

# **KAMERABASIERTE GONIOPHOTOMETRIE**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

Markus Katona, M.Sc.

geb. in

Konstanz, Deutschland

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2021

Hauptreferent

Prof. Dr. Cornelius Neumann

Korreferent

Prof. Dr. Markus Ulrich

---

## I DANKSAGUNG

An erster Stelle bedanke ich mich besonders bei meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann. Durch seine fachliche und persönliche Unterstützung war er stets eine große Stütze während meiner Zeit am *Lichttechnischen Institut*. Ich bedanke mich auch bei Prof. Dr. Markus Ulrich für die Übernahme des Korreferats. Als fachlichen Betreuer am *Lichttechnischen Institut* möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Klaus Trampert bedanken. Seine langjährige Erfahrung trug maßgeblich zur Entstehung dieser Arbeit bei.

Für Ihre Unterstützung möchte ich außerdem der *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH* danken. Ein spezieller Dank geht an Geschäftsführer Dr. Udo Krüger, der mit seinem Fachwissen zur Seite stand und einen Teil dieser Arbeit finanzierte. Ebenso trug die Unterstützung von Dipl.-Ing. Christian Schwanengel maßgeblich zu dieser Arbeit bei, wofür ich ihm sehr dankbar bin. Danken möchte ich neben Stefan Lerm auch allen anderen Mitarbeitenden für die Offenheit, schnelle Zuarbeit und konstruktive Unterstützung.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Arbeitsgruppe „*Allgemeine Lichttechnik*“ und „*Optische Technologien im Automobil*“ für das angenehme Arbeitsklima, die fachlichen konstruktiven Diskussionen und fürs gute Freunde sein. Ingo Rotscholl, Leopoldo Sayanca, Melanie Helmer, Maximilian Baumann, Asu Rayamajhi, Tino Weiß, Jan Fessler und Patric Jahn seien hier besonders genannt. Mein Dank gilt darüber hinaus meinen

Studenten deren Arbeiten ich betreute und allen weiteren Mitarbeitenden des LTIs für die stets große und kollegiale Hilfsbereitschaft.

Weiterhin gilt mein Dank meinen Freundinnen und Freunden für ihre offenen Ohren, die mein Leben während der Dissertation bereichert und mich besonders auch durch schwierige Zeiten begleitet haben. Ohne gemeinsame Kletterurlaube, die vielfältige Zeit zusammen, längere Telefonate oder auch manchem fachlichen Gespräch wäre diese Zeit nicht möglich gewesen. Ganz besonders möchte ich meinem Mitbewohner und engem Freund Chris Geiger danken.

Ebenso möchte ich mich fürs Korrekturlesen bei Mitarbeitern der *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH*, meiner Familie und meinen Kolleginnen und Kollegen bedanken.

Nicht zu vergessen ist die „*Karlsruhe School of Optics and Photonics*“, die mich mit einem zweijährigen Stipendium unterstützte und stets ein Ort für inspirierende Gespräche war.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie für ihre großartige Unterstützung. Besonders meinen Eltern Bärbel und Josef Katona, meinen Schwestern Jasmin und Heike Katona und meinen Großeltern Anton und Erika Plass danke ich für ihren Rückhalt und die großartige Hilfe. Ein ganz besonders liebenvoller Dank gilt schlussendlich meiner Lebensgefährtin Maria Sol Gomez, die mich über die gesamte Zeit unterstützte, motivierte und schwierige Zeiten Seite an Seite mit mir überstand. Ich danke auch ihrer Familie in Argentinien.

---

## II INHALTSVERZEICHNIS

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>I</b>  | <b>Danksagung</b>                        | <b>II</b> |
| <b>II</b> | <b>Inhaltsverzeichnis</b>                | <b>IV</b> |
| <b>1</b>  | <b>Einleitung</b>                        | <b>1</b>  |
| 1.1       | Motivation                               | 1         |
| 1.2       | Ziel und Gliederung der Arbeit           | 4         |
| <b>2</b>  | <b>Grundlagen der LVK-Messung</b>        | <b>5</b>  |
| 2.1       | Lichtstärkeverteilungskurve              | 5         |
| 2.2       | Fernfeldnäherung                         | 7         |
| 2.3       | Koordinaten- und Ebenensysteme           | 8         |
| 2.4       | LVK-Messsysteme                          | 11        |
| 2.4.1     | Einkanal- und Mehrkanalmessung           | 14        |
| 2.5       | Messunsicherheit                         | 18        |
| 2.5.1     | GUM                                      | 19        |
| 2.5.2     | Monte-Carlo-Methode                      | 21        |
| 2.5.3     | Mehrdimensionale Messgrößen              | 22        |
| 2.6       | Kinematik                                | 24        |
| 2.7       | Photogrammetrie                          | 26        |
| <b>3</b>  | <b>Methodenvergleich</b>                 | <b>29</b> |
| 3.1       | Messsystem A                             | 30        |
| 3.2       | Messsystem B                             | 34        |
| <b>4</b>  | <b>Geometrische Unsicherheitsanalyse</b> | <b>39</b> |

---

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 4.1   | Geometrische Beiträge zur<br>Messunsicherheit einer LVK-Messung ..... | 40        |
| 4.2   | Berechnungsmethode.....   | 41        |
| 4.3   | Justagemethoden .....   | 43        |
| 4.3.1 | Goniometerachsen- und Lasermethode .....                              | 43        |
| 4.3.2 | Winkelnormalmethode .....   | 45        |
| 4.3.3 | Methode der geometrischen Modellierung.....                           | 45        |
| 4.4   | Modell der Auswertung .....   | 46        |
| 4.4.1 | Kinematisches Modell des Messsystems .....                            | 49        |
| 4.4.2 | Kinematisches Modell des kamerabasierten<br>LVK-Messsystems .....     | 50        |
| 4.5   | Monte-Carlo-Simulation des<br>kamerabasierten LVK-Messsystems .....   | 55        |
| 4.6   | Auswertungsmethode.....   | 59        |
| 4.7   | Systemparameteranalyse .....  | 64        |
| 4.7.1 | Einfache Methoden.....  | 65        |
| 4.7.2 | Photogrammetrie .....   | 72        |
| 5     | <b>Raumstreulichtkorrektur.....</b>                                   | <b>79</b> |
| 5.1   | Streulicht in kamerabasierten LVK-<br>Messsystemen .....              | 80        |
| 5.2   | Kamerastreulicht.....   | 81        |
| 5.2.1 | Kamerastreulichtkorrektur.....  | 82        |
| 5.3   | Raumstreulicht .....  | 84        |
| 5.4   | Theoretisches Modell der RSLK .....                                   | 86        |
| 5.5   | Lichtfinger.....  | 94        |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.6      | SVF und SVF-Matrix .....                                      | 102        |
| 5.6.1    | Raumparameteranalyse und<br>Regionensegmentierung.....        | 104        |
| 5.6.2    | Detaillierte Raumanalyse .....                                | 106        |
| 5.6.3    | Berechnung der Korrekturmatrixt .....                         | 108        |
| 5.6.4    | Integrale Streulichtverteilungsfunktion .....                 | 110        |
| 5.7      | Prozess der RSLK .....  | 110        |
| <b>6</b> | <b>Photometrische Grenzfernerng .....</b>                     | <b>113</b> |
| 6.1      | Berechnung der photometrischen<br>Grenzfernerng .....         | 115        |
| 6.2      | Auswertungsmethode .....                                      | 119        |
| <b>7</b> | <b>Ergebnisse .....</b>                                       | <b>121</b> |
| 7.1      | Geometrische Parameteranalyse .....                           | 121        |
| 7.1.1    | Einfache Methoden .....                                       | 122        |
| 7.1.2    | Photogrammetrische Methode .....                              | 129        |
| 7.2      | Geometrische Messunsicherheitsanalyse.....                    | 133        |
| 7.2.1    | Positioniergenauigkeit des Goniometers .....                  | 136        |
| 7.2.2    | Messsystem ohne Lichtquellen- und<br>Winkelnormaljustage..... | 138        |
| 7.2.3    | Vollständige Messsystemanalyse.....                           | 143        |
| 7.3      | Raumstreuulichtkorrektur.....                                 | 149        |
| 7.3.1    | Analyse des Raumstreuulichts .....                            | 149        |
| 7.3.2    | Praktische Anwendung der RSLK .....                           | 156        |
| 7.3.3    | Einflussparameter der RSLK .....                              | 161        |
| 7.4      | Photometrische Grenzfernerng.....                             | 169        |

---

---

## INHALTSVERZEICHNIS

---

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| 7.4.1       | Lambertstrahler.....                                     | 170        |
| 7.4.2       | Engbündelnde Lichtquelle .....                           | 173        |
| <b>8</b>    | <b>Diskussion und Ausblick.....</b>                      | <b>179</b> |
| 8.1         | Geometrische Unsicherheitsanalyse .....                  | 179        |
| 8.1.1       | Softwaretechnische Umsetzung und<br>Übertragbarkeit..... | 182        |
| 8.1.2       | Bewertungsverfahren.....                                 | 183        |
| 8.1.3       | Geometrische Parameteranalyse .....                      | 184        |
| 8.2         | Raumstreichlichtkorrektur .....                          | 185        |
| 8.2.1       | Verbesserung des Messraums.....                          | 188        |
| 8.3         | Photometrische Grenzfernernung .....                     | 189        |
| <b>9</b>    | <b>Zusammenfassung.....</b>                              | <b>193</b> |
| <b>III</b>  | <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                        | <b>196</b> |
| <b>IV</b>   | <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                         | <b>210</b> |
| <b>V</b>    | <b>Veröffentlichungen .....</b>                          | <b>212</b> |
| <b>VI</b>   | <b>Betreute Arbeiten .....</b>                           | <b>214</b> |
| <b>VII</b>  | <b>Abkürzungen .....</b>                                 | <b>215</b> |
| <b>VIII</b> | <b>Formelzeichen.....</b>                                | <b>216</b> |
| <b>IX</b>   | <b>Literatur .....</b>                                   | <b>225</b> |



---

## Kapitel 1

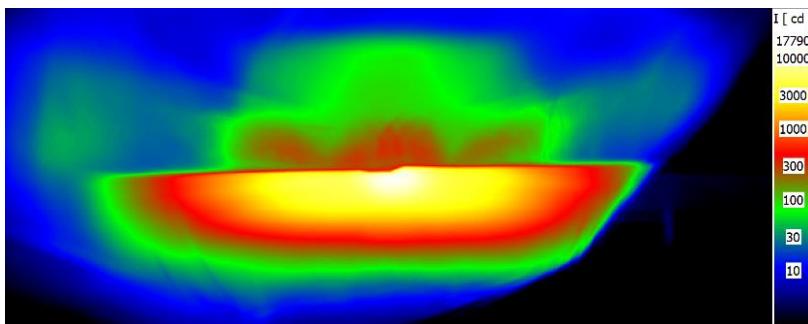
# EINLEITUNG

### 1.1 MOTIVATION

Bereits kurz nach der Erfindung der Fotografie im Jahre 1839 entwickelte sich aus der Kamera ein Werkzeug, das Peter Henry Emerson, einer der damals bedeutendsten Vertreter der Fotografie, im Jahre 1890 als eine „kleine Gottheit“ bezeichnete und ihm die Fähigkeit zur „intellektuellen Weiterentwicklung der Menschheit“ zusprach [1]. Eben dazu entwickelte sich die Kamera wenig später. Verging anfangs zwischen Aufnahme und fertigem Bildabzug, der ausschließlich ein Einzelstück war [2], viel Zeit, entwickelte sich die Kamera in den letzten Jahren zu einem dynamischen Werkzeug, dass augenblicklich hochauflösende Fotos aufnimmt. Aufgrund dieser Entwicklung ist es mittlerweile möglich, Kameras auch in der Messtechnik sinnvoll und valide zu verwenden. Die Erstellung topographischer Karten, die 3D Rekonstruktion von Objekten aber auch die Verwendung von Kameras als technisches Auge machen viele der heute alltäglichen Funktionen erst möglich [3–5]. Ein weiteres Einsatzgebiet hoch technologisierter Kameras sind Leuchtdichtemesskameras [6]. Mit ihrer Hilfe werden leuchtende Objekte photometrisch bewertet.

---

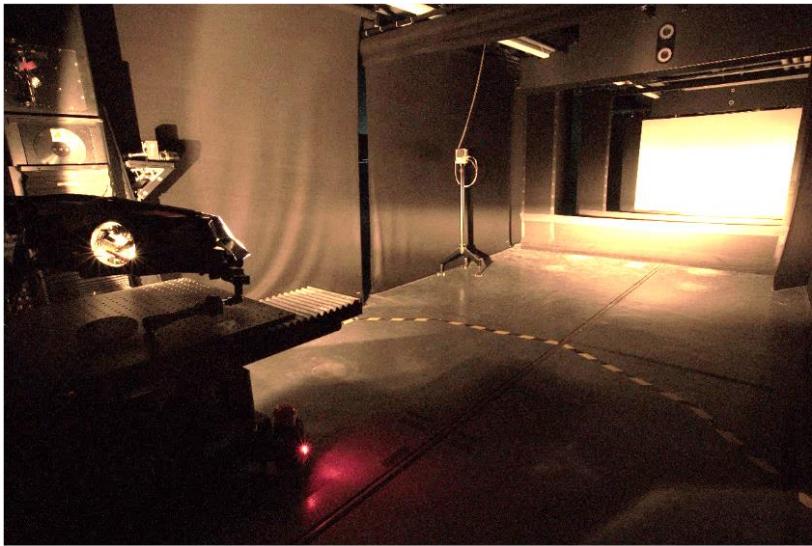
Ihr aktueller Entwicklungsstand ermöglicht mittlerweile auch die Bewertung von Lichtverteilungen hochauflösender Scheinwerfer [7, 8]. Dies wiederum vereinfacht und beschleunigt die Entwicklung von Scheinwerfern sowie anderen Lichtquellen und sorgt dafür, dass Prüfverfahren kostengünstig, präzise und effizient umgesetzt werden können. So ist es möglich, die Aufnahme einer Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) entsprechend Abbildung 1.1 mittels kamerabasierter LVK-Messgeräte innerhalb weniger Minuten durchzuführen, wohingegen konventionelle Messgeräte bestehend aus photometerkopfbasierten Detektoren mehrere Tage benötigen.



**Abbildung 1.1:** Lichtstärkeverteilung einer Abblendlichtverteilung.

Diesem enormen zeitlichen Gewinn steht ein deutlich größerer Aufwand gegenüber, um die Überprüfung und Einhaltung der notwendigen Qualitätsstandards zu gewährleisten und eine Korrektur möglicher Fehlerquellen durchzuführen. So erhöht sich durch die große Anzahl an Messkanälen, entsprechend der Kameraauflösung, der zu betreibende Aufwand zur Analyse jedes einzelnen Messkanals.

Beispielsweise müssen zu jedem Messkanal die geometrische Lage, dessen Wechselwirkungen mit den umliegenden Messkanälen aber auch Streulichteinflüsse innerhalb und außerhalb des optischen Systems untersucht und gegebenenfalls korrigiert werden. Zur Erlangung der geforderten Qualitätsstandards der Mess- und Prüfnormen, sollen in dieser Arbeit Faktoren untersucht werden, die einen Einfluss auf die Unsicherheit einer LVK-Messung mit einem kamerabasierten KFZ-Goniophotometer entsprechend Abbildung 1.2 haben. Die Analyse soll dabei anhand des ISO/BIPM-Leitfadens *GUM: „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“* durchgeführt werden [9].



**Abbildung 1.2:** LVK-Messraum des *Lichttechnischen Instituts am Karlsruher Institut für Technologie*.

### 1.2 ZIEL UND GLIEDERUNG DER ARBEIT

Die drei in dieser Arbeit untersuchten Einflussfaktoren auf eine LVK-Messung sind die geometrische Unsicherheit des Messsystems, das Raumstreu Licht und der Einfluss der photometrischen Grenz Entfernung. In Kapitel 2 werden daher zunächst die Grundlagen einer LVK-Messung beschrieben und die typischen LVK-Goniophotometer erläutert. Dazu gehören Messsysteme mit photometerkopf- und kamerabasierten Detektoren, welche in Kapitel 3 in einem Methodenvergleich gegenübergestellt werden. Anhand der LVK-Messung einer Lichtquelle, die die Vor- und Nachteile der beiden Detektortypen erläutert, wird außerdem die Notwendigkeit der Analyse der genannten Einflussfaktoren erläutert. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Analysemethoden jeweils in einem eigenen Kapitel, angefangen in Kapitel 4 mit der geometrischen Unsicherheitsanalyse. Zur Modellierung des Messsystems werden kinematische Transformationen verwendet, die die Lage des Detektors mit der Lichtquellenposition in Verbindung setzen. Im Anschluss wird in Kapitel 5 die Problematik des Raumstreu Lichts in kamerabasierten LVK-Messsystemen beschrieben und ein Raumstreu Licht korrekturverfahren vorgestellt. Zuletzt erfolgt in Kapitel 6 die Beschreibung einer Methode um die photometrische Grenz Entfernung genauer zu bestimmen und mit gängigen Abschätzungsformeln zu vergleichen. Die dafür vorgestellte Methode basiert auf Strahlendaten. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse zu jeder Analysemethode anhand einer LVK-Messung dargestellt und in Kapitel 8 diskutiert.

---

## Kapitel 2

# GRUNDLAGEN DER LVK-MESSUNG

Die Lichtstärkeverteilungskurve beschreibt das Abstrahlverhalten einer Lichtquelle, indem die Ausdehnung der Quelle vernachlässigt wird. So reduziert sich der Speicherbedarf des Dateiformats und eine dreidimensional visuell-darstellbare Messgröße entsteht. Die in diesem Kapitel beschriebenen Annahmen und die messtechnischen Bestimmungsmöglichkeiten der LVK liefern die Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Unsicherheitsanalysen.

### 2.1 LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKURVE

Die Lichtstärke  $I$  mit der SI-Basiseinheit Candela (cd) gibt den auf den Raumwinkel  $\Omega$  bezogenen Lichtstrom  $\Phi$  an. Der Lichtstrom wiederum entspricht der Gesamtmenge des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts. Die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) beschreibt demnach das richtungsabhängige Abstrahlungsverhalten einer Lichtquelle. Dabei wird angenommen, dass es sich bei der Lichtquelle um eine Punktlichtquelle handelt, denn nur unter dieser Bedingung ist eine Raumrichtung eindeutig zuweisbar. Die LVK ist daher für eine gegebene Raumrichtung  $(\varphi, \vartheta)$  mit dem Azimut  $\varphi$  und dem

---

Polarwinkel  $\vartheta$  definiert als der Teillichtstrom  $d\Phi$ , der in einen Raumwinkel  $d\Omega$  abgestrahlt wird:

$$I(\varphi, \vartheta) = \frac{d\Phi(\varphi, \vartheta)}{d\Omega(\varphi, \vartheta)}. \quad (2.1)$$

Die LVK kann daher in eine geometrische und eine photometrische Komponente zerlegt werden. Die geometrische Komponente entspricht dem geometrischen Fluss  $G$ . Er stellt das Gerüst der LVK als  $(\varphi, \vartheta)$ -Koordinatensystem dar. Die photometrische Komponente entspricht dem zugehörigen Lichtstärkewert  $I$  [10, 11].

Das klassische Messgerät zur Messung einer LVK ist ein Fernfeld-Goniophotometer. Hierbei soll durch einen großen Detektor-Lichtquellen-Abstand die Annahme der Punktlichtquelle gerechtfertigt werden. Da aber keine reale Lichtquelle eine Punktlichtquelle ist, entspricht die so gemessene Lichtstärke immer einer Näherung. Lediglich für einen unendlich großen Messabstand wäre die Definition der Punktlichtquelle erfüllt. Da dies aber nicht umsetzbar ist, muss ein Messabstand gewählt werden, ab der die Lichtquellenausdehnung gegenüber dem Messabstand vernachlässigt werden kann. Diese Entfernung wird als photometrische Grenzfernernung bezeichnet. Rechnerisch ist sie genau dann erreicht, wenn das photometrische Entfernungsgegesetz unter einer gegebenen Toleranz gültig ist:

$$I = \frac{E \cdot r^2}{\cos(\varepsilon)} (1 + \epsilon_{tol}). \quad (2.2)$$

Demnach entspricht eine im Abstand  $r$  unter dem Winkel  $\varepsilon$  gemessene Beleuchtungsstärke  $E$  bis auf eine Abweichung von  $\epsilon_{tol}$  der Lichtstärke einer Lichtquelle [10, 11].

## 2.2 FERNFELDNÄHERUNG

Der notwendige Mindestmessabstand einer LVK-Messung wird als photometrische Grenzentfernung bezeichnet. Sie ist laut den Normen *DIN EN 13032-4* [12] und *CIE S025* [13] dann erreicht, wenn die Abweichung zwischen gemessener LVK und LVK nicht größer als  $\delta = 1\%$  nahe der Hauptstrahlrichtung ist ( $\epsilon_{tol} < \delta$ ). Für weiter von der Hauptstrahlrichtung entfernt liegende Winkel bis zur doppelten Halbwertsbreite, werden tolerierbare 3 % angegeben [12]. Allerdings ist im Voraus einer Messung die Berechnung des notwendigen Messabstands zur Einhaltung dieser Toleranz nicht möglich. Daher geben die Normen Abschätzungsgleichungen an, die beispielsweise für lambertsche Lichtquellen ein Mindestmessabstand  $r_{min}$  vom fünffachen der Lichtquellenausdehnung  $D$  fordern. Für engbündelnde Lichtquellen wird ein Mindestmessabstand vom 15-fachen der Lichtquellenausdehnung genannt. In Tabelle 2.1 sind die Abschätzungsgleichungen aus *DIN EN 13032-4* zusammengefasst [12].

**Tabelle 2.1:** In der Norm *DIN EN 13032-4* gegebene Mindestmessabstände je nach Charakteristik der Lichtquelle.

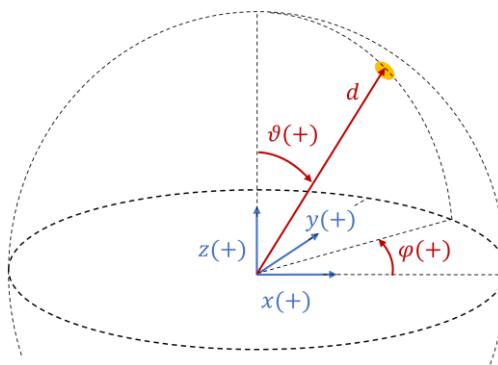
| Charakteristik der Testlichtquelle                                   | $r_{min}$           |
|--|---------------------|
| Verteilung nahezu kosinusförmig                                      | $5 \times D$        |
| Von Kosinusverteilung verschieden                                    | $10 \times D$       |
| Enge Winkelverteilung, steile Gradienten oder kritische Entblendung  | $15 \times D$       |
| Große nicht leuchtete Bereiche $S$ zwischen den leuchteten Bereichen | $10 \times (D + S)$ |

---

Alle diese Abschätzungsgleichungen beruhen auf analytischen Berechnungen idealisierter Lichtquellen [14, 15].

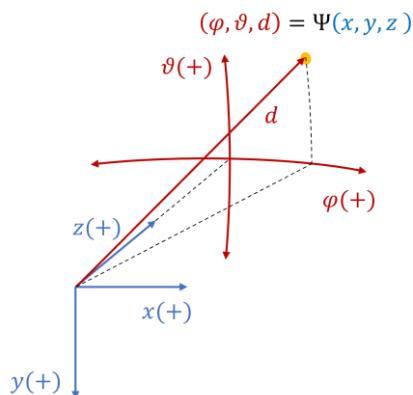
### 2.3 KOORDINATEN- UND EBENENSYSTEME

Den in den nächsten Kapiteln durchgeführten Untersuchungen liegen geometrische Transformationen zugrunde. Daher ist eine strikte Einhaltung einer am Anfang gewählten Konvention der Koordinatensysteme wichtig. Dies gilt für Transformationen durch homogene Koordinaten, wie beispielsweise in der Kinematik, sowie auch für die Umrechnung zwischen sphärischen- und kartesischen Koordinaten. Abbildung 2.1 zeigt hierfür eine in der Literatur häufig verwendete Konvention [16, 17].



**Abbildung 2.1:** Standardkoordinatensysteme aus der Literatur. Blau zeigt die kartesischen Koordinaten, rot zeigt die sphärischen Koordinaten als C-Ebenensystem.

In diesem Fall ist der Pol des sphärischen Koordinatensystems entlang der z-Achse ausgerichtet. Die Höhenwinkel  $\vartheta$  sind definiert von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ . Die Definition des Azimuts  $\varphi$  liegt zwischen  $-180^\circ$  und  $180^\circ$ , wobei die x-Achse entlang  $\varphi = 0^\circ$  ausgerichtet ist. Dieses sphärische Koordinatensystem entspricht dem C-Ebenensystem [18]. In der hier vorliegenden Dissertation werden allerdings hauptsächlich KFZ-Goniophotometer verwendet, die im A-Ebenensystem messen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Konvention nach Abbildung 2.2 angewandt.



**Abbildung 2.2:** Definition der verwendeten Koordinatensysteme. Das dargestellte sphärische Koordinatensystem entspricht einem A-Ebenensystem. Blau zeigt die kartesischen Koordinaten, rot zeigt die sphärischen Koordinaten.

Es handelt sich dabei um ein rechtsdrehendes Koordinatensystem, wobei die optische Achse einer Lichtquelle oder eines Goniophotometers stets entlang der z-Achse ausgerichtet ist. Die Höhenwinkel  $\vartheta$

sind von  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$  definiert, der Azimut  $\varphi$  liegt weiterhin zwischen  $-180^\circ$  und  $180^\circ$ . Neben dem A- und C-Ebenensystem existiert für die Darstellung von sphärischen Koordinaten außerdem das B-Ebenensystem [18]. Grundlegend unterscheiden sich die Ebenensysteme dabei in der Lage des Pols bezogen auf die optische Achse der Lichtquelle. Im A-Koordinatensystem zeigt die optische Achse zum Äquator. Die Pole befinden sich, ähnlich der Breiten- und Längengraudeinteilung auf der Erdkugel, ober bzw. unterhalb der optischen Achse. Bei B-Koordinatensystemen befinden sich die Pole links und rechts der optischen Achse, während bei einem C-Koordinatensystem die optische Achse entlang des Pols ausgerichtet ist [17, 18].

Die Transformationsvorschrift  $\Psi_A$  zur Umrechnung von sphärischen Koordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}_{sph} = (\varphi, \vartheta, d)$  des A-Koordinatensystems in kartesische Koordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}_{kart} = (x, y, z)$  entsprechend Abbildung 2.2 ist

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \vartheta \\ d \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{x}}_{sph} = \Psi_A(\tilde{\mathbf{x}}_{kart}) = \begin{pmatrix} \text{atan2}(x, z) \\ -\text{atan2}\left(y, \sqrt{x^2 + z^2}\right) \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Wobei  $\text{atan2}$  einer Erweiterung der inversen Winkelfunktion des Arkustangens entspricht, bei der sichergestellt wird, dass sich der  $\varphi$ -Winkel im richtigen Quadranten befindet. Zur Rücktransformation wird  $\Psi_A^{-1}$  verwendet:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{x}}_{kart} = \Psi_A^{-1}(\tilde{\mathbf{x}}_{sph}) = \begin{pmatrix} \sin(\varphi) \sqrt{d^2 - \sin(\vartheta)^2} \\ -\sin(\vartheta) \\ \cos(\varphi) \sqrt{d^2 - \sin(\vartheta)^2} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

## 2.4 LVK-MESSSYSTEME

Zur Messung einer LVK werden verschiedene Methoden angewandt [19]. Typisch sind Goniophotometer, bestehend aus einem photometrischen Detektor und einem Goniometer. Mit dem Goniometer wird die Orientierung zwischen der Testquelle und dem Detektor verändert, sodass zu jeder Raumrichtung der Quelle ein photometrischer Messwert erfasst werden kann. In den meisten Anwendungen wird die Testquelle mit dem Goniometer in Bezug zu einem ortsfesten Detektor um ihren Lichtschwerpunkt rotiert. Genauso kann aber auch die Testquelle ortsfest sein und ein Goniometer den Detektor um den Lichtschwerpunkt der Testquelle rotieren [18]. Zur Einhaltung des photometrischen Entfernungsgesetztes ist entsprechend Absatz 2.2 ein ausreichender Mindestmessabstand erforderlich.

Die Klassifizierung von Goniophotometern erfolgt durch die Unterscheidung des Messrasters. Dieses ergibt sich automatisch durch die Goniometerbewegung. Je nachdem ob die Anordnung der gemessenen Raumrichtungen einem A-, B- oder C-Ebenensystem entspricht, wird zwischen Typ-A, -B oder -C Goniometer unterschieden (vgl. Absatz 2.3) [20]. In dieser Arbeit werden Typ-A Goniometer verwendet. Eine typische Realisierung ist das KFZ-Goniophotometer GO-H 1660 der Firma *LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin* entsprechend Abbildung 2.3. Hierbei wird die Lichtquelle auf dem Goniometer montiert und ihr Lichtschwerpunkt über die xyz-Lineartischachsen in das Goniometerdrehzentrum justiert. Während der Messung sind diese Achsen arretiert und die Quelle wird nur über ihre Rotationsachsen

bewegt. Die horizontale Rotationsachse sitzt dabei auf der vertikalen Rotationsachse. Ist der Detektor entlang der optischen Achse des Goniometers angebracht, befinden sich die anfahrbaren Messpositionen der Lichtquelle in einem A-Koordinatensystem um ihren Lichtschwerpunkt [21].



**Abbildung 2.3:** Typ-A Goniophotometer GO-H 1660 mit zwei Rotationsachsen und drei Translationsachsen.

Um in einem B- oder C-Ebenensystem zu messen, kann entweder die Anordnung der Achsen, die Position des Detektors oder die Orientierung der Lichtquelle verändert werden. Eine Spezialanwendung eines Goniometers ist ein Drehspiegelgoniophotometer, bei dem das Goniometer die Quelle bewegt, durch die Messung über einen Spiegel aber die Brennlage der Quelle konstant gehalten wird. So entspricht das Messraster einem C-Ebenensystem. Ebenso ist das Roboter Goniophotometer der *Physikalisch Technischen Bundesanstalt* eine Spezialanfertigungen mit deutlich flexibleren Anwendungsmöglichkeiten [22].

Während die eben beschriebenen Goniophotometer meist mit Einkanal-Photometermessköpfen entsprechend Abbildung 2.4 ausgestattet sind, werden auch kamerabasierte Mehrkanal-Messsysteme mit Leuchtdichtemesskameras (engl. „*Imaging Luminance Measurement Device*“, ILMD) entsprechend Abbildung 2.5 eingesetzt [23–25].



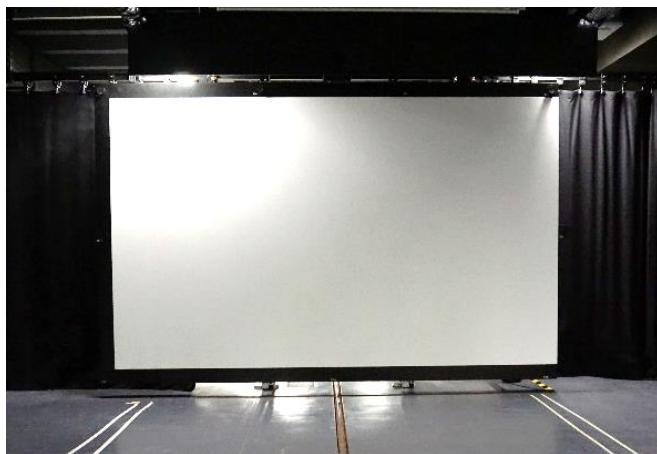
**Abbildung 2.4:** Abbildung eines Photometerkopfs.

**Abbildung 2.5:** Abbildung einer Leuchtdichtemesskamera (Bild entnommen aus [26]).

In Verbindung mit einem weiß-lambertsch-reflektierenden Messschirm, entsprechend Abbildung 2.6, der als Detektorebene verwendet und von der Leuchtdichtemesskamera betrachtet wird, können so ganze Raumwinkelbereiche auf einmal erfasst werden. Durch die Vielzahl an Messkanälen wird nicht mehr automatisch in einem A-, B- oder C-Ebenensystem gemessen. Zur Erfassung großer Raumwinkelbereiche ist aber dennoch ein Goniometer notwendig.

Darüber hinaus bieten Leuchtdichtemesskameras die Möglichkeit LVKs mit Nahfeld-Goniophotometern, in Kompaktmessplätzen oder in einem Differential-Goniophotometer zu bestimmen. Da es sich

hierbei aber um spezielle Ausführungen handelt, werden diese LVK-Messsysteme nicht weiter beschrieben und auf die Literatur verwiesen [19, 27–31]. Mit welchem Goniophotometer die LVK einer Testquelle schlussendlich gemessen wird, hängt von der Lichtquellengröße, einer geforderten stabilen Brennlage, der Messnorm, dem Messzeitbedarf, aber auch der geforderten Messgenauigkeit ab.

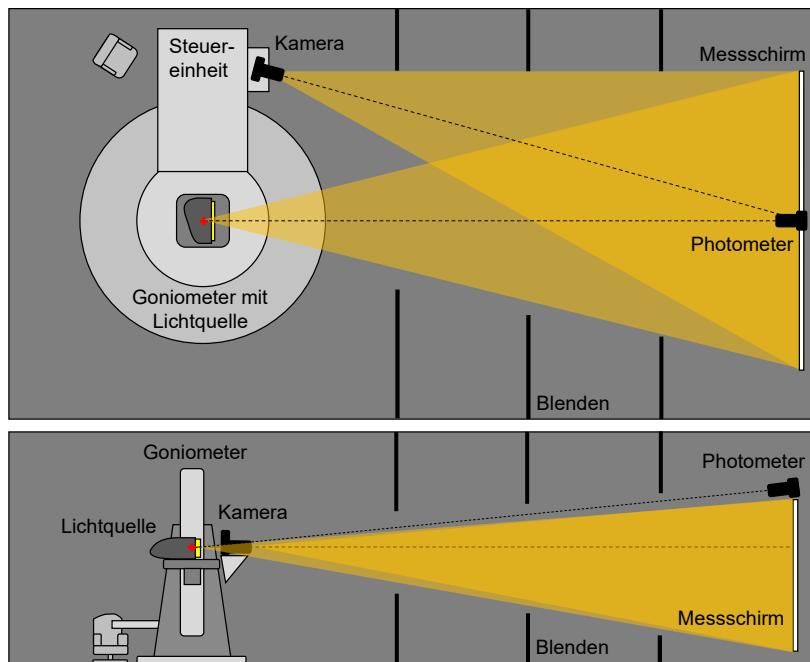


**Abbildung 2.6:** Messschirm über den die LVK einer Lichtquelle bei einer kamerabasierten LVK-Messung aufgenommen wird.

### 2.4.1 EINKANAL- UND MEHRKANALMESSUNG

Zum aktuellen Stand der Technik gehören photometerkopf- und kamerabasierte Goniophotometer, mit jeweils unterschiedlichen Vor- und Nachteilen. Daher kann es sinnvoll sein beide Messmethoden zu kombinieren [7]. Abbildung 2.7 zeigt den schematischen Aufbau

eines typischen KFZ-Goniophotometers ausgestattet mit beiden Messverfahren. Das Photometer ist in großer Entfernung knapp oberhalb der optischen Achse ausgerichtet, der Messschirm des kamera-basierten Detektors ist in großer Entfernung senkrecht zur optischen Achse ausgerichtet und wird von der am Goniometer montierten Leuchtdichtemesskamera betrachtet.



**Abbildung 2.7:** Schematische Darstellung eines kombinierten Messsystems bestehend aus photometerkopfbasierter Einkanalmessung und kamerabasierter Mehrkanalmessung.

Bei einer Messwerterfassung durch das Photometer fährt das Goniometer die Goniometerkoordinate  $(H, V)$  an.  $H$  ist die Koordinate der horizontalen Drehachse, die direkt in den Azimut  $\varphi$  übersetzt werden kann.  $V$  ist die Messkoordinate der vertikalen Drehachse, die direkt in den Polarwinkel  $\vartheta$  übersetzt werden kann. Bei einem nicht direkt entlang der optischen Achse ausgerichteten Photometer, ist allerdings eine Offsetkorrektur notwendig. Zur Erfassung einer LVK-Schnittebene werden Linienscans gefahren. Dafür wird eine Messkoordinate festgehalten während über die zweite Koordinate gescannt wird. Sollen Raumwinkelbereiche gemessen werden, müssen mehrere Linienscans aufgenommen und zusammengesetzt werden. Die Messzeit korreliert dabei stark mit der Messbereichsgröße sowie der festgelegten Schrittweite. Die Auflösung entlang einer Linie ergibt sich über die Winkelgeschwindigkeit des Goniometers und ist über die Integrationszeit des Photometers und dessen Durchmesser begrenzt. Die Auflösung orthogonal zur Linie wird durch die Größe des Photometers bestimmt. Unter Umständen können so Messzeiten von mehreren Stunden bis Tagen entstehen. Das Photometer ist durch die Verwendung eines Tubus nur geringfügig streulichtanfällig.

Bei der Verwendung eines kamerabasierten Detektors wird ein großer Raumbereich der LVK auf einmal erfasst. Soll jedoch die LVK eines Raumwinkelbereichs erfasst werden, der größer ist als der Raumwinkelbereich des Messschirms, müssen entsprechend Abbildung 2.8 mehrere Einzelbilddaunahmen zusammengesetzt werden. Dieses Vorgehen wird als „Merging“ oder „Stitching“ bezeichnet [7, 24] und lässt sich mathematisch darstellen als funktionaler Zusammenhang

$\rho_{H,V}$ , der die Lichtstärken eines einzelnen LVK-Segments  $I_{H,V}(\varphi_s, \vartheta_s)$  das unter den Goniometerkoordinaten  $(H, V)$  aufgenommen wurde in Lichtstärken der LVK  $I(\varphi, \vartheta)$  übersetzt.

$$I(\varphi, \vartheta) = \rho_{H,V} \left( I_{H,V}(\varphi_s, \vartheta_s) \right). \quad (2.5)$$

Für ein Typ-A Goniometer kann diese Gleichung mit den Transformationen aus Gleichung (2.3) und (2.4) als

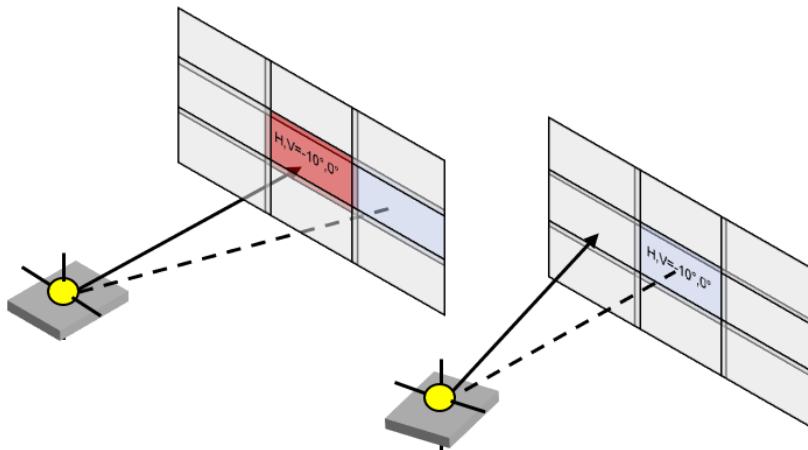
$$I(\varphi, \vartheta) = \Psi_A \left( R_y(H) R_x(V) \Psi_A^{-1} \left( I_{H,V}(\varphi_s, \vartheta_s) \right) \right) \quad (2.6)$$

ausgedrückt werden, wobei  $R_x(V)$  und  $R_y(H)$  den Rotationsmatrizen zur Rotation um die vertikale bzw. horizontale Goniometerachse entsprechen. So ist eine LVK-Messung selbst eines großen Raumwinkelbereichs innerhalb weniger Minuten möglich. Dem Messgeschwindigkeitsvorteil wiederum steht eine Streulichtanfälligkeit des kamerabasierten Detektors mit Einbußen im Kontrast innerhalb des Bildes gegenüber. Ein schwarzer Raumanstrich sowie Raumblenden verbessern zwar den Streulichteinfluss auf die Messung, ein bestmöglicher Kontrast lässt sich aber erst mittels mathematischer Kamera- und Raumstreulichtkorrektur erreichen [32, 33]. Aus diesen Gründen ist ein optimales Messsystem nur durch Kombination beider Messsysteme erreichbar [7].

Wichtig ist es an dieser Stelle anzumerken, dass Gleichung (2.5) bzw. Gleichung (2.6) nicht für die Rotation einer LVK  $I(\varphi, \vartheta)$  entsprechend der Goniometerkoordinaten  $H$  und  $V$  verwendet werden kann. Hierfür muss die inverse Funktion  $\rho_{H,V}^{-1}$  angewandt werden:

$$\begin{aligned}
 I_{H,V}(\varphi', \vartheta') &= \rho_{H,V}^{-1}(I(\varphi, \vartheta)) \\
 &= \Psi_A \left( R_x(-V) R_y(-H) \Psi_A^{-1}(I(\varphi, \vartheta)) \right). \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

$I_{H,V}(\varphi', \vartheta')$  beschreibt die rotierte LVK in einem übergeordneten Weltkoordinatensystem mit den Raumrichtungen  $(\varphi', \vartheta')$ .



**Abbildung 2.8:** Zusammensetzen einer LVK aus den Einzelbildaufnahmen mittels Stitching.

## 2.5 MESSUNSICHERHEIT

Ziel einer Messung ist ein vergleichbarer, valider und quantifizierbarer Messwert. Messungen sind allerdings aufgrund von Umwelteinflüssen mit Fehlern behaftet und darüber hinaus von Faktoren wie beispielsweise dem Messzeitpunkt abhängig. Diese Fehler lassen sich in systematische und zufällige Fehler unterteilen. Sind systematische

Fehler bekannt, können diese korrigiert werden. Zufällige Fehler hingegen werden mit statistischen Methoden untersucht. Dazu müssen alle Informationen über eine Messung gesammelt werden. Es wird dann, basierend auf den physikalischen Beziehungen, ein Messmodell aufgestellt, mit dessen Hilfe die Messunsicherheit des Gesamtsystems berechnet wird. Die Angabe eines Messwerts ist erst vollständig, wenn die Unsicherheit sowie alle notwendigen Informationen der Messung mit angegeben werden [9].

### 2.5.1 GUM

Der „*Guide to the expression of uncertainty in measurement*“ (GUM) ist das internationale Standardwerk zur Berechnung von Messunsicherheiten [9]. In ihm wird das systematische Vorgehen zur Berechnung der Messunsicherheit beschrieben. Voraussetzungen sind ein lineares Messmodell sowie die Annahme normalverteilter Eingangsgrößen. Liegt kein lineares Messmodell vor, muss das Modell linearisiert werden. Zur Berechnung der Messunsicherheit wird das Messmodell, d.h. der funktionale Zusammenhang der Messgröße  $Y$  mit den Eingangsgrößen  $X_i$ , aufgestellt:

$$Y = f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_N). \quad (2.8)$$

Darüber hinaus wird die Standardunsicherheit  $u(x_i)$  jedes Schätzwertes  $x_i$  der Eingangsgröße  $X_i$  ermittelt. Dies kann über Typ A oder Typ B der Bewertung für Standardunsicherheiten erfolgen. Sind die

ermittelten Eingangsgrößen nicht normalverteilt, müssen diese entsprechend in eine Normalverteilung umgerechnet werden. [9]

Durch das Messmodell wirken sich die Messabweichungen der Eingangsgrößen unterschiedlich auf die Messabweichung der Ausgangsgröße aus. Ist das Messmodell nichtlinear, werden Abhängigkeiten aus dem Messmodell über eine Taylorentwicklung und dem Abbruch nach dem ersten Glied berechnet. Sie ergeben die Sensitivitätskoeffizienten  $c_i$  und beschreiben wie stark die Eingangsgröße  $X_i$  die Messgröße  $Y$  beeinflusst:

$$c_i = \frac{\delta f}{\delta x_i}. \quad (2.9)$$

Die kombinierte Standardmessunsicherheit der Ausgangsgröße  $u(y)$  kann so über die Fehlerfortpflanzung als Quadratwurzel der kombinierten Varianz  $u^2(y)$  berechnet werden.  $u^2(y)$  wiederum berechnet sich aus den Sensitivitätskoeffizienten und den Standardmessunsicherheiten der Eingangsgrößen mit

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i). \quad (2.10)$$

Wenn die Eingangsgrößen korreliert sind, sind darüber hinaus die Korrelationen  $r(x_i, x_j) = u(x_i, x_j)/u(x_i)u(x_j)$  zu berücksichtigen. Außerdem wird häufig die Angabe der erweiterten Messunsicherheit  $U$  gefordert. Anhand des Erweiterungsfaktors  $k$  berechnet sie sich aus der kombinierten Standardmessunsicherheit  $u(y)$  mit

$$U = k \cdot u(y). \quad (2.11)$$

Das Ergebnis der Messung kann dann mit  $Y = y \pm U$  ausgedrückt werden. Es besagt, dass das zu erwartende Messergebnis entsprechend des zum Erweiterungsfaktor zugehörigen Konfidenzintervalls von beispielsweise 95% oder 99% innerhalb des angegebenen erweiterten Messunsicherheitsintervalls liegt. Der Erweiterungsfaktor  $k$  ist darüber hinaus abhängig von der Dimensionalität der Ausgangsgröße [34].

### 2.5.2 MONTE-CARLO-METHODE

Einige Messmodelle sind derartig komplex, dass sie sich nicht einfach in lineare Modelle überführen lassen. Möglich ist auch, dass sie Eingangsgrößen mit asymmetrischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen besitzen oder sie nur als „BlackBox“ existieren. Ein mögliches Beispiel hierfür wäre z.B. vorhandener Programmcode. Unter diesen Umständen muss die Monte-Carlo-Methode angewandt werden. Hierbei wird die Messgröße  $Y$  über das Messmodell  $f$  für  $M$  Simulationsschritte mit statistisch generierten Werten für die Eingangsgrößen  $X_i$  ermittelt. Die Ziehung der Eingangsgröße  $x_{i,r}$  für den Simulationsdurchlauf  $r$  ergibt sich aus der Erwartung  $x_i$  sowie einer Abweichung  $\Delta x_{i,r}$ , berechnet aus der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtevertteilung  $g_{X_i}(\xi_r)$ . Über die simulierten Messergebnisse  $y_r$  kann im Anschluss eine statistische Auswertung erfolgen. Ist  $\bar{y}$  der aus den simulierten Messergebnissen ermittelte Mittelwert, berechnet sich die kombinierte Standardmessunsicherheit zu:

$$u(y) = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^M (y_r - \bar{y})^2}{M - 1}}. \quad (2.12)$$

Je nach Anzahl an Simulationsschritten ist es möglich den Mittelwert, die Standardabweichung, aber auch die Kovarianzmatrix für mehrdimensionale Messgrößen inkrementell zu berechnen, um Speicherplatz zu sparen [35].

### 2.5.3 MEHRDIMENSIONALE MESSGRÖßen

Die Bewertung mehrdimensionaler Messgrößen  $Y = [Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_m]$  erfolgt anhand der Kovarianzmatrix, da die Ausgangsgrößen korreliert sein können. Die Kovarianz zwischen zwei Ausgangsgrößen berechnet sich mit:

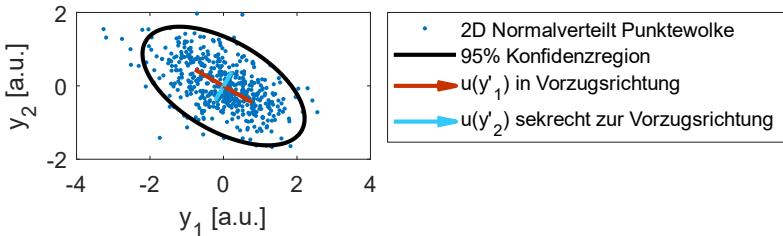
$$u(y_i, y_j) = \frac{\sum_{r=1}^M (y_{i,r} - \bar{y}_i)(y_{j,r} - \bar{y}_j)}{M - 1}. \quad (2.13)$$

Anschaulich lässt sich dieser Zusammenhang, wie in Abbildung 2.9 gezeigt, für zweidimensionale Messgrößen ( $m = 2$ ) darstellen. Während die blauen Messpunkte einem Auszug aus der gesamten Messpunkteverteilung der Messergebnisse entsprechen, stellt die schwarze Ellipse die Konfidenzregion mit einer 95%-igen Überdeckungswahrscheinlichkeit dar. Mathematisch ist diese Region über die Kovarianzmatrix  $U_y$  gegeben. Für die in Abbildung 2.9 dargestellte Messpunkteverteilung lautet sie:

$$U_y = \begin{bmatrix} u(y_1)^2 & u(y_1, y_2) \\ u(y_2, y_1) & u(y_2)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,81 & -0,33 \\ -0,33 & 0,44 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Die Matrixeinträge der Hauptdiagonalen entsprechen der Varianz der Messgrößen  $y_1$  bzw.  $y_2$ . Um den statistischen Zusammenhang besser darzustellen, werden für gewöhnlich die Korrelation als die standardisierte Kovarianz angegeben

$$r(y_i, y_j) = \frac{u(y_i, y_j)^2}{\sqrt{u(y_i)u(y_j)}}. \quad (2.15)$$



**Abbildung 2.9:** Konfidenzregion einer zweidimensionalen Messgröße mit den Standardabweichungen der Vorzugsrichtungen.

Für die in Abbildung 2.9 dargestellten Messgrößen ist die Korrelationsmatrix:

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} 1 & r(y_2, y_1) \\ r(y_1, y_2) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0,54 \\ -0,54 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

In dieser Dissertation wird außerdem eine andere Darstellung der Unsicherheiten zwischen zwei Ausgangsvariablen gewählt. So wird zur Berücksichtigung der Korrelation auf Basis einer Eigenwertzerlegung der Kovarianzmatrix die Unsicherheiten der Vorzugsrichtung  $y'_1$  bzw. der Nebenrichtung  $y'_2$  der Konfidenzellipse bestimmt [36].

Diese sind die in Abbildung 2.9 in rot und blau dargestellten Richtungen. Die Angabe der Unsicherheit erfolgt dann mit  $u(y'_1) = 0,01$  bzw.  $u(y'_2) = 0,005$ . Unter Beachtung des Erweiterungsfaktors für mehrdimensionale Messgrößen entsprechend Tabelle 2.2 ergibt sich also  $U'_1 = 0,025$  und  $U'_2 = 0,012$  für eine 95%-ige Überdeckungswahrscheinlichkeit. Zusätzlich wird für die Korrelation der Rotationswinkel  $\alpha$  zwischen der horizontalen Koordinatensystemachse und der Vorzugsrichtung angegeben. In dem in Abbildung 2.9 dargestellten Fall beträgt die Ellipsenorientierung  $\alpha = -30^\circ$ .

**Tabelle 2.2:** Erweiterungsfaktoren für mehrdimensionale ellipsoide Überdeckungsregionen für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von  $p = 0,95$  und  $p = 0,99$ .

| $m$ | $k_p(p = 0,95)$ | $k_p(p = 0,99)$ |
|-----|-----------------|-----------------|
| 1   | 1,96            | 2,57            |
| 2   | 2,45            | 3,03            |
| 3   | 2,8             | 3,36            |

## 2.6 KINEMATIK

Die Kinematik ist die Lehre der Bewegungen, wobei speziell in der Robotik die Vorwärtskinematik verwendet wird. Mit ihrer Hilfe lässt sich für einen Roboterarm die Position des letzten Elements aus den Gelenkwinkeln des Roboters berechnen [37]. Das zugehörige Bewegungssystem ist eine kinematische Kette bestehend aus festen und freien Translationen  $t$  und Rotationen  $R$ , die in Transformationen  $T$  zusammengefasst werden. Eine Transformation  $T_i$  beschreibt

demnach die Überführung des Koordinatensystems  $\tilde{X}_i$  in das Koordinatensystem  $\tilde{X}_{i+1}$ :

$$\tilde{X}_{i+1} = T_i * \tilde{X}_i. \quad (2.17)$$

Für die zugehörige Transformationsvorschrift werden homogene Matrizen verwendet, die einer Konvention unterliegen. Allgemein lassen sich homogene Transformationen aber wie folgt darstellen:

$$T_i = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}(\theta_x, \theta_y, \theta_z) & \mathbf{t}(x, y, z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.18)$$

wobei die Rotationsreihenfolge der Rotationsmatrix hier  $x \rightarrow y \rightarrow z$  entspricht:

$$\mathbf{R}(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = \mathbf{R}_z(\theta_z) \mathbf{R}_y(\theta_y) \mathbf{R}_x(\theta_x). \quad (2.19)$$

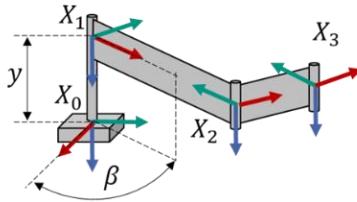
$\theta_x$ ,  $\theta_y$  und  $\theta_z$  sind die positiv definierten Rotationswinkel um die Achsen  $x, y$  und  $z$  des Koordinatensystems. Somit ergibt sich die Transformationsmatrix  $T_i$  mit den Koeffizienten der Rotationsmatrix  $r_{ij}$  zu:

$$T_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

Indem  $n$  Transformationen hintereinander geschaltet werden, ergibt sich die Gesamttransformationskette des Roboterarms oder eines anderen Bewegungssystems, mit dessen Hilfe das Koordinatensystem  $\tilde{X}_0$  in das Koordinatensystem  $\tilde{X}_n$  überführt wird:

$$T_{ges} = T_{n-1 \rightarrow n} \cdot \dots \cdot T_{1 \rightarrow 2} \cdot T_{0 \rightarrow 1}. \quad (2.21)$$

Abbildung 2.10 zeigt das Beispiel einer solchen kinematischen Kette.



**Abbildung 2.10:** Beispiel einer kinematischen Kette.

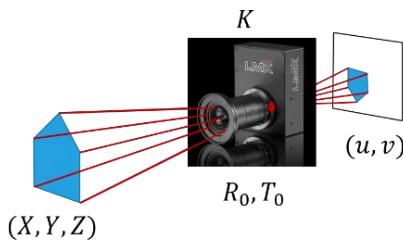
Eine besondere Form der Beschreibung einzelner Transformationen stellt die in der Robotik häufig verwendete Denavit-Hartenberg-Konvention dar. Ihr liegen definierte Eigenschaften zugrunde die besonders die Berechnung der Vorwärtsskinematik vereinfachen [37]:

- Die  $z_{i-1}$ -Achse ist die Rotationsachse des  $i$ -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.

## 2.7 PHOTOGRAMMETRIE

Photogrammetrische Methoden sind kontaktlose Messmethoden zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Objekten mithilfe von Kameras [38]. Zugrunde liegen ihnen Kameramodelle, die Bildpunkte  $(u, v)$  aus Kameraaufnahmen mit Koordinaten von realen Objekten  $(x, y, z)$  in Verbindung bringen. Verknüpft werden dabei Bildpunkte mit Objektpunkten über die intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter. Die extrinsischen Kameraparameter sind die

Kameraposition  $T_0$  und die Kameraorientierung  $R_0$ . Die intrinsischen Kameraparameter  $K$  setzen sich zusammen aus der Kamerakonstante, dem Bildhauptpunkt und den Funktionen zur Verzeichnungskorrektur. Abbildung 2.11 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Natürlich können beliebig andere Kameramodelle verwendet werden [39, 40].



**Abbildung 2.11:** Darstellung des Lochkameramodells als Basis photogrammetrischer Methoden (Kamerabild entnommen aus [26])

Werden bekannte Objektpunkte von einer Kamera mit bekannten intrinsischen Kameraparametern aufgenommen, kann die Kamerapose, bestehend aus Position und Orientierung, geschätzt werden. Dieses Vorgehen wird als *Rückwärtsschnitt* bezeichnet. Sind die intrinsischen Kameraparameter unbekannt, muss die Anzahl der Gleichungen erhöht werden. Erreicht wird dies über die Aufnahme bekannter Objektpunkte aus vielen verschiedenen Kameraposen. Dieses Vorgehen wird als *Bündelblockausgleich* bezeichnet und ist momentaner Stand der Technik [38].



---

## Kapitel 3

# METHODENVERGLEICH

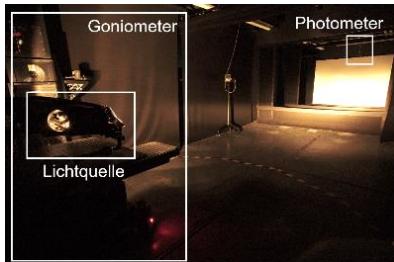
In diesem Kapitel werden die in der Arbeit verwendeten LVK-Messsysteme vorgestellt. Beide Messsysteme kombinieren einen photometerkopfbasierten- und einen kamerabasierten Detektor. Um einerseits die Detektortypen miteinander zu vergleichen und andererseits die Notwendigkeit der folgenden Analyse- und Korrekturverfahren hervorzuheben, wird mit jedem Messsystem eine Lichtquelle mit jeweils beiden Detektortypen vermessen. Der Vergleich erfolgt anhand der gemessenen LVK sowie der Messsystemparameter.

Die beiden verwendeten LVK-Messsysteme werden als Messsystem A und B bezeichnet. Messsystem A steht am *Lichttechnischen Institut* des *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, Messsystem B steht bei der Firma *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH* in Ilmenau. Beide Messsysteme bestehen aus Typ-A Goniometern sowie mindestens einem Photometer und einem kamerabasierten Detektor. Das Messsystem A konnte im Verlauf der Arbeit geometrisch präzise vermessen werden. Daher wird die folgende geometrische Unsicherheitsanalyse an diesem Messsystem erläutert. Das Messsystem B weist hingegen einige Besonderheiten auf, deren Berücksichtigung für eine Raumstreulichtkorrektur notwendig sind. Daher wird die Raumstreulichtkorrektur an diesem Messsystem erläutert.

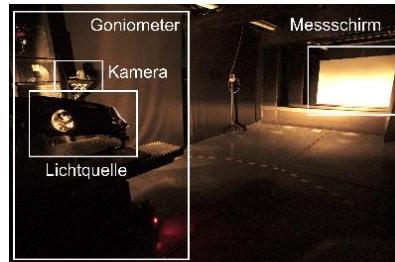
---

### 3.1 MESSSYSTEM A

Messsystem A besteht aus dem in Absatz 2.4 beschriebene Typ-A KFZ-Goniometer GO-H 1660 der Firma *LMT Lichtmesstechnik Berlin GmbH* mit Photometern in den typischen Messabständen von 5 m, 10 m, und 25 m. Zusätzlich ist ein  $3 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$  großer, weiß-lambertsch reflektierender Messschirm in 10 m Entfernung angebracht. Dieser Messschirm wird von einer am Goniometer montierten Leuchtdichitemesskamera betrachtet. So ist eine simultane Bereichsmessung von  $18^\circ \times 10^\circ$  möglich. Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 zeigen jeweils das Messsystem mit den zugehörigen Komponenten. Außerdem werden Raumblendensysteme eingesetzt um Raumstreulicht zu unterdrücken.



**Abbildung 3.1:** Messsystemkomponenten des photometerbasierten LVK-LVK-Messsystems.



**Abbildung 3.2:** Messsystemkomponenten des kamerabasierten LVK-Messsystems.

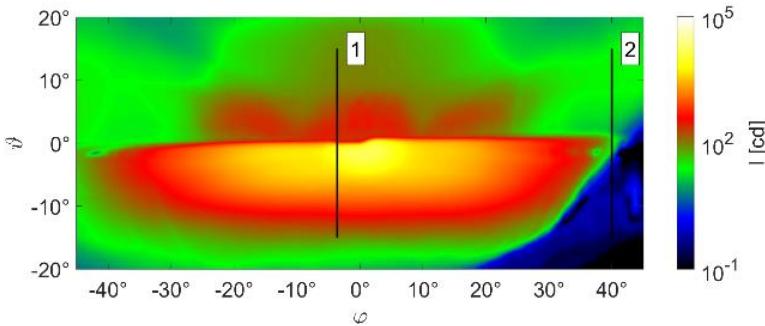
Um den Unterschied zwischen photometerkopfbasierten und kamerabasierten Messsystemen darzustellen wird zunächst die LVK-Messung der Abblendlichtverteilung eines KFZ-Frontscheinwerfers

vorgestellt. Hierzu wird die LVK in einem Winkelbereich von  $\varphi = \pm 60^\circ$  und  $\vartheta = \pm 25^\circ$  aufgenommen. Entscheidend dabei ist, dass die Position der Lichtquelle auf dem Goniometer zwischen beiden Messungen nicht verändert wird. Der Einfluss einer Lichtquellenfehljustage durch den Messtechniker ist somit ausgeschlossen. Für die Photometermessung in 10 m Entfernung wird eine Abtastung von  $0,1^\circ$  in beiden Raumrichtungen gewählt, wodurch sich eine Messzeit von ca. sieben Stunden ergibt. Aufgrund des Photometerkopfdurchmessers beträgt die Auflösung  $0,057^\circ$ . Das kamerabasierte Messsystem benötigt hingegen für die gleiche Messung weniger als 15 min bei einer Auflösung von  $0,0145^\circ$ . Für den direkten Vergleich der Messsysteme stellt Tabelle 3.1 die wichtigsten Parameter gegenüber [21, 41]. Um weitere Unterschiede herauszuarbeiten und die Untersuchungen dieser Arbeit zu begründen, werden die gemessenen LVKs in Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 in logarithmischer Falschfarbendarstellung gegenübergestellt.

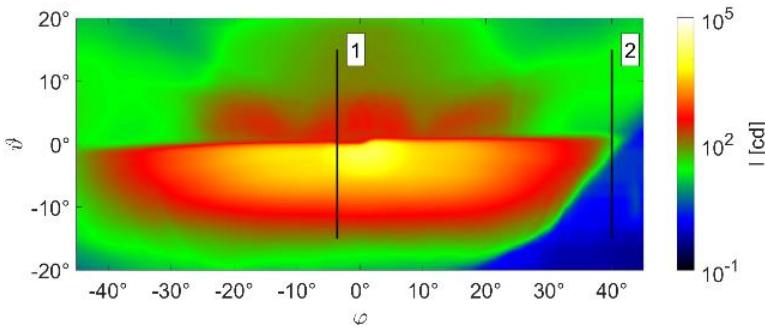
**Tabelle 3.1:** Methodenvergleich der LVK-Messsysteme mit Leuchtdichtemesskamera und Photometer.

| Messsystem   | Einkanalmes-sung     | Mehrkanalmes-sung            |
|--|----------------------|------------------------------|
| Detektor   | Photometer           | Kamera mit Messschirm        |
| Goniometer   | Typ A                | Typ A                        |
| Messabstand  | 5 m, 10 m, 25 m      | 10 m bis 10,18 m             |
| Auflösung  | $0,057^\circ$ (10 m) | $0,0145^\circ$               |
| Höchste Abtastung  | $0,01^\circ$         | $0,01^\circ$                 |
| Raumwinkelbereich einer Mess-aufnahme ( $d\varphi \times d\vartheta$ ) | -                    | $(18^\circ \times 10^\circ)$ |

---



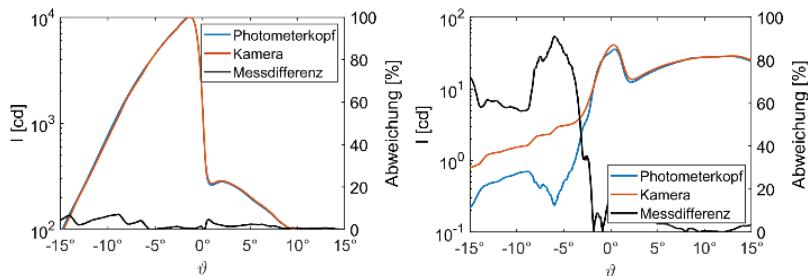
**Abbildung 3.3:** LVK einer Abblendlichtverteilung, aufgenommen mit dem Photometer des Messsystems A.



**Abbildung 3.4:** LVK einer Abblendlichtverteilung, aufgenommen mit der Kamera des Messsystems A.

Zur genaueren Analyse der Unterschiede ist allerdings die Betrachtung spezifischer Bereichen der LVK notwendig. Diese sind im Folgenden als LVK-Schnitte dargestellt. Der in Abbildung 3.5 dargestellte LVK-Schnitt 1 durch den Punkt B50-L zeigt bei genauer Betrachtung der Messdifferenz zwischen Photometer- und

Kameramessung eine gezackte Abweichung von bis zu 5 %. Diese systematische Messdifferenz lässt sich vermutlich auf verschobene Aufnahmen der kamerabasierten Messmethoden zurückführen. Die eindeutigen Ursachen dieser Differenzen sind allerdings nicht geklärt und zeigen die Notwendigkeit einer geometrischen Unsicherheitsanalyse. LVK-Schnitt 2 aus Abbildung 3.6 betrachtet einen LVK-Bereich mit niedriger Lichtstärke bis maximal 40 cd. Dabei zeigt sich für Lichtstärken unter 5 cd eine deutliche Abweichung der photometerbasierten zur kamerabasierten Messung von 60% bis 80%. Diese Abweichung lässt sich auf Raumstreulicht des kamerabasierten Messsystems zurückführen, was die Notwendigkeit einer Raumstreulichtkorrektur verdeutlicht.



**Abbildung 3.5:** Vergleich des LVK-Schnitts 1 aus den beiden vorherigen Abbildungen.

**Abbildung 3.6:** Vergleich des LVK-Schnitts 2 aus den beiden vorherigen Abbildungen.

### 3.2 MESSSYSTEM B

Messsystem B ist ein Typ-A Goniophotometer entsprechend Abbildung 3.7. Es ist in 25 m Entfernung mit einem Photometer ausgestattet. Außerdem befindet sich in 10 m Entfernung eine weiß-lambertsch reflektierende Messwand, die dem Messschirm des Messsystems A gleichzusetzen ist. Die Spezifikationen des Goniometers ähneln dem GO-H 1660 und werden daher nicht näher erläutert. Die Messwand ist mit  $40^\circ \times 14^\circ$  deutlich größer als die des Messsystems A. Eine Besonderheit ist, dass das Photometer entlang der optischen Achse des Goniometers ausgerichtet ist, wodurch die Messwand entsprechend Abbildung 3.8 mit einem „Loch“ versehen ist. Da prinzipiell jeder Raumteil Raumstreulicht erzeugt, gilt es diese Besonderheit in der Raumstreulichtkorrektur zu berücksichtigen.

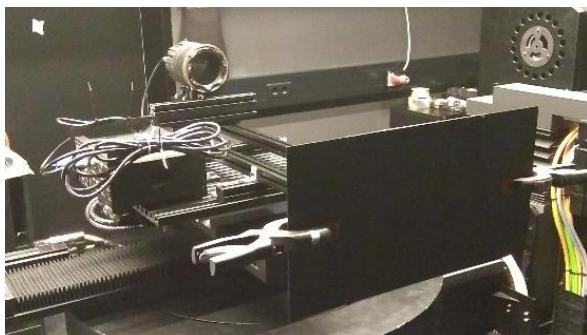
Um ebenfalls mit diesem Goniophotometer Unterschiede zwischen der photometerkopf- sowie der kamerabasierten LVK-Messmethode herauszuarbeiten, wird die in Abbildung 3.9 dargestellte Lichtquelle vermessen. Sie besteht aus dem Bühnenscheinwerfer X4-Atom der Firma *GLP German Light Products GmbH*, dessen fokussierbare Lichtverteilung auf einen Öffnungswinkel von  $34^\circ$  eingestellt ist [42]. Eine in 50 cm Entfernung fest mit der Lichtquelle verbundene Querblende schattet einen Teil der Lichtverteilung nahezu vollständig ab, sodass in diesem Raumwinkelbereich eine vernachlässigbare Lichtstärke erwartet wird. So soll explizit der Raumstreulichteffekt einer kamerabasierten LVK-Messmethode verdeutlicht werden.



**Abbildung 3.7:** Typ-A Goniometer der Firma *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH*.

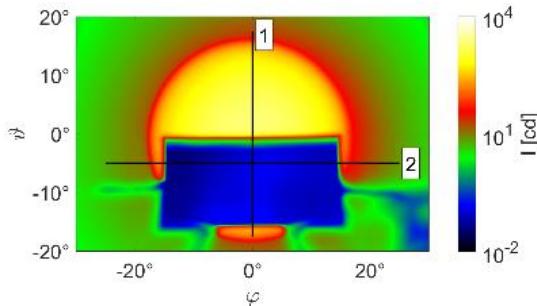


**Abbildung 3.8:** Teil der Messwand in 10 m Entfernung mit einem Loch entlang der optischen Achse des Goniometers für den Photometerkanal. Der Autor ist zum Größenvergleich mit im Bild.

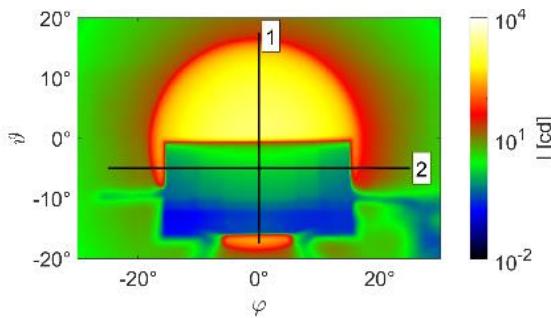


**Abbildung 3.9:** Konstruierte Lichtquelle bestehend aus dem Bühnenscheinwerfer X4-Atom, dessen optisches Linsensystem auf einen Öffnungswinkel von  $34^\circ$  eingestellt ist. Ein Teil der Lichtverteilung wird durch eine Blende abgeschattet um den Raumstreulichteinfluss untersuchen zu können.

Die mit dem photometerkopf- sowie dem kamerabasierten Detektor gemessenen LVKs sind in Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 in logarithmischer Falschfarbendarstellung abgebildet. Der „blaue“ LVK-Bereich in Abbildung 3.10 entspricht dem Blendenbereich.

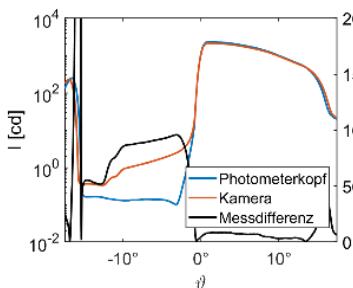


**Abbildung 3.10:** LVK des X4-Atom mit Querblende, aufgenommen mit dem Photometer des Messsystems B.

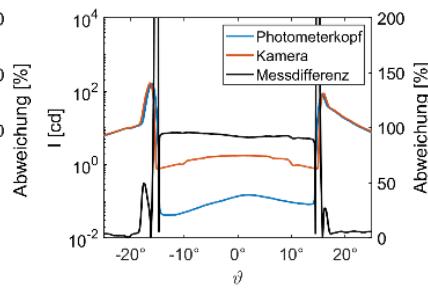


**Abbildung 3.11:** LVK des X4-Atom mit Querblende, aufgenommen mit der Kamera des Messsystems B.

Aus den LVK-Schnitten der erwartungsgemäß streulichtunanfälligen Photometermessung aus Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13 ist zu erkennen, dass in den Blendenbereichen Lichtstärken von 0,1 cd bis 0,2 cd zu erwarten sind. Bei der kamerabasierten Messmethode werden hingegen Lichtstärken zwischen 1 cd und 3 cd ermittelt. Dieser Offset ist dem Raumstreu Licht zuzuordnen, wodurch die Notwendigkeit der Raumstreu Licht Korrektur hervorgehoben wird. Außerdem zeigen sich an den Blendenkanten sehr große Abweichungen zwischen photometerkopf- und kamerabasierter LVK-Messmethode. Entlang dieser Raumrichtungen weist die LVK sehr hohe Gradienten auf, die anfällig für Einflüsse der photometrischen Grenzfernernung sind und somit auf den unterschiedlichen Messabstand zurückgeführt werden können. Somit zeigt sich die Notwendigkeit einer genaueren Analyse der photometrischen Grenzfernernung.



**Abbildung 3.12:** Vergleich des LVK-Schnitts 1 aus den beiden vorherigen Abbildungen mit berechneter Messdifferenz.



**Abbildung 3.13:** Vergleich des LVK-Schnitts 2 aus den beiden vorherigen Abbildungen mit berechneter Messdifferenz.



---

## Kapitel 4

# GEOMETRISCHE UNSICHERHEITSANALYSE

Die LVK, als eine von zwei Winkeln abhängige photometrische Größe, ist nach ihrer Definition abstandsunabhängig. Die messtechnische Erfassung einer LVK muss allerdings stets in endlicher Entfernung erfolgen. Dadurch haben aus geometrischer Sicht nicht nur die Raumrichtung sondern auch der Messabstand einen Einfluss auf das Messergebnis. Für eine geometrische Unsicherheitsanalyse ist es also naheliegend die geometrische Komponente nicht nur mit zwei Winkelkoordinaten, sondern, um den Messabstand miteinzubeziehen, als Detektorposition im Testquellenkoordinatensystem darzustellen<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Teile dieses Kapitels wurden in [43] bzw. [44] veröffentlicht und auf den Konferenzen *LuxJunior 2021* und *NEWRAD 2021* vorgestellt.

## 4.1 GEOMETRISCHE BEITRÄGE ZUR MESSUNSICHERHEIT EINER LVK-MESSUNG

Für eine Messunsicherheitsanalyse nach GUM wird entsprechend Absatz 2.5 das Modell der Auswertung benötigt. Im Fall einer LVK-Messung beruht das Grundmodell auf dem photometrischen Entfernungsgesetz nach Gleichung (2.2), und lässt sich durch:

$$I(\varphi, \vartheta) = k_E \cdot Y_E(\varphi, \vartheta) \cdot r^2 \quad (4.1)$$

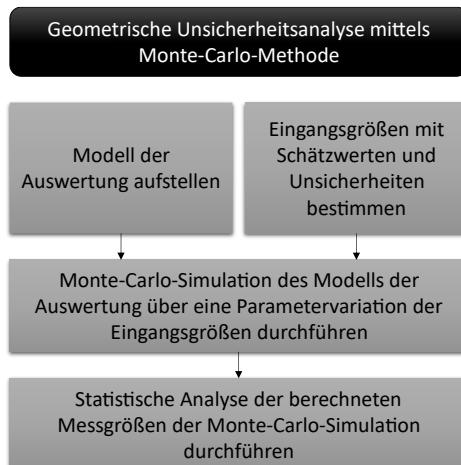
ausdrücken. Die Lichtstärkeverteilung  $I$  berechnet sich aus dem Detektorrückgabewert  $Y_E$ , der Messrichtung  $(\varphi, \vartheta)$ , dem Kalibrierfaktor  $k_E$  zur Umrechnung des Detektorrückgabewerts in eine photometrische Größe und dem Messabstand  $r$ . Dabei ist zu beachten, dass beliebig detailliertere Modelle aufgestellt werden können. Besonders für die richtungsunabhängige Messung eines Lichtstärkewerts [12, 45, 46], aber auch für die Lichtstärkeverteilung, finden sich in der Literatur Messmodelle [47]. Am Beispiel des Grundmodells lässt sich dennoch erkennen, dass neben den das Photometer betreffenden Eingangsgrößen, drei geometrische Eingangsgrößen einen Einfluss auf das Messergebnis haben. Eine Unsicherheit der Messrichtung  $(u(\varphi), u(\vartheta))$ , aber auch die Unsicherheit des Messabstands  $u(r)$  tragen zur kombinierten Messunsicherheit einer LVK-Messung bei. In diesem Kapitel soll daher der Unsicherheitsbeitrag der geometrischen Komponente einer LVK-Messung genauer untersucht werden.

## 4.2 BERECHNUNGSMETHODE

Die geometrische Komponente einer LVK-Messung ist eine dreidimensionale Größe, bestehend aus der Messrichtung  $(\varphi, \vartheta)$  sowie dem Messabstand  $r$ . Wird der Lichtschwerpunkt der Testquelle als Koordinatensystemursprung betrachtet, entsprechen  $(\varphi, \vartheta, r)$  der Detektorposition in sphärischen Koordinaten  $Y_{Q,sph}$ . Diese kann entsprechend Gleichung (2.4) in kartesischen Koordinaten als  $Y_Q = (x, y, z)$  ausgedrückt werden. Mit dem Index 'Q' wird gekennzeichnet, dass es sich dabei um das Koordinatensystem der Testquelle handelt. Für eine Unsicherheitsberechnung der geometrischen Komponente einer LVK-Messung kann daher die Lage des Detektors im Bezug zur Testquelle untersucht werden. Grundlage für die nachfolgenden Berechnung liefern Unsicherheitsabschätzungen der Kinematik von Robotern [48] oder anderer Werkzeugmaschinen wie beispielsweise parallelkinematischer Maschinen [49].

Zur geometrischen Unsicherheitsberechnung muss zunächst ein Modell inklusive der am Messvorgang beteiligten Komponenten, d.h. Quelle, Goniometer und Detektor, aufgestellt werden. Dieses Modell lässt sich über eine kinematische Kette nach Absatz 2.6 realisieren und wird als kinematisches Modell des Messsystems bezeichnet. Um den gesamten Messvorgang abzubilden, ist neben der Simulation der Messung auch die Simulation der Justage des Messsystems notwendig, da in beiden Vorgängen unsicherheitsbehaftete Eingangsgrößen einen Messunsicherheitsbeitrag liefern. Beide kinematischen Modelle ergeben zusammen das geometrische Modell der Auswertung. Zur

Bestimmung der Schätzwerte und Unsicherheiten der Eingangsgrößen werden die in Absatz 4.7 beschriebenen Methoden verwendet. Da das Modell nichtlinear ist und die Ausgangsgrößen mehrdimensional sind, wird die geometrische Messunsicherheitsanalyse über die Monte-Carlo-Methode entsprechend GUM Supplement 2 (vgl. Absatz 2.5.3) durchgeführt [34]. Das Ergebnis ist für jede Messrichtung ein Satz aus Detektorpositionen, aus denen sich die geometrischen Messunsicherheiten ( $u(\varphi), u(\vartheta), u(r)$ ) einer LVK-Messung mittels statistischer Methoden berechnen lassen. Dieses Vorgehen ist Abbildung 4.1 zu entnehmen und wird im Folgenden detailliert anhand des dort dargestellten Verlaufs beschrieben. Da die Grundlage einer jeden Messung die Justage des Messsystems ist, werden zunächst mögliche geometrische Justagemethoden erläutert.



**Abbildung 4.1:** Ablaufplan der geometrischen Unsicherheitsanalyse mittels Monte-Carlo-Methode.

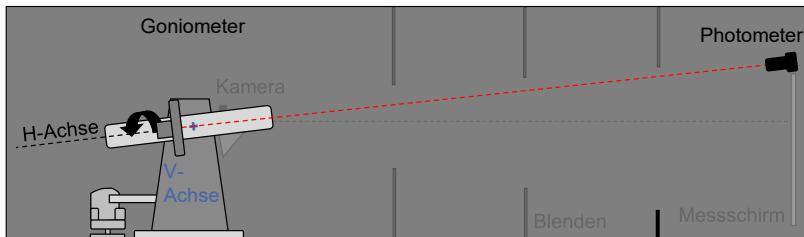
## 4.3 JUSTAGEMETHODEN

Jedes LVK-Messsystem muss vor Inbetriebnahme justiert werden. Dabei wird das Messsystem zuerst geometrisch und anschließend photometrisch justiert. Ziel der geometrischen Justage ist es, einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Messkoordinate  $(\varphi, \vartheta)$  und der Goniometerkoordinate  $(H, V)$  zu erstellen. Dafür muss die Lage des Photometers mit dem Drehzentrum des Goniometers in Beziehung gesetzt werden. Ist das Photometer beispielsweise direkt entlang der optischen Achse des Goniometers ausgerichtet, so entspricht die Goniometerposition der Messkoordinate:  $(\varphi, \vartheta) = (H, V)$ . Bei mehrdimensionalen oder nicht direkt entlang der optischen Achse des Goniometers ausgerichteten Detektoren, muss eine Richtungskorrektur durchgeführt werden. Zur Justage eines Goniometers werden im Folgenden drei Vorgehensweisen unterschieden. Diese sind: die Goniometerachsen- und Lasermethode, die Winkelnormalmethode und die Methode der geometrischen Modellierung.

### 4.3.1 GONIOMETERACHSEN- UND LASERMETHODE

Die Goniometerachsen- und Lasermethode ist eine gängige Methode zur geometrischen Justage eines Photometers. Hierbei wird die Photometerposition über die Goniometerkoordinaten justiert. Zur Ausrichtung eines Photometers an einem Typ-A Goniometer wie dem GOH-1660 entsprechend Absatz 2.4.1 wird dafür die V-Achse in die gewünschte Justageposition rotiert. Ein Beispiel dieses Justage-

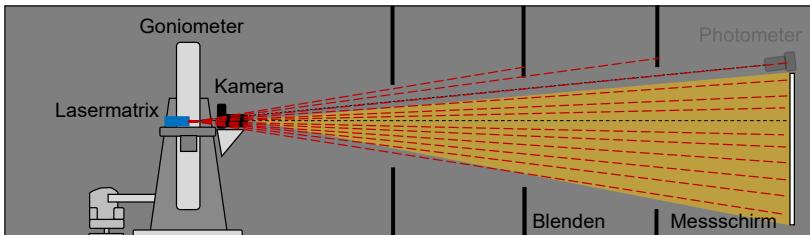
vorgangs ist Abbildung 4.2 zu entnehmen. Durch die Rotation eines entlang der H-Achse montierten Lasers kann das Photometer im entsprechenden Abstand ausgerichtetet werden. Wird ein kamerabasiertes Messsystem mit einem Messschirm als Detektor verwendet, muss zuerst die optische Achse im Kamerabild gefunden werden. Dies erfolgt über dieselbe Methode, die für die Justage eines Photometers verwendet wird. In einem zweiten Schritt wird ein weiterer Laser in der Grundstellung des Goniometers auf die zuvor bestimmte optische Achse ausgerichtetet. Anschließend wird der Messschirm mit dem Laser über das Goniometer abgerastert und so die Goniometerkoordinaten auf den Detektor übertragen. Zwischen den angefahrenen Stützstellen muss interpoliert werden. Wird ein Goniometer mit dieser Methode justiert, fließt die Goniometerstellgenauigkeit über den Justagevorgang in die geometrische Messunsicherheit mit ein.



**Abbildung 4.2:** Darstellung der Justagemethode: Goniometerachsen und Lasermethode.

#### 4.3.2 WINKELNORMALMETHODE

Die Winkelnormalmethode wird für kamerabasierte LVK-Messsysteme verwendet. Durch ein geometrisches Winkelnormal, welches im Drehzentrum des Goniometers justiert und entlang der optischen Achse ausgerichtet wird, können Raumrichtungen im Detektorbild eindeutig zugewiesen werden. Abbildung 4.3 veranschaulicht diese Methode. Ein mögliches Beispiel für ein Winkelnormal ist eine Lasermatrix, dessen einzelne Laserpunkte  $(\varphi, \vartheta)$ -Koordinaten zugeordnet sind. Die sich bei dieser Methode ergebene Unsicherheit erfolgt aus der Positioniergenauigkeit des Winkelnormals auf dem Goniometer sowie der Unsicherheit des Winkelnormals selbst.



**Abbildung 4.3:** Darstellung der Justagemethode: Winkelnormalmethode.

#### 4.3.3 METHODE DER GEOMETRISCHEN MODELLIERUNG

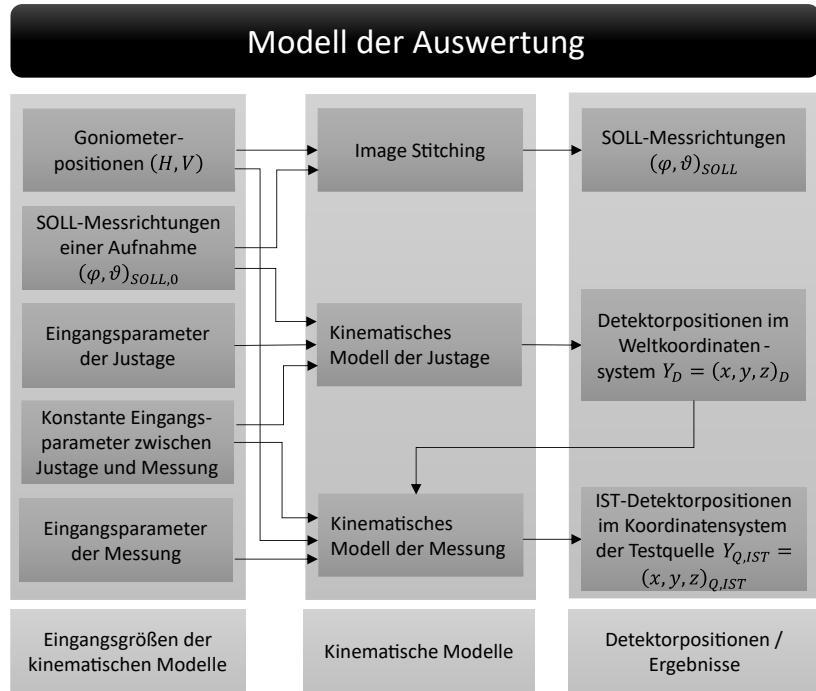
Die Methode der geometrischen Modellierung setzt die Kenntnis der geometrischen Lagen und Eigenschaften aller an einer LVK-Messung beteiligten Messsystemkomponenten voraus. Diese sind die Position

und Orientierung des Detektors in Bezug auf das Goniometer, die Geometrie des Detektors und ein kinematisches Modell des Goniometers. Bei einem kamerabasierten Detektor muss zusätzlich die Verzeichnung der Kamera geometrisch korrigiert werden. Nur so ist eine eindeutige Zuordnung zwischen Kamerapixel und Messrichtung auf Basis homografischer Methoden möglich. Die Umsetzung dieser Justagemethoden für ein kamerabasiertes LVK-Messsystem ohne Goniometer zeigte Moreno et. al. 2009 [23]. Sayanca et. al. ergänzte diese Methode für LVK-Messsysteme mit Goniometern, um so weitaus größere Raumbereiche messen zu können [24, 50]. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, dass im Nachgang einer Messung geometrische Diskrepanzen korrigiert werden können. So ist es beispielsweise möglich, den Einfluss von Goniometerungenauigkeiten aber auch der Lichtquellenjustage herauszurechnen. Allerdings ist dafür, je nach geforderter Genauigkeit, ein sehr großen Aufwand zur Bestimmung der Messsystemgeometrie zu betreiben.

## 4.4 MODELL DER AUSWERTUNG

Mit dem geometrischen Modell der Auswertung, entsprechend dem Schema aus Abbildung 4.4, werden die IST-Detektorpositionen  $Y_{Q,IST}$  einer LVK-Messung im Koordinatensystem der Testquelle  $\tilde{X}_Q$  berechnet. Die Berechnungsgrundlage dazu bilden die SOLL-Messrichtungen einer Einzelaufnahme  $(\varphi, \vartheta)_{SOLL,0}$ . Sie geben die in der Goniometergrundstellung, meist  $(H, V) = (0^\circ, 0^\circ)$ , erwarteten Messrichtungen an. Zusammen mit den Goniometerkoordinaten  $(H, V)$  der Messung

lassen sie sich über die Koordinatentransformationen entsprechend Gleichung (2.6) in die SOLL-Messrichtungen  $(\varphi, \vartheta)_{SOLL}$  der gemessenen LVK umrechnen. Bei kamerabasierten Mehrkanalmesssystemen entspricht dieses Vorgehen dem Stitching (Abs. 2.4.1).



**Abbildung 4.4:** Schematische Darstellung des Modells der Auswertung.

Für die Berechnung der IST-Detektorpositionen im Koordinatensystem der Testquelle muss zunächst das kinematische Justagemodell simuliert werden. Anhand der SOLL-Messrichtungen einer

Einzelmessung und unter Berücksichtigung der Justagemethode, werden über das kinematische Modell (vgl. Absatz 4.3) die Detektorpositionen  $Y_D$  im Weltkoordinatensystem simuliert. Dieses Koordinatensystem entspricht dem Detektorkoordinatensystem, weshalb entsprechende Größen mit dem Index ,D' versehen werden.

Für ein mit einem Winkelnormal justiertes, kamerabasiertes LVK-Messsystem, wird das kinematische Modell so aufgebaut, dass sich der Messschirm in der  $xy$ -Ebene befindet. Durch die Simulation des Justagevorgangs kann die Position und Orientierung des Winkelnormals im Vergleich zur Messschirmebene bestimmt werden. Anschließend werden die genauen Detektorpositionen der einzelnen Messkanäle über eine Schnittpunktberechnung der Laserpunkte des Winkelnormals mit dem Messschirm in der  $xy$ -Ebene berechnet.

Im nächsten Schritt erfolgt die Simulation der Messung. Dazu werden mit den zuvor berechneten Detektorpositionen  $Y_D$  über das kinematische Messmodell die IST-Detektorpositionen im Testquellenkoordinatensystem  $Y_{Q,IST}$  bestimmt. Zu beachten ist, dass für manche Eingangsgrößen der Messung dieselben Schätzwerte zu verwenden sind wie bei den Eingangsgrößen der Justage. So ist beispielsweise die Entfernung zwischen Detektor und Goniometer bei der Justage stets dieselbe wie bei der Messung und somit eine korrelierte Eingangsgröße. Im Gegensatz dazu können die angefahrenen Goniometerkoordinaten zwischen Justage und Messung abweichen. Um für alle SOLL-Messrichtungen eine IST-Detektorposition zu erhalten, muss diese Berechnung für alle Goniometerkoordinaten ( $H, V$ )

durchgeführt werden. Im Folgenden wird das kinematische Modell des Messsystems genauer erläutert.

#### 4.4.1 KINEMATISCHES MODELL DES MESSSYSTEMS

Das kinematische Modell des Messsystems stellt die an der Messung beteiligten Komponenten Detektor, Goniometer H-Achse, Goniometer V-Achse und Quelle in Beziehung zueinander. Umgesetzt wird dies über eine kinematische Kette, entsprechend Kapitel 2.6. Jeder Messsystemkomponente liegt demnach ein Koordinatensystem  $\tilde{X}_{Komponente_j}$  zugrunde, dass über eine oder mehrere Transformationen  $T_{Komponente_j,i}$  aus der Lage des vorherigen Koordinatensystems berechnet wird:

$$\tilde{X}_{Komponente_j} = T_{Komponente_j,n_j} \cdot \dots \cdot T_{Komponente_j,i} \cdot \dots \cdot T_{Komponente_j,1} \cdot \tilde{X}_{Komponente_{j-1}}. \quad (4.2)$$

Durch die Verkettung der Einzeltransformationen ergibt sich die Gesamttransformationsmatrix  $T_{ges}$ , die die Lage (Position und Orientierung) der Testquelle  $\tilde{X}_Q$  in Bezug zum Detektor  $\tilde{X}_D$  angibt.

$$\tilde{X}_D = T_{ges} * \tilde{X}_Q \quad (4.3)$$

Das Aufstellen der kinematischen Kette erfolgt auf Basis verschiedener Kriterien. Liegen für einige Komponenten, wie beispielsweise dem Goniometer, bereits kinematische Modelle vor, sind diese bevorzugt zu verwenden. Meist beruhen solche Modelle auf der Denavit-Hartenberg-Konvention. Beinhaltet diese Transformationskette aber eine große Zahl an nichtrelevanten Parametern oder können

Unsicherheiten nicht entlang der Transformationskette bestimmt werden, ist es möglich die kinematische Kette zu vereinfachen. Mit dem hier verwendete Goniometer GO-H 1660 wird beispielsweise die Lichtquelle während einer Messung nur über die beiden Rotationsachsen H und V bewegt, die sich im Idealfall schneiden. Der xyz-Linéartisch bleibt während der Messung arretiert und hat keinen Einfluss auf die geometrische Unsicherheit der Messung. Somit kann das Goniometermodell vereinfacht dargestellt werden, indem nur die Koordinatensysteme der Rotationsachsen verwendet und diese über zwei Unsicherheitsparameter, einer Achsschieflage und einem Achsabstand verknüpft werden. Dies erhöht die Übersichtlichkeit des Modells. Die Transformationen sind in diesem Fall nicht an eine typische Konvention gekoppelt, d.h. die Rotation der V-Achse entspricht einer Rotation um die x-Achse. Die Rotation der H-Achse entspricht einer Rotation um die y-Achse.

### **4.4.2 KINEMATISCHES MODELL DES KAMERABASIERTEN LVK-MESSSYSTEMS**

Im Folgenden wird die Aufstellung des kinematischen Justage- und Messmodells am kamerabasierten LVK-Messsystem A aus Absatz 3.1 erläutert. Die Justage erfolgt mittels Winkelnormal. Für andere Messsysteme oder Justagemethoden ändert sich ggf. das kinematische Modell. Die zugehörige Transformationskette ist in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt. Tabelle 4.1 listet die am Messsystem beteiligten Komponenten auf. Zur Bestimmung der Detektorposition ist die

Überführung der Lage der Quelle in das Detektorkoordinatensystem notwendig. Demnach gilt:

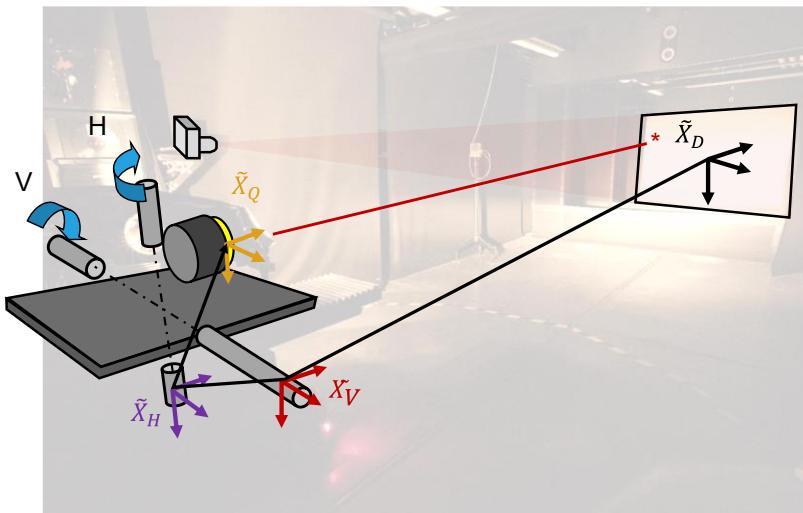
$$T_{ges} = T_{V,Pose} \cdot T_{V,Rot} \cdot T_{H,Pose} \cdot T_{H,Rot} \cdot T_Q \quad (4.4)$$

Die Transformation  $T_Q$  gibt dabei die Lage der Quelle in Bezug zur Goniometer H-Achse an. Für die Messung entspricht die Quelle der Lichtquelle, für die Justage dem Winkelnormal. Die Transformationen  $T_{H,Rot}$  bzw.  $T_{V,Rot}$  geben die Positionierung der H- bzw. V-Achse an, während  $T_{H,Pose}$  die Fehlausrichtung zwischen der H- und V-Achse beschreibt. Die Transformation  $T_{V,Pose}$ , beschreibt die Lage der V-Achse in Bezug zum Detektor.

Jede Transformation besteht entsprechend Gleichung (2.20) aus sechs unabhängigen Freiheitsgraden, die allerdings nicht unbedingt notwendige Eingangsgrößen enthalten. So lässt sich beispielsweise die Fehlorientierung der Goniometerachsen  $T_{H,Pose}$  ausreichend genau durch zwei Parameter, einem Achsabstand und einer Achsschieflage beschreiben. Der Achsabstand entspricht einer Translation in z-Richtung die Achsschieflage einer Rotation um die z-Achse.

**Tabelle 4.1:** Komponenten des kinematischen Modells des kamerasierten LVK-Messsystems im LTI.

| Nr. | Koordinatensystem         | Bezeichnung   |
|-----|---------------------------|---------------|
| 1   | Testquelle / Winkelnormal | $\tilde{X}_Q$ |
| 2   | Goniometer H-Achse        | $\tilde{X}_H$ |
| 3   | Goniometer V-Achse        | $\tilde{X}_V$ |
| 4   | Detektor                  | $\tilde{X}_D$ |



**Abbildung 4.5:** Schematische Darstellung des kinematischen Modells des kamerabasierten LVK-Messsystems.

Um daher die notwendigen Eingangsparameter der Transformationen aus Gleichung (4.4) zu erhalten wird für jede Transformation entschieden, welche Rotations- bzw. Translationsfreiheitsgrade notwendige und für das System relevante Freiheitsgrade sind. Alle weiteren Freiheitsgrade können zu Null gesetzt werden. Für das kinematische Messmodell verbleiben die unter Nr. 1-13 aus Tabelle 4.2 aufgelisteten Eingangsgrößen. Sie ergeben sich aus folgenden Überlegungen:

Im Idealsystem befindet sich die Quelle im Drehzentrum des Goniometers. Das Koordinatensystem der Quelle entspricht dem der H-Achse des Goniometers. Unter realen Bedingungen ist die Quelle durch eine Fehlausrichtung und Fehlorientierung in drei

Translations- und drei Rotationsfreiheitsgraden fehlerhaft auf dem Goniometer, d.h. in Bezug zur H-Achse, justiert (Nr. 1-6).

Die Rotation der H-Achse entspricht einer Rotation von  $\theta_{y,H,Rot} = H$  um die y-Achse. Die Unsicherheit entspricht der Stellgenauigkeit der H-Achse (Nr. 7).

Im Idealsystem schneiden sich die H- und die V-Achse des Goniometers und sie stehen senkrecht aufeinander. Unter realen Bedingungen haben die Achsen einen Achsabstand entlang der z-Richtung sowie eine Achsschieflage um die z-Achse (Nr. 8-9).

Die Rotation der V-Achse entspricht einer Rotation von  $\theta_{x,V,Rot} = V$  um die x-Achse. Die Unsicherheit entspricht der Stellgenauigkeit der vertikalen Drehachse (Nr. 10).

Im Idealsystem ist der Detektor in zehn Meter Entfernung senkrecht zur optischen Achse des Goniometers und somit parallel zur V-Achse ausgerichtet. Unter realen Bedingungen lässt sich die Entfernung in z-Richtung zwischen V-Achse und Detektor nur endlich genau bestimmen und der Detektor ist gegenüber der V-Achse um die x- und y-Achse verdreht. Eine Verdrehung des Detektors um die z-Achse bleibt bei einer Winkelnormaljustage und einem ebenen Messschirm ohne Einfluss.

**Tabelle 4.2:** Transformationen und Eingangsgrößen mit Schätzwerten und Unsicherheiten für die geometrische Unsicherheitsanalyse unterteilt in Eingangsgrößen für die Simulation einer Messung (1-13) und der Justage (14-23). Zu beachten ist, dass die Eingangsparameter 8,9 und 11-13 bei Messung und Justage dieselben sind.

| Nr.      | Komponente                             | Transformation     | Achse | Einheit               | Schätz-wert | Vertei-lung          | Standar-dunsicher-heit |        |
|----------|--|--------------------|-------|-----------------------|-------------|----------------------|------------------------|--------|
| <i>i</i> | Eingangsgröße $X_i$                    |                    |       |                       | $x_i$       | $g_{x_i}$            | $u(x_i)$               |        |
| 1        |  |                    |       | $\theta_{x,Q}$        | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,25   |
| 2        |  | Orientierung       |       | $\theta_{y,Q}$        | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,25   |
| 3        |  |                    |       | $\theta_{z,Q}$        | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,25   |
| 4        | Testquelle $T_Q$                       |                    |       | $x_Q$                 | mm          | 0                    | N                      | 10     |
| 5        |  | Positionierung     |       | $y_Q$                 | mm          | 0                    | N                      | 10     |
| 6        |  |                    |       | $z_Q$                 | mm          | 0                    | N                      | 10     |
| 7        | Goniometer                             | Rotation H         |       | $\theta_{y,H,Rot}$    | $^\circ$    | H                    | N                      | 0,0031 |
| 8        | H-Achse                                | Achsschieflage     |       | $\theta_{x,H,Pose}$   | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,008  |
| 9        | $T_{H,Rot}, T_{H,Pose}$                | Achsabstand        |       | $z_{H,Pose}$          | mm          | 0,5                  | N                      | 0,052  |
| 10       | Goniometer                             | Rotation V         |       | $\theta_{x,V,Rot}$    | $^\circ$    | V                    | N                      | 0,0041 |
| 11       | V-Achse                                | Messschirmab-stand |       | $z_{V,Pose}$          | mm          | 10000                | N                      | 2      |
| 12       | $T_{V,Rot}, T_{V,Pose}$                | Orientierung       |       | $\theta_{x,V,Pose}$   | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,1    |
| 13       |  |                    |       | $\theta_{y,V,Pose}$   | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,1    |
| 14       |  |                    |       | $\theta_{x,N}$        | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,25   |
| 15       |  | Orientierung       |       | $\theta_{y,N}$        | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,25   |
| 16       |  |                    |       | $\theta_{z,N}$        | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,25   |
| 17       | Winkelnormal $T_N$                     |                    |       | $x_N$                 | mm          | 0                    | N                      | 1      |
| 18       |  | Positionierung     |       | $y_N$                 | mm          | 0                    | N                      | 1      |
| 19       |  |                    |       | $z_N$                 | mm          | 0                    | N                      | 1      |
| 20       | Goniometer<br>H-Achse<br>$T_{H,Rot,N}$ | Rotation H         |       | $\theta_{y,H,Pose,N}$ | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,0031 |
| 21       | Goniometer<br>V-Achse<br>$T_{V,Rot,N}$ | Rotation V         |       | $\theta_{x,V,Pose,N}$ | $^\circ$    | 0                    | N                      | 0,0041 |
| 22       | Laserpunkte des<br>Winkelnormals       | Orientierung       |       | $\theta_{y,N}$        | $^\circ$    | $\varphi_{SOLL,0}$   | N                      | 0,002  |
| 23       |  |                    |       | $\theta_{z,N}$        | $^\circ$    | $\vartheta_{SOLL,0}$ | N                      | 0,002  |

Neben der Simulation einer Messung ist für das Modell der Auswertung die Simulation der Justage des Messsystems notwendig. Ziel ist die Berechnung der Detektorpositionen  $Y_D$  aus den SOLL-Messrichtungen einer Einzelaufnahme  $(\varphi, \vartheta)_{SOLL,0}$ . Das kinematische Justage-modell gleicht dem kinematischen Messmodell, dennoch müssen zum Teil abweichende Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Somit gibt es „konstante“ Eingangsgrößen deren Werte sich gegenüber einer Messung nicht verändern. Diese sind die Lage der Goniometer-achsen sowie die Lage zwischen Goniometer V-Achse und Detektor (Nr. 8,9 und 11-13). Diese Eingangsgrößen werden für das Justage-modell aus dem Messmodell übernommen. Die restlichen „variablen“ Eingangsgrößen können nicht aus dem Messmodell übernommen werden. Tabelle 4.2 listet sie unter den Nummern 14-23 auf. Konkret handelt es sich dabei um die Winkelnormalorientierung und -positionierung (Nr. 14-19) sowie die Stellgenauigkeit des Goniometers bei der Winkelnormaljustage (Nr. 20-21). Außerdem ist bei der Verwendung eines Winkelnormals nach Absatz 4.3.2 die Unsicherheit der Laserpunkte zu berücksichtigen (Nr. 22-23).

## 4.5 MONTE-CARLO-SIMULATION DES KAMERABASIERTEN LVK-MESSSYSTEMS

Um aus dem Modell der Auswertung die geometrische Unsicherheit zu berechnen, wird mittels Monte-Carlo-Simulation für jede SOLL-Messrichtung ein Satz von  $M = 10000$  IST-Detektorpositionen

$Y_{Q,IST,r}$  berechnet.  $M$  entspricht der Anzahl an Monte-Carlo Iterationen.

Zuerst werden die Schätzwerte  $x_i$  und Standardunsicherheiten  $u(x_i)$  der Eingangsgrößen  $X_i$  festgelegt. Anschließend folgen für jeden Simulationsschritt  $r$  die Ziehungen  $x_{i,r}$  für die Eingangsschätzwerte aus den zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichteveorlungen  $g_{X_i}(\xi_r)$ . Zu jeder Eingangsgröße aus Tabelle 4.2 liegt demnach eine Ziehung vor. Anschließend wird die Justage entsprechend Abbildung 4.6 simuliert. Hierfür werden dem kinematischen Justagemodell die Ziehungen der Eingangsgrößen übergeben (Nr. 8,9,11-13 und Nr. 14-21). Zu beachten ist, dass die Achsschieflage, der Achsabstand sowie der Goniometer-Messschirmabstand und die Detektororientierung bei Messung und Justage konstant sind und diese Ziehungen (Nr. 8,9,11-13) im Folgenden auch der Simulation der Messung übergeben werden. Über die Ziehungen des Winkelnormals (Nr. 22-23) werden dann für den  $r$ -ten Simulationsschritt die Detektorpositionen  $y_{D,r}$  bestimmt, indem der Schnittpunkt zwischen den Punktlasern des Winkelnormals und der Detektorebene bestimmt wird. Damit ist die Simulation der Justage abgeschlossen und es folgt die Simulation der Messung entsprechend Abbildung 4.7. Hierfür werden dem kinematischen Messmodell die Ziehungen der Messung (Nr. 1-13) übergeben. Danach wird für jede Aufnahme  $k$  die Position des Goniometers über eine neue Ziehung aktualisiert. So können über die aus der Justage bestimmten Detektorpositionen  $y_{D,r}$  die IST-Detektorposition im Testquellenkoordinatensystem  $y_{Q,IST,r,k}$  für jede Aufnahme  $k$  berechnet werden. Nach  $M$  Monte-Carlo-Iterationen liegen dann für jede

SOLL-Messrichtung  $(\varphi, \vartheta)_{SOLL}$   $M$  IST-Detektorpositionen  $y_{Q,IST,r}$  vor. Im nächsten Absatz wird die zugehörige statistische Auswertung erläutert. Der Ablauf der Monte-Carlo-Simulation ist im Programmablaufplan in Abbildung 4.8 dargestellt.

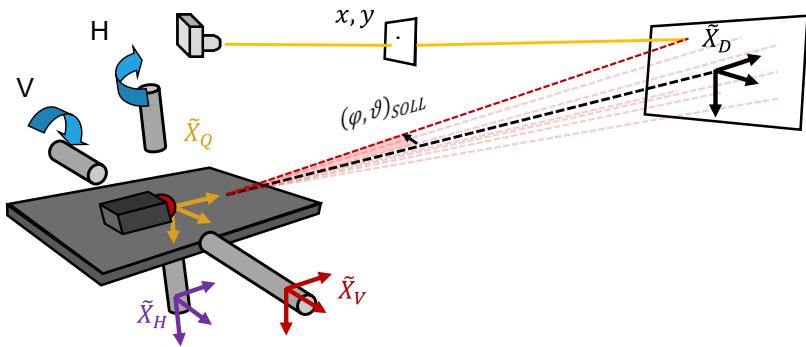


Abbildung 4.6: Kinematisches Justagemodell.

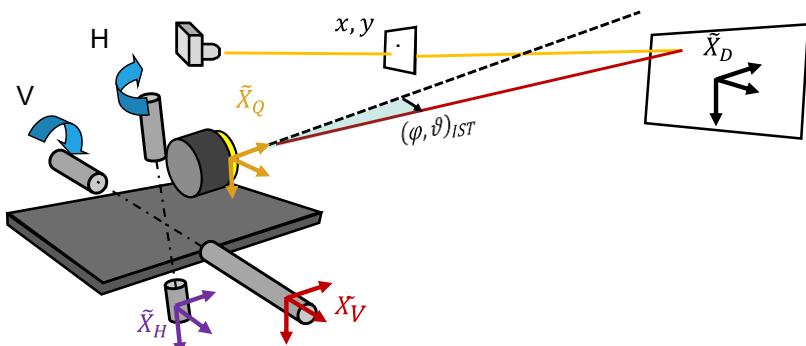
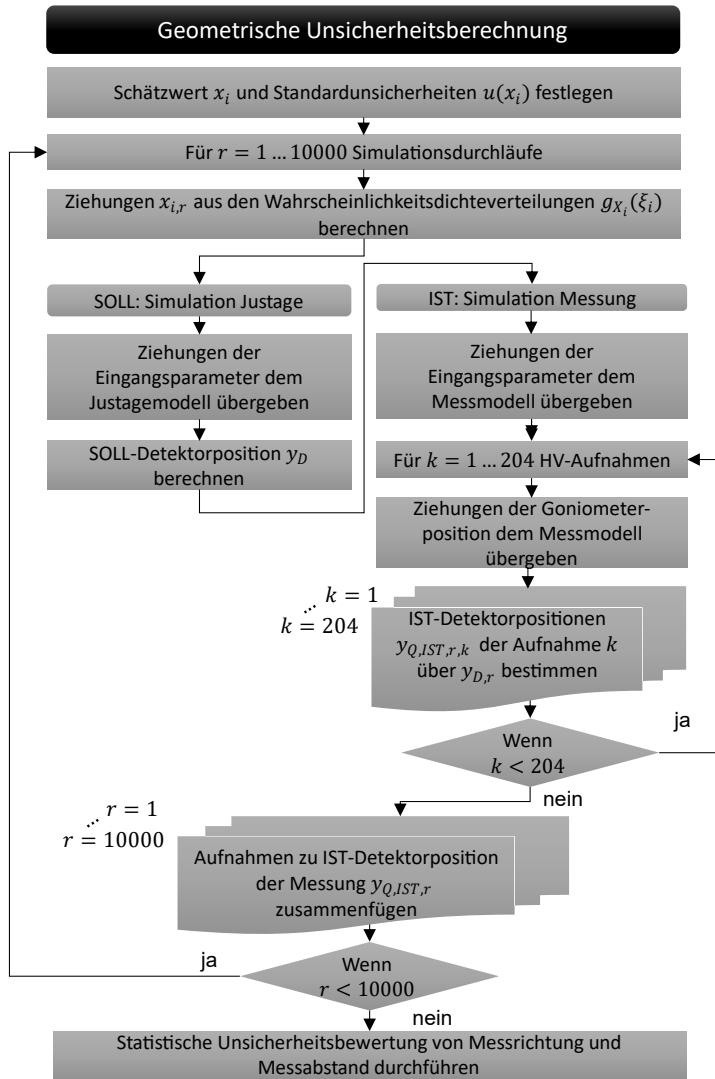


Abbildung 4.7: Kinematisches Messmodell.



**Abbildung 4.8:** Monte-Carlo-Simulationsablaufplan.

### 4.6 AUSWERTUNGSMETHODE

Die statistische Auswertung zur Berechnung der geometrischen Unsicherheit einer LVK-Messung wird an einer beispielhaften Simulation erläutert. Dafür wird ein Kamerabildeinzug des eben beschriebenen LVK-Messsystems simuliert und ausschließlich eine Unsicherheit der H- und V-Achsenpositionierung während der Messung angenommen. Die Unsicherheit der Positionierung der H-Achse ist mit  $0,0031^\circ$  etwas kleiner als die Unsicherheit der V-Achse mit  $0,0041^\circ$ . Da nur zwei Unsicherheitsparameter simuliert werden, ist es möglich die berechneten Ergebnisse nach ihrer Plausibilität zu überprüfen.

Für jede SOLL-Messrichtung liegt nach der Monte-Carlo-Simulation aus Absatz 0 ein Satz aus IST-Detektorpositionen vor, der hinsichtlich Messrichtung und Messabstand untersucht werden kann. Dies erfolgt durch eine statistische Auswertung entsprechend Abbildung 4.9. Jeder Satz IST-Detektorpositionen wird dafür zunächst über die SOLL-Messrichtung auf die optische Achse der Lichtquelle rotiert. Dies ist notwendig, da es sonst bei der Umrechnung der Detektorposition von kartesischen in sphärische Koordinaten an den Polen zu einer Überinterpretation der Unsicherheit des Azimuts kommt. Anschließend werden über Gleichung (2.3) die IST-Detektorpositionen  $y_{Q,IST,r} = (x, y, z)_{Q,IST,r}$  in IST-Messrichtungen  $(\varphi, \vartheta)_{IST,r}$  und IST-Messabstände  $r_{IST,r}$  umgerechnet. Die Unsicherheit des Messabstands  $u(r) = \sigma_r$  kann direkt als Standardabweichung  $\sigma_r$  berechnet werden. Für die Unsicherheit der Messrichtung  $(u(\varphi), u(\vartheta))$  wird

entsprechend Absatz 2.5.3 eine elliptische Konfidenzregion mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% aus den IST-Messrichtungen ermittelt. So kann entsprechend Abbildung 4.9 die Unsicherheit der Messrichtung als Standardabweichung entlang der langen  $u(y_l) = \sigma_l$  und kurzen Ellipsenachsen  $u(y_s) = \sigma_s$  der Konfidenzregion angegeben werden. Vervollständigt wird die Unsicherheitsangabe dann durch die Angabe des Winkels  $\alpha$ , der die Lage der Ellipse als Winkel zwischen der langen Ellipsenachse und der  $\varphi$ -Achse angibt. Zusammen mit der Standardmessunsicherheit der langen und kurzen Ellipsenachsen ist so eine Aussage der Korrelation zwischen den Messgrößen  $\varphi$  und  $\vartheta$  möglich.

Anzumerken bleibt, dass die Unsicherheit des Messabstand lediglich der durch die Messung verursachten Unsicherheit entspricht. Die Unsicherheit des Messabstands bei der photometrischen Kalibrierung, d.h. die Unsicherheit der Entfernung des photometrischen Normals vom Detektor muss separat berechnet werden.

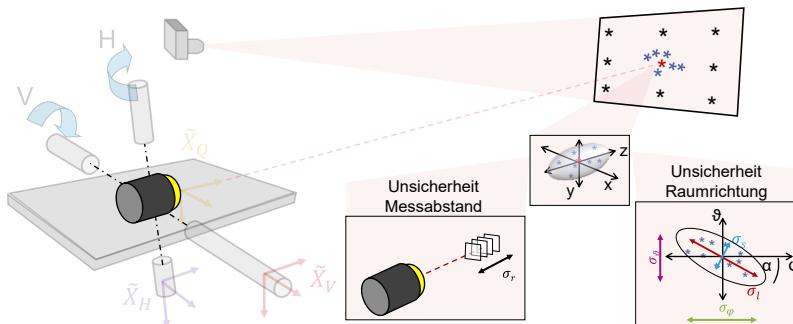
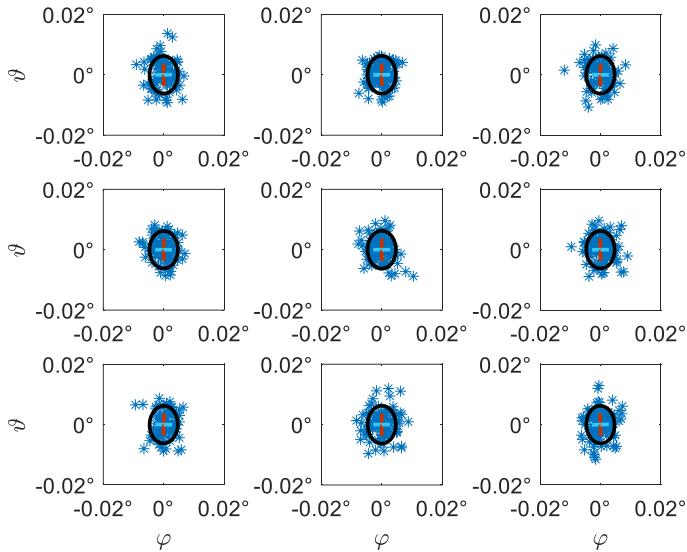
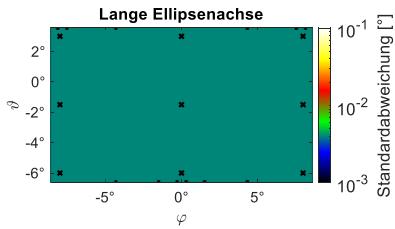


Abbildung 4.9: Geometrische Unsicherheitsbewertung.

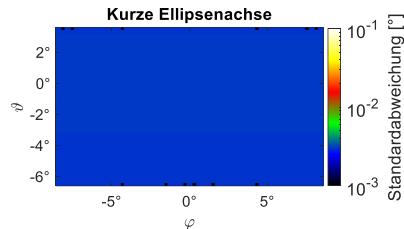
Die Ergebnisse der geometrischen Unsicherheitsanalyse eines Kamerabildeinzugs ( $\varphi \in [-8,5^\circ, 8,5^\circ]$ ,  $\vartheta \in [-6,5^\circ, 3,5^\circ]$ ) sind in Abbildung 4.10 bis Abbildung 4.14 dargestellt. Abbildung 4.10 zeigt die 95%-Konfidenzregionen für neun gleichmäßig über den Aufnahmebereich verteilte Messrichtungen (vgl. Abbildung 4.9). Zu erkennen ist, dass die Unsicherheiten der H- bzw. V-Achsenpositionierung des Goniometers direkt auf die Unsicherheit der  $\varphi$ - bzw.  $\vartheta$ -Messrichtung übertragen wird. Um die Unsicherheit für den gesamten Messbereich darzustellen, zeigen Abbildung 4.11 bis Abbildung 4.14 die Unsicherheiten der Messrichtungen in Falschfarbendarstellung. Aufgetragen über die  $(\varphi, \vartheta)$ -Koordinaten des Messbereichs ist hier die Unsicherheit entlang der langen- (Abbildung 4.11) und der kurzen Ellipsenachse (Abbildung 4.12) dargestellt. Abbildung 4.13 zeigt die Ausrichtung der Konfidenzregion in Form des Winkels  $\alpha$  und Abbildung 4.14 gibt die Unsicherheit des Messabstand an. Hierbei ist zu erkennen, dass die Unsicherheiten über den gesamten erfassten Raumbereich nahezu konstant sind. Ebenso ist entsprechend Abbildung 4.13 keine Korrelation zwischen der  $\varphi$ - und  $\vartheta$ -Messrichtung zu erkennen. Der Rotationswinkel von  $\alpha = -90^\circ$  bedeutet lediglich, dass die Unsicherheit der langen Ellipsenachse der Unsicherheit der  $\vartheta$ -Richtung entspricht. Da nur eine Unsicherheit der Achsenpositionierung des Goniometers angenommen wurde ist außerdem die Unsicherheit des Messabstands vernachlässigbar klein.



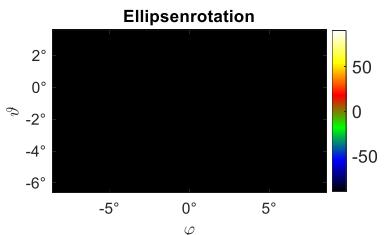
**Abbildung 4.10:** Geometrische Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung, dargestellt für neun ausgewählte Richtungen eines Kamerabildeinzugs. Blaue Sterne entsprechen den simulierten IST-Messrichtungen. Die schwarze Ellipse entspricht der Konfidenzregion mit einer 95%-igen Überdeckungswahrscheinlichkeit. Die roten und blauen Linien sind die Standardabweichungen entlang der langen- bzw. kurzen Ellipsenachse der Konfidenzregion. Die hier dargestellten Richtungen entsprechen den mit einem Kreuz markierten Richtungen aus Abbildung 4.11.



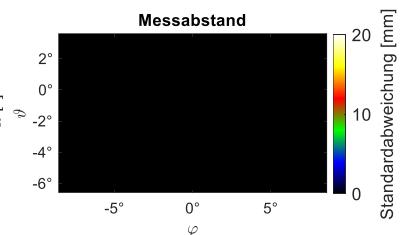
**Abbildung 4.11:** Standardabweichung entlang der langen Ellipsenachse bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.



**Abbildung 4.12:** Standardabweichung entlang der kurzen Ellipsenachse bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.



**Abbildung 4.13:** Ellipsenrotation bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.



**Abbildung 4.14:** Standardabweichung entlang Messrichtung bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.

## 4.7 SYSTEMPARAMETERANALYSE

Für die geometrische Unsicherheitsanalyse eines LVK-Messsystems müssen die Systemparameter, d.h. die Schätzwerte und Unsicherheiten der Eingangsgrößen bestimmt werden. Außerdem ist für manche Justagemethoden die Bestimmung der Systemparameter notwendig. Zu diesem Zweck werden im Folgenden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt. Es soll dabei untersucht werden, wie gut sich die Methoden für eine Systemparameteranalyse eignen. Die untersuchten Methoden sind:

- Die Verwendung einfacher Methoden, bestehend aus Kamerasmessungen, Bildverarbeitungsmethoden sowie Laserentfernungsmesser und Laser.
- Die Verwendung einer photogrammetrischen Methode.

Je nach verwendetem Messprinzip stehen andere Erwartungen im Vordergrund. Die einfachen Methoden sollen wirtschaftlich angewandt werden können, d.h. in erster Linie kostengünstig und transportabel sein. Die photogrammetrische Methode hingegen ist ein „Proof-of-Concept“ [39, 51].

Bestimmt werden müssen die in Tabelle 4.2 aufgelisteten Eingangsgrößen. Dabei ist es nicht möglich alle Eingangsgrößen mit jedem Verfahren zu bestimmen. Die Unsicherheit der Positionierung und Orientierung von Testquelle und Winkelnormal sind aus empirischen Erfahrungswerten zu ermitteln. Ebenso ist für die Bestimmung der Unsicherheit des Winkelnormals ein größerer Aufwand notwendig. Für das hier verwendete Winkelnormal sind daher

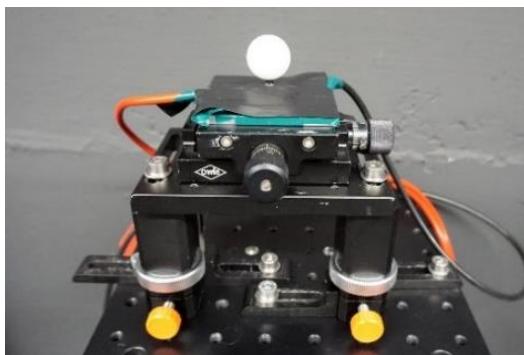
Unsicherheiten in persönlichen Gesprächen mit dem Hersteller erfragt worden. Alle weiteren Eingangsgrößen sind Systemparameter des Messsystems, dessen Schätzwerte und Unsicherheiten ermittelt werden können. Dazu zählen die Wiederholbarkeit der H- und V-Achse, der Achsabstand und die Achsschieflage, der Goniometer-Messschirmabstand, die Detektorausrichtung sowie die Kameraverzeichnung. Da die Verzeichnung der Leuchtdichtemesskamera nur für Justagemethode 3 notwendig ist und ausschließlich mit einem Kamerakalibreralgorithmus korrigiert werden kann, wird ihre Bestimmung in der Analyse mittels einfacher Methoden nicht beschrieben.

### 4.7.1 EINFACHE METHODEN

Die einfachen Methoden sollen unter wirtschaftlichen Aspekten zum Einsatz kommen. Dazu zählen auch klassische Messgeräte wie ein Laserentfernungsmessgerät, das zur Bestimmung des Abstands zwischen Goniometerdrehzentrum und Messschirm eingesetzt wird.

Die Achsschieflage und der Achsabstand des Goniometers werden mithilfe der in Abbildung 4.15 dargestellten, selbstleuchtenden Kugel mit 20 mm Durchmesser untersucht. Dafür ist die Kugel auf einem xyz-Lineartisch montiert und kann so in jeder Richtung auf 10  $\mu\text{m}$  genau justiert werden. Zur Bestimmung der Achsschieflage und des Achsabstands wird die Kugel auf dem Goniometer platziert. Außerdem befindet sich eine Kamera an der Decke über dem Goniometer, die auf das Goniometerdrehzentrum ausgerichtet und fokussiert ist

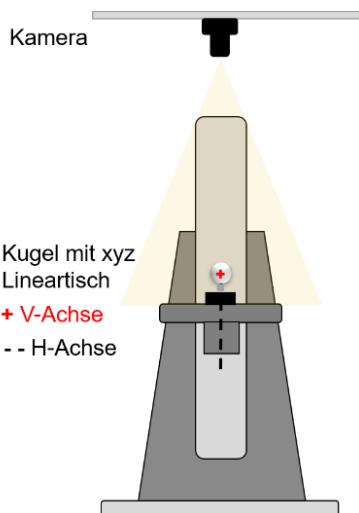
(vgl. Abbildung 4.16). Wird die Kugel jetzt über die H- und V-Achse des Goniometers bewegt und für verschiedene Goniometerkoordinaten die Position der Kugel im Kamerabild bestimmt, können Schätzwerte für die Achsschieflage und den Achsabstand des Goniometers ermittelt werden.



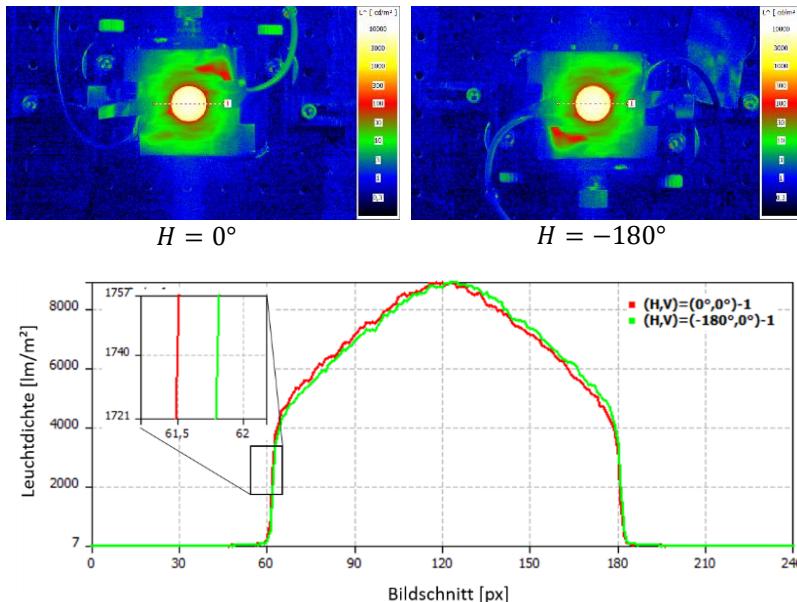
**Abbildung 4.15:** Selbstleuchtende Kugel mit xyz-Lineartisch zur Analyse der Goniometerunsicherheit.

Die Kugelposition wird entweder über eine Kreissuche oder einen Bildschnitt durch die Kugel im Kamerabild bestimmt. Für die Bestimmung mittels Bildschnitt wird eine Linie durch die Kugelkante entsprechend Abbildung 4.17 gelegt und die entsprechende Grauwertverteilung angeschaut. Durch den Vergleich desselben Bildschnitts in verschiedenen Aufnahmen kann eine Verschiebung der Kugeln im Bild ermittelt werden. Ist die Verschiebung der Kugelkante an der gegenüberliegenden Kugelseite eine andere, so spricht dies außerdem für eine größere Verschiebung orthogonal zur

Auswertungslinie. Eine Kreissuche mittels Hough-Transformation liefert vergleichbare Ergebnisse. Eine Analyse der Positioniergenauigkeit mittels des xyz-Tischs ergab darüber hinaus, dass für beide Methoden eine Positionsbestimmung mit einer Unsicherheit von 0,1 px im Kamerabild, d.h. umgerechnet um 0,014 mm erfolgen kann.



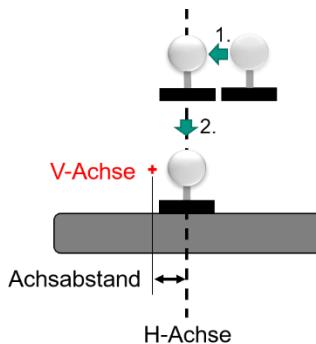
**Abbildung 4.16:** Aufbau zur Analyse der Goniometerunsicherheit. Die Darstellung zeigt das GOH-1660 schematisch mit der an der Decke installierten Kamera zur Beobachtung der selbstleuchtenden Kugel.



**Abbildung 4.17:** Positionsbestimmung der selbstleuchtenden Kugel über eine Bildschnittdiagramm.

Für die Bestimmung des Achsabstands wird die Kugel über den xyz-Lineartisch bestmöglich in das Drehzentrum des Goniometers justiert. Die im Anschluss bei einer Goniometerrotation verbleibende Bewegung der Kugel im Kamerabild entspricht dem Achsabstand. Die bestmögliche Justage in das Drehzentrum des Goniometers erfolgt dabei entsprechend Abbildung 4.18. Zuerst wird die Kugel auf die H-Achse des Goniometers justiert (Nr.1), indem für die Goniometer Stellung  $V = 0^\circ$  fünf verschiedene H-Koordinaten ( $H = [-180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ]$ ) angefahren werden. Über eine Analyse der Kugel im Kamerabild, kann der aktuelle Abstand der Kugel zur

H-Achse bestimmt und korrigiert werden. Eine Umrechnung von Pixeln in metrische Größen erfolgt über die Größe der Kugel im Kamerabild. Unter Umständen sind hier mehrere Schritte notwendig um die Kugel optimal zu positionieren.

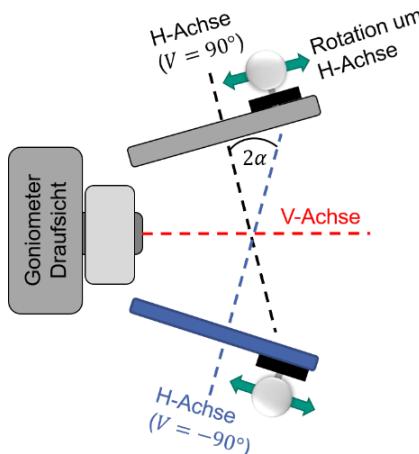


**Abbildung 4.18:** Schematische Darstellung zur Bestimmung des Achsabstands.

Im Anschluss muss die Kugel entlang der H-Achse verschoben werden bis sie im kürzesten Abstand zur V-Achse steht (vgl. Abbildung 4.18 Nr. 2). Dies geschieht, indem für  $V = -90^\circ$  und  $V = 90^\circ$  jeweils ein Kamerabild aufgenommen wird, die Position der Kugel im Kamerabild bestimmt und die Kugel um den halben Abstand der Kugelpositionen verschoben wird. Jetzt müsste sich die Kugel auf der V-Achse im kürzesten Abstand zur H-Achse befinden, was durch erneute Aufnahmen für  $V = -90^\circ$  und  $V = 90^\circ$  überprüft werden kann. Durch Aufnahmen der Kugel für  $V = 90^\circ$  und  $V = 0^\circ$  lässt sich anschließend der Achsabstand als die Differenz der berechneten

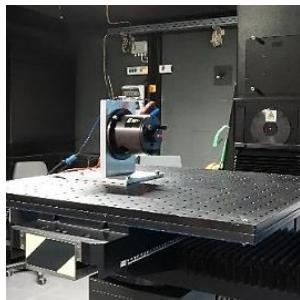
Kugelpositionen bestimmen. Dieses Vorgehen zur Bestimmung des Achsabstands wurde zum Teil bereits in [52] beschrieben.

Zur Analyse der Achsschieflage wird die Kugel entsprechend der Goniometer-Draufsicht aus Abbildung 4.19 soweit entlang der V-Achse aus dem Drehzentrum des Goniometers gefahren, dass sie im Kamerabild der an der Decke installierten Kamera für jede H-Koordinate sichtbar ist. Danach werden für  $V = -90^\circ$  und anschließend für  $V = 90^\circ$  jeweils Aufnahmen über den vollständigen horizontalen Bewegungsradius erstellt ( $H \in [-180^\circ, 180^\circ]$ ). Werden für die Kamerabilderserien für  $V = -90^\circ$  bzw.  $V = 90^\circ$  die Kugelpositionen im Kamerabild ermittelt und über eine Ausgleichsrechnung Geradengleichungen bestimmt, entspricht der Winkel zwischen beiden Geraden dem doppelten der Achsschieflage.

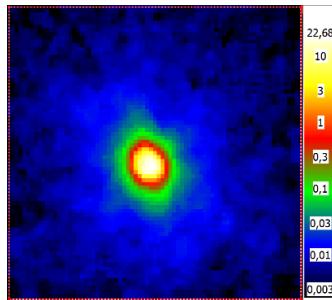


**Abbildung 4.19:** Schematische Darstellung zur Bestimmung des Achsabstands.

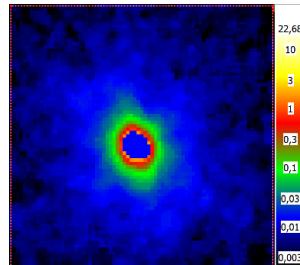
Zur Analyse der Wiederholbarkeit des Goniometers wird ein Laser entsprechend Abbildung 4.20 auf das Goniometer montiert. Beleuchtet der Laser den Messschirm des Messsystems, kann aus der Leuchtdichteaufnahme der photometrische Schwerpunkt des Laserspots ermittelt werden. Dies erfolgt indem entsprechend dem Bildauszug aus Abbildung 4.21 eine Teilregion des Laserspots durch einen Schwellwert bestimmt (vgl. Abbildung 4.22) und der photometrische Schwerpunkt dieser Region berechnet wird [53]. Dass die Laserstabilität einen Einfluss auf die Positionsbestimmung des Lasers hat, kann durch Mehrfachmessungen ausgeschlossen werden. Durch mehrmaliges anfahren von Goniometerkoordinaten entsprechend Abbildung 4.23 aus verschiedenen Richtungen, und jeweils einer Bestimmung des photometrischen Schwerpunkts lässt sich über die Standardabweichung der Koordinaten die Wiederholbarkeit der Goniometerachsen bestimmen. Wird der Laser unter verschiedenen Winkeln auf dem Goniometer aufgesetzt, ist darüber hinaus die Bewertung des vollen Goniometerbewegungsradius möglich. Eine Unsicherheit der absoluten Stellgenauigkeit der Achsen lässt sich mit dieser Methode allerdings nicht durchführen.



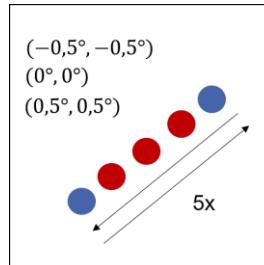
**Abbildung 4.20:** Im Goniometer- drehzentrum justierter Laser.



**Abbildung 4.21:** Bildauszug des Laserspots auf dem Messschirm.



**Abbildung 4.22:** Bildauszug des Laserspots auf dem Messschirm inklusive der Schwellwertregion.



**Abbildung 4.23:** Angefahrenen Laserpositionen.

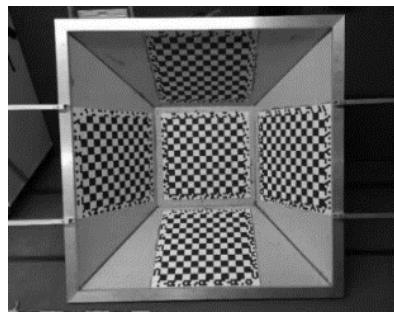
#### 4.7.2 PHOTOGRAMMETRIE

Die im Folgenden vorgestellte photogrammetrische Methode zur Analyse der Messsystemgeometrie eines Goniophotometers basiert

auf einem Kamerakalibreralgorithmus des *Institut für Mess- und Regelungstechnik* am *KIT* [54]. Der gewöhnliche Anwendungsbereich des Verfahrens ist auf die Kalibrierung von Stereo- und Multivision-Kamerasystemen für autonomes Fahren ausgelegt. Dennoch bietet sich der Algorithmus an, um zu überprüfen, ob allgemein eine photogrammetrische Methode erfolgreich zur Kalibrierung von kamera-basierten LVK-Messsystemen eingesetzt werden kann. Zum einen handelt es sich bei der verwendeten Methode um ein bestehendes robustes und mehrfach geprüftes Verfahren, das keiner weiteren Anpassung zur Analyse des LVK-Messsystems bedarf. Zum anderen bietet es durch vier voneinander unabhängig positionierbare Kalibriermuster (vgl. Abbildung 4.24) die Möglichkeit, diese in einem großen Raumbereich zu verteilen. Dadurch ergibt sich ein großer Bewegungsradius der Kamera. Dennoch ist dieses Verfahren nicht für den hier verwendeten Zweck ausgelegt und wird somit lediglich als ein „Proof-of-Concept“ betrachtet. Teile dieses Abschnitts wurden auf der *LuxJunior 2021* vorgestellt [55].

Die verwendete photogrammetrische Methode ist ein Kamerakalibreralgorithmus auf Basis der Bündelblockausgleichsrechnung. Obwohl sich über das vorgestellte Verfahren theoretisch die gesamte Messsystemgeometrie analysieren lässt, soll für das „Proof-of-Concept“ nur die Lage der Goniometerachsen und die Lage des Messschirms bestimmt werden. Als Vergleichsparameter zu den anderen Verfahren werden daraus der Messabstand, der Achsabstand und die Achsschieflage berechnet. Eine Überprüfung der Stellgenauigkeit erfolgt nicht.

Der Algorithmus kombiniert eine konventionelle Schachbrett-Kalibriermethode mit einem strukturlosen Kalibrieransatz [54]. Als Kalibriermuster verwendet er vier, in Abbildung 4.24 dargestellte, 2x1 Meter große Schachbrettmuster, mit deren Hilfe die extrinsischen Kameraparameter bestimmt werden. Die in Abbildung 4.25 dargestellte Kalibrierpyramide bestehend aus fünf dreidimensional angeordneten Schachbrettern. Sie wird für die Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter verwendet. Während der Berechnung gleicht der Algorithmus nicht nur die Position der Schachbretter, sondern auch die Ecken der einzelnen Schachbrettmuster mit aus [54].



**Abbildung 4.24:** 2x1 Meter große Schachbrettmuster des verwendeten Kamerakalibrieralgorithmus. **Abbildung 4.25:** Kalibrierpyramide des verwendeten Kamerakalibrieralgorithmus.

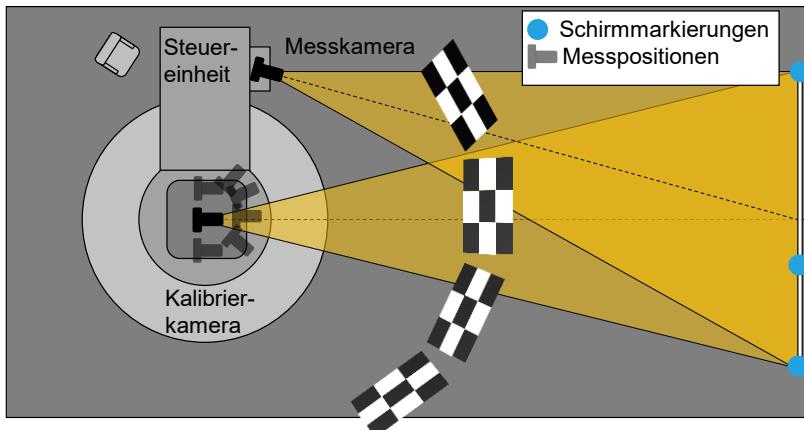
Zur Analyse der Messsystemgeometrie wird eine weitere „Kalibrierkamera“ auf dem Goniometer montiert. Dabei handelt es sich um eine LMK 5 der Firma *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH* mit fünf Megapixeln und einem 8 mm Objektiv. Diese wird über die Goniometerachsen verfahren und zu verschiedenen

Goniometerkoordinaten werden Bilder aufgenommen. Da über den Kamerakalibrieralgorithmus die Positionen der Kalibrierkamera geschätzt werden, können daraus die Systemparameter berechnet werden. Zur Bestimmung der Achsschieflage werden Kamerapositionen verwendet, die ausschließlich durch die Bewegung der Kamera mit den Rotationsachsen entstehen. Per Ausgleichsrechnung kann für jede Achse eine Ebene durch die ermittelten Kamerapositionen gelegt werden. Über die Normalenvektoren der Ebenen lässt sich dann die Achsschieflage berechnen. Zur Bestimmung des Achsabstands muss per Ausgleichsrechnung durch die gemessenen Kamerapositionen ein Kreis gelegt werden. Die Kreisnormale entspricht der Lage der jeweiligen Achse im Raum, aus denen sich der Achsabstand berechnen lässt.

Zur Analyse werden die vier 2x1 m großen Kalibermuster entsprechend Abbildung 4.26 um das Goniometer angeordnet. Außerdem befinden sich um den Messschirm acht Lasertrackernester die mit der Messschirmebene in Beziehung gesetzt sind und dessen Position bekannt ist. In diese Nester werden 1,5“ große weiß reflektierende Kugeln eingesetzt. Von diesen Kugeln wird im Anschluss an die Aufnahmen der Kamerakalibrierung eine weitere Aufnahme erstellt. Zu beachten ist dabei, dass für diese Aufnahmeposition auch eine Aufnahme der Schachbrettmuster vorhanden sein muss. Somit lässt sich über einen separaten Rückwärtsschnitt der Zusammenhang zwischen Messschirm und Goniometerachsen bestimmen.

Für den Kamerakalibrieralgorithmus werden insgesamt 136 Aufnahmen erstellt. Zum einen werden für die Kalibrierkamera, aber auch

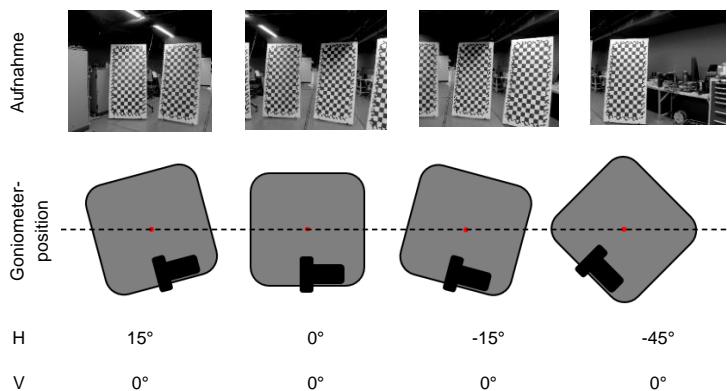
für die Kamera des Messsystems (Messkamera) je 25 Aufnahmen der Kalibrierpyramide aufgenommen, die vor den Kamera hin und her bewegt wird. Aus diesen Aufnahmen berechnen sich die intrinsischen Kameraparameter inklusive der für die Messkamera notwendigen Verzeichnungskorrektur.



**Abbildung 4.26:** Messaufbau für die Systemparameterbestimmung mittels Kamerakalibrationsalgorithmus.

Zum anderen werden mit der Kalibrierkamera Aufnahmen der 2x1 Meter großen Kalibermuster erstellt, indem die Kamera über die Lineartischachsen bewegt wird und alle 10 cm eine Aufnahme getätigt wird. Zur Analyse der Rotationsachsen wird die Kalibrierkamera 80 cm außerhalb des Goniometerdrehzentrums platziert und anschließend über die Rotationsachsen verfahren. In horizontaler Richtung werden so Aufnahmen von  $H = \pm 45^\circ$  und in vertikaler

Richtung Aufnahmen von  $V = \pm 30^\circ$  in je  $5^\circ$  Schritten erstellt. Der maximale Rotationsbereich ergibt sich aus der Position der vier  $2 \times 1$  Meter großen Kalibriermuster. Für eine ausreichend gute Schätzung einer Pose sollten mindestens zwei große Schachbrett muster in einem Kamerabild zu sehen sein. Einen Ausschnitt der Bilderserie für die Bewegung um die H-Achse ist in Abbildung 4.27 zu sehen.



**Abbildung 4.27:**                    Auszüge aus der Aufnahmeserie für die Bestimmung der Lage der H-Achse.



---

## Kapitel 5

# RAUMSTREULICHTKORREKTUR

Bei einer LVK-Messung ist Streulicht der Lichtanteil, der ungewollt auf den photometrischen Empfänger trifft. Dadurch kann es zu Messfehlern kommen, die allerdings vermieden oder behoben werden können. Bei einem klassischen Photometer, ist das vergleichsweise einfach realisierbar. Durch einen Tubus mit Querblenden kann seitlich aus dem Raum reflektiertes Licht abgeschirmt werden. Bei kamerasierten Detektoren bestehend aus einem Messschirm der von einer Leuchtdichtemesskamera betrachtet wird ist dies schwieriger. Der Messschirm gleicht einer Detektormatrix, dessen einzelne Messkanäle nicht mit einem Blendensystem versehen werden können, ohne gegenseitig das Messsignal abzuschirmen. So kann nur bedingt durch Raumblenden eine Raumstreulichtunterdrückung stattfinden. Eine ähnliche Problematik ergibt sich im optischen System der Kamera. Hier entsteht Streulicht beispielsweise durch Mehrfachreflexionen zwischen den Linsen. Eine Unterdrückung ist nur bedingt möglich. Da Streulicht in diesem Fall systematischer Natur ist, kann mit entsprechendem Vorwissen eine mathematische Kamerastreulichtkorrektur durchgeführt werden. Gleiches ist für das Raumstreuulicht möglich und wird im Folgenden an dem in Absatz 0 beschriebenen Messsystem B erläutert.

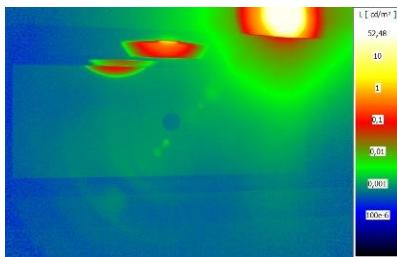
---

## 5.1 STREULICHT IN KAMERABASIERTEN LVK-MESSSYSTEMEN

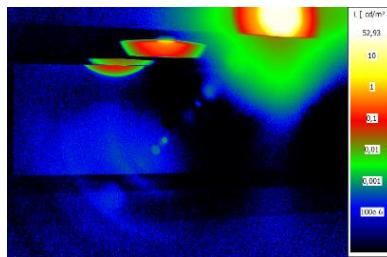
Streu Licht kann das Messergebnis einer kamerabasierten LVK-Messung unter gewissen Umständen merkbar beeinflussen. Besonders wenn Lichtstärken über mehrere Dekaden hinweg erfasst werden sollen, ist ein Streulichteffekt sichtbar. Somit ist der messbare Kontrast von kamerabasierten LVK-Messsystemen begrenzt. Bei photometerkopfbasierten LVK-Messsystemen hingegen tritt der Streulichteffekt deutlich geringer auf. Darum eignen sich Vergleiche zwischen photometerkopfbasierten und kamerabasierten LVK-Messsystemen um den Einfluss, aber auch die Ursache von Streulicht zu untersuchen. Deutlich ist dieser Effekt an dem in Abschnitt 0 unter „Messsystem B“ beschriebenen Beispiel zu erkennen. Die dort mit beiden Detektortypen vermessene Lichtquelle hat eine Blende, die einen LVK-Bereich nahezu vollständig abschirmt. Da es zwischen Kamera- und Photometermessung innerhalb dieses Bereichs zu großflächigen Messabweichungen kommt, ist dieser Einfluss auf Streulicht zurückzuführen. Dieses Streulicht lässt sich dabei in Raum- und Kamera-streu Licht unterteilen. Während Raumstreu Licht durch Oberflächen im Messraum auf den Messschirm gestreut wird, tritt Kamerastreu Licht in der Leuchtdichtemesskamera auf. Zur Verbesserung beider Streulichtanteile werden daher Querblenden und absorbierende Materialien verwendet. Dennoch lässt sich Streulicht durch diese Maßnahmen nicht vollständig unterdrücken, sodass mathematische Verfahren zum Einsatz kommen.

## 5.2 KAMERASTREULICHT

Kamerastreulicht entsteht aufgrund von Reflexion und Streuung im Objektiv, dem Gehäuse, in Filtern und auf dem Sensor der Kamera. Durch ein entsprechendes Hardwaredesign, wie zum Beispiel die Verwendung von entspiegelten Linsen und Blenden wird Streulicht zwar reduziert, eine vollständige Unterdrückung ist aber nicht möglich. In Abbildung 5.1 ist hierfür ein extremes Beispiel zu sehen. Das Leuchtdichtebild zeigt die Messschirmaufnahme eines kamerabasierten LVK-Messsystems, wobei ein engbündelnder Spot nur einen Teil der vordersten Raublende beleuchtet. Die beleuchtete Position im Raum ist dabei so gewählt, dass Raumstreu Licht auf dem Messschirm, d.h. im mittleren Bereich des Bildes, als vernachlässigbar angenommen werden kann. Dennoch ist über das Bild hinweg ein Leuchtdichteppich zu erkennen, der somit auf Kamerastreulicht zurückgeführt werden muss. Noch deutlicher veranschaulichen die auf den Spot zulaufenden Geisterbilder der Linsen einen Kamerastreulichteffekt. Um diesen Kamerastreulichtanteil zu reduzieren, müssen mathematische Korrekturverfahren angewandt werden. Dies ist möglich, wenn die Streulichtantwort eines Kamerapixels auf die übrigen Kamerapixel bekannt ist. So kann mittels Entfaltung eine Korrektur stattfinden. Ein solches Verfahren angewandt auf das Leuchtdichte Bild aus Abbildung 5.1 liefert das Ergebnis in Abbildung 5.2. Auch wenn ein Restanteil an Streulicht im Kamerabild verbleibt, ist es möglich Kamerastreulicht um eine Dekade zu korrigieren.



**Abbildung 5.1:** Leuchtdichteaufnahme eines engbündelnden Spots mit der Leuchtdichtemesskamera eines LVK-Messsystems ohne Streulichtkorrektur.



**Abbildung 5.2:** Leuchtdichteaufnahme eines engbündelnden Spots mit der Leuchtdichtemesskamera eines LVK-Messsystems mit Kamerastreuulichtkorrektur.

### 5.2.1 KAMERASTREULICHTKORREKTUR

Eng verwandt mit der Kamerastreuulichtkorrektur ist die spektrale Streulichtkorrektur für Array-Spektrometer von Zong et al. [32]. Fällt Licht einer Wellenlänge durch den Eintrittsspalt des Messgeräts, so trifft das Licht nicht nur auf den Sensorbereich der zu messenden Wellenlänge, sondern wird auch auf andere Sensorbereiche gestreut. Ist aber die wellenlängenabhängige Systemantwort des Spektrometers bekannt, kann nachträglich zu einer Messung eine Streulichtkorrektur durchgeführt werden. Ermittelt wird die Systemantwort mit Hilfe eines durchstellbaren Lasers. Dieses Vorgehen entspricht einer mathematischen Faltung des Systems mit einer Spektrallinie. Somit ergibt sich für jede Spektrallinie ein Satz von Linienspreizfunktionen,

die dem Messsignal dieser Spektrallinie entsprechen. Subtrahieren der Spektrallinien von den Linienspreizfunktionen und anschließendes Normieren ergibt die für die Korrektur notwendige Streulichtantwort des Messsystems, die im Folgenden als Streulichtverteilungsfunktionen (SVF) bezeichnet wird [56]. Für jeden spektralen Messwert  $y_{mess,i}$  kann so ein korrigierter Messwert  $y_{real,i}$  aus dem gemessenen Spektrum  $Y_{mess}$  sowie den SVF berechnet werden. Es gilt:

$$Y_{mess} = [\mathbf{E} + \mathbf{D}]Y_{real} = \mathbf{A}Y_{real} \quad (5.1)$$

wobei  $\mathbf{D}$  eine Matrix bestehend aus den Korrekturwerten der SVF ist,  $\mathbf{E}$  für die Einheitsmatrix steht und  $Y_{real}$  dem streulichtkorrigierten Spektrum entspricht. Durch eine Invertierung der Systemantwort  $\mathbf{A} = [\mathbf{E} + \mathbf{D}]$  lässt sich  $Y_{real}$  direkt berechnen:

$$Y_{real} = \mathbf{A}^{-1}Y_{mess}. \quad (5.2)$$

Dieses Verfahren kann auf bildgebende Detektoren, wie Leuchtdichthemesskameras übertragen werden, wie Zong et al. später zeigten [33, 56]. Anstatt der eindimensionalen wellenlängenabhängigen Linienspreizfunktion wird eine zweidimensionale ortsabhängige Punktspreizfunktion (PSF) verwendet. Dabei wird das Detektorsichtfeld mit einem Spot abgerastert und die jeweilige Antwort auf die unbeleuchteten Pixel untersucht. Die so ermittelten SVF können spaltenweise als eindimensionaler Vektor geschrieben werden, sodass, entsprechend Gleichung (5.2), wieder eine Korrekturmatrixt berechnet werden kann. Da allerdings die PSF in den meisten Fällen mehrere Pixel gleichzeitig ausleuchtet, ist es notwendig die Sensorauflösung für das Kamerastreulichtkorrekturverfahren zu verringern. Dies setzt die Annahme voraus, dass das Streulichtverhalten nahe

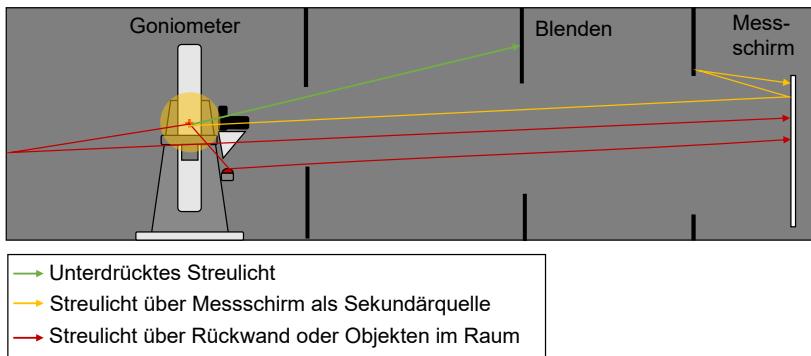
beieinanderliegender Pixel ähnlich ist. Gleichzeitig verringert sich der Rechenaufwand für die Korrektur. Die Wirksamkeit dieses Korrekturverfahren wird außerdem durch Streulichteinflüsse außerhalb des Kamerablickfelds begrenzt.

### 5.3 RAUMSTREULICHT

Raumstreuulicht ist der zweite einflussreiche Streulichtanteil bei einer kamerabasierten LVK-Messung. Er entsteht durch Streuung an Objekten im Raum und kann mit einer optimalen Auslegung von Raumblenden entsprechend Abbildung 5.3 deutlich unterdrückt werden. Dabei ist das Ziel, dass Streulicht über mindestens zwei Reflexionen an lambertsch-schwarzen Oberflächen von der Lichtquelle auf den Messschirm gelangt. Unter dieser Bedingung ist der entsprechende Raumstreuulichtanteil zu vernachlässigen.

Allerdings ergeben sich auch nach optimaler Blendenauslegung Raumstreuulichteffekte. So gelangt über die Rückwand Licht immer als einfachreflektiertes Streulicht auf den Messschirm. Außerdem wirkt der Messschirm selbst durch seine lambertsche Abstrahlcharakteristik bei gleichzeitig hohem Reflexionskoeffizienten als Sekundärlichtquelle. Reflexionen über den Messschirm, die beispielsweise an den Rückseiten der Blenden reflektiert werden, können somit näherungsweise als Einfachreflexionen betrachtet werden. Wie groß der Raumstreuulichteinfluss dieser Raumbereiche wirklich ist, kann mit

der in Absatz 5.6.4 vorgestellten Methode der integralen SVF bestimmt werden.



**Abbildung 5.3:** Raumstreulichteinflüsse im kamerabasierten LVK-Messsystem bei optimalem Raumblandendesign.

Darüber hinaus kann Raumstreulicht gemessen und korrigiert werden. Bizjak et al. zeigten dies an einem photometerbasierten LVK-Messsystem mit ortsfester Lichtquelle und beweglichem Photometer [57]. Da dieses Photometer mit einem Tubus zur Streulichtunterdrückung ausgestattet ist, sieht es nur direktes Licht von der Lichtquelle und Streulicht aus dem Raumbereich dahinter. Wird das bewegliche, um die Lichtquelle rotierende Photometer zusätzlich mit einem nach hinten gerichteten Photometer ausgestattet, sodass dort Streulicht detektiert werden kann, kann der gemessene Raumstreulichtanteil aus der gegenüberliegenden Photometermessung herausgerechnet werden. Wird allerdings die Lichtquelle bewegt und ist das Photometer

ortsfest, ändert sich die Beleuchtung hinter der Lichtquelle mit jeder Messwerterfassung, und dieses Verfahren ist nicht mehr anwendbar.

Bei kamerabasierten LVK-Messsystemen wirkt Raumstreu Licht außerdem aus einem deutlich größeren Raumbereich. Zur Streulichtkorrektur werden hier Faustwerte eingesetzt, die aus Streulichtmessungen typischer Lichtverteilungen ermittelt werden. Eine genauere Erläuterung dieses Verfahrens kann an dieser Stelle nicht erfolgen, es entspricht aber dem aktuellen Stand der Technik, ist im Messsystem B implementiert und wird im Ergebniskapitel als Vergleichskorrektur herangezogen. Unabhängig dessen kann eine allgemeingültige Korrektur des Raumstreu Lichts für kamerabasierte LVK-Messsysteme anhand einer bekannten Streulichtantwort des Raumes auf den Messschirm durchgeführt werden. Eine solche Korrektur wird als Raumstreu Lichtkorrektur bezeichnet. Ihr theoretisches Modell basiert neben der Kamerastreu Lichtkorrektur [56, 58] auch auf dem Prinzip des Differential-Goniophotometers von Zong et al. [31].

## 5.4 THEORETISCHES MODELL DER RSLK

Zur Herleitung der Raumstreu Lichtkorrektur (RSLK) eines kamerabasierten LVK-Messsystems wird zunächst ein Einkanal-Detektor betrachtet, der nicht mit einem Tubus gegen Raumstreu Licht abgeschirmt wird. Bei der Erfassung eines Lichtstärkewertes fällt somit ein Teil des direkt aus der Lichtquelle kommenden Lichts  $\Phi_{real}$  auf den Detektor und überlagert sich dort mit Raumstreu Licht  $\Phi_{rsl}$ . Vom

Detektor wird so eine LVK  $I_{mess}(\varphi, \vartheta)$  gemessen, die sich aus dem Realanteil  $I_{real}(\varphi, \vartheta)$  und einem Raumstreulichtanteil  $I_{rsl}(\varphi, \vartheta)$  zusammensetzt:

$$I_{mess}(\varphi, \vartheta) = I_{real}(\varphi, \vartheta) + I_{rsl}(\varphi, \vartheta) \quad (5.3)$$

Um die gemessene LVK zu korrigieren, muss der Raumstreulichtanteil berechnet werden. Dies ist möglich, wenn die Raumantwort  $R(\varphi', \vartheta')$  auf den Detektor bekannt ist.  $(\varphi', \vartheta')$  sind ortsfeste Weltkoordinaten, mit ihrem Ursprung im Goniometerdrehzentrum. Die Koordinaten  $(\varphi, \vartheta)$  sind die Koordinaten der LVK im Koordinatensystem der Lichtquelle. Die Raumantwort kann bestimmt werden, wenn jede Raumrichtung  $(\varphi', \vartheta')$  mit einem idealisierten Spot mit dem Lichtstrom  $\Phi_{LF}$  beleuchtet und das Detektorsignal  $I_s$  detektiert wird:

$$R(\varphi', \vartheta') = \frac{I_s(\varphi', \vartheta')}{\Phi_{LF}} \quad (5.4)$$

Zu beachten bleibt, dass in diesem Fall die Antwort des Realsignals mit abgebildet wird, falls der Spot in die Richtung des Detektors leuchtet. Wird eine LVK mit der Raumantwort gewichtet, entspricht das Vollraumintegral dem streulichtüberlagerten Messsignal (vgl. Abbildung 5.4) des Detektors:

$$I_{mess} = \int_{d\Omega'} R(\varphi', \vartheta') I_{real}(\varphi', \vartheta') d\Omega'. \quad (5.5)$$

Diese Einzelmesswerterfassung lässt sich auf andere Raumrichtungen übertragen, indem die LVK  $I_{real}(\varphi, \vartheta)$  über Gleichung (2.7) entsprechend Abbildung 5.5 mit

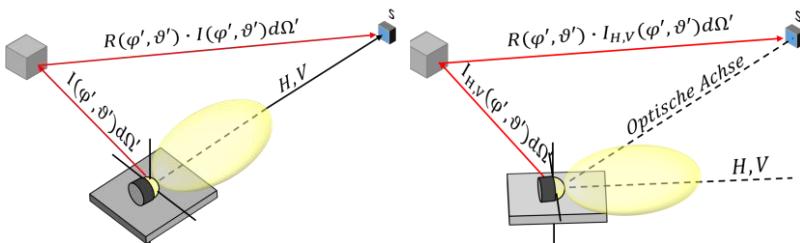
$$I_{real,H,V}(\varphi', \vartheta') = \rho_{H,V}^{-1}(I_{real}(\varphi, \vartheta)) \quad (5.6)$$

über die Goniometerkoordinaten  $H$  und  $V$  in die jeweilige Messposition rotiert wird. Ist der Detektor entlang der optischen Achse ausgerichtet, gilt  $(H, V) = (\varphi, \vartheta)$  und das Messsignal einer Einkanalmesung ergibt sich entsprechend Gleichung (5.5) und Gleichung (5.6) zu:

$$I_{mess}(\varphi, \vartheta) = \int_{d\Omega'} R(\varphi', \vartheta') \rho_{H,V}^{-1}(I_{real}(\varphi, \vartheta)) d\Omega'. \quad (5.7)$$

Diese Gleichung entspricht einer Faltung der LVK mit der Raumantwort:

$$I_{mess} = R * I_{real} \quad (5.8)$$

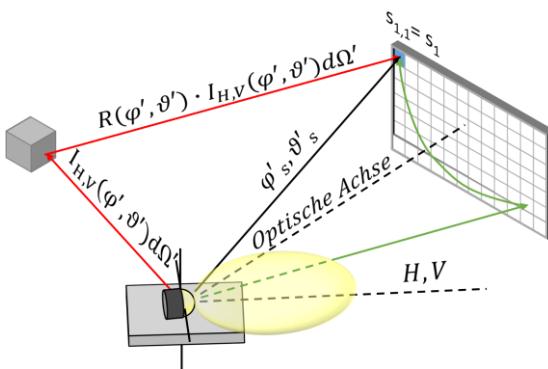


**Abbildung 5.4:** Streulichtanteil der **Abbildung 5.5:** Streulichtanteil der Raumrichtung  $(\varphi', \vartheta')$  auf den Detektor. Raumrichtung  $(\varphi', \vartheta')$  auf den Detektor unter einer Goniometerrotation.

Um die Faltung auf Mehrkanal-Detektoren zu übertragen müssen verschiedenen Detektorkanälen mit den Messrichtungen  $s = (\varphi'_s, \vartheta'_s)$  entsprechend Abbildung 5.6 berücksichtigt werden. Dabei wird einerseits, aufgrund der Detektorausdehnung, nicht mehr jede Goniometerkoordinate  $(H, V)$ , sondern lediglich eine Auswahl davon angefahren. Somit liegt nach der Faltung für jede Goniometerkoordinate ein LVK-Segment  $I_{mess,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  vor. Andererseits muss für jeden Detektorkanal eine eigene Raumantwort  $R(\varphi', \vartheta', \varphi'_s, \vartheta'_s)$  berücksichtigt werden. Somit ergibt sich für eine Mehrkanalmessung ein Satz aus LVK-Segmenten durch:

$$\begin{aligned}
 & I_{mess,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s) \\
 &= \int_{d\Omega'} R(\varphi', \vartheta', \varphi'_s, \vartheta'_s) \rho_{H,V}^{-1}(I_{real}(\varphi, \vartheta)) d\Omega' \tag{5.9}
 \end{aligned}$$

Diese werden entsprechend Absatz 2.4.1 mittels Stitching über ihre Goniometerkoordinaten zu einer LVK zusammengesetzt.



**Abbildung 5.6:** Streulichtberechnung bei einem Mehrkanaldetektor.

Da LVKs diskrete Dateiformate sind ist es notwendig Gleichung (5.9) zu diskretisieren:

$$I_{mess,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s) = \sum_i r_i(\varphi'_s, \vartheta'_s) \cdot d\Omega'_i \cdot I_{real,H,V,i}. \quad (5.10)$$

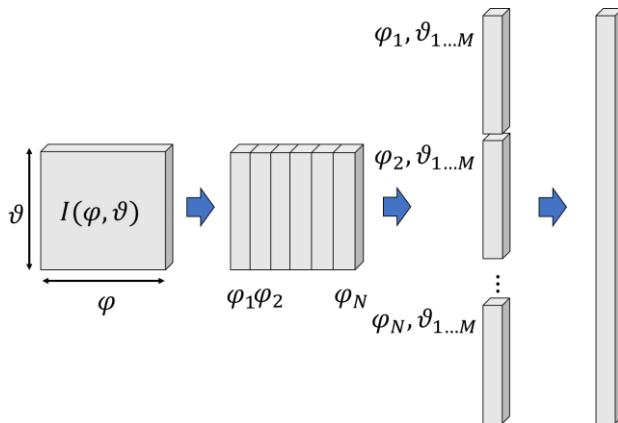
Der Index  $i$  steht dabei für die Raumrichtung  $(\varphi'_i, \vartheta'_i)$  und  $r_i(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  entspricht der Raumantwort der diskreten Raumrichtung  $i$  auf den Messschirm. Mit  $I_{real,H,V,i}$  wird die Lichtstärke der LVK bezeichnet, die nach einer Rotation der Testlichtquelle um die Goniometerkoordinaten in die Raumrichtung  $i$  leuchtet. Gleichung (5.10) wiederum lässt sich als eine Matrixmultiplikation darstellen, indem entsprechend Abbildung 5.7 die LVK in Spaltenvektoren und entsprechend Abbildung 5.8 die Raumantwort in Matrixform geschrieben wird [56, 58]. Die Berechnungsgleichung mittels Matrixmultiplikation ergibt sich für ein als Spaltenvektor geschriebenes LVK-Segment  $I_{mess,seg,H,V}$  mit der Raumantwort in Matrixschreibweise

$$\mathbf{R}_{s,i} = \begin{pmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{1,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{s,1} & \cdots & r_{s,i} \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

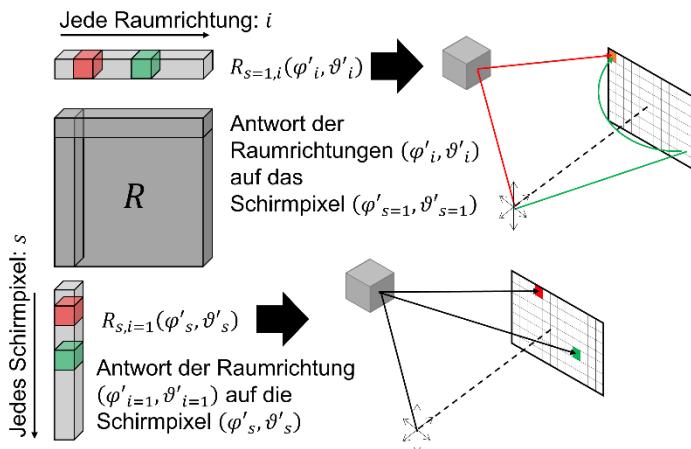
zu:

$$I_{mess,seg,H,V} = \mathbf{R}_{s,i} \cdot d\Omega'_i \cdot I_{real,H,V} \quad (5.12)$$

Diese Gleichung ähnelt stark der Gleichung der Kamerastreuulichtkorrektur aus Absatz 5.2.1, wobei  $\mathbf{R}_{s,i} \cdot d\Omega'_i$  der Matrix bestehend aus den Korrekturwerten der SVF und der Einheitsmatrix entspricht.



**Abbildung 5.7:** Umformung einer dreidimensionalen LVK in Vektorschreibweise für die Matrixmultiplikation.



**Abbildung 5.8:** Darstellung der Raumantwort in Matrixschreibweise. Zeilen der Raumantwortmatrix entsprechen der Raumantwort auf einen Detektorpixel. Spalten entsprechen der Raumantwort einer Raumrichtung auf den Detektor.

Allerdings ist es nicht einfach möglich  $\mathbf{R}_{s,i} \cdot \mathbf{d}\Omega'_i$  entsprechend Gleichung (5.2) zu invertieren und so die streulichtkorrigierte LVK direkt aus der gemessenen LVK zu berechnen. Ausschlaggebend dafür ist eine in dieser Form nicht quadratische Matrix  $\mathbf{R}_{s,i} \cdot \mathbf{d}\Omega'_i$ , da  $I_{mess,seg,H,V}$  dem LVK-Segment eines Kamerabildeinzugs und somit nur einem Teil von  $I_{real,H,V}$  entspricht. Für die Berechnung einer Matrix, die  $I_{real}$  auf  $I_{mess}$  abbildet, müssten u.a. die Goniometerkoordinaten miterücksichtigt werden. Ein solches Vorgehen wäre aufwändig und nur für vorgegebene Goniometerkoordinaten gültig, weshalb ein solcher Ansatz nicht verfolgt wird.

Eine andere Möglichkeit ist das Raumstreu Licht für jede Aufnahme direkt zu berechnen und von der gemessenen LVK-Aufnahme abzuziehen. Dies ist möglich indem entsprechend der Kamerastreu Lichtkorrektur die SVF verwendet wird. Die SVF lässt sich als die um den Direktanteil korrigierte Raumantwort darstellen. Sie wird im Folgenden als SVF-Matrix  $\mathbf{F}_{s,i}$  bezeichnet:

$$\mathbf{F}_{s,i} = \begin{pmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{s,1} & \cdots & f_{s,i} \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Ihre Einträge berechnen sich über das auf dem Detektor  $s$  gemessene Streulichtsignal  $I_{rsl,LF,s,i}$  wenn der als Lichtfinger bezeichnete idealisierte Spot die Raumrichtung  $i$  beleuchtet. Es gilt

$$f_{s,i} = \frac{I_{rsl,LF,s,i}}{\Phi_{LF}} = \begin{cases} \frac{I_s}{\Phi_{LF}} & \text{für } (\varphi'_s, \vartheta'_s) \neq (\varphi'_i, \vartheta'_i) \\ \frac{I_s - I_{LF}}{\Phi_{LF}} & \text{für } (\varphi'_s, \vartheta'_s) = (\varphi'_i, \vartheta'_i) \end{cases} \quad (5.14)$$

Um für die Stelle  $(\varphi'_s, \vartheta'_s) = (\varphi'_i, \vartheta'_i)$  nur den Streulichtanteil zu erhalten, muss der dort gemessene Lichtstärkewert  $I_s$  um die Lichtstärke des Lichtfingers  $I_{LF}$  korrigiert werden.

Durch die Verwendung der SVF anstelle der Raumantwort berechnet sich das Raumstreulicht eines LVK-Segments zu:

$$I_{rsl,seg,H,V} = \mathbf{F}_{s,i} \cdot d\Omega'_i \cdot I_{real,H,V}. \quad (5.15)$$

Da allerdings vor der RSLK die streulichtkorrigierte LVK nicht zur Verfügung steht, kann über  $\Phi_{real} \gg \Phi_{rsl}$  angenommen werden, dass durch  $I_{rsl}$  kein merkbarer Streulichteinfluss entsteht und somit  $I_{mess,H,V}$  anstatt  $I_{real,H,V}$  zur Berechnung des raumstreulichtkorrigierten LVK-Segments  $I_{real,seg,H,V}$  verwendet werden kann. Es ergibt sich:

$$I_{real,seg,H,V} = I_{mess,seg,H,V} - \mathbf{F}_{s,i} \cdot d\Omega'_i \cdot I_{mess,H,V} \quad (5.16)$$

Mit dieser Gleichung lässt sich das Raumstreulicht einer kamerabasierten LVK-Messung korrigieren. Allerdings liegen dieser theoretischen Betrachtungsweise Annahmen zugrunde, die auf die Praxis nicht übertragbar sind. So ist es nicht möglich einen Lichtfinger zu designen, dessen LVK einer idealisierten Dirac-Verteilung entspricht. Außerdem ist die Abtastung nicht beliebig klein wählbar. Die Leuchtlichtmesskamera liefert keine idealen rausch- und kamerastreulichtfreien SVFs und die Testlichtquelle, dessen LVK streulichtkorrigiert werden soll, ist keine ideal im Goniometerdrehzentrum justierte Punktlichtquelle. Aus diesen Gründen werden in den folgenden Abschnitten Faktoren diskutiert, die die RSLK unter realen Bedingungen möglich machen sollen.

## 5.5 LICHTFINGER

Zur Aufnahme der SVF ist eine engbündelnde Lichtquelle notwendig, die in das Goniometerdrehzentrum justiert wird, um so den Raum hinsichtlich seiner Raumantwort zu untersuchen. Diese Lichtquelle wird im Folgenden als Lichtfinger (LF) bezeichnet. Er ähnelt dem Kugelscanner, der zur Aufnahme der Kugelantwort einer Ulbricht-Kugel eingesetzt wird [59]. Allerdings ist auf einige Besonderheiten zu achten. Wichtige Parameter zur Auslegung des Lichtfingers sind:

- Die Lichtquellenstabilität
- Der Lichtstrom
- Der Öffnungswinkel
- Die LVK: Homogene Lichtverteilung maximaler Lichtstärke im Spot, homogene Lichtverteilung von 0 cd außerhalb des Spots und möglichst kleiner Übergangsbereich.

Die Lichtquellenstabilität muss gewährleistet sein, da für die Berechnung der SVF das aufgenommene Streulichtsignal auf den Lichtstrom normiert wird (vgl. Gleichung (5.4) und (5.14)). Ändert sich der Lichtstrom des Lichtfingers über die Streulichtmessung ist es auch möglich den Lichtstrom während der Messung aufzuzeichnen.

Um die Größe des Lichtstroms abzuschätzen muss das Rauschlevel des Messsystems  $I_r$  bekannt sein. Außerdem sollte die zu erreichende Sensitivität  $s_{min}$  einer Messung festgelegt werden, d.h. welche Lichtstärkeauflösung pro Lumen Lichtstrom der Testlichtquelle messbar

sein soll. Soll beispielsweise mit dem LVK-Messgerät eine Auflösung von 0,1 cd bei Testlichtquellen mit 1000 lm erreicht werden, so ergibt sich eine notwendige Sensitivität von  $s_{min} = 0,0001 \text{ cd/lm}$ .

Um daraus den notwendigen Lichtstrom des Lichtfingers zu bestimmen, muss die Gleichung zur Berechnung des Raumstreuolichts betrachtet werden. Ist  $I_{rsl,LF,i} + I_r$ , das mit Rauschen überlagerte Streulichtsignal, das mit dem in die Raumrichtung  $i$  leuchtenden Lichtfinger mit dem Lichtstrom  $\Phi_{LF,i}$  ermittelt wurde, so wird ein Betrag von

$$I_{rsl} = \sum_i \frac{I_{rsl,LF,i} + I_r}{\Phi_{LF,i}} \cdot \Phi_{Q,i} \quad (5.17)$$

an Raumstreuolicht korrigiert. Wobei  $\Phi_{Q,i}$  dem Lichtstromanteil der Testlichtquelle entspricht, der die Raumrichtung  $i$  beleuchtet. Um die geforderte Auflösung zu erreichen, muss der bei der Korrektur entstehende Fehler  $\frac{I_r}{\Phi_{LF,i}}$  kleiner als  $s_{min}$  sein, oder anders ausgedrückt

der Mindestlichtstrom des Lichtfingers  $\Phi_{LF,min}$  ergibt sich zu:

$$\Phi_{LF,min} = \frac{I_r}{s_{min}}. \quad (5.18)$$

Bei einem Rauschlevel von 0,01 cd und einer Sensitivität von 0,0001 cd/lm ist beispielsweise ein Mindestlichtstrom von  $\Phi_{LF,min} = 100 \text{ lm}$  erforderlich. Ein höherer Lichtstrom verbessert die Sensitivität der Korrektur. In diesem Fall kann Gleichung (5.18) auch dazu verwendet werden, um aus einem gegebenen Lichtstrom die Sensitivität zu berechnen.

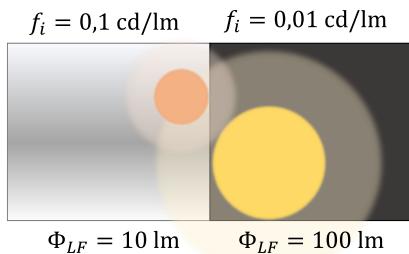
Da allerdings verschiedene technische Anforderungen wie der Öffnungswinkel und die LVK des Lichtfingers den Lichtstrom limitieren, ist der Mindestlichtstrom nicht immer zu erreichen. Einige dieser Anforderungen gelten aber wiederum nur für ausgewählte Regionen wie z.B. für den Messschirm. In diesem Fall kann ein speziell auf diese Region ausgelegter Lichtfinger verwendet werden. Um auch den Lichtstrom dieses Lichtfingers sinnvoll auszulegen ist es möglich ein Mindestkorrektturnivea zu fordern. Soll beispielsweise der Raumstreuulichtanteil einer Messung bezogen auf den Messwert um den Faktor  $k$  verbessert werden, so muss das Signal zu Rauschverhältnis der Streulichtmessungen  $\frac{I_{rst,LF,i}}{I_r}$  mindestens diesem Faktor entsprechen. Mit Gleichung (5.14) gilt dann für den Mindestlichtstrom der Raumrichtung  $i$ :

$$\Phi_{LF,min,i} > \frac{k \cdot I_r}{f_i} \quad (5.19)$$

wobei  $f_i$  dem SVF-Signal der zu analysierenden Raumrichtung entspricht. Wenn jetzt z.B. bekannt ist, dass die Messschirmregion SVF-Signale zwischen 0,005 und 0,5 cd/lm hervorruft, so kann für ein Mindestkorrektturnivea von  $k = 10$  ein Mindestlichtstrom von 20 lm abgeschätzt werden. Die maximal erreichbare Sensitivität, wenn Lichtstromanteile der Testlichtquelle diesen Raumbereich beleuchten, ergibt sich dann nach Gleichung (5.18) zu  $s_{min} = 0,005$  cd/lm.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Öffnungswinkel des Lichtfingers. Idealerweise sollte er an die Ortsfrequenzen der SVF angepasst werden. Durch verschiedene Tricks, wie eine Raumunter-

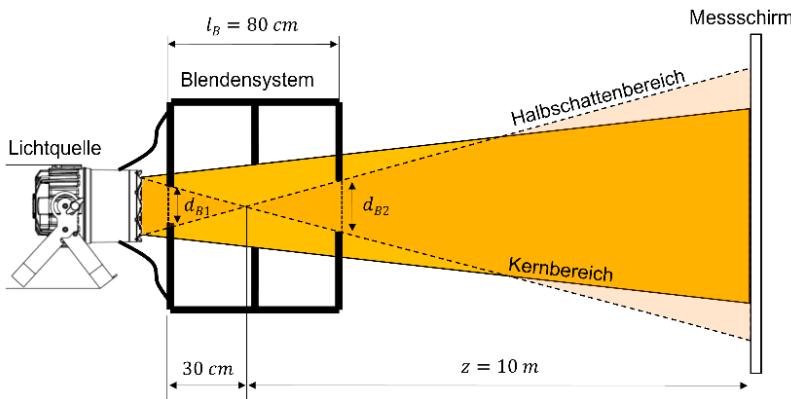
teilung, kann allerdings ein größerer Öffnungswinkel gewählt werden. Abbildung 5.9 veranschaulicht diesen Aspekt. Wird der Raum aufgrund von zwei sehr unterschiedlich reflektierenden Regionen unterteilt, kann er mit zwei verschiedenen Spots jeweils bis zur Grenze abgetastet werden. Somit lässt sich mithilfe vergleichsweise großer Öffnungswinkel trotzdem ein hoher Gradient der SVF abbilden. Eine solche Raumregion ist beispielsweise an der Messschirmgrenze zu finden.



**Abbildung 5.9:** Abtastung angrenzender Regionen mit deutlich unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten durch verschiedene Lichtfinger. Dieses Vorgehen ermöglicht die Abbildung hoher Ortsfrequenzen der SVF.

Eine weitere Anforderung an den Lichtfinger betrifft die LVK. Im Spot sollte die Lichtstärke möglichst homogen sein. In die übrigen Raumrichtungen darf kein messbares Licht entweichen. Dieses kann, wenn es auf den Detektor leuchtet, als Raumstreulicht fehlinterpretiert werden. Aus diesem Grund wird der Lichtfinger entsprechend Abbildung 5.10 mit einem Tubus versehen. Neben dem Kernbereich

des Spots entsteht somit nur ein kleiner Übergangsbereich an Streulicht, das an der Austrittslinse der Lichtquelle gestreut wird. Dieser Bereich wird im Folgenden als Halbschatten bezeichnet. Sollen Raumregionen weit entfernt des Messschirms analysiert werden, ist die Anforderung an einen kleinen Halbschattenbereich wenig relevant. Bei der Analyse von Raumregionen, die an den Messschirm angrenzen oder die dem Messschirm selbst zugehören, dürfen allerdings die Halbschattenbereiche nicht zu groß gewählt werden. Beleuchtet der Kernbereich oder ein Teil des Halbschattens den Messschirm direkt, müssen diese Bereiche aus den Streulichtsignalen nahegelegener Detektorbereiche interpoliert oder extrapoliert werden. Eine Subtraktion der LVK des Spots ist an dieser Stelle nicht möglich, da die Größenordnung des Raumstreu Lichts im Unsicherheitsbereich der Lichtstärke des Spots liegt.



**Abbildung 5.10:** Berechnung des Halbschattens durch die Abmessungen des Tubus des Lichtfingers.

Die Größe des Halbschattenbereichs für einen Lichtfinger berechnet sich aus der Lichtaustrittsfläche bzw. dem Eintrittsblendendurchmesser des Tubus  $d_{B1}$ , der Tubuslänge  $l_B$  und dem Austrittsblendendurchmessers  $d_{B2}$ . Für einen kleinen Halbschatten müssen die Blendendurchmesser so klein wie möglich und die Tubuslänge so groß wie möglich ausgelegt werden. Während die Tubuslänge über die Größe der maximal noch auf dem Goniometer messbaren Lichtquelle begrenzt wird, muss die Größe der Eintrittsblende im Kompromiss zum Lichtstrom ausgelegt werden. Ein großer Lichtstrom erfordert eine große Lichtaustrittsfläche der Lichtquelle, die bei der Fokussierung der LVK durch die Erhaltungsgröße Étendue weiter vergrößert wird.

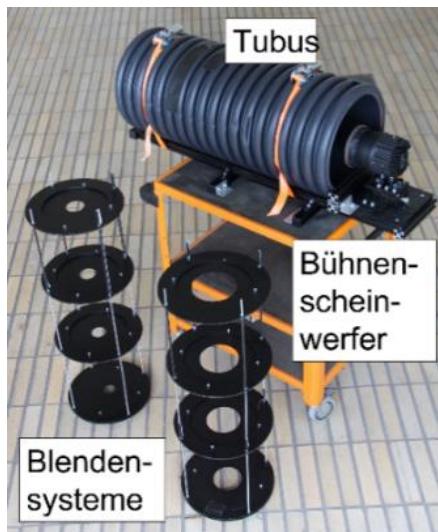
Zum Design eines geeigneten Lichtfingers sind also mehrere Faktoren entscheidend. Da allerdings durch die Aufteilung des Messraums in Regionen mehrere Lichtfinger verwendet werden können, ist es möglich die Lichtfinger an die jeweiligen Gegebenheiten anzupassen. In dem hier untersuchten Messsystem werden konkret zwei Regionen unterschieden. Die erste Region umfasst den Messschirm, daher wird sie als Messschirmregion bezeichnet. Das Besondere an dieser Region ist, dass der Lichtfinger auf den Detektor leuchtet. Dem Streulichtsignal ist somit die LVK des Lichtfingers überlagert. Damit dieser Direktanteil möglichst einfach korrigiert werden kann, muss der Tubus für einen möglichst kleinen Halbschattenbereich ausgelegt werden. Die zweite Region umfasst den übrigen Raum und wird im Folgenden als Raumregion bezeichnet. Die Streulichtkoeffizienten dieser Region können wesentlich geringer ausfallen. Da aber die

Anforderung an einen kleinen Halbschatten nicht gegeben ist, kann der Lichtstrom deutlich größer als bei der Schirmregion gewählt werden.

Die Lichtfinger sollen für eine LVK-Messung mit einer streulichtbedingten Sensitivität von 0,0001 cd/lm ausgelegt werden. Somit sind bei einem Rauschlevel von 0,01 cd mindestens 100 lm Lichtstrom notwendig. Um das zu erreichen wurde als Lichtfinger-Prototyp der Bühnenscheinwerfer X4-Atom der Firma *GLP German Light Products GmbH*, mit 250 lm Lichtstrom und einem einstellbaren Öffnungswinkel von 3,5° bis 34° gewählt. Zur Einschränkung des Halbschattens wurden entsprechend Abbildung 5.11 zwei verschiedene Tubus-Systeme konstruiert. Da der Lichtschwerpunkt des auf 3,5° fokussierten Lichtfingers deutlich hinter der Lichtquelle liegt, beträgt der Öffnungswinkel des Spots, der 95% des Lichtstroms enthält, bei dieser Einstellung in 10 m Entfernung 5°.

Der für die Messschirmregion designierte Tubus begrenzt den Lichtstrom auf 26 lm bei einem Öffnungswinkel des Halbschattens in 10 m Entfernung von 5,6°. Dadurch wird zwar der geforderte Mindestlichtstrom von 100 lm nicht erreicht, allerdings kann anhand des minimalen SVF-Signals von 0,005 cd/lm das der Messschirm aufweist über Gleichung (5.19) ein mögliches Korrekturmiveau von  $k = 13$  bestimmt werden. Dieses Korrekturmiveau sollte kritisches Streulicht ausreichend korrigieren. Der Kernbereichöffnungswinkel, bezogen auf 10 m Entfernung in den 99 % des Lichtstroms fallen, beträgt 5°.

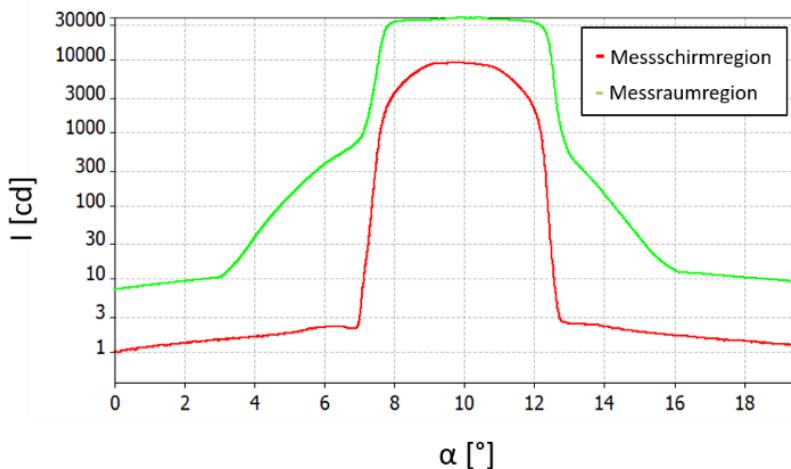
Der für die Raumregion designte Tubus begrenzt den Lichtstrom auf 196 lm bei einem Halbschattenöffnungswinkel von 14,6° und einem Kernbereichöffnungswinkel (mit 99 % des Lichtstroms) von 8°. Diese und alle weiteren Parameter der verwendeten Lichtfinger werden in Tabelle 5.1 aufgelistet. Da der Lichtstrom über die Messung nicht konstant gehalten werden kann muss er während der Messung aufgezeichnet werden. Abbildung 5.12 stellt die LVKs der beiden Lichtfinger gegenüber, aus denen die in Tabelle 5.1 beschriebenen Werte ermittelt wurden. Hier ist deutlich zu erkennen, dass für die Messschirmregion der Halbschatten des Lichtfingers fast vollständig eingeschränkt wurde. Der übrige Offset ist Raumstreuulicht.



**Abbildung 5.11:** Der für die Aufnahme der SVFs verwendete Lichtfinger inklusive der Tubussysteme der Raum- und Messschirmregion.

**Tabelle 5.1:** Parametervergleich der Lichtfinger.

|                                     | Messschirm-<br>region | Raum-<br>region |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Lichtstrom $\Phi_{LF}$              | 26 lm                 | 196 lm          |
| Blendendurchmesser $d_{B1}$         | 45 mm                 | 90 mm           |
| Blendendurchmesser $d_{B2}$         | 55 mm                 | 120 mm          |
| Kernbereich ( $\Phi > 99\%$ , 10 m) | 5°                    | 8°              |
| Halbschatten (10 m)                 | 5,6°                  | 14,6°           |

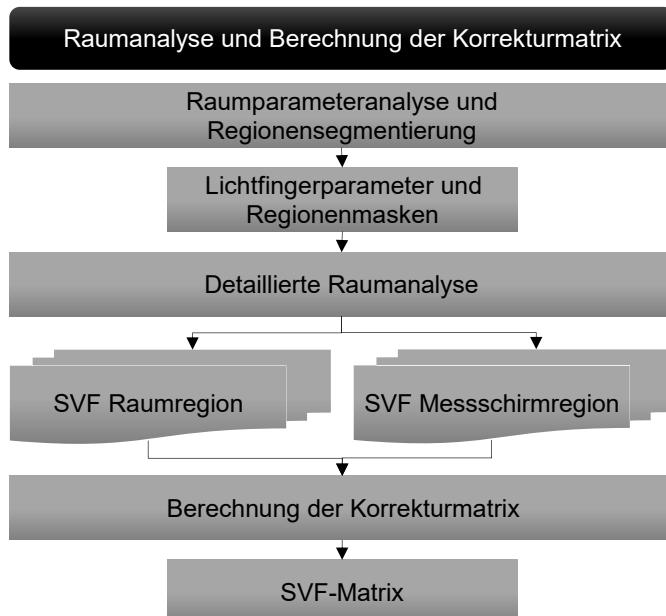


**Abbildung 5.12:** LVK-Schnitte der Lichtfinger.

## 5.6 SVF UND SVF-MATRIX

Wird mit den Lichtfingern der Raum gescannt, und zu jeder Raumrichtung eine Aufnahme getätigt, ergeben sich die entsprechenden

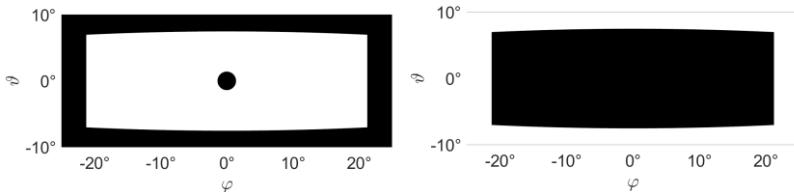
SVFs aus denen die Raumstreuulichtkorrekturmatrixt (SVF-Matrix) berechnet wird. Die zur Berechnung notwendigen Prozessschritte sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Zuerst erfolgt die Raumparameteranalyse und Regionensegmentierung, bei der der Raum grundlegend analysiert wird. Das Ergebnis ist die Unterteilung des Raums in Regionen und die Bestimmung der Lichtfingerparameter zu jeder Region. Anschließend erfolgt die detaillierte Raumanalyse. Hierbei wird für jede Region ein Satz an SVFs aufgenommen, die dann bei der Berechnung der Korrekturmatrixt zur SVF-Matrix zusammenge setzt werden.



**Abbildung 5.13:** Ablaufplan zur Raumstreuulichtanalyse und zur Berechnung der Raumstreuulichtkorrekturmatrixt (SVF-Matrix).

### 5.6.1 RAUMPARAMETERANALYSE UND REGIONENSEGMENTIERUNG

Während der Raumparameteranalyse und Regionensegmentierung wird der Raum in Regionen unterteilt und die Lichtfingerparameter bestimmt, mit deren Hilfe die jeweiligen Regionen in der detaillierten Raumanalyse gescannt werden. Dies erfolgt über eine Streulichtmessung des gesamten Raums, indem ein Lichtfinger mit großem Lichtstrom den Vollraum grob abstrahrt und die integrale SVF berechnet wird (vgl. Absatz 5.6.3). So können streulichtrelevante Regionen detektiert werden. Außerdem erfolgt die Unterteilung zwischen Messschirm- und Raumregion mittels der Regionensegmentierung. Hierbei werden die Raumgrenzen der verschiedenen Regionen anhand der strahlbegrenzenden Querblende festgelegt. So kann anschließend das Stützstellenraster zur Abtastung der jeweiligen Region mit dem Lichtfinger erstellt werden. Für das Messsystem B zeigen Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 binäre *Regionenmasken*, die die Zugehörigkeit einer Raumrichtung zur jeweiligen Region angeben. Eine Besonderheit des Messsystems B ist der Photometerkanal. Da er nicht zum Raumstreu Licht des Messsystems beiträgt, darf er weder der Messschirm- noch der Raumregion zugeordnet werden.

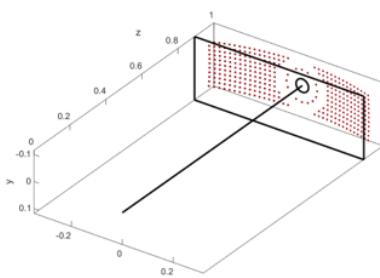


**Abbildung 5.14:** Regionenmaske der Messschirmregion (weiß ist logisch „1“).

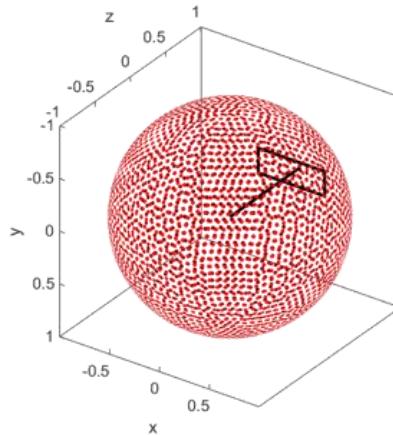
**Abbildung 5.15:** Regionenmaske der Raumregion (weiß ist logisch „1“).

Das Stützstellenraster der SVF Aufnahmen für die detaillierte Regionenanalyse wird über den Öffnungswinkel des Kernbereichs des jeweiligen Lichtfingers bestimmen. Benachbarte Stützstellen sollten so eng zusammen liegen, dass jede Raumrichtung mindestens einmal von einem Teil des Kernbereichs gesehen wird. Außerdem muss der Kernbereich immer vollständig innerhalb der zu analysierenden Messregion liegen. Andernfalls könnte das Streulichtsignal aufgrund von zu hohen oder zu niedrigen Streulichtkoeffizienten fehlerhaft sein. Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 zeigen die verwendeten Stützstellenraster der Raum- und Messschirmregion. Für die Messschirmregion ergeben sich 304 Raumrichtungen, die vorwiegend in einem  $1^\circ$ -Raster im B-Koordinatensystem (konstante  $(H, V)$ -Koordinaten) angeordnet sind. Nur um den Photometerkanal entsprechend detailliert abzubilden, werden Stützstellen aus dem äquidistanten  $1^\circ$ -Raster weggelassen und durch rotationssymmetrische, um den Photometerkanal angeordnete Stützstelle ersetzt. Für die Raumregion ist es sinnvoll eine Anordnung des Rasters mit nahezu äquidistanten

Raumwinkelbereichen zu wählen. Eine entsprechende Aufteilung mit einer lückenlosen Raumabdeckung ergibt 2986 Stützstellen [60].



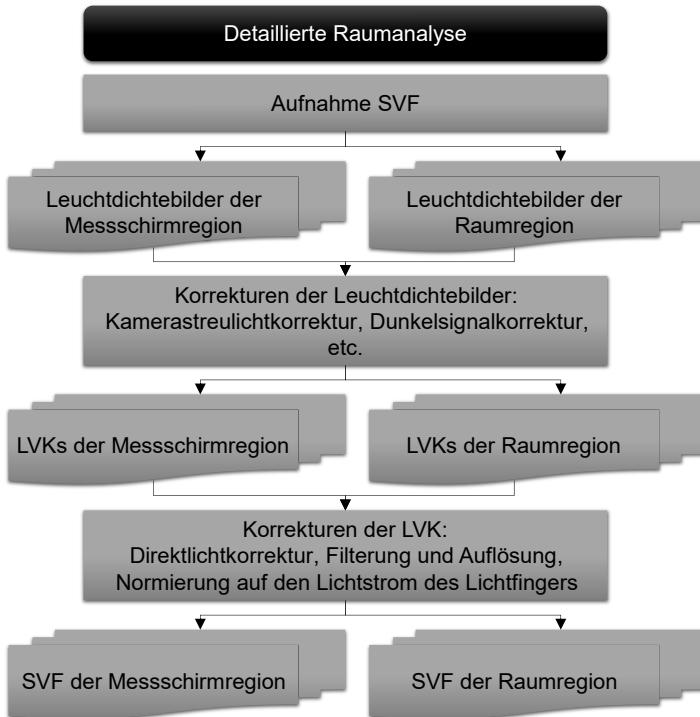
**Abbildung 5.16:** Rasterpositionen der Messschirmregion.



**Abbildung 5.17:** Rasterpositionen der Raumregion.

### 5.6.2 DETAILLIERTE RAUMANALYSE

Ziel der detaillierten Raumanalyse ist die Aufnahme der SVFs  $\mathbf{F}_{s,i}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  für jede Region. Die Aufnahmen erfolgen dabei zuerst als Leuchtdichtebild. Auf eine erfasste Leuchtdichteaufnahme müssen dann einige Berechnungsschritte angewandt werden. Der hierfür notwendige Prozess ist in Abbildung 5.18 dargestellt.



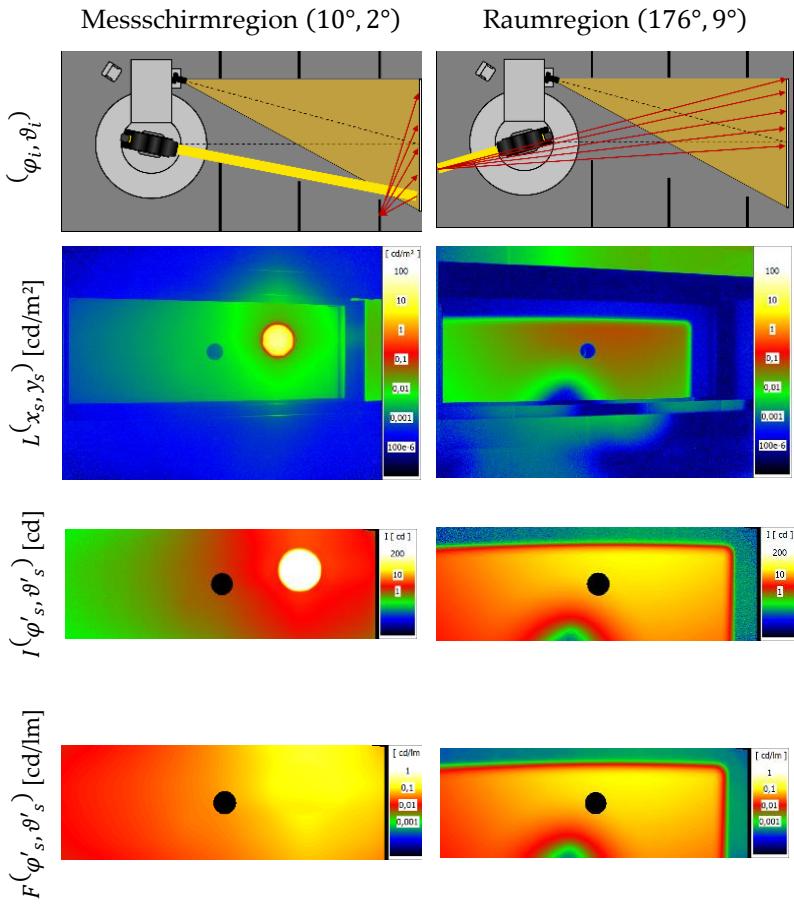
**Abbildung 5.18:** Ablaufplan zur Berechnung der SVF aus den aufgenommenen Leuchtdichtebildern.

Ist für jede Region eine Streulichtanalyse erfolgt liegt für jede Raumrichtung  $i$  ein Leuchtdichtebild  $L(x_s, y_s)$  vor. Abbildung 5.19 zeigt exemplarisch für die Messrichtung  $(\varphi'_i, \vartheta'_i) = (176^\circ, 9^\circ)$  aus der Raumregion und  $(\varphi'_i, \vartheta'_i) = (10^\circ, 2^\circ)$  aus der Messschirmregion die jeweilige Aufnahme. Falls noch nicht geschehen, müssen diese Aufnahmen zunächst defektpixel-, dunkelsignal- und kamerastreulichtkorrigiert werden. Anschließend kann ein LVK-Segment  $I(\varphi'_s, \vartheta'_s)$

entsprechend dem vorliegenden Kalibrierdatensatz berechnet werden. Zuletzt muss aus dem LVK-Segment die SVF berechnet werden. Dazu findet zuerst eine Direktlichtkorrektur statt. Notwendig ist dies vor allem für die Messschirmregionen. Über die Raumrichtung  $(\varphi'_i, \vartheta'_i)$ , die der Lichtfinger zur Aufnahme der SVF beleuchtet, und die Größe des Halbschattenbereichs wird der Direktanteil ausgeschnitten und inter- bzw. extrapoliert. Anschließend wird das direktlichtkorrigierte LVK-Segment auf den Lichtstrom des Lichtfingers normiert. Somit ergibt sich die unter  $F(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  abgebildete SVF in logarithmischer Falschfarbendarstellung.

### 5.6.3 BERECHNUNG DER KORREKTURMATRIX

Über die ermittelten SVF kann die Raumstreu Lichtkorrekturmatrixt (SVF-Matrix) aus Gleichung (5.16) berechnet werden. Durch die Unterteilung des Raums in mehrere Regionen ist es für die spätere RSLK einfacher separate SVF-Matrizen  $F_{s,i,region}$  zu erstellen. Demnach ergibt sich eine SVF-Matrix der Raumregion  $F_{s,i,raum}$  sowie eine SVF-Matrix der Messschirmregion  $F_{s,i,schirm}$ . Für die jeweilige Matrix müssen äquivalent zur Raumantwortmatrix aus Abbildung 5.8 die berechneten SVF als Spaltenvektoren nebeneinander geschrieben werden. Jede Spalte entspricht so der Streulichtantwort der Raumrichtung  $i$  auf den Detektor.



**Abbildung 5.19:** Berechnung der SVF  $F(\varphi_s, \vartheta_s)$  aus einem aufgenommenen Leuchtdichtebild  $L(x_s, y_s)$  über die Lichtstärke  $I(\varphi_s, \vartheta_s)$  für zwei ausgewählte Messrichtungen. Die Darstellung ist jeweils eine fünffach logarithmische Falschfarbenskala.

### 5.6.4 INTEGRALE STREULICHTVERTEILUNGSFUNKTION

Für eine anschauliche Raumstreu Lichtanalyse eines Messraums eignet sich die integrale Streulichtverteilungsfunktion. Sie kann als das Integral über  $(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  berechnet werden, wenn für jede Raumrichtung  $(\varphi'_i, \vartheta'_i)$  eine SVF vorliegt. Die integrale Streulichtverteilungsfunktion ergibt sich dann zu

$$F_{integral}(\varphi'_i, \vartheta'_i) = 100\% \cdot \int_{d\Omega'_s} F_{s,i}(\varphi'_i, \vartheta'_i, \varphi'_s, \vartheta'_s) d\Omega'_s \quad (5.20)$$

und ist einfach in einem sphärischen Koordinatensystem darstellbar.

## 5.7 PROZESS DER RSLK

Zuletzt soll die Berechnung der RSLK erläutert werden. Grundlegend dafür ist die SVF-Matrix, die entsprechend Absatz 5.6.3 für jede Region einzeln berechnet wurde. Das Raumstreu Licht eines LVK-Segments, der jeweiligen Region ergibt sich nach Gleichung (5.16) zu:

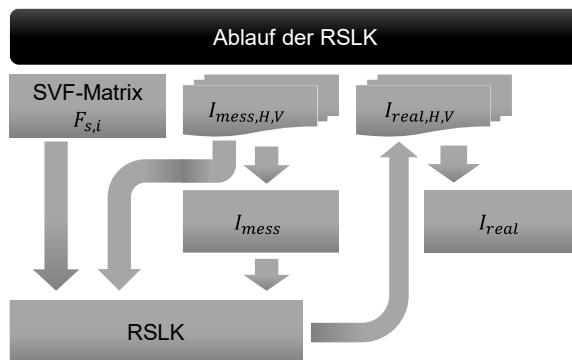
$$I_{rst,seg,H,V,region} = \mathbf{F}_{s,i,region} \cdot \Phi_{mess,H,V,region}, \quad (5.21)$$

wobei die in Gleichung (5.16) enthaltenen Raumwinkelelemente  $d\Omega'_i$  nicht Teil der Korrekturmatrixt sind. Vielmehr werden sie direkt mit der gemessenen LVK verrechnet. Hierfür wird die gemessene LVK in eine Lichtstrom-Verteilungskurve umgerechnet und anschließend in die Aufnahmeposition rotiert. Das Ergebnis ist  $\Phi_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$ . Im nächsten Simulationsschritt wird über die Regionenmasken entschieden, welcher Eintrag von  $\Phi_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$  in welcher Region

Streulicht verursacht. Innerhalb einer Region können dann die Lichtstromeinträge von  $\Phi_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$  in die Lichtstromvektoren  $\Phi_{mess,H,V,region}$  eingesortiert werden. Das Raumstreu Licht des gesamten Systems wird anschließend durch die Summe des in den verschiedenen Regionen verursachten Raumstreu Lichts berechnet:

$$I_{rsl,seg,H,V} = I_{rsl,seg,H,V,schirm} + I_{rsl,seg,H,V,raum}. \quad (5.22)$$

Anschließend wird das Raumstreu Licht von der gemessenen LVK abgezogen. Da die RSLK für jedes LVK-Segment einzeln erfolgen muss, ist zur Korrektur der gesamten LVK der in Abbildung 5.20 abgebildete Vorgang notwendig. Die LVK-Segmente der Testlichtquelle  $I_{mess,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  werden dazu über den Image-Stitching Prozess zur LVK  $I_{mess}(\varphi, \vartheta)$  zusammengesetzt. Anschließend kann über die SVF-Matrix jedes einzelnen LVK-Segments zu  $I_{real,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  raumstreu Licht korrigiert werden. Die raumstreu Licht korrigierten LVK-Segmente wiederum werden mittels Image-Stitching zur LVK  $I_{real}(\varphi, \vartheta)$  zusammengefügt.



**Abbildung 5.20:** Prozess der RSLK.



---

## Kapitel 6

# PHOTOMETRISCHE GRENZENTFER- NUNG

Bei einer LVK-Messung sollte der über die photometrische Grenzentfernung gegebene Mindestmessabstand eingehalten werden, sodass die Abweichung zwischen der Messgröße und der tatsächlichen LVK innerhalb einer gegebenen Toleranz liegt. Allerdings ist nach Absatz 2.2 die photometrische Grenzentfernung nicht einfach zu bestimmen, weshalb Abschätzungen auf Basis analytischer Lichtquellenmodelle verwendet werden. Wie gut sich die Abschätzungen dieser Modelle auf reale Lichtquellen übertragen lassen, soll mit der in diesem Kapitel beschriebenen Methode auf Basis von Strahlendaten untersucht werden<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Die vorgestellte Methodik wurde bereits in der Masterarbeit des Autors unter dem Titel „Berechnung der dynamischen photometrischen Grenzentfernung“ veröffentlicht [61]. Ausstehend war aber eine detaillierte und realitätsnahe Überprüfung der Ergebnisse anhand von Strahlendatensätzen realer Lichtquellen, deren Vergleich zu äquivalenten Punktlichtquellenmodellen und eine Analyse des Einflusses der Lichtquellenjustage auf dem Goniometer. Die Ergebnisse der nachfolgenden Analysemethode wurden in einem Beitrag auf der LICHT 2021 präsentiert [62].

Die in Absatz 2.2 beschriebenen Abschätzungsgleichungen für die photometrische Grenzfernentfernung basieren auf Berechnungen mittels analytischer Lichtquellenmodelle. Grundlage dafür ist die photometrische Grenzfernentfernung eines kreisrunden Lambertstrahlers. Hierbei lässt sich zeigen, dass die Messabweichung entlang der Hauptabstrahlrichtung für Messabstände ab dem fünfachen des Lichtquellendurchmessers bei unter 1% liegt [10]. Für nicht lambertsche Lichtquellen können diese Berechnungen mit Lichtquellenmodellen auf Basis von  $\cos^n(\vartheta)$ -Verteilungen durchgeführt werden. Moerman et al. zeigten damit, dass die photometrische Grenzfernentfernung engstrahlender Lichtquellen deutlich größer ist [14]. Eine signifikante Richtungsabhängigkeit konnte später von Jacobs et al. mit einem verbesserten Ansatz dieser Modelle nachgewiesen werden [15]. Unter anderem wurde dafür eine Lichtquelle bestehend aus zwei Punktlichtquellen mit engbündelnder Verteilung ( $n \gg 1$ ) analysiert. Den Einfluss einer Fehljustage der Lichtquelle bei einer LVK Messung anhand eines simulierten LED-Arrays berechneten Cai et al., indem sie für diesen speziellen Lichtquellentyp die für den Messabstand maximal erlaubte Fehljustage ermittelten, um innerhalb der Messabweichung von 1% zu bleiben [63].

Diese Veröffentlichungen zeigen eindrücklich den Einfluss der Lichtquellenausdehnung, des Abstrahlverhaltens sowie einer Fehljustage der Lichtquelle auf die photometrische Grenzfernentfernung. Allerdings basieren die durchgeführten Berechnungen auf analytischen Lichtquellenmodellen. Um die Problematik auch für reale Lichtquellen zu überprüfen müssen Lichtquellenmodelle verwendet werden, die das

orts- und winkelabhängige Abstrahlverhalten einer Lichtquelle deutlich präziser wiedergeben. Eine Möglichkeit hierfür sind mit einem Nahfeldgoniophotometer aufgenommene Strahlendaten, die die LeuchtdichteVerteilung einer Lichtquelle beschreiben. Diese als Rayfiles bezeichneten Datenfiles bestehen aus mehreren Millionen Strahlen, die entsprechend der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle angeordnet sind. Jeder Strahl wird dabei durch einen Startpunkt und eine Raumrichtung beschrieben und trägt einen zugehörigen photometrischen Wert. Da allerdings die Lichtströme der Strahlen konstant sind, können diese in den nachfolgenden Berechnungen vernachlässigt werden [29].

## 6.1 BERECHNUNG DER PHOTOMETRISCHEN GRENZENTFERNUNG

Für eine gegebene LeuchtdichteVerteilung  $L(A_Q, \varphi, \vartheta)$  einer Lichtquellen kann die LVK durch Vernachlässigung der Lichtquellenausdehnung berechnet werden:

$$I(\varphi, \vartheta) = \int_{A_Q} L(A_Q, \varphi, \vartheta) \cos(\vartheta) dA_Q. \quad (6.1)$$

$A_Q$  bezeichnet dabei eine infinitesimale Fläche auf der Lichtquellenoberfläche, die in die Raumrichtung  $(\varphi, \vartheta)$  abstrahlt. Wird dagegen die LVK in endlicher Entfernung gemessen, ergibt sich eine Verteilungskurve, die im Folgenden als Pseudo-LVK bezeichnet wird. Sie berechnet sich für den Messabstand  $r$  zu:

$$I_{pseudo}(r, \varphi, \vartheta) = r^2 \int_{A_Q} \frac{L(A_Q, \varphi, \vartheta) \cos(\varepsilon_Q) \cos(\varepsilon_D)}{r_{QD}^2} dA_Q. \quad (6.2)$$

Berücksichtigt werden müssen dabei die Terme  $\cos(\varepsilon_Q)$  für den Abstrahlwinkel der infinitesimalen Fläche  $dA_Q$  und  $\cos(\varepsilon_D)$  für den Einfallswinkel des Lichts auf den Detektor [15].  $r_{QD}$  ist der Abstand zwischen  $dA_Q$  und dem Detektor. Durch die Berechnung der Pseudo-LVK für verschiedene Abstände sowie der LVK kann die photometrische Grenzfernernung (PGE) mit

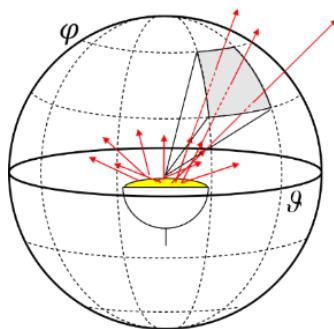
$$PGE(\varphi, \vartheta) = R \quad | \quad \epsilon(r, \varphi, \vartheta) = \left| 1 - \frac{I_{pseudo}(r, \varphi, \vartheta)}{I(\varphi, \vartheta)} \right| < \delta \quad \forall \quad r \geq R \quad (6.3)$$

berechnet werden. In Worten ausgedrückt besagt Gleichung (6.3), dass für verschiedene Messabstände  $r$  Pseudo-LVKs ausgerechnet und deren Abweichungen zur LVK berechnet werden. Der kürzeste Messabstand mit einer Abweichung kleiner 1% ist die photometrische Grenzfernernung, sofern die Abweichung größerer Messabstände ebenfalls unter der 1% Schwelle bleibt. Wird die photometrische Grenzfernernung durch die maximale Ausdehnung der Quelle geteilt, ergibt sich das photometrische Grenzverhältnis (PGV):

$$PGV(\varphi, \vartheta) = \frac{PGE(\varphi, \vartheta)}{D} \quad (6.4)$$

Da die zur Verfügung stehenden Messdaten Strahlendaten sind, muss diese Berechnung numerisch stattfinden. Für eine LVK Berechnung wird dazu die Richtung der Strahlen nach Gleichung (2.3) in sphärische Koordinaten umgerechnet, und der Lichtstrom aller Strahlen innerhalb eines Raumwinkelelements aufsummiert. Für die Berechnung einer Pseudo-LVK müssen die Strahlen entsprechend

Abbildung 6.1 zuerst auf eine Kugeloberfläche im Abstand  $r$  projiziert und dann bezogen auf den Lichtschwerpunkt in sphärische Koordinaten umgerechnet werden. Anschließend kann ebenfalls der Lichtstrom aller Strahlen in einem Raumwinkelement aufsummiert werden. Gewichtet über die Raumwinkelgröße ergibt sich der jeweilige Lichtstärkewert.



**Abbildung 6.1:** Berechnung einer Pseudo-LVK aus Strahlendaten durch Projektion der Strahlen auf eine Kugel im Abstand  $r$  und Aufsummieren der Strahlen in einem Raumwinkelement.

Ein entscheidender Berechnungsfaktor ist dabei die Form und Größe der Raumwinkelemente. Die Größe der Raumwinkelemente ist ein Kompromiss zwischen Auflösung und Sensitivität. Ein zu großer Raumwinkel bildet unter Umständen die Messauflösung der LVK nicht mit ab, während bei einem zu kleinen Raumwinkel aufgrund von einer zu geringen Strahlanzahl pro Raumwinkelbereich Diskretisierungsfehler möglich sind. Die Raumwinkelform ist darüber hinaus ein Kompromiss zwischen Berechnungsgeschwindigkeit und

Gleichförmigkeit. In dieser Arbeit werden kanonische Raumwinkel gewählt. Somit ist der zur Berechnung benötigte Rechenzeitaufwand vergleichsweise groß, das Photometer mit seiner runden Form wird aber realitätsnaher abgebildet. Welche Raumwinkelformen für eine Berechnung in Frage kommen, ist außerdem in einem Konferenzbeitrag der *LuxJunior 2017* in Ilmenau nachzulesen [64].

Um die Ergebnisse zu validieren, wird der Punktlichtquellenansatz aus [15] erweitert, indem eine Lichtquelle aus einer beliebigen Anzahl an  $\cos^n(\vartheta)$ -strahlenden Punktlichtquellen zusammengesetzt wird, die entsprechend der leuchtenden Fläche angeordnet sind. Die Verteilung der Punktlichtquellen erfolgt dabei stochastisch anhand einer Beleuchtungsstärkeverteilung in der Ebene des Lichtschwerpunkts. Der Exponent  $n$  wird mit einer Ausgleichsrechnung aus einem  $\cos^n \vartheta$ -Fit der gemessenen LVK bestimmt. Die für die Simulation der photometrischen Grenzfernernung notwendige Berechnung der Pseudo-LVKs erfolgt über eine abgewandelte Form der Gleichung (6.2), wobei  $I_{Q,i}(\varphi_D, \vartheta_D)$  der Lichtstärke der Punktlichtquelle  $i$  entspricht, die auf den Detektor an der Stelle  $(\varphi, \vartheta)$  trifft:

$$I_{pseudo}(r, \varphi, \vartheta) = r^2 \sum_i \frac{I_{Q,i}(\varphi_D, \vartheta_D) \cos(\varepsilon_Q) \cos(\varepsilon_D)}{r_{QD}^2} \quad (6.5)$$

Die Berechnung der photometrischen Grenzfernernung aus  $\cos^n \vartheta$ -Punktlichtquellen wird als analytische Berechnung bezeichnet.

### 6.2 AUSWERTUNGSMETHODE

Zur Überprüfung der Abschätzungsformeln werden Strahlendaten mit einem Nahfeldgoniophotometer aufgenommen. Anschließend wird die photometrische Grenzentfernung numerisch berechnet. Zur Überprüfung werden die Lichtquellen aus Punktlichtquellen analytische modelliert und die photometrische Grenzentfernung ebenfalls berechnet. Darüber hinaus erfolgt eine Analyse des Einflusses der Lichtschwerpunktjustage im Goniometerdrehzentrum. Die Lichtschwerpunktbestimmung erfolgt entsprechend Wendel et al. aus den Strahlendaten [65].



---

## Kapitel 7

# ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der geometrischen Unsicherheitsanalyse, der Parameteranalyse zur geometrischen Unsicherheitsanalyse, der Raumstreuulichtkorrektur sowie der photometrischen Grenzentfernung vorgestellt<sup>3</sup>.

### 7.1 GEOMETRISCHE PARAMETERANALYSE

Zur Berechnung der geometrischen Unsicherheitsanalyse eines LVK-Messsystems müssen zuerst die Systemparameter bestimmt werden. Dies erfolgt anhand der in Absatz 4.7 beschriebenen Verfahren zur geometrischen Parameteranalyse. Die dort als „einfache Methoden“ bezeichneten Verfahren sind wirtschaftlich umsetzbare Messmethoden. Das photogrammetrische Verfahren ist ein „Proof-of-Concept“. Analysiert werden die als relevant betrachteten Systemparameter des Messsystems A aus Absatz 3.1. Die ermittelten Ergebnisse beider Ansätze sind Tabelle 7.1 zu entnehmen.

---

<sup>3</sup> Ergebnissesteile dieses Kapitels wurden in [43, 44, 55, 62] veröffentlicht, sowie auf der AMCTM 2017, der *LuxJunior 2021*, der *LICHT 2021* und der *NEWRAD 2021* vorgestellt.

**Tabelle 7.1:** Gegenüberstellung der ermittelten Schätzwerte und Unsicherheiten der verwendeten Methoden zur geometrischen Systemparameterbestimmung.

|                           | Einheit | Einfache Methode |        | Photogrammetrie |        |
|---------------------------|---------|------------------|--------|-----------------|--------|
|                           |         | $x$              | $u(x)$ | $x$             | $u(x)$ |
| Wiederholbarkeit H        | °       | -                | 0,0031 | -               | -      |
| Wiederholbarkeit V        | °       | -                | 0,0041 | -               | -      |
| Achsschieflage            | °       | 0                | 0,008  | 1,65            | -      |
| Achsabstand               | mm      | 0,5              | 0,014  | 18,4            | -      |
| Messschirmabstand         | mm      | 10000            | 2      | 9,98            | -      |
| Detektororientierung um x | °       | 0                | 0,1    | -               | -      |
| Detektororientierung um y | °       | 0                | 0,1    | -               | -      |

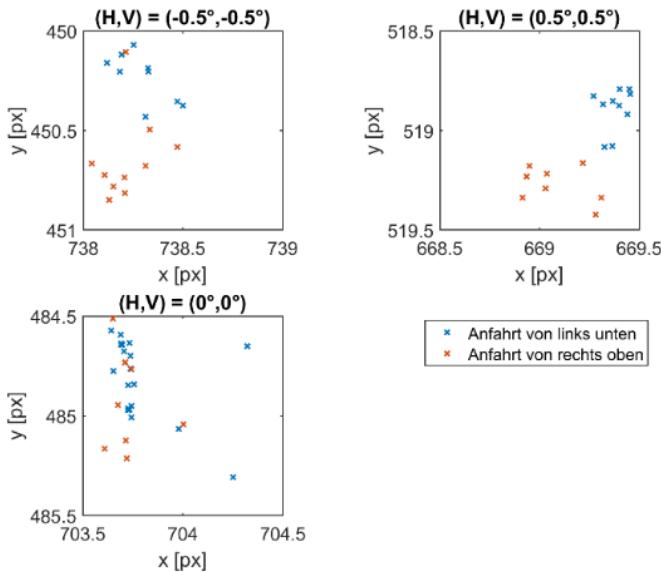
### 7.1.1 EINFACHE METHODEN

Zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit der Goniometer H- und V-Achse wurde entsprechend dem Vorgehen aus Absatz 4.7.1 ein Laser auf das Goniometer montiert und entlang der optischen Achse ausgerichtet. Anschließend wurden die Goniometerkoordinaten  $(H, V) = (-0,5^\circ, -0,5^\circ), (0^\circ, 0^\circ)$  und  $(0,5^\circ, 0,5^\circ)$  immer wieder angefahren und jeweils die Laserposition in der Messschirmaufnahme der Leuchtdichtemesskamera ermittelt, wobei ein Pixel  $0,0143^\circ$  entspricht. Das Anfahren erfolgte jeweils zehn Mal von links unten und zehnmal von rechts oben. Abbildung 7.1 zeigt die berechneten

Laserpositionen für die jeweilige Goniometerkoordinate. Zu erkennen, ist auch ein Hystereseverhalten des Goniometers. Allerdings kann während einer Messung das Anfahren aus beliebiger Richtung erfolgen oder die SOLL-Goniometerkoordinate wird erst durch eine Nachregelung erreicht. Daher wird die Hysterese nicht separat analysiert. Durch die Testmessungen ergibt sich eine Standardabweichung der H-Achse von maximal  $0,0031^\circ$  für den Punkt  $(0,5^\circ, 0,5^\circ)$  und der V-Achse von  $0,0041^\circ$  für den Punkt  $(-0,5^\circ, -0,5^\circ)$ . Diese Werte werden als Standardunsicherheit der Goniometerpositionierung angenommen. Dabei bleibt anzumerken, dass lediglich die Wiederholbarkeit, nicht aber die absolute Positionierbarkeit bewertet wurde. Außerdem wurde nur eine Bewertung von drei Goniometerkoordinaten nahe der Hauptstrahlrichtung vorgenommen. Tabelle 7.2 listet die Standardabweichungen der angefahrenen Koordinaten zum Vergleich auf. Die Unsicherheit der Positionsbestimmung des Lasers im Kamerabild kann zu  $0,04 \text{ px} = 0,00057^\circ$  bestimmt werden. Diese beinhaltet die Laserstabilität sowie die Positionierung des Lasers auf dem Goniometer.

**Tabelle 7.2:** Ermittelte Standardabweichungen der Wiederholbarkeit des Goniometers für ausgewählte  $(H, V)$ -Koordinaten.

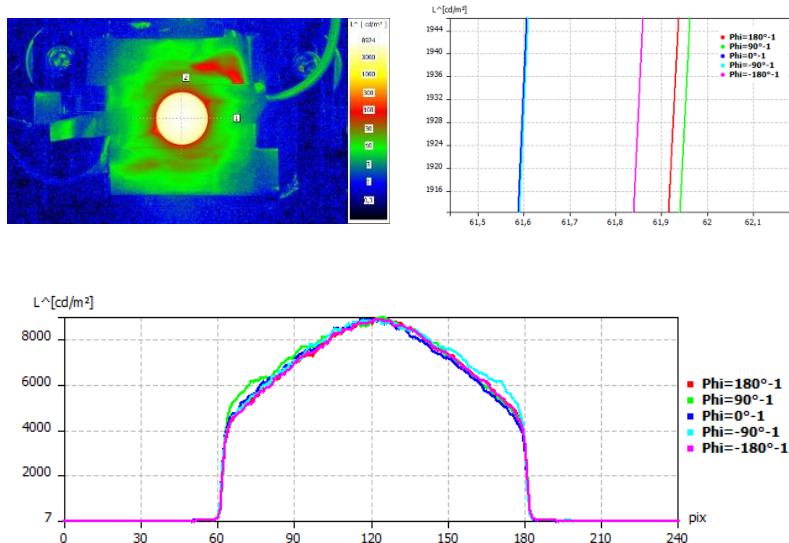
| $(H, V)$                   | $d\varphi$     | $d\vartheta$   |
|----------------------------|----------------|----------------|
| $(-0,5^\circ, -0,5^\circ)$ | $0,0018^\circ$ | $0,0041^\circ$ |
| $(0^\circ, 0^\circ)$       | $0,0024^\circ$ | $0,0031^\circ$ |
| $(0,5^\circ, 0,5^\circ)$   | $0,0031^\circ$ | $0,0038^\circ$ |



**Abbildung 7.1:** Ergebnisse der Wiederholbarkeitsanalyse des Goniometers.

Zur Berechnung des Achsabstands wurde die in Absatz 4.7.1 beschriebene Methode auf Basis einer Kugel-Kameramessung verwendet. Ziel dieser Methode ist es, die Kugel bestmöglich in das Goniometerdrehzentrum zu justieren und über die bei einer Goniometerbewegung verbleibende Kugelvariation in einem Kamerabild den Achsabstand zu bestimmen. Abbildung 7.2 zeigt das Ergebnis der Justage der Kugel in die H-Achse. Mittels einer Kugelkantenanalyse aus fünf verschiedener Aufnahmen mit den H-Koordinaten  $H = (-180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ)$  ergibt sich eine Justagegenauigkeit der Kugel in die H-Achse von 0,35 px bzw. 0,05 mm.

Überprüft wurde die Kugelbewegung in einem horizontalen und einem vertikalen Bildschnitt, wobei Abbildung 7.2 den horizontalen Bildschnitt zeigt. Die Umrechnung von Pixel in Millimeter erfolgte über den durch die Kugelgröße von 20 mm im Kamerabild ermittelten Umrechnungsfaktor.



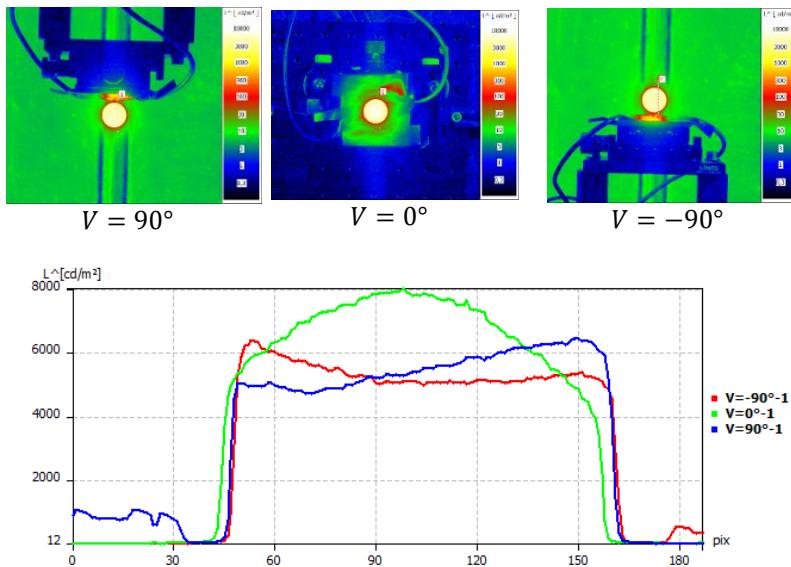
**Abbildung 7.2:** Justage der Kugel in die H-Achse. Links oben ist die Aufnahme der Koordinate  $H = 0^\circ$  in Falschfarben dargestellt. Die Diagramme zeigen jeweils den horizontale Grauwertbildschnitt durch die Kugel für alle Aufnahmen, sowie ein Ausschnitt der linken Kugelkante zur Ermittlung der Justagegenauigkeit.

Darauf aufbauend zeigt Abbildung 7.3 die auf die Höhe der V-Achse justierte Kugelposition, aus der sich der verbleibende Achsabstand

## Ergebnisse

---

ermitteln lässt. Liegen die Kugelkanten für die Goniometerkoordinaten  $V = 90^\circ$  und  $V = -90^\circ$  aufeinander, muss sich die Kugel auf der H-Achse im kürzesten Abstand zur V-Achse befinden. Die Positionsabweichung von 0,8 px zwischen  $V = 90^\circ$  und  $V = -90^\circ$  zeigt, dass diese Position um 0,4 px bzw. 0,057 mm erreicht wurde. Der verbleibende Abstand zwischen den Messpositionen  $V = 90^\circ$  bzw.  $-90^\circ$  und  $V = 0^\circ$  beträgt 3,5 px was einem Achsabstand von 0,5 mm entspricht.



**Abbildung 7.3:** Bestimmung des Achsabstands durch Aufnahmen der Kugel für  $V = 90^\circ$ ,  $V = 0^\circ$  und  $V = -90^\circ$ . Das untere Diagramm zeigt den vertikalen Grauwertbildschnitt durch die Kugel.

Die Unsicherheit der Positionsbestimmung der Kugel im Kamerabild wurde mit verschiedenen Versuchen zu 0,1 px bestimmt.

Mitberücksichtigt wurde dabei die Stabilität der LED der selbstleuchtenden Kugel, sowie deren Homogenität und Rundheit. Da sich die Kugel im Kamerabild nur um wenige Pixel bewegt spielen Kamera-zeichnung und Messabstand keine Rolle. Die Unsicherheit des Versuchs wird daher aus der Positionierunsicherheit der Kugel in die H-Achse und der Unsicherheit der Positionsbestimmung im Kamerabild zu 0,36 px bzw. 0,052 mm abgeschätzt.

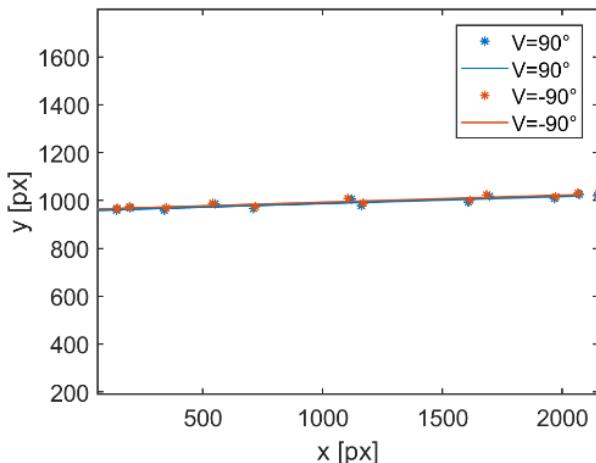
Die Berechnung der Achsschieflage wurde über die in Absatz 4.7.1 vorgestellte Methode ebenfalls auf Basis einer Kugel-Kameramesung durchgeführt. Im Vergleich zur Methode der Achsabstandsbe-rechnung erfolgt die Positionsbestimmung der Kugel in einem grö-ßeren Bildausschnitt in verschiedenen Entfernung. Um Kamera-effekte vorzubeugen, wurde der Versuch mehrfach mit unterschied-lichen Startpositionen der Kugel auf dem Goniometer durchgeführt. Außerdem wurden eine unterschiedliche Anzahl an Aufnahmen je Durchlauf erstellt. Die zu jedem Durchlauf ermittelte Achsschieflage ist Tabelle 7.3 zu entnehmen. Abbildung 7.4 zeigt die über die Kame-rabilder ermittelten Kugelpositionen mit den berechneten Regressi-onsgeraden der Messung Nr. 2 aus Tabelle 7.3. Da betragsmäßig die größte berechnete Achsschieflage  $0,008^\circ$  beträgt, wird in der geometrischen Unsicherheitsanalyse dieser Wert als Standardunsicherheit der Achsschieflage verwendet.

Der Goniometer-Messschirmabstand und die Messschirmorientie-rung (Detektororientierung) wurden mit einem Laserentfernungs-messgerät mit einer angegebenen Toleranz von 1 mm bestimmt. Da zusätzliche von einer Positionierungsgenauigkeit ausgegangen werden

muss, konnte ein Goniometer-Messschirmabstand von 10000 mm  $\pm 2$  mm ermittelt werden. Die Detektororientierung in x- und y-Richtung konnte jeweils zu  $0^\circ \pm 0,1^\circ$  bestimmt werden.

**Tabelle 7.3:** Ermittelte Achsschieflagen über die Kugel-Kamera Methode für verschiedene Durchläufe.

| Nr. | Anzahl H-Koordinaten<br>pro V-Koordinaten | Achsschieflage |
|-----|---|----------------|
| 1   | 12  | -0,0015°       |
| 2   | 12  | -0,000055°     |
| 3   | 36  | -0,008°        |
| 4   | 36  | -0,005°        |



**Abbildung 7.4:** Für die Bestimmung der Achsschieflage ermittelte Regressionsgeraden und Messwerte der Aufnahmeserie Nr. 2 aus Tabelle 7.3.

### 7.1.2 PHOTOGRAMMETRISCHE METHODE

Wie Abbildung 7.5 zeigt, kann mithilfe des Kamerakalibreralgorithmus des *Instituts für Mess- und Regelungstechnik* (MRT) die Messsystemgeometrie vollständig rekonstruiert werden. Ein „Proof-of-Concept“ dieser Messmethode ist somit erfolgt. Zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse werden die rekonstruierte Lage der Goniometerachsen sowie der Goniometer-Messschirmabstand genauer untersucht und mit den Ergebnissen der vorherigen Methoden verglichen.

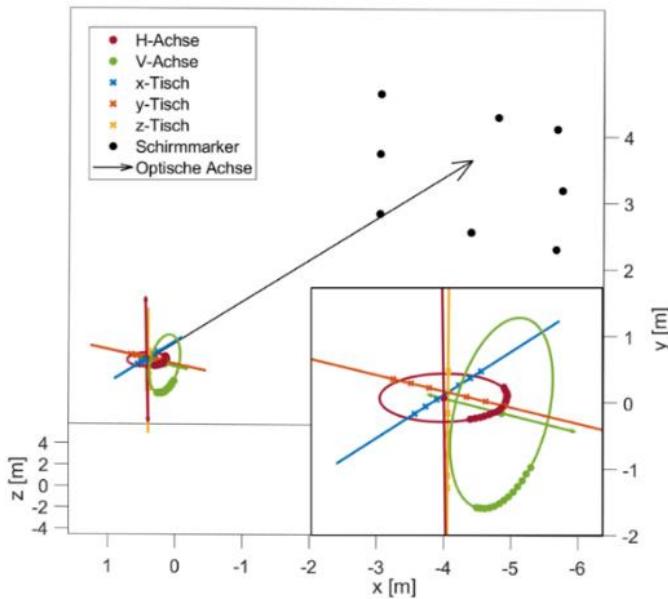
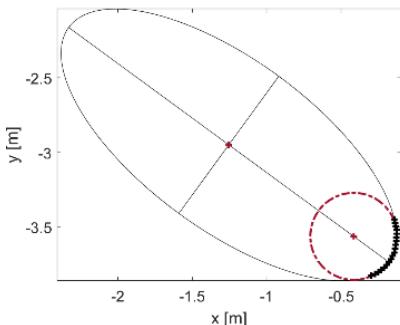


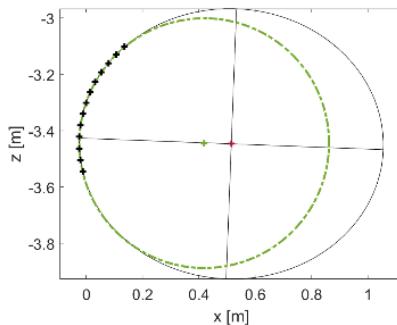
Abbildung 7.5: Ergebnisse der Achsschieflage.

Mit der photogrammetrischen Methode wurde ein Achsabstand von 18,4 mm, eine Achsschieflage von 1,65° und ein Goniometer-Messschirmabstand von 9,979 m berechnet. Der berechnete Goniometer-Messschirmabstand ist demnach um 21 mm kleiner als der mit dem Laserentfernungsmessgerät ermittelte Wert. Ebenso unterscheiden sich die Ergebnisse des Achsabstands mit 18,4 mm und der Achsschieflage mit 1,65° deutlich.

Die größte Unsicherheit bei der Analyse der Goniometerachsen ergibt sich bei diesem Versuch durch die Anordnung der Kamerapositionen, die zur Berechnung der Achsenfits verwendet werden. Aufgrund des Verfahrens war es maximal möglich Kamerapositionen in einem Winkelbereich von 90° für die H-Achse, und 60° für die V-Achse zu erfassen. Andernfalls wären zu wenige Schachbrettmuster in den Kameraaufnahmen zu sehen gewesen, was sich negativ auf die Unsicherheit der Kamerapositionsbestimmung ausgewirkt hätte. Daher kommt es bei der Bestimmung einer Ausgleichsebene bzw. eines Ausgleichskreises zur Berechnung der Achsschieflage und des Achsabstands zu großen Unsicherheiten. Abbildung 7.6 veranschaulicht diesen Effekt für die Berechnung der H-Achse, indem der über die Kamerapositionen berechnete Kreisfit mit einem Ellipsenfit verglichen wird. Da ein Kreis ein Spezialfall einer Ellipse ist, müsste auch der Ellipsenfit in diesem Fall einen Kreis ergeben. Die vorhandenen großen Abweichungen zeigen jedoch die Notwendigkeit von aufgenommenen Kamerapositionen über den gesamten Goniometerbewegungsradius ( $H \in [-180^\circ 180^\circ]$ ). Abbildung 7.7 zeigt diese Problematik für die V-Achse.



**Abbildung 7.6:** Kreis- und Ellipsen- fit durch die Kamerapositionen zur Bestimmung der H-Achse.

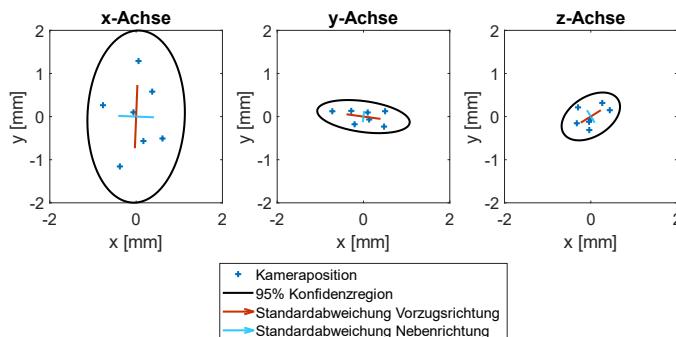


**Abbildung 7.7:** Kreis- und Ellipsen- fit durch die Kamerapositionen zur Bestimmung der V-Achse.

Die große Abweichung des Messabstands von 21 mm lässt sich zum Teil über die große und unstimmige Abweichung des Achsabstands von 18,4 mm erklären. Außerdem wurde ein vom Kamerakalibreralgorithmus unabhängiger Rückwärtsschnitt verwendet, der die Lage des Messschirms über die Messschirmmarkierungen (vgl. Abbildung 4.26) mit dem Goniometer in Beziehung setzt. Hierbei ist die Unsicherheit der Positionsbestimmung der Messschirmmarkierungen vergleichsweise groß und ein Ausgleichen der Positionen ist über das einfache Rückwärtsschnittverfahren nicht möglich.

Um allgemein eine Aussage über die Unsicherheit eines Kamerakalibreralgorithmus zu bekommen kann u.a. der verbleibende Rückprojektionsfehler betrachtet, oder die intrinsischen Kameraparameter verschiedener Kalibriervorgänge verglichen werden [66]. Die Unsicherheit des Kamerakalibreralgorithmus wird dabei von vielerlei

Faktoren bestimmt. Neben der Übereinstimmung von Kamera und Kameramodell sind das unter anderem die Kameraauflösung, Objektiveigenschaften, Unsicherheit der Kalibriermuster und Lichtverhältnisse. Im Rahmen dieses Versuchs wurde kein verbleibender Rückprojektionsfehler bestimmt. Daher folgt eine Analyse der Positionsbestimmung des Algorithmus über die xyz-Lineartischachsen des Goniometers. Da Kameraaufnahmen entlang dieser Achsen aufgenommen wurden, konnten über Regressionsgeraden die Lagen der Achsen im Raum berechnet werden. Unter der Annahme die Bewegung der xyz-Achsen sei linear, ist es möglich aus den Abständen zwischen Achsenfit und Kamerapositionen Unsicherheitsparameter zu schätzen. Abbildung 7.8 zeigt für jede Achse die berechnete Konfidenzregion für eine 95%-ige Überdeckungswahrscheinlichkeit.



**Abbildung 7.8:** Konfidenzregionen der Achsenfits der Goniometer x-, y- und z-Achse.

Es ist zu erkennen, dass nach diesem Verfahren die Unsicherheit der Kamerapositionen um die Goniometer x-Achse am stärksten schwanken. Die Goniometer x-Achse entspricht der z-Achse des Weltkoordinatensystems. Für die x-Achse ergibt sich eine Konfidenzellipse mit Standardabweichung entlang der langen Ellipsenachse und kurzen Ellipsenachse von 0,82 mm bzw. 0,45 mm.

## 7.2 GEOMETRISCHE MESSUNSICHERHEITSANALYSE

Für eine geometrische Messunsicherheitsanalyse nach Kapitel 4 müssen je nach Messanwendung die Eingangsgrößen mit unterschiedlichen Unsicherheitsparametern versehen werden. Die hierfür relevanten und für ein Messsystem je nach Messanwendung verschiedenen Eingangsgrößen sind die Lichtquellen- und Winkelnormaljustage auf dem Goniometer.

Gerade die Lichtquellenpositionierung ist unter Umständen durch eine schwierige Bestimmung des Lichtschwerpunkts stark unsicherheitsbehaftet. So kann bei einem kreisrunden Lambertstrahler der Lichtschwerpunkt einfach ermittelt werden. Eine andere Möglichkeit ist das Messobjekt mit Markern zu versehen, die den Lichtschwerpunkt kennzeichnen. Hat die Lichtquelle hingegen eine komplexe Geometrie ohne Markierungen, ist nur eine Abschätzung des Lichtschwerpunkts möglich. Aus Erfahrungswerten wird für diesen Fall eine Standardunsicherheit der Lichtquellenposition von 10 mm in

jeder Raumrichtung angenommen. Diese Abschätzung kann für komplexe Lichtquellentypen mit mehreren Lichtschwerpunkten, wie KFZ-Frontscheinwerfer, sogar eine sehr gutmütige Abschätzung sein. Die Ausrichtung des Winkelnormals hingegen erfolgt an Markierungen, sodass nur von einer Standardunsicherheit von 1 mm in jede Raumrichtung ausgegangen wird.

Weiterhin ist die Unsicherheit der Lichtquellenorientierung auf dem Goniometer zu beachten. Sie kann völlig unerheblich sein, wenn beispielsweise über nachbearbeitende Prozessschritte die gemessene LVK in die gewünschte Aufnahmerichtung rotiert wird. Ist dies nicht möglich und ist die Ausrichtung der Lichtquelle entscheidend, können sich vergleichsweise großen Unsicherheitsbeiträge ergeben. Aus Erfahrungswerten wird im Rahmen dieser Analyse eine Standardunsicherheit der Lichtquellen- und Winkelnormalorientierung von  $0,25^\circ$  angenommen.

Aufgrund verschiedener Messanwendungen wird im Folgenden die geometrische Messunsicherheitsanalyse einmal mit und einmal ohne Unsicherheit der Lichtquellen- und Winkelnormaljustage vorgestellt. Für die Unsicherheiten des Messsystems werden die über die einfachen Methoden bestimmten Schätzwerte und Unsicherheiten verwendet. Damit ergibt sich das in Tabelle 7.4 dargestellte Gesamtbudget, wobei unter Nr. 24 bzw. 25 die Gesamtunsicherheit des Messsystems, einmal mit und einmal ohne Unsicherheit der Lichtquellen- und Winkelnormaljustage aufgeführt ist. Als Ergebnis sind in der Tabelle jeweils die Standardunsicherheiten der kritischsten

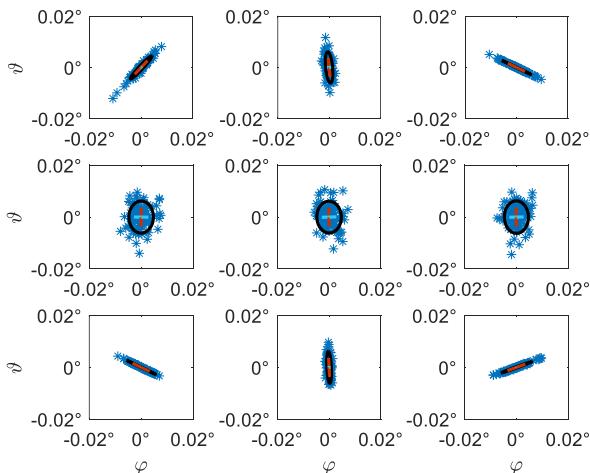
Raumrichtung aus einer Halbraummessung entlang der langen Ellipsenachse sowie des Messabstands aufgeführt.

**Tabelle 7.4:** Unsicherheitsbudget.

| Nr. | Komponente  | Transforma-<br>tion      | Schätz-<br>wert      | Standardun-<br>sicherheit | Max. Ab-<br>solutbei-<br>trag | Max.<br>Absolut-<br>beitrag |
|-----|---|--------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1   | Testquelle $T_Q$  | Orientierung             | 0°                   | 0,25°                     | 0,25°                         | 0 mm                        |
| 2   |   |                          | 0°                   | 0,25°                     | 0,25°                         | 0 mm                        |
| 3   |   |                          | 0°                   | 0,25°                     | 0,247°                        | 0 mm                        |
| 4   |   | Positionierung           | 0 mm                 | 10 mm                     | 0,057°                        | 9,91 mm                     |
| 5   |   |                          | 0 mm                 | 10 mm                     | 0,057°                        | 9,89 mm                     |
| 6   |   |                          | 0 mm                 | 10 mm                     | 0,057°                        | 9,96 mm                     |
| 7   | Goniometer  | Rotation H               | H                    | 0,0031°                   | 0,0031°                       | 0 mm                        |
| 8   | H-Achse   | Achsschleiflage          | 0°                   | 0,008°                    | 0,0086°                       | 10 <sup>-6</sup> mm         |
| 9   | $T_{H,Rot}, T_{H,Pose}$   | Achsabstand              | 0,5 mm               | 0,052 mm                  | 0,0001°                       | 0,05 mm                     |
| 10  | Goniometer  | Rotation V               | V                    | 0,0041°                   | 0,0041°                       | 10 <sup>-5</sup> mm         |
| 11  | V-Achse   | Messschirmab-<br>stand   | 10 m                 | 2 mm                      | 10 <sup>-7</sup> °            | 0 mm                        |
| 12  | $T_{V,Rot}, T_{V,Pose}$   | Orientierung             | 0°                   | 0,1°                      | 10 <sup>-7</sup> °            | 0 mm                        |
| 13  |   |                          | 0°                   | 0,1°                      | 10 <sup>-7</sup> °            | 0 mm                        |
| 14  |   |                          | 0°                   | 0,25°                     | 0,25°                         | 10 <sup>-3</sup> mm         |
| 15  |   | Winkelnormal $T_N$       | 0°                   | 0,25°                     | 0,25°                         | 10 <sup>-4</sup> mm         |
| 16  |   |                          | 0°                   | 0,25°                     | 0,038°                        | 10 <sup>-4</sup> mm         |
| 17  |   |                          | 0 mm                 | 1 mm                      | 0,0058°                       | 0,14 mm                     |
| 18  |   | Positionierung           | 0 mm                 | 1 mm                      | 0,0058°                       | 0,09 mm                     |
| 19  |   |                          | 0 mm                 | 1 mm                      | 0,0009°                       | 0,99 mm                     |
| 20  | Goniometer  | H-Achse<br>$T_{H,Rot,N}$ | Rotation H           | 0°                        | 0,0031°                       | 10 <sup>-6</sup> mm         |
| 21  | Goniometer  |                          |                      |                           |                               |                             |
| 22  | V-Achse   | $T_{V,H,Rot}$            | Rotation V           | 0°                        | 0,0041°                       | 10 <sup>-5</sup> mm         |
| 23  | Winkelnormals   |                          |                      |                           |                               |                             |
| 24  | $\Sigma$ Messsystem<br>(k=2,45)                                 | Orientierung             | $\varphi_{SOLL,0}$   | 0,002°                    | 0,002°                        | 10 <sup>-6</sup> mm         |
| 25  | $\Sigma$ ohne Quellen Positionierung & Orientierung<br>(k=2,45) |                          | $\vartheta_{SOLL,0}$ | 0,002°                    | 0,002°                        | 10 <sup>-5</sup> mm         |
|     |   |                          |                      |                           | 0,36°                         | 10,11 mm                    |
|     |   |                          |                      |                           | 0,78°                         | 24,77 mm                    |
|     |   |                          |                      |                           | 0,0093°                       | 0,02 mm                     |
|     |   |                          |                      |                           | 0,023°                        | 0,049 mm                    |

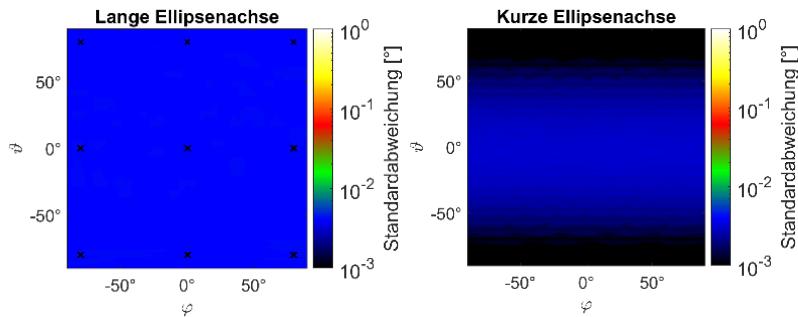
### 7.2.1 POSITIONIERGENAUIGKEIT DES GONIOMETERS

In einem ersten Analyseschritt wird entsprechend dem Beispiel aus Absatz 4.6 ausschließlich eine Unsicherheit der Goniometer H- und V-Achsenpositionierung mit  $u(H) = 0,0031^\circ$  und  $u(V) = 0,0041^\circ$  angenommen, diesmal aber eine Halbraummessung simuliert. Abbildung 7.9 zeigt die Konfidenzregionen von neun im  $80^\circ$  Abstand angeordneten Raumrichtungen ( $\varphi \in [-80^\circ, 0^\circ, 80^\circ]$ ,  $\vartheta \in [-80^\circ, 0^\circ, 80^\circ]$ ), wobei die mittlere Abbildung der Raumrichtung  $(0^\circ, 0^\circ)$  entspricht. Die untersuchten Raumrichtungen sind als Kreuze in Abbildung 7.10 zu erkennen.



**Abbildung 7.9:** Konfidenzregionen der Messunsicherheitsbetrachtung der Messrichtung. Berücksichtigt wird die Positioniergenauigkeit des Goniometers. Die neun Raumrichtungen sind für die Raumrichtungen  $\varphi$  und  $\vartheta$  von  $-80^\circ$  bis  $80^\circ$  in  $80^\circ$ -Schritten angeordnet.

Dabei zeigt sich zunächst für Messrichtungen nahe dem Äquator, dass die Standardmessunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse  $u(y_s) = 0,0031^\circ$  und entlang der langen Ellipsenachse  $u(y_l) = 0,0041^\circ$  beträgt. Außerdem sind nach den Konfidenzregionen der mittleren Zeile aus Abbildung 7.9  $\varphi$  und  $\vartheta$  unkorreliert, da  $u(y_l) = u(\vartheta)$  und  $u(y_s) = u(\varphi)$  gilt. Für Messungen an den Polen ( $\vartheta \rightarrow 90^\circ$  bzw.  $-90^\circ$ ) wird die Unsicherheit der H-Achsenpositionierung immer unkritischer, wohingegen die Unsicherheit der V-Achsenpositionierung bleibt. Zu erkennen ist dies auch an den Standardmessunsicherheiten der langen und kurzen Ellipsenachse aus Abbildung 7.10 und Abbildung 7.11. Diese sind entlang der langen Ellipsenachse über den gesamten Halbraum konstant, wohingegen sie für die kurze Ellipsenachse zum Pol hin vernachlässigbar werden.

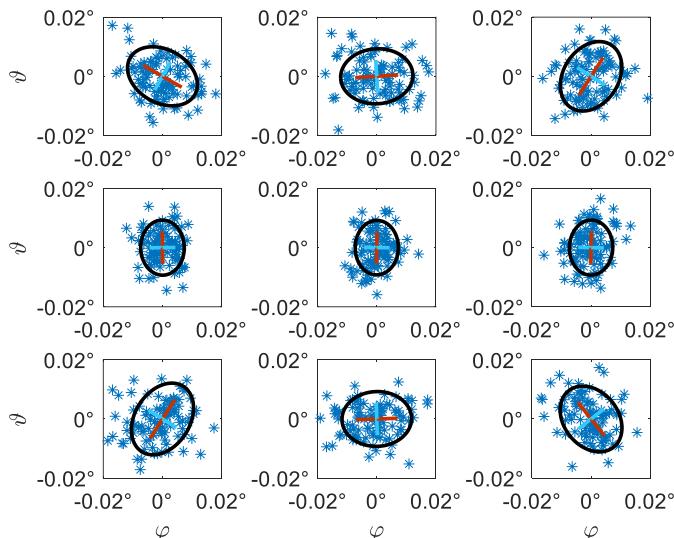


**Abbildung 7.10:** Positionierungsgenauigkeit des Goniometers: Standardunsicherheit entlang der langen Ellipsenachse.

**Abbildung 7.11:** Positionierungsgenauigkeit des Goniometers: Standardunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse.

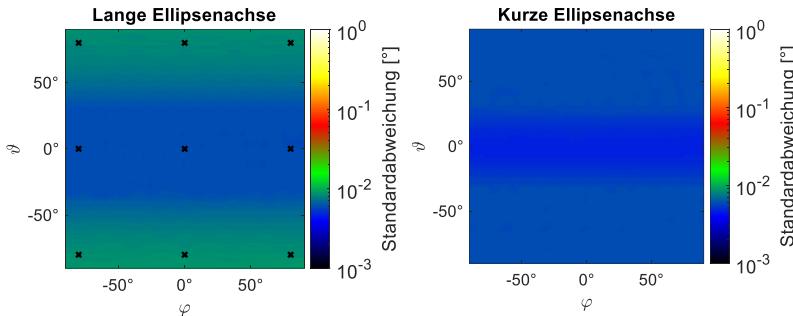
## 7.2.2 MESSSYSTEM OHNE LICHTQUELLEN- UND WINKELNORMALJUSTAGE

Werden außerdem alle weiteren Unsicherheitsparameter des Messsystems außer die Lichtquellen- und Winkelnormaljustage mitberücksichtigt, ergeben sich die in Abbildung 7.12 dargestellten Konfidenzregionen der im  $80^\circ$ -Raster angeordneten Messrichtungen. Für diesen Fall zeigt sich eine Vergrößerung der Standardmessunsicherheit für alle Messrichtungen. Am Äquator ergeben sich Unsicherheiten von  $u(y_s) = 0,0048^\circ$  und  $u(y_l) = 0,0061^\circ$ , was auf eine Überlagerung verschiedener Eingangsparameter zurückzuführen ist.



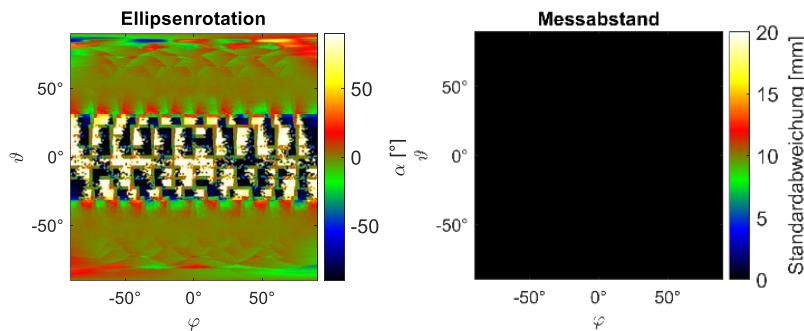
**Abbildung 7.12:** Konfidenzregionen der Messunsicherheitsbetrachtung der Messrichtung. Berücksichtigt wird das Messsystem ohne eine Quellenjustage.

Diese Unsicherheit vergrößert sich in Richtung der Pole zu  $u(y_s) = 0,0061^\circ$  bzw.  $u(y_l) = 0,0093^\circ$ , da hier vor allem die Unsicherheit der Achsschieflage zum Tragen kommt, die mit einer Standardunsicherheit von  $0,008^\circ$  die größte Eingangunsicherheit aufweist. Am Äquator ist die Achsschieflage nicht relevant, da sie bei einer Winkelnormaljustage miteinkalibriert wird. Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 zeigen die Standardmessunsicherheit der langen und kurzen Ellipsenachse in Abhängigkeit der Raumrichtung. Außerdem zeigt Abbildung 7.15 die Ausrichtung der Konfidenzellipse über den Rotationswinkel  $\alpha$ . Zusammen mit den Unsicherheiten der langen und kurzen Ellipsenachse kann somit eine Aussage über die Korrelation der Messgrößen  $\varphi$  und  $\vartheta$  getroffen werden. Entscheidend wird diese Größe jedoch erst, wenn sich  $u(y_l)$  und  $u(y_s)$  voneinander unterscheiden. Auffällig dabei ist, dass über den gesamten Messbereich die Orientierung der Konfidenzellipse stark davon abhängt, wo auf dem Messschirm die entsprechende Raumrichtung gemessen wurde. Außerdem zeigen sich, für Raumrichtungen mit  $|\vartheta| < 30^\circ$  Rotationswinkel von  $\alpha = -90^\circ$  bzw.  $90^\circ$ . Ursache hierfür ist, dass  $\alpha$  den Rotationswinkel zwischen der langen Ellipsenachse und der  $\varphi$ -Achse angibt. Die Ellipsenrotation um den Winkel  $-90^\circ$  entspricht daher der Rotation um den Winkel  $90^\circ$ . Abbildung 7.16 zeigt eine vernachlässigbare Unsicherheit des Messabstands über den gesamten Messbereich.



**Abbildung 7.13:** Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheit entlang der langen Ellipsenachse.

**Abbildung 7.14:** Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse.



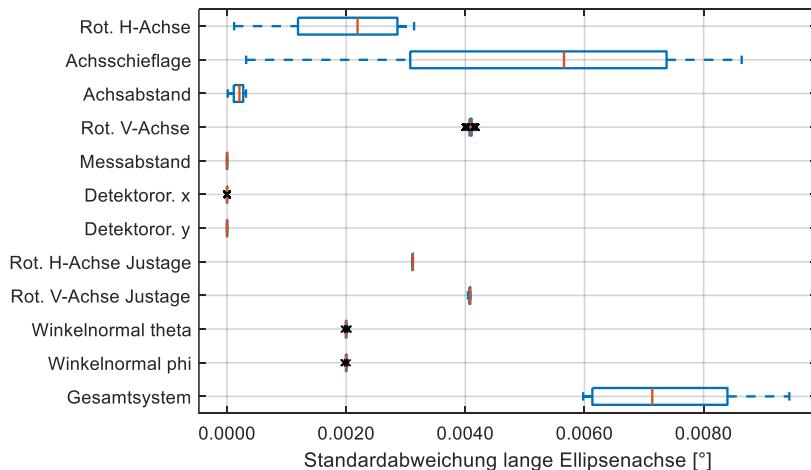
**Abbildung 7.15:** Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Orientierung der Konfidenzregion.

**Abbildung 7.16:** Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheit des Messabstands.

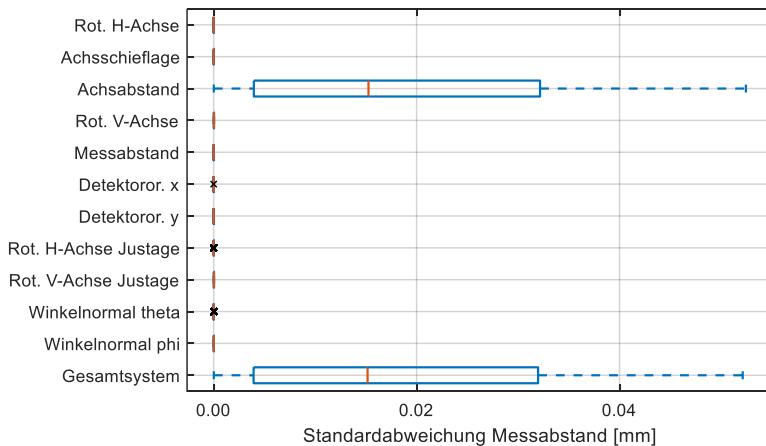
Für eine detailliertere Ursachenanalyse können Abbildung 7.17 bzw. Abbildung 7.18 herangezogen werden. Die Boxplots zeigen die Streuung der Standardunsicherheiten aller berechneten Messrichtungen

entlang der langen Ellipsenachse (Abbildung 7.17) und des Messabstands (Abbildung 7.18). Da die Standardunsicherheit des Goniometer-Messschirmabstands und der Detektororientierung bei Messung und Justage dieselbe ist, liefern diese Eingangsgrößen keine Beiträge zur Messunsicherheit. Vernachlässigbar in Bezug auf die Messrichtung ist auch der Achsabstand, der ebenfalls bei Messung und Justage konstant bleibt. Interessant ist aber, dass eine Unsicherheit des Achsabstands trotzdem eine Unsicherheit des Messabstands hervorruft und somit entsprechend Abbildung 7.18 den einzigen Beitrag zur Gesamtunsicherheit des Messabstands liefert. Ursache hierfür ist, dass die Transformation des Achsabstands in der kinematischen Kette des Messsystems erst nach der Rotation um die V-Achse durchgeführt wird. Eine Unsicherheit des Achsabstands bei gleichzeitiger Rotation um die V-Achse ergibt somit einen Beitrag zur Gesamtunsicherheit in Höhe der ermittelten Standardunsicherheit von 0,052 mm. Der Achsabstand selbst trägt nicht zur Unsicherheit des Messabstands bei. Er fließt erst bei der Berücksichtigung der Kalibrierentfernung des photometrischen Normals mit in die kombinierte Messunsicherheit ein. Einflussreich auf die geometrische Messunsicherheit sind dagegen die Stellgenauigkeit der H- und V-Achse sowohl bei der Messung als auch bei der Justage. Die jeweiligen Unsicherheitsbeiträge werden für einen Großteil der Messrichtungen eins zu eins auf die Messunsicherheit der Messrichtung übertragen. Lediglich der Unsicherheitsbeitrag der Goniometer H-Achse verschwindet in Polnähe, wie im vorherigen Absatz beschrieben. Verdeutlicht wird dieser Effekt durch die Streuung der Standardunsicherheiten der langen Ellipsenachse entsprechend „Rot. H-Achse“ aus Abbildung 7.17.

## Ergebnisse

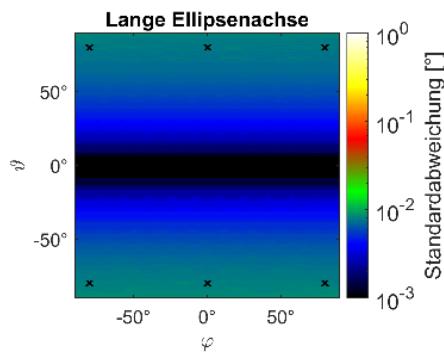


**Abbildung 7.17:** Messsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheiten der langen Ellipsenachse.



**Abbildung 7.18:** Messsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheiten des Messabstands.

Der größte Einfluss auf die Messunsicherheit wird allerdings durch die Achsschieflage hervorgerufen. In Abbildung 7.19 wird die Auswirkung der Standardunsicherheit der Achsschieflage auf die Standardmessunsicherheit der Raumrichtung in Form der langen Ellipsenachse dargestellt. Es zeigt sich ein am Äquator vernachlässigbarer Unsicherheitsbeitrag, der allerdings an den Polen mit  $0,0086^\circ$  maximal und demnach sogar größer wird, als die Standardunsicherheit der Achsschieflage von  $0,008^\circ$ .

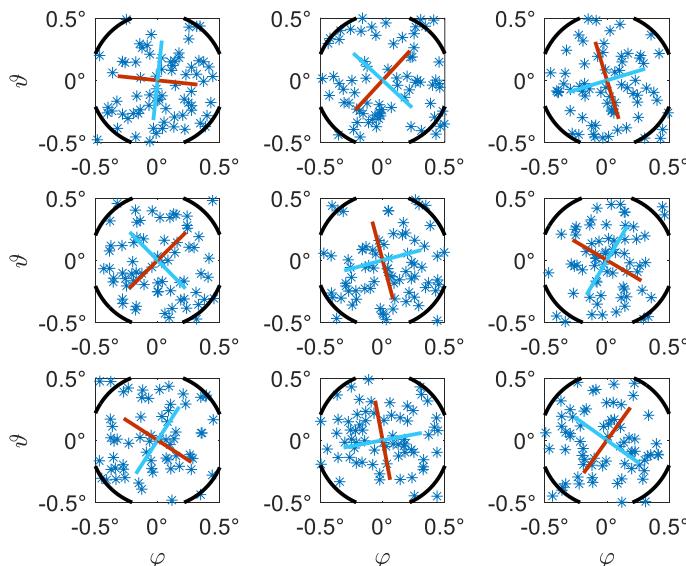


**Abbildung 7.19:** Achsschieflage: Standardunsicherheit der langen Ellipsenachse.

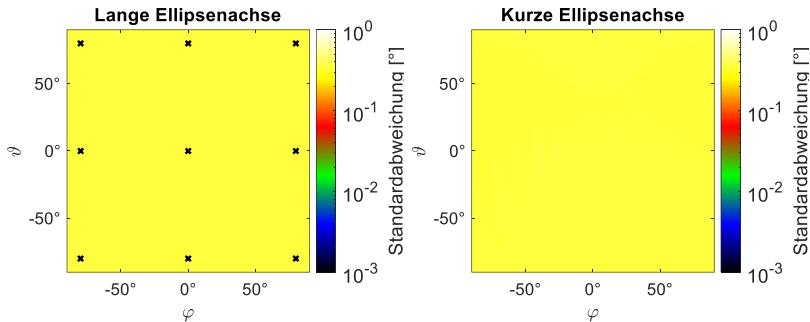
### 7.2.3 VOLLSTÄNDIGE MESSSYSTEMANALYSE

Die Unsicherheit des Gesamtmesssystems berücksichtigt auch eine Unsicherheit der Lichtquellen- und Winkelnormaljustage auf dem Goniometer. Abbildung 7.20 bis Abbildung 7.24 zeigen die graphischen Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse des gesamten

Messsystems. Dabei ist zu erkennen, dass über den gesamten Aufnahmebereich die Standardmessunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse der Standardmessunsicherheit der langen Ellipsenachse mit  $0,36^\circ$  entspricht (vgl. Abbildung 7.21 und Abbildung 7.22). Somit ergeben sich bei der Betrachtung des gesamten Messsystems keine relevanten Korrelationen. Das Diagramm der Ellipsenrotation hat somit keine weitere Aussagekraft. Wie in Abbildung 7.24 zu erkennen ist, liegt auch die Messunsicherheit des Messabstands über dem gesamten Aufnahmebereich bei nahezu konstanten 10 mm.

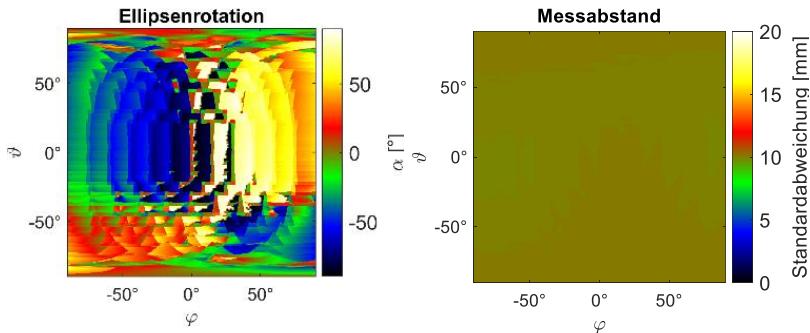


**Abbildung 7.20:** Konfidenzregionen der Messunsicherheitsbetrachtung der Messrichtung. Berücksichtigt wird das vollständige Messsystem inklusive der Quellenjustagen.



**Abbildung 7.21:** Gesamtsystem: Standardunsicherheit entlang der langen Ellipsenachse.

**Abbildung 7.22:** Gesamtsystem: Standardunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse.



**Abbildung 7.23:** Gesamtsystem: Orientierung der Konfidenzregion.

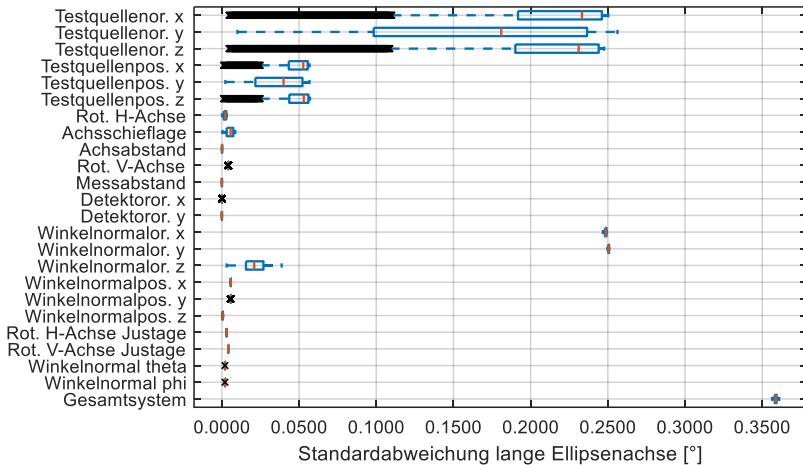
**Abbildung 7.24:** Gesamtsystem: Standardunsicherheit des Messabstands.

Um auch für das Gesamtsystem relevante Eingangsgrößen zu identifizieren, werden die Ergebnisse aus Tabelle 7.1 sowie Abbildung 7.25 bis Abbildung 7.28 genauer betrachtet. In Abbildung

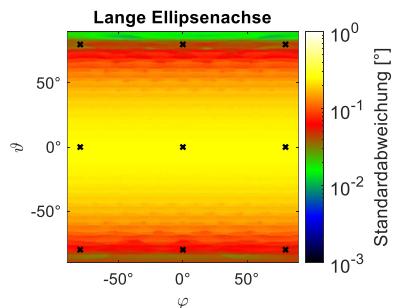
7.25 ist zu erkennen, dass der größte Unsicherheitsbeitrag auf die Messrichtung von der Winkelnormal- und Testquellenorientierung hervorgerufen wird und bis zu  $0,25^\circ$  entspricht. Zum Teil ist dieser Unsicherheitsbeitrag abhängig von der Aufnahmeposition. Abbildung 7.26 zeigt dafür beispielhaft den Unsicherheitsbeitrag der Lichtquellenorientierung um die y-Achse. Die y-Achse entspricht der Richtung der Goniometer H-Achse, weshalb sich eine solche Fehljustage der Testlichtquelle ähnlich der Unsicherheit der H-Achse verhält. Einen großen Einfluss hat dieser Unsicherheitsbeitrag für Messrichtungen in Äquatornähe, wohingegen der Unsicherheitsbeitrag für polnahe Winkel vernachlässigbar ist. Die Testquellenpositionierung liefert auch einen nennenswerten Beitrag von bis zu  $0,057^\circ$  (vgl. Tabelle 7.1). Erklärt werden kann dieser Beitrag über den Goniometer-Messschirmabstand sowie die Standardunsicherheit der Positionierung von 10 mm. Eine Verschiebung entlang der y-Achse von 10 mm entspricht in 10 m Entfernung einer Winkeländerung von  $\tan^{-1} \left( \frac{10 \text{ mm}}{10000 \text{ mm}} \right) = 0,057^\circ$ .

Die Unsicherheitsbeiträge auf den Messabstand sind Abbildung 7.28 zu entnehmen. Während eine Fehlorientierung der Testlichtquelle oder des Winkelnormals keinen nennenswerten Einfluss auf die Unsicherheit des Messabstands zur Folge hat, ergibt eine Fehlpositionierung der Testlichtquelle um 10 mm entlang einer Achse, je nach Aufnahmerichtung, einen Unsicherheitsbeitrag zwischen 0 mm und 10 mm. Abbildung 7.28 zeigt dabei wie sich eine Fehlpositionierung in z-Richtung, d.h. entlang der optischen Achse, auf die Unsicherheit des Messabstands auswirkt. Während

der Unsicherheitsbeitrag für die Messrichtung  $(\varphi, \vartheta) = (0^\circ, 0^\circ)$  maximal ist, ergibt sich für Messrichtungen mit  $\varphi$  oder  $\vartheta$  gegen  $\pm 90^\circ$  ein zu vernachlässigender Unsicherheitsbeitrag.



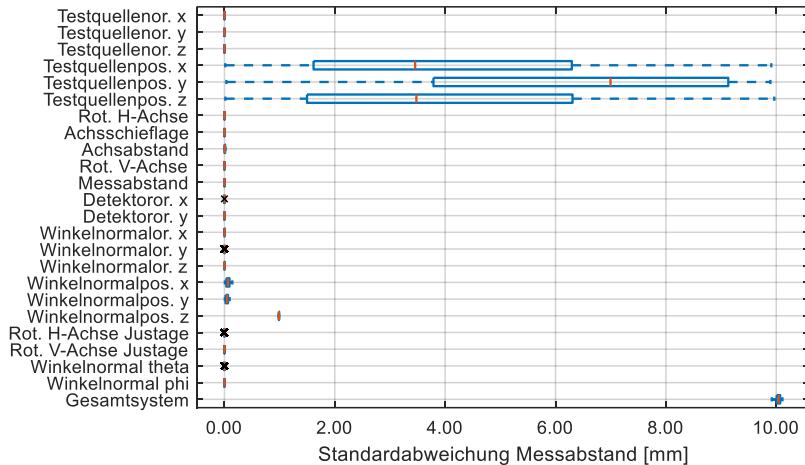
**Abbildung 7.25:** Absolute Beiträge der Eingangsgrößen aufgetragen als Boxplot über alle simulierten Raumrichtungen.



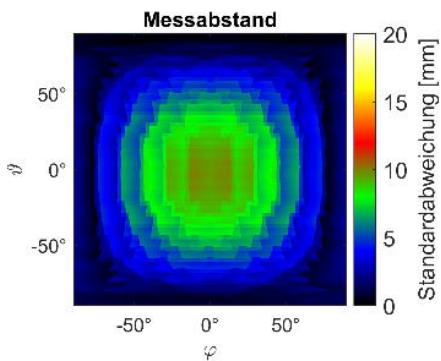
**Abbildung 7.26:** Unsicherheit der Testquellenorientierung um die y-Achse.

## Ergebnisse

---



**Abbildung 7.27:** Absolute Beiträge der Eingangsgrößen aufgetragen als Boxplot über alle simulierten Raumrichtungen.



**Abbildung 7.28:** Unsicherheit der Testquellenpositionierung in z-Richtung.

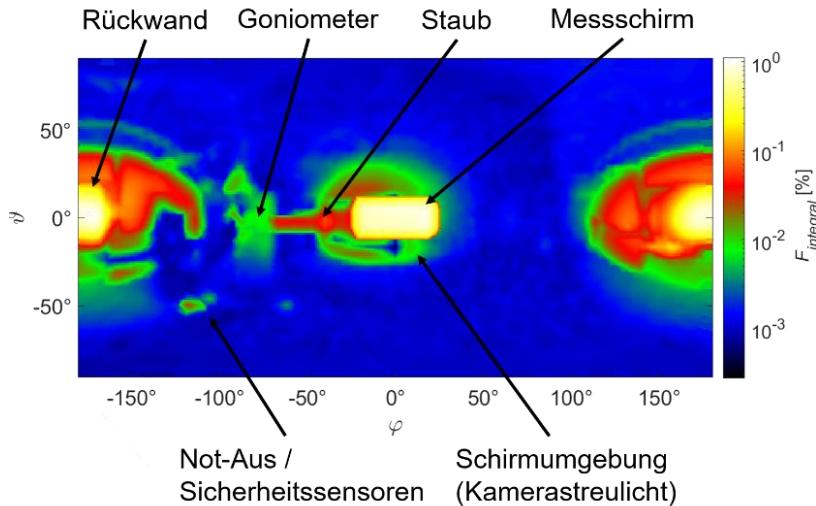
## 7.3 RAUMSTREULICHTKORREKTUR

Die Überprüfung der Raumstreuulichtkorrektur aus Kapitel 5 erfolgt im Messraum B anhand der in Absatz 0 vorgestellten Testquelle. Da aber bereits die Aufnahmen der SVFs einen entscheidenden Einfluss auf die RSLK haben können, wird zuerst eine Analyse des Messraums und der SVF-Aufnahmen durchgeführt. Hierdurch sollen auch Schwachstellen im Raum, mit einem großen Streulichtverhalten, identifiziert und ggf. behoben werden. Ideal eignet sich dafür die integrale SVF.

### 7.3.1 ANALYSE DES RAUMSTREULICHTS

Ein wichtiges Tool zur Analyse des Streulichtverhalten des Raumes ist die integrale SVF entsprechend Absatz 5.6.4. Mit ihrer Hilfe können Störstellen im Raum analysiert werden. Abbildung 7.29 zeigt die integrale Raumantwort für den verwendeten Messraum. Zu erkennen sind dabei folgende Störstellen des Raumes: Rückwand, Messschirm, Messschirmumgebung, Staub, Not-Aus und Sicherheitssensoren sowie das Goniometer. Der Einfluss des Messschirms und der Einfluss der Rückwand sind dabei im Methodenkapitel in Abbildung 5.19 (Absatz 5.6.3, S. 109) als SVF dargestellt. Entsprechend der integralen SVF wird Licht, das in diese Regionen fällt, um bis zu 1% wieder auf den Messschirm gestreut. Maximal kann dabei bis zu 0,5 cd/lm Streulicht entstehen. Wird für jede Raumrichtung das mittlere Streulichtsignal über den Messschirm berechnet, ergeben sich für

die Messschirmregion mittlere Streulichtsignale von 0,04 bis 0,06 cd/lm. Da sich die Region der Rückwand nicht eindeutig abgrenzen lässt, ist nur eine Angabe des größten mittleren Streulichtsignals von 0,06 cd/lm möglich.



**Abbildung 7.29:** Integrale Streulichtverteilungsfunktion des untersuchten Messraums.

Wie groß die Einflüsse der weiteren Störfaktoren im Raum sind, ist in Tabelle 7.5 aufgelistet. Für jeden Störfaktor ist dort der größte Wert der integralen SVF, das größte mittlere Streulichtsignal, sowie das maximale Streulichtsignal dargestellt.

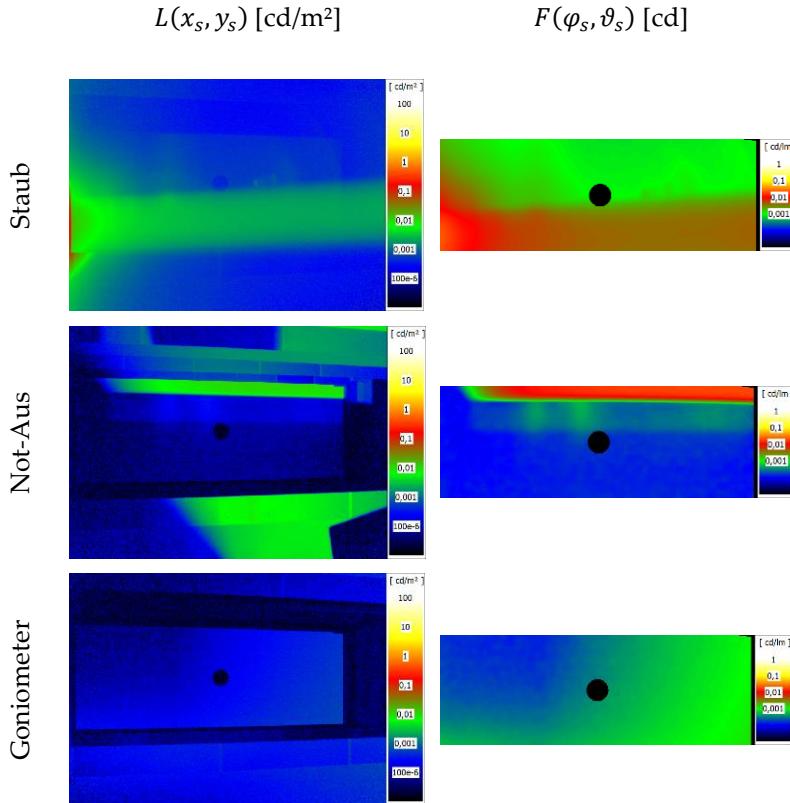
Neben dem Messschirm und der Rückwand haben demnach Staub vor der Kamera und die Messschirmumgebung einen großen

Streulichteinfluss auf eine Messung. Entsprechend Abbildung 7.29 sind sie vergleichsweise großflächig und befinden sich in der Nähe des Messschirms. Der Not-Aus-Schalter, ein großer roter Pilzknopfdrucktaster hat zwar einen großen punktuellen Einfluss auf einem kleinen Messschirmbereich, nimmt aber einen vergleichsweise kleinen Raumbereich ein. Das Goniometer wiederum ist großflächig bei gleichzeitig geringem Streulichteinfluss.

**Tabelle 7.5:** Streulichteinfluss der Raumregionen.

| Störfaktor     | $F_{integral}$ [%] | $\frac{I_{mean}}{\Phi_{LF}}$ [cd/lm] | $\frac{I_{max}}{\Phi_{LF}}$ [cd/lm] |
|----------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Messschirm     | 0,7-1              | 0,04-0,06                            | 0,5                                 |
| Rückwand       | bis 1              | bis 0,06                             | 0,2                                 |
| Staub          | bis 0,05           | bis 0,003                            | 0,03                                |
| Not-Aus        | 0,03               | 0,002                                | 0,02                                |
| Schirmumgebung | bis 0,02           | bis 0,001                            | 0,004                               |
| Goniometer     | bis 0,007          | bis 0,0005                           | 0,003                               |

Wie sich die verschiedenen Störfaktoren Staub, Not-Aus und Goniometer im Speziellen äußern, zeigt Abbildung 7.30 als Leuchtdichtebild und SVF. Beim Störfaktor Staub ist im Leuchtdichtebild deutlich der Strahl des Lichtfingers zu erkennen, der durch das Kameraviewfeld leuchtet. Da der Notausknopf tief angebracht ist, schattet die erste Raumblende einen Großteil dieses Streulichts ab. Das Goniometer zeigt einen gleichförmigen aber geringen Streulichteinfluss. Die SVF der Messschirmumgebung ist hauptsächlich auf Kamerastreulicht zurückzuführen, das nicht über die KSLK korrigiert werden kann. Dieser Einfluss ist Abbildung 5.1 bzw. Abbildung 5.2 aus Absatz 5.2 zu entnehmen.

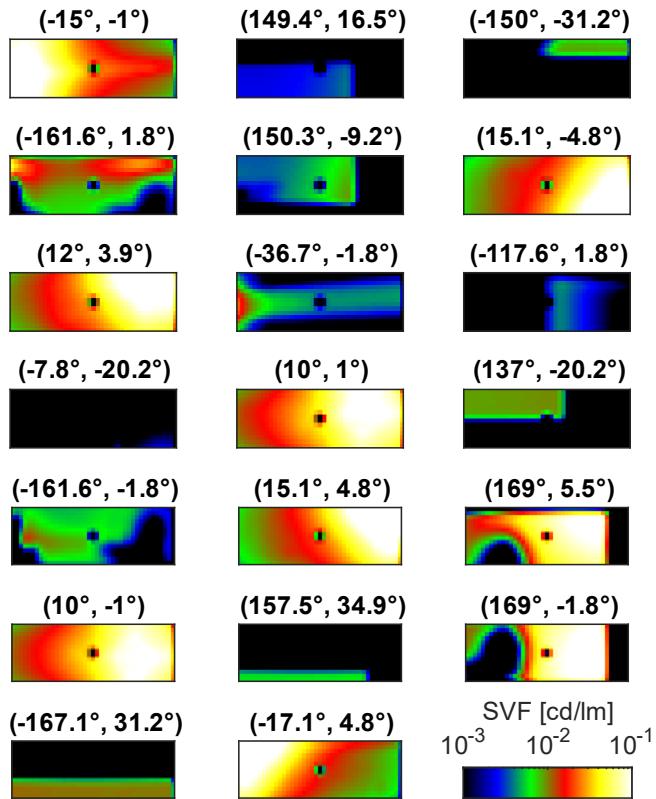


**Abbildung 7.30:** SVFs  $F(\varphi_s, \vartheta_s)$  und zugehörige Leuchtdichteaufnahmen  $L(x_s, y_s)$  in fünffach logarithmischer Falschfarbenskala für die Streulichtfaktoren Staub, Not-Aus und Goniometer.

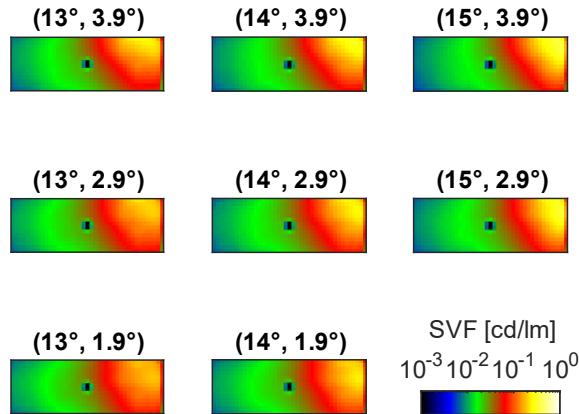
Wie unterschiedlich die SVFs des Messraums sein können zeigt Abbildung 7.31. Die dargestellten SVFs sollen zu einer ersten Einschätzung führen, wie die Anzahl und Anordnung an Stützstellen im

Raum zur Bestimmung der SVFs gewählt werden muss. Da die Anzahl der Stützstellen mit dem Arbeitszeitbedarf gekoppelt ist, ist sie ein entscheidender Parameter einer wirtschaftlichen Anwendung des Korrekturverfahrens. Die in Abbildung 7.31 zu erkennenden SVFs repräsentieren 20 zufällig aus dem Messraum ausgewählte Raumrichtungen. Dabei zeigt sich eine große Vielfalt verschiedener SVFs in der relativen Verteilung sowie im absoluten Wert. Allerdings weisen auch manche SVFs ein sehr ähnliches Verhalten auf, wie beispielsweise die unterste und zweitunterste SVF in der rechten Spalte zeigen. Diese beiden SVFs gehören benachbarte Raumrichtungen der Rückwand an.

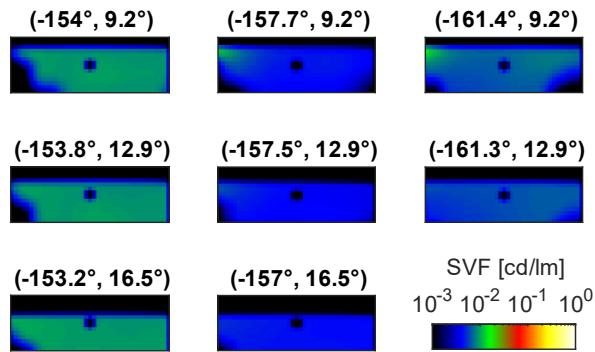
Um schlussendlich eine Aussage über die notwendige Anzahl der SVF-Stützstellen zu treffen, können benachbarte SVFs betrachtet werden. Abbildung 7.32 zeigt dafür acht benachbarter SVFs aus der Messschirmregion, die im  $1^\circ$  Abstand angeordnet sind. Hierbei lässt sich eine deutliche Ähnlichkeit der Aufnahmen erkennen. Gleiches gilt für die acht in Abbildung 7.33 dargestellten SVFs der Rückwand. Allerdings entstehen aufgrund der strahlbegrenzenden Blenden im Raum scharfe Kanten in den SVFs, die bei einer Korrektur zu Stufen im Streulichtsignal führen könnten. Ab welcher Stützstellendichte solche Artefakte auftreten ist nach dieser visuellen Begutachtung nicht festzustellen, sondern muss in der Simulation ermittelt werden. Dariüber hinaus bleibt zu untersuchen ob eine SVF über die Interpolation aus benachbarten SVFs berechnet werden kann, um so die Stützstellenanzahl weiter zu reduzieren.



**Abbildung 7.31:** 20 zufällig aus streulichtrelevanten Regionen ausgewählte SVFs zur Demonstration der Inhomogenität der SVFs. Die angegebenen Winkel entsprechen der Aufnahmerichtung und sind im A-Koordinatensystem angegeben.



**Abbildung 7.32:** Acht benachbarter SVFs aus der Messschirmregion.



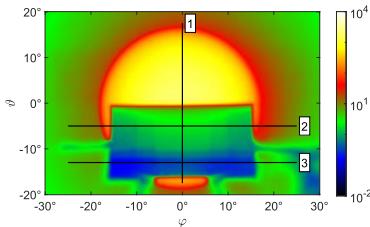
**Abbildung 7.33:** Acht benachbarter SVFs der Rückwand.

### 7.3.2 PRAKТИSCHE ANWENDUNG DER RSLK

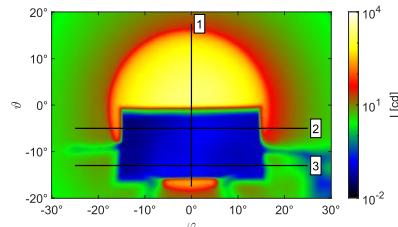
Zur Überprüfung der Raumstreuulichtkorrektur wird im Messraum B die in Absatz 0 vorgestellte Testquelle mit dem kamera- und photometerkopfbasierten Detektor vermessen und verglichen. Die Photometermessung gilt als streulichtunanfällig und wird als Referenzmessung verwendet. Ausgehend von der Kameramessung ohne jegliche Streulichtkorrektur werden Korrekturverfahren angewandt und deren Wirkungsweise analysiert.

Zur Gegenüberstellung der verschiedenen Korrekturverfahren zeigt Abbildung 7.34 die mit dem kamerabasierten LVK-Messsystem gemessene LVK in Falschfarbendarstellung. Abbildung 7.35 stellt die mit dem Photometer gemessene LVK gegenüber. Relevant für die Bewertung der Streulichtkorrekturen ist dabei der von der Lichtquellenblende abgeschottete LVK-Bereich. Für die dargestellten LVKs liegt dieser Bereich in  $\varphi$ -Richtung zwischen  $-14^\circ$  und  $14^\circ$  sowie in  $\vartheta$ -Richtung zwischen  $-3^\circ$  und  $-14^\circ$ . Bei der Photometermessung entsprechend Abbildung 7.35 ist dieser Bereich vergleichsweise homogen mit einer mittleren Lichtstärke von 0,1 cd bei einer Streuung von 0,031 cd. Das gemessene Licht entsteht dabei durch Mehrfachreflexionen zwischen Lichtquellenblende und Goniometertisch. Da sich die Lichtquelle während der Messung immer mit dem Goniometertisch bewegt, ist dieser Streulichtanteil nicht als Raumstreuulicht identifizierbar und somit Teil der LVK. Die mit der Kamera aufgenommene, nicht streulichtkorrigierte LVK aus Abbildung 7.34 weist hingegen eine mittlere Lichtstärke von 1 cd bei einer Streuung von 0,6 cd auf

Außerdem ergeben sich Maximalwerte von bis 3,2 cd. Tabelle 7.5 stellt die Lichtstärken des Blendenbereichs dieser und der im Folgenden berechneten streulichtkorrigierten LVKs gegenüber.



**Abbildung 7.34:** Mit dem kamera-  
basierten LVK-Messsystem gemes-  
sene LVK ohne Streulichtkorrek-  
turen.



**Abbildung 7.35:** Mit dem Photome-  
ter gemessene LVK.

**Tabelle 7.6:** Vergleich der LVK-Werte innerhalb des Blendenbe-  
reichs der Lichtquelle für verschiedene Streulichtkorrekturen.

| LVK-Aufnahme mit...                  | Mittelwert | Streuung |
|--------------------------------------|------------|----------|
| Photometer                           | 0,1 cd     | 0,031 cd |
| Kamera ohne Korrektur                | 1 cd       | 0,6 cd   |
| Kamera mit KSLK                      | 0,89 cd    | 0,55 cd  |
| Kamera mit Korrektur nach dem S.d.T. | 0,68 cd    | 0,45 cd  |
| Kamera mit RSLK                      | 0,082 cd   | 0,09 cd  |

Neben der Photometermessung und der Kameramessung ohne Korrektur (Kamera ohne Korr.) werden für die Kameramessung folgende Korrekturen durchgeführt und verglichen:

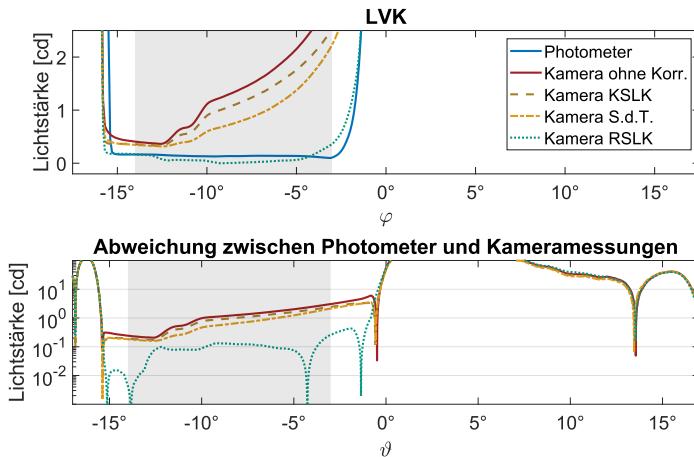
- Kamerastreulichtkorrektur (Kamera KSLK)

- Faustwertkorrektur nach dem Stand der Technik (Kamera S.d.T.) entsprechend Absatz 5.3 und
- Raumstreuulichtkorrektur (Kamera RSLK) nach dem in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren.

Während eine reine KSLK die Lichtstärke im Blendenbereich auf 0,89 cd mit einer Streuung von 0,55 cd korrigiert, erreicht eine Faustwertkorrektur nach dem Stand der Technik 0,68 cd bei einer Streuung von 0,45 cd. Die RSLK nach dem hier vorgestellten Verfahren erreicht hingegen 0,082 cd bei einer Streuung von 0,09 cd und korrigiert somit das Raumstreuulicht deutlich. Das Ergebnis entspricht nahezu der Photometermessung. Da allerdings die Streuung größer als der Mittelwert ist, ergeben sich leichte Überkorrekturen. Zu beachten ist dabei, dass im Voraus der Faustwertkorrektur und der RSLK eine KSLK durchgeführt werden muss.

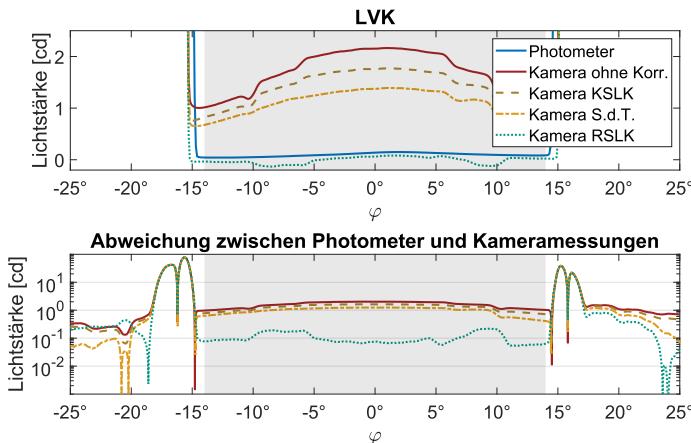
Noch deutlicher wird der Streulichteinfluss bei Betrachtung der LVK-Schnitte 1-3 aus Abbildung 7.34. Diese sind in Abbildung 7.36 bis Abbildung 7.38 dargestellt. Die grau hinterlegten Bereiche der LVK-Schnitte entsprechen dem durch die Lichtquellenblende abgeschotetten LVK-Bereich. Bei näherer Betrachtung der LVK-Schnitte fällt auf, dass mit jedem Korrekturverfahren das Streulicht im System weiter reduziert wird. Sehr eindrücklich zeigt dies die Abweichung zwischen den jeweiligen Kameramessungen und der als Referenz angesehenen Photometermessung, wie sie jeweils in den unteren Graphen der Abbildungen zu sehen ist. Hierbei ist zu erkennen, dass ausschließlich das in dieser Arbeit vorgestellte RSLK-Verfahren (Legendeintrag: Kamera RSLK) in der Lage ist die Dynamik der

Kameramessung um eine weitere Dekade zu verbessern. Beträgt die Abweichung zwischen Photometermessung und Kameramessung ohne Korrektur aus Abbildung 7.36 in der grau hinterlegten Blendenregion zwischen 0,3 cd und 3 cd, kann sie mit der RSLK auf 0,1 cd über nahezu den vollständigen Blendenbereich korrigiert werden. Ähnlich eindrückliche Korrekturen zeigen die LVK-Schnitte 2 und 3 aus Abbildung 7.37 bzw. Abbildung 7.38.

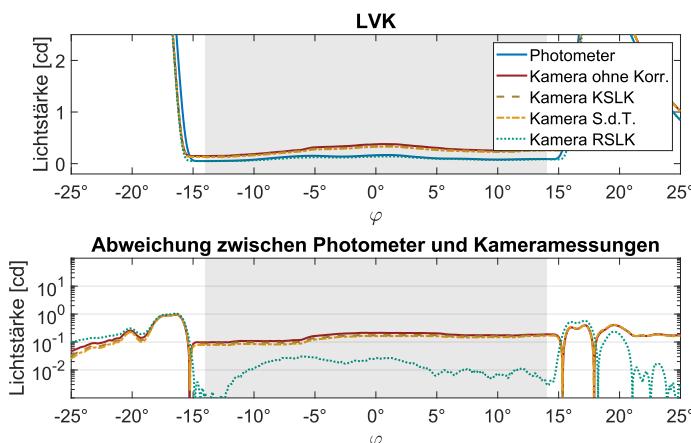


**Abbildung 7.36:** LVK-Schnitt 1 aus Abbildung 7.34 für die Photometermessung und die Kameramessungen ohne Streulichtkorrektur, mit Faustwertkorrektur und mit RSLK. Die untere Abbildung zeigt die Abweichungen zwischen den Kameramessungen zur Photometermessung.

## Ergebnisse



**Abbildung 7.37:** LVK-Schnitt 2. Verglichen werden die Photometermessung mit den verschiedenen Streulichtkorrekturverfahren.



**Abbildung 7.38:** LVK-Schnitt 3. Verglichen werden die Photometermessung mit den verschiedenen Streulichtkorrekturverfahren.

Ein in den Kameramessungen auffälliger Effekt sind Stufen, die in LVK-Schnitt 1 (Abbildung 7.36) zwischen  $\varphi = -10^\circ$  und  $-13^\circ$  und LVK-Schnitt 2 (Abbildung 7.37) zwischen  $\pm 5^\circ$  und  $\pm 10^\circ$  auftreten. In beiden Fällen lassen sie sich auf den Stitching Algorithmus zurückführen, da Aufnahmen mit unterschiedlichem Streulichteinfluss zusammengefügt werden. Da sich die Aufnahmen überlappen ergeben sich Stufen im Kamerabild. Das RSLK Verfahren kann diese Stufen zwar deutlich korrigieren, in der LVK bleiben sie aber sichtbar. Im folgenden Absatz werden daher Effekte erläutert, die die Performance des RSLK-Algorithmus limitieren.

### 7.3.3 EINFLUSSPARAMETER DER RSLK

Um das RSLK Verfahren besser bewerten zu können ist eine Analyse der Systemparameter und deren Auswirkung auf die Korrektur notwendig. Hierfür wichtige Parameter betreffen zum einen die Bestimmung der SVF und zum anderen das Korrekturverfahren selbst.

Für die Bestimmung der SVF sind die Lichtfingerparameter entscheidend. Diese betreffen den Lichtstrom und den Öffnungswinkel von Spot- und Halbschattenbereich. Der Lichtstrom des Lichtfingers begrenzt nach Gleichung (5.18) die Performance der Korrektur. Bei einem Rauschlevel des Systems von 0,01 cd und einem Lichtstrom des Lichtfingers von 26 lm für den Messschirm ergibt sich eine zu erwartende Sensitivität der Korrektur von 0,00038 cd/lm. Da der Lichtstrom der Testlichtquelle 150 lm beträgt, kann nach der Streulicht-

korrektur ein Korrekturfehler von bis zu 0,057 cd verbleiben. Diese Größenordnung kann bereits eine Erklärung für die verbleibenden Abweichungen zwischen der Photometermessung und der Kameramessung mit RSLK aus dem vorherigen Absatz sein. Das Rauschlevel wurde dabei aus Dunkelsignalmessungen während der SVF-Aufnahmen bestimmt und lässt sich ggf. durch Korrekturen noch weiter reduzieren.

Um außerdem Schwankungen des Lichtfingers auszugleichen wurde der Lichtstrom während der Messung aufgezeichnet und die Abweichungen bei der Berechnung der SVF- Matrix korrigiert. Ein Einfluss der Lichtquellenstabilität ist somit als vernachlässigbar anzunehmen.

Die Öffnungswinkel von Spot- und Halbschattenbereich des Lichtfingers sind Einflussparameter, die sich aus den in Absatz 5.5 beschriebenen Limitierungen ergeben. Sie wurden unter den gegebenen Bedingungen als Kompromiss nach bestem Wissen und Gewissen ausgelegt. Der Öffnungswinkel begrenzt dabei die Raumauflösung der SVF. Eine weitere Verkleinerung des Öffnungswinkels hätte eine Verkleinerung des Lichtstroms zu Folge, was unpraktikabel ist und somit eine Analyse des Öffnungswinkels hinsichtlich kleinerer Öffnungswinkel schwierig macht. Der Halbschattenbereich wiederum hat einen Einfluss auf die Direktlichtkorrektur der SVF. Da der Öffnungswinkel des für die Messschirmregion verwendeten Lichtfingers  $5,6^\circ$  beträgt, müssen bei der Direktlichtkorrektur große Teilbereiche einer SVF-Aufnahme interpoliert werden. In vertikaler Richtung entspricht die Halbschattengröße  $1/3$  der Messschirmgröße, weshalb hier Interpolationsfehler zu erwarten sind.

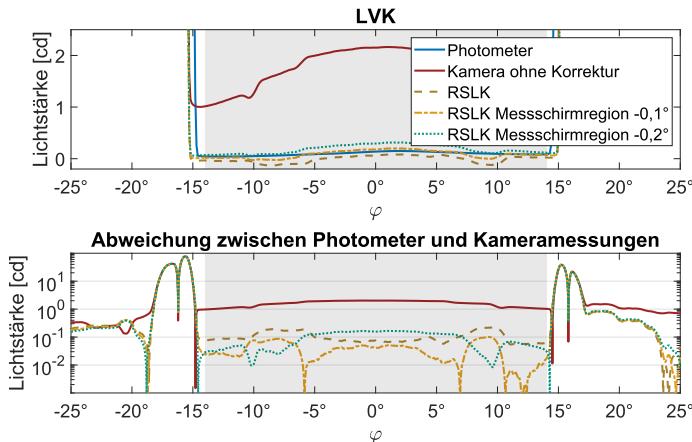
Ein weiterer möglicher Einflussparameter ist die Stützstellenanzahl der SVF. Hierzu wurde in Absatz 7.3.1 eine visuelle Begutachtung benachbarter SVF vorgenommen. Durch die erkennbar große Ähnlichkeit benachbarter Verteilungsfunktionen wird vermutet, dass eine höhere Stützstellenanzahl die RSLK nicht weiter verbessern wird, die Verwendung von weniger Stützstellen aber überprüft werden muss.

Bei der Berechnung der RSLK, ergeben sich weitere Einflussparameter. Entscheidend ist die in Absatz 5.6.1 beschriebene Regionensegmentierung. Um die durch den Öffnungswinkel des Spots begrenzte Raumauflösung der SVF künstlich zu vergrößern wurde der Raum in eine Messschirmregion und eine Raumregion unterteilt und jeweils eine eigene SVF-Matrix berechnet. Damit bei der Streulichtberechnung auch eine korrekte Zuordnung zwischen den LVK-Bereichen und den SVF-Stützstellen erfolgt, muss daher auch die LVK entsprechend der Regionenmasken aus Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 in zwei LVK-Bereiche aufgeteilt werden. Somit ist sichergestellt, dass LVK-Bereiche, die auf den Messschirm leuchten, auch mit den SVFs der Messschirmregion verrechnet werden. Ebenso werden LVK-Bereiche, die in den übrigen Raum leuchten mit den SVFs der Raumregion verrechnet.

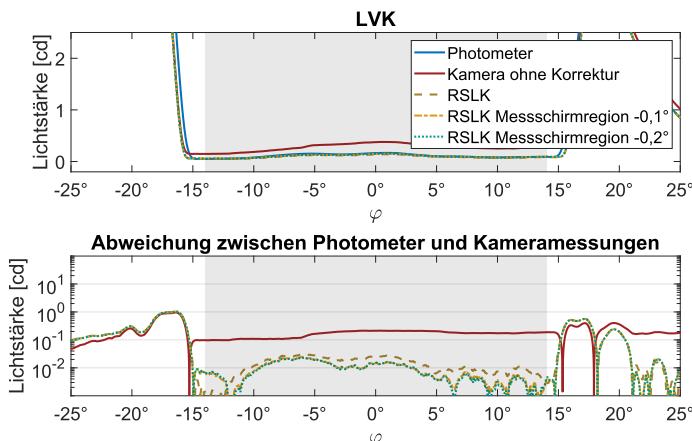
Da sich die Reflexionskoeffizienten zwischen Raum und Messschirm deutlich voneinander unterscheiden, kann eine um wenige zehntel Grad fehlerhaft bestimmte Regionenmaske eine Über- bzw. Unterkorrektur des Raumstreuolichts verursachen. Um dies zu analysieren wurde die RSLK mit verschiedenen großen Regionenmasken durchgeführt. Abbildung 7.39 zeigt hierfür die Ergebnisse des LVK-Schnitts 2

aus Abbildung 7.34. Neben einer RSLK auf Basis der aus den Blendenmaßen berechneten Regionen (Legendeneintrag: RSLK), wurde außerdem die Blendenöffnung um 15 mm bzw. 30 mm kleiner angenommen und erneut eine RSLK durchgeführt. 15 mm entsprechen dabei einer Verkleinerung der strahlbegrenzenden Blendenöffnung um  $0,1^\circ$ , 30 mm entsprechen  $0,2^\circ$ . Eine Verkleinerung der Raumblenden führt dazu, dass LVK Anteile mit der SVF der Raumregion anstatt der höher reflektierenden Messschirmregion verrechnet werden. Die Wirkung der RSLK ist demnach geringer. Allerdings ist bei Betrachtung der Abweichung zwischen Photometer- und Kameramessungen kein optimaler Parameterwert zu ermitteln. Die Ursache liegt neben Unsicherheiten bei der Bestimmung der Raumblendenmaße auch an der Ausdehnung der Testlichtquelle.

Dass die Regionengröße nicht immer ein einflussreicher Parameter ist zeigt LVK-Schnitt 3 aus Abbildung 7.40. Die Abweichung zwischen den verschiedenen raumstreulichtkorrigierten LVKs und der Photometermessung ist nahezu konstant. Werte dieses LVK-Schnitts wurden in LVK-Segmenten aufgenommen, bei denen kein LVK-Bereich mit hoher Lichtstärke auf die Regionengrenze zwischen Raum und Messschirm trifft.



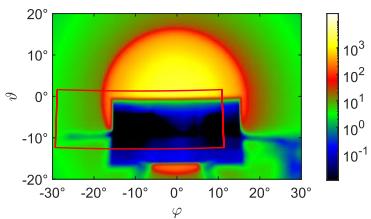
**Abbildung 7.39:** LVK-Schnitt 2. Verglichen werden die Photometermessung mit RSLK-Verfahren verschiedener Regionengrößen.



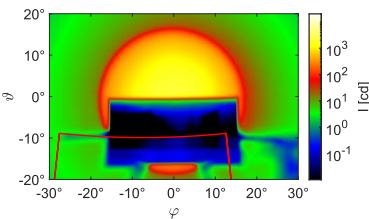
**Abbildung 7.40:** LVK-Schnitt 3. Verglichen werden die Photometermessung mit RSLK-Verfahren verschiedener Regionengrößen.

Für eine bessere Darstellung dieses Effekts können LVK-Segmente betrachtet werden, mit denen die LVK-Schnitte aufgenommen wurden. Für LVK-Schnitt 2 ist die Lage eines solchen Segmentes in Abbildung 7.41 zu sehen. Die zugehörigen LVK-Segmente zeigt Abbildung 7.43. Beim Vergleich der LVKs „RSLK“, „RSLK Messschirmregion  $-0,1^\circ$ “ und „RSLK Messschirmregion  $-0,2^\circ$ “ zeigt sich, je kleiner die Messschirmregion, desto weniger Streulicht wird korrigiert. Diese Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass entsprechend Abbildung 7.41 ein LVK-Bereich von bis zu 2000 cd direkt auf die obere Messschirmkante fällt. Wird der Lichtstrom in einem LVK Bereich von  $0,1^\circ$  Höhe oberhalb der dargestellten Messschirmkante berechnet, so ergeben sich 1,3 lm. Da entsprechend Tabelle 7.5 ein Lumen Lichtstrom im Mittel bis zu 0,06 cd Streulicht über dem Messschirm erzeugt, ergibt sich für diese Aufnahme ein mittleres Streulicht von 0,078 cd. Dies entspricht ca. der Korrekturdifferenzen von ca. 0,08 cd pro  $0,1^\circ$  kleinerer Messschirmregion (vgl. Abbildung 7.39).

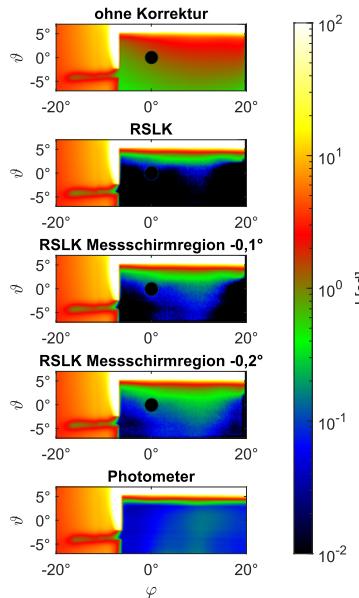
Um auch den Einfluss der Regionengröße auf den LVK-Schnitt 3 besser verstehen zu können, werden Abbildung 7.42 und Abbildung 7.44 betrachtet. In den verschiedenen raumstreulichtkorrigierten LVKs lässt sich kein relevanter Unterschied erkennen. Ursache hierfür ist, dass entsprechend Abbildung 7.42 der für Streulicht verantwortliche LVK-Bereich nicht auf eine Raum-Messschirmkante fällt.



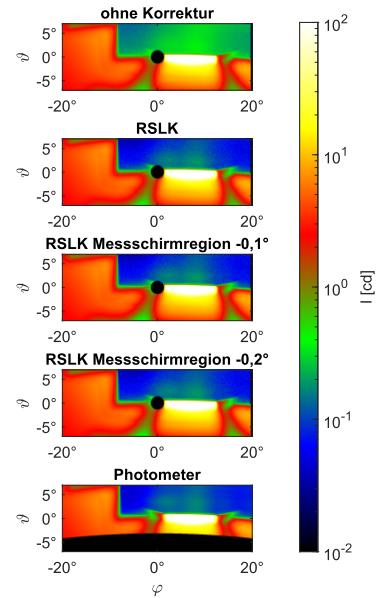
**Abbildung 7.41:** LVK-Segment zur Vermessung von Schnitt 2.



**Abbildung 7.42:** LVK-Segment zur Vermessung von Schnitt 3.

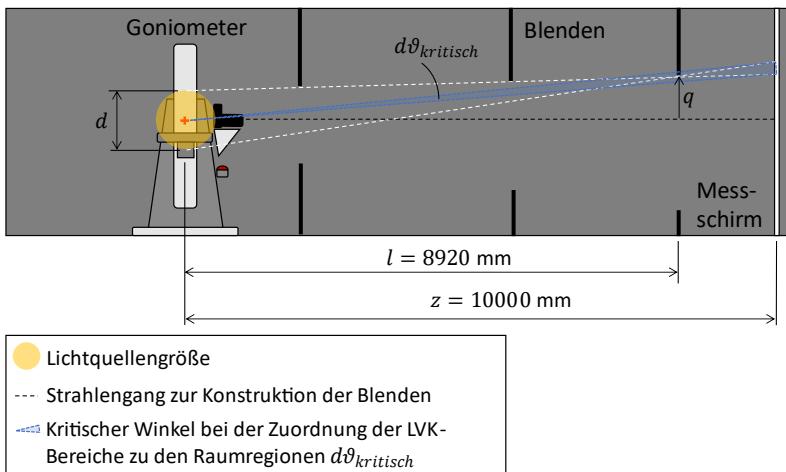


**Abbildung 7.43:** Korrekturen der LVK-Segmente mit der LVK-Schnittr 2 vermessen wurde.



**Abbildung 7.44:** Korrekturen der LVK-Segmente mit der LVK-Schnittr 3 vermessen wurde.

Der Parameter Regionengröße hat nicht nur einen Einfluss durch die Unsicherheit der Bestimmung der Raumblendenmaße. Wie in Abbildung 7.45 verdeutlicht wird, ist der Messschirm über die gesamte Raumrückwand weiß gestrichen. Somit befinden sich die Blende für eine Unterteilung der Raumregionen nicht in der Messschirmebene, sondern an der Stelle der letzten strahlbegrenzenden Blende. Da jede Testlichtquelle eine Ausdehnung  $D$  besitzt, ergeben sich Winkel  $d\vartheta_{kritisch}$  bzw.  $d\varphi_{kritisch}$  mit keiner klaren Zuordnung zwischen LVK-Bereich und Raumregion. Diese kritischen Winkel lassen sich über das Blendenmaß  $q$ , die Lichtquellenausdehnung  $D = 120$  mm, die Lage der strahlbegrenzenden Blende  $l = 8920$  mm und den Messschirmabstand von  $z = 10000$  mm über einen Strahlensatz auf  $d\vartheta_{kritisch} \approx d\varphi_{kritisch} \approx 0,06^\circ$  abschätzen.

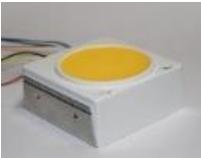
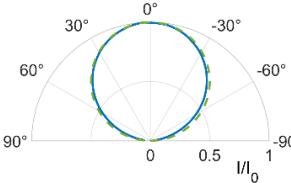
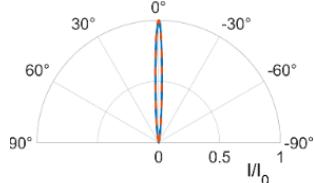


**Abbildung 7.45:** Einfluss des Parameters Messschirmgröße auf die RSLK.

## 7.4 PHOTOMETRISCHE GRENZENTFERNUNG

Die Analyse des in Kapitel 6 beschriebenen Verfahrens zur Berechnung der richtungsabhängigen photometrischen Grenzentfernung auf Basis von Strahlendaten erfolgt anhand der in Tabelle 7.7 vorgestellten Lichtquellen, einem kreisrunden Lambertstrahler und einer engbündelnden Taschenleuchte. Die photometrische Grenzentfernung wird auf Basis einer Toleranz von 1% für jede Raumrichtung berechnet. Die numerische Berechnung erfolgt mit kanonischen Raumwinkeln mit einem Öffnungswinkel von  $3^\circ$  für den Lambertstrahler und  $1^\circ$  für die engbündelnde Taschenleuchte. Für die analytische Berechnung werden 1000 Punktlichtquellen mit einem aus der LVK berechneten  $\cos^n(\vartheta)$ -Abstrahlverhalten simuliert, die entsprechend einer aus dem Rayfile generierten Beleuchtungsstärkeverteilung angeordnet sind. So soll das Nahfeld-Abstrahlverhalten der Lichtquelle möglichst realitätsnah abgebildet werden. Um außerdem den Einfluss der Lichtquellenjustage auf dem Goniometer zu untersuchen, wird einerseits die photometrische Grenzentfernung direkt aus dem aufgenommenen Rayfile berechnet. Andererseits wird das Rayfile um seinen Lichtschwerpunkt korrigiert und die photometrische Grenzentfernung erneut berechnet. Die selbe Analyse erfolgt für die Punktlichtquellen mit  $\cos^n(\vartheta)$ -Abstrahlverhalten.

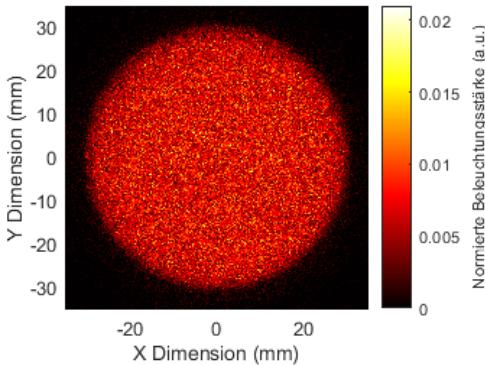
**Tabelle 7.7:** Vergleich der Testlichtquellen für die Berechnung der photometrischen Grenzfernug.

| Lichtquelle                 | Quasi lambertsche LED<br>Lichtquelle  | Engbündelnde Taschen-<br>leuchte  |
|-----------------------------|---|---|
| Bezeichnung                 | Philips Fortimo   | ECOM Taschenleuchte   |
| Abbildung                   |  |  |
| LVK                         |  |  |
| Lichtquelle-<br>durchmesser | 60 mm   | 35 mm   |
| $n$                         | 1,15  | $\sim 822$  |

#### 7.4.1 LAMBERTSTRAHLER

Die in Tabelle 7.7 aufgelistete Lichtquelle Philips Fortimo ist ein kreisrunder Lambertstrahler mit 60 mm Durchmesser und einer aus der LVK berechneten  $\cos^n(\vartheta)$ -Abstrahlcharakteristik mit  $n = 1,15$ . Abbildung 7.46 zeigt die berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung in der Ebene des Lichtschwerpunkts, entsprechend deren Verteilung die Anordnung der zur analytischen Berechnung verwendeten 1000 Punktlichtquellen erfolgt. Für die numerische Berechnung werden 300 Millionen Strahlen verwendet. Aus der Lichtschwerpunkt-

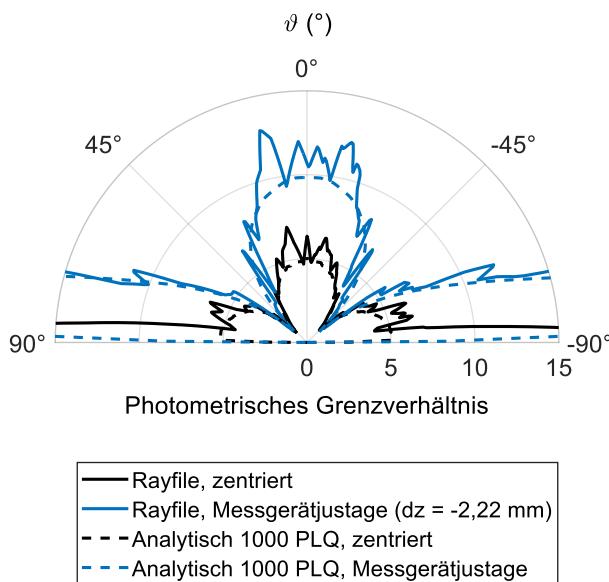
berechnung des Rayfiles wurde ein Offset der Lichtquellenjustage im Goniometer von  $-2,2$  mm entlang der optischen Achse ermittelt.



**Abbildung 7.46:** Aus dem Rayfile berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung in der Ebene des Lichtschwerpunkts für den Lambertstrahler.

Abbildung 7.47 zeigt die berechneten photometrischen Grenzentfernungen bezogen auf den Lichtquellendurchmesser (photometrisches Grenzverhältnis). Verglichen wird die numerische und analytische Berechnungsweise jeweils für die Position der Messgerätjustage sowie der ideal im Messgerät zentrierten Lichtquelle. Ist die Lichtquelle entsprechend ihrem Lichtschwerpunkt justiert (schwarze Kurven) zeigt sich für die numerische sowie die analytische Berechnungsweise eine photometrische Grenzfernun vom fünfachen der Lichtquellenausdehnung in Hauptabstrahlrichtung. Dieser Faktor ist deckungsgleich zu den aus der Literatur bekannten Abschätzungsformeln für kreisrunde Lambertstrahler. Ebenso ergibt sich eine

charakteristische Kurvenform der photometrischen Grenzfernug mit einem Maximum bei  $0^\circ$  und einer zuerst sinkenden und daraufhin wieder ansteigenden photometrischen Grenzfernug für größer werdende  $\vartheta$ -Winkel. Dabei ist auch zu erkennen, dass die numerische Berechnung aufgrund der diskreten Strahlen verrauscht ist. Außerdem zeigt sich für  $\vartheta = 90^\circ$  ein sehr großer Ausschlag der photometrischen Grenzfernug. Grund hierfür ist die durch  $\cos^n(90^\circ) = 0$  bedingte zu geringe Strahlanzahl in dieser Raumrichtung.

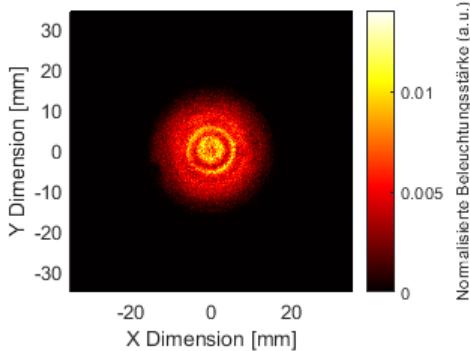


**Abbildung 7.47:** Photometrisches Grenzverhältnis des kreisrunden Lambertstrahlers.

Beim Vergleich der photometrischen Grenzentfernung für verschiedene Jutagepositionen, zeigt sich, dass eine Verschiebung der Lichtquelle aus dem Goniometerdrehzentrum um -2,22 mm entlang der optischen Achse, die photometrische Grenzentfernung in Hauptabstrahlrichtung verdoppelt. Noch ausgeprägter kommt dieser Effekt für Raumrichtungen von  $\vartheta > 45^\circ$  zum Tragen. Da die analytische Berechnungsweise mit der numerischen Berechnungsweise bis auf das stochastische Rauschen sehr gut übereinstimmt werden die berechneten Ergebnisse als plausibel angesehen.

### 7.4.2 ENGBÜNDELNDE LICHTQUELLE

Die in Tabelle 7.7 aufgelistete engbündelnde ECOM-Taschenleuchte hat eine Ausdehnung von maximal 35 mm und ein aus der LVK berechnetes  $\cos^n(\vartheta)$ -Abstrahlverhalten mit  $n = 822$ . Abbildung 7.46 zeigt die berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung in der Ebene des Lichtschwerpunkts. Entsprechend dieser Verteilung erfolgt die Anordnung der 1000 Punktlichtquellen für die analytische Berechnung. Für die numerische Berechnung mittels Rayfile werden 100 Millionen Strahlen simuliert und ein kanonischer Öffnungswinkel von  $1^\circ$  verwendet. Aus der Lichtschwerpunktberechnung ergibt sich eine Differenz zwischen Lichtschwerpunkt und Messgerätjustage von -28 mm entlang der optischen Achse. Abbildung 7.49 verdeutlicht diese Größenordnung.



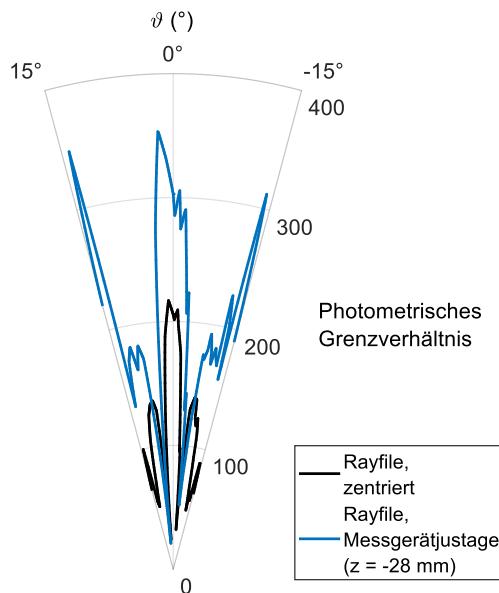
**Abbildung 7.48:** Aus dem Rayfile berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung in der Ebene des Lichtschwerpunkts für die engbündelnde Taschenleuchte.



**Abbildung 7.49:** Unterschied zwischen realem Lichtschwerpunkt und der Messgerätjustageposition.

Abbildung 7.50 zeigt die numerisch berechnete photometrische Grenzfernungen bezogen auf den Lichtquellendurchmesser. Da das Abstrahlverhalten mit einer Halbwertsbreite von  $6^\circ$  engbündelnd ist werden nur Winkel bis  $\vartheta = 15^\circ$  dargestellt. Bei der Bewertung der

Hauptabstrahlrichtung von dem zunächst lichtschwerpunktkorrigierten Rayfile zeigt sich eine photometrische Grenzfernug vom 220-fachen der Lichtquellenausdehnung. Dieser Wert übersteigt deutlich die in den Normen angegebene Abschätzungsformel vom 15-fachen der Lichtquellenausdehnung engbündelnder Lichtquellen.

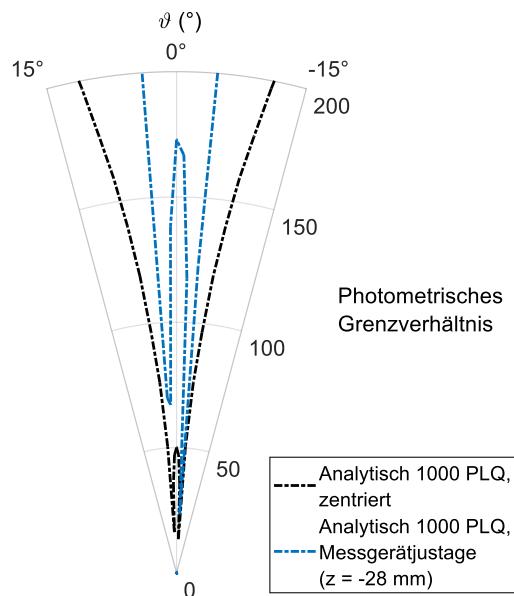


**Abbildung 7.50:** Photometrisches Grenzverhältnis der engbündelnden Taschenleuchte, berechnet aus den gemessenen Rayfiles.

Noch dramatischer wirkt sich eine Fehljustage der Lichtquelle im Messgerät aus. Ein Offset von 28 mm entlang der optischen Achse der Lichtquelle vergrößert die photometrische Grenzfernug in

Hauptabstrahlrichtung auf das 360-fache der Lichtquellenausdehnung. Somit muss mindestens ein Messabstand von 12,6 m gewählt werden um innerhalb der geforderte Messtoleranz von 1% zu liegen. Zwar ist der Mindestmessabstand für Winkel um  $5^\circ$  weitaus kleiner, für Winkel mit  $\vartheta > 15^\circ$  wird allerdings eine deutlich den Wert der Hauptabstrahlrichtung übersteigende photometrische Grenzfernernung erwartet.

Bei der analytischen Berechnungsweise entsprechend Abbildung 7.51 zeigt sich eine deutlich geringere photometrische Grenzfernernung in Hauptabstrahlrichtung vom 50- bzw. 180-fachen der Lichtquellenausdehnung, je nach Justageposition. Für Winkel von  $\vartheta > 5^\circ$  ergibt sich allerdings ein weitaus steilerer Anstieg der photometrische Grenzfernernung als bei der numerischen Berechnung. Mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen analytischer und numerischer Berechnung können auf den bei der numerischen Berechnung verwendeten großen Öffnungswinkel von  $1^\circ$  zurückzuführen sein. Allerdings wird vermutet, dass ein größerer Öffnungswinkel glättend wirkt und die photometrische Grenzfernernung eher verkleinert. Viel wahrscheinlicher ist daher, dass die Abschätzung der photometrischen Grenzfernernung der ECOM-Taschenleuchte nicht über ein Punktlichtquellenmodell möglich ist.



**Abbildung 7.51:** Photometrisches Grenzverhältnis der ECOM-Taschenleuchte, berechnet aus analytischen Punktlichtquellen.



---

## Kapitel 8

# DISKUSSION UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der drei Einflussfaktoren: geometrische Parameter, Raumstreulicht und photometrische Grenzuentfernung einer LVK-Messung diskutiert und die Erkenntnisse thematisch eingeordnet. Neben einer Diskussion über die Vollständigkeit der verwendeten Modelle soll die Relevanz der Ergebnisse in Bezug auf eine LVK-Messung besprochen und mögliche Erweiterungsvorschläge gemacht werden. Bei der geometrischen Unsicherheitsanalyse wird in diesem Zusammenhang verstärkt Wert auf die Auswahl der verwendeten Eingangsgrößen gelegt und der Einfluss verschiedener Messanwendungen diskutiert. Bei der Raumstreulichtkorrektur wird die praktische Anwendbarkeit dieses Verfahrens für industrielle Zwecke analysiert. Bei der photometrischen Grenzuentfernung hingegen werden die gewonnenen Erkenntnisse in den aktuellen Stand der Technik eingeordnet.

### 8.1 GEOMETRISCHE UNSICHERHEITSANALYSE

Die in Kapitel 4 vorgestellte Methode zur geometrischen Unsicherheitsanalyse eines LVK-Messsystems kann erfolgreich angewandt

---

werden. Absatz 7.2 zeigt dies am verwendeten Messsystem A. Es ist zu erkennen, dass die geometrischen Unsicherheitsfaktoren einen deutlichen Beitrag zur kombinierten Messunsicherheit einer LVK liefern können. Allerdings ist dieser Beitrag abhängig von den geforderten Messbedingungen. Entscheidend dabei ist, ob die Unsicherheit der Lichtquellenjustage relevant für die Messung ist, bzw. wie präzise sie erfolgen kann. Je nachdem ob diese Unsicherheit berücksichtigt wird, ergeben sich für das evaluierte Messsystem Standardmessunsicherheiten der Messrichtung von bis zu  $0,0093^\circ$  ohne relevante Lichtquellenjustage bzw.  $0,36^\circ$  bei relevanter Lichtquellenjustage. Ein in diesem Zusammenhang wichtiger Einflussparameter ist die Lichtschwerpunktbestimmung der Lichtquelle. Diese Problematik ist auch Teil der Berechnung der photometrischen Grenzentfernung aus Absatz 7.4.2. Der angenommene und der reale Lichtschwerpunkt der dort analysierten engbündelnden Lichtquelle liegen um 28 mm auseinander, was deutlich die während der geometrischen Unsicherheitsanalyse angenommene Positionierunsicherheit von 10 mm übersteigt. Wie groß die Unsicherheit der Lichtquellenjustage also tatsächlich ist hängt stark vom Lichtquellentyp ab. Unter Umständen kann es aber auch irrelevant sein, ob der Lichtschwerpunkt der Lichtquelle tatsächlich im Goniometerdrehzentrum justiert wird. Ebenso bleibt der Einfluss von Nachbearbeitungsschritten in dieser geometrischen Unsicherheitsanalyse unberücksichtigt.

Weiterhin soll die Vollständigkeit des verwendeten geometrischen Modells diskutiert werden, um festzustellen ob alle relevanten Systemparameter berücksichtigt wurden. Die Bestimmung der

Eingangsgrößen der vorgestellten Unsicherheitsberechnung orientiert sich dabei an der kinematischen Kette, die zur Überführung des Lichtquellenkoordinatensystems in das Detektorkoordinatensystem verwendet wird. Als relevant angesehen wurden Fertigungstoleranzen wie Achsabstand, Achsschieflage und Stellgenauigkeit des Goniometers, sofern diese entweder bei Justage und Messung verschieden sind, oder durch eine Goniometerbewegung eine Unsicherheit hervorrufen können. Letzteres ist der Fall, sobald die unsicherheitsbehaftete Größe in der kinematischen Kette hinter einer der Rotationsachsen liegt. Eine Unsicherheit des Goniometer-Messschirmabstands hat beispielsweise keinen Einfluss auf die geometrische Messunsicherheit, sie ist bei Messung und Justage dieselbe. Ähnlich verhält es sich mit der Detektororientierung. Andererseits hat die Unsicherheit des Achsabstands einen Einfluss auf die Gesamtunsicherheit obwohl auch dieser bei Messung und Justage konstant ist. Da allerdings der Achsabstand in der kinematischen Kette hinter der Rotation der V-Achse liegt trägt diese Größe zur kombinierten Messunsicherheit bei.

Für das verwendete Goniometer GO-H 1660 als nicht relevant angesehen wird demgegenüber die thermische Ausdehnung und die mechanische Deformation aufgrund der massiven Bauteile des Goniometers. Ebenso besitzt das Goniometer ein spielarmes vorgespanntes Getriebe. Nicht analysiert, aber möglicherweise einflussreich könnte allerdings das Gewichte verschiedener Testlichtquellen sein. Das Goniometer ist nach Spezifikation zwar auf eine Last von 75 kg ausgelegt, wie aber gerade Messungen in vertikalen Aufnahmepositionen

aussehen und welchen Einfluss diese beispielsweise auf die Goniometerpositioniergenauigkeit haben, wurde nicht überprüft [21].

### 8.1.1 SOFTWARETECHNISCHE UMSETZUNG UND ÜBERTRAGBARKEIT

Ein weiterer wichtiger Diskussionspunkt ist die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Goniophotometer. Dazu zählen nicht nur verschiedene Goniophotometertypen sondern auch verschiedene Justagemethoden, wie in Absatz 4.3 beschrieben. Diese Übertragbarkeit ist vollständig gewährleistet, indem die verwendeten geometrischen Transformationen entsprechend angepasst werden. Das vorgestellte Verfahren basiert dabei auf einer kinematischen Kette, die auf ihre wesentlichen Transformationen reduziert wurde (vgl. Absatz 4.4.1). Diese Methode veranschaulicht den Prozess sehr gut und hat den Vorteil, dass messbare Größen wie Achsabstand und Achsschieflage simuliert werden können. In einem standardisierten Prozess einfacher umsetzbar könnte es aber sein, vorhandene kinematische Modelle auf Basis von URDF-Dateien (*Unified Robot Description Format*) [67] zu nutzen und diese entsprechend einem Baukastensystem zusammenzusetzen. Zu beachten bleibt dabei aber, dass diese kinematischen Modelle die Bewegung des Goniometers beschreiben und ggf. für relevante Unsicherheitsparameter wie beispielsweise die Achsschieflage keine Transformationsglieder existieren.

### 8.1.2 BEWERTUNGSVERFAHREN

Das vorgeschlagene Bewertungsverfahren berechnet zu jeder Raumrichtung eine Unsicherheit der Messrichtung sowie des Messabstands. Entscheidend dabei ist, dass die Bewertung in Form der Detektorposition stattfindet. Somit können bei Bedarf weitere Analyseparameter, wie die Unsicherheit des Lichteinfallswinkels auf den Detektor mitberücksichtigt werden. Für die Auswertung müssen außerdem die Detektorpositionen einer Raumrichtung auf die optische Achse gedreht werden. Andernfalls kann es, aufgrund der zum Pol hin entartenden Raumwinkel, zu einer polnahen Verzerrung der Unsicherheitsbewertung kommen.

Das in dieser Dissertation vorgestellte Bewertungsfahren liefert für die Unsicherheitsbewertung der Messrichtung drei Diagramme, die eine Aussage über die Konfidenzregionen der Messrichtungen liefern. Da als Konfidenzregion eine Ellipse gewählt wurde, beschreiben die Diagramme die Standardmessunsicherheit entlang der langen und kurzen Ellipsenachse sowie des Rotationswinkels der Ellipse. Der Rotationswinkel wird dabei erst relevant, wenn sich die Standardmessunsicherheit der langen und kurzen Ellipsenachse voneinander unterscheiden. Eine Darstellung der Korrelationen verschiedener Messrichtungen untereinander ist weiterhin nicht möglich.

### 8.1.3 GEOMETRISCHE PARAMETERANALYSE

Zur geometrischen Unsicherheitsanalyse gehört auch die Bestimmung der geometrischen Systemparameter. In dieser Arbeit wurden dazu erfolgreich die „Einfachen Methoden“ vorgestellt, um, mit vergleichsweise geringem Zeit- und Kostenaufwand, die geometrischen Systemparameter zu bestimmen. Ein Vergleich der Ergebnisse zu einem etablierten geometrischen Messverfahren steht noch aus. Nur so kann schlussendlich die Plausibilität der ermittelten Ergebnisse überprüft werden, was mithilfe von Lasertrackermessungen angedacht ist. Ebenso besteht noch Entwicklungsbedarf in Bezug auf die in Absatz 4.7.1 vorgeschlagene Methode zur Analyse der Stellgenauigkeit der Goniometer H- und V-Achse, welche sich auf die Wiederholbarkeit beschränkt. Für eine Analyse der absoluten Stellgenauigkeit müsste eine Methode entwickelt werden, die in der Lage ist die angefahrenen Goniometerpositionen in Verbindung zueinander zu setzen. Möglich wäre z.B. die Bewegung von Mustern über die Goniometerachsen mit Kameras aufzunehmen und eine Lageberechnung der Muster in den Kamerabildern durchzuführen.

Ebenso erfolgreich vorgestellt wurde eine photogrammetrische Methode zur geometrischen Parameteranalyse. Es konnte gezeigt werden, dass auf Basis der Bündelblockausgleichsrechnung die Messsystemgeometrie eines Goniophotometers rekonstruiert werden kann, auch wenn die erreichte Genauigkeit nicht ausreichend ist, wie der Vergleich mit den einfachen Methoden zeigt. Die Verwendung dieses Algorithmus könnte allerdings noch weiter verbessert werden,

indem auch die Kameraorientierungen in die Berechnungen miteinbezogen werden. Gerade bei der Analyse der Rotationsachsen des Goniometers könnte sich hierbei eine Verbesserung ergeben. Mitberücksichtigt werden sollte dabei auch, dass zur Analyse der Achsschieflage und des Achsabstands Messkoordinaten über den vollständigen Goniometerbewegungsradius aufgenommen werden. So können die Ausgleichsrechnungen für Kreis- und Ebenenfits mit geringerer Unsicherheit durchgeführt werden. Außerdem muss die Kamera nicht unbedingt auf dem Goniometer installiert werden. Unter Umständen ist es sinnvoller mit einer oder mehreren Kameras das Messsystem von außen zu betrachten. Auch wenn der Ansatz einer photogrammetrischen Methode in dieser Dissertation nur in einem „Proof-of-Concept“ untersucht wurde, bleibt der Scharm solcher Methoden zur Bestimmung der Messsystemgeometrie weiterhin bestehen. Grund hierfür ist das kontaktlose Messverfahren, sowie eine mögliche schnelle Analysemethode. Kann darüber hinaus die messsysteminterne Kamera zur Analyse verwendet werden, wäre ein Autokalibriermechanismus des Messsystems möglich.

## 8.2 RAUMSTREULICHTKORREKTUR

Das in Kapitel 5 vorgestellte Raumstreulichtkorrekturverfahren ist in der Lage Streulicht effizient im Nachgang einer kamerabasierten LVK-Messung zu korrigieren. In erster Linie erfolgt damit eine Raumstreulichtkorrektur, allerdings werden auch Kamerastreulichtanteile korrigiert, die nicht über die KSLK korrigiert werden konnten.

So zeigt die Raumanalyse mittels integraler SVF, dass die Region um den Messschirm Streulicht im System erzeugt. Diese Region betrifft den Bereich der ersten Raumblende, die gleichzeitig von der Messkamera gesehen wird. Versuche haben gezeigt, dass das für diese Raumregion detektierte Streulicht nicht auf den Messschirm gestreut wird und somit in der Kamera entstehen muss.

Wie einflussreich allgemein Streulicht in kamerabasierten LVK-Messsystemen ohne Raumstreulichtkorrektur ist, hängt stark von der Auslegung des Raumes ab. In einem Messraum mit optimalem Raumblendendesign wird Streulicht als vernachlässigbar angesehen, wenn es über zwei Reflektionen an matt-schwarzen Oberflächen von der Lichtquelle auf den Messschirm gelangt. Für eine bestmögliche Auslegung muss dafür Absatz 5.3 beachtet werden. Dennoch ergeben sich nicht unterdrückbare Störstellen, wie die Rückwand, das Goniometer oder der Messschirm selbst. Der untersuchte Messraum des Messsystems B ist in dieser Hinsicht ein gut ausgelegter Messraum. Um den Streulichteinfluss abzuschätzen, der bei der Messung ohne RSLK entsteht, wird die Vermessung der Helldunkelgrenze eines KFZ-Frontscheinwerfers betrachtet. Nach ECE-Regelung ECE-R112 darf an dem Punkt des Fahrerauges des entgegenkommenden Fahrzeugs B50-L eine maximal zulässige Lichtstärke von 350 cd gemessen werden [68]. Hat der Scheinwerfer beispielsweise 1000 lm und fallen davon 2/3, d.h. 667 lm auf den  $40^\circ \times 14^\circ$  großen Messschirm, kann über die mittleren Streulichtkoeffizienten aus Tabelle 7.5 abgeschätzt werden, dass zwischen 26,7 cd und 40 cd Streulicht entstehen wird. Dies entspricht einem Streulichtanteil des Punktes B50-L von ca. 10%. Wie

stark diese Abschätzung der Realität entspricht und inwiefern die bisherige Faustwertkorrektur nach dem Stand der Technik diesen Wert korrigiert, muss in einer Messung überprüft werden, allerdings verdeutlicht diese Abschätzung den Einfluss von Streulicht in kamerasierten LVK-Messsystemen und die Notwendigkeit einer Korrektur.

Bei der praktischen Anwendung des RSLK-Verfahrens müssen aufgrund physikalischer und technischer Gegebenheiten Kompromisse eingegangen werden, die die Effektivität der RSLK beeinträchtigen. Einige der physikalischen Gegebenheiten wurden bereits in Absatz 7.3.3 analysiert. Sie betreffen unter anderem die Erhaltungsgröße Étendue, die Lichtfingergeometrie, die Testlichtquellenausdehnung sowie die geometrischen und photometrischen Unsicherheiten des Messsystems. Technische Gegebenheiten betreffen hingegen den Kosten-Nutzen Aufwand. Somit ist die Auflösung der Stützstellen, für die SVFs aufgenommen werden ein entscheidender Faktor. Die für den Vollraum verwendeten 2986 Aufnahmen mit einem Winkelabstand am Äquator von  $3,7^\circ$ , wurden in 32 Stunden erstellt. Die 304 Messschirmaufnahmen im  $1^\circ$  Raster konnten in 2,5 Stunden aufgenommen werden. Ursache dieses großen Zeitbedarfs ist das Erstellen von hochdynamischen Aufnahmen damit u.a. auch Streulichtsignale knapp oberhalb des Rauschlevels detektiert werden können. Soll darüber hinaus im Vorfeld der SVF-Aufnahmen für die Berechnung der SVF-Matrix eine Raumanalyse stattfinden, verdoppelt sich der Zeitaufwand. Inwiefern die Anzahl an Aufnahmen reduziert werden kann, sei es durch Nichtbetrachten irrelevanter Raumregionen oder

einer Verringerung der Auflösung, bleibt zu überprüfen. Eine Reduzierung der Auflösung verringert auch gleichzeitig den Rechenzeitbedarf. Soll darüber hinaus die Korrektur in Echtzeit während der Messung stattfinden kann auch nur die als sehr kritisch angesehene Messschirmregion, zur Streulichtkorrektur herangezogen werden. Da in diesem Fall nur der Messschirm mit sich selbst korrigiert wird, könnte die Korrektur entsprechend der KSLK nach Gleichung (5.2) stattfinden.

### 8.2.1 VERBESSERUNG DES MESSRAUMS

Wie bereits erwähnt ist das Messsystem B ein gegen Raumstreulicht gut ausgelegtes Messsystem. Allerdings ergaben sich zwei wesentliche Erkenntnisse für eine effiziente Messraumgestaltung aus den durchgeführten Messungen. Erstens betrifft dies die strahlbegrenzende Blende, die aufgrund der Lichtquellenausdehnung in Verbindung mit der Regionensegmentierung die Unsicherheit der Korrektur beeinflusst, sobald Licht auf eine Regionengrenze trifft (vgl. Absatz 7.3.3). Eine Möglichkeit dieser Problematik entgegenzuwirken ist die strahlbegrenzende Blende in die Messschirmebene zu legen, sodass der weiße Messschirm nicht durch die Raumblenden beschnitten wird, sondern eine schwarze Umrahmung des Messschirms die Messschirmregion begrenzt.

Zweitens betrifft es die im Goniometer verbaute Leuchtdichtemesskamera. Zum einen beeinflusst dies die thermische Stabilität der

Kamera, da bei konstanter Motorenbewegung der V-Achsen erst nach mehreren Stunden ein thermisches Gleichgewicht im Goniometergehäuse erreicht wird. Zum anderen sieht die Kamera aus dieser Aufnahmeposition außer dem Messschirm einen Großteil der ersten Querblende im Raum. Licht das auf diese Blende trifft und von der Kamera gesehen wird ist kein relevantes Signal, erzeugt aber Kamerastreulicht. Eine Abschirmung der Kamera durch weitere Blenden oder sogar die Positionierung der Kamera hinter der ersten Raumblende kann diese Problematik verbessern.

### 8.3 PHOTOMETRISCHE GRENZENTFERNUNG

Die in Kapitel 6 vorgestellte numerische Methode zur Berechnung der photometrischen Grenzfernernung basiert auf Strahlendaten. Strahlendaten beschreiben das orts- und winkelauflöste Abstrahlverhalten einer Lichtquelle präziser als bisher verwendete analytische Punktlichtquellenmodelle. Mit Hilfe von Strahlendaten soll daher die Übertragbarkeit der bisherigen Berechnungen auf reale Lichtquellen überprüft werden. Wie die Ergebnisse aus Absatz 7.4.1 zeigen, ist dies für Lichtquellen mit nahezu lambertschem Abstrahlverhalten möglich. Für Lichtquellen mit engbündelndem Abstrahlverhalten, zeigt sich hingegen ein signifikanter Unterschied des numerischen und analytischen Berechnungsansatzes. So ergibt sich eine Differenz der photometrischen Grenzfernernung in Hauptabstrahlrichtung vom 2,9-fachen. Nicht vollständig geklärt ist dabei, ob diese Abweichungen tatsächlich auf das Punktlichtquellenmodell

zurückzuführen sind. Bei der numerischen Berechnung ist z.B. der Öffnungswinkel des kanonischen Raumwinkels ein entscheidender Parameter. Um stochastisch bedingte Fehler zu vermeiden, muss der Öffnungswinkel groß genug gewählt werden, damit genügend Strahlen pro Raumwinkel gezählt werden. Der hierbei für die Berechnung der photometrischen Grenzfernweite verwendete Öffnungswinkel mit  $1^\circ$  Durchmesser ist vergleichsweise groß. Die in Kapitel 3 vorgestellten Messsysteme haben hingegen Photometer mit Auflösungen von  $0,056^\circ$  oder kleiner. Ob sich, wie vermutet, der größere Öffnungswinkel eher gutmütig auf die Berechnung der photometrischen Grenzfernweite auswirkt, muss noch untersucht werden. Es wird allerdings angenommen, dass der Gesamtlichtstrom pro Raumwinkel bei steigendem Öffnungswinkel schneller steigt, als die entsprechenden Lichtstromänderungen für verschiedene Messabstände.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Ergebnisse betrifft die Lichtschwerpunktbestimmung der Lichtquellen. Nach den durchgeführten analytischen und numerischen Berechnungen ergibt sich eine signifikante Vergrößerung der photometrischen Grenzfernweite aufgrund eines fehlerhaft bestimmten Lichtschwerpunkts. Gerade für Lichtquellen mit mehreren Lichtschwerpunkten ist eine solche Bestimmung oft nicht einfach. Nach den Normen DIN EN 13032-1 und DIN EN 13032-4 ist der Lichtschwerpunkt als „[...] im Zentrum des festen Körpers, dessen Umrisse durch die leuchtenden Flächen begrenzt ist [...]“ [12, S. 33] definiert. Bei mehreren getrennten lichtemittierenden Bereichen, wird sogar gefordert, dass in mehreren Durchgängen gemessen werden soll. Dennoch können sich die in den

Normen festgelegten Bereiche von den tatsächlichen Lichtschwerpunkten unterscheiden. Aus heutiger Sicht sind Strahlendaten die beste Methode zur Lichtschwerpunktbestimmung. Der Lichtschwerpunkt einer Lichtquelle mit unbekanntem Abstrahlverhalten kann somit immer nur geschätzt werden, was in der Berechnung des zu wählenden Mindestmessabstands berücksichtigt werden sollte.



---

## Kapitel 9

# ZUSAMMENFASSUNG

Die Unsicherheit einer LVK-Messung hängt von vielerlei Faktoren ab. In dieser Dissertation wurden daher drei wichtige Faktoren ausgewählt und analysiert. Diese sind die geometrischen Parameter Raumrichtung und Messabstand, das Raumstreulicht bei kamerabasierten Messverfahren und die photometrische Grenzentfernung.

Für die Unsicherheitsbestimmung der geometrischen Parameter wurde dafür ein LVK-Messsystem mittels einer kinematischen Kette modelliert. Zuerst erfolgte dafür die Aufstellung einer Transformationsvorschrift mit deren Hilfe das Quellenkoordinatensystem in das Detektorkoordinatensystem überführt werden konnte. Berücksichtigt wurden dazu Systemparameter, deren Unsicherheit für das System als relevant angesehen wurden. Aus der Transformationsvorschrift wurde dann ein Modell generiert, das die Messsystemjustage und darauf aufbauend die Messung simuliert. Mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation konnten so für jede Messrichtung mögliche Detektorpositionen berechnet werden. Anschließend erfolgte eine Umrechnung in die Unsicherheit der Messrichtung und des Messabstands.

Zur Anwendung der Methode mussten Messverfahren entwickelt werden, mit deren Hilfe die Schätzwerte und Unsicherheiten der

---

geometrischen Systemparameter des LVK-Messsystems bestimmt werden können. Zum einen waren dies Messmethoden, die wirtschaftlich anwendbar sein sollten. Zum anderen wurde die Anwendung einer photogrammetrischen Methoden untersucht. Schlussendlich erfolgte ein Vergleich dieser Messmethoden und eine geometrische Messsystemanalyse, auf Basis der ermittelten Systemparameter. Die Ergebnisse der Messsystemanalyse wurden anschließend ausgewertet und diskutiert.

Für die Korrektur des Raumstreuolichts in kamerabasierten LVK-Messsystemen wurde ein Verfahren auf Basis der Kamerastreulichtkorrektur entwickelt. Ausgehend von einer theoretischen Betrachtungsweise erfolgte die Überführung in die Praxis. Hierfür wurde ein Lichtfinger designt, mit dessen Hilfe der Raum hinsichtlich seines Streulichtverhaltens charakterisiert werden konnte. Das Ziel war die Aufnahme der Streulichtverteilungsfunktionen, die die Streulichtantwort des Raumes auf den Messschirm wiedergeben. In diesem Zusammenhang konnte auch die Auslegung wichtiger Parameter des Lichtfingers diskutiert werden. Anschließend erfolgte die Berechnung der SVF-Matrix aus den Streulichtverteilungsfunktionen, mit deren Hilfe eine Raumstreuolichtkorrektur durchgeführt wurde. Abschließend konnte das Verfahren mithilfe einer konstruierten Testlichtquelle bewertet werden. In diesem Zusammenhang wurden einige Faktoren diskutiert, die einen Einfluss auf die Sensitivität des Raumstreuolichtkorrekturverfahrens haben.

Für die Berechnung der photometrische Grenzentfernung wurde in dieser Dissertation ein Verfahren auf Basis von Strahlendaten

gewählt, das es ermöglicht reale Lichtquellen zu bewerten. Dafür wurde die photometrische Grenzentfernung von zwei verschiedenen Lichtquellentypen numerisch über Rayfiles und aus einem analytischen Punktlichtquellenmodell berechnet und verglichen. Erweitert wurde die Analyse, indem zusätzlich der Einfluss der Lichtschwerpunktjustage im Goniometerdrehzentrum auf die photometrische Grenzentfernung bewertet wurde. Abschließend erfolgte eine Diskussion über den Vergleich zwischen den analytischen Berechnungen aus Punktlichtquellen und den numerischen Berechnungen aus Rayfiles.

---

### III ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Abbildung 1.1: | Lichtstärkeverteilung einer Abblendlichtverteilung. ....  | 2  |
| Abbildung 1.2: | LVK-Messraum des <i>Lichttechnischen Instituts am Karlsruher Institut für Technologie</i> . ....  | 3  |
| Abbildung 2.1: | Standardkoordinatensysteme aus der Literatur. Blau zeigt die kartesischen Koordinaten, rot zeigt die sphärischen Koordinaten als C-Ebenensystem. ....   | 8  |
| Abbildung 2.2: | Definition der verwendeten Koordinatensysteme. Das dargestellte sphärische Koordinatensystem entspricht einem A- Ebenensystem. Blau zeigt die kartesischen Koordinaten, rot zeigt die sphärischen Koordinaten. .... | 9  |
| Abbildung 2.3: | Typ-A Goniophotometer GO-H 1660 mit zwei Rotationsachsen und drei Translationsachsen. ....  | 12 |
| Abbildung 2.4: | Abbildung eines Photometerkopfs. ....   | 13 |
| Abbildung 2.5: | Abbildung einer Leuchtdichthemesskamera (Bild entnommen aus [26]). ....   | 13 |
| Abbildung 2.6: | Messschirm über den die LVK einer Lichtquelle bei einer kamerabasierten LVK-Messung aufgenommen wird. ....  | 14 |

---

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2.7:  | Schematische Darstellung eines kombinierten Messsystems bestehend aus photometerkopfbasierter Einkanalmessung und kamerabasierter Mehrkanalmessung..... | 15 |
| Abbildung 2.8:  | Zusammensetzen einer LVK aus den Einzelbildaufnahmen mittels Stitching.....   | 18 |
| Abbildung 2.9:  | Konfidenzregion einer zweidimensionalen Messgröße mit den Standardabweichungen der Vorzugsrichtungen.....   | 23 |
| Abbildung 2.10: | Beispiel einer kinematischen Kette.....   | 26 |
| Abbildung 2.11: | Darstellung des Lochkameramodells als Basis photogrammetrischer Methoden (Kamerabild entnommen aus [26]).....   | 27 |
| Abbildung 3.1:  | Messsystemkomponenten des photometerbasierten LVK-Messsystems. ....   | 30 |
| Abbildung 3.2:  | Messsystemkomponenten des kamerabasierten LVK-Messsystems. ....   | 30 |
| Abbildung 3.3:  | LVK einer Abblendlichtverteilung, aufgenommen mit dem Photometer des Messsystems A. ....  | 32 |
| Abbildung 3.4:  | LVK einer Abblendlichtverteilung, aufgenommen mit der Kamera des Messsystems A. ....  | 32 |
| Abbildung 3.5:  | Vergleich des LVK-Schnitts 1 aus den beiden vorherigen Abbildungen. ....  | 33 |
| Abbildung 3.6:  | Vergleich des LVK-Schnitts 2 aus den beiden vorherigen Abbildungen. ....  | 33 |
| Abbildung 3.7:  | Typ-A Goniometer der Firma <i>TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH</i> .....  | 35 |

---

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 3.8:  | Teil der Messwand in 10 m Entfernung mit einem Loch entlang der optischen Achse des Goniometers für den Photometerkanal. Der Autor ist zum Größenvergleich mit im Bild. ....   | 35 |
| Abbildung 3.9:  | Konstruierte Lichtquelle bestehend aus dem Bühnenscheinwerfer X4-Atom, dessen optisches Linsensystem auf einen Öffnungswinkel von $34^\circ$ eingestellt ist. Ein Teil der Lichtverteilung wird durch eine Blende abgeschattet um den Raumstreulichteinfluss untersuchen zu können. .... | 35 |
| Abbildung 3.10: | LVK des X4-Atom mit Querblende, aufgenommen mit dem Photometer des Messsystems B. ....   | 36 |
| Abbildung 3.11: | LVK des X4-Atom mit Querblende, aufgenommen mit der Kamera des Messsystems B. ....   | 36 |
| Abbildung 3.12: | Vergleich des LVK-Schnitts 1 aus den beiden vorherigen Abbildungen mit berechneter Messdifferenz. ....   | 37 |
| Abbildung 3.13: | Vergleich des LVK-Schnitts 2 aus den beiden vorherigen Abbildungen mit berechneter Messdifferenz. ....   | 37 |
| Abbildung 4.1:  | Ablaufplan der geometrischen Unsicherheitsanalyse mittels Monte-Carlo-Methode.....   | 42 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 4.2:  | Darstellung der Justagemethode: Goniometerachsen und Lasermethode.....  | 44 |
| Abbildung 4.3:  | Darstellung der Justagemethode: Winkelnormalmethode.....  | 45 |
| Abbildung 4.4:  | Schematische Darstellung des Modells der Auswertung.....  | 47 |
| Abbildung 4.5:  | Schematische Darstellung des kinematischen Modells des kamerabasierten LVK-Messsystems. ....  | 52 |
| Abbildung 4.6:  | Kinematisches Justagemodell. ....   | 57 |
| Abbildung 4.7:  | Kinematisches Messmodell. ....  | 57 |
| Abbildung 4.8:  | Monte-Carlo-Simulationsablaufplan. ....   | 58 |
| Abbildung 4.9:  | Geometrische Unsicherheitsbewertung.....  | 60 |
| Abbildung 4.10: | Geometrische Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung, dargestellt für neun ausgewählte Richtungen eines Kamerabildeinzugs. Blaue Sterne entsprechen den simulierten IST-Messrichtungen. Die schwarze Ellipse entspricht der Konfidenzregion mit einer 95%-igen Überdeckungswahrscheinlichkeit. Die roten und blauen Linien sind die Standardabweichungen entlang der langen- bzw. kurzen Ellipsenachse der Konfidenzregion. Die hier dargestellten Richtungen entsprechen den mit einem Kreuz markierten Richtungen aus Abbildung 4.11..... | 62 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 4.11: | Standardabweichung entlang der langen Ellipsenachse bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.....                     | 63 |
| Abbildung 4.12: | Standardabweichung entlang der kurzen Ellipsenachse bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.....                     | 63 |
| Abbildung 4.13: | Ellipsenrotation bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.....  | 63 |
| Abbildung 4.14: | Standardabweichung entlang Messrichtung bei ausschließlicher Unsicherheitsbetrachtung der Goniometerachsenpositionierung für einen Kamerabildeinzug.....                                 | 63 |
| Abbildung 4.15: | Selbstleuchtende Kugel mit xyz-Lineartisch zur Analyse der Goniometerunsicherheit.....   | 66 |
| Abbildung 4.16: | Aufbau zur Analyse der Goniometerunsicherheit. Die Darstellung zeigt das GOH-1660 schematisch mit der an der Decke installierten Kamera zur Beobachtung der selbstleuchtenden Kugel..... | 67 |
| Abbildung 4.17: | Positionsbestimmung der selbstleuchtenden Kugel über eine Bildschnittanalyse.....  | 68 |

---

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 4.18: | Schematische Darstellung zur Bestimmung des Achsabstands.....  | 69 |
| Abbildung 4.19: | Schematische Darstellung zur Bestimmung des Achsabstands.....  | 70 |
| Abbildung 4.20: | Im Goniometerdrehzentrum justierter Laser. ....  | 72 |
| Abbildung 4.21: | Bildauszug des Laserspots auf dem Messschirm.....  | 72 |
| Abbildung 4.22: | Bildauszug des Laserspots auf dem Messschirm inklusive der Schwellwertregion.....  | 72 |
| Abbildung 4.23: | Angefahrene Laserpositionen. ....  | 72 |
| Abbildung 4.24: | 2x1 Meter große Schachbrett muster des verwendeten Kamerakalibreralgorithmus.....  | 74 |
| Abbildung 4.25: | Kalibrierpyramide des verwendeten Kamerakalibreralgorithmus.....   | 74 |
| Abbildung 4.26: | Messaufbau für die Systemparameterbestimmung mittels Kamerakalibreralgorithmus.....  | 76 |
| Abbildung 4.27: | Auszüge aus der Aufnahmeserie für die Bestimmung der Lage der H-Achse.....   | 77 |
| Abbildung 5.1:  | Leuchtdichteaufnahme eines engbündelnden Spots mit der Leuchtdichtemesskamera eines LVK-Messsystems ohne Streulichtkorrektur. .... | 82 |
| Abbildung 5.2:  | Leuchtdichteaufnahme eines engbündelnden Spots mit der Leuchtdichtemesskamera eines LVK-   |    |

|                 |  |
|-----------------|--|
|                 | Messsystems mit  |
|                 | Kamerastreulichtkorrektur ..... 82   |
| Abbildung 5.3:  | Raumstreulichteinflüsse im kamerabasierten LVK-Messsystem bei optimalem Raumbblendendesign. ..... 85   |
| Abbildung 5.4:  | Streulichtanteil der Raumrichtung $(\varphi', \vartheta')$ auf den Detektor ..... 88   |
| Abbildung 5.5:  | Streulichtanteil der Raumrichtung $(\varphi', \vartheta')$ auf den Detektor unter einer Goniometerrotation ..... 88  |
| Abbildung 5.6:  | Streulichtberechnung bei einem Mehrkanaldetektor ..... 89  |
| Abbildung 5.7:  | Umformung einer dreidimensionalen LVK in Vektorschreibweise für die Matrixmultiplikation. ..... 91   |
| Abbildung 5.8:  | Darstellung der Raumantwort in Matrixschreibweise. Zeilen der Raumantwortmatrix entsprechen der Raumantwort auf einen Detektorpixel. Spalten entsprechen der Raumantwort einer Raumrichtung auf den Detektor. ..... 91 |
| Abbildung 5.9:  | Abtastung angrenzender Regionen mit deutlich unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten durch verschiedene Lichtfinger. Dieses Vorgehen ermöglicht die Abbildung hoher Ortsfrequenzen der SVF ..... 97                  |
| Abbildung 5.10: | Berechnung des Halbschattens durch die Abmessungen des Tubus des Lichtfingers. ..... 98  |

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 5.11: | Der für die Aufnahme der SVFs verwendete<br>Lichtfinger inklusive der Tubussysteme der<br>Raum- und Messschirmregion.....   | 101 |
| Abbildung 5.12: | LVK-Schnitte der Lichtfinger.....   | 102 |
| Abbildung 5.13: | Ablaufplan zur Raumstreuulichtanalyse und<br>zur Berechnung der<br>Raumstreuulichtkorrekturmatrixt (SVF-<br>Matrix).....  | 103 |
| Abbildung 5.14: | Regionenmaske der Messschirmregion<br>(weiß ist logisch „1“).....   | 105 |
| Abbildung 5.15: | Regionenmaske der Raumregion (weiß ist<br>logisch „1“).....   | 105 |
| Abbildung 5.16: | Rasterpositionen der Messschirmregion .....   | 106 |
| Abbildung 5.17: | Rasterpositionen der Raumregion.....  | 106 |
| Abbildung 5.18: | Ablaufplan zur Berechnung der SVF aus<br>den aufgenommenen Leuchtdichtebildern. ....  | 107 |
| Abbildung 5.19: | Berechnung der SVF $F(\varphi'_s, \vartheta'_s)$ aus einem<br>aufgenommenen Leuchtdichtebild $L(x_s, y_s)$<br>über die Lichtstärke $I(\varphi'_s, \vartheta'_s)$ für zwei<br>ausgewählte Messrichtungen. Die<br>Darstellung ist jeweils eine fünffach<br>logarithmische Falschfarbenskala. .... | 109 |
| Abbildung 5.20: | Prozess der RSLK.....   | 111 |
| Abbildung 6.1:  | Berechnung einer Pseudo-LVK aus<br>Strahlendaten durch Projektion der<br>Strahlen auf eine Kugel im Abstand $r$ und<br>Aufsummieren der Strahlen in einem<br>Raumwinkelement. ....  | 117 |

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 7.1: | Ergebnisse der Wiederholbarkeitsanalyse des Goniometers.....   | 124 |
| Abbildung 7.2: | Justage der Kugel in die H-Achse. Links oben ist die Aufnahme der Koordinate $H = 0^\circ$ in Falschfarben dargestellt. Die Diagramme zeigen jeweils den horizontale Grauwertbildschnitt durch die Kugel für alle Aufnahmen, sowie ein Ausschnitt der linken Kugelkante zur Ermittlung der Justagegenauigkeit..... | 125 |
| Abbildung 7.3: | Bestimmung des Achsabstands durch Aufnahmen der Kugel für $V = 90^\circ, V = 0^\circ$ und $V = -90^\circ$ . Das untere Diagramm zeigt den vertikalen Grauwertbildschnitt durch die Kugel.....  | 126 |
| Abbildung 7.4: | Für die Bestimmung der Achsschieflage ermittelte Regressionsgeraden und Messwerte der Aufnahmeserie Nr. 2 aus Tabelle 7.3.....   | 128 |
| Abbildung 7.5: | Ergebnisse der Achsschieflage. ....  | 129 |
| Abbildung 7.6: | Kreis- und Ellipsenfit durch die Kamerapositionen zur Bestimmung der H-Achse.....  | 131 |
| Abbildung 7.7: | Kreis- und Ellipsenfit durch die Kamerapositionen zur Bestimmung der V-Achse.....  | 131 |
| Abbildung 7.8: | Konfidenzregionen der Achsenfits der Goniometer x-, y- und z-Achse. ....   | 132 |

---

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 7.9:  | Konfidenzregionen der Messunsicherheitsbetrachtung der Messrichtung. Berücksichtigt wird die Positionierungsgenauigkeit des Goniometers. Die neun Raumrichtungen sind für die Raumrichtungen $\varphi$ und $\vartheta$ von $-80^\circ$ bis $80^\circ$ in $80^\circ$ -Schritten angeordnet. .... | 136 |
| Abbildung 7.10: | Positionierungsgenauigkeit des Goniometers: Standardunsicherheit entlang der langen Ellipsenachse. ....   | 137 |
| Abbildung 7.11: | Positionierungsgenauigkeit des Goniometers: Standardunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse. ....   | 137 |
| Abbildung 7.12: | Konfidenzregionen der Messunsicherheitsbetrachtung der Messrichtung. Berücksichtigt wird das Messsystem ohne eine Quellenjustage. ....  | 138 |
| Abbildung 7.13: | Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheit entlang der langen Ellipsenachse. ....  | 140 |
| Abbildung 7.14: | Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Standardunsicherheit entlang der kurzen Ellipsenachse. ....  | 140 |
| Abbildung 7.15: | Gesamtsystem ohne Quellenpositionierung: Orientierung der Konfidenzregion. ....   | 140 |

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| Abbildung 7.16: | Gesamtsystem<br>Quellenpositionierung:<br>Standardunsicherheit des Messabstands .....  | 140 |
| Abbildung 7.17: | Messsystem ohne Quellenpositionierung;<br>Standardunsicherheiten der langen<br>Ellipsenachse.....  | 142 |
| Abbildung 7.18: | Messsystem ohne Quellenpositionierung;<br>Standardunsicherheiten des Messabstands....  | 142 |
| Abbildung 7.19: | Achsschieflage: Standardunsicherheit der<br>langen Ellipsenachse.....  | 143 |
| Abbildung 7.20: | Konfidenzregionen<br>Messunsicherheitsbetrachtung<br>der<br>Messrichtung. Berücksichtigt wird das<br>vollständige Messsystem inklusive der<br>Quellenjustagen..... | 144 |
| Abbildung 7.21: | Gesamtsystem: Standardunsicherheit<br>entlang der langen Ellipsenachse.....  | 145 |
| Abbildung 7.22: | Gesamtsystem: Standardunsicherheit<br>entlang der kurzen Ellipsenachse. ....   | 145 |
| Abbildung 7.23: | Gesamtsystem: Orientierung der<br>Konfidenzregion.....   | 145 |
| Abbildung 7.24: | Gesamtsystem: Standardunsicherheit des<br>Messabstands.....  | 145 |
| Abbildung 7.25: | Absolute Beiträge der Eingangsgrößen<br>aufgetragen als Boxplot über alle<br>simulierten Raumrichtungen.....   | 147 |
| Abbildung 7.26: | Unsicherheit der Testquellenorientierung<br>um die y-Achse.....  | 147 |

- Abbildung 7.27: Absolute Beiträge der Eingangsgrößen aufgetragen als Boxplot über alle simulierten Raumrichtungen. ....148
- Abbildung 7.28: Unsicherheit der Testquellenpositionierung in z-Richtung. ....148
- Abbildung 7.29: Integrale Streulichtverteilungsfunktion des untersuchten Messraums. ....150
- Abbildung 7.30: SVFs  $F(\varphi_s, \vartheta_s)$  und zugehörige Leuchtdichteaufnahmen  $L(x_s, y_s)$  in fünffach logarithmischer Falschfarbenskala für die Streulichtfaktoren Staub, Not-Aus und Goniometer. ....152
- Abbildung 7.31: 20 zufällig aus streulichtrelevanten Regionen ausgewählte SVFs zur Demonstration der Inhomogenität der SVFs. Die angegebenen Winkel entsprechen der Aufnahmerichtung und sind im A-Koordinatensystem angegeben. ....154
- Abbildung 7.32: Acht benachbarter SVFs aus der Messschirmregion. ....155
- Abbildung 7.33: Acht benachbarter SVFs der Rückwand. ....155
- Abbildung 7.34: Mit dem kamerabasierten LVK-Messsystem gemessene LVK ohne Streulichtkorrekturen. ....157
- Abbildung 7.35: Mit dem Photometer gemessene LVK. ....157
- Abbildung 7.36: LVK-Schnitt 1 aus Abbildung 7.34 für die Photometermessung und die Kameramessungen ohne Streulichtkorrektur, mit

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
|                 | Faustwertkorrektur und mit RSLK. Die untere Abbildung zeigt die Abweichungen zwischen den Kameramessungen zur Photometermessung. .... | 159 |
| Abbildung 7.37: | LVK-Schnitt 2. Verglichen werden die Photometermessung mit den verschiedenen Streulichtkorrekturverfahren. ....                       | 160 |
| Abbildung 7.38: | LVK-Schnitt 3. Verglichen werden die Photometermessung mit den verschiedenen Streulichtkorrekturverfahren. ....                       | 160 |
| Abbildung 7.39: | LVK-Schnitt 2. Verglichen werden die Photometermessung mit RSLK-Verfahren verschiedener Regionengrößen. ....                          | 165 |
| Abbildung 7.40: | LVK-Schnitt 3. Verglichen werden die Photometermessung mit RSLK-Verfahren verschiedener Regionengrößen. ....                          | 165 |
| Abbildung 7.41: | LVK-Segment zur Vermessung von Schnitt 2.....   | 167 |
| Abbildung 7.42: | LVK-Segment zur Vermessung von Schnitt 3.....   | 167 |
| Abbildung 7.43: | Korrekturen der LVK-Segmente mit der LVK-Schnitt 2 vermessen wurde.....   | 167 |
| Abbildung 7.44: | Korrekturen der LVK-Segmente mit der LVK-Schnitt 3 vermessen wurde.....   | 167 |
| Abbildung 7.45: | Einfluss des Parameters Messschirmgröße auf die RSLK. ....  | 168 |
| Abbildung 7.46: | Aus dem Rayfile berechnete Beleuchtungsstärkeverteilung in der Ebene  |     |

|                      |                              |                        |            |               |
|----------------------|------------------------------|------------------------|------------|---------------|
| des                  | Lichtschwerpunkts            | für                    | den        |               |
| Lambertstrahler..... |                              |                        |            | 171           |
| Abbildung 7.47:      | Photometrisches              | Grenzverhältnis        | des        |               |
|                      | kreisrunden                  | Lambertstrahlers.      | .....      | 172           |
| Abbildung 7.48:      | Aus                          | dem                    | Rayfile    | berechnete    |
|                      | Beleuchtungsstärkeverteilung | in                     | der        | Ebene         |
|                      | des                          | Lichtschwerpunkts      | für        | die           |
|                      | engbündelnde                 | Taschenleuchte.        | .....      | 174           |
| Abbildung 7.49:      | Unterschied                  | zwischen               | realem     |               |
|                      | Lichtschwerpunkt             | und                    | der        |               |
|                      | Messgerätjustageposition.    | .....                  |            | 174           |
| Abbildung 7.50:      | Photometrisches              | Grenzverhältnis        | der        |               |
|                      | engbündelnden                | Taschenleuchte,        | berechnet  |               |
|                      | aus                          | den                    | gemessenen | Rayfiles..... |
|                      |                              |                        |            | 175           |
| Abbildung 7.51:      | Photometrisches              | Grenzverhältnis        | der        |               |
|                      | ECOM-Taschenleuchte,         | berechnet              | aus        |               |
|                      | analytischen                 | Punktlichtquellen..... |            | 177           |

---

## IV TABELLENVERZEICHNIS

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Tabelle 2.1: | In der Norm <i>DIN EN 13032-4</i> gegebene Mindestmessabstände je nach Charakteristik der Lichtquelle.....  | 7   |
| Tabelle 2.2: | Erweiterungsfaktoren für mehrdimensionale ellipsoide Überdeckungsregionen für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von $p = 0,95$ und $p = 0,99$ .....   | 24  |
| Tabelle 3.1: | Methodenvergleich der LVK-Messsysteme mit Leuchtdichtemesskamera und Photometer.....  | 31  |
| Tabelle 4.1: | Komponenten des kinematischen Modells des kamerabasierten LVK-Messsystems im LTI.....   | 51  |
| Tabelle 4.2: | Transformationen und Eingangsgrößen mit Schätzwerten und Unsicherheiten für die geometrische Unsicherheitsanalyse unterteilt in Eingangsgrößen für die Simulation einer Messung (1-13) und der Justage (14-23). Zu beachten ist, dass die Eingangsparameter 8,9 und 11-13 bei Messung und Justage dieselben sind..... | 54  |
| Tabelle 5.1: | Parametervergleich der Lichtfinger.....   | 102 |
| Tabelle 7.1: | Gegenüberstellung der ermittelten Schätzwerte und Unsicherheiten der  |     |

---

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
|              | verwendeten Methoden zur geometrischen<br>Systemparameterbestimmung. ....   | 122 |
| Tabelle 7.2: | Ermittelte Standardabweichungen der<br>Wiederholbarkeit des Goniometers für<br>ausgewählte (H,V)-Koordinaten. ....      | 123 |
| Tabelle 7.3: | Ermittelte Achsschieflagen über die Kugel-<br>Kamera Methode für verschiedene<br>Durchläufe. ....                       | 128 |
| Tabelle 7.4: | Unsicherheitsbudget. ....   | 135 |
| Tabelle 7.5: | Streulichteinfluss der Raumregionen. ....   | 151 |
| Tabelle 7.6: | Vergleich der LVK-Werte innerhalb des<br>Blendenbereichs der Lichtquelle für<br>verschieden Streulichtkorrekturen. .... | 157 |
| Tabelle 7.7: | Vergleich der Testlichtquellen für die<br>Berechnung der photometrischen<br>Grenzentfernung. ....                       | 170 |

## V VERÖFFENTLICHUNGEN

### Zeitschriftenartikel

- C. Kaiser, **M. Katona**, C.M. Ögün, R. Kling, "High-intensity discharge lamps with high color rendering indices based on molecular radiation of indium iodide", *IEEE Transactions on Plasma Science* 42.1 (2013): 20-28.
- I. Rotscholl, **M. Katona**, K. Trampert, U. Krüger, F. Schmidt, C. Neumann, "Hyperspectral LED models for optical simulations." *Optics express* 24.26 (2016): A1597-A1611.
- **M. Katona**, K. Trampert, S. Schwanengel, U. Krüger, C. Neumann, "Geometric system analysis of ILMD-based LID measurement systems using Monte Carlo simulation.", *Journal of Physics: Conference Series, NEWRAD*, 2022.

### Konferenzbeiträge

- **M. Katona**, I. Rotscholl, K. Trampert, C. Neumann, "Übersicht über die Berechnung von Lichtstärkeverteilungen aus Rayfiles mit ihren Vor- und Nachteilen unter Verwendung verschiedener Raumwinkeltypen." *Proceedings oft the Lux junior*. 2017.
- **M. Katona**, J. Feßler, L. Sayanca, K. Trampert, C. Neumann, "Geometrische Kalibrierungsmethode einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochauflöste Lichtstärkeverteilungen im Fernfeld." *LICHT* 2018, Davos. 2018.

- **M. Katona**, K. Trampert, C. Neumann, C. Schwanengel, "Systemanalyse eines bildgebenden LVK Messsystems mittels Monte Carlo Simulation." *Lux junior 2019*: 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 06.–08. September 2019, Dörnfeld/Ilm: Tagungsband. 2019.
- J. Feßler, **M. Katona**, K. Trampert, C. Neumann, "Rückwärtschnitt zur geometrischen Kalibrierung einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochauflösende Lichtstärkeverteilungen." *Lux junior 2019*: 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 06.–08. September 2019, Dörnfeld/Ilm: Tagungsband. Hrsg.: C. Vandahl. 2019.
- **M. Katona**, K. Trampert, C. Neumann, "Fehlerabschätzung der Fernfeldannahme bei LVK-Messungen mittels Nahfelddaten" *LICHT 2021*, Bamberg. 2021.
- **M. Katona**, J. Beck, K. Trampert, C. Neumann, "Geometrische Parameteranalyse eines LVK-Messsystems mittels Photogrammetrie." *Lux junior 2021*: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 04.–06. Juni 2021, Dörnfeld/Ilm: Tagungsband. 2021.

Einige Textpassagen und Bilder wurden direkt aus den Veröffentlichungen der Konferenzen, *LuxJunior 2019*, *LICHT 2021*, *LuxJunior 2021* und *NEWRAD 2021* entnommen.

---

## VI BETREUTE ARBEITEN

- A. Saha, „Method to determine a virtual emission geometry of light sources using ray-files.“, Masterarbeit, 2018.
  - J. Feßler, „Rückwärtsschnitt zur geometrischen Kalibrierung einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochauflösende Lichtstärkeverteilungen“, Masterarbeit, 2018.
  - M. A. G. Choirul, „Bundle Adjustment for Geometric Calibration of Camera-Based Goniophotometer Measurement“, Masterarbeit, 2019.
  - M. Wolff, „Streulichtkorrektur eines kamerabasierten LVK-Messverfahrens mittels Raumantwort“, Bachelorarbeit, 2019.
-

---

## VII ABKÜRZUNGEN

|        |   |
|--------|---|
| BIPM   | Bureau International des Poids et Mesures             |
| CIE    | Commission Internationale de l'Éclairage              |
| DIN    | Deutsches Institut für Normung e.V.                   |
| DH     | Denavit-Hartenberg                                    |
| GUM    | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement |
| ILMD   | Imaging Luminance Measurement Device                  |
| ISO    | Internationale Organisation für Normung               |
| KFZ    | Kraftfahrzeug   |
| KSLK   | Kamerastreulichtkorrektur                             |
| LED    | Light-Emitting Diode                                  |
| LF     | Lichtfinger   |
| LSB    | Bitwertigkeit   |
| LVK    | Lichtstärkeverteilungskurve                           |
| PGE    | Photometrische Grenzentfernung                        |
| PGV    | Photometrisches Grenzverhältnis                       |
| PSF    | Punktspreizfunktion                                   |
| RSLK   | Raumstreuulichtkorrektur                              |
| S.d.T. | Stand der Technik                                     |
| SVF    | Streuulichtverteilungsfunktion                        |
| URDF   | Unified Robot Description Format                      |
| WKS    | Weltkoordinatensystem                                 |

## VIII FORMELZEICHEN

Anmerkung:

- Fett geschriebene Formelzeichen entsprechen Matrizen.

Griechisches Alphabet

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| $\alpha$                       | Achsschleiflage zwischen H-Achse und V-Achse  |
| $\alpha$                       | Orientierung der Konfidenzellipse   |
| $\delta$                       | Erlaubte Toleranz bei der photometrischen Grenzentfernung   |
| $\varepsilon$                  | Einfallswinkel  |
| $\varepsilon_Q$                | Abstrahlwinkel der infinitesimalen Fläche $dA_Q$ einer Lichtquelle auf einen Detektor   |
| $\varepsilon_D$                | Einfallswinkel auf einen Detektor   |
| $\epsilon_{tol}$               | Abweichung zwischen gemessener und tatsächlicher LVK  |
| $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ | Rotationswinkel um die Koordinatensystemachsen $x, y, z$  |
| $\theta_{a,b,c}$               | Rotationswinkel<br>a: Koordinatensystemachsen $x, y, z$<br>b: Messsystemkomponente: $H, V, Q, N$<br>c: Statische oder dynamische Transformation „Pose“, „Rot“ |
| $\vartheta$                    | Höhenwinkel sphärischer Koordinaten   |

|   |  |
|---|--|
| $\vartheta'$                            | Höhenwinkel des WKS bei der RSLK   |
| $\vartheta'_s$                          | Höhenwinkel des Detektorpixels $s$ im WKS  |
| $\sigma_l, \sigma_s \sigma_r$           | Standardabweichungen entlang der langen- und kurzen Ellipsenachse sowie des Messabstands |
| $\varphi$                               | Azimut sphärischer Koordinaten   |
| $\varphi'$                              | Azimut des WKS bei der RSLK  |
| $\varphi'_s$                            | Azimut des Detektorpixels $s$ im WKS   |
| $(\varphi, \vartheta)_{SOLL}$           | Soll-Messrichtungen einer LVK  |
| $(\varphi, \vartheta)_{SOLL,0}$         | Soll- Detektorposition   |
| $\xi$                                   | Möglicher Wert von $X_i$   |
| $\Psi_A$                                | Transformationsvorschrift zur Umrechnung von kartesische in sphärische Koordinaten       |
| $\Psi_A^{-1}$                           | Transformationsvorschrift zur Umrechnung von sphärische in kartesische Koordinaten       |
| $\Phi$                                  | Lichtstrom   |
| $\Phi_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$ | Über die Goniometerkoordinaten $(H, V)$ rotierte Lichtstromverteilungskurve              |
| $\Phi_{LF}$                             | Lichtstrom des Lichtfingers  |
| $\Phi_{LF,i}$                           | Lichtstrom des Lichtfingers der in die Raumrichtung $i$ leuchtet                         |
| $\Phi_{mess,H,V,region}$                | Lichtstromvektor der über eine Raumregion Streulicht auf dem Detektor erzeugt            |
| $\Phi_{real}$                           | Lichtstromanteil einer Lichtquelle der auf direktem Weg auf den Detektor trifft          |
| $\Phi_{rsl}$                            | Lichtstromanteil der aufgrund von Raumstreu Licht auf den Detektor trifft                |
| $\Omega$                                | Raumwinkel   |

|             |  |
|-------------|--|
| $\Omega'$   | Raumwinkel der Raumrichtungen ( $\varphi', \vartheta'$ )               |
| $\Omega'_i$ | Raumwinkel der $i$ -ten Raumrichtung<br>( $\varphi'_i, \vartheta'_i$ ) |
| $\Omega'_i$ | Matrixschreibweise der Raumwinkel                                      |

## Lateinisches Alphabet

|  |  |
|--|--|
| <b>A</b>                                 | Systemantwort der KSLK   |
| $A_Q$                                    | Infinitesimale Fläche auf der Lichtquellen-oberfläche              |
| $c_i$                                    | Sensitivitätskoeffizienten   |
| $d$                                      | Abstand einer sphärischen Koordinate zum Koordinatensystemursprung |
| <b>D</b>                                 | Matrix mit Korrekturwerten der SVF bei der KSLK                    |
| $D$                                      | Lichtquellenausdehnung   |
| $d_{B1}$                                 | Eintrittsblendendurchmesser Tubus                                  |
| $d_{B2}$                                 | Austrittsblendendurchmesser Tubus                                  |
| $E$                                      | Beleuchtungsstärke   |
| <b>E</b>                                 | Einheitsmatrix   |
| $f(X_1, X_2, \dots X_N)$                 | Modell der Auswertung  |
| $f_{s,i}$                                | Einträge der SVF-Matrix $\mathbf{F}_{s,i}$                         |
| $\mathbf{F}_{s,i}$                       | SVF-Matrix für die Raumstreuulichtkorrektur                        |
| $\mathbf{F}_{s,i,region}$                | SVF-Matrizen einer Region ( <i>raum</i> oder <i>schirm</i> )       |
| $F_{integral}(\varphi'_i, \vartheta'_i)$ | Integrale SVF  |
| $g_{X_i}(\xi_i)$                         | WahrscheinlichkeitsdichteVerteilung von $X_i$                      |
| $G$                                      | Geometrischer Fluss  |

|  |   |
|--|---|
| $H$  | Goniometerkoordinate der horizontalen Rotationsachse  |
| $I$  | Lichtstärke   |
| $I(\varphi, \vartheta)$                      | LVK   |
| $I_{LF}$                                     | Lichtstärke des Lichtfingers  |
| $I_{mess}$                                   | Gemessene LVK einer Lichtquelle   |
| $I_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$         | Um die Goniometerposition rotierte gemessene LVK einer Lichtquelle im WKS                             |
| $I_{mess,H,V}$                               | Vektorschreibweise von $I_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$   |
| $I_{mess,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$ | Unter der Goniometerposition $(H, V)$ , auf dem Detektor gemessenes LVK-Segment                       |
| $I_{mess,seg,H,V}$                           | Vektorschreibweise von $I_{mess,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$                                   |
| $I_{pseudo}(r, \varphi, \vartheta)$          | Pseudo-LVK, gemessen im Abstand $r$ zur Lichtquelle   |
| $I_r$  | Rauschlevel einer LVK   |
| $I_{real}$                                   | Streulichtkorrigierte LVK einer Lichtquelle   |
| $I_{real,H,V}(\varphi', \vartheta')$         | Um die Goniometerposition rotierte LVK einer Lichtquelle im WKS (ohne Streulicht)                     |
| $I_{real,H,V}$                               | Vektorschreibweise von $I_{mess,H,V}(\varphi', \vartheta')$   |
| $I_{real,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$ | Streulichtkorrigiertes LVK-Segment  |
| $I_{real,seg,H,V}$                           | Vektorschreibweise von $I_{real,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$                                   |
| $I_{rst}$                                    | Raumstreu Lichtanteil einer LVK   |
| $I_{rst,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$  | Unter der Goniometerposition $(H, V)$ mit dem Detektor gemessener Streulichtanteil                    |
| $I_{rst,seg,H,V}$                            | Vektorschreibweise von $I_{rst,seg,H,V}(\varphi'_s, \vartheta'_s)$                                    |
| $I_{rst,LF,s,i}$                             | Auf dem Detektor $s$ gemessenes Streulichtsignal wenn der Lichtfinger die Raumrichtung $i$ beleuchtet |

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| $I_{rsl,seg,H,V,region}$          | Vektorschreibweise des durch eine Region verursachten Streulichts   |
| $I_s$                             | Detektorsignal  |
| $k_E$                             | Kalibrierfaktor bei einer LVK-Messung zur Umrechnung von LSB in Lux |
| $k_p$                             | Erweiterungsfaktor der Überdeckungswahrscheinlichkeit $p$           |
| $K$                               | Intrinsische Kameraparameter  |
| $l_B$                             | Tubuslänge  |
| $L(x_s, y_s)$                     | Leuchtdichteaufnahme  |
| $L(A_Q, \varphi, \vartheta)$      | LeuchtdichteVerteilung einer Lichtquelle                            |
| $m$                               | Anzahl an Freiheitsgraden   |
| $M$                               | Anzahl an Monte-Carlo-Iterationen                                   |
| $p$                               | Überdeckungswahrscheinlichkeit                                      |
| $r$                               | Monte-Carlo-Iterationsschritt                                       |
| $r$                               | Messabstand   |
| $r(x_i, x_j)$                     | Korrelation zwischen Eingangsgrößen                                 |
| $r(y_i, y_j)$                     | Korrelation zwischen Messgrößen                                     |
| $r_{ij}$                          | Koeffizient der Rotationsmatrix $R$                                 |
| $r_{IST,r}$                       | IST-Messabstand des $r$ -ten Simulations-schritts                   |
| $r_{min}$                         | Mindestmessabstand, photometrische Gren-zentfernung                 |
| $r_{QD}$                          | Abstand zwischen $dA_Q$ auf der Lichtquelle und dem Detektor        |
| $r_{s,i}$                         | Koeffizient der Raumantwortmatrix                                   |
| $R$                               | Messabstände  |
| $R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ | Rotationsmatrix   |

|   |   |
|---|---|
| $R(\varphi', \vartheta')$                           | Raumantwort   |
| $R(\varphi', \vartheta', \varphi'_s, \vartheta'_s)$ | Raumantwort auf einen kamerabasierte Detektor   |
| $R_x(\theta_x), R_y(\theta_y), R_z(\theta_z)$       | Rotationsmatrix der jeweiligen Koordinatensystemachse   |
| $R_0$   | Kameraorientierung  |
| $R_{s,i}$   | Raumantwortmatrix   |
| $R_y$   | Korrelationsmatrix  |
| $S$   | Größten nicht leuchtenden Bereiches zwischen zwei leuchtenden Bereichen einer Lichtquelle   |
| $t$   | Translation   |
| $T_0$   | Kameraposition  |
| $T_{ges}$   | Gesamttransformationsmatrix   |
| $T_i$   | Transformation zur Überführung des Koordinatensystem $\tilde{X}_i$ in das Koordinatensystem $\tilde{X}_{i+1}$   |
| $T_{H,Pose}, T_{H,Rot}$                             | Transformationen zur Überführung in das Koordinatensystem der H-Achse aufgeteilt in einen statischen Anteil "Pose" und die Rotation der H-Achse "Rot" |
| $T_Q$   | Transformationen zur Überführung in das Koordinatensystem der (Test)quelle  |
| $T_{V,Pose}, T_{V,Rot}$                             | Transformationen zur Überführung in das Koordinatensystem der V-Achse aufgeteilt in einen statischen Anteil "Pose" und die Rotation der V-Achse "Rot" |

|  |   |
|--|---|
| $T_{Komponente_{j,i}}$   | $i$ -te Transformation der Komponente $j$ im<br>vergleich zum vorherigen Koordinatensys-<br>tem             |
| $u$  | Erste Koordinate eines Bildpunkts   |
| $u(x_i)$   | Standardunsicherheit von $x_i$  |
| $u(y), \text{ z.B.:}$<br>$u(\varphi), u(\vartheta), u(r),$<br>$u(y_l), u(y_s)$ | Kombinierte Standardmessunsicherheit von $Y$  |
| $u^2(y)$   | Kombinierte Varianz von $Y$   |
| $u(x_i, x_j)$  | Kovarianz zwischen Eingangsgrößen   |
| $u(y_i, y_j)$  | Kovarianz zwischen Messgrößen   |
| $U$  | Erwartete Messunsicherheit  |
| $U_y$  | Kovarianzmatrix   |
| $v$  | Zweite Koordinate eines Bildpunkts  |
| $V$  | Goniometerkoordinate der horizontalen Ro-<br>tationsachse   |
| $x$  | Erste Koordinate eines kartesischen Koordi-<br>natensystems   |
| $x_i$  | Schätzwert von $X_i$  |
| $x_{i,r}$  | $r$ -ter simulierter Schätzwert von $X_i$   |
| $\Delta x_{i,r}$   | Abweichung zwischen $x_{i,r}$ und $x_i$   |
| $x_{a,b}, y_{a,b}, z_{a,b}$  | Translation<br>a: Messsystemkomponente: H,V,Q,N<br>b: Statische/ dynamische Transformation<br>„Pose“, „Rot“ |
| $X$  | Vektor der Eingangsgrößen $X_i$ einer Unsi-<br>cherheitsanalyse nach GUM                                    |
| $\tilde{X}_D$  | Koordinatensystem des Detektors, WKS  |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $X_i$                      | $i$ -te Eingangsgrößen einer Unsicherheitsanalyse nach GUM   |
| $\tilde{X}_i$              | $i$ -tes Koordinatensystem   |
| $\tilde{X}_{Komponente_j}$ | Koordinatensystem der Messsystemkomponente $j$   |
| $\tilde{X}_{kart}$         | Kartesisches Koordinatensystem   |
| $\tilde{X}_Q$              | Koordinatensystem der Testlichtquelle  |
| $\tilde{X}_{sph}$          | Sphärisches Koordinatensystem  |
| $y$                        | Zweite Koordinate eines kartesischen Koordinatensystems  |
| $\hat{y}$                  | Schätzwert von $Y$   |
| $y_l, y_s$                 | Schätzwert der Vorzugs- bzw. Nebenrichtung einer 2D-Messgröße, gegeben als lange und kurze Ellipsenachse |
| $\bar{y}$                  | Mittelwert   |
| $y_i$                      | Schätzwert von $Y_i$   |
| $y_{i,r}$                  | $r$ -ter simulierter Schätzwert von $Y_i$  |
| $y_{mess,i}$               | Messwert eines Spektrums oder bildgebenden Detektors   |
| $y_{real,i}$               | Streulichtkorrigierter Messwert eines Spektrums oder bildgebenden Detektors                              |
| $y'_1, y'_2$               | Schätzwert der Vorzugs- bzw. Nebenrichtung einer 2D-Messgröße  |
| $\mathbf{Y}$               | (Vektor der) Messgrößen einer Unsicherheitsanalyse nach GUM  |
| $Y_i$                      | $i$ -te Messgröße  |
| $Y_D$                      | Detektorpositionen im WKS  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $Y_E$           | Detektorrückgabewert bei einer LVK-Messung in LSB  |
| $Y_{mess}$      | Vektor eines gemessenen Spektrums oder Kamerabildeinzugs   |
| $Y_{real}$      | Vektor eines streulichtkorrigierten Spektrums oder Kamerabildeinzugs   |
| $Y_Q$           | SOLL-Detektorposition in kartesischen Koordinaten im Koordinatensystem der Lichtquelle                         |
| $Y_{Q,sph}$     | SOLL-Detektorposition in sphärischen Koordinaten im Koordinatensystem der Lichtquelle                          |
| $Y_{Q,IST}$     | IST-Detektorpositionen im Lichtquellenkoordinatensystem  |
| $Y_{Q,IST,r}$   | IST-Detektorpositionen des $r$ -ten Simulationsschritts im Lichtquellenkoordinatensystem                       |
| $Y_{Q,IST,r,k}$ | IST-Detektorpositionen des $r$ -ten Simulationsschritts der $k$ -ten Aufnahme im Lichtquellenkoordinatensystem |
| $z$             | Dritte Koordinate eines kartesischen Koordinatensystems  |

## IX LITERATUR

- [1] P. H. Emerson, *Naturalistic Photography for Students of the Art*. London: S. Low, Marston, Searle & Rivington, 1890.
- [2] Technikmuseen in Deutschland, *Wie die Entwicklung der Kamera unsere Welt verändert hat | Technikmuseen in Deutschland*. [Online]. Verfügbar unter: <https://technikmuseen-deutschland.de/wie-die-entwicklung-der-kamera-unsere-welt-veraendert-hat> (Zugriff am: 8. Mai 2021).
- [3] *Google Earth* (Zugriff am: 23. Juli 2021).
- [4] E. C. Chen, *Quicktime VR: An image-based approach to virtual environment navigation*, 1995. [Online]. Verfügbar unter: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/218380.218395>
- [5] J. Levinson *et al.*, „Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms“ in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 ; 5 - 9 June 2011 ; Baden-Baden, Germany*, 2011, doi: 10.1109/ivs.2011.5940562.
- [6] CIE, „CIE 244:2021 Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMDs)“, 2021.
- [7] C. Schwanengel, T. Reiners, F. Schmidt und C. Diem, „Das Beste aus zwei Welten – Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung“ in Hrsg. (Hg.) 2016 – LICHT 2016.
- [8] G. Elger, B. Spinger, N. Bienen und N. Benter, „LED Matrix light source for adaptive driving beam applications“ in 2013 *IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference*

- (ECTC), Las Vegas, NV, USA, 052013, S. 535–540, doi: 10.1109/ECTC.2013.6575624.
- [9] Bipm *et al.*, „JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM 1995 with minor corrections“, *Joint Committee for Guides in Metrology*, 2008.
- [10] Otto Reeb, *Grundlagen der Photometrie*. Karlsruhe: Braun, 1962.
- [11] B. E. A. Saleh und M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*. Hoboken, NJ, Ann Arbor, Michigan: John Wiley & Sons; ProQuest, 2019.
- [12] DIN EN 13032-4:2019-11, *Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten – Teil\_4: LED-Lampen, -Module und -Leuchten; Deutsche Fassung EN\_13032-4:2015+A1:2019*, Berlin.
- [13] CIE S 025/E:2015, *Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules*. [Online]. Verfügbar unter: <https://cie.co.at/publications/test-method-led-lamps-led-luminaires-and-led-modules>
- [14] J. Moerman und J. G. Holmes, „The choice of test distance to control errors in the photometry of round projectors focused at a long distance“, *Lighting Research & Technology*, Jg. 13, Nr. 2, S. 87–95, 1981, doi: 10.1177/096032718101300205.
- [15] V. Jacobs *et al.*, „Analyses of Errors Associated with Photometric Distance in Goniophotometry“, *Proc., the 28th Session of CIE*, S. 458–468, 2015.
- [16] I. N. Bronštejn und K. A. Semendjaev, *Taschenbuch der Mathematik*, 6. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch, 2006.

- [17] Synopsis, *LightTools Enewsletter*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.synopsys.com/optical-solutions/e-news/lighttools/osg\\_lt-december2016.html](https://www.synopsys.com/optical-solutions/e-news/lighttools/osg_lt-december2016.html).
- [18] DIN EN 13032-1:2012-06, *Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 1: Messung und Datenformat; Deutsche Fassung EN 13032-1:2004+A1:2012*, Berlin.
- [19] Dipl.-Ing. Chr. Schwanengel, „Comparison of techniques for measuring luminous intensity distribution overall and across segments“, *TechnoTeam In: Bildverarbeitung GmbH*, 2011.
- [20] Internationale Beleuchtungskommission, „The photometry and goniophotometry of luminaires“, Vienna, Technical report / CIE CIE 121-1996, 1996.
- [21] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin, „Operation Manual GO-H 1660“, Nov. 2012.
- [22] M. Lindemann, R. Maass und G. Sauter, „Robot goniophotometry at PTB“, *Metrologia*, Jg. 52, Nr. 2, S. 167–194, 2015, doi: 10.1088/0026-1394/52/2/167.
- [23] I. Moreno und C.-C. Sun, „Three-dimensional measurement of light-emitting diode radiation pattern: a rapid estimation“, *Meas. Sci. Technol.*, Jg. 20, Nr. 7, S. 75306, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/7/075306.
- [24] I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neumann, „Indirect light intensity distribution measurement using image merging“ in *Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI*, A. B. Forbes, N.-F. Zhang, A. Chunovkina, S. Eichstädt und

- F. Pavese, Hg., WORLD SCIENTIFIC, 2018, S. 307–314, doi: 10.1142/9789813274303\_0030.
- [25] C. Schwanengel, *Comparison of techniques for measuring luminous intensity distribution over all and across segments*. [Online]. Verfügbar unter: [http://www2.technoteam.de/rigo801/documents/LID\\_Measurements.pdf](http://www2.technoteam.de/rigo801/documents/LID_Measurements.pdf).
- [26] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, *Reprint einer LMK 6 color Leuchtdichtheitsmesskamera*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e5183/e5432/e5436/e8101/e8105/IMG\\_9250ee\\_quadrat\\_thumbnail\\_ger.jpg](https://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e5183/e5432/e5436/e8101/e8105/IMG_9250ee_quadrat_thumbnail_ger.jpg).
- [27] A. Kokka, T. Pulli, T. Poikonen, J. Askola und E. Ikonen, „Fisheye camera method for spatial non-uniformity corrections in luminous flux measurements with integrating spheres“, *Metrologia*, Jg. 54, Nr. 4, S. 577–583, 2017, doi: 10.1088/1681-7575/aa7cb7.
- [28] M. López, K. Bredemeier, N. Rohrbeck, C. Véron, F. Schmidt und A. Sperling, „LED near-field goniophotometer at PTB“, *Metrologia*, Jg. 49, Nr. 2, S141–S145, 2012, doi: 10.1088/0026-1394/49/2/S141.
- [29] J. Audenaert, P. C. Acuña R, P. Hanselaer und F. B. Leloup, „Practical limitations of near-field goniophotometer measurements imposed by a dynamic range mismatch“ (eng), *Optics express*, Jg. 23, Nr. 3, S. 2240–2251, 2015, doi: 10.1364/OE.23.002240.
- [30] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, „LID Checker and KMP“, Broschüre, 2021. [Online]. Verfügbar unter:

- file:///C:/Users/49157/AppData/Local/Temp/KMP-LID-web\_ger-1.pdf.
- [31] Y. Zong, "Differential Goniophotometer," US 9,958,317 B1, Mai 1, 2018.
  - [32] Y. Zong, S. W. Brown, B. C. Johnson, K. R. Lykke und Y. Ohno, „Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers“ (eng), *Applied optics*, Jg. 45, Nr. 6, S. 1111–1119, 2006, doi: 10.1364/AO.45.001111.
  - [33] Y. Zong, S. W. Brown, G. Meister, R. A. Barnes und K. R. Lykke, „Characterization and correction of stray light in optical instruments“ in *Remote Sensing*, Florence, Italy, 2007, 67441L, doi: 10.1117/12.737315.
  - [34] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, „JCGM 102:2011 Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities“, *Joint Committee for Guides in Metrology*, 2011.
  - [35] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, „JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method“, *Joint Committee for Guides in Metrology*, 2008.
  - [36] Spruyt Vincent, *How to draw an error ellipse representing the covariance matrix?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.visiondummy.com/2014/04/draw-error-ellipse-representing-covariance-matrix/> (Zugriff am: 26. Juli 2021).

- [37] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [38] T. Luhmann, *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, 3. Aufl. Berlin: Wichmann VDE-Verlag, 2010.
- [39] J. Beck und C. Stiller, „Generalized B-spline Camera Model“ in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, 26.06.2018 - 30.06.2018, S. 2137–2142, doi: 10.1109/IVS.2018.8500466.
- [40] J. Salvi, X. Armangué und J. Batlle, „A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation“, *Pattern Recognition*, Jg. 35, Nr. 7, S. 1617–1635, 2002, doi: 10.1016/S0031-3203(01)00126-1.
- [41] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin, Hg., „Hardware Manual Photometer Unit: GO-H Series“, Nov. 2011.
- [42] GLP German Light Products GmbH, „Instruction Manual: impression X4 Atom Head manual (v1.0)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.glp.de/de/produkte?format=raw&task=download&fid=67>.
- [43] M. Katona, K. Trampert, C. Neumann und C. Schwanengel, „Systemanalyse eines bildgebenden LVK Messsystems mittels Monte Carlo Simulation“ (de), 2019, doi: 10.22032/dbt.39606.
- [44] M. Katona, K. Trampert, C. Schwanengel, U. Krüger und C. Neumann, „Geometric system analysis of ILMD-based LID measurement systems using Monte-Carlo simulation“, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 2149, Nr. 1, S. 12015, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2149/1/012015.

- [45] *CIE 198:2011 Determination of Measurement Uncertainties in Photometry*, CIE, 2011.
- [46] Y. Ohno, T. Goodman und G. Sauter, „Trilateral intercomparison of photometric units maintained at NIST (USA), NPL (UK), and PTB (Germany)“, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, Jg. 104, Nr. 1, S. 47, 1999, doi: 10.6028/jres.104.003.
- [47] U. Krueger, B. Ruggaber und P. Blattner, „Measurement Uncertainty in Imaging Photometry: An introduction for TC2-67 based on Excel and Octave“, *CIE Tutorial on Measurement Uncertainties for Headlamp*, 2020.
- [48] J. Santolaria und M. Ginés, „Uncertainty estimation in robot kinematic calibration“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Jg. 29, Nr. 2, S. 370–384, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2012.09.007.
- [49] B. Jokiel, J. C. Ziegert und L. Bieg, „Uncertainty propagation in calibration of parallel kinematic machines“, *Precision Engineering*, Jg. 25, Nr. 1, S. 48–55, 2001, doi: 10.1016/S0141-6359(00)00055-6.
- [50] I. L. Sayanca, „Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung“. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0072-852795>
- [51] J. Beck, „Camera Calibration with Non-Central Local Camera Models“. Dissertation, Institut für Mess- und Regelungstechnik mit Maschinenlaboratorium (MRT), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2021.

- [52] F. Bieber, „Charakterisierung von Messplätzen zur LVK-Messung“. Masterarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2016.
  - [53] R. Poschmann, U. Krueger, T. Porsch und B. Ruggaber, „Bedienhandbuch LMK LabSof“, 5. Jan. 2018.
  - [54] T. Strauss, J. Ziegler und J. Beck, „Calibrating multiple cameras with non-overlapping views using coded checkerboard targets“ in *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, 08.10.2014 - 11.10.2014, S. 2623–2628, doi: 10.1109/ITSC.2014.6958110.
  - [55] M. Katona, J. Beck, K. Trampert und C. Neumann, „Geometrische Parameteranalyse eines LVK-Messsystems mittels Photogrammetrie“ (de), 2021, doi: 10.22032/dbt.49317.
  - [56] Y. Zong, S. W. Brown, K. R. Lykke und Y. Ohno, „Correction of stray light in spectroradiometers and imaging instruments“ in *CIE*, 2007, S. 33–36.
  - [57] G. Bizjak, M. Lindemann, A. Sperling und G. Sauter, „Determination of stray light at the PTB goniophotometer facility“, *MAPAN*, Jg. 24, Nr. 3, S. 163–173, 2009, doi: 10.1007/s12647-009-0020-z.
  - [58] Y. Zong, “Simple Matrix Method for Stray-Light Correction in Imaging Instruments,” US 8,554,009 B2.
  - [59] S. Winter, M. Lindemann, W. Jordan, U. Binder und M. Anokhin, „Convenient integrating sphere scanner for accurate luminous flux measurements“, *Metrologia*, Jg. 46, Nr. 4, S248-S251, 2009, doi: 10.1088/0026-1394/46/4/S22.
-

- [60] M. Deserno, *How to generate equidistributed points on the surface of a sphere*. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://www.cmu.edu/biolphys/deserno/pdf/sphere\\_equi.pdf](https://www.cmu.edu/biolphys/deserno/pdf/sphere_equi.pdf).
- [61] M. Katona, „Berechnung der dynamischen photometrischen Grenzfernernung“. Masterarbeit, Lichttechnisches Institut (LTI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015.
- [62] M. Katona, K. Trampert und C. Neumann, „Fehlerabschätzung der Fernfeldannahme bei LVK-Messungen mittels Nahfelddaten“ in *LICHT2021*, Bamberg, 2021.
- [63] W. Cai, X. Liu, X. Lei und W. Chen, „Analysis of misalignment-induced measurement error for goniophotometry of light-emitting diode arrays“ (eng), *Applied optics*, Jg. 52, Nr. 34, S. 8381–8387, 2013, doi: 10.1364/AO.52.008381.
- [64] M. Katona, I. Rotscholl, K. Trampert und C. Neumann, „Übersicht über die Berechnung von Lichtstärkeverteilungen aus Rayfiles mit ihren Vor- und Nachteilen unter Verwendung verschiedener Raumwinkeltypen“ in *LuxJunior*, Ilmenau, 2017.
- [65] S. Wendel, S. Lueck und C. Neumann, „Constructing Multiple Focal Points Using Rayfiles“ in *LuxJunior 2011*, 2011.
- [66] Z. Zhang, „A flexible new technique for camera calibration“, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Jg. 22, Nr. 11, S. 1330–1334, 2000, doi: 10.1109/34.888718.
- [67] L. Kunze, T. Roehm und M. Beetz, „Towards semantic robot description languages“ in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 2011, S. 5589–5595, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980170.

- [68] *ECE-Regulation 112 Rev. 3*, UNECE, Jan. 2013.