

DOI: [10.22032/dbt.39604](https://doi.org/10.22032/dbt.39604)

Rückwärtsschnitt zur geometrischen Kalibrierung einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochauflösende Lichtstärkeverteilungen

Jan Feßler*; Markus Katona; Klaus Trampert; Cornelius Neumann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Engesserstraße 13, Geb.: 30.34, 76131 Karlsruhe

*: jan.fessler@kit.edu, +49 721 608 47383, lti.kit.edu

Zusammenfassung

Für die Bestimmung von hochaufgelösten Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) mittels kamerabasierter Goniometermesstechnik ist eine geometrische Kalibrierung notwendig. Diese stellt den räumlichen Zusammenhang zwischen den einzelnen Komponenten des Messsystems bestehend aus Kamera, Goniometer und einem weißen Schirm her.

Zur Bestimmung der geometrischen Kalibrierung wird im Folgenden mithilfe eines photogrammetrischen Verfahrens die Pose einer Kamera im Raum geschätzt. Hierfür werden geometrisch bekannte Objektpunkte sowie deren Bildpunkte in der Abbildung durch eine Messkamera, welche durch das Lochkameramodell beschrieben wird. Des Weiteren werden die intrinsischen Parameter der Kamera benötigt. Die Berechnung beruht auf den Kollinearitätsgleichungen, welche einen mathematischen Zusammenhang zwischen Punktepaaren und der Kamerapose, zusammengesetzt aus Translation und Rotation, herstellen.

Bei der folgenden Validierung des Kalibrieransatzes nimmt eine Kamera die Position der Lichtquelle ein, um so Aussagen über die Anwendbarkeit des Ansatzes treffen zu können.

1 Einleitung

Der Einsatz spezialisierter Leuchten findet immer weitere Verbreitung. Zur Überprüfung der gewünschten Lichtfunktion werden diese Leuchten mithilfe von Goniophotometersystemen hinsichtlich ihres Abstrahlverhaltens vermessen. Die Lichtstärke I gibt die richtungsabhängige Intensitätsverteilung der Lichtquelle wieder. Voraussetzung dafür ist eine Punktlichtquelle. Daher muss in großer Entfernung gemessen werden, um diese Bedingung zu erfüllen. Je nach gewünschter Auflösung, also Anzahl der einzelnen Messpunkte, dauert eine Messung bis zu mehreren Stunden.

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, Deutschland.



This is an **Open Access** article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike-4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

In einem anderen Ansatz zur Bestimmung einer LVK ersetzt ein Schirm das Photometer, welches als einpixeliges Messgerät die Messpunkte nur seriell abarbeiten kann [1]. Hier wird der Schirm durch das zu vermessende Objekt (engl. *device-under-test* DUT) beleuchtet und gleichzeitig von einer Leuchtdichtkamera betrachtet. Dadurch erfasst jeder Pixel der Kamera einen Teil des Schirms, welcher einer Raumrichtung bezogen auf das DUT entspricht. Dies vervielfacht die Anzahl der Messpunkte pro Einstellung und verkürzt so deutlich die Dauer bei gleichzeitig höherer Auflösung. Mithilfe eines Goniometers kann auch hier die durch Mehrfachaufnahmen und einem anschließenden *image merging*-Prozess die Vollraum-LVK zusammengesetzt werden. Allerdings führt die Bestimmung der Lichtstärke über die Schirmfläche ohne eine präzise Zuordnung zwischen Kamerapixel und Raumwinkel zu einer geometrischen Unsicherheit, wodurch das Zusammenfügen von Teilsegmenten der LVK zu sichtbaren Sprüngen an den Rändern der Aufnahmen führt [2, pp. 154-155].

In diesem Beitrag wird ein Teil der geometrischen Kalibrierung eines solchen Messraums vorgestellt. Dafür wird eine aus der Photogrammetrie bekannte Lösungsstrategie auf das kamerabasierte Goniometermesssystem angewandt. Die eingesetzte Methode ist als räumlicher Rückwärtsschnitt bekannt und berechnet die Position und Lage, kurz Pose, einer Kamera im Raum über die Korrespondenz von bekannten Objektpunkten und deren Abbildung in der dazugehörigen Aufnahme. Die Kamera wird hierbei durch eine Lochkamera modelliert. Für die geometrische Kalibrierung wird das System zunächst in die Teilsysteme Schirm zu Kamera und Schirm zu DUT aufgespalten. Das Teilsystem Schirm zu Kamera dient als erster Test für den Algorithmus in der spezifischen Anwendung und als Grundlage für Zuordnung der Raumwinkel der Kamera auf dem Schirm, während das zweite Teilsystem zwischen Schirm und DUT bzw. Goniometerdrehzentrum für eine präzisere Berechnung der Lichtstärke benötigt wird.

Im Nachfolgenden erfolgt zuerst eine Erläuterung der Kollinearitätsgleichungen und des Rückwärtsschnitts. Anschließend wird das entsprechende Goniometersystem am LTI vorgestellt und der implementierte photogrammetrische Algorithmus angewandt, um die Zuordnung von Winkelbereichen auf dem Schirm zu Kamerapixel zu finden. Des Weiteren wird durch die Montage einer zweiten Kamera an der Position des Messobjekts die Methode validiert. Hierfür wird das Goniometer entlang der Achsen verfahren und zu der jeweiligen Schrittweite eine Pose bestimmt. In weiterführenden Untersuchungen soll ebenfalls eine Kamera auf dem Goniometer bewegt werden um so die Lage zwischen Goniometerdrehzentrum und Schirm bestimmen zu können.

2 Photogrammetrische Grundlagen

Zur Bestimmung der Kamerapose werden geometrische Informationen aus Realpunkten mit deren Abbildungen verknüpft. Diese Verknüpfung geschieht unter der Annahme von Kollinearität.

Hierfür werden zuerst die Orientierungen von Kamerasystemen erläutert. Darauf folgen allgemeine Definitionen über die Relationen von Koordinatensystemen für die folgenden kollinearen Abbildungen. Abschließend wird der Rückwärtsschnitt zur Bestimmung der äußeren Kameraorientierung, auch Kamerapose genannt erklärt.

2.1 Orientierungen der Kamera

Zum besseren mathematischen Umgang werden die verschiedenen Kameraparameter in äußerer und innerer Orientierung unterschieden, die zum einen die globale Lage und zum anderen die intrinsische Charakterisierung der Kamera beschreibt.

2.1.1 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung entspricht der Kamerapose. Diese wird durch drei Positionsvariablen X , Y und Z und drei Rotationen ω , φ und κ bestimmt. Die Darstellung der äußeren Orientierung erfolgt in der Regel durch einen Vektor der zuerst die Translation und anschließend die Rotation enthält.

2.1.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung gibt Aufschluss über die optisch relevanten Parameter der Kamera. Diese umfassen die Kamerakonstante c bzw. die Brennweite f und die Lage des Bildhauptpunktes der Kamera, beschrieben durch die Bildkoordinaten x_0 und y_0 .

2.2 Abbildungen

Die benötigten geometrischen Informationen werden über Koordinaten realer Punkte von markanten Objekten der Berechnung zugeführt. Im Folgenden werden diese Koordinaten als Objektkoordinaten $[X, Y, Z]$ bezeichnet. Gleichzeitig erfolgt die Lokalisierung derselben Punkte in der Aufnahme, den Bildkoordinaten $[x, y]$. Dadurch ergeben sich eindeutige Zusammenhänge zwischen Abbildung und Objekt. Ein mögliches Gesamtsystem ist in Abbildung 2.1: Abbildungssystem mit untergeordnetem Koordinatensystem in Rot. \vec{X}_0 entspricht dem Translationsvektor und f der Brennweite. gezeigt. Hierbei entspricht das untergeordnete System der Kamera. Dieses kann beliebig im übergeordneten Koordinatensystem gedreht und verschoben sein. Bezogen auf eine Kamera entspricht dies der Kamerapose, welche sich aus einer Translation und einer Blickrichtung (Rotation) ergibt. Grundlage hierfür ist die Zentralprojektion, bei welcher alle Strahlen einen gemeinsamen Schnittpunkt, das Projektionszentrum genannt, haben [3, p. 244]. Dieses Projektionszentrum ist in Abbildung 2.1: Abbildungssystem mit untergeordnetem Koordinatensystem in Rot. \vec{X}_0 entspricht dem Translationsvektor und f der Brennweite. durch den Ursprung des roten Unterkoordinatensystem dargestellt.

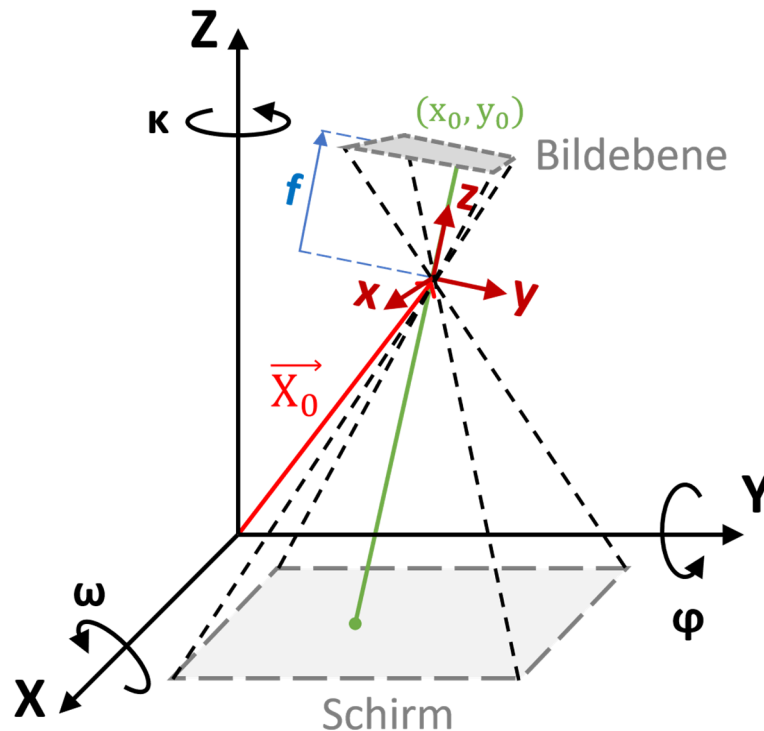


Abbildung 2.1: Abbildungssystem mit untergeordnetem Koordinatensystem in Rot. \vec{X}_0 entspricht dem Translationsvektor und f der Brennweite. x_0 und y_0 stellen Bildkoordinaten dar.

Grundlegend für die Abbildung durch die Zentralprojektion ist der Strahlensatz, der die Koordinaten von Punkten entlang eines Strahls beschreibt. Im zweidimensionalen lässt sich dieser Zusammenhang über die Koordinaten a und b mit

$$\left| \frac{a_1}{a_2} \right| = \left| \frac{b_1}{b_2} \right| \quad (2.1)$$

beschreiben. Dies ermöglicht die Formulierung von geometrischen Zusammenhängen, zwischen einem Punkt in einer Aufnahme und einem Punkt im reellen Raum.

2.3 Transformation von Koordinatensystemen

Die Transformationen zwischen zwei Koordinatensystemen wird durch eine Translation und eine Rotation beschrieben. Dies ermöglicht die Darstellung derselben Punkte in unterschiedlichen Koordinatensystemen.

Die räumliche Drehung wird durch eine Rotationsmatrix beschrieben. Diese besteht aus einer Multiplikation der drei Einzelrotationen ω um die X-Achse, φ um die Y-Achse und κ um die Z-Achse. Die Einzelrotationen ergeben sich wie folgt [3, p. 219]:

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}, R_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}, R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Die Drehreihenfolge ω , φ , κ entspricht der entgegengesetzten Leserichtung und damit:

$$\mathbf{R}_{Ges} = \mathbf{R}_{\kappa} \cdot \mathbf{R}_{\varphi} \cdot \mathbf{R}_{\omega} \quad (2.3)$$

Für die Überführung in ein anderes Koordinatensystem wird zusätzlich eine Translation \vec{X}_0 benötigt. Ein zusätzlicher Maßstabsfaktor m_B beschreibt die Streckung des Bildes welche durch die Abbildung zwischen Bild und Objekt entsteht. Daraus folgt die Gesamtgleichung:

$$\vec{X}_{neu} = \vec{X}_0 + m_B \cdot \mathbf{R} \cdot \vec{X}_{alt} \quad (2.4)$$

Ist eine bekannte Kamera gegeben, so können mithilfe des gegebenen Mittelpixels $[x_0, y_0]$ und Pose der Kamera die Objektpunkte in Bildpunkte umgerechnet werden. Der Vergrößerungsfaktor ergibt sich über die Brennweite der Kamera, da $f \approx -z$ [4, p. 144].

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{m_B} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Für die Rotationsmatrix gilt $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.

2.4 Kollinearitätsgleichungen

Die Kollinearitätsgleichungen beschreiben die Berechnung von Bildpunkten aus Objektpunkten und umgekehrt. Aufgrund der grundlegenden Beschreibung von Abbildungen sind aus diesen Gleichungen verschiedene Methoden zur Berechnung von Posen, weiteren Punktkorrespondenzen und Mehrbildverfahren entstanden.

Um die Kollinearitätsgleichungen zu erhalten, werden die beiden ersten Zeilen aus Gleichung (2.5) durch die Dritte geteilt. Dadurch entfällt der Maßstabsfaktor m_B [4, p. 240]. Umgeformt nach den Bildkoordinaten ergeben sich die Kollinearitätsgleichungen:

$$x = x_0 + z \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.6)$$

$$y = y_0 + z \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.7)$$

Auf diesen Gleichungen basiert der verwendete Rückwärtsschnitt. Sie sind die Grundgleichungen der Photogrammetrie, da auf ihnen ebenfalls der Vorwärtsschnitt und die Bündeltriangulation beruhen [4, p. 244].

Sie stellen außerdem den einfachsten Zusammenhang linearer Abbildungen im geometrischen Sinn dar, in welchem sie durch die Positionen von Projektionszentrum und Objektpunkten die direkte Bestimmung von Bildkoordinaten ermöglichen.

2.5 Rückwärtsschnitt zur Posenfindung

Im Allgemeinen berechnet der Rückwärtsschnitt bei Eingabe einer hinreichenden Anzahl an Punkten eine Pose mit minimaler Abweichung der Bildkoordinaten, welche aus der Pose bestimmt wurden, zu den gegebenen Bildpunkten. Diese liegen zwischen drei, wenn die innere Orientierung bekannt ist, und fünf Punkten, falls die innere Orientierung mitgeschätzt werden soll.

Für die Berechnung des Rückwärtsschnitts werden die Kollinearitätsgleichungen über eine Taylorentwicklung linearisiert und mithilfe eines Least-Squares-Schätzers ein Poseninkremental berechnet, welches auf eine Initialpose beaufschlagt wird, um so eine verbesserte Pose zu berechnen. Dieses Vorgehen wiederholt sich bis ein vorgegebenes Konvergenzkriterium erfüllt ist.

Der Least-Square-Schätzer minimiert den Bildpunktfehler anhand des Poseninkrementals auf Basis der folgenden Gleichungen [4, p. 243]:

$$vx = \left(\frac{\partial x}{\partial X_0}\right) dX_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial Y_0}\right) dY_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial Z_0}\right) dZ_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \omega_0}\right) d\omega_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi_0}\right) d\varphi_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \kappa_0}\right) d\kappa_0 - (x - x_K) \quad (2.8)$$

$$vy = \left(\frac{\partial y}{\partial X_0}\right) dX_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_0}\right) dY_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial Z_0}\right) dZ_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \omega_0}\right) d\omega_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi_0}\right) d\varphi_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \kappa_0}\right) d\kappa_0 - (y - y_K) \quad (2.9)$$

Die verwendete Realisierung des Rückwärtsschnitts entspricht der von Bashar Alsadik bereitgestellten Funktion im *MathWorks file exchange* [5].

3 Vorstellung des Messsystems

Das System des LTI besteht aus einem 5-Achsen-Goniometer, einem weißen Schirm, sowie einer Leuchtdichtemesskamera LMK 5-1 Color, welche am Goniometerkorpus montiert ist. Eine zugehörige 2D Skizze ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

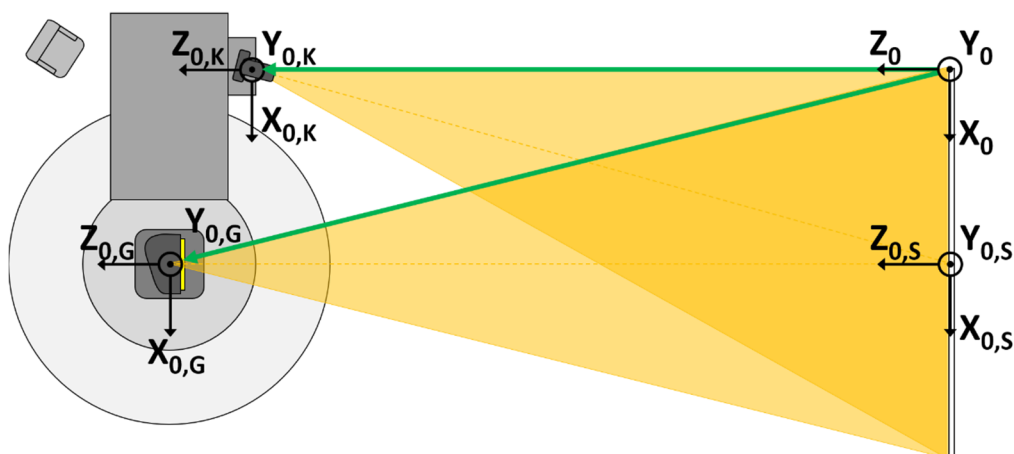


Abbildung 3.1: Skizze des Gesamtsystems mit den zugehörigen Koordinatensystemen

Die abgebildeten Koordinatensysteme sind dem jeweiligen Element zugeordnet. Der globale Ursprung ist dabei an der oberen linken Ecke des Schirms verortet und mit dem Index „0“ gekennzeichnet. Die weiteren Indizes sind „0,S“ für Schirm in der Schirmmitte, „0,G“ für Goniometer im Drehzentrum des Goniometers und „0,K“ für Kamera im Projektionszentrum der Kamera. Die grünen Pfeile stellen die zu bestimmenden Posen dar.

Die Objektpunkte werden durch Marker am Schirm verkörpert. Diese bestehen für die ersten geometrischen Kalibrierungsversuche aus Papier und sind händisch montiert und vermessen. Die Mittelpunkte der Kreise sind auf die Ecken bzw. Kanten des Schirms ausgerichtet. Mittels Kreisdetektion werden die zugehörigen Bildpunkte gefunden. Der Schirm misst 3 m x 1,8 m und liegt in der Z=0 Ebene.

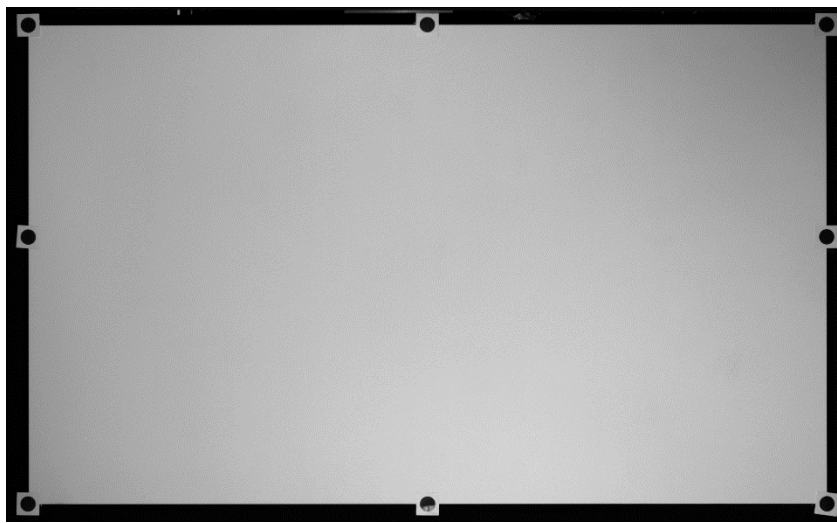


Abbildung 3.2: Aufnahme des Schirms mit montierten Markern

3.1 Stand der Technik

In diesem Unterkapitel werden Arbeiten beleuchtet, die relevante Informationen zum aktuellen Stand der Technik des Gesamtsystems liefern.

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH stellte zusammen mit LMT Lichtmesstechnik GmbH auf der Licht 2016 den Bildverarbeitungsraum (BV-Raum) vor [1]. Dieses ermöglicht die Aufnahme von Bildern eines Schirmes zur Berechnung von Lichtstärkeverteilungskurven. Bestandteile des Messraums sind ein Schirm, eine Leuchtdichtekamera, ein Photometer zum Stützen der Aufnahmen und ein Goniometer für den automobilen Bereich. Mehrbildaufnahmen mit Bildfusion sind ebenfalls möglich. Als Vorteile werden schnelle LVK-Messungen, Monitoring der gesamten Lichtverteilung, Photometerstützung sensibler Messpunkte, hohe Auflösung, hohe Kontraste, weitere Informationen wie Hell-Dunkel-Grenzen-Analyse und Homogenitätsinformationen angegeben. Geometrisch kalibriert wird das kamerabasierte Messsystem im Gegensatz zu dem hier dargestellten Verfahren mithilfe eines Winkelnormals.

Sayanca et. al. zeigten 2018 die Bedingungen und die Mathematik für die indirekte Messung von LVK mittels Messschirm und Leuchtdichtekamera [6]. Durch Raumfeldblenden konnte das Streulicht auf 1,5% relativ zu den Photometerwerten gesenkt werden. Des Weiteren werden Abweichungen zu Photometermessung bis zu einem minimalen Wert von 0,8% bei einer Winkelauflösung von 0,01° angegeben.

Sayanca bestimmte 2018 im Rahmen seiner Dissertation speziell für das in dieser Thesis verwendete Messsystem die Pose der Kamera mittels eines auf Homographie basierenden Ansatzes aus einer frei zugänglichen Matlab-Toolbox [2].

4 Messergebnisse

Zuerst erfolgt die Berechnung der statischen, am Goniometer verbauten, LMK 5-1 Color, welche auch im Messbetrieb verwendet wird. Diese wird dann mit der von Sayanca bestimmten Pose verglichen [2].

4.1 Posenbestimmung der Messkamera

Die Pose von Sayanca wird als Referenz herangezogen, da keine absoluten Daten für die Pose der Kamera und der Position des Drehzentrums vorhanden sind [2, p. 80]. Nach der Überführung in das in diesem Beitrag verwendete Koordinatensystem ergibt sich folgende Pose:

$$\vec{X}_{Sayanca} = [350 \text{ mm}, -380 \text{ mm}, 9750 \text{ mm}, -1.66^\circ, -6.8^\circ, -0.37^\circ] \quad (4.1)$$

Verglichen mit den durch den Rückwärtsschnitt berechneten Werten lässt sich eine erhebliche Differenz feststellen:

$$\vec{X}_{Rückwärts} = [103.63 \text{ mm}, -728.19 \text{ mm}, 9626.19 \text{ mm}, -0.82^\circ, -7.24^\circ, -0.397^\circ] \quad (4.2)$$

Der betragsmäßig größte Unterschied ist in der Höhe zu finden. Der Rückwärtsschnitt bestimmt hier nahezu den doppelten Betrag. Im Gegensatz dazu entspricht die Verschiebung entlang der X-Achse nur ungefähr einem Drittel der Pose von Sayanca. Die Betrachtung der Winkel hingegen entspricht den jeweiligen Ergebnissen. Die φ -Drehung des Rückwärtsschnitts muss größer sein, da sich die Kamera laut dieser Berechnung weiter entfernt vom Schirmzentrum befindet. Gleiches gilt für die Drehung um ω . Grund hierfür ist der ungefähr selbe Zielpunkt der Kamerabetrachtung.

Eine weitere Möglichkeit eine Aussage über die Validität der Pose treffen zu können ist der Rückprojektionsfehler. Hierbei werden die aufgenommenen Bildpunkte mithilfe der bestimmten Pose mathematisch auf den Schirm projiziert und deren Abweichung zu den reellen Punkten bestimmt. Die Fehler sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

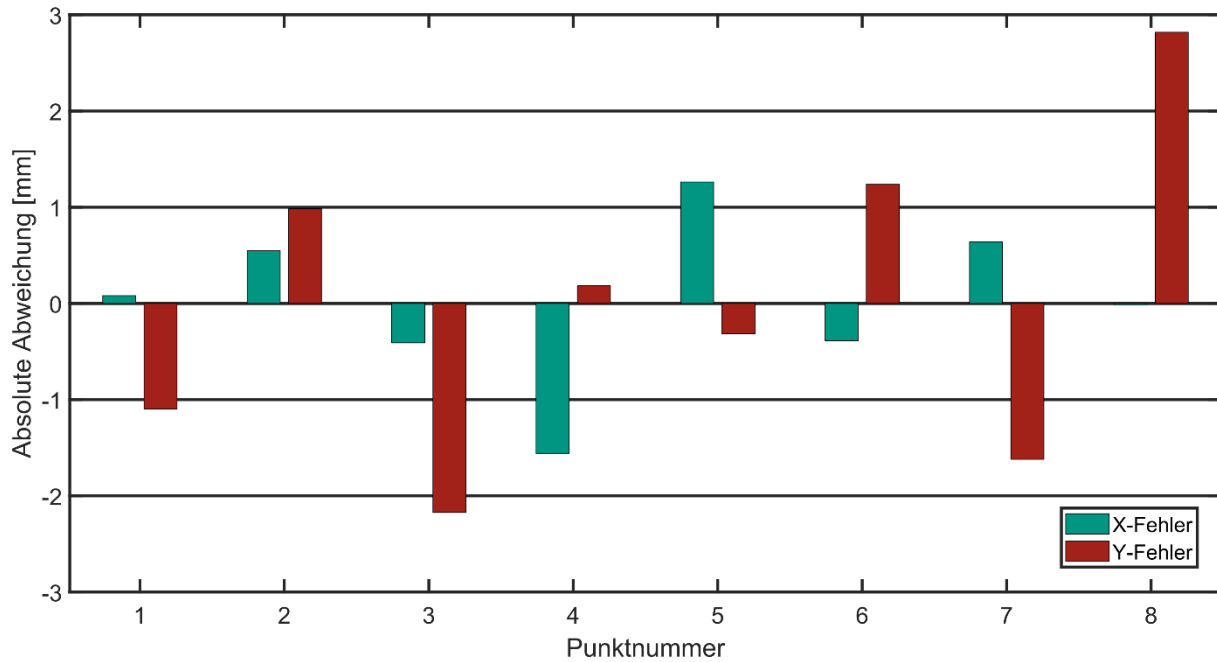


Abbildung 4.1: Rückprojektionsfehler. Die Punktnummer ist Zeilenweise aufsteigend von links oben nach rechts unten

Der Fehler in X-Richtung fällt hierbei deutlich geringer aus als in Y-Richtung. Dies könnte mit der Auflösung in der jeweiligen Richtung zusammenhängen, da die Kamera im vertikalen deutlich mehr, als nur den Schirm aufnimmt. Damit entfällt weniger „effektive Auflösung“ der Kamera auf den Schirm. Ein systematischer Einfluss auf den Projektionsfehler ist nicht zu erkennen. Die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers (MQF) ergibt in $X = 0,28$ mm und $Y = 0,55$ mm. Die Pose von Sayanca führt zu einem MQF von $X = 65,89$ mm und $Y = 71,57$ mm. Dies weist auf eine notwendig gute Bestimmung der Kamerapose in diesem Anwendungsfall hin.

4.2 Überprüfung des Algorithmus Mithilfe von Messfahrten

Im Folgenden wird die Präzision des Algorithmus mithilfe von Messfahrten des Goniometers überprüft. Diese sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Dazu wird eine LMK 5-5 Kamera an der Stelle des DUT montiert und die Achsen schrittweise verfahren. Für jeden Schritt wird die Pose der Kamera berechnet. Somit ergibt sich eine Methode zur Überprüfung des Algorithmus, da die Ergebnisse mit der Schrittweite des Goniometers verglichen werden können. Des Weiteren ermöglichen die Messreihen Aussagen zur Präzision der Achsbewegungen. Die Lage der Kamera ist für diesen Teil nicht relevant, da über die Positionen der Pose die Achsbewegung bestimmt werden soll.

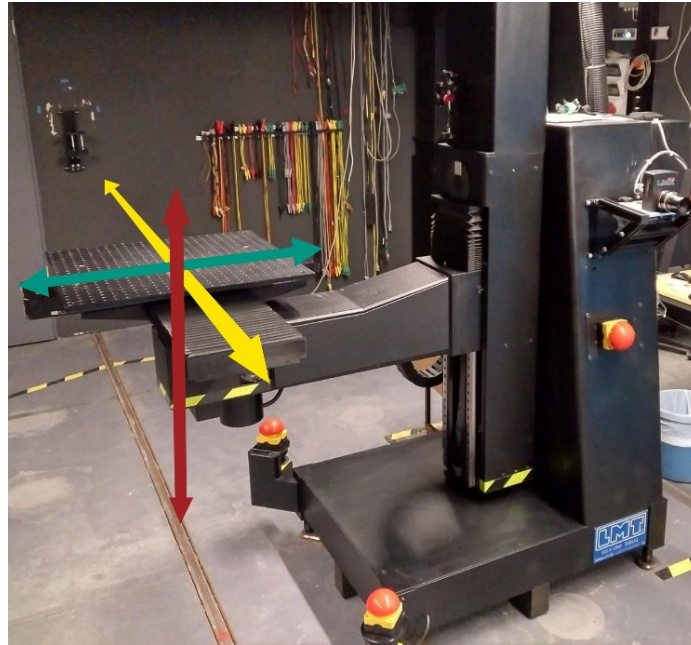


Abbildung 4.2: Überprüfte Achsen. X-Achse (grün), Y-Achse (rot) und Z-Achse (gelb)

Die möglichen untersuchbaren Kamerapositionen in der jeweiligen Achse werden durch das Blickfeld der Kamera festgelegt, sodass an jeder Position alle Messpunkte in der Aufnahme vorhanden sind.

Tabelle 1: Schrittweite der einzelnen Messfahrten

Achse											
$X_{Y,Z=0}$	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
$Y_{X,Z=0}$	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0
$Z_{X,Y=0}$	-200	-160	-120	-80	-40	0	40	80	120	160	200

Anschließend folgt die Bestimmung einer Regressionsgeraden durch die bestimmten Positionen. Daran schließt sich die Berechnung der Differenz zwischen berechnetem Punkt und dem Punkt mit der Schrittweite entlang der Geraden. Die jeweiligen Fehler sind in den Abbildungen 6-8 dargestellt. Entlang der X-Achse dominiert der X-Fehler. Gleiches gilt für die Y-Achse. Generell folgen die Fehler in X und Y Richtung keiner Systematik. Dem können physikalische Gegebenheiten zu Grunde liegen, wie beispielsweise die Auflösung der Kamera oder die Präzision der Marker am Schirm. Einzig der Z-Fehler entlang der Z-Achse weist ein lineares Verhalten um den Nullpunkt auf. Dies legt nahe, dass entweder ein Proportionalitätsfehler in der Entfernungsbestimmung vorliegt oder der Positionsgeber des Goniometers fehlerhaft ist. Die Steigung des Z-Fehlers entlang der Z-Achse beträgt 35,9 mm/m. Dies würde unter der Annahme wahrer Posenschätzungen 1,44mm pro Messschritt entsprechen.

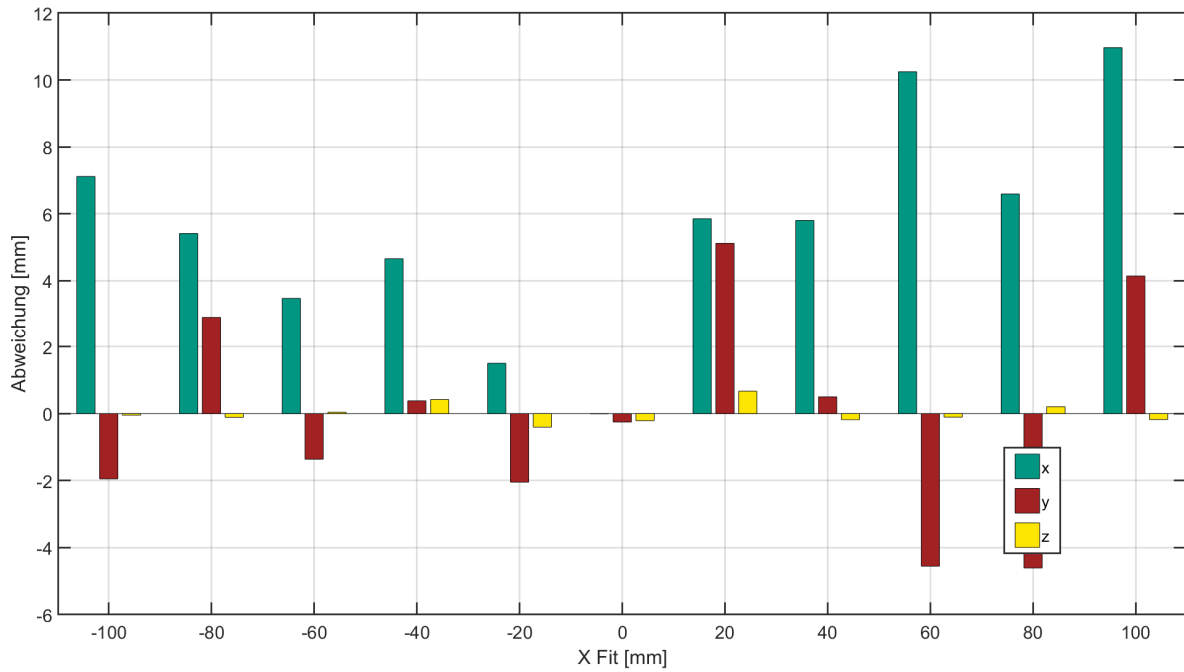


Abbildung 4.3: Abweichung der Posenpositionen in jeder Raumrichtung zur Regressionsgeraden für die X-Achse.

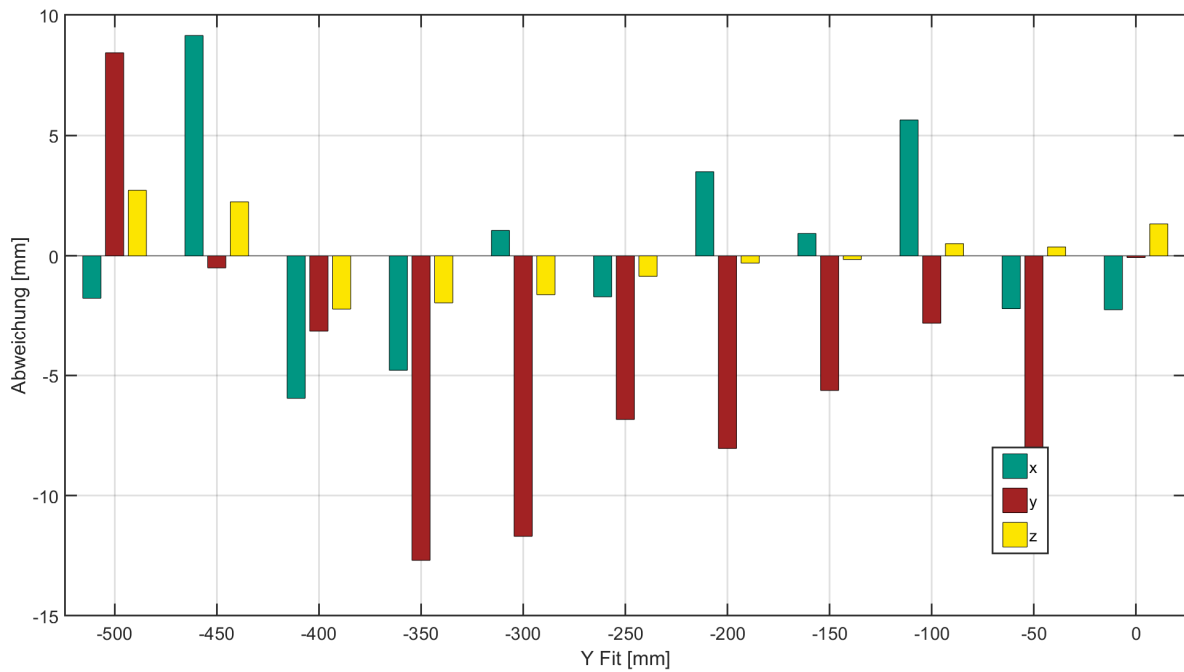


Abbildung 4.4: Abweichung der Posenpositionen in jeder Raumrichtung zur Regressionsgeraden für die Y-Achse.

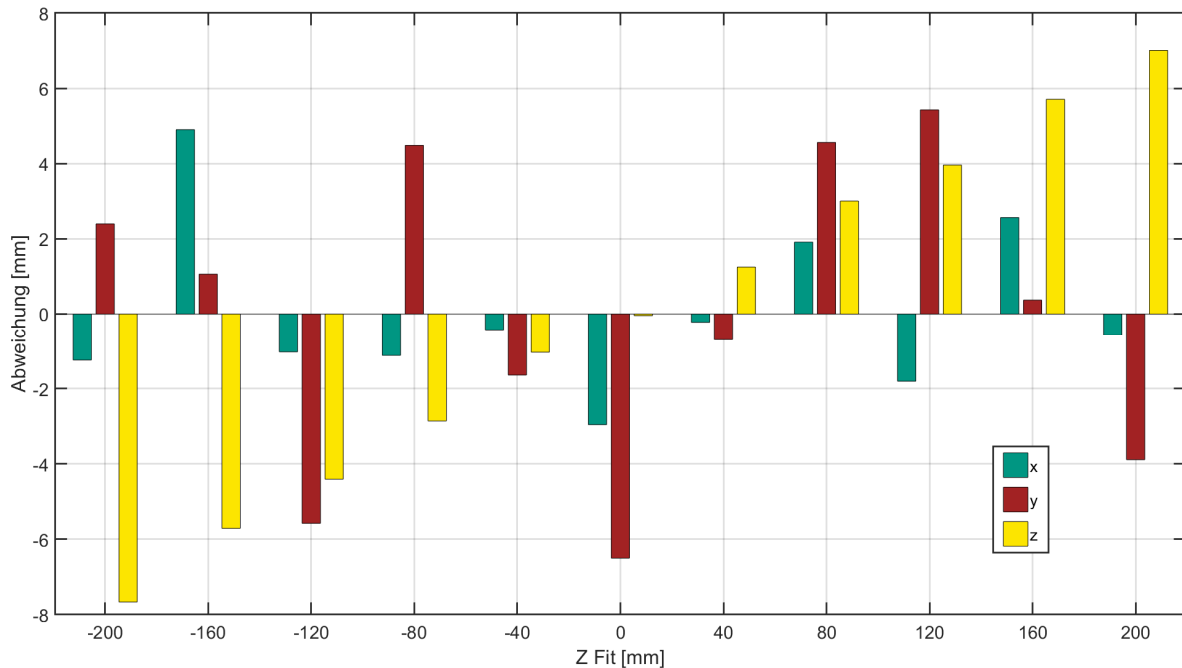


Abbildung 4.5: Abweichung der Posenpositionen in jeder Raumrichtung zur Regressionsgeraden für die Z-Achse.

4.3 Zusammenführung der Achsen

Die Anfahrgenauigkeit des Goniometers ist mit kleiner 0,5 mm angegeben [7]. Bei der Betrachtung der zusammengeführten Achsen wird deutlich, dass die Posenbestimmung des Rückwärtsschnitts keine hinreichende Genauigkeit bietet. Dies zeigen die Nullpunkte der Messfahrten, welche sich jeweils deutlich unterscheiden. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Vergleich der Nullpunkte der verschiedenen Messfahrten.

Achse	X_0 [mm]	Y_0 [mm]	Z_0 [mm]
X	1418,69	-774,15	10309,29
Y	1413,96	-762,55	10309,66
Z	1422,31	-779,85	10309,76

Die Unterschiede für die Validierung in X- und Y-Richtung sind hierbei nicht vernachlässigbar. Die Abweichung der Positionsbestimmung liegt weit über der angenommenen Positionierungsvarianz laut Datenblatt [7]. Leidglich die Positionierungsgenauigkeit in Z-Richtung liegt mit einer Spanne von lediglich 0,49 mm innerhalb der Positionierungsgenauigkeit. Die Gesamtdarstellung der Messfahrten ist in Abbildung 4.6 gezeigt.

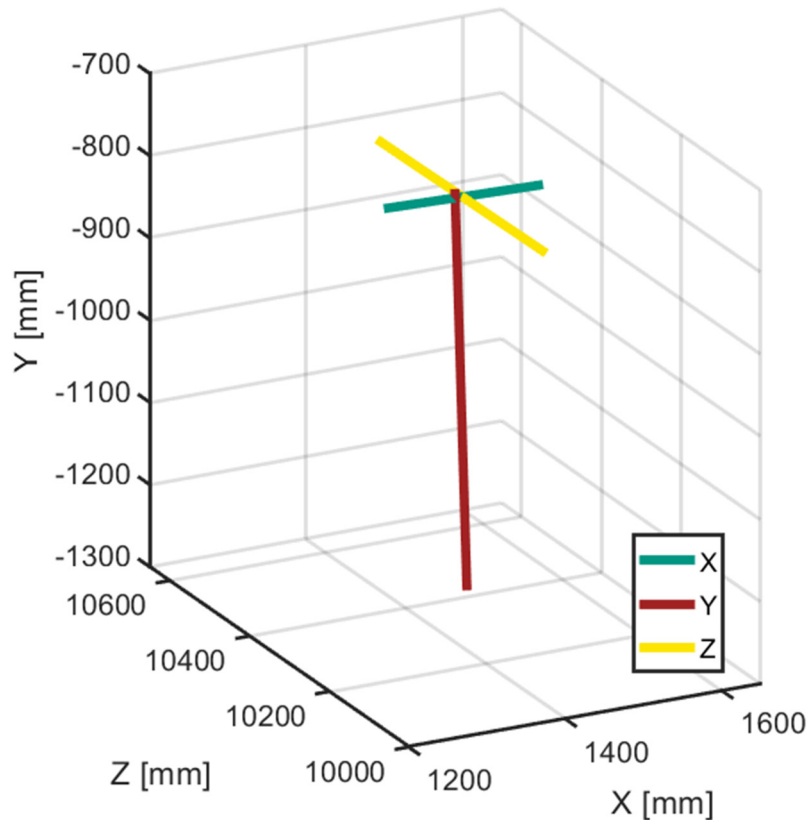


Abbildung 4.6: Resultierende Achskreuz

5 Fazit

Mit bekannten Objektpunkten ist es möglich, mithilfe deren Abbildungen, eine Kamerapose durch den Rückwärtsschnitt zu schätzen. Da keine absoluten Daten mit hinreichend kleiner Unsicherheit für das Messsystem vorhanden sind, wurden alternative Methoden zur Validierung getestet. Der Rückprojektionsfehler der fest montierten Messkamera bestätigt die Validität der geschätzten Pose innerhalb der gegebenen Toleranzen.

Die Messfahrten entlang der Achsen zeigen jedoch eine unzureichende Präzision in der geschätzten Einzelpose pro Messschritt. Die Abweichungen zu den einzelnen Regressionsgeraden zeigen Abweichungen weit über den Anfahrge nauigkeit des verwendeten Goniometers. Die benötigte Präzision wird auch in der Entfernungsbestimmung nicht erreicht.

Es werden weitere Optimierungen für diesen Kalibrierprozess benötigt. Die größte Ungenauigkeit bringen die eingesetzten Marker in das System. Diese wurden händisch an den Ecken und Kanten des Schirms ausgerichtet und grob vermessen. Im nächsten Schritt sollen laservermessene Marker verwendet werden, um so präzise Eingabewerte zu akquirieren. Des Weiteren ist der Einfluss der Kamerakalibrierung zu untersuchen, da diese nicht explizit auf geometrische Anwendungszwecke ausgelegt ist. Durch weitere Arbeiten am Messsystem konnte eine hohe Sensitivität gegenüber

der Kamerakalibrierung festgestellt werden. Die Methode des Rückwärtsschnitts kann etwa durch Hinzunahme der Ableitung zweiter Ordnung und damit potenteren Schätzverfahren weiter verbessert werden. Auch die Verwendung komplexerer Berechnungsmethoden, wie dem Bündelblockausgleich sind zu Berücksichtigen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] C. Schwanengel, F. Schmidt, T. Reiners und C. Diem, „Das Beste aus zwei Welten - Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung,“ 2016. [Online]. Available: https://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e6009/e7542/e7797/pb_download7802/Licht2016_TTBV_LMT_final_ger.pdf.
- [2] I. L. Sayanca, Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2018.
- [3] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol und H. Mühlig, Taschenbuch der Mathematik, Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2013.
- [4] T. Luhmann, Nahbereichsphotogrammetrie, Berlin: Wichmann, 2010.
- [5] B. Alsadik, „"space photo resection" MathWorks File Exchange (28.06.2019),“ 22 02 2013. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40467-space-photo-resection>.
- [6] I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neuman, „Indirect light intensity distribution measurement using image merging,“ *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI*, pp. 307-315, 2018.
- [7] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin, „Goniometer LMT GO-H 1660 Datenblatt,“ 2003. [Online]. Available: http://www.lmt-berlin.de/ds/Datenblatt_LMT_GO-H_1660_B409_EN_screen.pdf.