

Genauigkeitsanalyse photogrammetrischer 3D-Digitalisierung durch transparente Objektträger

Hartmut Clauß¹

Zusammenfassung

Die photogrammetrische 3D-Digitalisierung steht oft vor der Herausforderung, Objekte allseitig ohne Verdeckungen durch Haltevorrichtungen zu erfassen. Besonders bei fragilen Objekten, die ihre Form bei Lageänderung variieren, ist dies ein kritisches Problem, da eine mehrstufige Erfassung in unterschiedlichen Lagen unmöglich ist. Obwohl transparente Objektträger aus Glas eine Erfassung von der Unterseite ermöglichen, wirken sie als optisch aktive Bauteile: Sie verändern den Strahlengang und verursachen Abbildungsfehler in Geometrie und Textur, die mit herkömmlichen Kameramodellen algorithmisch nicht korrigierbar sind.

Diese Arbeit analysiert die Fehlereinflüsse systematisch und stellt den transparenten Objektträger des Systems „CYBERGLOBE“ vor. Es wird sowohl theoretisch als auch messtechnisch nachgewiesen, dass die spezielle Konstruktion auftretende Abbildungsfehler auf ein vernachlässigbares Maß reduziert.

Schlagwörter Photogrammetrie · Digitaler Zwilling · Strahlengang · Objektträger · CYBERGLOBE

1 Photogrammetrische 3D-Digitalisierung in der Praxis

Die praktische 3D-Digitalisierung von Objekten birgt eine Reihe anspruchsvoller Herausforderungen. Wird neben einer exakten Geometrie auch eine konservatorische Reproduktion der Texturen gefordert, dann ist häufig die photogrammetrische Digitalisierung das Mittel der Wahl. Für mobile Objekte haben sich dafür zwei grundlegende Anordnungen etabliert:

1. Das Objekt wird mit einem manuellen oder automatischen Drehtisch in verschiedenen Betrachtungswinkeln vor einer Kamera positioniert und somit ringsum bildgebend erfasst (horizontale Positionierung). Darüber hinaus wird die Kamera wiederum manuell oder automatisch in verschiedenen Höhen angeordnet (vertikale Positionierung), um auch vertikal wirkende Hinterschneidungen des Objektes zu digitalisieren (siehe Abbildung 1). Anstelle der vertikalen Kamerapositionierung können auch mehrere Kameras übereinander angeordnet sein, was vor allem Vorteile für die Aufnahmezeit bietet, allerdings auch den Nachteil birgt, dass jede Kamera ihre eigenen Kameraparameter (innere Orientierung) besitzt.



Abbildung 1 Automatischer Drehtisch mit manuellem Auslegerstativ zur photogrammetrischen 3D-Digitalisierung

2. Für eine maximale Effizienz der Bildaufnahme wird auf Bewegungen des Objektes und der Kamera gänzlich verzichtet und stattdessen für jede Bildposition eine separate Kamera verwendet (siehe Abbildung 2). Neben der kurzen Aufnahmezeit sind vor allem die konstanten und bekannten Orientierungen der Kameras (innere und äußere) für die spätere photogrammetrische Auswertung von großem Vorteil. Nachteilig ist allerdings der immense gerätetechnische Aufwand, wenn eine hohe

¹ Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH (CLAUSS), Turnhallenweg 5a, 08297 Zwönitz, Deutschland, <https://dr-clauss.de>

Detailierung feiner 3D-Strukturen gefordert wird. Beispielsweise werden 325 (!) halbsphärisch angeordnete Kameras benötigt, wenn ein Winkelraster von 10 ° realisiert werden soll.

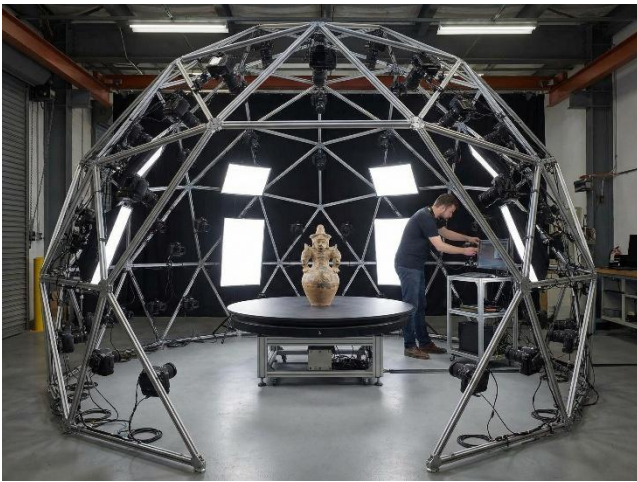


Abbildung 2 Gerätelösung mit sphärisch angeordneten Kameras (Symbolbild)

1.1 Allseitige Objektdigitalisierung

Die Erfassung eines Objektes aus allen Richtungen und die nahtlose und allseitige Erzeugung des digitalen Zwillings in einem Arbeitsgang ist mit den bekannten Anordnungen schwierig, denn Objektbereiche werden im Normalfall durch Haltevorrichtungen, zum Beispiel durch die Plattform zum Aufstellen des Objektes (Objektträger), verdeckt. Die übliche Vorgehensweise sieht in diesem Fall die 3D-Digitalisierung einzelner, durch Umlagern sichtbarer, Objektbereiche vor, die später halbautomatisch oder manuell zum Gesamtmodell vereinigt werden. Die Praxis zeigt dabei häufig, dass natürliche Merkmale des Objekts geometrisch nicht ausreichend genau zugeordnet werden können, um die einzelnen Objektbereiche mit hoher Genauigkeit zusammensetzen. Daher ist es im Allgemeinen unumgänglich und auch üblich, eindeutige und kontraststarke Marker in Form von Haftmarken oder Farbmarkierungen am Objekt anzubringen (siehe Abbildung 3).

Obwohl sich dieses Verfahren bewährt hat und gute Ergebnisse liefert, ist der hohe personelle Aufwand für die vielen manuellen und anspruchsvollen Arbeitsschritte problematisch. Darüber hinaus ist die Verwendung von Haftmarken und Farbmarkierungen für manche

Objektklassen nicht zulässig oder zumindest durch die Verdeckung der Textur nicht gewollt.

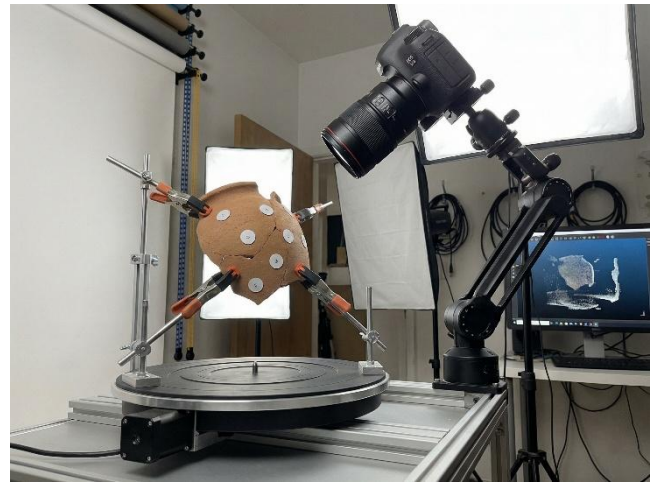


Abbildung 3 Photogrammetrische Erfassung einer Tonscherbe mit Haftmarkierungen (Symbolbild)

Ganz anders stellt sich die Problematik für fragile Objekte dar, die Teile ohne feste Lage oder Form aufweisen (siehe Abbildung 4). Objekte dieser Gattung können im Allgemeinen nicht umgelagert werden, ohne dabei die Geometrie zu verändern. Eine allseitige Digitalisierung durch die beschriebene Vereinigung einzelner Objektbereiche ist daher unmöglich.



Abbildung 4 Der Augsburger Religionsfriede, 1555 (© Österreichisches Staatsarchiv, Abteilung Haus-, Hof- und Staatsarchiv)

1.2 Transparente Objektträger

Ein naheliegender Ansatz, um Verdeckungen durch den Objektträger zu verhindern und so eine allseitige Digitalisierung in einem Arbeitsgang zu ermöglichen, ist es, den Objektträger transparent auszuführen. Dies hat den großen Vorteil, dass auch fragile Objekte von allen Seiten erfasst werden können.

Es gibt zahlreiche Versuche, die Digitalisierung mit einem Objektträger aus Glas durchzuführen (siehe Abbildung 5). Auch marktverfügbare Gerätelösungen mit diesem Merkmal sind vorhanden (vgl. Analyse in CLAUSS, 2024-1/2), beispielhaft wird in Abbildung 6 ein Produkt zum Zwecke einer allseitigen photogrammetrischen Objektdigitalisierung des Unternehmens „uni-Robot Ltd.“ dargestellt.



Abbildung 5 Digitalisierung mit Objektträger aus Glas (© Julius Fröbus GmbH)



Abbildung 6 Produkt "CASE 850" (© uni-Robot Ltd.)

2 Einflüsse der Glasplatte im Strahlengang

Alle bisher bekannten Lösungen, die einen transparenten Objektträger aufweisen, verwenden eine mehrere Millimeter starke Glasplatte, die bei Aufnahmen von unterhalb des Objektträgers als optisches Element im Strahlengang wirksam ist (vgl. Analyse in CLAUSS, 2024-1/2). Die vielfältigen Einflüsse dieser Glasplatte werden im Folgenden näher betrachtet und bewertet.

2.1 Farbveränderung

Ein wesentlicher Vorzug der photogrammetrischen Objektdigitalisierung ist die hochwertige bildgebende Erfassung der Texturen. Für konservatorische Zwecke ist es sogar üblich, die systemische Farbwiedergabe mit Referenzfarbtafeln zu kalibrieren.

Wird nun eine Glasplatte in den Strahlengang der Kamera eingefügt, verändert das Transmissionsspektrum des verwendeten Glases folgerichtig die Farbwiedergabe (siehe Abbildung 7).

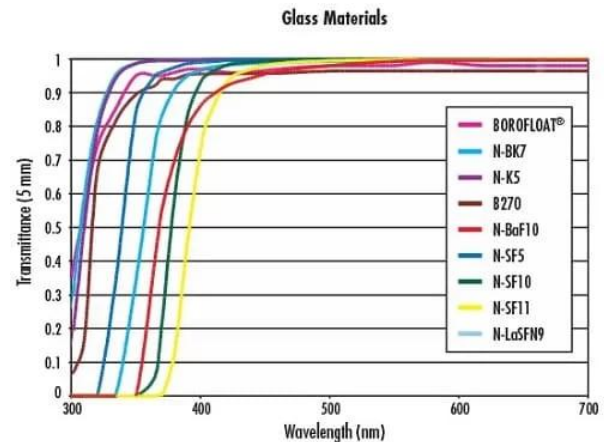


Abbildung 7 Transmissionsspektrum ausgewählter Gläser (© Edmund Optics BV)

Ein praktischer Versuch mit 6 mm starkem Floatglas zeigte, dass eine messbare Farbveränderung durch das Glas im Strahlengang eintritt. Beispielsweise verschiebt sich der Weißpunkt RGB:242|242|242 bzw. xy:0,332424|0,347426 auf RGB:236|238|237 bzw. xy:0,331856|0,347915 (siehe Abbildung 8). Die Einflüsse des Floatglases fallen gemäß Transmissionsspektrum erwartungsgemäß moderat aus, müssen aber dennoch behandelt werden.

In der Praxis wird für die Aufnahmen durch die Glasplatte ein anderes Kalibrierprofil verwendet und der Einfluss dadurch ausgeglichen.

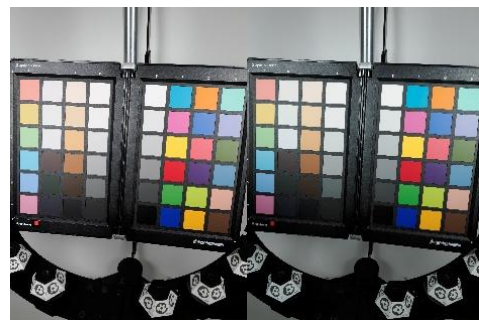


Abbildung 8 Farbveränderung durch Einfügen einer Glasplatte aus Floatglas

2.2 Reflexion

Bekanntermaßen kommt es an jeder optischen Grenzfläche zu Reflexionen. Dies geschieht sowohl beim Übergang in optisch dichtere (Luft-Glas), als auch in optisch dünnere Medien (Glas-Luft). Wird eine Glasplatte in den Strahlengang eingefügt, werden damit an jeder Grenzfläche ca. 10 Prozent der Lichtstrahlen reflektiert, wodurch es zu einer Mehrfachreflexion kommt, die sich als unscharfe Reflexionsabbildungen bemerkbar macht (siehe Abbildung 9). Bei einem Reflexionsgrad von 10 % besitzt die Reflexion 2. Ordnung noch etwa 8 % der Helligkeit, die Reflexion 3. Ordnung aber nur noch 0,08 %. Die Reflexionen höherer Ordnungen spielen daher in der Praxis keine Rolle.

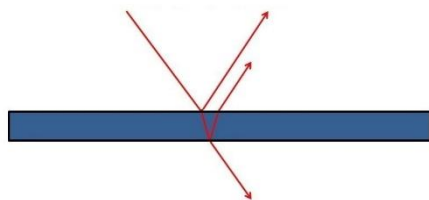


Abbildung 9 Schematische Darstellung der mehrfachen Reflexion an einer Glasplatte, beschränkt auf die Reflexionen erster und zweiter Ordnung

Ein praktischer Versuch mit 6 mm starkem Floatglas zeigte den Unterschied zwischen der Bildgebung ohne (siehe Abbildung 10, links) und mit eingefügter Glasplatte (siehe Abbildung 10, Mitte), besonders deutlich in der Vergrößerung (siehe Abbildung 10, kleine Bilder).

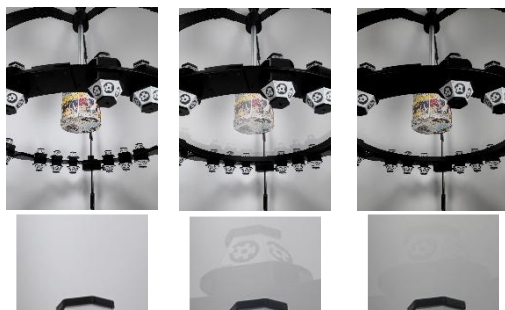


Abbildung 10 Praxisversuch Reflexion, links ohne Glasplatte, Mitte mit Glasplatte, rechts mit Glasplatte und Polarisationsfilter

Das Mittel der Wahl, um Reflexionen an Glasflächen teilweise auszublenden, ist die Verwendung eines Polarisationsfilters, da die Reflexion stets zu einer Teilpolarisation des Lichts führt. Im Sonderfall gemäß Brewsterschem Gesetz wird die Reflexion sogar vollständig polarisiert. In der Abbildung 10 rechts ist der Effekt des Polarisationsfilters vor der Kamera dargestellt. Ein

vollständiges Ausblenden der Reflexionen ist auf diese Weise nicht möglich. Für die Digitalisierung sind die verbleibenden Reflexionsbilder aber beherrschbar, da sie durch die Objekt- und Kamerabewegung nicht ortsfest auftreten und damit während der digitalen Bildverarbeitung gut zu filtern sind.

2.3 Brechung

Wird eine Glasplatte in einen optischen Strahlengang eingebracht, findet entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik an beiden Grenzflächen zwischen Glas und Luft eine Brechung des hindurchtretenden Lichtstrahls statt. Man spricht in diesem Fall von einer Doppelbrechung, die eine Verschiebung des einfallenden Lichtstrahls bewirkt (siehe Abbildung 9).

Das Modell des einzelnen, doppelt gebrochenen Lichtstrahls gibt allerdings noch keine Auskunft über die Gesetzmäßigkeiten, die für einen bildgebenden Strahlengang gelten. Um diese zu ermitteln, wird das Modell (vgl. Zentralperspektive) um einen Objektpunkt (O) und ein Projektionszentrum (K) erweitert (siehe Abbildung 11 sowie Tabelle 1), durch die die Strahlen, ungeachtet ihrer Ablenkung dazwischen, verlaufen müssen. Gesucht wird im vorliegenden Fall der Zusammenhang zwischen dem Strahlwinkel ohne Glasplatte (α) und dem Strahlwinkel (β), der durch die Wirkung der Doppelbrechung resultiert um den real auftretenden Strahlwinkel (β) auf den optimalen Strahlwinkel (α) zurückführen zu können.

Tabelle 1 Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
K	Projektionszentrum der Kamera
O	Objektpunkt
c	Abstand zwischen K und Glas
d	Dicke der Glasplatte
g	Abstand zwischen O und Glas
q	Abstand K-O parallel zum Glas
q ₁	Teil von q bei Brechung, kameraseitig
q ₂	Teil von q bei Brechung, im Glas
q ₃	Teil von q bei Brechung, objektseitig
n	Brechungsindex Glas ($n_{\text{Luft}} = 1$)
α	Strahlwinkel ohne Glasplatte
β	Strahlwinkel mit Glasplatte
γ	Strahlwinkel innerhalb der Glasplatte

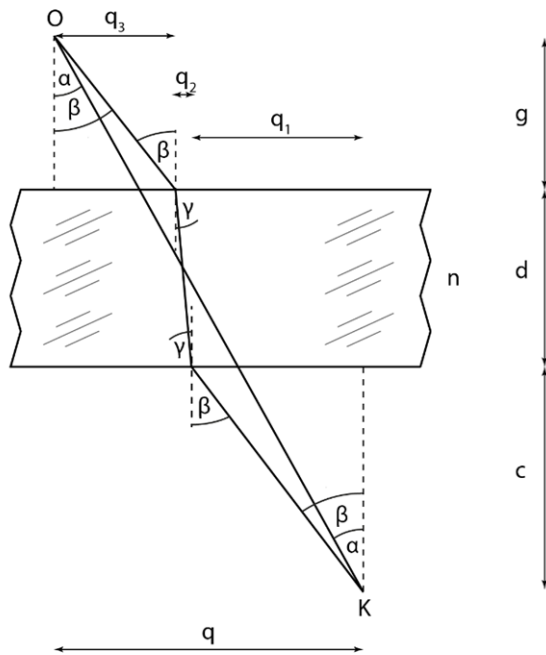


Abbildung 11 Die geometrischen Zusammenhänge der Doppelbrechung

Grundlegende Zusammenhänge:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 ; n = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} ; \tan \alpha = \frac{q}{c + d + g}$$

Mit den Beziehungen

$$\tan \beta = \frac{q_1}{c} ; \tan \gamma = \frac{q_2}{d} ; \tan \beta = \frac{q_3}{g}$$

gilt:

$$\tan \alpha = \frac{\tan \beta (c + g)}{c + d + g} + \frac{\tan \gamma \cdot d}{c + d + g}$$

Brechungsgesetz:

$$\tan \gamma = \tan \left[\sin^{-1} \frac{\sin \beta}{n} \right] = \frac{\sin \beta}{\sqrt{(\sin \beta + n)(n - \sin \beta)}}$$

Ergebnis:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\tan \beta (c + g)}{c + d + g} + \frac{\sin \beta \cdot d}{(c + d + g) \sqrt{(\sin \beta + n)(n - \sin \beta)}} \right]$$

Die Betrachtung führt zu dem eindeutigen Ergebnis, dass die Berechnung des korrigierten Strahlwinkels (α) nur mit Kenntnis des Abstands zwischen Glasoberfläche und Objektpunkt (g) möglich ist. Da dies im Grunde aber genau die Größe ist, die durch die photogrammetrische Auswertung bestimmt werden soll, ist eine direkte Korrektur der Doppelbrechung ausgeschlossen.

2.3.1 Berechnung der Brechungsfehler

Unter Verwendung der Ergebnisse von 2.3 kann eine beispielhafte Berechnung der Abbildungsfehler erfolgen. Dazu werden die in Tabelle 2 angegebenen praxisüblichen Konstanten angenommen.

Tabelle 2 Verwendete Konstanten

Formelzeichen	Konstanter Wert
n	1,5
d	6 mm
c	350 mm
β	45 °
f	15 mm (Brennweite der Kamera)
p	2 μ m (Pixelpitch des Kamerasensors)

Setzt man die gegebenen Werte in die Gleichung unter 2.3 ein, erhält man den korrigierten Strahlwinkel (α) in Abhängigkeit vom Objektstand (g). Gemäß Zentralprojektion ist unter Verwendung der Brennweite (f) und des Pixelpitches der Kamera (p) daraus ein Pixelfehler ableitbar. Das Ergebnis der Beispielrechnung ist in Abbildung 12 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der zu erwartende Abbildungsfehler bei einer Objekthöhe von nur 10 mm etwa 1 Pixel und bei 200 mm bereits 10 Pixel beträgt.

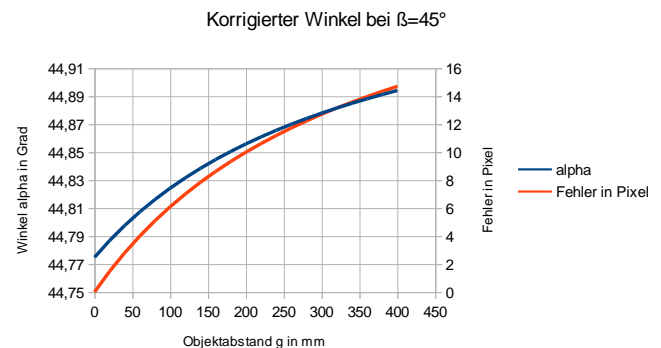


Abbildung 11 Korrigierter Strahlwinkel und Pixelfehler in Abhängigkeit vom Objektstand (Glasplatte)

Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein zylindrischer Probekörper mit 100 mm Höhe aufgenommen und in Abbildung 13 dargestellt. Links der Körper ohne Glasplatte, mittig mit Glasplatte, sowie rechts vergrößert bei $g = 100$ mm. Der vorab berechnete Pixelfehler von etwa 6 Pixel konnte experimentell nachgewiesen werden und ist auch gut erkennbar.



Abbildung 13 Probeaufnahme zum Nachweis der berechneten Pixelfehler (mit Glasplatte)

2.3.2 Korrektur über die Kamerakalibrierung

Es stellt sich die Frage, ob die durch die Doppelbrechung hervorgerufenen Abbildungsfehler mit einer hohen Anzahl von Verknüpfungspunkten für jede Kameraposition individuell korrigierbar sind. Dazu betrachten wir das in der Photogrammetrie übliche Brown-Conrady-Modell zur Beschreibung der Abbildungsgeometrie bzw. der Verzeichnungen:

$$\begin{aligned}x_u &= x_d + (x_d - x_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_1(r^2 + 2(x_d - x_c)^2) \\ &\quad + 2P_2(x_d - x_c)(y_d - y_c))(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 \dots) \\ y_u &= y_d + (y_d - y_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (2P_1(x_d - x_c)(y_d - y_c) \\ &\quad + P_2(r^2 + 2(y_d - y_c)^2))(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 \dots),\end{aligned}$$

mit

(x_u, y_u) – unverzerrte Bildpunkt, wie er von einer idealen Lochkamera projiziert wird,

(x_d, y_d) – verzerrte Bildpunkt, wie er auf der Bildebene mit einer bestimmten Linse projiziert wird,

K_n – n-te radiale Verzerrungskoeffizient

P_n – n-te tangentielle Verzerrungskoeffizient und

$r = \sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}$ – euklidischer Abstand zwischen verzerrtem Bildpunkt und dem Verzerrungszentrum

Bei näherer Betrachtung der Verzeichnungs-gleichungen wird klar, dass zwar radiale und tangentielle, nicht aber Objektpunkt-diskrete Verzerrungen modelliert werden können. Bei Objekten mit stetigen, eher flachen Konturen kann der Abbildungsfehler mit Hilfe dieser Gleichungen und günstiger Koeffizienten zwar verringert ausfallen, eine echte Korrektur der Brechungseffekte ist mit den üblichen Kameramodellen aber nicht möglich.

3 Umfassende Gerätelösung CYBERGLOBE

Die Kombination unzähliger Details, die den vielfältigen Herausforderungen einer guten photogrammetrischen Objektdigitalisierung Rechnung tragen, führten zur umfassenden Gerätelösung CYBERGLOBE.

Der CYBERGLOBE ist ein photogrammetrisch arbeitendes Komplettsystem, bestehend aus Objekts scanner und Verarbeitungs-Software. Beliebige, bis etwa fußballgroße Objekte werden auf den eigens entwickelten transparenten Objektträger gelegt und aus allen Richtungen, auch von der Unterseite, in einem Arbeitsgang in automatischer Folge erfasst. Die integrierte Systembeleuchtung garantiert eine praktisch schattenfreie, konservatorische Ausleuchtung und eine fotorealistische, farbkalibrierte Texturqualität. Die Verarbeitungs-Software verrechnet die aufgenommenen Einzelbilder automatisch im Batchbetrieb sowohl zum texturierten 3D-Modell wie auch zum Gaussian Splat.



Abbildung 14 Der Objekts scanner CYBERGLOBE

3.1 Der transparente Objektträger des CYBERGLOBE

Eine wesentliche Kernkomponente des CYBERGLOBE ist sein transparenter Objektträger, der dank seiner speziellen Konstruktion ganz gezielt Verzerrungen durch Brechungseffekte vermeidet. Er besteht aus einer speziellen nur 0,12 mm dicken, beidseitig polierten Kunststoffolie mit

einem reduzierten Brechungsindex von $n = 1,3$. Die Folie ist außerdem hoch transluzent ($> 95\%$), besitzt im sichtbaren Wellenlängenbereich ein neutrales Transmissionsspektrum und ist schlierenfrei. Die kratz- und reisefeste Folie wird so stark radial vorgespannt, dass sie eine flächige Tragfähigkeit von 20 kg erreicht. Abgerundet werden die hervorragenden Eigenschaften durch die antistatische Rezeptur und die ausgezeichnete chemische Beständigkeit, wobei die Folie selbst chemisch neutral und frei von sog. Weichmachern ist.

3.1.1 Farbveränderung und Reflexion

Der Praxistest zeigt keine messbaren Abweichungen beim Vermessen der Referenzfarbkarten. Der Weißpunkt (RGB) verschiebt sich von 242|242|242 bzw. $xy:0,332424|0,347426$ zu 237|237|237 bzw. $xy:0,332424|0,347426$, wird daher nur etwas dunkler, bleibt aber farbneutral (siehe Abbildung 15).

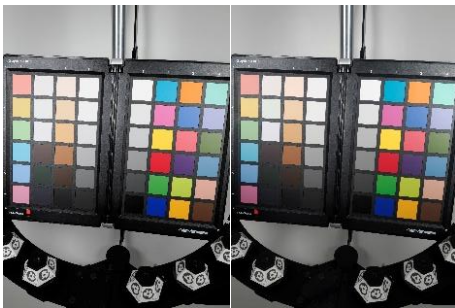


Abbildung 15 Farbveränderung durch Einfügen des CYBERGLOBE Objektträgers

Bei der Reflexion verhält sich der Objektträger exakt wie die Glasoberfläche (siehe 2.2), wobei die Verschiebung der Reflexion 2. Ordnung durch die geringe Dicke der Folie sehr gering ausfällt und dadurch im Bild nicht mehr registrierbar ist. Die Ausblendung der Reflexion mit einem Polarisationsfilter vor der Kamera funktioniert analog zur Glasoberfläche gut.

3.1.2 Doppelbrechung am Objektträger

Analog zu den Betrachtungen unter 2.3 und 2.3.1 wird der Abbildungsfehler beispielhaft berechnet. Dabei kommt die Dicke der Folie mit $d = 0,12\text{ mm}$ und der Brechungsindex $n = 1,3$ zur Anwendung.

Das Ergebnis der Beispielrechnung ist in Abbildung 16 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der zu erwartende Abbildungsfehler bei einer Objekthöhe von 400 mm lediglich 0,23 Pixel beträgt und damit vernachlässigt werden kann.

Zur Validierung der Ergebnisse wurde wiederholt der zylindrische Probekörper mit 100 mm Höhe aufgenommen

und in Abbildung 17 dargestellt: Links der Körper ohne Objektträger, daneben mit Objektträger, sowie von beiden Bildern eine Vergrößerung bei $g = 100\text{ mm}$. Bei Verwendung des CYBERGLOBE-Objektträgers kann experimentell kein Abbildungsfehler nachgewiesen werden.

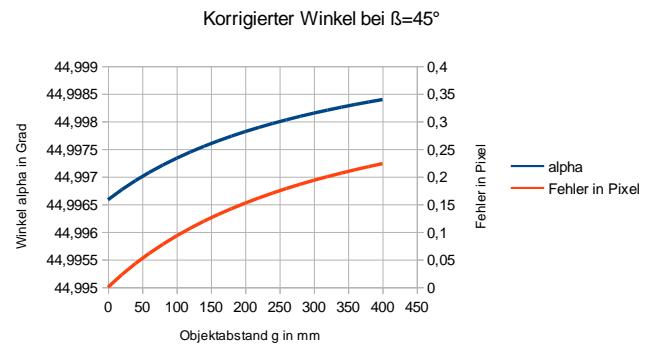


Abbildung 16 Korrigierter Strahlwinkel und Pixelfehler in Abhängigkeit vom Objektabstand (CYBERGLOBE-Objektträger)

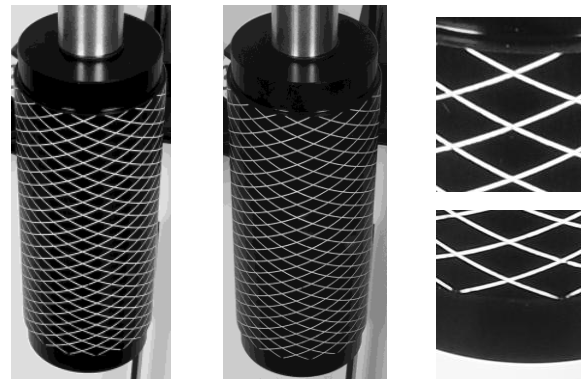


Abbildung 17 Probeaufnahme zum Nachweis der berechneten Pixelfehler (CYBERGLOBE-Objektträger)

3.2 Genauigkeitsuntersuchungen nach VDI/VDE 2634 Blatt 3

Abschließend wurden die ausgeführten theoretischen und praktischen Betrachtungen zum Objektträger des CYBERGLOBE einer normgerechten Prüfung unterzogen, um die Genauigkeit des photogrammetrischen Gesamtsystem nachzuweisen. Gemäß VDI/VDE 2634 Bl. 3 kommen dazu im Messvolumen verteilte Prüfkörper vorgegebener Geometrie zum Einsatz (siehe Abbildung 18). Stellvertretend für die Vielzahl der eingesetzten Prüfkörper wird die Betrachtung an dieser Stelle nur an einem Beispiel vorgenommen. Die realen Geometriemaße sind:

$$D_{P1} = 47,918\text{ mm}$$

$$D_{P2} = 47,923\text{ mm}$$

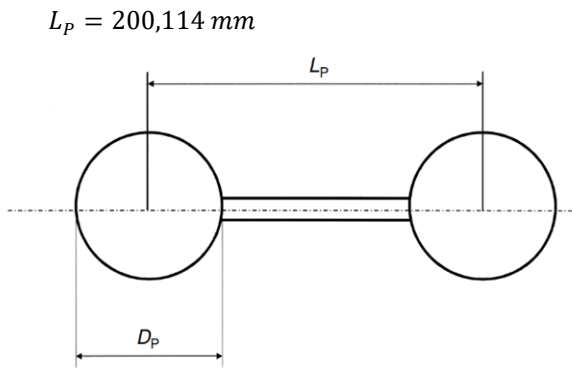


Abbildung 18 Prüfkörper nach VDI/VDE 2634

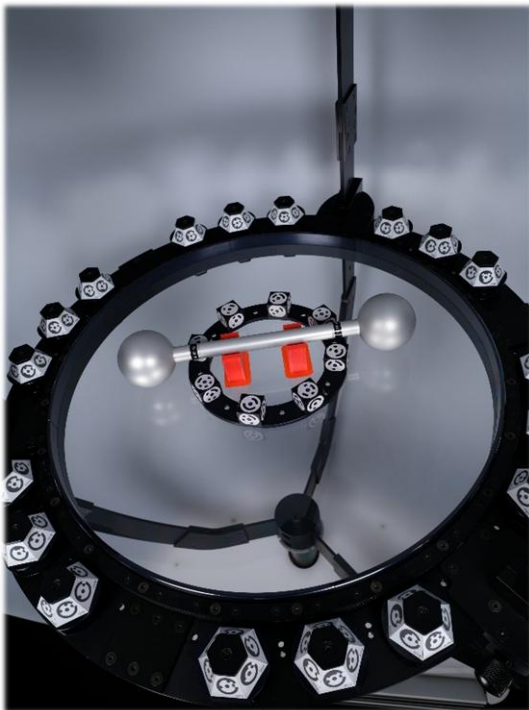


Abbildung 1 Prüfanordnung mit einem Prüfkörper

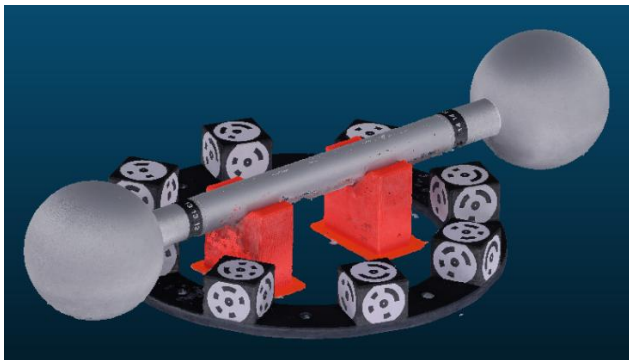


Abbildung 20 Mit CYBERGLOBE erstelltes 3D-Modell

Der Prüfkörper wird in der Prüfanordnung gemäß Abbildung 19 photogrammetrisch digitalisiert. Das erzeugte 3D-Modell ist in Abbildung 20 dargestellt.

Entsprechend der Vorgaben aus der VDI/VDE 2634 werden Kugelparameter in die Messwerte des Prüfkörpers eingepasst, um die Standardabweichung der Messwerte zu bestimmen und die gemessenen Längen und Durchmesser zu erhalten.

Messwerte:

$$D_{P1} = 47,931 \text{ mm} ; \sigma = 0,033 \text{ mm}$$

$$D_{P2} = 47,954 \text{ mm} ; \sigma = 0,037 \text{ mm}$$

$$L_p = 200,137 \text{ mm}$$

Die normgerechte Messung bestätigt die vorausgegangenen Betrachtungen. Der CYBERGLOBE erzeugt mit seinem speziellen Objektträger 3D-Modelle mit nachgewiesener hoher Genauigkeit.

4 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zur photogrammetrischen 3D-Digitalisierung durch transparente Objektträger kommen zum eindeutigen Ergebnis, dass alle Geräte und Systeme, die mit einer Glasplatte als Objektträger im Strahlengang arbeiten, unausweichliche Abbildungsfehler erzeugen, die sich zwangsläufig auf die Reproduktionsgenauigkeit auswirken.

Es wurde sowohl theoretisch wie auch praktisch nachgewiesen, dass die spezielle Bauart des CYBERGLOBE-Objektträgers diese Abbildungsfehler auf ein vernachlässigbares Maß reduziert und dadurch eine ausgezeichnete Reproduktionsgenauigkeit erreicht.

Die optischen und mechanischen Eigenschaften des CYBERGLOBE-Objektträgers sind durch die spezielle Konstruktion denen einer Glasplatte deutlich überlegen.

Der transparente Objektträger des CYBERGLOBE ist damit das einzige bekannte System, das eine allseitige 3D-Digitalisierung ohne systematische Abbildungsfehler durch Brechungseffekte erlaubt.

Literaturverzeichnis

- Clauss (2024-1). Vorrichtung für die automatisierte photogrammetrische Objektaufnahme, Deutsche Patentanmeldung, DE 10 2024 001 465
- Clauss (2024-2). Objekthalter für die optische Objekterfassung, Deutsche Patentanmeldung, DE 10 2024 002 716
- VDI/VDE e.V. (Hrsg.) (VDI/VDE 2634 Bl. 3:2008). Optische 3-D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten