

# Systemanalyse eines bildgebenden LVK Messsystems mittels Monte Carlo Simulation

Markus Katona\*, Klaus Trampert, Cornelius Neumann  
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland  
Mailadresse\*: [markus.katona@kit.edu](mailto:markus.katona@kit.edu)

Christian Schwanengel  
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Lichtstärkeverteilungskurve einer Lichtquelle (LVK) wird klassischerweise mit einem Goniophotometer gemessen. Dafür wird die LVK der Lichtquelle in großer Entfernung mit einem Photometer abgetastet. Durch die punktuelle Abtastung des Winkelraums ist die Messauflösung direkt mit dem Zeitbedarf gekoppelt. Als Alternative hierzu hat sich die LVK Messung mit bildgebenden Empfängern entwickelt, bei der ein großer Ausschnitt der LVK mit nur einer Messung aufgenommen wird. In Kombination mit einem Goniometer ist es durch Mehrfachaufnahmen möglich die vollständige LVK der Lichtquelle zu bestimmen. So kann bei deutlich geringerem Zeitbedarf die LVK mit sehr hoher Winkelauflösung erfasst werden.

Für eine Sensitivitätsanalyse ist eine photometrische wie auch geometrische Modellierung des Systems notwendig. Dieser Beitrag behandelt die Aufstellung der geometrischen Systembeschreibung der bildgebenden LVK-Messtechnik mithilfe kinematischer Transformationen. Durch die Methode der Monte-Carlo-Simulation kann der Einfluss der Unsicherheitsparameter der geometrischen Eingangsgrößen auf das Gesamtergebnis einer Messung analysiert und in Form einer Winkel- und Distanzunsicherheit ausgegeben werden. Diese können als Grundlage für eine spätere Messunsicherheitsbetrachtung des Gesamtsystems verstanden werden.

**Index Terms:** Goniophotometer, Fernfeld, Leuchtdichtemesskamera, geometrische Systembeschreibung, Kinematik

## 1 Einleitung und Grundlagen

Die Lichtstärke  $I$  beschreibt den Teillichtstrom  $d\Phi$  der in einen infinitesimalen Raumwinkelbereich  $d\Omega$  emittiert wird.

$$I(\varphi, \vartheta) = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [cd] \quad (1.1)$$



Sie ist eine abstandsunabhängige Größe und gibt als Funktion über zwei Raumwinkel  $(\varphi, \vartheta)$  die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) an. Voraussetzung hierfür ist die Annahme einer Punktlichtquelle [1]. Da keine reale Lichtquelle eine Punktlichtquelle ist, ist die Lichtstärke eine rein theoretisch definierte Größe und für reale Lichtquellen nur in unendlich großem Abstand eindeutig bestimmt. Um Sie dennoch messtechnisch zu erfassen, wird eine Mindestmessentfernung vorausgesetzt, ab der sich der Detektor im Fernfeld befindet und somit die Ausdehnung der Lichtquelle vernachlässigt werden kann. Diese Entfernung wird als photometrische Grenzentfernung bezeichnet und ist abhängig von der Ausdehnung, wie auch vom Abstrahlverhalten der Lichtquelle [2,3]. Ist die Annahme einer Punktlichtquelle gerechtfertigt, kann mit dem photometrischen Entfernungsgesetz über den Messabstand  $r$  die Lichtstärke berechnet werden [1]:

$$I = \frac{E \cdot r^2}{\cos(\alpha)\Omega_0} \quad (1.2)$$

$E$  ist die vom Detektor erfasste Beleuchtungsstärke, und  $\alpha$  die Ausrichtung des Detektors zur Lichtquelle. Um Messergebnisse vergleichbar zu halten, ist die zu verwendende Messentfernung in vielen Normen eindeutig festgelegt.

Um den vollständigen Winkelraum zu erfassen wird zur Aufnahme einer Verteilungskurve ein Goniometer verwendet.

### 1.1 Direkte und indirekte LVK- Messmethode am Beispiel des KFZ-Goniophotometer

Die LVK-Messung lässt sich grundsätzlich in eine direkte- und indirekte LVK Messmethode unterscheiden. Bei der direkten Messmethode wird das direkt auf einen Detektor einfallende Licht erfasst, während bei der indirekten Messmethode eine diffus reflektierende Oberfläche von der Lichtquelle bestrahlt und gleichzeitig von einem Detektor erfasst wird. Während bei der direkten LVK Messtechnik ein Photometerkopf verwendet wird, kann für die indirekte LVK Messtechnik eine orts aufgelöste Kamera verwendet werden. Durch die Wahl einer großen diffus reflektierenden Oberfläche ergibt sich somit die simultane Messung vieler Stützstellen der LVK mit nur einem einzigen Kamerabildeinzug. Die beiden Messmethoden sind bereits in der Literatur beschrieben [4,5,6], daher soll im Folgenden nur kurz auf die beiden Messsysteme eingegangen werden. Dies geschieht anhand des zur Verfügung stehenden Messsystems (vgl. Abbildung 1).

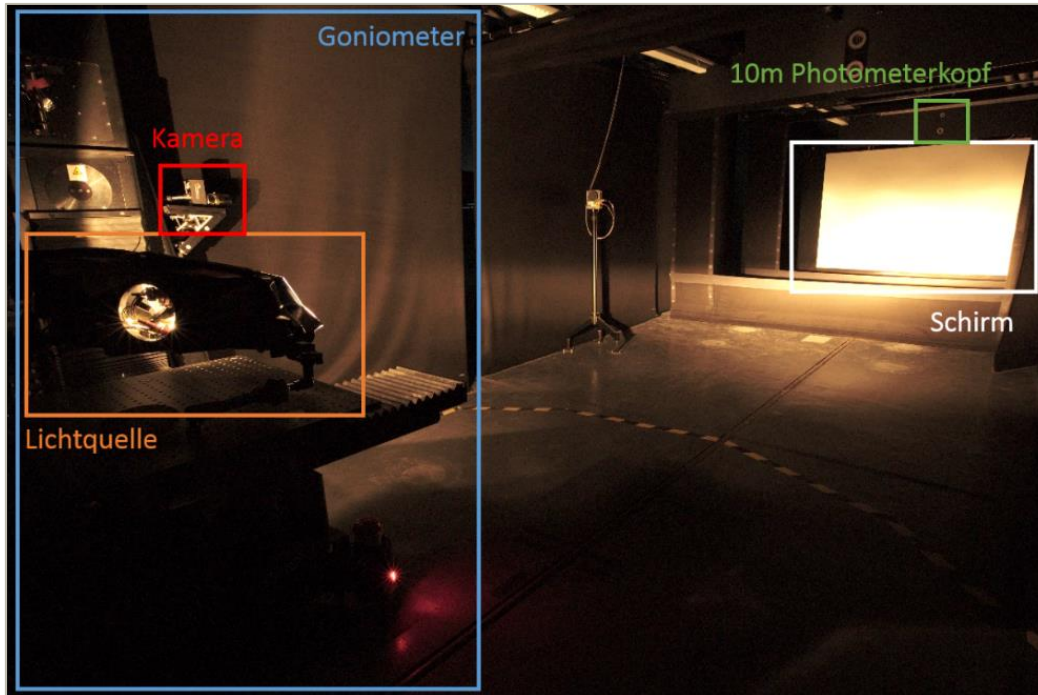


Abbildung 1: Messraum im LTI mit direkter- und indirekter LVK Messmethode

Der in Abbildung 1 gezeigte Messraum im Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie besteht aus dem LMT G-OH1660 Typ-A Goniometer von der Firma LMT das mit einem Photometer in 5 m, 10 m und 25 m Entfernung ausgestattet ist. Das Goniometer besitzt einen Lineartisch zur Ausrichtung der Lichtquelle sowie zwei Achsen (H- und V-Achse) um die Lichtquelle in jede Raumrichtung rotieren zu können. Diese Komponenten werden zur direkten LVK-Messtechnik verwendet. Zusätzlich wurde der Messraum mit einer LMK5-Color Kamera der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, einem weiß, lambertsch reflektierenden Schirm in 10 m Entfernung sowie einem Blendensystem ausgestattet. Beide Messmethoden wurden von den Firmen hinsichtlich des aktuellen Standes der Technik kalibriert und können zur LVK Messung verwendet werden. Mit beiden Messmethoden kann eine vollständige LVK aufgenommen werden.

## 1.2 Geometrische Beziehungen der Messsysteme

Für die Sensitivitätsanalyse eines Messsystems ist nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) die Aufstellung eines mathematischen Modells notwendig. Anschließend kann anhand der einzelnen Sensitivitäten der Eingangsgrößen eine Aussage über deren Einfluss auf die Gesamtunsicherheit getroffen werden. Da sich die Lichtstärke entsprechend ihrer Definition in ihren geometrischen Fluss  $G$ , sowie ihre transportierte photometrische Komponente aufteilen lässt ist es sinnvoll diese beiden Komponenten separat voneinander zu betrachten. In diesem Beitrag soll nur die geometrische Systembeschreibung betrachtet werden.

### 1.3 Kinematik in der Robotik

Die Kinematik ist die Lehre der Bewegungen. In der Robotik stellt sie für ein gegebenes Bewegungssystem den Zusammenhang zwischen den einstellbaren beweglichen Teilen und der Position des Roboters her. Es kann jedes Bewegungssystem mathematisch aus einer Kette von festen und freien Translationen  $t$  und Rotationen  $R$  beschrieben werden, die in Transformationen  $T$  zusammengefasst werden. Eine Transformation  $T_i$  beschreibt die Überführung eines Koordinatensystems  $X_i$  in das Koordinatensystem  $X_{i+1}$

$$X_{i+1} = T_i * X_i \quad (1.3)$$

Die Transformationsvorschrift aus homogenen Koordinaten setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$T_i = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) & t(x, y, z) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Wobei für  $R$  die Rotationsreihenfolge  $x \rightarrow y \rightarrow z$  gewählt wurde:

$$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = R_{rot,z}(\theta_z)R_{rot,y}(\theta_y)R_{rot,x}(\theta_x) \quad (1.5)$$

$\theta_x$ ,  $\theta_y$  und  $\theta_z$  sind die positiv definierten Rotationswinkel um die Achsen  $x, y$  und  $z$  der Koordinatensysteme. Daraus ergibt sich die Transformationsmatrix für ein Systemglied mit den Koeffizienten  $r_{ij}$  der Rotationsmatrix zu:

$$T_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Die Gesamttransformationskette ist multiplikativ, d.h. um bei  $n$  hintereinander geschalteten Transformationen das Koordinatensystem  $X_0$  in das Koordinatensystem  $X_n$  zu überführen kann folgende Vorschrift verwendet werden:

$$T_{ges} = T_{n-1 \rightarrow n} * \dots * T_{1 \rightarrow 2} * T_{0 \rightarrow 1} \quad (1.7)$$

Abbildung 2 zeigt eine kinematische Kette.

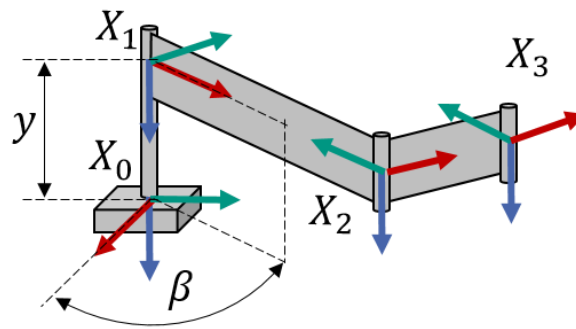


Abbildung 2: Transformationskette eines Roboterarms

Eine besondere Form der Beschreibung der einzelnen Koordinatensysteme, die häufig in der Robotik verwendet wird, stellt die Denavit-Hartenberg-Transformation dar. Ihr liegen die folgenden Eigenschaften zugrunde:

- Die  $z_{i-1}$ -Achse ist die Rotationsachse des  $n$ -ten Gelenks.
- Die  $x_i$ -Achse ist das Kreuzprodukt von  $z_{i-1}$  und  $z_i$ .
- Mit der  $y_i$ -Achse ergibt sich ein rechtshändiges Koordinatensystem.

Da bei dieser Systemaufstellung kein Roboterarm nachgebaut werden muss, die Drehkoordinatensysteme ineinander liegen und viele der Koordinaten ortsfest sind, reicht die Definition freier Koordinatensysteme, die sich entsprechend der Transformationen  $T_i(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x, y, z)$  ineinander überführen lassen.

## 2 Systembeschreibung des bildgebenden LVK-Messsystems

Für die geometrische Systembeschreibung des bildgebenden LVK-Messsystems wird der Bildgeber, d.h. die Kamera, nicht mitbetrachtet. Dies hat den Hintergrund, dass der Schirm als Detektorebene aufgefasst werden kann und immer ortsfest verbleibt. Zur späteren Systemanalyse wird dann eine Lasermatrix simuliert, die auf das Goniometer aufgebracht wird und ein 9 Punktemuster auf den Schirm wirft. Auch bei einer simulierten HV-Drehung des Goniometers wird ein Punktemuster verwendet, das entsprechend Abbildung 4 jeweils einen zentralen Laserpunkt mit seiner 8er Nachbarschaft auf dem Schirm darstellt. Eine weitere Annahme, die dem System zugrunde gelegt wird, ist ein ebener Schirm. Dadurch setzt sich entsprechend Abbildung 3 das System aus den folgenden Koordinatensystemen zusammen: Dem Weltkoordinatensystem  $X_W$ , dem Schirmkoordinatensystem  $X_S$ , dem Koordinatensystem der Goniometer V-Achse  $X_V$ , dem Koordinatensystem der Goniometer H-Achse  $X_H$  und dem Koordinatensystem des Lasers  $X_L$ .

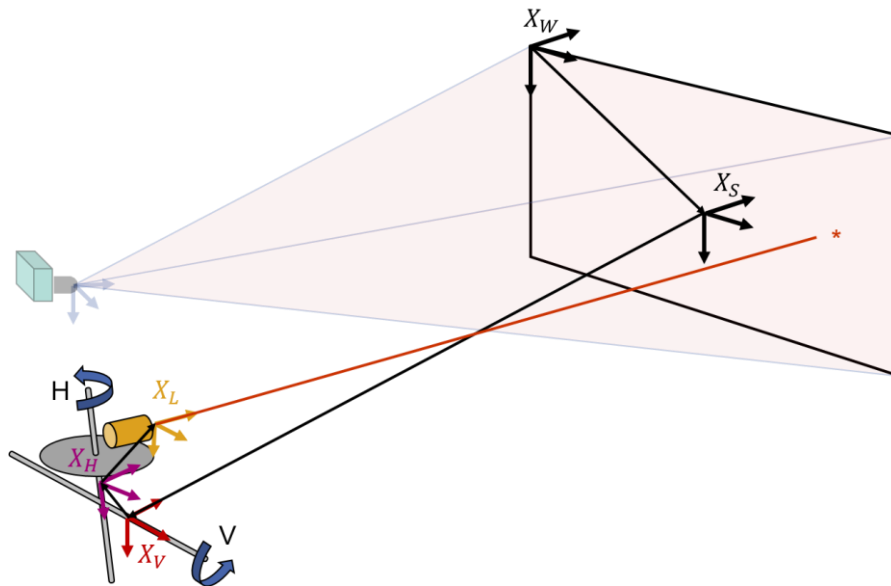


Abbildung 3: Für die geometrische Kalibrierung wichtige Systemkomponenten und ihre Koordinatensysteme.

Um die Pose des Koordinatensystems des Lasers entsprechend seiner Unsicherheitsparameter und entsprechend der horizontalen und vertikalen Drehung des Goniometers im Raum zu bestimmen wird folgende Transformationsvorschrift verwendet

$$T_{ges} = T_{Schirm} * T_{V,pose} * T_{V,aktion} * T_{H,pose} * T_{H,aktion} * T_{Laser} \quad (2.1)$$

Sie setzt sich aus den in Tabelle 1 dargestellten Transformationen zusammen. Während Laser-, Schirm- und Weltkoordinatensystem den in Abbildung 3 dargestellten Koordinatensystemen entsprechen, teilen sich die Koordinatensysteme der Goniometer Achsen in einen „Aktion“ und einen „Pose“-Teil auf. Der „Pose“-Teil entspricht der Lage des Koordinatensystems für die Drehwinkel  $H, V = 0^\circ$ , wohingegen der „Aktion“-Teil der durchgeführten Rotation um diese Achse entspricht. Des Weiteren wurden die Transformationen auf relevante Freiheitsgrade reduziert. Die „Aktionen“ der H- bzw. V-Achse wurde auf die Rotation um eine Achse beschränkt. Für die Schiefelage der beiden Achsen zueinander ( $T_{H,pose}$ ) ist nur die Rotation um eine Achse relevant, da die anderen beiden Rotationen bereits von anderen Freiheitsgraden abgedeckt werden. Genauso ist es ausreichend für  $T_{V,pose}$  und  $T_{Schirm}$  einen Freiheitsgrad jeweils nur zu einer Transformation zuzuordnen. Eine Unterscheidung der beiden Parameter ist nur der Übersichtlichkeit halber erfolgt.

Tabelle 1: Einzel- und gesamt Transformationen der Systemaufstellung

#	Notation	Transformation	Freiheits- grade	Art	$X_i \rightarrow X_{i+1}$
	$T_{ges}$	Gesamte Transformationskette			$X_L \rightarrow X_W$
1	$T_{Laser}$	Pose des Objektkoordinatensystems gegenüber H-Achse	$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ $t(x, y, z)$	Fest	$X_L \rightarrow X_{H,0}$
2	$T_{H,Aktion}$	„Aktion“, Drehwinkel H-Achse	$R(\theta_y)$	Aktion	$X_{H,0} \rightarrow X_{H,Aktion}$
3	$T_{H,Pose}$	Schief lagen und Offset von H- zu V-Achse	$R(\theta_z)$ $t(x, y, z)$	Fest	$X_{H,Aktion} \rightarrow X_{V,0}$
4	$T_{V,Aktion}$	„Aktion“, Drehwinkel V-Achse	$R(\theta_x)$	Aktion	$X_{V,0} \rightarrow X_{V,Aktion}$
5	$T_{V,Pose}$	Lage und Orientierung der V-Achse zum Schirm (incl. Messabstand)	$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ $t(z)$	Fest	$X_{V,Aktion}$
6	$T_{Schirm}$	Relative Lage der Optischen Achse in der Schirmebene	$t(x, y)$	Fest	$X_S \rightarrow X_W$

## 2.1 Geometrische Systemanalyse mittels Simulation eines Lasers und der Monte-Carlo-Methode

Die Systemanalyse findet auf Basis der Monte-Carlo-Simulation statt. Dafür werden je nach Kalibriermethode bzw. je nach zu analysierenden Systemparametern Unsicherheiten in Form einer Standardabweichung  $\sigma$  der Simulation übergeben. Mit der Annahme von Normalverteilten Unsicherheitsparametern werden durch die Monte-Carlo-Simulation  $N$  Parametersätze erzeugt und im Anschluss ein 3x3 Laserpunktemuster auf dem Schirm berechnet. Die Streuung der Laserpunkte kann dann als zweidimensionale Normalverteilte Ergebnisgröße in Form einer Standardabweichung bestimmt werden. Dafür werden entsprechend Abbildung 4 die Standardabweichungen entlang der Hauptdiagonalen der Laserpunkteverteilung über eine Singulärwertzerlegung der Kovarianzmatrix bestimmt. Diese schließen mit der Laserposition des Idealsystems (System ohne unsicherheitsbehafteter Größen) einen Öffnungswinkel ein und werden als Bewertungsparameter ausgegeben. Des Weiteren wird eine Standardabweichung des Abstandsverhältnisses von den Berechnungen mit unsicherheitsbehafteten Größen zum Idealsystem angegeben.

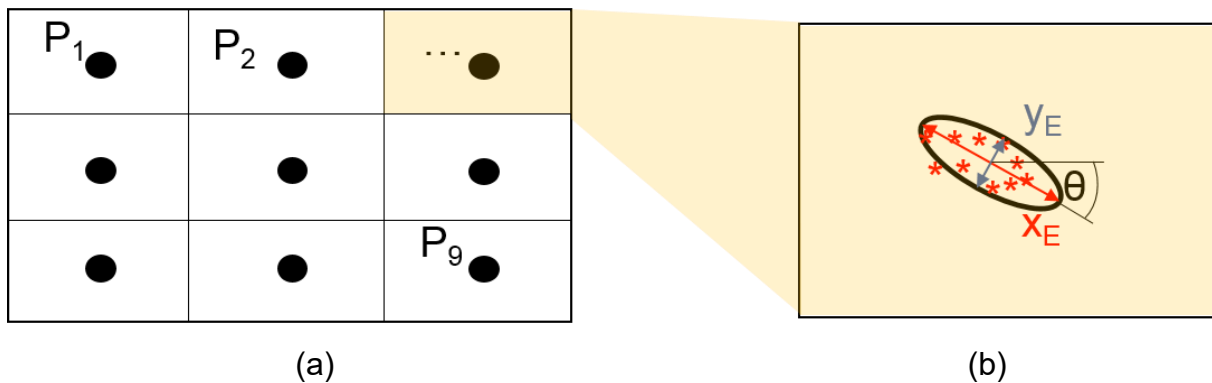


Abbildung 4: (a) Verteilung der simulierten Laserpunkte auf dem Schirm. (b) Simulationsergebnis und Bewertungsmethode der Lasersimulationen für einen Bewertungspunkt.

## 2.2 Geometrische Kalibriermethoden

Das System kann geometrisch auf zwei verschiedene Arten kalibriert werden, die jeweils in der geometrischen Systemanalyse unterschiedlich betrachtet werden müssen. Die erste Kalibriermethode funktioniert über eine vollständige geometrische Analyse der Systemparameter. Dafür müssen die geometrischen Beziehungen zwischen Schirm, Kamera und Goniometer erfasst werden. Dies kann über Messmethoden wie Lasertrackermessungen durchgeführt werden, die zwar hoch präzise allerdings sehr zeit- und kostenaufwändig sind. Außerdem können photogrammetrische Methoden, wie in [5] beschrieben, angewandt werden. Diese erfordern aber einerseits ein hohes Maß an Kenntnissen der softwaretechnischen Umsetzung von Bündelblockausgleichs- und Kamerakalibriermethoden. Andererseits ist die Unsicherheitsbestimmung kamerabasierter Messsysteme, wie sie an dieser Stelle zum Einsatz kommt, schwierig. Darüber hinaus muss, wenn die Annahme eines ebenen Schirms nicht gerechtfertigt ist, die Geometrie des Schirms mitbestimmt werden. Dies ist ebenfalls eine Herausforderung, da der Schirm keinerlei Strukturen aufweist bzw. diese nur am Rand angebracht werden können. Ein Vorteil dieser Methode ist die geometrische Kenntnis des Gesamtsystems. Dadurch können beispielsweise ein nicht korrekt im Drehzentrum des Goniometers platzierter Lichtschwerpunkt herausgerechnet oder andere Korrekturen durchgeführt werden.

Die zweite Kalibriermethode wird über ein Winkelnormal durchgeführt, das im Drehzentrum des Goniometers platziert wird und ein Winkelmuster auf den Schirm wirft. So werden den einzelnen Kamerapixel feste Winkelwerte zugeordnet. Hierbei liegt die geometrische Unsicherheit in der Unsicherheit des Winkelnormals, sowie die Positionierung des Winkelnormals auf dem Goniometer. Eine anschließende Korrektur des Lichtschwerpunktes ist hier nicht möglich. Durch die Systemaufstellung wird es möglich diese beiden Kalibriermethoden zu untersuchen und hinsichtlich ihrer Effektivität zu bewerten.



### 3 Validierung

Für die Validierung des Systemmodells werden einzelne Systemparameter entsprechend ihrer Unsicherheiten verändert während die übrigen Systemparameter festgehalten werden. Betrachtet werden dabei Systemparameter, die ein erwartetes Systemverhalten auf dem Schirm wiedergeben. Dabei wird einerseits eine visuelle Beurteilung der Ergebnisse vorgenommen, andererseits werden die Standardabweichungen der Eingangs- und Ausgangsparameter verglichen. Als Beispiel sind die Hysterese, d.h. Stellgenauigkeit der H-Achse, sowie der Messabstand aufgeführt. Abbildung 5 und Abbildung 6 geben visuell das erwartete Systemverhalten wieder. Tabelle 2 zeigt eine Übereinstimmung der Eingangs- und Ausgangssensitivitäten. Damit kann davon ausgegangen werden, dass das System funktioniert und auch überlagerte Sensitivitätsanalysen getestet werden können.

Tabelle 2: Beispielhafte Simulationsergebnisse für die Validierung des Systemmodells.

#	Trans-formation	t/R	$\sigma$ Eingabe- parameter	$\sigma \left(1 - \frac{d}{d_0}\right)$	$\sigma$ größte Ellipsen- achse [°]	$\sigma$ kleinste Ellipsen- achse [°]
1	$T_{H,Aktion}$	R	0,0043°	0,00001	0,00428	0,00000
8	$T_{V,Pose}$	t	2 mm	0,00020	0,00100	0,00000

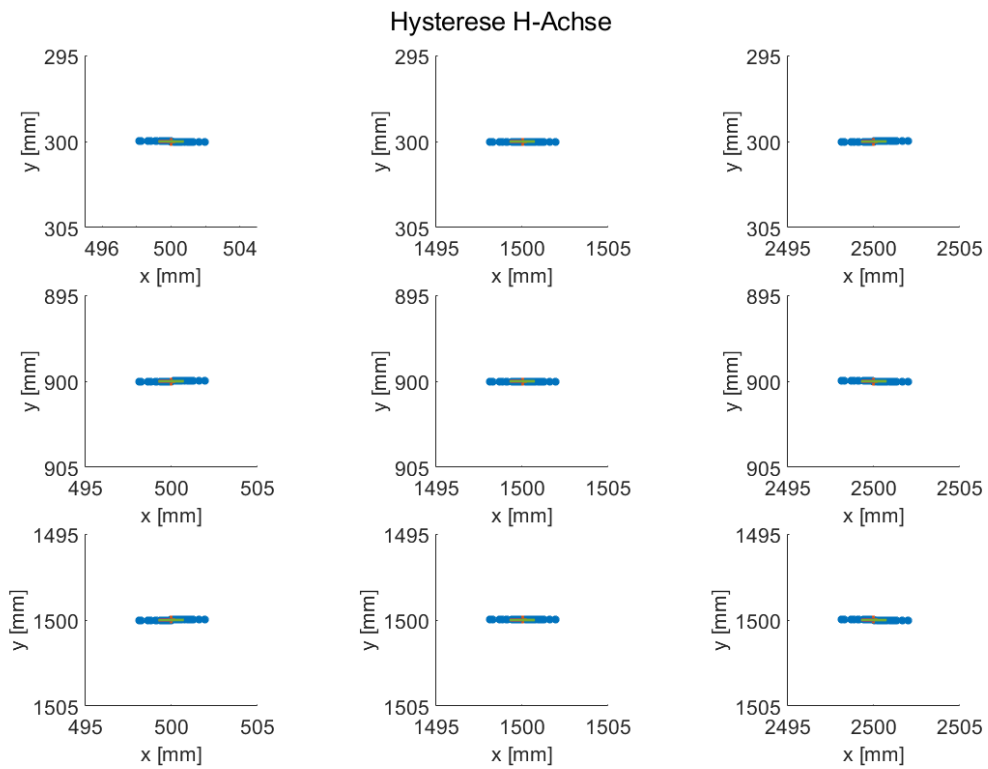


Abbildung 5: Validierungsergebnisse der Hysterese der H-Achse.

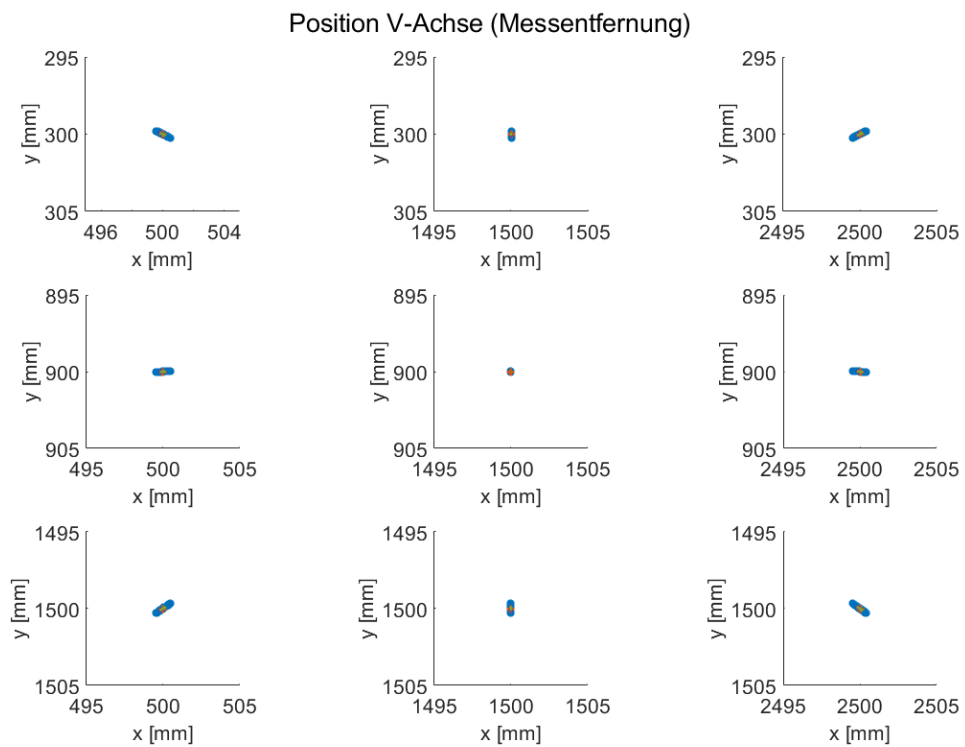


Abbildung 6: Validierungsergebnisse der Messentfernung.

## 4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der ersten Untersuchung dargestellt. Hierbei wird das Gesamtsystem bewertet und die einzelnen Parameter simuliert, nicht jedoch eine Unterscheidung zwischen den Kalibriermethoden getroffen. Genauso wenig ist diese Untersuchung dazu geeignet Aussagen über eine Messung treffen zu können. Dazu müssen weitere Simulationen durchgeführt werden, die im Abschnitt Ausblick aufgeführt sind.

### 4.1 Parameterbestimmung

Für jeden Freiheitsgrad muss ein Wert sowie eine Sensitivität angegeben werden. Diese Sensitivitäten wurden entweder aus Literaturwerten übernommen oder versucht mit händischen Methoden zu bestimmen. Für die Laserposition sowie die Laserorientierung ( $T_{\text{Laser}}$ ) wurde geschätzt wie genau sich ein Objekt im Goniometerdrehzentrum platzieren lässt. Natürlich muss davon ausgegangen werden, dass eine Quelle mit undefiniertem Lichtschwerpunkt wie es beispielsweise bei Leuchten mit Optiken der Fall ist [3,7], deutlich unpräziser platziert werden können als ein Geometrienormal. Die Hysterese der H- bzw. V-Achse ( $T_{H,\text{Aktion}}$ ,  $T_{V,\text{Aktion}}$ ) wurde bewertet, indem mit einem Laser dieselben Punkte aus unterschiedlichen Richtungen angefahren wurden. Natürlich muss hier auch die absolute Präzision des Goniometers mitberücksichtigt werden. Tests für eine solche Parameterbestimmung stehen noch aus. Die Achslage sowie die Orientierung der Achsen zueinander muss ebenfalls noch überprüft werden. Hierzu werden Methoden verwendet, bei denen kameragestützt Kreise und Kugeln auf dem Goniometer beobachtet werden, während das Goniometer um die eigenen Achsen bewegt wird. Die Distanz zum Schirm kann per Laserentfernungsmessgerät bestimmt werden. Diese Messgeräte haben eine gängige Toleranz von 1 mm.

Weiterhin sind photogrammetrische Methoden denkbar um die Systemparameter zu bestimmen. Eine Sinnhaftigkeit dieser Methoden soll in nachfolgenden Untersuchungen noch überprüft werden. Außerdem soll Raum und Goniometer mit einem Lasertracker vermessen werden um Referenzwerte für die Untersuchungen der Geometrie des Systems zu erhalten.

### 4.2 Systemanalyse

Tabelle 3 listet die verwendeten Systemparameter inklusive ihrer Sensitivitätsparameter auf und stellt sie mit den ermittelten Unsicherheiten in Beziehung. Dafür wurde jede Größe unabhängig simuliert. Die oberste Zeile der Tabelle gibt die Gesamtunsicherheit wieder, so kann der Betrag jeder einzelnen Variable zur Unsicherheit des Gesamtsystems abgeschätzt werden. Natürlich ist hier zu beachten, dass einige Sensitivitäten nur geschätzt wurden. Dadurch ist auch das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße ein bewertungstechnisch interessanter Wert. Abbildung 7 zeigt die Fehlerellipsen der 3x3 Laserpunktmatrix für

die Gesamtunsicherheit. In Abbildung 8 sind die Anordnung der Laserpunkte bezogen auf den Schirm, sowie die Legende der Ergebnisabbildungen zu sehen.

Zu erkennen ist, dass die Rotationsunsicherheiten wie Laserorientierung ( $T_{Laser}$ ), Hysterese ( $T_{H,Aktion}$ ,  $T_{V,Aktion}$ ), Verdrehung des Goniometers gegenüber dem Schirm ( $T_{V,Pose}$ ) oder die Unsicherheit der Lasermatrix ( $T_{Lasermatrix}$ ) einen 1:1 Einfluss auf die Ausgangsgröße haben. Genauso ist dieser 1:1 Einfluss im Abstandsverhältnis für Translationsunsicherheiten in z-Richtung wiederzufinden. Als betragsmäßig am Einflussreichsten ist für den aktuell angenommenen Parametersatz die Laserpositionierung und Orientierung sowie der Messabstand.

Tabelle 3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt als Standardabweichungen  $\sigma$ .

#	Transformation	t/R	[x,y,z] in [mm] bzw. [ $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ] in [°]	$\sigma$ Eingabe- parameter [mm] oder [°]	$\sigma$ $\left(1 - \frac{d}{d_0}\right)$	$\sigma$ größte Ellipsen- achse [°]	$\sigma$ kleinste Ellipsen- achse [°]
1	$T_{ges}$				<b>0,00023</b>	<b>0,01441</b>	<b>0,01429</b>
2	$T_{Laser}$	t	[0 0 0] mm	[1 1 1] mm	0,00010	0,00576	0,00571
3	$T_{Laser}$	R	[0 0 0] °	[0,01 0,01 0] °	0,00002	<b>0,01004</b>	<b>0,01000</b>
4	$T_{H,Aktion}$	R	[0 0 0] °	[0 0,0043 0] °	0,00001	0,00428	0,00000
5	$T_{H,Pose}$	t	[0 0 0] mm	[0,1 0,1 0,1] mm	0,00001	0,00058	0,00057
6	$T_{H,Pose}$	R	[0 0 0] °	[0 0 1/200] °	0,00000	0,00044	0,00000
7	$T_{V,Aktion}$	R	[0 0 0] °	[0,0036 0 0] °	0,00000	0,00360	0,00000
8	$T_{V,Pose}$	t	[0 0 10000] mm	[0 0 2] mm	<b>0,00020</b>	0,00100	0,00000
9	$T_{V,Pose}$	R	[0 0 0] °	[1/200 1/200 0] °	0,00001	0,00505	0,00497
10	$T_{Schirm}$	t	[1500 800] mm	[1 1 0] mm	0,00000	0,00580	0,00573
11	$T_{Lasermatrix}$	$\varphi, \vartheta$	3x3-Matrix	[1/2000 1/2000 0]°	0,00000	0,00051	0,00050

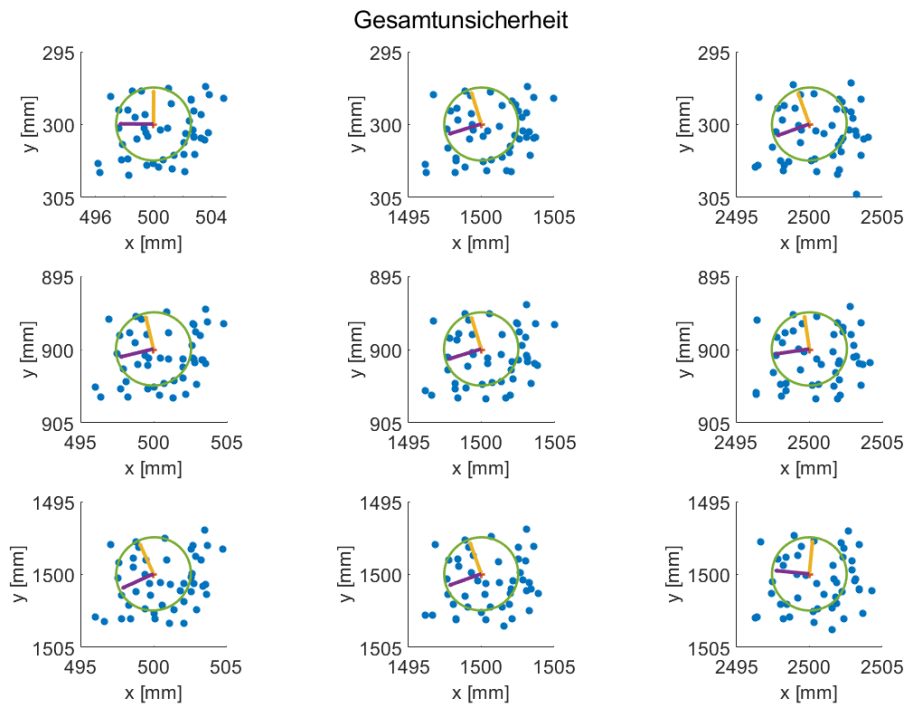


Abbildung 7: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse.

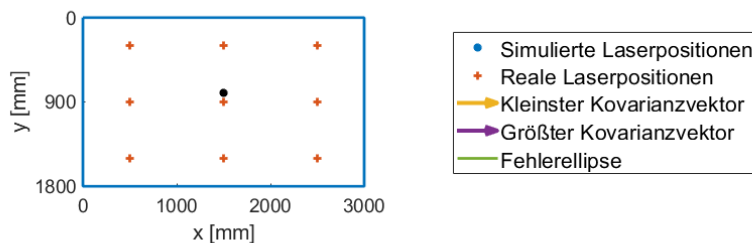


Abbildung 8: Darstellung der Laserpunkte auf dem Schirm und der Legende für die visuelle Ergebnisanalyse.

### 4.3 Grenzen des Systems

Ein Modell entspricht auf Grund getroffener Annahmen nie der Realität. Für das aktuelle Modell wurde angenommen, dass der Schirm eine ebene Fläche ist. Dies erleichtert die Simulation deutlich. Außerdem lässt sich die Schirmunebenheit auch über eine Unsicherheit der Messentfernung beschreiben. Eine weitere sehr einflussreiche Größe, die besonders die photometrische Betrachtungsweise betrifft, ist die photometrische Grenzentfernung. Diese ist für sehr engbündelnde Strahler laut [2] und [3] in 10 m Entfernung noch nicht erreicht. Über die Verwendung von  $\cos^n$ -strahlenden Punktlichtquellen im Simulationsmodell kann dieser Einfluss

näherungsweise mitsimuliert werden. Weiterhin wird ein Taumeln der H,V-Achsen als vernachlässigbar angenommen und findet, wie auch der Einfluss der Gravitation, keine Berücksichtigung.

## 5 Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Systemmodell für eine bildgebende LVK Messtechnik vorgestellt, das zur Sensitivitätsanalyse verwendet werden kann. In einer ersten Analyse hat sich deutlich gezeigt, dass sich so der Einfluss der einzelnen Sensitivitätsparameter auf das Gesamtergebnis rekonstruieren lässt und anhand ermittelter Unsicherheitsparametern eine Unsicherheit der geometrischen Systemkomponenten angegeben werden kann. In einem nachfolgenden Schritt ist daher die Bestimmung aller Sensitivitätsparameter mittels händischer Methoden, photogrammetrischer Methoden und mittels Lasertracker bestmöglich durchzuführen. Darauf aufbauend können dann, die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Kalibriermethoden verglichen und Messungen simuliert werden. Des Weiteren soll der Vorteil der photogrammetrischen Kalibriermethode überprüft werden, ob hier ein Herausrechnen des tatsächlichen Lichtschwerpunktes möglich ist.

Außerdem muss das Systemmodell um die photometrische Systemkomponente erweitert werden. Diese berücksichtigt die photometrische Grenzentfernung, das Abstrahlverhalten der Lichtquelle wie auch das Reflexionsverhalten des Schirms. Weiter sollen Methoden entwickelt werden, die den Einfluss des Raumstreulichts, wie auch des Kameraastreulichts bestimmen und verkleinern können.

## 6 References

- [1] O. Reeb, Grundlagen der Photometrie, Verlag G. Braun Karlsruhe, 1962.
- [2] V. Jacobs et al., Analyses of Errors Associated with Photometric Distance in Goniophotometry, 2015.
- [3] M. Katona, I. Rotscholl, K. Trampert, C. Neumann, Determination of errors associated with the far field assumption in light distribution measurements using near field data, AMCTM 2017, Glasgow.
- [4] Dipl.-Ing. C. Schwanengel, Das Beste aus zwei Welten – Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung, LICHT 2016.
- [5] M. Katona, J. Fessler, L. Sayanca, K. Trampert, C. Neumann, C. Schwanengel - Geometrische Kalibrierungsmethode einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochaufgelöste Lichtstärkeverteilungen im Fernfeld. Davos, LICHT 2018.
- [6] I. L. Sayanca, K. Trampert and C. Neumann, Indirect Light Intensity Distribution Measurement using ImageMerging, AMCTM2017, Glasgow.
- [7] Simon Wendel, S. Lück, C. Neumann. Constructing multiple focal points using rayfiles. Lux junior, Ilmenau 2011.