bereich von  $\pm 0.1$  mm bewegen. Es kann daher von einer Wiederholbarkeit der Ergebnisse in dieser Größenordnung, für ähnliche Messanordnungen ausgegangen werden.

## 9.5 Ergebnisse mit einem 4 m langen und stark deformierten Holzbrett

Bei den Messungen mit dem Holzbrett werden höhere Deformationen vermutet, da Unebenheiten schon mit dem Auge erkennbar sind. Um das Verhalten der Messmethode bei groben Deformationen zu untersuchen werden im Bereich von 1 m Länge bis 1,5 m Länge Unebenheiten mit einem elektrischen Hobel hinzugefügt. Die Anzahl an Nivellementpunkten wird in diesem Bereich erhöht. Befestigt wird das Brett über Klammern an der BSH Rippe. In Abbildung 61 werden die Ergebnisse



**Abbildung 60:** Vergleich der gegenseitigen Standpunkte mit der MS60 an der BSH Rippe

aus diesem Versuch dargestellt. Die Grafik ist analog zur Abbildung 59 aufgebaut.

In der oberen Grafik ist die Verformung des Holzbretts deutlich zu sehen und die Deformation durch den elektronische Hobel geht deutlich aus den Daten hervor. Vergleicht man die kontinuierliche Messung eines Kugelprismas mit dem Nivellement, zeigt sich wieder eine gute Übereinstimmung der erkannten Oberflächenunebenheiten. Bei der Gegenüberstellung der stufenweisen Deformation besticht wieder die höhere Auflösung der kontinuierlichen Messung. Aus der niedrigeren Auflösung des Nivellements gehen die Bruchkanten nicht hervor. Die Differenzen zwischen dem Nivellement und der kontinuierlichen Messung liegen an den Stützpunkten wieder im Genauigkeitsbereich von  $\pm 0.1$  mm.

Die gegenseitigen Standpunkte in Abbildung 62 zeigen im Differenzbild mehrere Abweichungen, deren Größenordnung deutlich höher ist als  $\pm 0.1$  mm. Die Artefakte bei einer Länge von 1 m und bei 1.5 m lassen sich auf eine mangelnde Punktzuordnung zurückführen. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, wird die Punktzuordnung über den Normalvektor der Ebene realisiert. Da die Proben in eine horizontale Lage gedreht werden, kann der Normalvektor der Ebene durch die Lotlinie angenähert werden. Gibt es aber abrupte Änderungen an der Holzoberfläche, stimmt diese Approximation nicht mehr mit den Gegebenheiten überein und Ungenauigkeiten in der horizontalen Punktlagegenauigkeit des Messsystems führen zu falschen Zuordnungen.

Die Abweichungen bei einer Länge von 2.7 m können auf die Interpolation zurückgeführt werden. Durch unterschiedliche Oberflächenauflösungen in beiden Punkten werden dieselben Effekte durch eine unterschiedliche Anzahl an Punkten beschrieben. Die Verteilung der jeweiligen Stützpunkte der Triangulation hat eine entscheidende Auswirkung auf die Form und die Lage von Oberflächeneffekten. Betrachtet man die Effekte genauer, ist zu sehen, dass die Ausprägung in beiden Messungen mit derselben Stärke erfasst wird, nur die Form unterscheidet sich aufgrund der Stützpunkte.

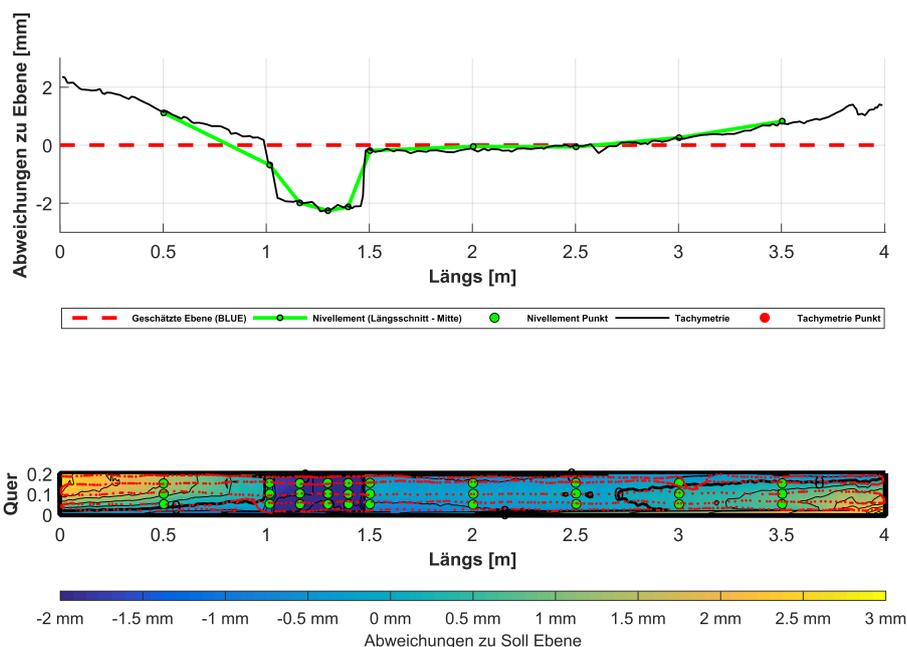


Abbildung 61: Vergleich der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas und dem Nivellement des Bretts

Ab einer Länge von 3.7 m ist ein leichtes Driften der Datenreihen festzustellen. Betrachtet man das Messobjekt an diesem Brettrand, kann man eine Porosität des Materials erkennen. Tiefe Risse in der Oberfläche stellen die Festigkeit des Materials hier in Frage. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass das Objekt während dem Auflegen des Kugelprismas seine Form behalten hat.

Mit diesem Effekt muss bei einer Punktwolke gerechnet werden, da sich derselbe Punkt in zwei Epochen nicht eindeutig realisieren lässt. Die Punktzuordnung ist dabei kein exaktes Verfahren, sondern bleibt eine Approximation der Realität.

## 9.6 Untersuchung der Richtlatte zur Ebenheitsprüfung

Die Richtlatte ist die Realisierung eines Stichmaßes aus Kapitel 1.3.2. Das Maß ist immer in Relation zu den beiden Auflagern der Richtlatte zusehen. Gibt es nun Unebenheiten auf der Oberfläche, so kommt durch die Auflager eine Schiefstellung der Richtlatte zustande und der Messweg der Messuhr weicht von der Lotlinie ab. Die Nivellementlatten bei einem Nivellement werden über Dosenlibellen nach der Lotlinie eingerichtet, daher ist ein direkter Vergleich nicht möglich. Aus diesem Grund werden aus den Daten des Nivellements die entsprechenden Stichmaße berechnet. Diese berechneten Stichmaße werden den tatsächlich gemessenen Stichmaßen in Abbildung 63 gegenübergestellt.

Die Nivellementpunkte werden über eine kubischen Spline verbunden. Zu jedem Punkt wird der interpolierte Wert 0.998 m links und 0.982 rechts abgegriffen und somit die Auflager simuliert. Die Längenverzerrung aufgrund geringer Schiefelage kann hier vernachlässigt werden. Auf der Verbindungslinie zwischen den Auflagern wird 0.998 m rechts vom ersten Auflager der Mittelpunkt der Latte angenommen. Die Verbindung zwischen dem simulierte Mittelpunkt und dem Nivellementpunkt entspricht dem Stichmaß an dieser Stelle. Dieser Wert kann nun verglichen werden. Es

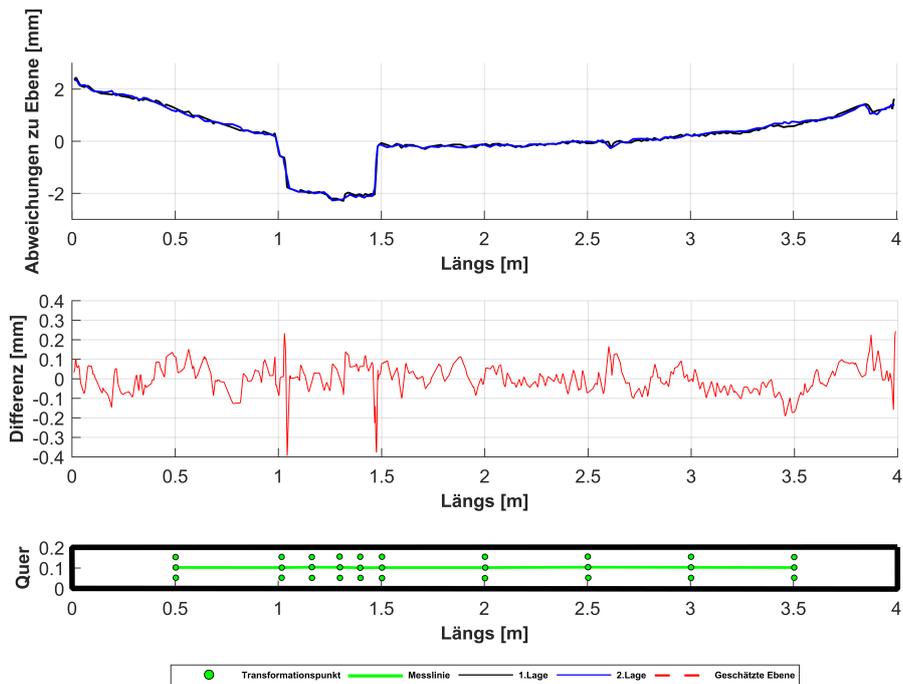


Abbildung 62: Vergleich der gegenseitigen Standpunkte mit der MS60 am Brett

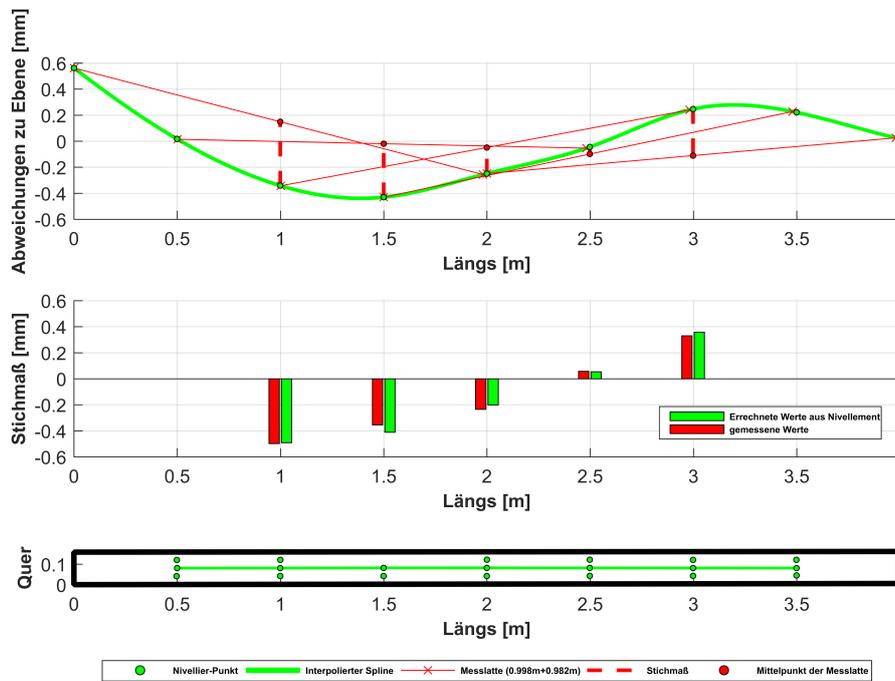
fällt auf, dass die Werte der Richtlatte und die simulierten Werte sich unter 0.1 mm von einander unterscheiden. Daher kann auch für die Richtlatte eine vergleichbare Genauigkeit der Messungen angenommen werden.

Zu beachten ist hier aber, dass die Richtlatte nur für Deformationen im Bereich zwischen den Auflagern sensitiv ist. Eine Aneinanderreihung von Lattenaufstellungen ist mit dieser Konfiguration von nur einer Messuhr nicht möglich. Eine Erfassung der gesamten Geometrie ist mit der Konfiguration mit drei Messuhren möglich, wenn die Standpunkte überlappend gemessen werden. Die Verkippung bei großen Unebenheiten ist ein Faktor, der die Genauigkeit bei einer Aneinanderreihung verschlechtert. Auch wirken sich kleine bautechnische Mängel in den Abständen zwischen den Messuhren negativ auf die Genauigkeit aus.

Es kann daher gesagt werden, dass die Richtlatte eine geeignete Genauigkeit des Stichmaßes relativ zu den beiden Auflagern besitzt. Die Ableitung großräumiger Deformationen und die erzielbaren Genauigkeit ist aber mit diesem Messkonzept in Frage zu stellen.

## 9.7 Zusammenfassung der Versuche am Labor für Bauphysik

Die Versuche am Bautechnik Zentrum zeigen, dass sich die kontinuierliche Messung eines Kugelprismas zur Bestimmung der Ebenheit von Holzoberflächen eignet. Es werden an einer 4 m langen BSH Rippe Deformationen im Ausmaß von  $\pm 0.5$  mm erkannt, welche mit freiem Auge nicht zu erkennen waren. Auch größere Deformationen an einem 4 m langen Holzbrett im Ausmaß von  $\pm 2$  mm können mit dieser Methode bestimmt werden. Der Vergleich der Messungen mit einem Präzissionsnivelement zeigt, dass die angenommene Genauigkeit aus Kapitel 8 von  $\pm 0.1$  mm, unter Berücksichtigung der dort angeführten Limitationen, eingehalten werden kann. Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit werden die Proben jeweils von zwei gegenüberliegenden Standpunkten einge-



**Abbildung 63:** Gegenüberstellung der Richtlatte mit dem Nivellement auf der mittleren Messlinie der BSH Rippe

messen. Die Differenzen zwischen den Datensätzen befinden sich unter den Versuchsbedingungen im definierten Genauigkeitsbereich.

Der Versuch mit einem stark deformierten Brett hat Fehler im Vergleich der Punktwolken aufgezeigt. Bei abrupten Kanten in der Oberfläche schlägt die Punktzuordnung fehl, da die Approximation der Flächennormale mit der Lotlinie nicht mehr legitim ist. Mit Deformationen im Bereich von mehreren Millimetern auf kleinem Raum ist aber bei industriell gefertigten Brettschichthölzer nicht zu rechnen. Vor allem, da ein solcher Defekt auch mit dem freien Auge leicht detektiert werden kann.

Es wird aufgezeigt, dass die Verteilung der gemessenen Punkte eine Auswirkung auf die Erscheinungsform der Deformationen hat. Die Form der Artefakte an der Oberfläche hängt von der Lage und Anzahl der Stützpunkte ab, die in die Triangulation einfließen.

## 10 Messung von BSH Rippen und BSP Platten bis zu 10 m Länge in einem Holzbetrieb

Nachdem der Testlauf der Oberflächenbestimmung mittels Taylor-Hobson Prisma in Kapitel 9 mit einer kurzen BSH Rippe positiv verlaufen war, wurde die Messmethode in einem Feldversuch getestet. Als Testobjekte wurden nun BSH Rippen und BSP Platten gemessen, die erst vor wenigen Tagen den Fertigungsprozess durchlaufen hatten und deren Abmessungen stellvertretend für diese Bauteiltypen waren. Die Messungen wurden in einem Holzbetrieb in Kärnten durchgeführt. Für die Messungen waren zwei Tage eingeplant worden, um jeweils verschiedene Kategorien von BSH Rippen am ersten Tag, sowie von BSP Platten am zweiten Tag, zu messen.

### 10.1 Aufbau und Ablauf der Messungen in einem Holzbetrieb

Ein besonderes Augenmerk wurde bei diesen Messungen auf die richtige Lagerung der Testobjekte gelegt. Für eine parallele Visur mit der Holzoberfläche mussten die Testobjekte aufgebockt werden. Eine Lagerung auf zwei Unterleghölzern wie in Kapitel 9.2 war nicht mehr möglich, da die Deformation am Objekt durch die Lagerung in diesem Fall größer wäre als die Deformation des Objekts selbst. Aus diesem Grund wurde am ersten Tag eine Hilfskonstruktion aus mehreren BSH Rippen und einer Platte errichtet, die in Abbildung 64 zu sehen ist.



**Abbildung 64:** Hilfskonstruktion ohne Testobjekt(links) und mit Testobjekt(rechts) am ersten Tag

Das Konzept dieser Konstruktion war es, die Unebenheiten des Bodens und der Unterleghölzern durch mehrere Schichten von BSH Rippen auszugleichen. Auf diese Rippen wurde eine Platte gelegt, welche die verbliebenen Unebenheiten aufnehmen sollte. Die Oberfläche dieser Platte wurde mit dem Prisma der Bauart Taylor-Hobson kontinuierlich gemessen, um die Deformationen der Lagerung den Deformationen der Testobjekte gegenüberstellen zu können. Die Höhe der Konstruktion wurde auf das zur Verfügung stehende Miniaturstativ abgestimmt. Eine andere Montage der Totalstation kann eine solche Holzkonstruktion überflüssig machen. In jedem Fall aber muss, vor der eigentlichen Messung der Probe, die Unebenheit der Unterlage auf der die Probe aufliegt bestimmt werden. Der Bezug zwischen den Testobjekten und der Platte wurde über markierte Transformationspunkte gewährleistet. Zu diesem Zweck wurden Körnungen auf der Platte und den Testobjekten vorgenommen. Gemessen wurden am ersten Tag sechs BSH Rippen, wobei immer zwei den gleichen Querschnitt aufwiesen. Alle Messungen wurden, analog zu dem Versuch im Labor für Bauphysik, doppelt durchgeführt, wobei die beiden Standpunkte jeweils an den gegenüberliegenden Rändern der Testobjekte gewählt wurden. Neben der Oberflächendeformation wurden auch noch die Holz-

feuchte und das Gewicht der Testobjekte erfasst.

Am zweiten Tag wurden vier BSP Platten mit unterschiedlichen Durchmessern gemessen. Aus aufeinander geschichteten BSP Platten wurde wieder eine Hilfskonstruktion errichtet. Der Ablauf der Messungen war analog zum Tag davor. Die Anordnung der Messungen am zweiten Tag wird in Abbildung 65 dargestellt.



Abbildung 65: Hilfskonstruktion mit BSP Platten am zweiten Tag

## 10.2 Untersuchung von Datenlücken im Messfile

Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass die Trajektorien des Taylor-Hobson Prismas erhebliche Lücken aufweisen. In Abbildung 66 ist das Ergebnis der Messung der zweiten BSP Platte als Beispiel angeführt.

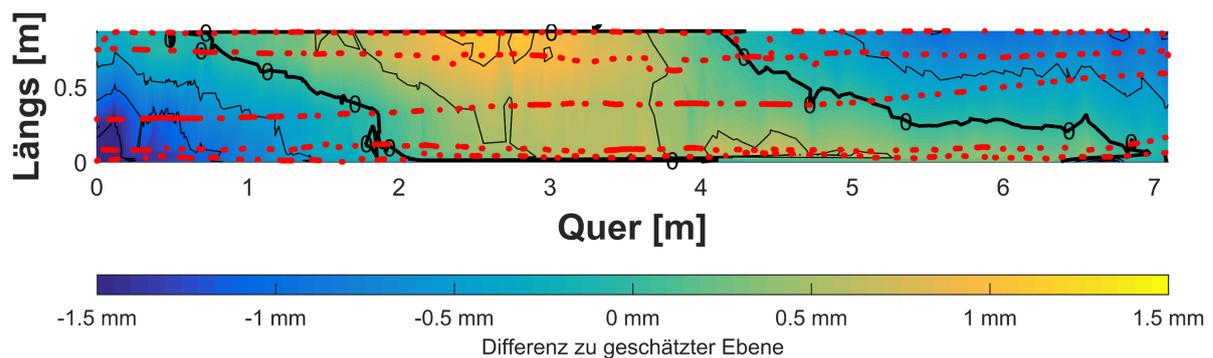
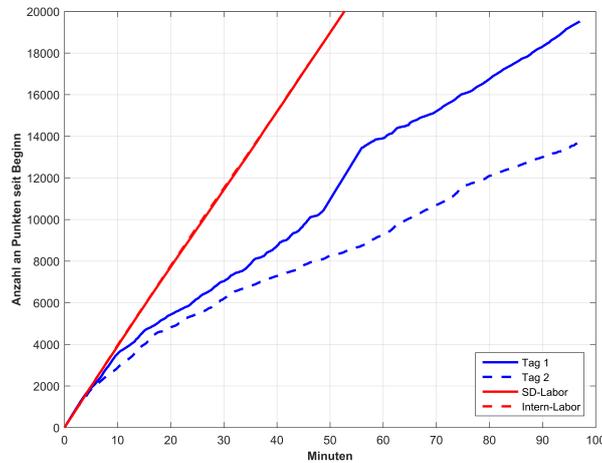


Abbildung 66: Datenlücken in der Trajektorie des Taylor-Hobson Prismas (rot)

Es ist zu sehen, dass die in rot dargestellte Trajektorie immer wieder unterbrochen ist. Nach mehreren gemessenen Punkten kommt es immer wieder zu Datenlücken von mehreren Sekunden. Die Messsituation wurde im Labor der TU Graz nachgestellt, um den Effekt zu reproduzieren und um die Ursache herauszufinden. Dafür wurde das Taylor-Hobson Prisma an einem Messschlitten auf einem horizontalen Komperator montiert. Das Prisma wurde auf dem Messschlitten auf einer ähnlichen Länge wie bei dem Holzbetrieb auf und ab bewegt, um die Messung zu simulieren.

Währenddessen wurde es mit der MS60 kontinuierlich verfolgt und gemessen. Da die Vermutung eines Problems bei der Speicherung bestand, wurde das Experiment für die Speicherung am internen Speicher und für die Speicherung auf der SD Karte wiederholt. Das Ergebnis dieser Untersuchung wird in Abbildung 67 dargestellt.



**Abbildung 67:** Zeitlicher Verlauf der Messrate im Feldversuch und im Labor

Der Verlauf der Messraten von dem Versuch im Holzbetrieb werden in blau dargestellt. In der Grafik ist die reine Messzeit gegenüber der Gesamtzahl an bisher gemessenen Punkten über den gesamten Tag aufgetragen. Die benötigte Zeit für das Umstellen und das Umbauen der Stationen scheint hier nicht auf. Es ist ein Drift in den beiden Datenreihen zu erkennen, daher wird mit zunehmender Zeit die Messrate niedriger und es kommt sogar zu erheblichen Datenlücken. Betrachtet man die Zeitreihen, die im Labor aufgenommen worden sind, so sind dieser Trend und die Datenlücken dort nicht zu erkennen. Die Messrate entspricht nicht den eingestellten 10 Hertz, aber sie ist konstant über die Zeit und es gibt nur minimalen Unterschied zwischen einer Speicherung auf der SD Karte und dem internen Speicher.

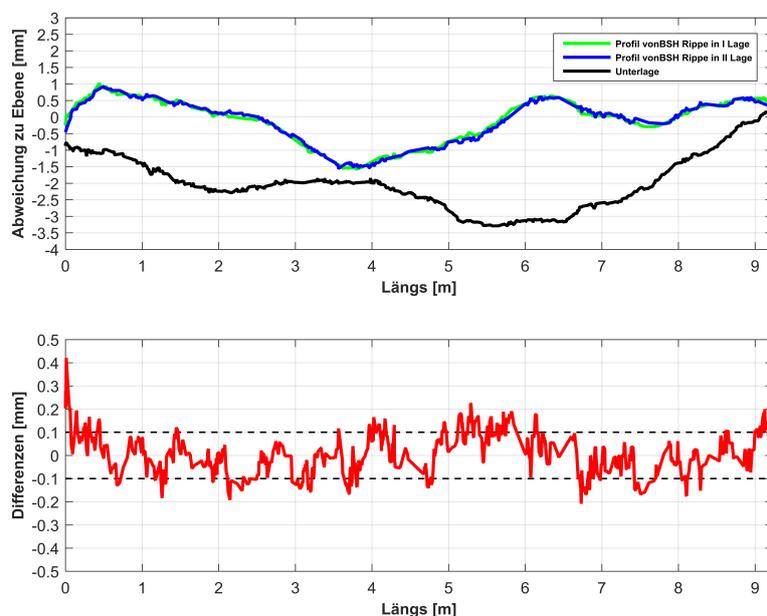
Der entscheidende Unterschied zwischen der Aufnahmesituation im Labor und der Aufnahmesituation vor Ort war die Aktivierung der Überblickkamera. Aufgrund der geringen Höhe wurde die Anzielung der Totalstation bei den Messungen im Betrieb über die integrierte Kamera und nicht über das Teleskop durchgeführt. Es hat sich bei näherer Untersuchung der MS60 gezeigt, dass die Darstellung der gemessenen Punkte am Display, wenn die Kamera aktiviert ist, ein entscheidender Faktor bei der Speicherung ist. Je mehr Punkte dargestellt werden müssen, desto länger braucht die Software für die Berechnung der Darstellung. Während dieser Phase werden keine neuen Punkte gespeichert. Die Neuberechnung der Szenerie wird mit jeder Bewegung der Totalstation ausgelöst. Bleibt die Position der Totalstation unverändert, also befindet sich die Trajektorie des Prismas innerhalb der Schranken des ATR, wird die erwartete Messrate eingehalten.

Für die kontinuierliche Zielverfolgung und Messung, muss bei der MS60 die Darstellung der Punkte bei aktivierter Kamera deaktiviert werden, um eine konstante Messrate zu gewährleisten.

### 10.3 Ergebnisse der Messung in dem Holzbetrieb

Die Schwankungen in der Messrate während der Messungen in dem Holzbetrieb führten zu einer verminderten Oberflächenauflösung. In Kapitel 6.3 wurde bereits dargelegt, dass eine verminderte Oberflächenauflösung auch zu einer verminderten Genauigkeit der interpolierten Oberfläche führt.

Vergleicht man nun die Messungen des selben Objekts von den zwei unterschiedlichen Standpunkten so kommt es zu Problemen bei dem Punktvergleich. Es wird ein M2M Vergleich (Kapitel 4.3) durchgeführt, aber die unregelmäßig verteilten Stützpunkte bei der Triangulation führen teilweise zu groben Fehlern. Aus diesem Grund können aus diesen Daten keine Aussagen über kleinräumige Effekte getroffen werden. Die Punktverteilung aber reicht aus um Aussagen über die großräumigen Deformationen der Testobjekte zu treffen.

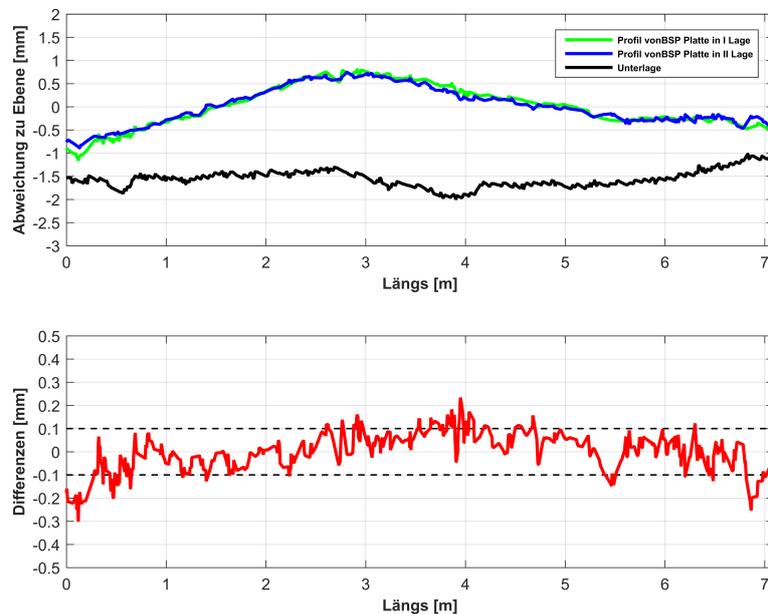


**Abbildung 68:** Gemessene RSH Rippe in zwei Lagen (unten) mit Unterlage dargestellt (oben)

In Abbildung 68 ist das Ergebnis der sechsten gemessenen RSH Rippe am ersten Tag dargestellt. Anhand der Messungen von zwei Standpunkten ist hier eine sehr gute Wiederholbarkeit zu sehen. Die Differenzen zwischen den beiden Messungen werden in der unteren Grafik in rot dargestellt. Die Differenzen liegen größtenteils im erwarteten Bereich von  $\pm 0.1$  mm, nur an wenigen Stellen kommt es zu größeren Abweichungen aufgrund der Punktverteilung. Die Profile zeigen Deformationen an der RSH Rippe im Ausmaß von  $\pm 1$  mm.

Den Profilen der RSH Rippe ist das entsprechende Profil der Unterlage gegenübergestellt. Der absolute Höhenunterschied in dieser Abbildung zwischen der RSH Rippe und der Unterlage ist nur symbolisch und dient der Veranschaulichung. Die Deformationen an der Oberseite der RSH Rippe hängen mit den Deformationen an der Unterlage zusammen. Zwischen diesen Messprofilen befinden sich aber noch mehrere geklebte Holzlamellen, daher ist die Auswirkung der Deformationen an der Unterlage auf die RSH Rippe noch von der Holzfestigkeit der RSH Rippe selbst abhängig. Die Differenz der Profile zu bilden, um den Effekt der Unterlage zu korrigieren, wäre daher ein Fehler. Viel aussagekräftiger ist die Gegenüberstellung der Profile und die gemeinsame Interpretation. In Abbildung 68 ist der Trend der Unterlage und der RSH Rippe gegenläufig, daher liegt das Testobjekt nur an einigen Punkten auf und behält seine Form durch die Eigenspannung bei. In diesem Fall stammt die Deformation an der Oberfläche von der RSH Rippe selbst. Sind der Trend der Unterlage und der RSH Rippe ähnlich, so kommt ein gewisses Ausmaß der Deformation von der Unterlage. Wie viel an Deformation aber tatsächlich von der Unterlage kommt, hängt auch noch von Parametern wie der Dicke des Holzes und der Eigenspannung ab.

Als Vergleich ist in Abbildung 69 eine RSP Platte von den Messungen am Tag zwei dargestellt. Für die Profile aller Testobjekte sei an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen.



**Abbildung 69:** Gemessene RSP Platte in zwei Lagen (unten) mit Unterlage dargestellt (oben)

#### 10.4 Zusammenfassung der Messungen und Anmerkungen zum Messablauf

Die Messungen in dem Holzbetrieb haben gezeigt, dass sich das Messkonzept eignet um Oberflächendeformationen mit einer Genauigkeit bis zu  $\pm 0.1$  mm zu erkennen. Das Messsystem hat sich als portabel und anpassungsfähig genug herausgestellt, um in Fertigungshallen von Holzbetrieben eingesetzt zu werden. Der Feldversuch hat aber auch gezeigt, dass es neben den messtechnischen Aspekten noch viele Rahmenbedingungen gibt, die während der Messungen vor Ort noch weiterentwickelt werden müssen.

Um das Messkonzept zuverlässig in einen Fertigungsablauf zu integrieren, muss ein einheitliches Konzept der Lagerung der Testobjekte entwickelt werden. Die bisherigen Hilfskonstruktionen zeigten unter größer werdender Belastung eine minimale Bewegung. Ebenfalls ermöglicht eine einheitliche Lagerung ein einheitliches Konzept für die Transformationspunkte. Bisher variierte die Reihenfolge und Anzahl der Transformationspunkte je nach Sichtbarkeit. Somit ist dies eine Grundvoraussetzung für die Automatisierung des Arbeitsablaufs.

In der Fertigungshalle muss ein geeigneter Ort für die Durchführung der Messung gewählt werden. Hier stehen mehrere Forderungen in Konkurrenz zueinander. Die Messungen erfordern ausreichend Platz für den Aufbau und den Umbau der Testobjekte und einer Hilfskonstruktion, es sollte die Infrastruktur (Stapler, Kran, etc.) vorhanden sein um die Testobjekte zu bewegen, die Messungen sollten so gut als möglich von atmosphärischen Störungen und Erschütterungen verschont bleiben und sie dürfen die restlichen Arbeitsabläufe in der Fertigungshalle nur minimal behindern.

Für die Messungen in dem Holzbetrieb wurde ein Aufbau in einem Bereich gewählt, wo fertige Pro-

dukte gelagert wurden. Dieser Ort erfüllte das Platzangebot, die Infrastruktur und vermied einen Konflikt mit anderen Arbeitsabläufen. Dadurch ergaben sich aber immer wieder grobe Störungen in der Atmosphäre, da das Lager über ein großes Tor ins Freie von den Staplern befahren wurde. Es wurde darauf geachtet nicht während einer groben Störung des Raumklimas zu messen, da sich dieses schnell wieder erholt hatte, jedoch konnte das nicht immer verhindert werden. Die Temperatur in der Fertigungshalle wurde bei konstanten 19°C gehalten, wobei die Messungen bei einer Außentemperatur um den Gefrierpunkt im November stattgefunden haben.

Bis nicht alle Rahmenbedingen für die Messungen in den Holzbetrieben standardisiert werden könnten, wird empfohlen das Konzept von jeweils zwei separaten Messungen von zwei Standpunkten aus für die Testobjekte beizubehalten. Bei zu großen Differenzen kann dann die Messreihe verworfen werden und eine Fehlinterpretation wird somit verhindert.

## 11 Zeitliche Gegenüberstellung und Wirtschaftlichkeit

Ein Faktor, der noch nicht ausreichend behandelt wurde, ist die Wirtschaftlichkeit und die Zeitdauer der Messmethoden. Unter Wirtschaftlichkeit wird die Beziehung zwischen Ertrag und Aufwand verstanden, welche vorliegt wenn das Verhältnis zu Gunsten des Anwenders ausfällt. (EICHHORN, 2000, S.15-16)

Die Anschaffungskosten, der Personalbedarf und die Zeitdauer sind Parameter, die in dieser Definition als Aufwand gesehen werden können. Die Fülle der Daten und der daraus ableitbare Informationsgehalt sind für den Anwender der Ertrag. Der Begriff "Wirtschaftlichkeit" kann aber keine globale Auskunft über die Güte eines Messsystems liefern, da die Gewichtung der Parameter subjektiv von jedem Anwender beurteilt werden muss.

### 11.1 Gegenüberstellung von untersuchten Messmethoden

In den Tabellen 7 und 8 wurden Eigenschaften ausgewählt, die eine wichtige Rolle bei der Wahl der Methode übernehmen, da sie den Aufwand widerspiegeln. Jeweils zwei Messverfahren werden anhand dieser verglichen.

**Tabelle 7:** Gegenüberstellung ausgewählter Eigenschaften der MS60 und der Messung eines Stichmaßes

Kategorie/ Gerät	Messuhr	MS60
Modus	Einzelpunkt	10 Hz dynamisch
Speicher	analog	digital
Resultat	Stichmaß	Punktwolke
Brettlänge	400 cm	400 cm
Punkte	21	1200
Aufstellung	2 min	10 min
Messung	3 min	3 min

Die Richtlatte mit der Messuhr bildet das einfachste der genannten Messsysteme. Der Transport gestaltet sich als einfach und auch die Kalibrierung der Latte ist nicht zeitaufwendig, wenn eine geeignete Oberfläche zur Kalibrierung vorliegt. Die Dokumentation der Daten geschieht über ein Messprotokoll, in das die abgelesenen Werte eingetragen werden müssen. Für die weitere Prozessierung müssen diese Protokolle digitalisiert werden. Die Anschaffungskosten von diesem System sind deutlich niedriger als die restlichen Lösungen, doch es muss die niedrigere Aussagekraft der Messwerte abgewogen werden.

Das Aufstellen einer Totalstation und das Messen der Referenzpunkte beansprucht eine längere Zeitdauer als die Richtlatte, jedoch die Messung selbst nimmt eine vergleichbare Zeit ein. Es wird daher mit dem gleichen Messaufwand eine viel höhere Anzahl an Punkten gemessen. Daher liegt mit diesem Messsystem eine flächige und dreidimensionale Information über die Oberflächendeformation vor. Die gemessene Punktwolke benötigt eine Prozessierung der Daten, um Informationen daraus abzuleiten. Dies kann automatisiert werden, verlangt aber einen genau definierten Arbeitsablauf vor Ort in den Betrieben.

**Tabelle 8:** Gegenüberstellung ausgewählter Eigenschaften der MS60 und des AT402

<b>Kategorie/ Gerät</b>	<b>MS60</b>	<b>AT402</b>
Modus	10 Hz dynamische	Einzelpunkt
Speicher	digital	digital
Resultat	Punktwolke	diskrete Punkte
Brettlänge	43 cm	43 cm
Punkte	500	40
Aufstellung	10 min	15 min
Messung	2 min	3 min

Der Lasertracker besticht durch die höchste Genauigkeit der genannten Methoden, der AT402 zeigt sich aber im Vergleich bei dieser Messaufgabe als ineffizienter. Die Messung der Punkte nimmt durch das einzelne Auslösen der Messungen mehr Zeit in Anspruch. Die Messung diskreter Punkte ist in vielen Anwendungen ein Vorteil, da keine Punktwolke ausgewertet werden muss. In der Anwendung bei der Flächenbestimmung spielt dies aber eine untergeordnete Rolle. Auch bei der Aufstellung des Systems, durch die Ansteuerung über einen Laptop, erweist sich das Gerät als umständlicher als die Totalstation. Auch hier müssen die höheren Anschaffungskosten des Lasertrackers im Vergleich zur Totalstation berücksichtigt werden.

## 11.2 Zeitaufwand der Messungen mit Taylor-Hobson Prisma

Als Ergänzung zu den Tabellen 7 und 8 wird hier detaillierter auf die nötige Messzeit einer Oberflächenbestimmung mit Taylor-Hobson Prisma eingegangen. Die Zeitangaben in Tabelle 9 basieren auf dem Feldversuch in Kapitel 10 und sollen einen Eindruck davon vermitteln, wie lange es dauert BSH Rippen und BSP Platten bis zu einer Länge von 10 m mit einer MS60 zu messen.

Aus den Daten geht hervor, dass die effektive Messzeit einer BSH Rippe, von einer Station aus, bei ungefähr 5 Minuten liegt. Die Messung einer BSP Platte benötigt doppelt so lange. Für eine Messung von einem zweiten Standpunkt werden ungefähr 12 bis 13 Minuten für das Umstellen der Totalstation gebraucht, bis wieder eine Messung gestartet werden kann. Die Zeit die für das Umbauen des Versuchsaufbaus benötigt wird, variiert sehr stark, da dies auch von der Verfügbarkeit eines Kranes oder eines Staplers vor Ort abhängig ist. In diese Zeitdauer fallen das Messen der Holzfeuchte, das Vermarken der Transformationspunkte, das Auswählen einer Holzprobe und das Austauschen der Testobjekte. Es hat sich gezeigt, dass für diesen Vorgang 30 bis 40 Minuten eingerechnet werden müssen. Summiert man die Einzelschritte auf, kann für die Messung eines Testobjektes eine Zeitdauer von einer Stunde erwartet werden.

Eine Reduktion der Zeitdauer kann durch die Standardisierung des Messablaufs vor Ort erreicht werden. Ein konstanter Prüfaufbau mit permanenter Unterlage und fix installierter Totalstation sind mögliche Erweiterungen des Messkonzepts.

**Tabelle 9:** Aufstellung des Zeitaufwands im Holzbetrieb

	<b>Lage I</b>	<b>Lage II</b>	<b>Umstellen</b>	<b>Umbau</b>	<b>Gesamtdauer</b>
Unterlage 1	16 min	10 min	12 min	–	–
BSH Rippe 1	5 min	5 min	10 min	48 min	68 min
BSH Rippe 2	6 min	7 min	11 min	22 min	45 min
BSH Rippe 3	5 min	5 min	13 min	53 min	75 min
BSH Rippe 4	4 min	5 min	11 min	28 min	48 min
BSH Rippe 5	6 min	6 min	15 min	34 min	60 min
BSH Rippe 6	6 min	6 min	15 min	34 min	60 min
<b>Mittel (Rippe)</b>	<b>5 min</b>	<b>5 min</b>	<b>13 min</b>	<b>36 min</b>	<b>59 min</b>
Unterlage 2	8 min	9 min	11 min	–	–
BSP Platte 1	7 min	7 min	18 min	35 min	69 min
BSP Platte 2	11 min	11 min	10 min	29 min	61 min
BSP Platte 3	12 min	13 min	12 min	24 min	61 min
BSP Platte 4	6 min	7 min	10 min	26 min	48 min
<b>Mittel (Platte)</b>	<b>9 min</b>	<b>9 min</b>	<b>12 min</b>	<b>29 min</b>	<b>60 min</b>

## 12 Zusammenfassung der Versuche und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden mehrere Ansätze aus der Industrievermessung für die Messung von Oberflächen behandelt. Der notwendige Genauigkeitsbereich, die Größe des Werkstücks, die Mobilität des Systems und die Wirtschaftlichkeit bestimmen darüber welcher Ansatz zur Anwendung kommt.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einer möglichst mobilen Messmethode zur Bestimmung der Oberfläche von BSH Rippen und BSP Platten aus Fichtenholz in Holzbetrieben. Ein anwendungsfreundliches Messsystem soll in einen Fertigungsprozess eingebunden werden, ohne die übrigen Arbeitsabläufe grob zu stören.

Zu Beginn der Arbeit wurde der Status Quo in den Prüfverfahren der Holzindustrie erhoben. Dafür wurde die derzeitige Ebenheitsprüfung der *holz.bau forschungs gmbh* näher untersucht und die entsprechenden Normen beleuchtet. Die gängige Messmethode war eine 2 m lange Latte aus Aluminium mit drei Aussparungen für Messuhren. Diese Konstruktion ist für die Messung von Stichmaßen ausgelegt. Durch überlappende Messungen mit mehreren Messuhren können Aufstellungen zu einer Messlinie verknüpft werden. Ein Versuch im Labor für Bauphysik hat gezeigt, dass die Differenzen zwischen den Ablesungen der Messuhr und einem Präzisionsnivelement weniger als 0.1 mm betragen. Dies gilt aber nur für die innere Genauigkeit der Richtlatte mit der Messuhr bei einer Aufstellung. Über die Genauigkeit bei einer Verknüpfung der Stichmaße kann keine Aussage durch Messergebnisse belegt werden, da zum Zeitpunkt des Versuchs nur eine Messuhr funktionsfähig war. Der Versuch hat aber Probleme in diesem Messsystem aufgezeigt, die sich in jedem Fall negativ auf die Genauigkeit auswirken. Die Kalibrierung der Richtlatte vor Ort ist eine heikle Angelegenheit, da man hier auf die Verfügbarkeit einer geeigneten Kalibrierungsoberfläche angewiesen ist. Die Messfehler summieren sich bei einer Aneinanderreihung der Aufstellungen auf und es kommt zu einem Drift in den Daten. Es sind keine Messungen in zwei Lagen vorgesehen, um systematische Effekte zu eliminieren. Bautechnische Schwankungen in den Abständen der Richtlatte verhindern einen konstanten Bezug der Auflager bei überlappenden Messungen. Es kann daher gesagt werden, dass die Richtlatte ein geeignetes Verfahren ist, um schnelle Aussagen über die geometrische Form von Oberflächen zu tätigen. Für eine zuverlässige Auskunft, über die Oberflächenunebenheiten im Submillimeterbereich bei Bauteilen mit mehreren Metern Länge, muss ein neuer Ansatz ausgearbeitet werden.

Als ein möglicher Ansatz wurde die Oberflächenmessung mit einem Laserscanner untersucht. Die universelle Einsatzbarkeit eines Laserscanners und die hohe Messrate machen es zu einem geeigneten Messsystem. Versuche im Messlabor der TU Graz haben aber gezeigt, dass der Laserstrahl der Distanzmessung bei einem berührungslosen Messverfahren in die Holzoberfläche eindringt. Abhängig von der Ausrichtung des Objekts, der Distanz zum Objekt und der Dichte der Holzoberfläche kann es zu systematischen Abweichungen von bis zu 1 mm kommen. Dieser Effekt ist in der Holzindustrie bereits als Tracheid Effekt bekannt und wurde auch mit der MS60 in diesem Versuch beobachtet. Distanzmessungen in Laserscannern können auf unterschiedlichen Technologien basieren, weshalb auch noch ein zweiter Versuch mit dem Industriescanner Surphaser 100HSX durchgeführt wurde. Dieser Industriescanner ist auf den Nahbereich ausgelegt und weist in den Spezifikationen eine Genauigkeit im Submillimeter auf. Er wurde von der Firma *Geos3D* für die Messungen zur Verfügung gestellt. Es zeigte sich die gleiche Abhängigkeit des Eindringverhaltens von der Distanz, der Verdrehung und der Dichte der Oberfläche. Eine adäquate Berechnung einer Korrekturfunktion für das Eindringverhalten über die Intensitätswerten, stellte sich aufgrund der komplexen physikalischen

Zusammenhänge und des hohen Rauschanteils in beiden Fällen als zu schwierig heraus. Aus diesem Grund wurde der Laserscanner als mögliches Prüfverfahren ausgeschlossen.

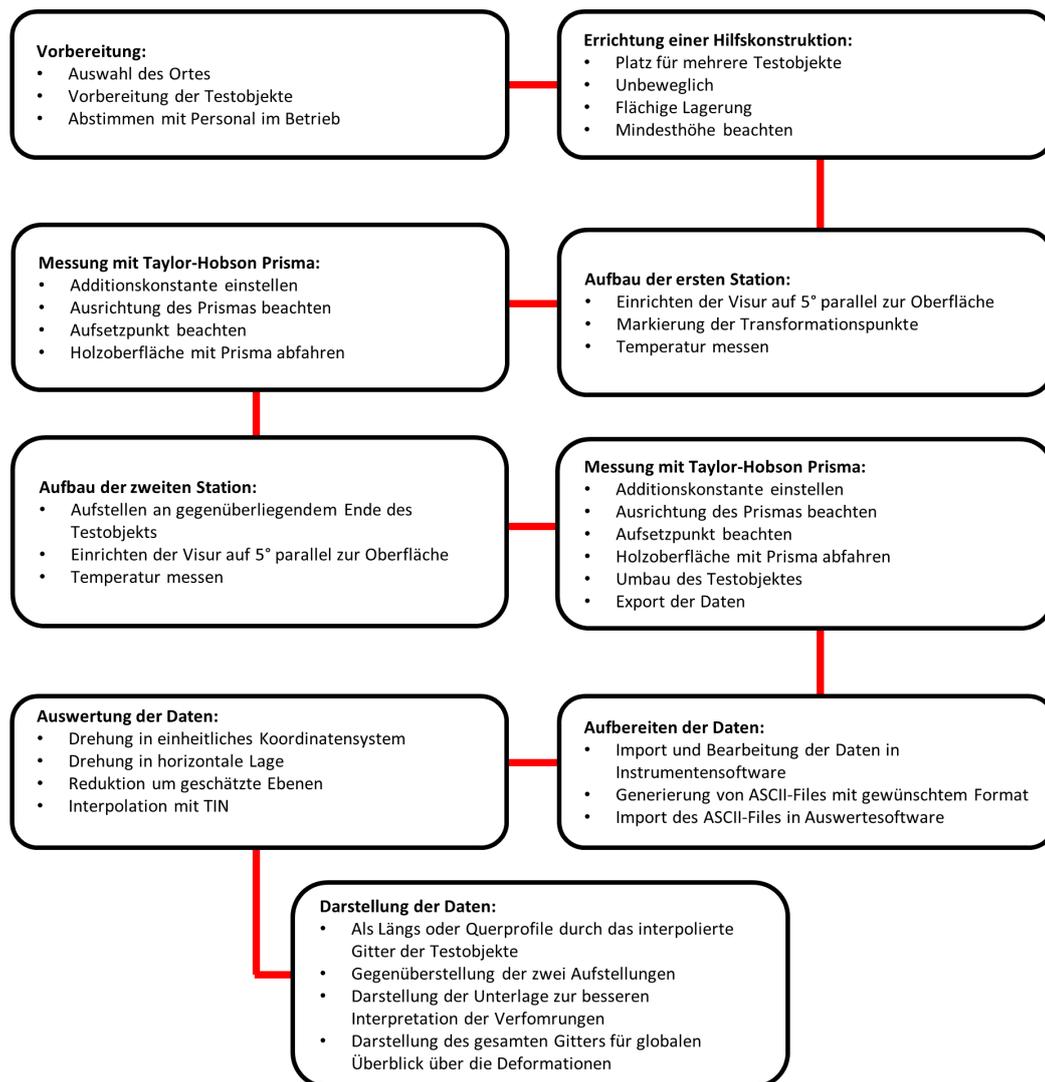
Die Versuchsreihe im Büro bei Geos 3D eröffnete die Möglichkeit, einen AT402 Lasertracker in die Analyse der Messverfahren miteinzubeziehen. Durch die hohe Genauigkeit des Lasertrackers konnten diese Messwerte als Referenz für die Oberflächenunebenheiten der Proben herangezogen und mit dem Laserscanner verglichen werden. Der Lasertracker AT402 selbst eignet sich durch die Beschränkung auf Einzelmessungen weniger für die effiziente Bestimmung von großflächigen Oberflächen. Ein anderes Modell, der Lasertracker AT403, besitzt aber die Möglichkeit einer kontinuierlichen Verfolgung und Messung eines Kugelprismas und bietet mit einer höheren Genauigkeit der Distanzmessung eine ähnliche Funktionalität wie eine Totalstation. Von einem technischen Standpunkt gesehen eignet sich der Lasertracker AT403 am besten für die Oberflächenbestimmung bei komplexen Bauteilen.

Bei der Prüfung von BSH Rippen und BSP Platten stellt die Prüfoberfläche eine einfache Ebene dar. Daher ist es hier möglich, durch eine Adaptierung des Messkonzepts, auch mit einer Totalstation eine Genauigkeit im Submillimeterbereich zu erreichen. Durch die Verwendung einer Totalstation, anstatt eines Lasertrackers, sinken die Kosten des Prüfverfahrens und die Wirtschaftlichkeit erhöht sich. Unter diesem Gesichtspunkt wird in dieser Masterarbeit die Verwendung einer Totalstation bevorzugt und näher ausgearbeitet.

Damit mit der Totalstation eine Genauigkeit im Submillimeterbereich erreicht werden kann, müssen Prinzipien aus mehreren Messverfahren kombiniert werden. Für die Messungen wird, wie bei einem Lasertracker, ein Kugelprisma verwendet, um das Eindringen einer berührungslosen Messung zu vermeiden. Das Kugelprisma hat einen Durchmesser von 88.9 mm, ist mit einem GPR1 Prisma ausgestattet und entspricht der Bauform von Taylor-Hobson. Das Prisma wird mit der Hand an der Holzoberfläche geführt, während die Trajektorie des Prismas von der Totalstation kontinuierlich verfolgt und gemessen wird. Durch die Linienführung des Anwenders wird die Auflösung der Oberfläche bestimmt. Wird die Trajektorie mit mehreren Hertz aufgezeichnet, ist das Ergebnis der Messung eine hochauflösende Punktwolke. Sie kann, wie das Ergebnis eines Laserscanners, ausgewertet werden. Eine Steigerung der Genauigkeit der Messdaten wird durch die Minimierung des Einflusses der Distanzmessung auf die entscheidende Punkt Komponente bewirkt. Der aussagekräftigste Wert für die Oberflächenunebenheiten ist die orthogonale Abweichung des Punktes zu einer Referenzebene. Durch eine Parallelstellung der Visur mit der Holzoberfläche ist dieser Wert zum Großteil von der hoch genauen Winkelmessung abhängig. Ein Versuch hat gezeigt, dass damit eine Genauigkeit bis zu  $\pm 0.1$  mm auf 18 m erreicht werden kann. Der Einfluss der Distanzmessung bewirkt eine Genauigkeit der Punktlage auf der Holzoberfläche im Millimeterbereich. Da die Deformationen an BSH Rippen und BSP Platten eher großflächigen Charakter haben ist hier diese Punktlagegenauigkeit mehr als ausreichend.

Das Erreichen einer Genauigkeit von  $\pm 0.1$  mm unterliegt einigen Limitationen, daher wird empfohlen die Messungen mit dem Taylor-Hobson Kugelprisma innerhalb einer Distanz von 20 m durchzuführen. Dabei soll eine parallele Visur zur Objektoberfläche sichergestellt werden, die eine Verkipfung von  $5^\circ$  nicht übersteigt. Bei der Führung des Kugelprismas soll darauf geachtet werden, dass das Prisma nicht um mehr als  $10^\circ$  zur Ziellinie verkippt wird und sich der Aufsetzpunkt nicht ändert. Die entsprechende Prismenkonstante muss eingestellt werden und die Auswirkung einer Änderung der Atmosphäre muss unter 50 ppm bleiben. Der gesamte Arbeitsablauf wird im Flussdiagramm in Abbildung 70 verdeutlicht.

Das Messverfahren wurde in einem Feldversuch in einem Holzbetrieb getestet. Bei diesen Messungen konnte die Durchführbarkeit des Arbeitsablaufs in einer Fertigungshalle bewiesen werden. Es wurden aber auch Probleme aufgezeigt, die dadurch bei zukünftigen Messungen vermieden werden können. Die Aktivierung der Überblickkamera und der Punktanzeige am Display führte zu einem drastischen Sinken der Messrate. Der rechenintensive Prozess der Punktdarstellung am Display verlangsamte das Instrument derart, dass es zu Datenlücken im Ausmaß von mehreren Sekunden kam. Dies kann durch die Deaktivierung der Punktdarstellung am Display umgangen werden. Auch sollte vermieden werden, bei zu niedriger Außentemperatur zu messen, wenn die Lagerhalle durch große Tore von Fahrzeugen befahren wird. Der drastische Temperaturunterschied ist eine grobe Störung, die zu Messfehlern führen kann.



**Abbildung 70:** Flussdiagramm für den Arbeitsablauf mit dem Taylor-Hobson Prisma

Diese Prüfmethode ist leicht realisierbar, sie ist mobil und lässt sich noch weiter automatisieren. Für ein effizientes Arbeiten muss der Arbeitsablauf vor Ort in den Betrieben noch genauer definiert werden. Eine einheitliche Lagerung der Testobjekte und ein einheitliches Konzept für die Anordnung der Transformationspunkte tragen in Zukunft zu einer Effizienzsteigerung bei. Es hat sich bewährt, mehrere Testobjekte zugleich mit einem Aufbau abzudecken, daher eine größere Unterlage zu wählen und z.B. mehrere BSH Rippen von der gleichen Station zu messen. Das Umbauen des

Aufbaus und der Testobjekte benötigt vor Ort am meisten Zeit. Es wird empfohlen das Konzept mit den gegenseitigen Visuren beizubehalten, da es als Kontrolle unerlässlich für die Qualitätssicherung ist.

Der Anwendungsbereich dieser Methode geht aber über die Erforschung von Klebefugen hinaus. Es ist ein universelles Werkzeug der Qualitätssicherung und kann auch für andere Holzbauteile mit ebenen Flächen eingesetzt werden.

## Literatur

- [ASTRAND 1996]   ASTRAND, Erik: *Automatic Inspection of Sawn Wood*. Foto und Montage Roland Offset, Linköping, 1996. – S.192. – ISBN 91-7871-693-4
- [ASTRAND und ASTRÖM 2000]   ASTRAND, Erik ; ASTRÖM, Anders: The use of Tracheid effect for non-contact measurement of strength related properties of wood. In: *Die Grazer Holzbau-Fachtagung 2000* (2000). – S.7
- [Basic-Software-Inc. 2013]   BASIC-SOFTWARE-INC.: *Surphaser SR, IR 100 HSX - Spec Sheet*. 2013. – S.2
- [BRATULIC und AUGUSTIN 2016]   BRATULIC, Katarina ; AUGUSTIN, Manfred: Screw glueing- theoretical and experimental approach on srew pressure distribution and glue line strength. In: *WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering* (2016). – S.10
- [CAMPBELL und REECE 1996]   CAMPBELL, Neil ; REECE, Jane: *Biologie*. 10.Auflage. Pearson, 1996. – S.1863. – ISBN 978-3-8632-6725-4
- [DEUMLICH und STAIGER 2002]   DEUMLICH, Fritz ; STAIGER, Rudolf: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. 9.Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002. – S.426. – ISBN 3-87907-305-8
- [EICHHORN 2000]   EICHHORN, Peter: *Das Prinzip Wirtschaftlichkeit - Basis der Betriebswirtschaftslehre*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 2000. – S.319. – ISBN 978-3-409-11575-9
- [HEXAGON 2015]   HEXAGON: *Leica Absolute Tracker AT402 - Factsheet*. URL [http://www.leica-geosystems.at/de/Leica-Absolute-Tracker-AT402\\_81625.htm](http://www.leica-geosystems.at/de/Leica-Absolute-Tracker-AT402_81625.htm), 2015. – S.2
- [HEXAGON 2017]   HEXAGON: *Romer Absolut Arm - Produktbroschüre*. URL <http://www.hexagonmi.com/de-DE/resource-detail?id=0d1a3178-30db-41e4-8570-f6f7fce066bb>, 2017. – S.24
- [HOFFMANN-WELLENHOF u. a. 2003]   HOFFMANN-WELLENHOF, Bernhard ; LEGAT, Klaus ; WIESER, Manfred: *Navigation - Principles of Positioning and Guidance*. Springer-Verlag Wien New York, 2003. – S.409. – ISBN 3211-00828-4
- [HOLST u. a. 2016]   HOLST, Christoph ; SCHMITZ, Berit ; KUHLMANN, Heiner: TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. In: *Terrestrisches Laserscanning 2016-Beiträge zum 154.DVW Seminar am 28. und 29. November 2016 in Fulda* (2016). – S.39-58
- [LACKNER und LIENHART 2016]   LACKNER, Stefan ; LIENHART, Werner: Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements. In: *Proc. Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria* (2016). – S.8
- [LEICA-GEOSYSTEMS 2014]   LEICA-GEOSYSTEMS: *WFD - Wave Form Digitizer Technology White Paper*. URL [http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova\\_ms50/white-tech-paper/Leica\\_Nova\\_MS50\\_WFD-Wave\\_Form\\_Digitizer\\_Technology\\_TPA\\_en.pdf](http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_ms50/white-tech-paper/Leica_Nova_MS50_WFD-Wave_Form_Digitizer_Technology_TPA_en.pdf), 2014. – S.12. – ISBN 829578en – 09.14 – INT

- [LEICA-GEOSYSTEMS 2015a] LEICA-GEOSYSTEMS: *ATRplus - White paper*. URL [http://www.leica-geosystems.at/downloads123/zz/tps/nova\\_ms60/white-tech-paper/ATRplus%20White%20Paper\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.at/downloads123/zz/tps/nova_ms60/white-tech-paper/ATRplus%20White%20Paper_en.pdf), 2015. – S.12. – ISBN 10.15 – INT
- [LEICA-GEOSYSTEMS 2015b] LEICA-GEOSYSTEMS: *Leica Nova MS60 - Datenblatt*. URL [http://www.leica-geosystems.at/downloads123/zz/tps/nova\\_ms60/brochures-datasheet/Leica%20Nova%20MS60%20DS\\_de.pdf](http://www.leica-geosystems.at/downloads123/zz/tps/nova_ms60/brochures-datasheet/Leica%20Nova%20MS60%20DS_de.pdf), 2015. – S.2. – ISBN 836397de - 05.15 - INT
- [LÖFFLER 2002] LÖFFLER, Franz: *Handbuch Ingenieurgeodäsie Maschinen- und Anlagenbau*. 2.Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002. – S.419. – ISBN 3-87907-299-X
- [LIENHART u. a. 2016] LIENHART, Werner ; EHRHART, Matthias ; GRICK, Magdalena: High frequent total station measurements for monitoring of bridge vibrations. In: *Proc. Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria (2016)*. – S.8
- [MÖSER u. a. 2012] MÖSER, Michael ; ; HOFFMEISTER, Helmut ; MÜLLER, Gerhard ; STAIGER, Rudolf ; SCHLEMMER, Harald ; LAMBERT, WANNINGER: *Handbuch Ingenieurgeodäsie Grundlagen*. 4.Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2012. – S.628. – ISBN 978-3-87907-504-1
- [NIEMEIER 2008] NIEMEIER, Wolfgang: *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden*. 2.Auflage. Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 2008. – S.487. – ISBN 978-3-11-019055-7
- [ÖNORM-B1995-1-1 2015-06-15] ÖNORM-B1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*. 2015-06-15
- [ÖNORM-DIN18202 2013-12-15] ÖNORM-DIN18202: *Toleranzen im Hochbau -Bauwerke*. 2013-12-15
- [ÖNORM-EN14080 2013-08-01] ÖNORM-EN14080: *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*. 2013-08-01
- [SCHICKHOFER 2006] SCHICKHOFER, Gerhard: *Holzbau: der Roh- und Werkstoff Holz, Skriptum*. TU Graz, Fachbereich Ingenieurbaukunst, 2006. – S.542. – ISBN S-4-01A/2006
- [TAYLOR-HOBSON 2015] TAYLOR-HOBSON: *Autokollimatoren und Zubehör*. URL [http://www.taylor-hobson.com.de/uploads/downloads/products/Digitaler%20Ultra-Zweiachsen\\_Lowres\\_DE-overview.pdf](http://www.taylor-hobson.com.de/uploads/downloads/products/Digitaler%20Ultra-Zweiachsen_Lowres_DE-overview.pdf), 2015. – S.12
- [WOSCHITZ 2014] WOSCHITZ, Helmut: Laboruntersuchungen von neuen Digitalnivellieren. In: *Wieser, A.(Hrsg.):Ingenieurvermessung 14, Beiträge zum 17.Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich (2014)*. – S.73-88

# Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung von Varianten der Schraubpressverklebung [ BRATULIC und AUGUSTIN (2016)] . . . . .	2
2	Maßabweichung und Grenzabweichung (ÖNORM-DIN18202, 2013–12–15, S.6) . . . . .	4
3	Stichmaß nach(ÖNORM-DIN18202, 2013–12–15, S.6) . . . . .	4
4	Tracheiden und Tracheen bei Laubholz (CAMPBELL und REECE, 1996, 1001) . . . . .	6
5	Schematischer Ablauf einer Laufzeitmessung . . . . .	8
6	Schematischer Ablauf einer Phasenmessung . . . . .	8
7	Messlatte zur Ebenheitsprüfung . . . . .	10
8	AT402 von Leica Geosystems mit Achsenbeschriftung . . . . .	11
9	Scan der Steyrergasse 30 der TU Graz . . . . .	12
10	Modell der Steyrergasse 30 der TU Graz . . . . .	13
11	Koordinatenmessmaschine der Firma Zeiss [Bild: <a href="http://www.zeiss.at/messtechnik">www.zeiss.at/messtechnik</a> ] . . . . .	15
12	Romer Messarm von Hexagon [HEXAGON (2017)] . . . . .	15
13	geodätisches System (links) und mathematisches System (rechts) . . . . .	17
14	C2C Vergleich ohne (links) und mit (rechts) lokaler Modellierung(HOLST u. a., 2016, S.43) . . . . .	19
15	Kugelprisma der Bauart "Taylor-Hobson" . . . . .	21
16	Messkonzept mit Kugelprisma . . . . .	22
17	Transformation zweier Punktwolken . . . . .	23
18	Transformation zweier Punktwolken in horizontale Lage . . . . .	23
19	Reduktion der Punktwolken um geschätzte Ebenen . . . . .	24
20	Fixierung des Objekts auf einem Messpfeiler in horizontaler Lage (links) und vertikaler Lage (rechts) . . . . .	25
21	Verwendetet Holzproben in den Versuchen . . . . .	26
22	Messlabor der Technischen Universität Graz . . . . .	27
23	Einzelpunktmessung (links), kontinuierliche Messung eines Kugelprismas (mitte) und Scan (rechts) mit Probe I . . . . .	28
24	Längsschnitt durch den Scan von Probe I (Schnitt durch die Mitte) . . . . .	29
25	Längsschnitt durch den Scan von Probe I (Schnitt durch die Mitte) . . . . .	29
26	Vergrößerung der Trend bereinigten Daten von Probe I . . . . .	30
27	Scan (links) und Farbfoto (mitte) und kontinuierliche Messung eines Kugelprismas (rechts) von Probe II . . . . .	31
28	Intensitätsbild von Probe II . . . . .	31
29	Scans von Probe III bei variierender Verdrehung und Distanz . . . . .	32
30	Querschnitte der Scans von Probe III bei variierender Verdrehung und Distanz . . . . .	33
31	Intensitätsbilder der Scans von Probe III bei variierender Verdrehung und Distanz . . . . .	34
32	Abweichungen zu Sollebene mit Intensitäten bei variierender Verdrehung und Distanz . . . . .	35
33	Zwei Messepochen mit gegenüberliegenden Standpunkten der Probe II und der Probe III bei 13 m . . . . .	36
34	Versuchsaufbau im Büro von Geos3D . . . . .	39
35	Bestimmung der Referenzpunkte mit Lasertracker (links) und Anbringen der Zieltafeln (rechts) . . . . .	39
36	Einzelpunktmessung mit Lasertracker auf Probe III in zwei Lagen (oben) und Längsprofile durch die Mitte (unten) . . . . .	41
37	Scan der Probe II aus einer Distanz von 8 m mit dem Surphaser 100HSX . . . . .	42
38	Längsschnitte durch die Mitte von Probe II in einer Distanz von 8 m . . . . .	42

39	Scan der Probe III aus einer Distanz von 8 m mit dem Surphaser 100HSX . . . . .	43
40	Gegenüberstellung der Ergebnisse des Scans von Probe III mit den entsprechenden Intensitäten . . . . .	44
41	Schematischer Aufbau der Kalibrierungsstrecke für die Nullpunktkorrektur . . . . .	46
42	Prüfstrecke mit MS60 (links) und Halterung für Taylor-Hobson Prisma (rechts) . . .	47
43	Ergebnis der Überprüfung für Varianten des Rundprismas bei 26 m [LACKNER und LIENHART (2016)] . . . . .	48
44	Ergebnis der Überprüfung für Varianten des Rundprismas bei 26 m (Vergrößert)[LACKNER und LIENHART (2016)] . . . . .	48
45	Verdrehung der Kugel in 90° Intervallen um die Ziellinie und Abweichungen in Relation zur ersten Position . . . . .	49
46	Taylor-Hobson Kugelprisma mit roter Markierung . . . . .	50
47	Aufbau mit Messschlitten . . . . .	51
48	Ergebnisse mit dem Messschlitten für 3 m (links) und 18 m(rechts) . . . . .	52
49	Histogramm der Differenzen für 3 m (links) und 6 m(rechts) . . . . .	52
50	Histogramm der Differenzen für 18 m . . . . .	53
51	Foto der Versuchshalle am BTZ [Foto: Bratulic] . . . . .	55
52	Prinzip eines Nivellements . . . . .	56
53	Abweichungen zu einem Höhenkomparator mit DNA03 [WOSCHITZ (2014)] . . . . .	56
54	Nivellierprobe nach Förstner . . . . .	57
55	Aufstellung mit MS60 (links) und DNA03 (rechts) im BTZ . . . . .	58
56	Miniaturinvarlatte . . . . .	59
57	Künstliche Deformationen am Holzbrett . . . . .	59
58	Eichung der Messlatte in der Druckerpresse . . . . .	60
59	Vergleich der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas mit dem Nivellement einer BSH Rippe . . . . .	61
60	Vergleich der gegenseitigen Standpunkte mit der MS60 an der BSH Rippe . . . . .	62
61	Vergleich der kontinuierlichen Messung eines Kugelprismas und dem Nivellement des Bretts . . . . .	63
62	Vergleich der gegenseitigen Standpunkte mit der MS60 am Brett . . . . .	64
63	Gegenüberstellung der Richtlatte mit dem Nivellement auf der mittleren Messlinie der BSH Rippe . . . . .	65
64	Hilfskonstruktion ohne Testobjekt(links) und mit Testobjekt(rechts) am ersten Tag .	66
65	Hilfskonstruktion mit BSP Platten am zweiten Tag . . . . .	67
66	Datenlücken in der Trajektorie des Taylor-Hobson Prismas (rot) . . . . .	67
67	Zeitlicher Verlauf der Messrate im Feldversuch und im Labor . . . . .	68
68	Gemessene RSH Rippe in zwei Lagen (unten) mit Unterlage dargestellt (oben) . . .	69
69	Gemessene RSP Platte in zwei Lagen (unten) mit Unterlage dargestellt (oben) . . .	70
70	Flussdiagramm für den Arbeitsablauf mit dem Taylor-Hobson Prisma . . . . .	77

## Tabellenverzeichnis

1	Spezifikationen der Unsicherheiten des Leica AT402 [ HEXAGON (2015)] . . . . .	12
2	Spezifikationen des Surphaser 100HSX [ Basic-Software-Inc. (2013)] . . . . .	13
3	Spezifikationen MS60 Leica [ LEICA-GEOSYSTEMS (2015b)] . . . . .	14
4	Ergebnisse der freien Stationierungen . . . . .	40
5	Spezifikationen der Automatischen Zielerfassung - ATR Plus der MS60 [LEICA-GEOSYSTEMS (2015b)] . . . . .	50
6	Ergebnisse der Nivellierprobe nach Förstner . . . . .	58
7	Gegenüberstellung ausgewählter Eigenschaften der MS60 und der Messung eines Stichmaßes . . . . .	72
8	Gegenüberstellung ausgewählter Eigenschaften der MS60 und des AT402 . . . . .	73
9	Aufstellung des Zeitaufwands im Holzbetrieb . . . . .	74

# Anhang - Ergebnisse der Messungen bei Geos3D für die Probe III

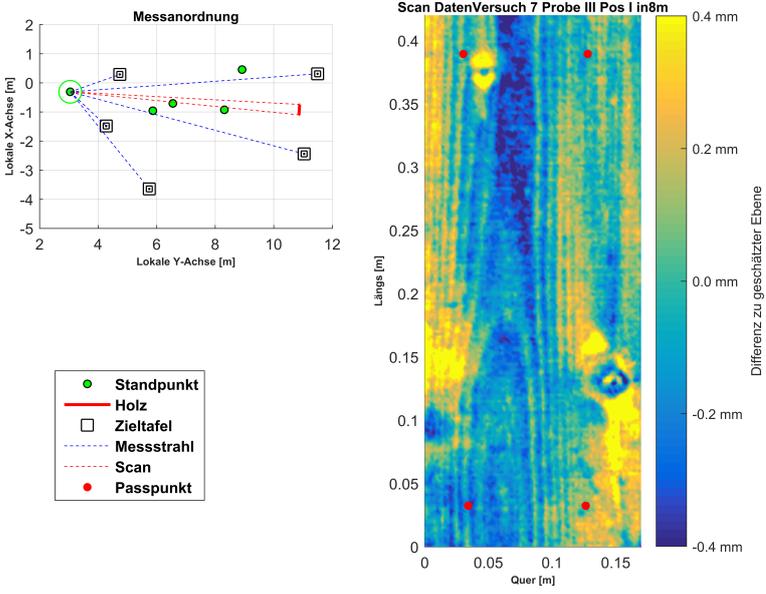


Abbildung 1: Scan von Probe III in Position I

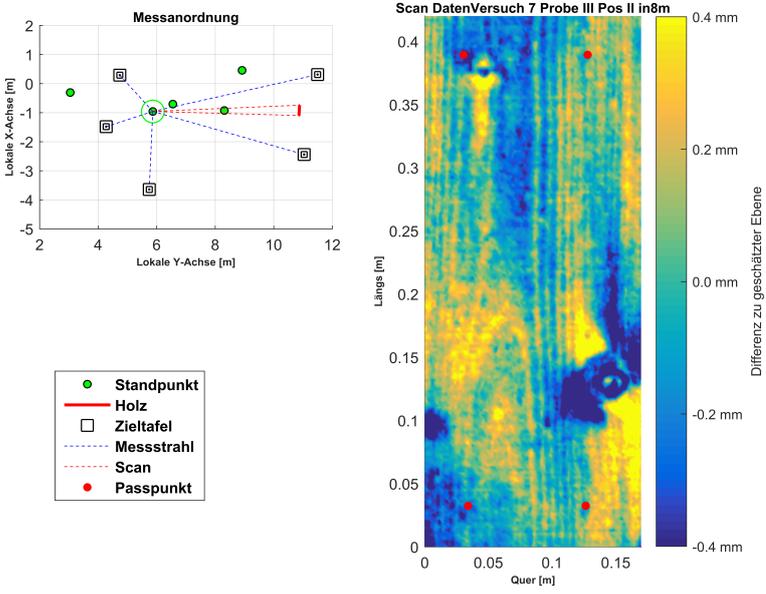


Abbildung 2: Scan von Probe III in Position II

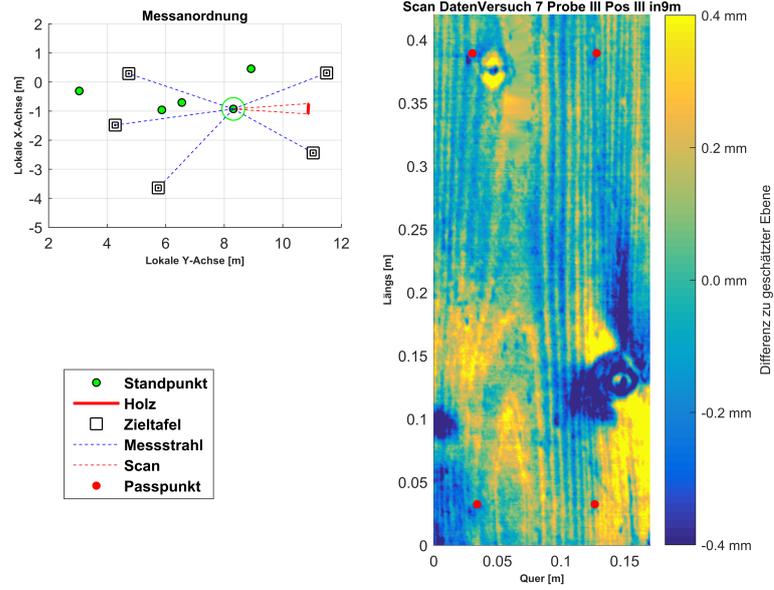


Abbildung 3: Scan von Probe III in Position III

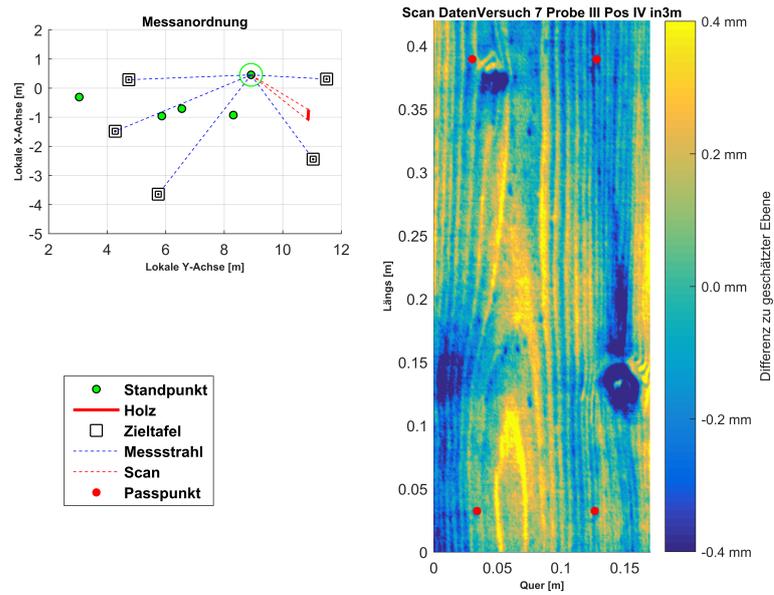


Abbildung 4: Scan von Probe III in Position VI

# Anhang - Ergebnisse der Messungen im Holzbetrieb (RSH Rippen)

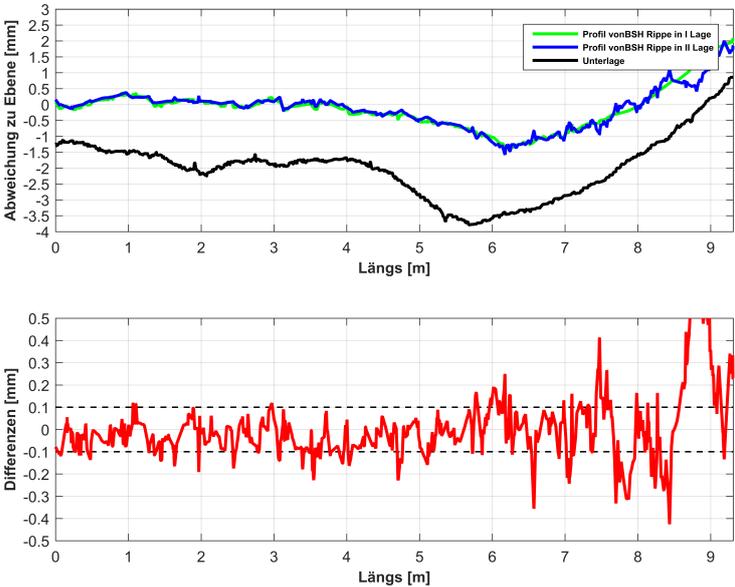


Abbildung 5: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSH Rippe 1

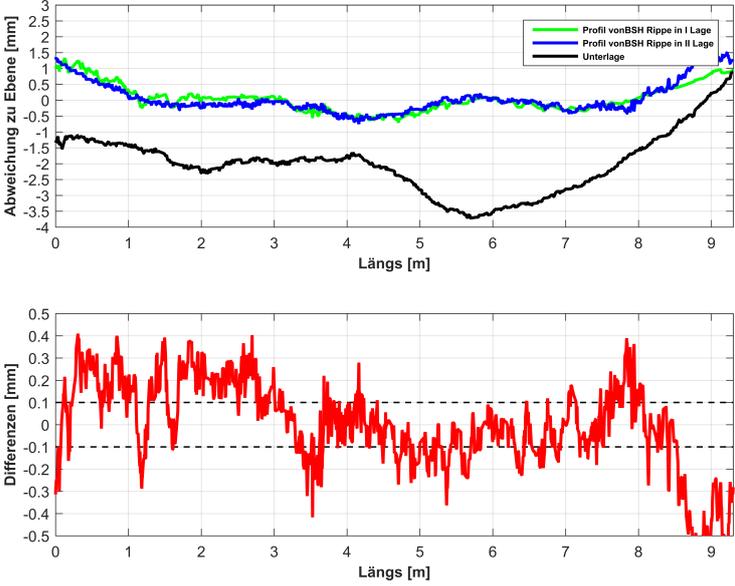


Abbildung 6: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSH Rippe 2

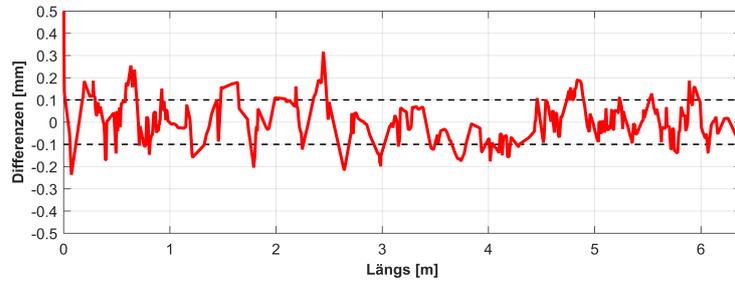
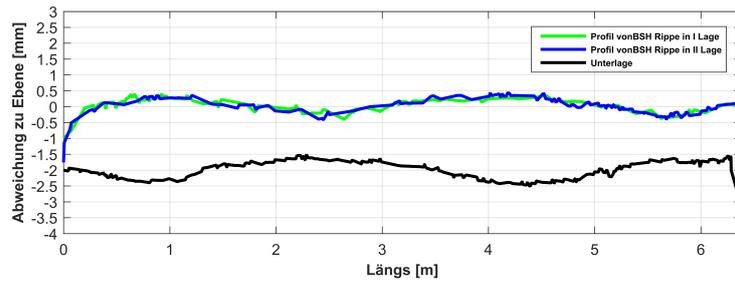


Abbildung 7: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSH Rippe 3

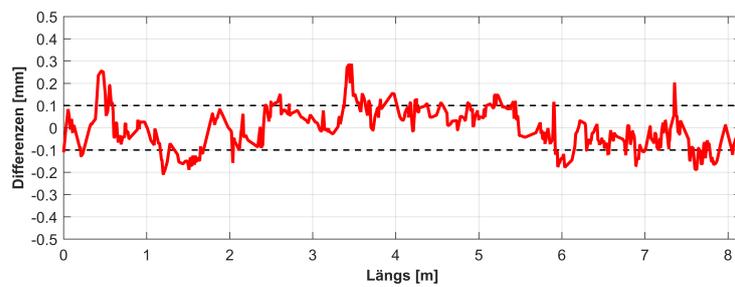
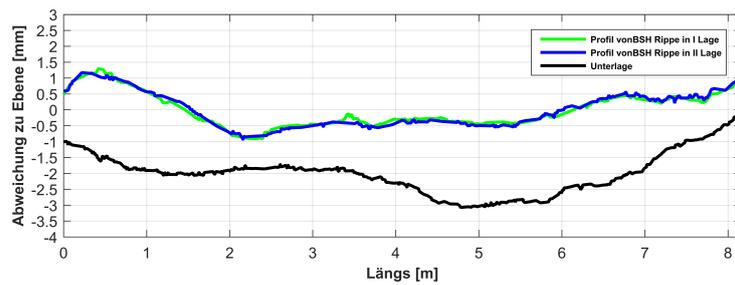


Abbildung 8: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSH Rippe 4

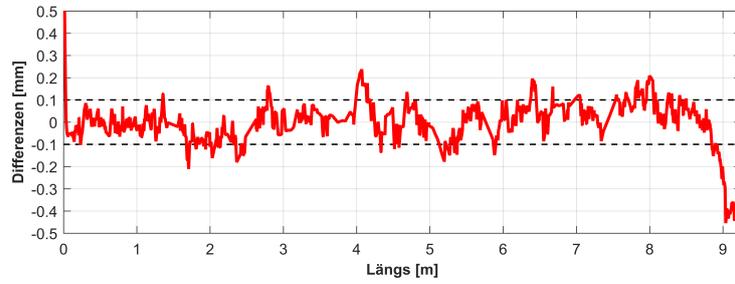
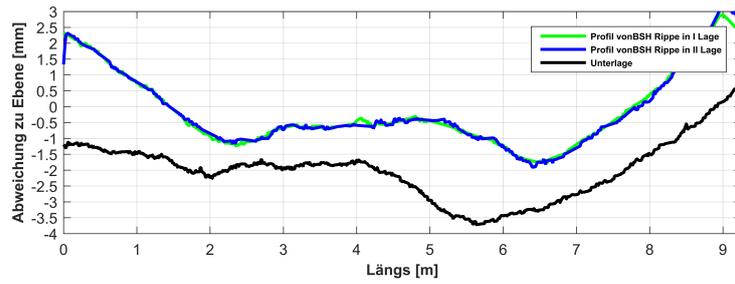


Abbildung 9: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSH Rippe 5

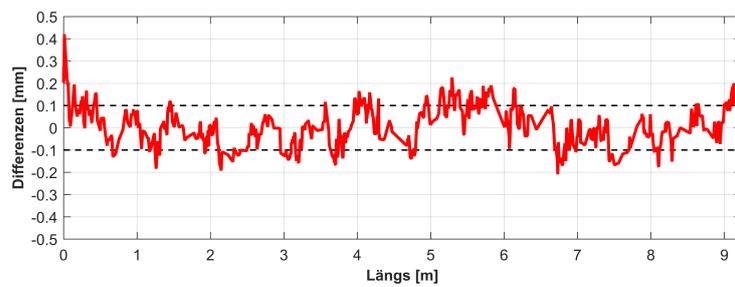
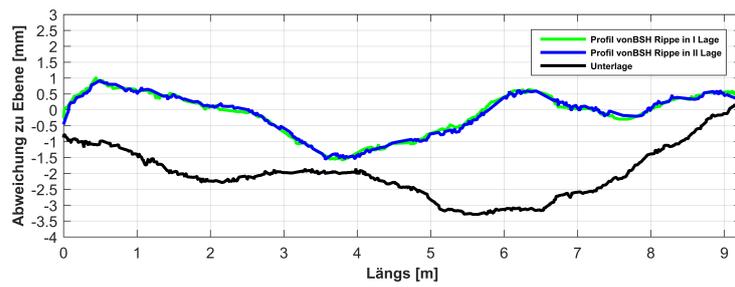


Abbildung 10: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSH Rippe 6

# Anhang - Ergebnisse der Messungen im Holzbetrieb (RSP Platten)

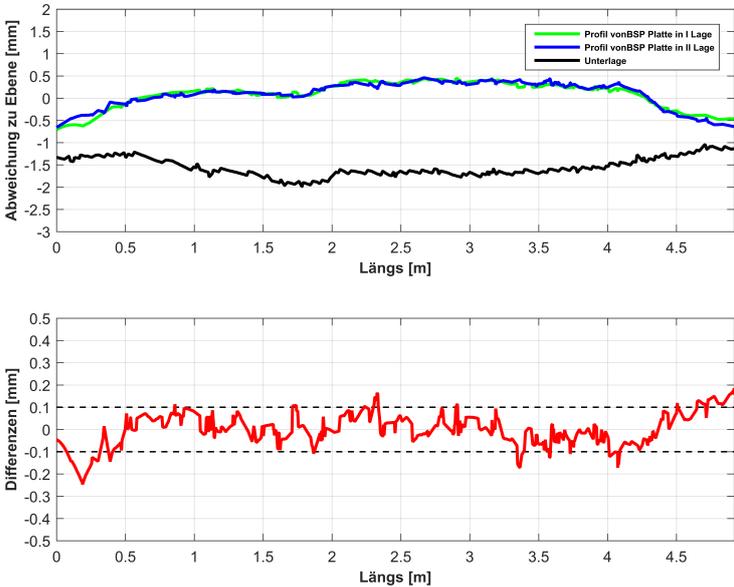


Abbildung 11: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSP Platte 1

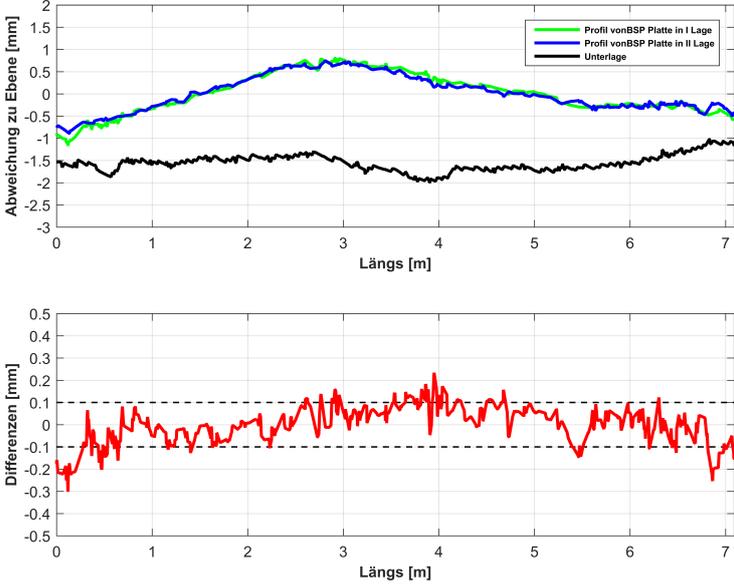


Abbildung 12: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSP Platte 2

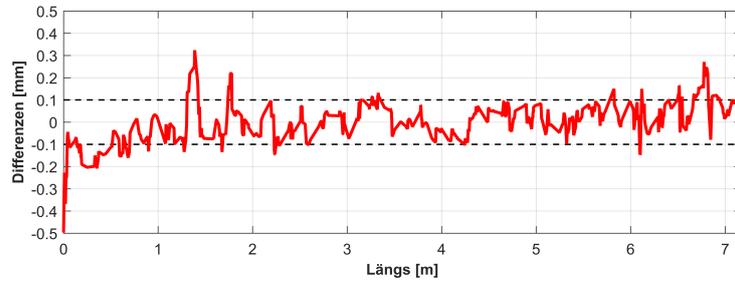
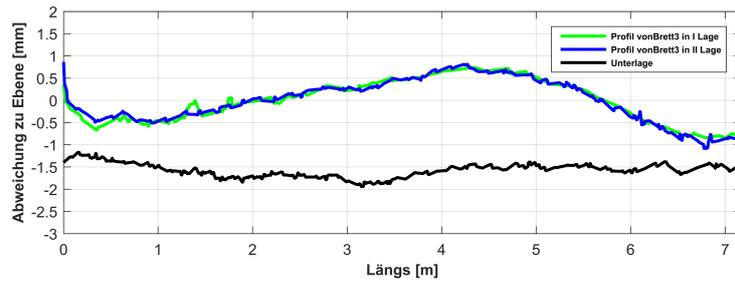


Abbildung 13: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSP Platte 3

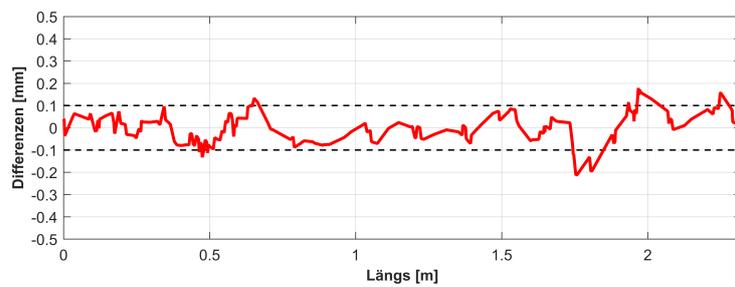
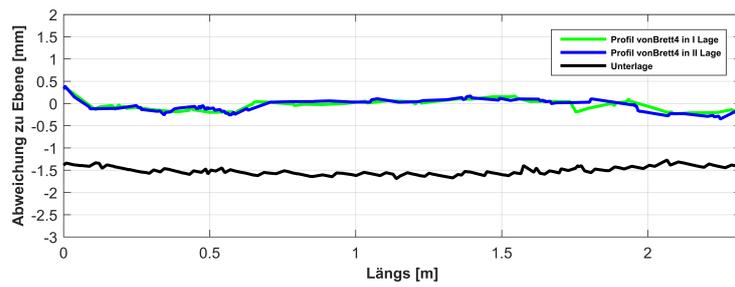


Abbildung 14: Messung mit Taylor-Hobson Prisma von BSP Platte 4