



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Hochschule Neubrandenburg

Studiengang Geodäsie und Messtechnik

Genauigkeitsüberprüfung eines Streifenlichtprojektors

Bachelorarbeit

vorgelegt von: *Axel Plaumann*

Zum Erlangen des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“ (B.Eng.)

Erstprüfer: Prof. Dr. Sven Brämer

Zweitprüfer: Prof. Dr. Wilhelm Heger

Eingereicht am: 28.02.2020

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2020-0101-4

Kurzfassung

Streifenlichtprojektoren sind ein viel genutztes Vermessungsinstrument in der Industrie. Auch hier in der Hochschule Neubrandenburg steht ein „low-cost“ System für studentische Übungen zur Verfügung. Genutzt wird das System mit dem Namen David-3D SI1 seit Jahren, es wurde aber nie auf seine Genauigkeit bei der Erstellung eines Scans überprüft. Bei professionellen Systemen kann ein Messvolumen zwischen 0,5m³ und 4m³ genutzt werden, wobei Genauigkeiten bei kleineren Messfeldern bis 0,003 mm erreicht werden kann.

Diese Arbeit befasst sich mit der Genauigkeitsüberprüfung des Streifenlichtprojektors David-3D SI1. Es soll bestimmt werden mit welcher Genauigkeit Scans aus verschiedenen Entfernung zu der Basis des Projektors erstellt werden. Auch die Einflüsse verschiedener Materialien und Lichtbedingungen werden in dieser Arbeit überprüft.

Abstract

Strip light projectors are a widely used surveying instrument in industry. Such a system is also available here at the Neubrandenburg University of Applied Sciences. The system with the name David-3D SI1 has been used for years, but it was never checked for accuracy when making a scan.

This thesis deals with the accuracy check of the David 3D SI1 strip light projector. The aim is to determine the accuracy with which scans are made from different distances to the base of the projector. The influences of different materials and lighting conditions are also examined in this work.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die hier vorliegende Masterarbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und sowohl wörtliche, als auch sinngemäß entlehnte Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in gleicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhalt

1	Motivation	1
2	Einführung	2
3	Grundlagen	3
3.1	Taktile Vermessung	3
3.1.1	Lehre und Messschieber	3
3.1.2	Messarme und Koordinatenmessmaschinen	3
3.2	Optische 3D-Messtechnik	3
3.2.1	Laufzeitmessung	4
3.3	Triangulation	5
3.3.1	Passive Triangulation	5
3.3.2	Aktive Triangulation	5
3.4	Streifenlicht	7
3.4.1	Grey Code	7
3.4.2	Phasenshift-Verfahren	8
3.4.3	Kombination aus Grey Code und Phasenshift-Verfahren	8
3.5	Kamerakalibrierung	8
3.5.1	Innere Orientierung	9
3.5.2	Äußere Orientierung	10
3.6	Reflexionsverhalten von Licht	10
4	Genauigkeitsbetrachtung	11
4.1	Leuchtdichteerhaltung	11
4.2	Fehler durch verschiedene Positionen und Entfernungen im Blickfeld	11
4.3	Grenzen der Kamera	12
4.4	Grenzen des Projektors	12
4.5	Fehler durch die Berechnung der Strecken	12
5	Messaufbau	14
5.1	David 3D sl1	14
5.2	Referenzkörper	15
5.2.1	Holz	16
5.2.2	Aluminiumprofil	17
5.2.3	Aluminiumklotz	17
5.2.4	Formteil	18
5.2.5	Bücher	19
5.3	Durchführung der Messung	19

5.3.1	Ersten Probemessungen.....	19
5.3.2	Bestimmung des Messbereichs	21
5.3.3	Einfluss verschiedener Materialien auf die Messung.....	23
6	Datenauswertung	24
6.1	Formeln für die Auswertung	24
6.2	Auswertung des Messbereichs.....	26
6.2.1	Auswertung mit Inventor	26
6.2.2	Auswertung mit Geomagic Control	28
6.3	Einfluss verschiedener Materialien auf die Genauigkeit.....	30
6.4	Blender	33
7	Zusammenfassung und Ausblick	34
8	Literaturverzeichnis.....	35
9	Abbildungsverzeichnis.....	36
10	Formelverzeichnis.....	36
11	Tabellenverzeichnis	37

1 Motivation

In der heutigen Industrie ist es unablässig Informationen über Produktion zu haben. Zum einen spielen Informationen über Komplikationen in dem Produktionsablauf eine Rolle, zum anderen sind aber auch die Informationen über das Einhalten von Maßen relevant. Vorgaben hierfür sind zum Beispiel DIN-Maße oder durch den Kunden festgelegte Maße. Hierbei ist es die Aufgabe des Qualitätsmanagements die Einhaltung der Vorgaben zu überwachen. Für diese Aufgabe werden hochgenaue Messinstrumente benötigt. Die Vermessung bietet dafür verschiedenste Messinstrumente und Messverfahren an. Von Theodoliten über Tachymeter und GNSS-Empfängern bis hin zu digitalen optischen Messinstrumenten. Wobei die Optische Vermessung einen besonderen Vorteil bietet, nämlich dass keine Berührung des zu vermessenden Objekts mehr nötig ist. Durch Methoden wie die Streifenlichtprojektion ist es zusätzlich möglich, flächenhafte Daten in nur einer Messung zu erhalten. Dieses bietet den Vorteil, dass durch nur wenige Messungen auch große Objekte mit einer komplexen Form vermessen werden können.

Im nachfolgenden Innendienst stehen die Messungen als Punktwolke zur Verfügung, mit welcher viele weitere Arbeitsschritte leichter und sogar erst ermöglicht werden. Ein Beispiel ist der Vergleich der Punktwolke mit einem CAD-Modell, wodurch Abweichungen vom Soll bestimmt werden können, ohne die Datenfülle ist ein direkter Vergleich mit dem CAD-Modell nicht möglich. Es könnten lediglich Einzelmaße überprüft werden. Ein weiterer Vorteil der Streifenlichtprojektion ist es, dass dieses System auch in „low-cost“-Varianten genutzt werden kann. Somit steht dieses nicht nur Unternehmen zur Verfügung, sondern auch Privatpersonen, die ein Interesse an der Vermessungstechnik haben oder diese für Hobbyprojekte nutzen.

In der Hochschule Neubrandenburg steht ein Streifenlichtprojektionssystem zur Verfügung. Genutzt wird dieses vor allem in dem Modul Industrievermessung. Dort werden Messungen mit einem Linienlaser und dem Streifenprojektionsverfahren durchgeführt. Es wurde je doch nie überprüft, mit welcher Genauigkeit eine Messung erstellt wird, was durch diese Arbeit ausgeglichen werden soll.

2 Einführung

In der heutigen Industrie spielt neben der Genauigkeit der Messinstrumente auch ihre Messgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Bei diesen Anforderungen konnte sich die optische 3D-Messtechnik in vielen Bereichen durchsetzen und besitzt nun ein großes Anwendungsgebiet, wovon eine Auswahl im Folgenden vorgestellt wird.

Qualitätssicherung: Die Kontrolle von industriell gefertigten Gütern ist eines der klassischen Anwendungsgebiete der optischen 3D-Vermessung. Hierbei geht es vor allem um eine schnelle und flächendeckende Aufnahme des Werkstücks, um so einen schnellen Vergleich mit einem digitalen Soll zu ermöglichen. Fehlerhafte Werkstücke können so ausgeschieden werden und die Produktion gegebenenfalls angepasst werden.

Kunst- und Denkmalschutz: Mit der vollständigen digitalen Aufnahme von Kunstgütern oder Denkmälern ist es möglich die Ist-Zustände für die Nachwelt zu sichern und für Restaurationen verformungsgerechte Baupläne zur Verfügung zu stellen. Auch für den Bereich der Rekonstruktion sind digitale 3D-Aufnahmen der Objekte vorteilhaft, da zum Beispiel die digitalen vorhandenen Teile einer zerbrochenen Vase durch Algorithmen wieder zusammengefügt werden können.

Medizin: In der Zahnmedizin werden mit Hilfe von Streifenlichtprojektionen 3D-Aufnahmen von dem Gebiss der Patienten gemacht. Mit dem digitalen Gebissabdruck können kieferorthopädische Eingriffe oder Implantate besser geplant werden. Durch das Wissen über die Anatomie der Patienten lassen sich Prothesen besser anpassen oder auch chirurgische Eingriffe planen und die Ergebnisse im Voraus simulieren.

Unterhaltungsindustrie: Ein großer neuer Bereich ist die Unterhaltungsindustrie, besonders in Bezug auf Computerspiele. Hier werden immer realistischere Welten erstellt, welche fast nicht mehr von Filmaufnahmen aus der realen Welt unterscheidbar sind. Für all diese Welten werden Daten von Objekten benötigt. Diese können zum einen digital modelliert oder zum anderen aber eingescannt werden. Um Objekte, die nur schwer modellierbar sind, einscannen zu können, eignet sich die Streifenlichtprojektion. Beispiel hierfür sind Strukturen von Ruinen oder von historischen Fahrzeugen. (Gühring, 2002)

3 Grundlagen

In der Industrie werden verschiedene Möglichkeiten genutzt um zu überprüfen ob ein Werkstück innerhalb der Toleranzen liegt oder nicht. Je nach Anforderung können die Werkstücke von den Facharbeitern selber überprüft werden oder sie müssen durch komplexe aber sehr präzise Vermessungsinstrumente überprüft werden.

3.1 Taktile Vermessung

Taktile Vermessung ist die ursprüngliche Form der Vermessung. Mit zu den ältesten geschichtlich beschriebenen Vermessungen gehört die Landaufteilung nach den Nilschwemmen im alten Ägypten. Hier wurde mit Bändern die Grenzen der Teilstücke bestimmt.

3.1.1 Lehre und Messschieber

Für den täglichen Gebrauch werden in den meisten Betrieben keine komplexen Vermessungsinstrumente genutzt. Das am häufigsten genutzte Mittel zur Überprüfung, ob ein in Massenproduktion gefertigtes Bauteil in der Norm ist, ist die Lehre. Die Überprüfung erfolgt visuell und mechanisch. Wenn das Bauteil nicht in die Lehre passt oder in dieser wackelt, ist es nicht in der Norm und muss nachgearbeitet werden.

Ein weiteres viel genutztes Messmittel ist der Messschieber, womit Maße auf Grund von Plänen nachgemessen werden können. Andersherum können auch aus einem Bauteil Pläne erstellt werden.

3.1.2 Messarme und Koordinatenmessmaschinen

Für die industrielle Produktion wie in der Automobilindustrie werden hohe Genauigkeiten bei gleichzeitiger hoher Beweglichkeit benötigt. Dieser Aufgabenbereich kann durch einen Messarm abgedeckt werden. Mit diesem können Genauigkeiten bis auf mehrere zehn Mikrometer erreicht werden.

Wo höchste Genauigkeiten gefordert werden, können Koordinatenmessmaschinen eingesetzt werden. Diese liefern die höchste Genauigkeit in der Industrievermessung. Das hauptsächliche Problem bei diesen ist, dass sie einen klimatisierten Raum benötigen und nicht mobil eingesetzt werden können. Zusätzlich müssen auch die Werkstücke vorher akklimatisieren werden.

3.2 Optische 3D-Messtechnik

Durch die taktile Vermessung ist eine Berührung des Messobjekts nötig, dieses ist aber nicht immer möglich oder gewollt. Als Alternative dazu bieten sich optische Vermessungen an.

Anders als mit der taktilen Vermessung kann in der optischen Vermessung ein Objekt mit vielen Messungen zeitgleich vermessen werden.

3.2.1 Laufzeitmessung

Die einfachste Form der optischen Vermessung ist die Laufzeitmessung. Das ausgesandte Licht breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit (c) aus. Die Strecke (s) kann durch Messen der Zeit (t) vom Aussenden des Lichtstrahls über die Reflektion am Objekt bis zum Empfang am Sensor berechnet werden. Da das Licht durch die Reflektion die doppelte Strecke zurücklegt, muss dieses in der Berechnung beachtet werden.

$$s = \frac{c * t}{2}$$

Formel 1: Berechnung einer Strecke durch Zeitmessung und eines Lichtstrahls

Für die Laufzeitmessung werden verschiedene Methoden angewandt.

3.2.1.1 Pulsmodulation

Die Pulsmodulation ist vom Verfahren her die einfachste Form der Streckenmessung mit Licht. Bei diesem Verfahren wird nur die direkte Laufzeit eines sehr kurzen Lichtimpulses gemessen. Die Sensoren hinter dieser Technik müssen jedoch sehr hohe Anforderungen bestehen, wie zum Beispiel die Zeitmessung, da hier schon kleinste Abweichungen zu einem großen Unterschied zwischen Soll und Ist führen können.

Genutzt wird dieses Verfahren hauptsächlich beim Militär und im zivilen Bereich in der Radartechnik, da mit einem Impuls mehrere Ziele in verschiedenen Entfernungen gleichzeitig angemessen werden können.

3.2.1.2 Periodische Modulation

Bei der periodischen Modulation wird ein amplituden- oder frequenzmodulierter Laser genutzt. Das Modulationssignal wird optisch und elektronisch mit dem vom Objekt reflektierten Licht gemischt. Durch das Mischsignal können Informationen über die Phasenverschiebung zwischen dem Modulationssignal und dem empfangenen Signal gewonnen werden. Es gibt verschiedene Modulationsverfahren, die mit verschiedenen Abbildungsoptiken kombiniert werden können. (Luhmann, 2010)

3.3 Triangulation

Die Triangulation, mit welcher auch die ersten Landeskoordinatennetze geschaffen wurden, kann auch für die optische Vermessung genutzt werden. Hierfür wird eine Basislinie benötigt, deren Länge genau bestimmt worden sein muss. Von den Enden aus werden Richtungsmessungen zu einem dritten Punkt durchgeführt. Mit diesen Werten kann das Dreieck bestimmt werden.

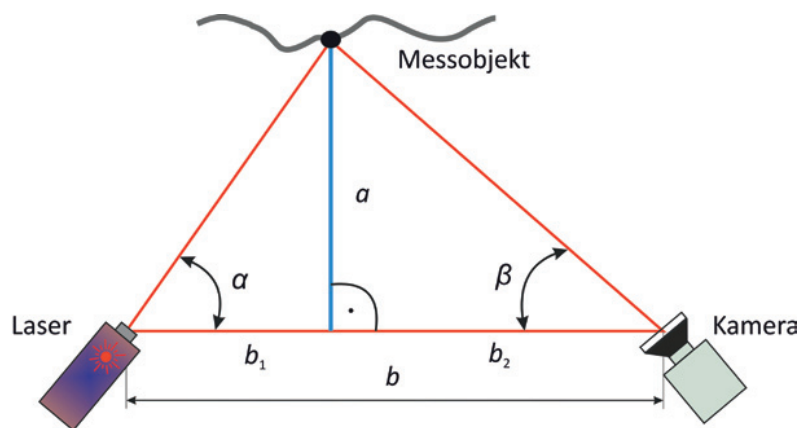


Abb. 1: Messaufbau für die optische Triangulation (Michael Schuth, 2017)

Die Triangulation kann in zwei Teile unterteilt werden, der passiven und der aktiven Triangulation.

3.3.1 Passive Triangulation

In der klassischen Nahbereichsphotogrammetrie wird die passive Triangulation eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird mindestens eine Kamera benötigt, in der Praxis werden meist zwei oder mehr Kameras genutzt. Das zu vermessende Objekt wird von einer Kamera aus verschiedenen Blickwinkeln beobachtet oder von mehreren Kameras zeitgleich. Hierbei muss die Lage der Kamera nicht bekannt sein, da sie berechnet werden kann. (Wiora, 2001)

3.3.2 Aktive Triangulation

Bei der aktiven Triangulation wird im Gegensatz zu der passiven Triangulation mindestens eine Lichtquelle benötigt, welche kontrastreiches Licht projiziert. Anders als bei der passiven Triangulation müssen die Lage und Orientierung von dem Projektor und der Kamera bekannt sein.

3.3.2.1 Punktprojektion

Die Punktprojektion ist die technisch einfachste Form der aktiven Triangulation. Ein Laser beschreibt eine Gerade im Raum, seine Reflektion wird von einer Zeilenkamera beobachtet, was einer Ebenenschar entspricht. Der hierbei entstehende Schnitt entspricht dem gesuchten Punkt. Zum Einsatz kommt dieses Verfahren bei Hochgeschwindigkeitsmessungen, da die

vollständige Aufnahme von Objekten mechanisch und zeittechnisch hier betriebswirtschaftlich nicht lukrativ ist.

3.3.2.2 Linienprojektion

Durch einen Linienlaser wird eine Ebene im Raum geschaffen, welche auf dem Objekt einen Schnitt erzeugt. (MEn19) Dieser Schnitt ist aus Sicht des Lasers eine Gerade, verformt sich aber in dem Moment, in dem der Blickwinkel geändert wird. Aus der Verformung der Linie können Informationen zu der Tiefe der Oberfläche gewonnen werden. Die einfachste Aufbauform für die Linienprojektion besteht aus einem Projektor und einer Kamera. Es sind aber auch Kombinationen von einem Projektor und mehreren Kameras oder mehreren Projektoren und einer Kamera möglich.

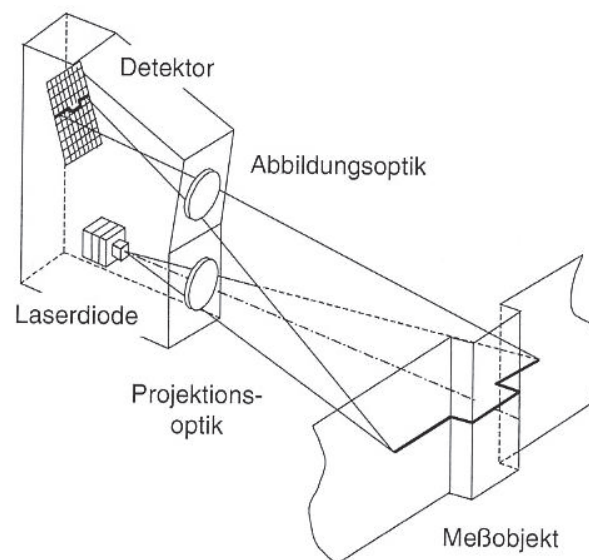


Abb. 2: Aufbau der Linienprojektion (Luhmann, 2010)

Mit diesem Aufbau sind auch Flächenscans möglich, indem der Laser relativ zum Objekt bewegt wird. Umgesetzt wird dieses zum Beispiel bei dem David-3D-Lienenlasersystem. Eine andere Methode wird vom Instrumentenhersteller Faro angewandt: bei dem Scanaufsatz für den Messarm wird der gesamte Messaufbau fest verbaut und bewegt sich um das Objekt. Das Messvolumen des Messaufbaus wird durch den Messarm bestimmt.

3.3.2.3 Strukturierte Beleuchtung

Durch Projektion von Linienmustern auf das Objekt können mehrere flächenhafte Messungen auf einmal durchgeführt werden. Mit der Funktionsweise befasst sich das nächste Kapitel 3.4 genauer.

3.4 Streifenlicht

Anders als bei der Linienprojektion ist bei der Streifenlichtprojektion keine Bewegung des Lasers nötig um eine 3D-Aufnahme des Objekts zu erhalten. Bei der Vermessung mit Streifenlicht werden viele Lichtschnitte gleichzeitig durchgeführt, was eine Messpunktdichte auf dem Objekt erzeugt und somit die Oberfläche des Objekts in 3D darstellt.

Die allgemeine Funktionsweise ist hierbei, dass die gesamte Oberfläche des Objekts durch die Streifenprojektion Codiert wird.

3.4.1 Grey Code

Bei dem Grey Code wird durch die Projektion ein spezieller Code auf dem Objekt erzeugt. Aufgebaut ist dieser Code durch ein Binärmuster, welches jeder Zeile eindeutig zugeordnet werden kann. Benachbarte Codes unterscheiden sich um je ein Bit, was mögliche Fehler geringer ausfallen lässt. Die Breite der Streifen verdoppelt sich mit jedem projizierten Muster. Jedes Muster muss einzeln auf das Objekt projiziert werden, was den Messaufwand zu jeder kleineren Pixelgröße erhöht.

Der Grey Code kann durch ein vollständig weißes und ein vollständig schwarzes Muster erweitert werden. Durch diese einfarbigen Muster können die Intensitäten bestimmt werden, um richtige von falschen Messpunkten zu unterscheiden. (Michael Schuth, 2017) So werden bei einem vollständig schwarzen Muster alle Pixel, die im Kamerabild eine hohe Intensität messen, als Fehlpunkte bestimmt. Bei dem weißen Muster müssen alle Pixel im Kamerabild eine hohe Intensität messen, Pixel die keine hohe Intensität messen können, werden als Fehler erkannt.

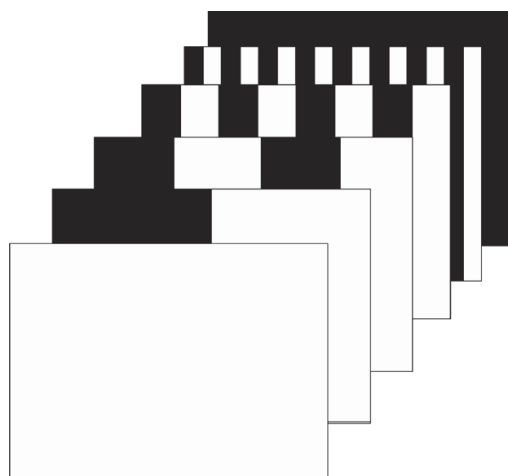


Abb. 3: Darstellung des Grey Codes (Michael Schuth, 2017)

3.4.2 Phasenshift-Verfahren

Bei dem Phasenshift-Verfahren wird ein sinusförmiger Verlauf von Hell zu Dunkel genutzt, was ein periodisches Streifenmuster ergibt. Für eine Messung werden vier Bilder hintereinander aufgenommen. Nach jeder Aufnahme wird der Sinusverlauf um 90 Grad verschoben, so dass jedes Pixel in der Kamera vier verschiedene Intensitäten aufnimmt.

Vorteil dieser Codierung ist, dass eine hohe lokale Auflösung erreicht wird, da die Phasenlage an jedem Punkt exakt bestimmt werden kann. Nachteilig ist hingegen, dass die Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung der Streifen schwierig ist.

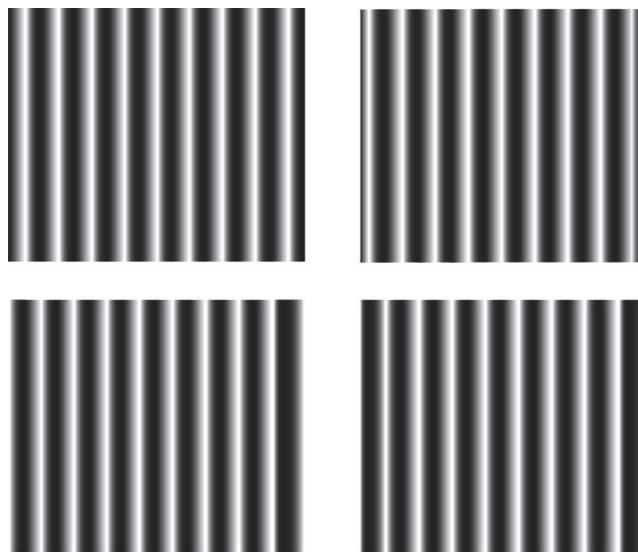


Abb. 4: Phasenshift-Verfahren (Michael Schuth, 2017)

3.4.3 Kombination aus Grey Code und Phasenshift-Verfahren

Durch eine Kombination von „Grey Code“ und Phasenshift-Verfahren wird ein eindeutiges Ergebnis erzielt bei gleichzeitiger hoher lokaler Auflösung. Durch den „Grey Code“ werden die Mehrdeutigkeiten gelöst, es kann jedoch keine Verbesserung der Auflösung geliefert werden.

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_{90}(x, y) - I_{270}(x, y)}{I_{180}(x, y) - I_0(x, y)}$$

Formel 2: Bestimmung des Phasenwerts bei dem kombinierten Verfahren (Michael Schuth, 2017)

3.5 Kamerakalibrierung

Jede Kamera hat trotz hoch genauer Produktion Fehler, wie zum Beispiel eine Abweichung der Linse, beispielsweise die Verzeichnung. Diese Fehler werden durch die Kalibrierung bestimmt und ausgeglichen.

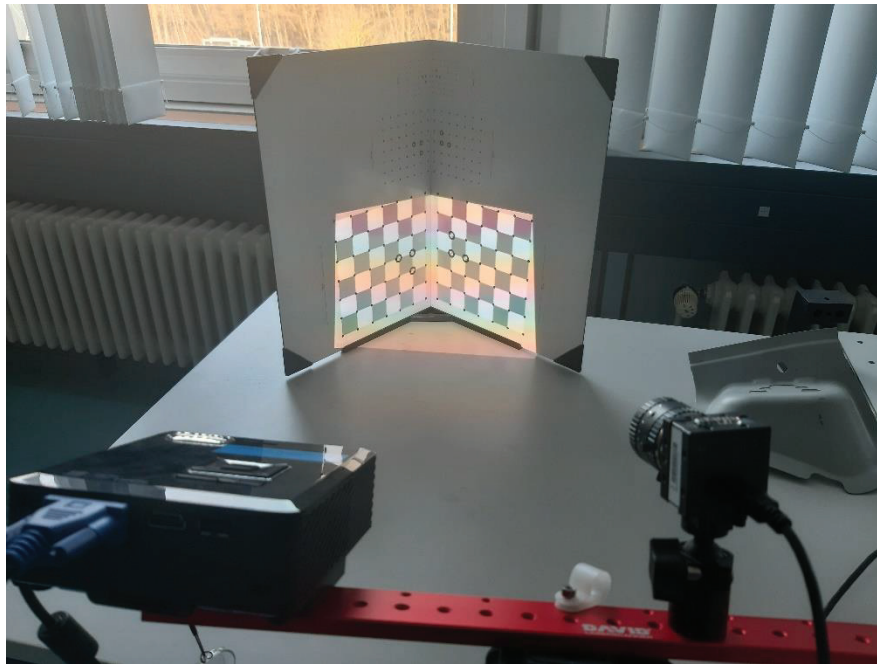


Abb. 5: David 3D sl1 nach der Kalibrierung

3.5.1 Innere Orientierung

Jede Optik unterliegt Fehlern, welche zu einer Verzeichnung des Bildes führen. Um präzise Messungen durchführen zu können, müssen diese Fehler bekannt sein. Durch ein mathematisches Modell wird die Geometrie der Kamera in Parametern beschrieben.

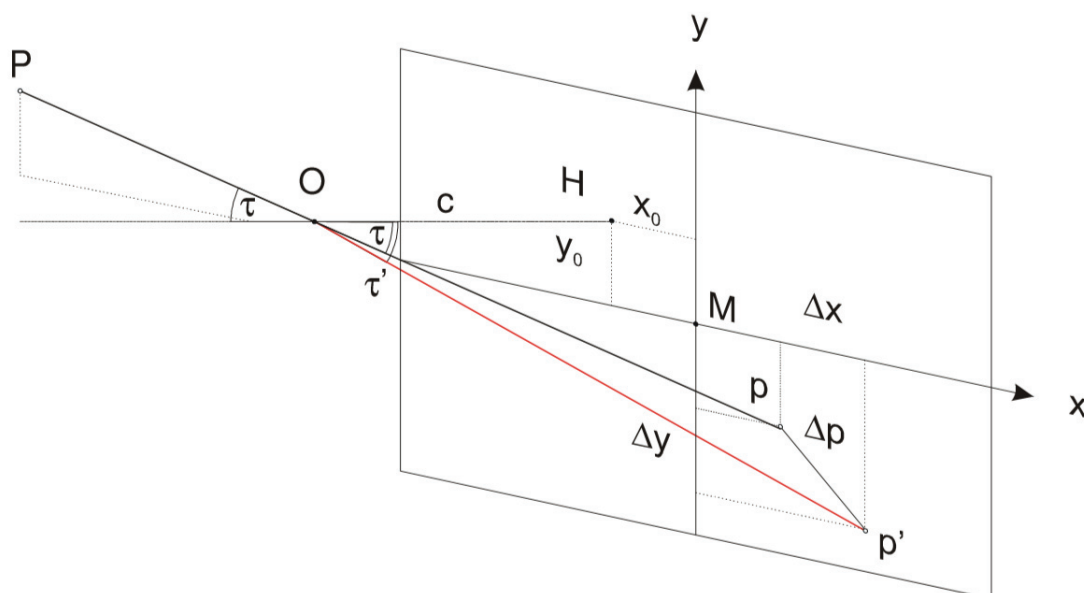


Abb. 6: Innere Orientierung einer Kamera (Kresse, 2016)

Diese Parameter sind:

- Bildmittelpunkt \approx Bildhauptpunkt $M \approx H(x'_o, y'_o)$
- Kamerakonstante als lotrechter Abstand vom Projektionszentrum zur Bildebene bei Fokussierung auf Unendlich gilt $c \approx f$
- Verzeichnung als Abweichung von der idealen zentralperspektivischen Abbildung durch Δx_o und Δy_o beschrieben
- radial symmetrische Hauptebene der Linse
- tangential asymmetrische Brechungsänderung durch dezentrierte Linse
- Affinität und Scherung der nicht quadratischen Pixel des Sensors

3.5.2 Äußere Orientierung

Mit der äußeren Orientierung wird die Position und Orientierung der Kamera im übergeordneten Koordinatensystem bestimmt. Die äußere Orientierung muss in den meisten Fällen bei der Arbeit mit Streifenlicht nicht beachtet werden, da meist nur mit lokalen Koordinaten gearbeitet wird.

3.6 Reflexionsverhalten von Licht

Für Reflexion gibt es drei verschiedene Möglichkeiten:

- Gerichtete Reflexion
- Absorption
- Diffuse Reflexion

Die gerichtete Reflexion ist die im umgangssprachlichen nur als Reflexion bezeichnete Form. Gemeint sind hier alle Formen von spiegelnden Oberflächen für die Einfallswinkel = Ausfallswinkel gilt. Für optische Vermessungen mit Kameras ist die gerichtete Reflexion ein Hindernis, da so nicht das Objekt vermessen wird, sondern die durch die Reflexion sichtbaren Objekte. Lediglich bei der Laufzeitmessung wird diese Eigenschaft genutzt. Hierfür werden Prismen genutzt, welche durch eine gerichtete Reflexion im inneren über zwei Seiten den einfallenden Lichtstrahl in die entgegengesetzte Richtung reflektieren.

Absorption ist genau wie auch die gerichtete Reflexion nicht für Vermessungen mit Kameras geeignet. Durch die Absorption ist es nicht möglich Messdaten zu generieren. Dies kann jedoch genutzt werden, um Objekte die nicht gemessen werden sollen, für das System nicht messbar zu machen. So kann zum Beispiel das zu vermessende Objekt durch eine

schwarze Halterung gehalten werden. In der nach der Messung erfolgenden Bereinigung müssen die Daten der Halterung nicht mehr mühevoll entfernt werden.

Für die optische Vermessung wird eine diffuse Reflexion des Messobjekts angestrebt. Damit wird sichergestellt, dass das gewünschte Objekt vermessen wird und nicht Objekte im Umfeld, deren Vermessung nicht gewünscht ist. Auch die Vermessung durch Streifenlicht wird so erst möglich.

4 Genauigkeitsbetrachtung

Da die Überprüfung über mögliche Genauigkeiten des Streifenlichtprojektors das Ziel dieser Arbeit ist, ist es wichtig im Voraus zur Genauigkeitsbetrachtung einige theoretische Einschätzungen zu erstellen.

4.1 Leuchtdichteerhaltung

Da es sich bei dem Projektor um eine Leuchtquelle handelt, welche für eine kreisförmige Beleuchtung sorgt, ist anders als bei einem Laser mit einem starken Verlust an Leuchtleistung zu rechnen. Dieser Verlust setzt eine maximale Arbeitsentfernung fest. Durch Anpassung der Außenbeleuchtung kann diese maximale Arbeitsentfernung beeinflusst werden. Es ist bei dem genutzten Projektor nur bedingt möglich selbst Einfluss auf die Leuchtstärke vorzunehmen, weswegen zwei verschiedene Beleuchtungsstärken des Raums untersucht werden. Die zwei Beleuchtungsstärken sollen einerseits normales Tageslicht und die Deckenbeleuchtung des Labors, und andererseits der Ausschluss von Fremdlicht, das heißt möglichst nur der Projektor als einzige Lichtquelle im Raum, sein.

Bei dem normalen Tageslicht ist mit Fehlern durch Fremdlicht zu rechnen, sowie mit einer reduzierten Messreichweite.

4.2 Fehler durch verschiedene Positionen und Entfernungen im Blickfeld

Die nach jedem Aufbau der Messsysteme durchgeführte Kalibrierung soll Fehler in der Optik der Kamera ausgleichen. Durch einen fehlerhaften Algorithmus wie auch durch falsche oder unzureichende Kameraparameter kann die Kalibrierung nicht richtig durchgeführt werden.

Der einflussreichste Fehler, der durch die Kalibrierung bestimmt und korrigiert werden kann, ist die Verzeichnung. Berechnet wird diese in Prozent. Bei einem positiven Wert wird von einer kissenförmigen Verzeichnung gesprochen. Bildhaft beschrieben werden kann diese durch ein Quadrat, welches durch Herausziehen der Ecken Verformt wird. Bei einem negativen Wert

wird von einer Tonnenförmigen Verzeichnung gesprochen. Bildhaft beschrieben werden hier die Ecken von einem Quadrat eingedrückt.

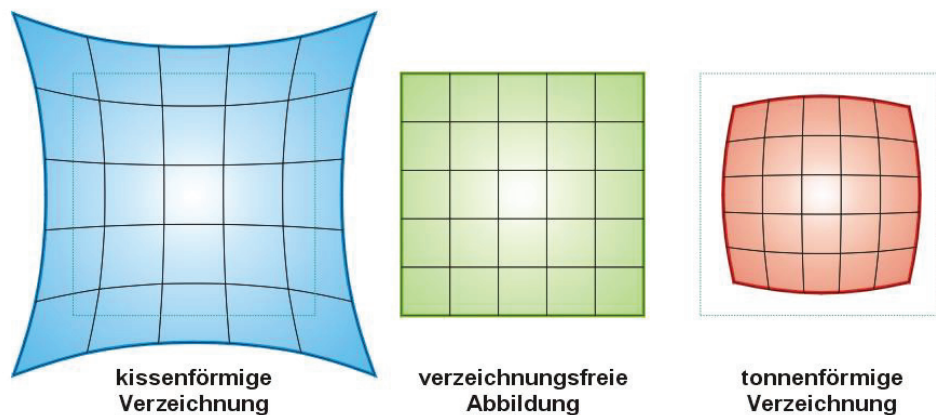


Abb. 7: Mögliche Verzeichnungen

Berechnet werden kann die Verzeichnung durch:

$$V(h') = \frac{\hat{h}' - h'}{h'} * 100$$

Formel 3: Berechnung der Verzeichnung

Wobei $h' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ der paraxiale Achsabstand eines Bildpunktes ist und \hat{h}' ist der tatsächliche Abstand durch die Verzeichnung (V). (Naumann/Schröder, 1992)

4.3 Grenzen der Kamera

Die Auflösung der Kamera ist durch die Pixel-Größe festgelegt. Mit zunehmender Entfernung der Kamera vom Projektor wird die Fläche größer, welche von je einem Pixel beschrieben wird.

4.4 Grenzen des Projektors

Wie auch bei der Kamera nimmt mit zunehmender Entfernung von dem Projektor die Größe für jeden Pixel zu. Nur das bei dem Projektor ein Pixel eine immer größere Fläche abdeckt.

4.5 Fehler durch die Berechnung der Strecken

Die Größen der Referenzkörper sind für die Genauigkeitsüberprüfung von zentraler Bedeutung. Gemessen wurden diese händisch mit einem digitalen Messschieber. Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit beträgt $\pm 0,02\text{mm}$. Um mögliche Fehlmessungen aufzudecken, wurden alle Messungen fünfmal durchgeführt und dann gemittelt.



Abb. 8: Der genutzte digitale Messschieber

Die Berechnung der Strecken in den Messdaten erfolgt durch messen der Strecke zwischen zwei Achsen. Die Achsen werden als optisch ausgleichende Gerade erzeugt. Auch hier wurden immer fünf Messungen erstellt, um mögliche Fehler in den Geraden wie auch in den Messungen aufzudecken.

In der Software erfolgt die Berechnung der einzelnen Messpunkte durch den räumlichen Vorwärtsschnitt. Durch die Kalibrierung werden die Blickwinkel (α und β) von der Kamera und dem Projektor bestimmt, wie auch die Basis (s).

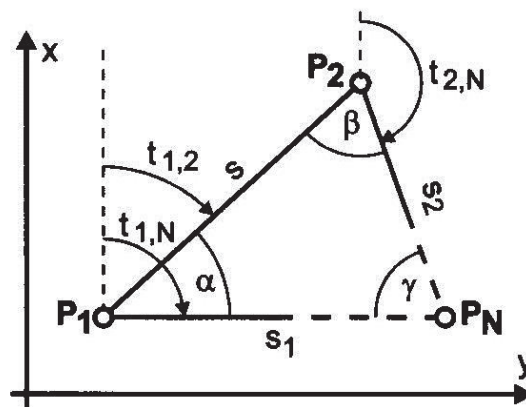


Abb. 9: Berechnung eines Neupunktes durch den Vorwärtsschnitt

Anders als in den Grundlagen vom geodätischen Rechnen werden die Richtungen durch Algorithmen und Parameter bestimmt. Da die Innenwinkel durch die Kalibrierung bekannt sind, müssen diese nicht noch berechnet werden, jedoch müssen die Richtungswinkel in dem Kamerakoordinatensystem noch berechnet werden.

$$t_{1,N} = t_{1,2} + \alpha \quad t_{2,N} = t_{1,2} \pm 200gon - \beta$$

Formel 4: Berechnung der Richtungswinkel im Kamerakoordinatensystem

Über den Geradenschnitt werden die Koordinaten für den Bildpunkt berechnet. Hierfür werden die Koordinaten von dem Projektor und der Kamera im lokalen System benötigt. (Knickmeyer, 2016)

$$x_N = x_1 + \frac{y_2 - y_1 - (x_2 - x_1) * \tan t_{2,N}}{\tan t_{1,N} - \tan t_{2,N}}$$

Formel 5: Berechnung der X-Koordinate des Messpunktes

$$y_N = y_1 + (x_N - x_1) * \tan t_{1,N}$$

Formel 6: Berechnung der Y-Koordinate des Messpunktes

Da es sich hier anders als beim geodätischen Rechnen nicht nur um 2D-Koordinaten handelt, werden noch Information über die Höhe (h_N) benötigt. Berechnet wird dieses über den vertikalen Winkel, welcher von oben abgedreht wird. Für den Projektor wird dieser Winkel als Z_{AN} bezeichnet und für die Kamera als z_{AB} . Zusätzlich muss noch der Höhenversatz zwischen Kamera und Projektor beachtet werden, welcher als Δh_{AB} bezeichnet wird. (Pro00)

$$h_N = \frac{1}{2} (s * \frac{\sin \alpha * \cot z_{AN} + \sin \beta * \cot z_{BN}}{\sin(\alpha + \beta)} + \Delta h_{AB})$$

Formel 7: Berechnung der Höheninformationen des Messpunktes

5 Messaufbau

Im industriellen Umfeld ist es üblich, die Genauigkeit von den Messinstrumenten mit Hilfe von Referenzkörpern zu überprüfen. Für diese Arbeit stehen keine industriellen Referenzkörper zur Verfügung, als Ersatz werden Verschnitt- und Reststücke aus der Werkstatt der Geräteausgabe genutzt.

Da keine höhere Genauigkeit als 0,1 mm von dem Streifenlichtprojektor „David 3D“ erwartet wird, werden die Maße der Ersatzreferenzkörper mit einem Messschieber bestimmt.

5.1 David 3D sl1

Das Messsystem David 3D sl1, im Folgenden als „David 3D“ bezeichnet, besteht aus einem Projektor, einer Kamera, einem Stativ mit Halterung für Projektor und Kamera, zwei Aufstelltafeln für die Kalibrierung mit insgesamt vier verschiedenen großen Kalibrierfeldern und der David-3D-Software, welche auf einem Laptop installiert ist. Bei diesem Messsystem handelt es sich um ein Low-Cost-System des Unternehmens DAVID Vision Systems GmbH.

Dieses Unternehmen wurde von Hewlett Packard, kurz HP, übernommen und es wurden bereits Nachfolgesysteme entwickelt.

Die Messdaten werden in dem .obj-Format ausgegeben, welches von den meisten Programmen zur Weiterverarbeitung unterstützt wird.

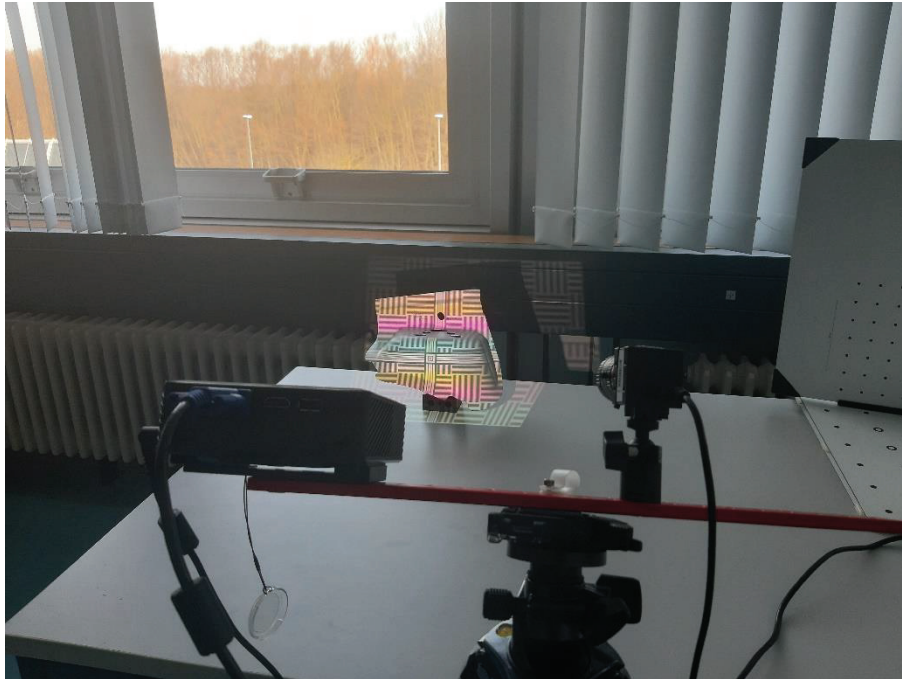


Abb. 10: David 3D in Messbereitschaft

5.2 Referenzkörper

Die ursprüngliche Idee war es, Kugeln als Referenzkörper zu nutzen, da bei diesen leicht der Durchmesser bestimmt werden kann. Nach der ersten Messung musste aber festgestellt werden, dass die Rundungen dieser nicht richtig gemessen werden können. Auch nach zusätzlichem Anrauen konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Als Ersatz wurde auf Verschnitt- und Reststücke aus Werkstatt der Geräteausgabe zurückgegriffen.

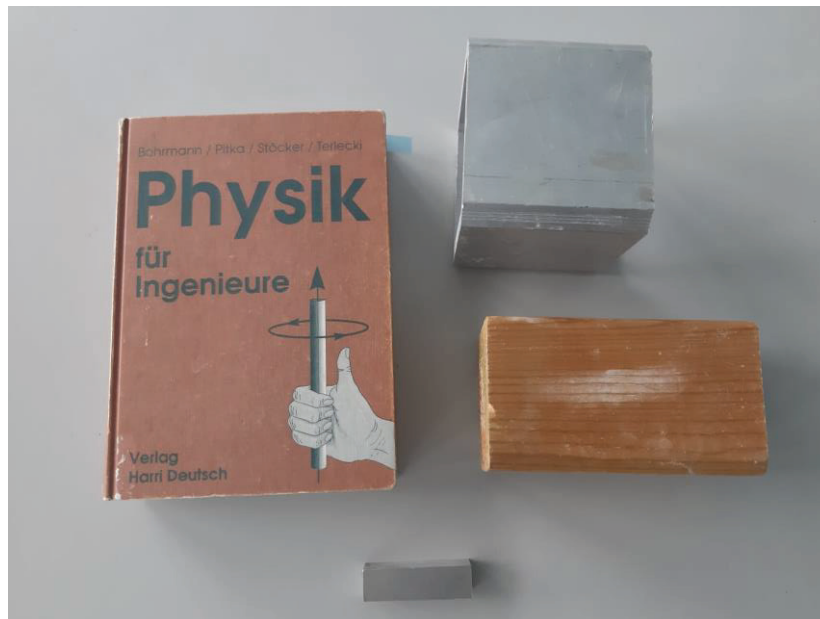


Abb. 11: Überblick über die für die Messungen genutzten Objekte

Die Bestimmung der Durchmesser und Kantenlängen erfolgte durch messen mit einem Messschieber. Da keine bessere Genauigkeit als 0,1mm erwartet wird, ist dieses Vorgehen zulässig. Die Genauigkeit des Messschiebers beträgt laut Hersteller $\pm 0,02\text{mm}$.

Tabelle 1: Referenzmessungen der Referenzkörper

Referenzmessung	Holz	Formteil	Aluminiumprofil geschnittene Seite	Holz mit Kreidebeschichtung	Aluminiumprofil gegossene Seite
1 in mm	147,3	14,2	89,8	145,6	99,7
2 in mm	147,6	14,2	89,9	145,4	99,6
3 in mm	147,4	14,2	89,9	145,7	99,8
4 in mm	147,4	14,2	89,9	145,3	99,6
5 in mm	147,4	14,2	89,9	145,7	99,7
Mittel in mm	147,4	14,2	89,9	145,5	99,7
Standartabweichung	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1

5.2.1 Holz

Bei dem Referenzkörper „Holz“ handelt es sich um ein Stück eines Kantholzes mit abgerundeten Kanten. Die Maße dieses Körpers betragen 84,95 x 84,38 x 146,60mm. Aufgrund der Parallelität der Seiten zueinander bieten sich Messungen zur Überprüfung der Abstände der Seiten an. Lediglich die abgerundeten Seiten können nicht verglichen werden.

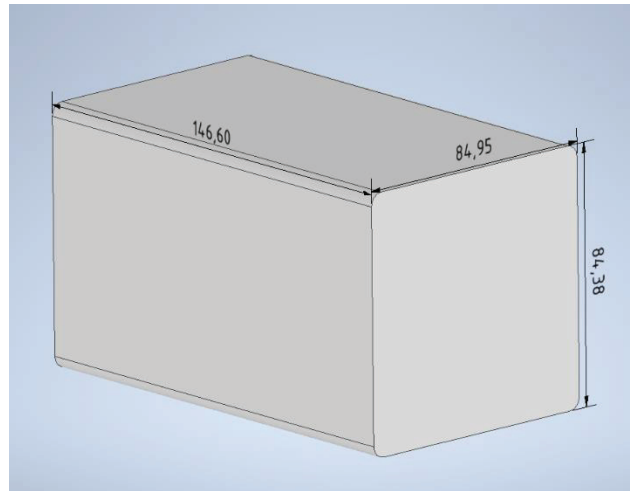


Abb. 12: Referenzkörper Holz

5.2.2 Aluminiumprofil

Das Aluminiumprofil ist ein Teil eines Trägers. Dieser Körper eignet sich auf Grund seiner Form und diffusen Spiegelung besonders gut für die optische Vermessung. Da die Ecken innen wie auch außen angefasst sind, war keine Messung von Ecke zu Ecke möglich, aber durch die geraden scharfen Kanten können hier gute Messungen vorgenommen werden.

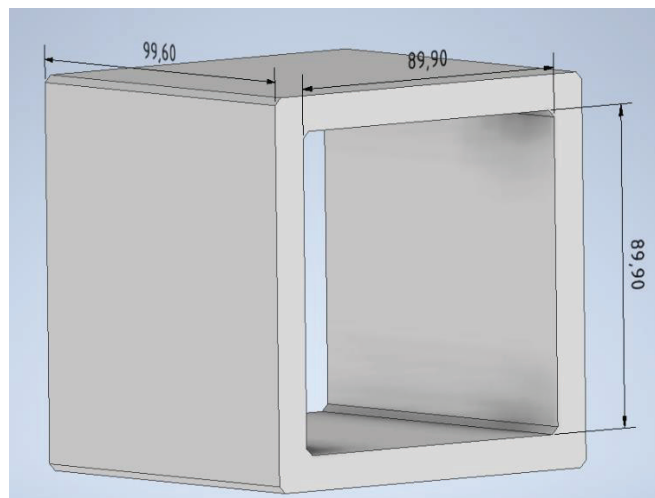


Abb. 13: Referenzkörper Aluminiumprofil

5.2.3 Aluminiumklotz

Der Aluminiumklotz ist der kleinste der genutzten Referenzkörper. Dieser hat die Maße 18,70 x 20,35 x 65,65mm. Besonderheit dieses Referenzkörpers ist es, dass die Oberfläche leicht spiegelnd ist. Für die meisten Messungen war dieser Körper nicht nutzbar, da die Spiegelung zu stark war.

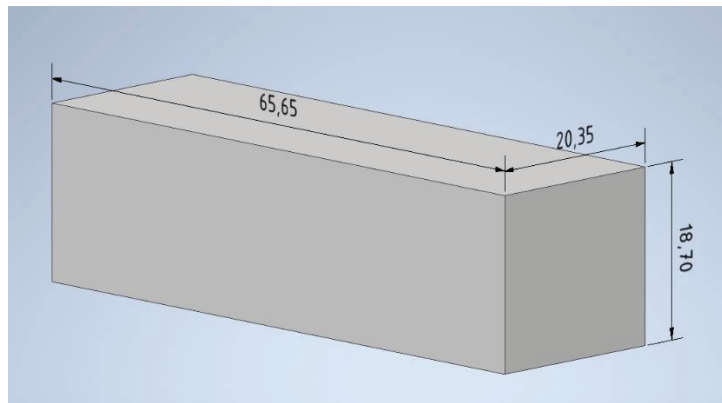


Abb. 14: Referenzkörper Aluminiumklotz

5.2.4 Formteil

Für Übungen steht im Labor ein Formteil aus der Automobilbranche zur Verfügung. Dieses besitzt eine pulverbeschichtete Oberfläche. In diesem Formteil befinden sich einige Ausstanzungen, welche für die Messungen genutzt wurden.

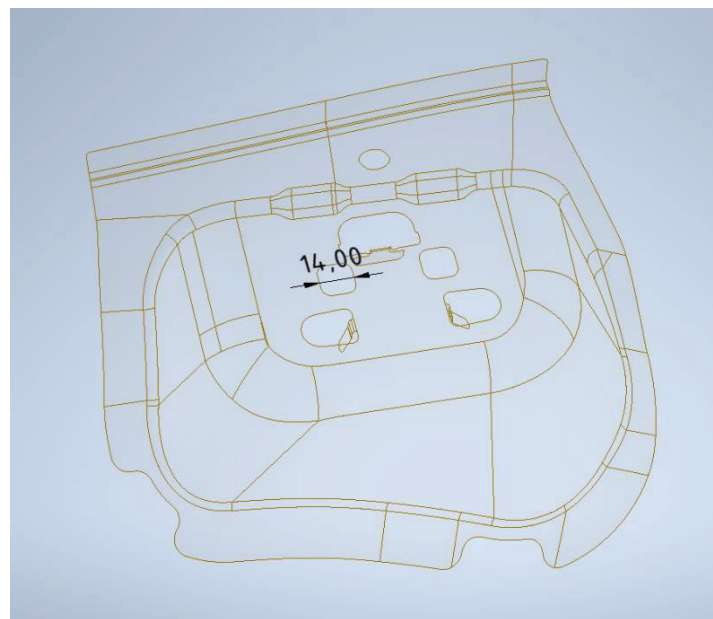


Abb. 15: Referenzkörper Formteil

5.2.5 Bücher

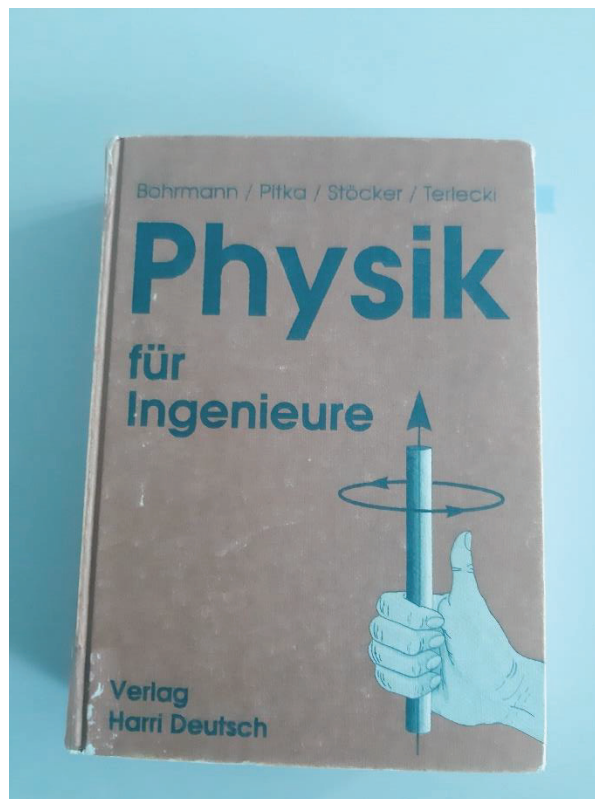


Abb. 16: Testkörper Buch

Um den Einfluss von farbigem Papier zu überprüfen, stehen zwei Bücher zur Verfügung. Auf Grund ihrer Größe lassen sich diese nicht mit dem Messschieber messen, dienen aber gut als Anschauung in Bezug darauf, welche Farben Einfluss auf die Messbarkeit haben.

5.3 Durchführung der Messung

Ziel der Messungen ist es zu bestimmen mit welchen Genauigkeiten bei dem Messsystem gerechnet werden kann. Hierfür werden neben dem Messbereich auch zwei unterschiedliche Beleuchtungen der Umgebung überprüft. Diese Beleuchtungen sind „Hell“, was der normalen Deckenbeleuchtung des Labors entspricht, sowie „Dunkel“, was der Vermeidung möglichst aller anderen Lichtquellen entspricht. Gerade durch den Messaufbau im Dunkeln, bzw. nach Sonnenuntergang, wird versucht die Leuchtdichte zu erhalten und Fremdlicht aus der Messung heraus zu halten, um so bessere Messergebnisse zu erzielen.

5.3.1 Ersten Probemessungen

Im ersten Messdurchlauf wurden für jeden Referenzkörper die messbaren Seiten bestimmt.

Um den Messkörper möglichst mittig im Kamerasichtfeld zu platzieren wurden schwarz lackierte Stahlgewichte genutzt. Schon nach der ersten Messung stellte sich heraus, dass diese nur durch vereinzelte Pixel gemessen werden konnten. Grund hierfür ist die schwarze

Lackierung, welche das Licht des Projektors eliminiert. Dieses ist ein positiver Nebeneffekt, da so komplizierte Bereinigungen der digitalen Messdaten umgangen werden können.

Bei diesen ersten Messungen haben sich die Rundungen einiger Körper als nicht messbar herausgestellt. Durch diese Beobachtung haben sich zwei der ursprünglich gedachten Referenzkörper, Kugeln mit $\varnothing 40\text{mm}$ und $\varnothing 200\text{mm}$, als nicht für die Versuchsmessung als Referenzkörper anwendbar herausgestellt.



Abb. 17: Kante eines Referenzkörpers ohne Filterung

Durch Anpassung der Einstellungen der Ergebnis-Filterung konnten bessere Qualitäten in der Darstellung generiert werden. Durch die Einstellungen ist es möglich Glättung im Mittel, Glättung im Median und die Qualitätsüberprüfung anzupassen.

Durch mehrere Messungen mit verschiedenen Einstellung der drei Filter wurden die Einstellungen Glättung im Mittel 4, Glättung im Median 4 und Qualitätsüberprüfung 0,3 als guter Kompromiss zwischen den Filtern angesehen. Diese Einstellungen werden auch für alle nachfolgenden Messungen angewandt.

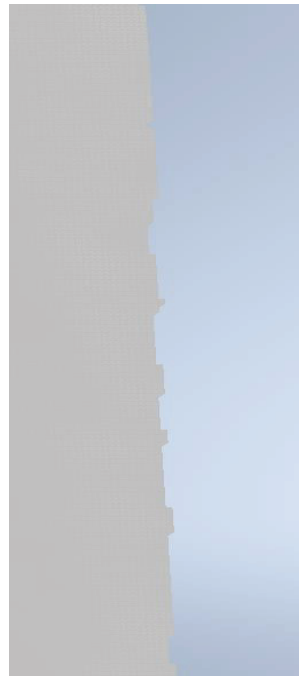


Abb. 18: Kante eines Referenzkörpers mit Filterung

Bemerkenswert war, dass bei dem Holzkörper die Jahresringe am Kopf- und Fußende in der digitalen Abbildung sichtbar sind. Besonders gut traten diese bei der unbereinigten Messung hervor.

5.3.2 Bestimmung des Messbereichs

Bei diesem Messdurchlauf wird die minimale und die maximale Messentfernung bestimmt. Der hierfür genutzte Referenzkörper ist das Holz, welches mit einer Seitenlänge von 84,62mm der größte zu Verfügung stehende Körper ist. Durch den Aufbau mit der festen Basis und der Kalibrierung auf die Tafel mit 120mm Punktabstand entsteht ein Schnitt der Sichtfelder von Kamera und Projektor. Bestimmt wird hierbei der Bereich, in dem der Körper von der Kamera aufgenommen wird und gleichzeitig im Streifenlicht des Projektors liegt. Die Kalibriertafel wurde in einer Entfernung von 0,8m aufgestellt. Dieses ist der Punkt, in dem sowohl die Kamera als auch der Projektor die gesamte Kalibriertafel abdecken und scharf gestellt sind.

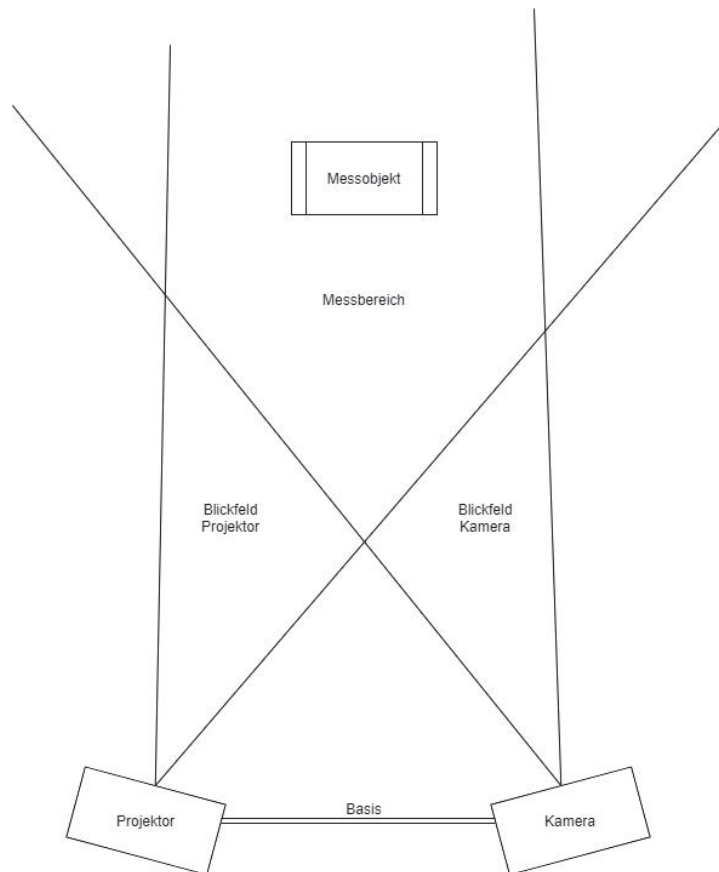


Abb. 19: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Ergebnis der Messungen ist, dass bei der maximalen Basis (37cm) der minimale Messabstand 0,6m und der maximale Messabstand 2,2m beträgt. Bei der minimalen Basis (22cm) beträgt der minimale Messabstand 0,6m und der maximale Messabstand mindestens 2,8m. Bei 2,8m Entfernung von der Basis wurde die Messung abgebrochen da nahezu keine Messdaten mehr produziert werden konnten. Je weiter der zu vermessende Körper den Extremen entgegen rückt, umso weiter rückt er auch an die Ränder von Kamera und Projektor. Da nach der Kalibrierung keine Veränderungen mehr an dem Aufbau von Kamera und Projektor vorgenommen werden dürfen, hat dieses auch einen starken Einfluss auf Abbildungs- und Aufnahmeschärfe. Eine mit steigender Entfernung unschärfer werdende Bildwiedergabe des Projektors konnte während der Messungen schon auf der beleuchteten Fläche des Werkstücks beobachtet werden. Auch ein Verlust der Aufnahmeschärfe der Kamera konnte auf dem Bildschirm des Laptops beobachtet werden. Aufgrund des größeren Messbereiches wurde die Basis mit 22cm für alle Messungen in der Versuchsreihe gewählt. Eine Auswertung dieser Beobachtung findet in Kapitel 6.1 statt.

5.3.3 Einfluss verschiedener Materialien auf die Messung

Nach der Überprüfung des Messbereiches werden noch die Einflüsse verschiedener Materialien auf die Messgenauigkeit überprüft. Zur Verfügung stehen Referenzkörper aus Aluminium, Holz und testweise Papier.

Wie schon in 5.3.1 aufgeführt, haben sich runde oder abgerundete Körper als nur schlecht messbar herausgestellt. Auch alle Formen von dunkler bis schwarzer Oberflächenfarbe sind durch die Lichtabsorption nicht messbar.

Bei dem Referenzkörper aus Aluminium haben sich die stark reflektierenden Seiten als schwierig messbar herausgestellt. Durch Anpassung der Leuchtstärke des Projektors und der Belichtungszeit der Kamera konnten hier Messungen erzielt werden. Eines der Hauptprobleme war jedoch auch weiterhin, dass ein Teil zu stark reflektiert, während andere Teile nahezu keine Reflektionen mehr abgeben.

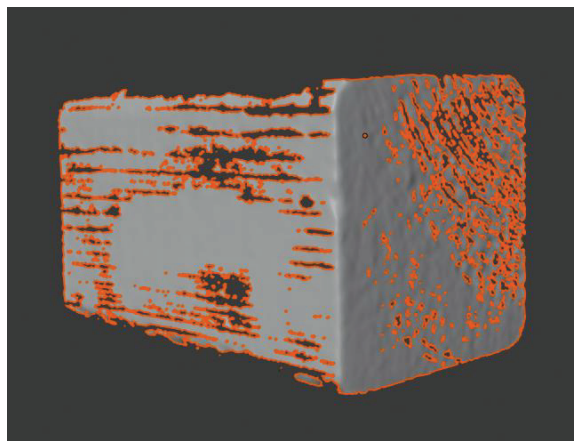


Abb. 20: Referenzkörper Holz ohne Kreidebeschichtung

Um einen besseren Reflektion zu erhalten wurden zwei Seiten des Referenzkörper „Holz“ mit weißer Kreide bemalt. Durch diese Veränderung der Oberfläche im Vergleich zu den naturbelassenen Seiten konnte eine bessere Darstellung der Messung in dem David-3D Programm erzeugt werden. Um zu überprüfen, wie stark der Einfluss auf eine schräge Fläche ist, wurde jeweils eine Messung auf die Verbindungsecke zwischen den beiden Oberflächen durchgeführt. Besonders hier war der Unterschied in dem Umfang der Punktwolke deutlich sichtbar. Bei den Seiten ohne Kreidebeschichtung kann nur ein unvollständiger Scan erfolgen, während die Seiten mit Kreidebeschichtung auch bei diesem Winkel vollständig gescannt werden können.

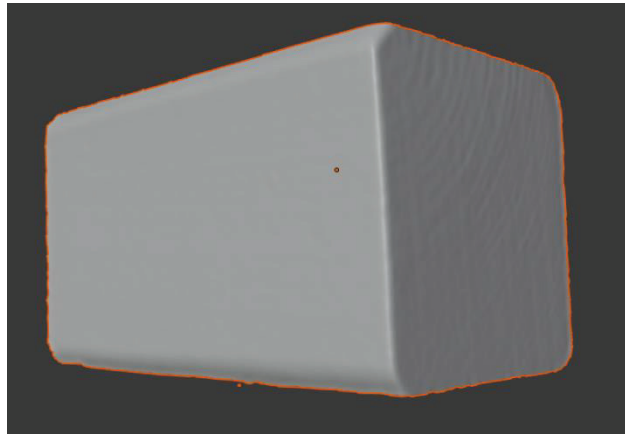


Abb. 21: Referenzkörper Holz mit Kreidebeschichtung

6 Datenauswertung

Die Auswertung der Messungen erfolgte mit der Software „Inventor“ von dem Hersteller Autodesk und „Geomagic Control“ von dem Hersteller Geomagic GmbH. Bei diesen Programmen ist es möglich die .obj-Dateien ohne Maßstabsverzerrung einzulesen. Inventor bietet ein Tool mit dem Strecken zwischen Punkten, Vertexen, Ebenen und Achsen gemessen werden können. Da die Ränder der Messobjekte nicht als eine scharfe Gerade gemessen werden können, wurde eine optisch ausgleichende Achse durch diese gelegt. In Geomagic können Features erstellt werden. Diese Features sind Linie, Kreis, ovaless Langloch, Rechteck und abgerundetes Langloch. Durch die fünf zur Verfügung stehenden Messungen können Ausreißer bestimmt werden und durch Mitteln der bestimmten Werte kann eine höhere Genauigkeit erzielt werden.

Für eine optisch bessere Darstellung der Messdaten wurde auf das freie Programm Blender zurückgegriffen.

6.1 Formeln für die Auswertung

Die Berechnung der Koordinaten der einzelnen Punkte in der Punktwolke wird durch Algorithmen in der David-3D-Software realisiert. Es besteht keine Möglichkeit die Software zu untersuchen und die einzelnen Rechenschritte herauszufiltern.

In der Auswertung der Messdaten wurde auf die Grundlagen der Fehlerlehre zurückgegriffen. Für die jeweils fünf Beobachtungen(l_j) für jeden Standpunkt wurde der empirische Mittelwert(\bar{l}) gebildet.

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$$

Formel 8: Berechnung des empirischen Mittelwertes (Foppe, 2016)

Aus dem berechneten empirischen Mittel kann die Abweichung zu dem Referenzobjekt berechnet werden, um eine Abschätzung der Systematischen Abweichung(Δ) zu ermöglichen. Dieses erfolgt durch gegenüberstellen von Ist(μ_l) und Soll(\tilde{L}), in der Auswertung der Anschaulichkeit wegen als Differenz zum Referenzkörper benannt.

$$\Delta = \mu_l - L$$

Formel 9: Berechnung der systematischen Abweichung (Foppe, 2016)

Die Verbesserungen(v_j) werden zu dem Mittelwert(\bar{l}) berechnet.

$$v_j = \bar{l} - l_j$$

Formel 10: Berechnung der Verbesserung (Foppe, 2016)

Um die empirische Standardabweichung(s_l) berechnen zu können, muss zuerst die empirische Varianz(s_l^2) bestimmt werden. Wobei die Formel für die empirische Varianz(s_l^2) wie folgt lautet:

$$s_l^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{(n-1)}$$

Formel 11: Berechnung der empirischen Varianz (Foppe, 2016)

Und die Formel für die empirische Standardabweichung(s_l) lautet:

$$s_l = \sqrt{s_l^2}$$

Formel 12: Berechnung der empirischen Standardabweichung (Foppe, 2016)

Die Formeln für die Verbesserungen(v_j), die empirische Varianz(s_l^2) und die empirische Standardabweichung(s_l) können zu einer Formel zusammengefasst werden.

$$s_l = \sqrt{\frac{(\bar{l} - l_1)^2 + (\bar{l} - l_2)^2 + \dots + (\bar{l} - l_n)^2}{n-1}}$$

Formel 13: Zusammengefasste Formel zur Berechnung der empirischen Standardabweichung

Um eine bessere Einschätzung über den Einfluss der Differenz zu bekommen, wird die Differenz als prozentuale Abweichung(p) dargestellt. Berechnet wird diese aus dem Soll-Wert(s_{soll}) und der Differenz(d).

$$p = \frac{d}{s_{soll}} * 100$$

Formel 14: Berechnung der prozentualen Abweichung

6.2 Auswertung des Messbereichs

Bei der Bestimmung des Messbereichs ging es im ersten Schritt um die Bestimmung des Bereiches, in dem Messdaten generiert werden können. Die Beschreibung der Bestimmung des Messbereiches erfolgt bereits in Kapitel 5.3.2.

6.2.1 Auswertung mit Inventor

In der Auswertung der Messdaten mit Inventor wird die Abweichung bestimmt, welche von dem Referenzkörper in der Messung zu dem Soll entstehen.

Tabelle 2: Ausschnitt aus den Messung bei Fremdlicht

Messreihe Messbereich	0,6m	0,8m	1,0m	1,2m	1,4m	1,6
H1 in mm	82,6	82,3	82,3	81,3	81,8	82,2
H2 in mm	82,7	82,6	82,4	81,7	82,3	82,1
H3 in mm	82,5	82,6	82,3	81,8	81,9	81,3
H4 in mm	82,6	82,8	82,4	82,2	81,9	82,6
H5 in mm	82,7	82,7	82,5	81,7	82,1	81,8
Mittel in mm	82,6	82,6	82,4	81,7	82,0	82,0
Differenz zum Referenzkörper in mm	-2,0	-2,0	-2,2	-2,9	-2,6	-2,6
Standardabweichung	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,5
Prozentuale Abweichung	2,4	2,4	2,7	3,5	3,2	3,2

Je weiter sich die Messung von Punkt der Kalibrierung entfernt, umso ungenauer werden die Messungen. Da weder die Kamera, noch der Projektor in ihrer Lage oder in ihrem Brennpunkt verändert werden dürfen, entsteht mit zunehmender Entfernung eine Unschärfe. Durch diese Unschärfe können keine genauen Messungen erstellt werden.

Tabelle 3: Ausschnitt aus den Messungen ohne Fremdlicht

Messreihe Messbereich	0,6m	0,8m	1,0m	1,2m	1,4m	1,6m
D1 in mm	82,6	82,7	82,5	82,1	82,2	81,8
D2 in mm	82,3	83,0	82,3	82,2	81,6	81,9
D3 in mm	82,4	82,6	82,5	82,3	82,4	81,7
D4 in mm	82,6	82,5	82,4	82,4	81,8	82,1
D5 in mm	82,2	82,6	82,5	82,4	82,0	81,8
Mittel in mm	82,4	82,7	82,4	82,3	82,0	81,9
Differenz zum Referenzkörper in mm	-2,2	-1,9	-2,2	-2,3	-2,6	-2,8
Standardabweichung	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1
Prozentuale Abweichung	2,7	2,3	2,7	2,8	3,2	3,4

Zusätzlich wird durch die zunehmende Entfernung von jedem Pixel eine immer größer werdende Fläche abgedeckt. Auch dieses wirkt sich negativ auf die Genauigkeiten aus.

Anders als erwartet haben sich keine großen Unterschiede zwischen den Messungen mit Fremdlicht und ohne Fremdlicht ergeben, wobei die Versuchsreihe mit Fremdlicht besser ausfällt. Die Differenzen zum Referenzkörper und auch die prozentuale Abweichung sind hier geringer als bei der Messung ohne Fremdlicht. Auch die Standardabweichungen fallen hier geringer aus.

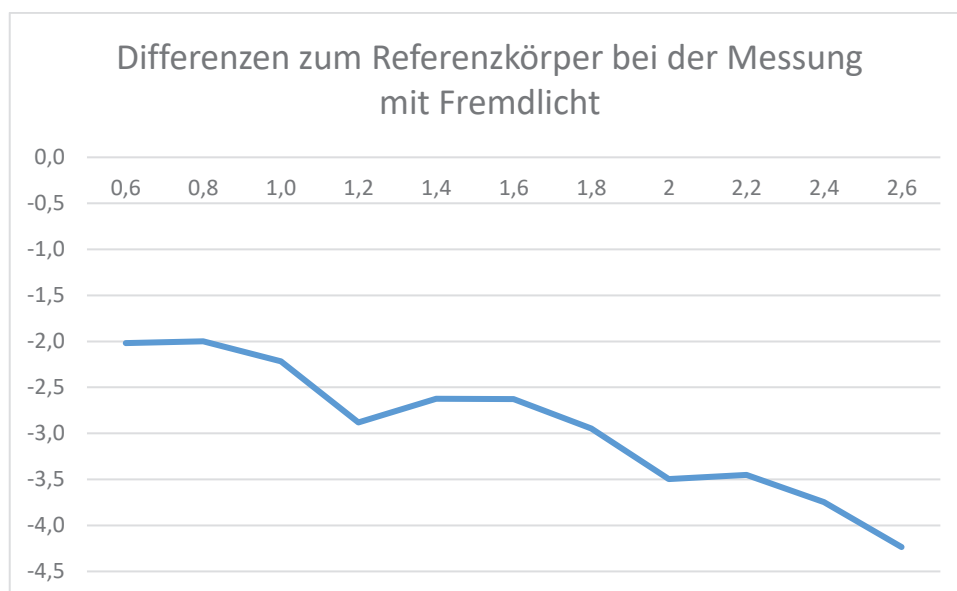


Abb. 22: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper mit Fremdlicht

Durch die grafische Darstellung der Messergebnisse der Messung mit Fremdlicht ist gut zu erkennen, wann die Belichtungszeit der Kamera neu angepasst wurde. Da es keine programminterne Überprüfung für die Güte der Belichtung gibt, mussten diese auf subjektiver

optischer Ansicht angepasst werden. Trotz diesem Verlauf ist ein Anstieg der Differenz zu dem Referenzkörper zu erkennen.

Bei der grafischen Darstellung der Messergebnisse der Messung ohne Fremdlicht ist ein nahezu kontinuierlicher Anstieg der Differenzen zum Referenzkörper zu erkennen. Durch die besonderen Verhältnisse musste hier bei jedem Standpunkt die Belichtungszeit angepasst werden.

Zusätzlich zu den Differenzen steigen auch die Standardabweichungen an. Dieses spricht für immer ungenauere Messergebnisse. Auch eine Bestimmung der Abstände zwischen den einzelnen Pixeln unterstützt diese Annahme. Bei der minimalen Messentfernung von 0,6m Entfernung zur Basis beträgt der Abstand zwischen den einzelnen Pixeln 0,206mm, bei der maximalen Entfernung von 2,6m von der Basis beträgt die Entfernung zwischen den einzelnen Pixeln 0,898mm.

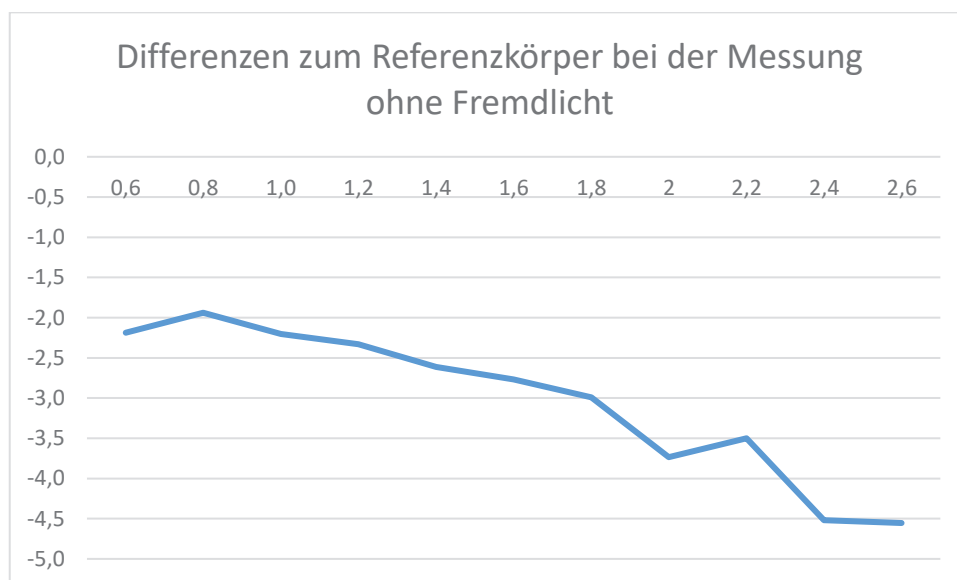


Abb. 23: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper ohne Fremdlicht

Der beste Messabstand beträgt nach dieser Auswertung zwischen 0,6m und 1,0m Entfernung von der Basis, wobei Messungen ohne Fremdlicht nur eine geringe Verbesserung bringen. Hier sollte überlegt werden, ob dieser Zusatzaufwand für die Messung benötigt wird.

6.2.2 Auswertung mit Geomagic Control

Wie auch bei der Auswertung der Daten mit Inventor werden hier die Abweichungen zu dem Referenzkörper bestimmt. Zusätzlich wird noch ein Vergleich zwischen den beiden Programmen erstellt, denn anders als in Inventor steht in Geomagic Control ein Tool zur Verfügung, welches automatisiert über die Kanten Features erzeugen kann. Genutzt wurde

hier das Features abgerundetes Langloch, weil diese der Geometrie des Referenzkörpers entspricht.

Tabelle 4: Ausschnitt aus den Messungen bei Fremdlicht im zur Auswertung mit Inventor

Messreihe Messbereich	0,6m	0,8m	1m	1,2m	1,4m	1,6m
H1 in mm	83,2	83,0	82,3	0,0	82,1	81,8
H2 in mm	82,9	82,6	82,3	0,0	82,1	81,8
H3 in mm	82,9	83,0	82,3	0,0	82,0	81,8
H4 in mm	83,2	83,1	82,3	0,0	82,1	81,8
H5 in mm	83,2	83,0	82,3	0,0	82,0	81,8
Mittel in mm	83,1	83,0	82,3	0,0	82,1	81,8
Differenz zur Referenz in mm	-1,6	-1,7	-2,3		-2,6	-2,8
Standardabweichung	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0
Prozentuale Abweichung	-1,9	2,0	2,8		3,1	3,4
Abweichung zur 1. Auswertung in mm	-0,5	-0,3	0,1		-0,1	0,2

Im Vergleich zu der Auswertung mit Inventor fällt auf, dass eine deutlich bessere Standardabweichung erreicht werden konnte. Während sich bei einer Entfernung von 0,6m zur Basis der Unterschied zwischen den beiden Differenzen zur Referenz noch auf 0,5mm beläuft, ergibt das Mittel über die gesamte Messung keinen Unterschied. Wobei beachtet werden muss, dass bei den Messwerten von 1,2m Entfernung zur Basis von Geomagic Control keine Ergebnisse generiert werden können, da der Rand aller Scans zu zerklüftet ist.

Tabelle 5: Ausschnitt aus den Messungen ohne Fremdlicht im zur Auswertung mit Inventor

Messreihe Messbereich	0,6m	0,8m	1m	1,2m	1,4m	1,6m
D1 in mm	83,2	83,1	82,9	82,5	82,5	82,0
D2 in mm	83,1	83,1	82,9	82,5	82,5	82,1
D3 in mm	83,0	83,3	82,9	82,5	82,7	82,2
D4 in mm	83,0	83,1	82,9	82,5	82,7	82,2
D5 in mm	83,0	83,1	82,9	82,6	82,3	82,1
Mittel in mm	83,1	83,1	82,9	82,5	82,5	82,1
Differenz zum Referenzkörper in mm	-1,5	-1,5	-1,7	-2,1	-2,1	-2,5
Standardabweichung	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1
Prozentuale Abweichung	1,9	1,8	2,0	2,5	2,5	3,0
Abweichung zur 1. Auswertung in mm	-0,6	-0,4	-0,5	-0,2	-0,5	-0,3

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Auswertung der Messungen ohne Fremdlicht. Auch hier konnten kleinere Standardabweichungen erzielt werden. Dieses dürfte an der automatischen

Generierung der Features liegen, da so mit mehr Messpunkten gearbeitet wird und auch eine subjektive Meinung herausfällt. Anders als bei der Messung mit Fremdlicht beträgt die Durchschnittliche Differenz zwischen den beiden Auswertungen 0,4mm.

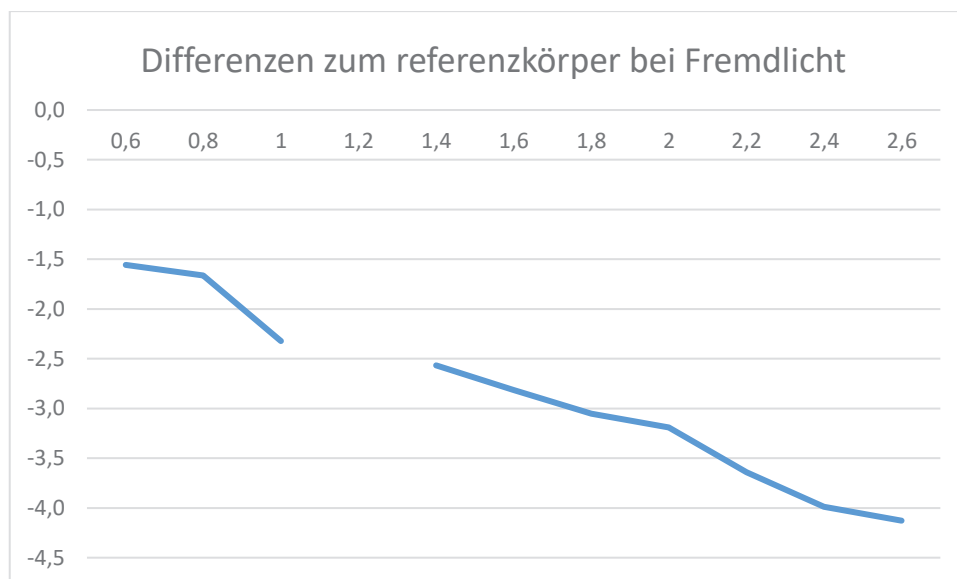


Abb. 24: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper bei Fremdlicht

Die bildliche Darstellung der Differenzen zu dem Referenzkörper zeigt einen geradlinigeren Verlauf. Auch dieses kann durch die automatisierte Erzeugung der Features erklärt werden.

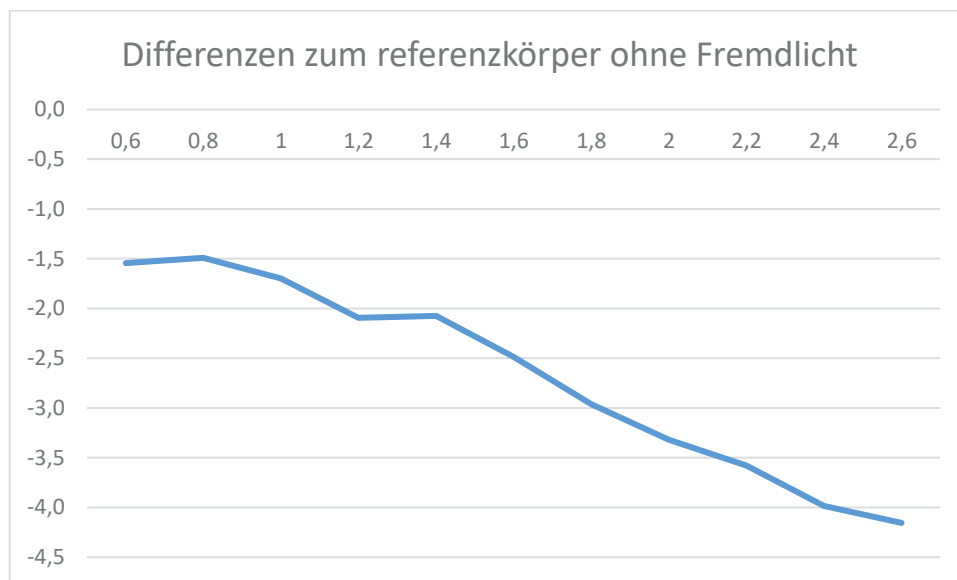


Abb. 25: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper ohne Fremdlicht

6.3 Einfluss verschiedener Materialien auf die Genauigkeit

Durch die Abweichungen vom Soll aus der Überprüfung des Messbereichs stellt sich die Frage, welchen Einfluss verschiedene Materialien auf die Messungen haben.

Wie auch bei der Messung des Messbereichs wurden von jedem Referenzkörper fünf Messungen erstellt, um mögliche Fehlmessungen aufzudecken. Beim Erstellen der optisch

ausgleichenden Geraden in Inventor konnten bei den Referenzkörpern Aluminium Profil und Formteil gerade Seiten genutzt werden. Bei der Auswertung mit Geomagic Control wurden die beiden Features Rechteck und abgerundetes Langloch genutzt.

Als erste Einschätzung ist der Referenzkörper Holz als schlechteste Wahl zum vermessen. In Bezug auf den prozentualen Fehler, welcher mit der Größe des Körpers zusammenhängt, erreicht dieser jedoch nur eine Differenz von 2,7% zu dem Soll. Bei dem Referenzkörper Aluminium Profil beträgt die Differenz 1,2%, was der höchsten Genauigkeit entspricht.

Tabelle 6: Messungen mit verschiedenen Materialien

Messreihe Material 1. Auswertung	Holz	Formteil	Aluminiumprofil geschnittene Seite	Holz + Kreide	Aluminiumprofil gegossene Seite
1 in mm	143,4	15,3	91,1	142,2	98,4
2 in mm	143,4	15,6	90,9	142,0	98,3
3 in mm	143,4	15,4	91,1	142,2	98,3
4 in mm	143,9	15,5	90,8	142,0	98,2
5 in mm	143,7	15,4	90,9	141,9	98,2
Mittel in mm	143,5	15,4	91,0	142,1	98,3
Standard	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Differenz zum Referenzkörper in mm	-3,9	1,2	1,1	-3,5	-1,4
Einfluss in Prozent	2,7	8,0	1,2	2,4	1,4
Messreihe Material 2. Auswertung	Holz	Formteil	Aluminiumprofil geschnittene Seite	Holz + Kreide	Aluminiumprofil gegossene Seite
1 in mm	145,6	15,1	90,5	142,7	98,2
2 in mm	145,6	15,3	90,5	142,7	98,1
3 in mm	145,5	15,1	90,3	142,8	97,9
4 in mm	145,5	15,2	90,6	142,8	98,1
5 in mm	145,6	15,3	90,2	142,8	98,1
Mittel in mm	145,6	15,2	90,4	142,8	98,1
Standard	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1
Differenz zum Referenzkörper in mm	-1,8	1,0	0,6	-2,8	-1,6
Einfluss in Prozent	1,3	6,6	0,6	1,9	1,6
Abweichung zur 1. Auswertung in mm	2,0	-0,2	-0,5	0,7	-0,2

Durch die Auswertung mit Geomagic Control ist es zu einer Verbesserung der Genauigkeiten gekommen. Bei dem Referenzkörper Holz wurde eine Verbesserung um 2mm zu dem Soll berechnet. Im Vergleich dazu konnte das bei dem Referenzkörper Holz mit Kreide nur eine Verbesserung um 0,7mm berechnet werden. Wie auch bei der Auswertung des Messbereiches

ist diese Veränderung durch die automatisierte Auswertung zu erklären, da hier mit mehr Messpunkten gearbeitet wird und die subjektive Meinung entfällt.

Der testweise genutzte Referenzkörper „Buch“ konnte nicht für Messungen genutzt werden, da keine ausreichende Punktmenge generiert werden konnte. Jedoch eignen sich die Messungen an diesem Referenzkörper gut, um den Einfluss der Farben des Messobjekts zu überprüfen.

Der vom Projektor ausgestrahlte Lichtkegel hat zur Mitte die höchste Intensität. Dieses kann auch bei der Auswertung an dem Referenzkörper Buch beobachtet werden, da hier der Lichtkegel gut zu erkennen ist.

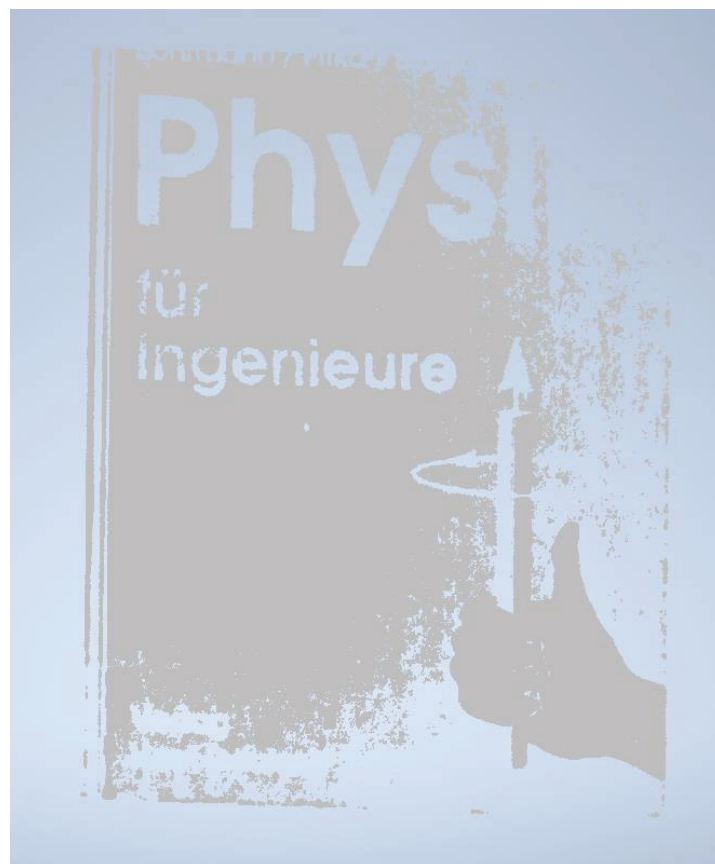


Abb. 26: Messergebnisse des Referenzkörpers Buch

Deutlich erkennbar sind die Unterschiede der Farben auf dem Buchdeckel. Wie in den vorangegangenen Messungen schon herausgefunden sind auch hier schwarze Farben nicht messbar. Durch den Lichtkegel des Projektors kann seine Position relativ zu der Kamera bestimmt werden. Dieser befindet sich auf der linken Seite. Hier ist auch deutlich der Verlust der Leuchtdichte zu erkennen.

6.4 Blender

Bei der Blender-Software handelt es sich um eine open source-Software. Entwickelt wurde diese für die Modellierung von einzelnen Objekten in Computerspielen bis hin zu ganzen Spielen. Vorteil von Blender im Vergleich zu Inventor ist, dass die ausgewählten Objekte mit einem orangen Rand versehen werden. Vor dem schwarzen Hintergrund lassen sich so besser Form und Lücken in dem zu vermessenden Objekt erkennen. Auch die Darstellung von Tiefeninformationen wird durch einen deutlichen Schatten besser dargestellt.



Abb. 27: Scan einer menschlichen Hand, dargestellt in Blender

In Blender steht ein Tool zur Messung von Abständen zur Verfügung. Mit diesem Tool können die Abstände zwischen Punkten gemessen werden. Für Vermessungstechnische Anwendungen ist diese Software jedoch ungeeignet, da die Möglichkeit eines genauen Messens nicht gegeben ist.



Abb. 28: Vergleich zwischen Modell und Scan

Die Referenzkörper wurden mit der Software „Inventor“ auf der Grundlage der vorherigen Vermessungen der Referenzkörper nachgebaut. Um auch eine bessere bildliche Darstellung zu erhalten, wurden nachgebaute Referenzkörper mit den Messdaten zusammen in die Blender-Software geladen. Somit konnte festgestellt werden, dass einige Aufnahmen von rechtwinkligen Fläche als Trapez dargestellt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Genauigkeitsüberprüfung konnte festgestellt werden, dass das David-3D-Messsystem nur Genauigkeiten von schlechter als 1mm erreichen kann, wobei die Formen und Farben des Objekts eine bedeutende Rolle spielen. Auch der Einfluss der Größe des Messobjekts spielt eine Rolle, da Fehler einen prozentualen Anteil über die Größe des Messobjekts bekommen.

Für zukünftige Untersuchungen können Projektor und Kamera durch qualitativ höherwertige Modelle ausgetauscht werden und anschließend eine neue Genauigkeitsüberprüfung durchgeführt werden. Durch diese können mögliche Schwachstellen in dem Algorithmus der David-3D-Software aufgedeckt werden.

Durch ein vollständiges Scannen von den Referenzkörpern kann möglicherweise eine höhere Genauigkeit erzielt werden. Auch dieses kann bei weiteren Messungen bestimmt werden.

8 Literaturverzeichnis

Foppe, Prof. Dr.-Ing. Karl. 2016. *Script Fehlerlehre & Statistick.* Neubrandenburg : Hochschule Neubrandenburg, 2016.

Gühning, Dipl.-Ing. Jens. 2002. *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion.* Stuttgart : Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 2002.

Knickmeyer, Prof. Dr.-Ing. Elfride T. 2016. *Geodätisches Rechnen.* s.l. : Hochschule Neubrandenburg, 2016.

Kresse, Prof. Dr. Wolfgang. 2016. *Script Photogrammetrie und Bildverarbeitung.* Neubrandenburg : Hochschule Neubrandenburg, 2016.

Luhmann, Thomas. 2010. *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen.* s.l. : Wichmann, 2010.

Michael Schuth, Wassili Buerakow. 2017. *Handbuch Optische Messtechnik.* s.l. : Hanser, 2017.

Naumann/Schröder. 1992. *Bauelemente der Optik.* s.l. : Carl Hanser Verlag, 1992.

Wiora, Dipl.-Phys. Georg. 2001. *Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren.* Heidelberg : Ruprechts-Karl-Universität Heidelberg, 2001.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Messaufbau für die optische Triangulation (Michael Schuth, 2017)	5
Abb. 2: Aufbau der Linienprojektion (Luhmann, 2010)	6
Abb. 3: Darstellung des Grey Codes (Michael Schuth, 2017)	7
Abb. 4: Phasenshift-Verfahren (Michael Schuth, 2017)	8
Abb. 5: David 3D s11 nach der Kalibrierung	9
Abb. 6: Innere Orientierung einer Kamera (Kresse, 2016)	9
Abb. 7: Mögliche Verzeichnungen	12
Abb. 8: Der genutzte digitale Messschieber	13
Abb. 9: Berechnung eines Neupunktes durch den Vorwärtsschnitt	13
Abb. 10: David 3D in Messbereitschaft	15
Abb. 11: Überblick über die für die Messungen genutzten Objekte	16
Abb. 12: Referenzkörper Holz	17
Abb. 13: Referenzkörper Aluminiumprofil	17
Abb. 14: Referenzkörper Aluminiumklotz	18
Abb. 15: Referenzkörper Formteil	18
Abb. 16: Testkörper Buch	19
Abb. 17: Kante eines Referenzkörpers ohne Filterung	20
Abb. 18: Kante eines Referenzkörpers mit Filterung	21
Abb. 19: Schematische Darstellung des Messaufbaus	22
Abb. 20: Referenzkörper Holz ohne Kreidebeschichtung	23
Abb. 21: Referenzkörper Holz mit Kreidebeschichtung	24
Abb. 22: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper mit Fremdlicht	27
Abb. 23: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper ohne Fremdlicht	28
Abb. 24: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper bei Fremdlicht	30
Abb. 25: Darstellung der Differenzen zum Referenzkörper ohne Fremdlicht	30
Abb. 26: Messergebnisse des Referenzkörpers Buch	32
Abb. 27: Scan einer menschlichen Hand, dargestellt in Blender	33
Abb. 28: Vergleich zwischen Modell und Scan	33

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung einer Strecke durch Zeitmessung und eines Lichtstrahls	4
Formel 2: Bestimmung des Phasenwerts bei dem kombinierten Verfahren (Michael Schuth, 2017)	8
Formel 3: Berechnung der Verzeichnung	12
Formel 4: Berechnung der Richtungswinkel im Kamerakoordinatensystem	14
Formel 5: Berechnung der X-Koordinate des Messpunktes	14
Formel 6: Berechnung der Y-Koordinate des Messpunktes	14
Formel 7: Berechnung der Höheninformationen des Messpunktes	14
Formel 8: Berechnung des empirischen Mittelwertes (Foppe, 2016)	25
Formel 9: Berechnung der systematischen Abweichung (Foppe, 2016)	25
Formel 10: Berechnung der Verbesserung (Foppe, 2016)	25
Formel 11: Berechnung der empirischen Varianz (Foppe, 2016)	25
Formel 12: Berechnung der empirischen Standardabweichung (Foppe, 2016)	25
Formel 13: Zusammengefasste Formel zur Berechnung der empirischen Standardabweichung	25
Formel 14: Berechnung der prozentualen Abweichung	26

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:Referenzmessungen der Referenzkörper	16
Tabelle 2:Ausschnitt aus den Messung bei Fremdlicht	26
Tabelle 3:Ausschnitt aus den Messungen ohne Fremdlicht.....	27
Tabelle 4:Ausschnitt aus den Messungen bei Fremdlicht im zur Auswertung mit Inventor	29
Tabelle 5:Ausschnitt aus den Messungen ohne Fremdlicht im zur Auswertung mit Inventor	29
Tabelle 6:Messungen mit verschiedenen Materialien	31