

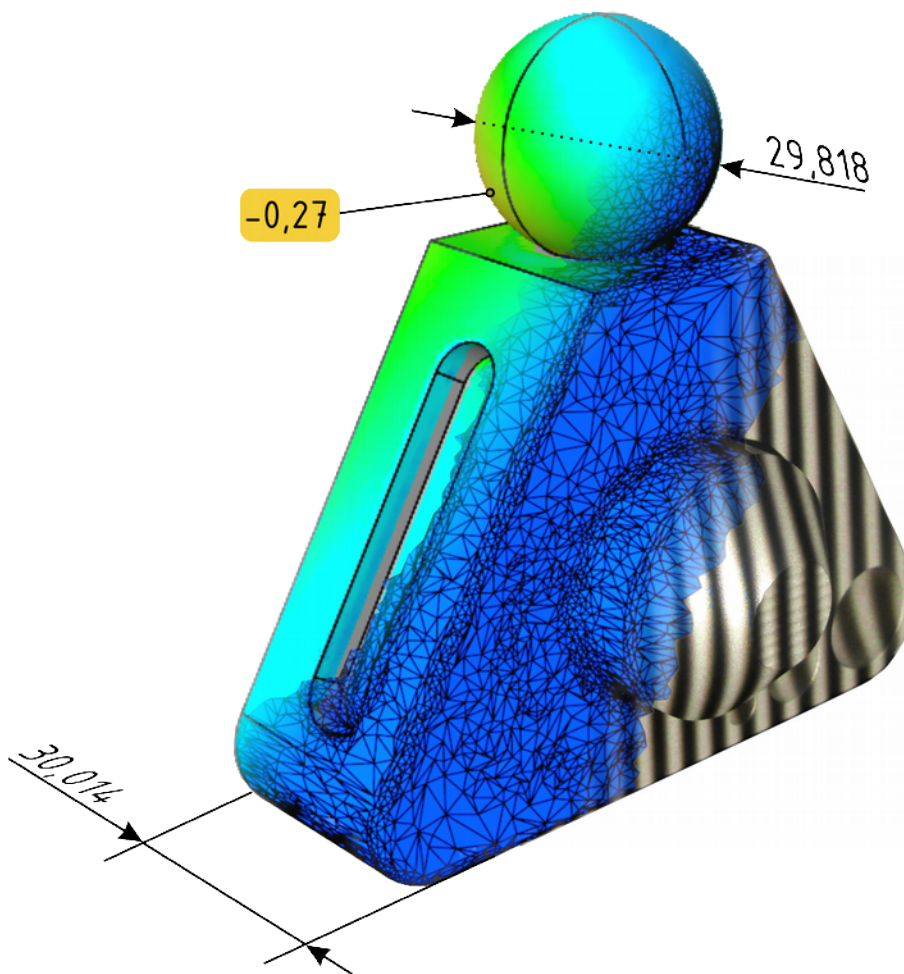


Universität Stuttgart

Praktikum

Optische 3D Vermessung

APMB, Spezialisierungsfachpraktikum, Hauptfachpraktikum



**Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Theoretische Grundlagen.....	5
2.1	Triangulation.....	5
2.2	Laserscanning.....	6
2.3	Structured Light Scanning.....	7
3	Durchführung.....	8
3.1	Scannen.....	9
3.1.1	Laserscanning.....	10
3.1.2	Structured Light Scanning.....	12
3.2	Shape Fusion.....	14
3.3	Vermessung.....	15

1 Einleitung

Ziel der der Koordinatenmesstechnik ist es, das zu messende Objekt dreidimensional zu erfassen. Dazu werden endlich viele Punkte auf der Oberfläche des Objekts mit ihren Koordinaten im Raum aufgenommen. Aus diesen Punkten können dann die oberflächenbestimmenden Geometrielemente des Objekts berechnet werden. Neben den taktilen Messverfahren gewinnen optische Verfahren immer mehr an Bedeutung. Dem IKFF stehen bereits zwei taktile Koordinatenmessgeräte zur Verfügung, ein Portalmessgerät von Zeiss sowie der Messarm FARO Gage. Es wird auch bereits ein Praktikum zum Umgang mit diesen angeboten.

Optische Systeme haben gegenüber den taktilen Koordinatenmessgeräten einige Vorteile, außerdem bieten sich dabei neue Möglichkeiten.

Im Vergleich zum vorhandenen Zeiss Koordinatenmessgerät ist z.B. keine aufwändige Klimatisierung notwendig. Außerdem ist ein mobiler Einsatz des optischen Messsystems möglich. Während taktile Messgeräte nur eine begrenzte (kleine) Anzahl von Punkten aufnehmen können, ist bei optischen Verfahren ein Scan des kompletten Objekts möglich. Dies eröffnet weitere Möglichkeiten. So ist z.B. ein Formabgleich mit dem zu Grunde liegenden CAD-Modell möglich, aber auch ein Reverse Engineering des vermessenen Objekts kann durchgeführt werden. Des Weiteren lassen sich damit auch weiche Materialien, die nicht für taktilen Messen geeignet sind, scannen und vermessen. Auch der Messraum ist bei den optischen Verfahren wesentlich größer.

In diesem Praktikum werden zunächst im theoretischen Teil die Grundlagen zweier optischer Messverfahren - Laserscanning und Structured Light Scanning (SLS) - erläutert. Im praktischen Teil werden von den Teilnehmern anschließend beide Verfahren durchgeführt und die Messergebnisse mit denen eines taktilen Messverfahrens verglichen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Triangulation

Das Prinzip der Triangulation wurde bereits früher bei der Landvermessung angewendet. Die Grundidee wird in 1 verdeutlicht:

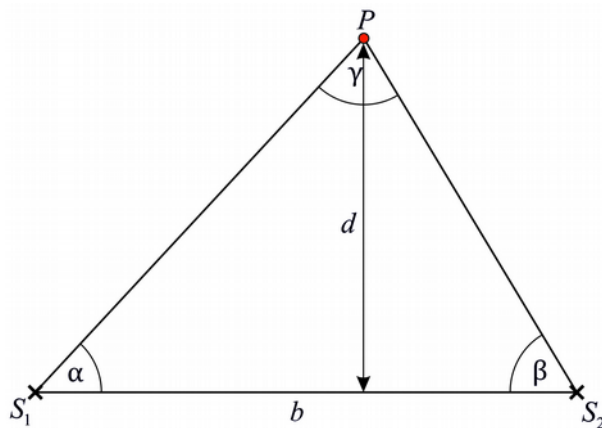


Abb. 1: Prinzip der Triangulation

Bei bekannter Basislänge b und bekannten Winkeln α und β (und somit auch dem Triangulationswinkel γ) zwischen zwei Beobachtungspunkten S_1 und S_2 kann die Distanz d zum Objekt P berechnet werden:

$$d = \sin \alpha \cdot \frac{b}{\sin \gamma} \cdot \sin \beta \quad \gamma = 180^\circ - \alpha - \beta$$

Die benötigten Größen werden entweder gemessen oder durch eine Kalibrierung ermittelt.

Es kann zwischen **aktiven und passiven Verfahren** unterschieden werden. Bei passiven Verfahren wird das Objekt von den Punkten S_1 und S_2 jeweils mit einer oder auch mehreren Kameras aufgenommen. Durch einen Abgleich der Bilder (z.B. mittels Markierungen auf dem Objekt) können dann die Koordinaten jedes einzelnen Punktes an der Objektoberfläche berechnet werden. Aus der gewonnenen Punktwolke lässt sich dann ein 3D-Modell erstellen.

Bei aktiven Verfahren hingegen werden an einem Beobachtungspunkt eine Kamera und am anderen eine strukturierte Lichtquelle (z.B. ein Linienlaser oder ein Projektor) zur Beleuchtung des Objekts platziert. Letztere projiziert ein Streifenmuster auf das Objekt. Aus der verformten Abbildung des Musters bzw. der Linie auf der Oberfläche des Objekts können dann die Koordinaten jedes Punktes berechnet werden. Zwei aktive Verfahren, das Laserscanning und das Structured Light Scanning, werden in diesem Praktikum durchgeführt und zunächst kurz erläutert.

2.2 Laserscanning

Beim Laserscanning wird als strukturierte Lichtquelle ein **Linienlaser** verwendet, welcher über das Objekt geschwenkt wird. Die Position der **feststehenden Kamera** wird durch eine vorherige Kalibrierung bestimmt. Die Position und vor allem die Orientierung des Lasers ändern sich allerdings während des Scannens. Dessen Koordinaten müssen deshalb kontinuierlich ausgewertet werden. Dies ist beispielsweise durch Referenzobjekte im Bild möglich.

Beim Scannen **verändert** sich dann bei **unterschiedlicher Höhe Δz des Objekts** die **Form der Laserlinie**, was auf dem **Kamerasensor zu einer Positionsveränderung Δx** führt. Sind die Positionen von Kamera und Laserquelle oder Kamera und unverformter Linie bekannt, können aus dem Kamerabild der verformten Linie die Koordinaten des Objektpunktes berechnet werden. Nach einem vollständigen Schwenk über das Objekt erhält man dann als Ergebnis die Koordinaten aller Punkte an der Objektoberfläche als große Punktwolke.

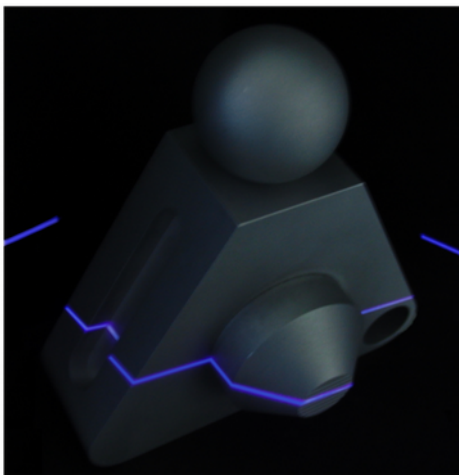
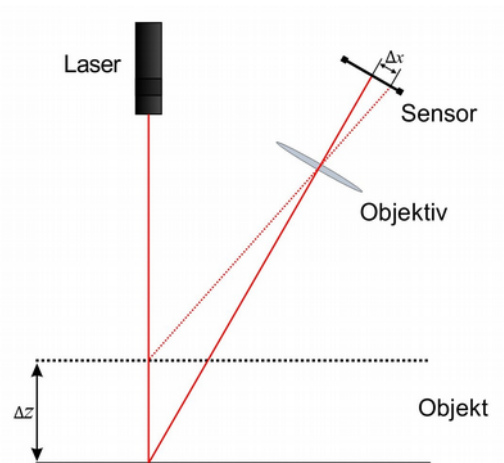


Abb. 2: Laserscanning



2.3 Structured Light Scanning

Anstatt eine einzelne Linie über das Objekt zu schwenken, werden beim **SLS** mit einem Projektor **mehrere schmale schwarze und weiße Linien** auf das Objekt geworfen. Dieses Verfahren ist damit wesentlich **schneller**. Zudem muss der **Projektor** während des Scannens **nicht** wie der Laser **bewegt** werden, da er das **komplette Objekt beleuchtet**. Seine Position ist also fest und kann im Gegensatz zum Laserscanning bereits bei einer vorherigen Kalibrierung ermittelt werden. Störende Referenzobjekte werden hier während des Scannens nicht mehr benötigt.

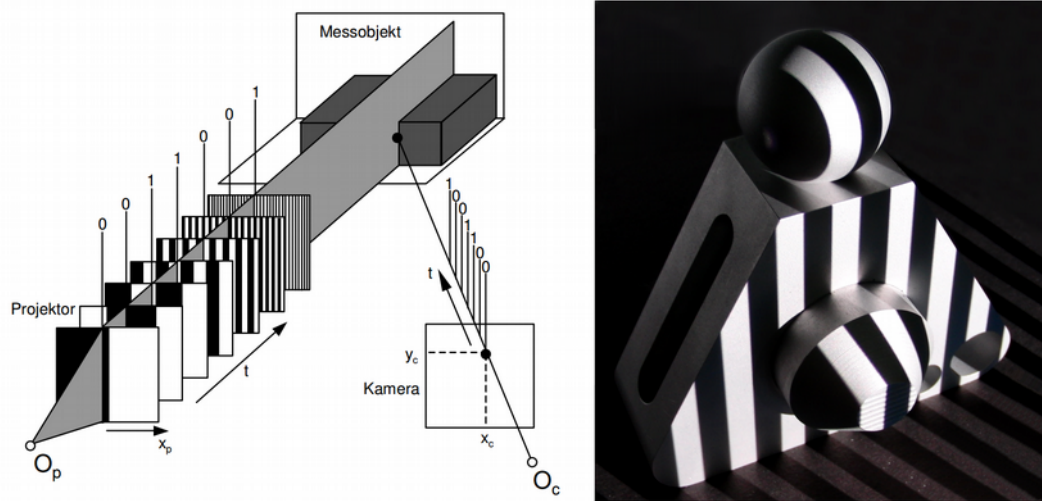


Abb. 3: Structured Light Scanning

Es ergibt sich jedoch ein Problem. Besonders an **Objektkanten** ist der **Verlauf** der einzelnen Linien oft **nicht eindeutig**. Deshalb werden **zeitlich versetzt binär codierte Streifenmuster projiziert**, bei denen in jedem Bild ein Streifenmuster der doppelten Frequenz verwendet wird. Die Kamera erfasst parallel dazu die projizierten Muster und somit kann **jedem Pixel ein Binärwert zugeordnet** werden. Dadurch kann der genaue Verlauf der einzelnen Streifen nachvollzogen werden.

Da die projizierten Streifen wesentlich breiter sind als die Laserlinie beim Laserscanning, werden **zusätzlich** noch **sinusförmige hell-dunkel Verläufe** verwendet. Damit ist dann eine subpixelgenaue Auswertung möglich, was die Präzision erhöht. Analog zum Laserscanning kann dann eine Punktwolke berechnet werden.

3 Durchführung

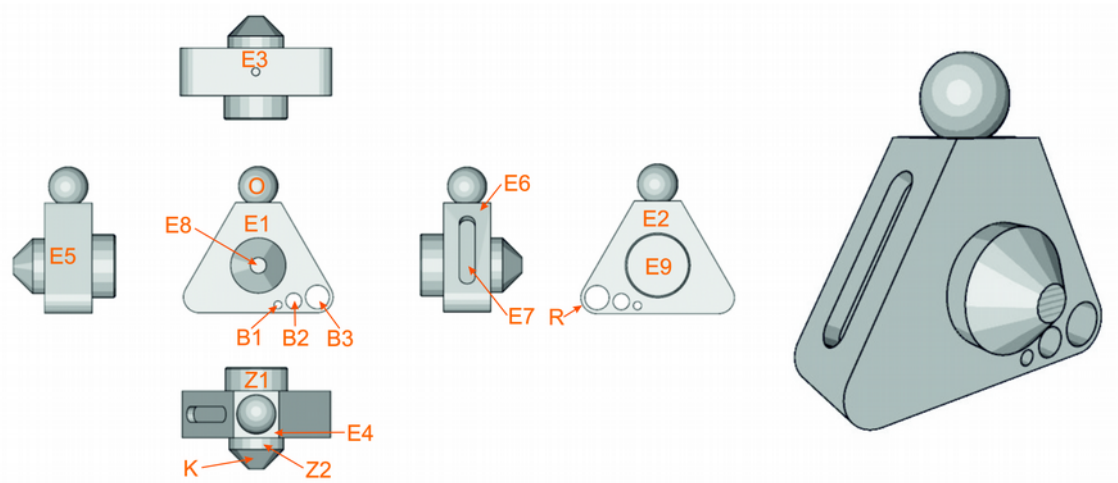
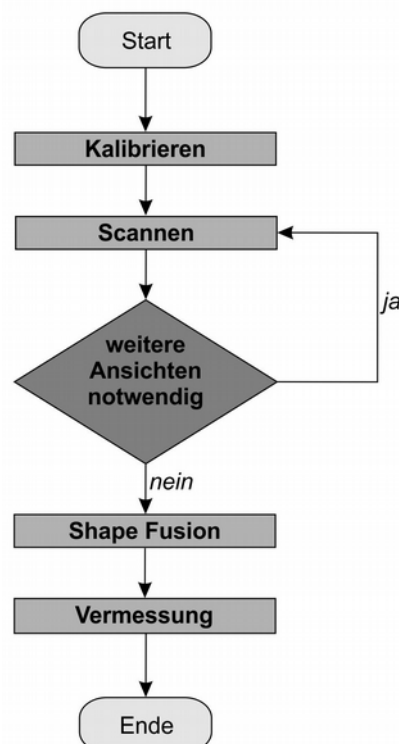


Abb. 4: Prüfkörper

Untersucht werden soll der oben abgebildete Prüfkörper. Dieser wird jeweils mit beiden beschriebenen Verfahren gescannt.

Das grundsätzliche Vorgehen ist dabei bei beiden Verfahren gleich. Zunächst muss das System kalibriert werden, danach werden je nach benötigter Anzahl eventuell mehrere Scans durchgeführt, diese anschließend zusammengefügt und dann vermessen.



3.1 Scannen

Zum Scannen wird die Software „DAVID“ verwendet.

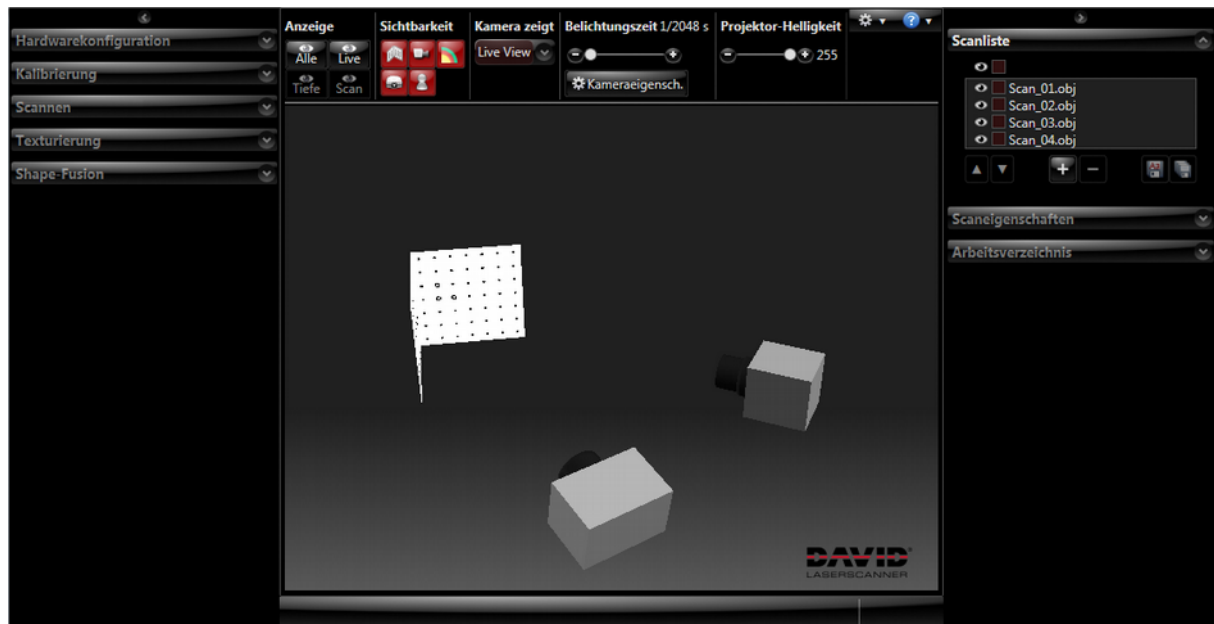


Abb. 6: Screenshot der Software DAVID

Links befinden sich mehrere aufklappbare Menüs, die sich je nach gewähltem Verfahren automatisch anpassen. In der Mitte werden in einem Fenster entweder der Versuchsaufbau, das Kamerabild oder die Scans gezeigt. Eingestellt wird dies im oberen Bereich. Außerdem besteht hier die Möglichkeit, Belichtungszeit der Kamera oder die Helligkeit des Projektors einzustellen. Auf der rechten Seite werden die einzelnen Scans verwaltet.

3.1.1 Laserscanning

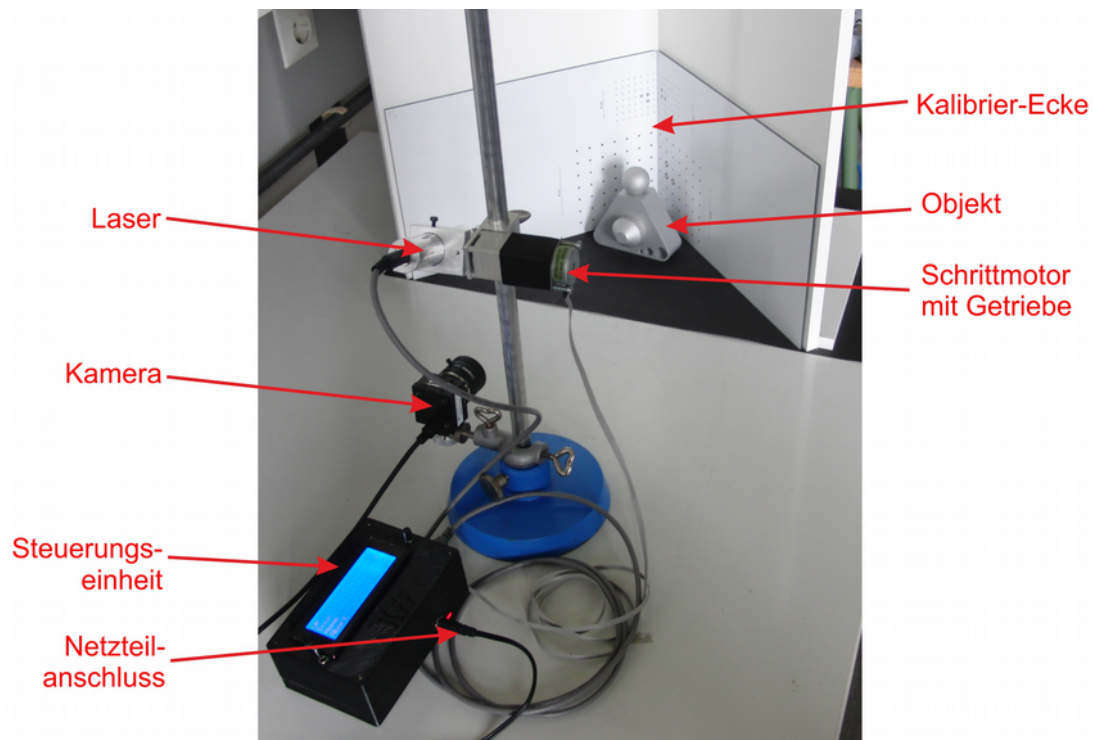


Abb. 7: Versuchsaufbau Laserscanning

7 zeigt den Versuchsaufbau zum Laserscanning. Dabei kommen zum Einsatz:

- Monochrom Kamera mit einer Auflösung von 1280x960 Pixeln, ausgestattet mit einem Objektiv mit 12mm Brennweite
- blauer Linienlaser mit einer Wellenlänge von 405 nm der Laserklasse 1
Damit ist das Tragen einer Schutzbrille nicht notwendig. Bei Beschädigung des Lasers kann dennoch eine Laserstrahlung höherer Laserklasse auftreten, die für das Auge schädlich ist. Achten Sie deshalb trotzdem darauf, dass Sie niemals direkt in den Strahl schauen!
- Schrittmotor zur Bewegung des Lasers
- Kalibrier-Ecke, bestehend aus einem exakt gefertigten 90°-Winkel und austauschbaren Mustern

In der *DAVID*-Software wird unter →*Hardwarekonfiguration* →*Hand-Held Laser Setup* eingestellt. Als →*Kamera* wählen Sie →*DAVID-CAM-3-M*

Für den Aufbau wählen Sie zunächst das Kalibriermuster in der passenden Größe aus (für den Prüfkörper das mit dem Aufdruck 120 mm) und bringen es auf der Kalibrier-Ecke an. Platzieren Sie dann den Prüfkörper vor den schwarzen Ringen auf der Kalibrier-Ecke und positionieren Sie die Kamera so, dass der komplette Prüfkörper im Bild zu sehen ist. Außerdem sollte am Bildrand noch ein Teil der Kalibrier-Ecke sichtbar sein. Stellen Sie nun den Fokus der Kamera so ein, dass das Objekt scharf

abgebildet wird. Passen Sie die Höhe des Lasers so an, dass der Winkel zwischen Laser, Objekt und Kamera etwa 20° beträgt. Dann können der Prüfkörper noch einmal entfernt und Blende und Belichtungszeit der Kamera so angepasst werden, dass das Muster auf der Kalibrier-Ecke möglichst kontrastreich dargestellt wird. Um eine große Tiefenschärfe zu erhalten, sollte die Blende möglichst weit geschlossen werden.



Nun kann die Kalibrierung erfolgen, bei der die Software die Position der Kamera berechnet. Im Menüpunkt $\rightarrow$ *Kalibrierung* wird das eingesetzte Kalibriermuster und die Größe von diesem eingetragen.

Mit einem Klick auf $\rightarrow$ *Kalibriere* wird diese abgeschlossen. Nach erfolgter Kalibrierung dürfen der Aufbau und Fokus der Kamera nicht mehr verändert werden. Nun kann das Scannen des Objekts erfolgen.

Dazu wird der Prüfkörper wieder möglichst weit hinten in der Kalibrier-Ecke platziert. Dann muss der Laser fokussiert und die Belichtungszeit der Kamera so weit reduziert werden, bis im Kamerabild nur noch eine möglichst schmale, aber durchgehende Linie zu sehen ist. Um den Kontrast der Laserlinie zu erhöhen ist es außerdem hilfreich, den Raum abzudunkeln.

Im Menü $\rightarrow$ *3D Laser Scannen* wird der Scan dann gestartet. Mit der Steuerungseinheit kann unter $\rightarrow$ *Manual control* $\rightarrow$ *Move motor* der Schrittmotor auf- und abbewegt und somit der Laser über das Objekt geschwenkt werden.

Da sich dabei Position und Orientierung des Lasers verändern, müssen diese von der Software während des Scannens berechnet werden. Dazu dient ebenfalls die Kalibrier-Ecke. Ist die Laserlinie rechts und links des Objekts auf dieser zu sehen, kann die Software Position und Orientierung des Lasers berechnen.

Im zentralen Fenster der DAVID-Software ist nun der aktuelle Scanfortschritt zu sehen. Die Farbe stellt dabei die Entfernung zur Kamera dar. Ist das Ergebnis zufriedenstellend und wird das Objekt ohne größere Löcher dargestellt, kann der Scan gestoppt werden.



Nun wird im Fenster der DAVID-Software das Scanergebnis gezeigt. Meist ist noch ein Rauschen zu erkennen, dies lässt sich mittels $\rightarrow$ *Ergebnis-Filterung* $\rightarrow$ *Glättung* verringern. Mit $\rightarrow$ *Ergebnis-Filterung* $\rightarrow$ *Interpolation* können kleinere Löcher durch Interpolation geschlossen werden. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, kann der Scan

→*Zur Liste* hinzugefügt werden. Beim Start des nächsten Scans muss dann zunächst noch mit →*Lösche* der alte Scan entfernt werden.

Aufgabe:

Scannen Sie den Prüfkörper aus sechs Positionen (vier Seitenansichten und jeweils ein Scan der Ober- bzw. Unterseite) und speichern Sie diese im .stl Format ab. Achten Sie auf eine ausreichende Überdeckung der Scans. Was fällt Ihnen an den Scans auf?

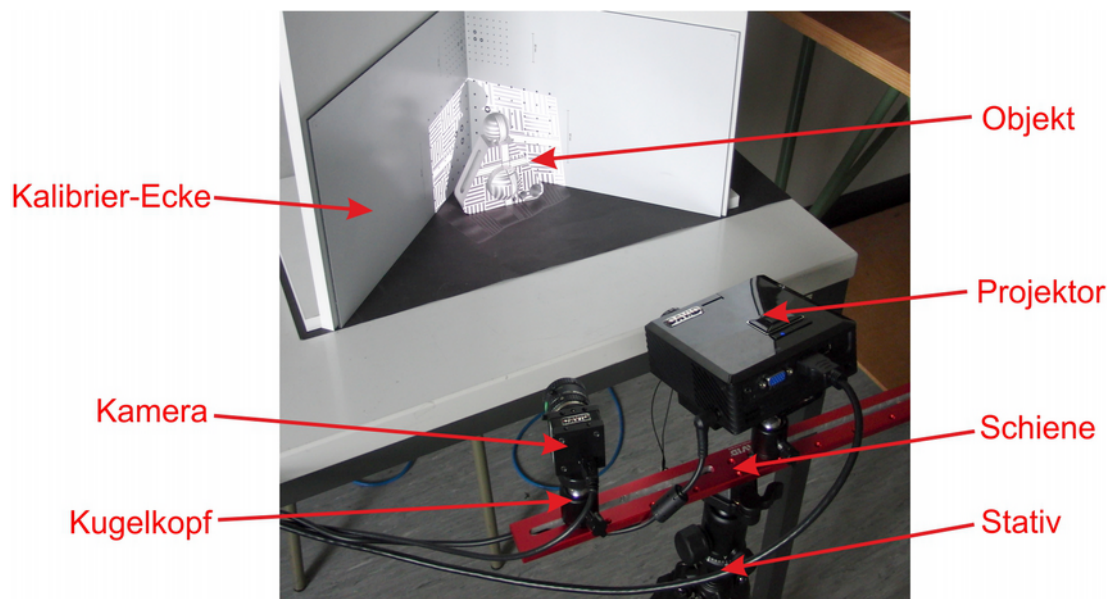
3.1.2 Structured Light Scanning

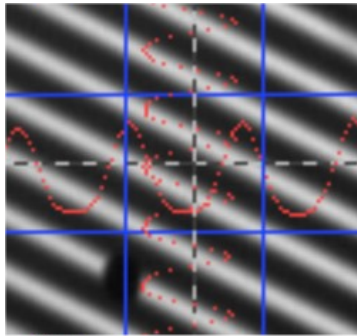
Abb. 8: Versuchsaufbau SLS

8 zeigt den Versuchsaufbau zum SLS. Dabei kommen zum Einsatz:

- Monochrom Kamera mit einer Auflösung von 1280x960 Pixeln, ausgestattet mit einem Objektiv mit 12mm Brennweite
- Projektor mit einer Auflösung von 800x600 Pixeln
- Kalibrier-Ecke

Unter →*Hardwarekonfiguration* wählen Sie jetzt →*Structured Light Setup*. Für den Projektor wird →*MonitorID 2* eingestellt und als →*Kamera* wieder die →*DAVID-CAM-3-M* ausgewählt.

Kamera und Projektor müssen auf der Schiene so montiert werden, dass sich zwischen diesen und dem Objekt ein Triangulationswinkel von etwa 20° ergibt. Außerdem muss der komplette Prüfkörper vom Projektor beleuchtet werden und auch auf dem Kamerabild zu sehen sein. Dann können der Fokus von Kamera und Projektor so eingestellt werden, dass Objekt und Streifen scharf dargestellt werden. Schließlich muss noch die Blende eingestellt werden.



Als Hilfsmittel zeigt die *DAVID*-Software dazu im Livebild der Kamera blaue Linien und ein rotes Sinusmuster. Die Blende wird nun so eingestellt, dass die roten Kurven nicht von den blauen Linien abgeschnitten werden. Optimal ist die Einstellung, wenn die Kurven wie im linken Bild dargestellt werden.

Für die Belichtungszeit sollte beim SLS 1/60 Sekunde oder ein Vielfaches davon eingestellt werden, da dies mit der Frequenz des Projektors übereinstimmt. Sind diese nicht aufeinander abgestimmt, kommt es zu einem Flackern des Bildes.

Der Aufbau kann nun kalibriert werden. Beim SLS werden dabei die Positionen von Kamera und Projektor berechnet. Außerdem werden auch mögliche auftretende Verzerrungen durch die Linsen mit einberechnet.

Dazu wird das Objekt entfernt und an Stelle von diesem die Kalibrier-Ecke mit dem Muster passender Größe platziert. Ist das Objekt wesentlich dunkler, kann in *DAVID* die Projektorhelligkeit verringert werden, bis die Sinusmuster wieder wie oben beschrieben dargestellt werden. Die Kalibrierung wird im Menü → *Kalibrierung* analog zum Laserscanning durchgeführt.

Da sich beim SLS die Position des Projektors während des Scannens nicht mehr ändert, ist die Kalibrier-Ecke zum Scannen nun nicht mehr notwendig und kann wieder durch das Objekt ersetzt werden. Die Einheit aus Projektor und Kamera kann nun theoretisch beliebig bewegt werden, so lange deren Position zueinander und deren Fokuseinstellungen unverändert bleiben.

Im Menü → *Strukturiertes Licht* wird bei → *Muster-Parameter* die Einstellung → *Qualität* verwendet. Dies legt die Anzahl der projizierten Muster fest. Die Orientierung der Steifen wird von der Software automatisch eingestellt. Danach kann der Scan mit einem Klick auf → *Start* gestartet werden. Nach einigen Sekunden ist der Scan beendet, wie beim Laserscanning können mit → *Ergebnis-Filterung* die Ergebnisse noch etwas verbessert werden. Auch hier wird der Scan dann → *Zur Liste* hinzugefügt.

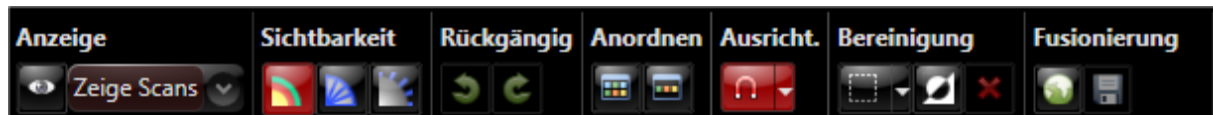
Aufgaben:

Scannen Sie zunächst den Prüfkörper von schräg vorne. Was fällt Ihnen am Scanergebnis auf? Wie kann man dies verhindern?

Scannen Sie den Prüfkörper nun wie bereits beim Laserscanning aus sechs Positionen und speichern Sie alle Scans im .stl Format ab.

3.2 Shape Fusion

Der Begriff „Shape Fusion“ beschreibt das Zusammenfügen der einzelnen Scans zu einem kompletten 3D Modell. Dies ist ebenfalls in *DAVID* möglich.



Zunächst müssen die Scans jedoch bereinigt werden. Mit einem Klick auf →*Anordnen* werden die Scans nebeneinander angeordnet. Alle Punkte der Scans, die nicht zum Prüfkörper gehören, können dann mittels →*Bereinigung* entfernt werden.



Anschließend rufen Sie das Menü →*Shape Fusion* auf. Wählen Sie als Methode →*Ausrichtung* →*Frei* aus. Unter dem Punkt →*Scans ausrichten* wählen Sie nun zwei Scans aus der Liste aus. Zu Beachten ist, dass jeweils Scan A auf Scan B ausgerichtet wird, Scan B also seine Position behält. Ist die automatische Ausrichtung nicht korrekt, können mit →*Kontaktpaar auswählen* zwei Punkte auf den Scans ausgewählt werden, die später übereinander liegen sollen.

Sind alle Scans korrekt ausgerichtet, können diese mit →*Fusioniere* zu einem einzigen Modell zusammengefügt werden. Die Optionen →*Verfeinerung* und →*Schließe Löcher* werden nicht verwendet.

Aufgabe:

Erzeugen Sie aus den Scans vom Laserscanning ein komplettes 3D-Modell und speichern Sie dieses als .stl Datei ab.

3.3 Vermessung

Zur Vermessung der Scans wird die kostenlose Software „Geomagic Verify Viewer“ eingesetzt. Hier werden kurz die grundlegenden Funktionen beschrieben.

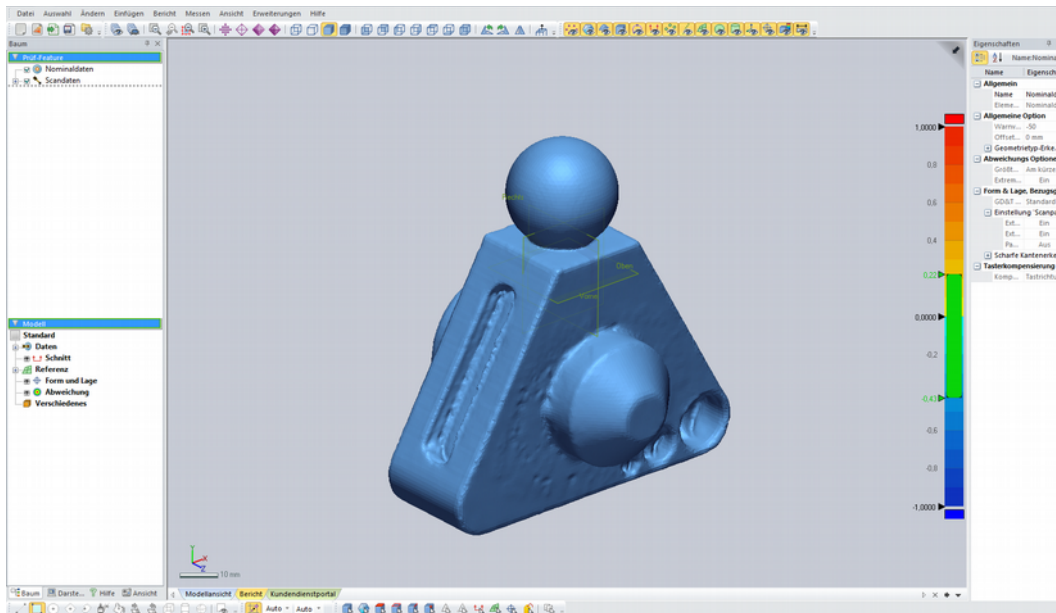


Abb. 9: Screenshot der Software Geomagic Verify Viewer

Nach dem Öffnen einer Datei im *Geomagic Verify Viewer* können hier einige grundlegende Geometrien Vermessen werden. Wählen Sie dazu → *Messen* → *Abstand/Winkel/Radius* → *Geometrie einpassen*.



In diesem Fenster können nun Ebenen, Zylinder, Kugeln etc. auf die Scans eingepasst werden. Durch → *Ziehen mit der linken Maustaste* werden die Punkte auf dem Scan markiert. Punkte am Rand des Scans sollten nicht ausgewählt werden, da hier oft größere Unsicherheiten vorhanden sind. Sind genügend Punkte ausgewählt, kann mit dem Haken die Geometrie bestätigt werden und die nächste eingepasst werden.

Sind alle benötigten Geometrien erzeugt, kann der Haken bei → *Geometrie anpassen* wieder entfernt werden. Mit einem Klick auf die einzelnen Elemente können diese dann vermessen werden.

Aufgaben:

Vermessen Sie zunächst jeweils die einzelnen Scans vom Laserscanning und SLS und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein.

Vermessen Sie nun noch das 3D-Modell des Prüfkörpers, das durch die Shape Fusion entstanden ist und tragen Sie die Werte ebenfalls in die Tabelle ein.

Vergleichen Sie nun die erhaltenen Messwerte mit den eingetragenen Messwerten, die mit der FARO Gage ermittelt wurden. Welche Beobachtungen können gemacht werden? Wo treten größere Abweichungen auf und wie können diese erklärt werden?

Starten Sie nun noch das Programm „GOM Inspect“. Am Beispiel dieser Software können weitere Möglichkeiten der optischen 3D Vermessung dargestellt werden. Hier kann bspw. ein direkter Vergleich von Messdaten und CAD-Modell erfolgen, außerdem stehen im Gegensatz zum *Geomagic Verify Viewer* weit umfangreichere Möglichkeiten zur Vermessung zur Verfügung. Die Bedienung ist dadurch allerdings etwas umständlicher. Deshalb wurde bereits ein Projekt angelegt, mit dem die einzelnen Möglichkeiten demonstriert werden können

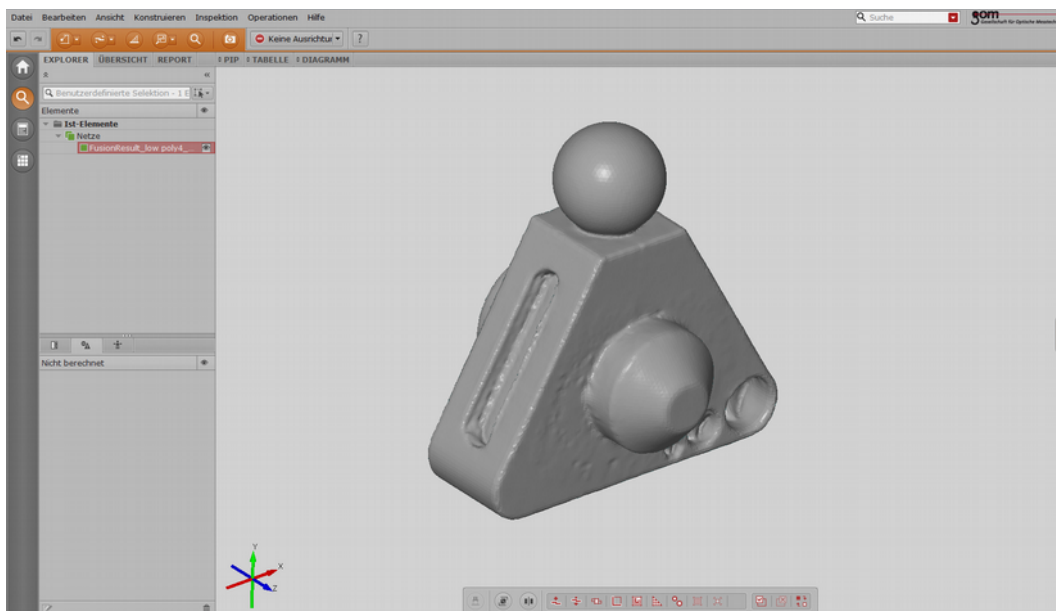


Abb. 10: Screenshot der Software GOM Inspect

10 zeigt einen Screenshot der Software GOM Inspect. Im linken Bereich kann die Sichtbarkeit der einzelnen Elemente an- und ausgeschaltet werden.

Aufgabe:

Öffnen Sie die Datei „*Prüfkörper*“. Lesen Sie die Werte für die Parallelität der Ebenen und den Kegelwinkel ab und tragen Sie diese noch in die hellgrau hinterlegten Felder der Tabelle ein. Welche Beobachtungen können gemacht werden? Treten im Vergleich mit der FARO Gage Abweichungen auf? Wie können diese erklärt werden?

Merkmal	Sollwert	Laser	SL	Laser Shape Fusion	FARO Gage	Differenz Laser-Gage	Differenz SL-Gage	Differenz Laser SF-Gage
Durchmesser [mm]								
Kugel O	30				29,893			
Zylinder Z1	40				39,922			
Zylinder Z2	35				34,967			
Rundung R	20				19,942			
Bohrung B1	5				-			
Bohrung B2	10				10,063			
Bohrung B3	15				15,052			
Winkel [°]								
E5 – E6	60				60,028			
Kegel K	45				44,302			
Abstand [mm]								
E1 – E2	30				30,03			
E3 – E4	70				69,999			
E2 – E9	15				14,975			
Parallelität								
E1 – E2	0				0,043			
E2 – E9	0				0,022			