
Gegenüberstellung von Messtechniken zur Messung von Lichtstärkeverteilungen und Lichtstärkeverteilungsausschnitten

Dipl.-Ing. Chr. Schwanengel



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	ix
1. Lichttechnische Grundlagen	1
1.1. Allgemeine Lichttechnische Größen und Begriffe	1
1.2. „Die LVK“ - Notationen und Darstellungen	3
1.2.1. A-,B- und C-Ebenen	4
1.2.2. Darstellung in der Theta-Phi-Ebene	6
1.2.3. Lichtstärkeverteilungskörper	7
1.3. Lichtmesstechnik	8
2. LVK-Messtechnik	13
2.1. Fernfeld	13
2.1.1. Direkt LVK-Messtechnik	13
2.1.1.1. Leuchtenwender	13
2.1.1.2. Drehspiegelgoniometer	15
2.1.1.3. Sonstige	17
2.1.2. Indirekt LVK-Messtechnik	19
2.1.2.1. Bildverarbeitungs-Messplatz	20
2.1.2.2. Kompaktmessplatz	21
2.1.2.3. Imaging Sphere	22
2.2. Nahfeld	24
2.2.1. Nahfeldgoniophotometer	24
2.2.2. Nahfeld-Fourieroptik	27
3. Gegenüberstellung der Messtechnik	29
3.1. Übersicht der Kriterien	29
3.1.1. Größe und Photometrische Grenzentfernung des Messobjekts	29
3.1.2. relevanter Raumwinkel	30
3.1.3. Lichtquelle	30
3.1.4. relevanter Kontrast	31
3.1.5. Reproduzierbarkeit und Genauigkeit	32
3.1.6. Winkelauflösung der LVK	32
3.1.7. Messdauer	32
3.1.8. Platzbedarf	33
3.1.9. Preis	33
3.2. Tabellarische Gegenüberstellung der Messtechnik	34

4. Anwendungsbeispiele	35
4.1. Messung von Leuchten	35
4.2. Messung von Lampen	36
4.3. Messung von Scheinwerfern	39
4.4. Messung von LED	41
A. Anhang	43
A.1. Robotergoniometer	43
A.2. Messung auf gekrümmten Flächen	45
A.3. BV-Messplatz	46
Literaturverzeichnis	47

Abbildungsverzeichnis

1.1. Hochleistungs-LED, deren Strahlenkörper und Simulationbeispiel	3
1.2. A-Ebenen (links) und B-Ebenen (rechts) [www01]	4
1.3. C-Ebenen [www01]	5
1.4. Halogen-Globelampe inkl. Einhausung	5
1.5. Lichtstärkeverteilungskurve der Halogen-Globelampe	6
1.6. Darstellung der Halogen-Globelampe in der ϑ - φ -Ebene	6
1.7. Lichtstärkeverteilungskörper der Halogen-Globelampe	7
1.8. spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges	8
1.9. spektrale Verteilung der Normfarbwerte	9
1.10. Handluxmeter LMT Pocket Lux 2[www02]	9
1.11. normierte spektrale Empfindlichkeit eines CCD-Sensors	10
1.12. Leuchtdichtemesskamera mit $V(\lambda)$ -Filter [www03]	10
1.13. Farbmesskamera mit 4 Farbvollfiltern [www03]	11
2.1. Schematische Darstellung einer Kfz-Goniometermessstrecke; Seitenansicht .	14
2.2. Optronik Leuchtenwender SMS10C; Frontansicht[www04]	15
2.3. Schem. Darstellung eines Drehspiegelgoniometers; Seitenansicht[www05] . .	16
2.4. Drehspiegelgoniometer: links - LMT[www05]; oben - LightLab[www06] . .	17
2.5. GO-FI 2000 von LMT links - Schema; rechts - Frontansicht[Lin08]	18
2.6. Kardangoniometer: links - Schema; rechts - Ansicht[Lin08]	19
2.7. Prinzip der Indirekten LVK-Messung	20
2.8. Prinzip der Indirekten LVK-Messung am KMP	21
2.9. KMP der Firma TechnoTeam [www07]	22
2.10. Imaging Sphere von Radiant Imaging (links) und Schema einer LED-Messung (oben) [www08] [www09]	23
2.11. Prinzip der LVK-Berechnung aus Lichtstromanteilen [www03]	24
2.12. LED-Goniometer von TechnoTeam [www03]	25
2.13. Nahfeldgoniometer der Firma TechnoTeam; links Lampengoniometer; rechts Leuchtgoniometer [www03]	26
2.14. Prinzip der Nahfeldmessung mit Fourieroptik [CIE]	27
2.15. Messplatz mit Fourieroptik für Messobjekte bis 150 mm [CIE]	28
4.1. Deckenleuchte (z.B. Bürobeleuchtung) im Nahfeldgoniometer	35
4.2. LVK der Deckenleuchte aus Abbildung 4.1	36
4.3. Halogenglühlampe, LVK und Strahlendaten	36
4.4. Justageautomat zur Justage von Kaltreflektorlampen	37

4.5. KMP-Messaufbau für Justage von Kaltreflektorlampen	37
4.6. LVK; gemessen im KMP-Messaufbau aus Abbildung 4.5	38
4.7. Kfz-Projektionsscheinwerfer	39
4.8. BV-Messplatz Seitenansicht; vollständiger Grundriß siehe Abbildung A.4	40
4.9. LVK des Projektionsscheinwerfers; 4-fach log.	40
4.10. High-Power LED	41
4.11. LVK der High-Power LED; links - Ebenendarstellung, rechts - 3D	41
A.1. Schema Robotergoniometer der PTB[Lin08]	43
A.2. Ansicht Robotergoniometer der PTB[Lin08]	44
A.3. Funktionsprinzip eines Roboterarms[Lin08]	44
A.4. Grundriß, Aufriß eines BV-Messplatzes	46

Tabellenverzeichnis

2.1. Goniometermodell der RIGO801-Serie von TechnoTeam	25
3.1. Gegenüberstellung der Messtechniken	34

Zusammenfassung

Die Arbeit soll einen Überblick über die aktuell existierenden Messtechniken zur Ermittlung von Lichtstärkeverteilungen geben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk darauf, zu zeigen, für welches Messobjekt welche Messtechnik anwendbar ist. Wo sich Schnittmengen finden, also mehrere Messtechniken für dasselbe Objekt abwendbar sind sowie umgekehrt, und wo zu separieren ist. Es sollen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Messtechniken und sich daraus für die Vermessung von konkreten Messobjekten ergebende Vor- und Nachteile behandelt werden.

1. Lichttechnische Grundlagen

Im ersten Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten lichttechnischen Größen erläutert, sowie die in diesem Zusammenhang verwendeten Bezeichnungen und Abkürzungen definiert, um Verwechslungen zu vermeiden. Außerdem wird die Lichtmesstechnik im Allgemeinen umrissen.

1.1. Allgemeine Lichttechnische Größen und Begriffe

Theoretisch sind die folgenden Ausführungen auch auf andere Bereiche der Strahlung anwendbar. Dabei müssen allerdings die Einschränkungen, die sich unter anderem aus den Empfindlichkeiten der Sensoren ergeben, beachtet werden (Vergleich Kapitel 1.3, Seite 8). In dieser Arbeit geht es vorrangig um Licht. Licht ist der Teil der Strahlung, den wir Menschen über unser Auge wahrnehmen, also sehen, d.h. im Folgenden geht es im Wesentlichen um den sichtbaren Bereich der Strahlung zwischen 360 und 830 nm bewertet mit $V(\lambda)$ und dem Strahlungsäquivalent.

$$\Phi = K_m \cdot \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.1)$$

Φ - Lichtstrom

K_m - Photometrische Strahlungsäquivalent $K_m = 683 \text{ lmW}^{-1}$

$V(\lambda)$ - menschliche Hellempfindlichkeit für photopisches Sehen

λ - Wellenlänge

Leuchtende Objekte senden Licht mit der Lichtstärke I aus. Integriert man I über einen Raumwinkel, erhält man einen Teillichtstrom. Integriert man über die komplette Kugel, ergibt das den Gesamtlichtstrom des Objektes:

$$\Phi = \int_{\Omega_1} I(\gamma) \cdot d\Omega_1 \quad (1.2)$$

I - Lichtstärke

Ω_1 - Raumwinkel

Trifft der Lichtstrom Φ auf eine Fläche, spricht man von der Beleuchtungsstärke

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \quad (1.3)$$

E - Beleuchtungsstärke

A_2 - beleuchtete Fläche

Mit Gleichung 1.2 ergibt sich daraus

$$E = \frac{I(\gamma) \cdot d\Omega_1}{dA_2} \quad (1.4)$$

Häufig ist die für das menschliche Auge relevante lichttechnische Größe die Leuchtdichte L . Sie ist eine orts- und richtungsabhängige (differentielle) Messgröße [FS09].

$$L(x, y, z, \vartheta, \varphi) = \frac{d^2\Phi}{dA_1 \cdot \cos(\vartheta, \varphi) \cdot d\Omega_1} = \frac{dI(\vartheta, \varphi)}{dA_1 \cdot \cos(\vartheta, \varphi)} \quad (1.5)$$

L - Leuchtdichte

A_1 - strahlende Fläche

$\cos(\vartheta_1)$ - Ausstrahl- bzw. Betrachtungswinkel

Je größer die Lichtstärke einer konstanten Fläche ist, desto größer ist die Leuchtdichte. Und anders herum: Die Leuchtdichte wird um so größer, je kleiner die Fläche bei einer konstanten Lichtstärke ist.

Da Objekte in der Praxis eine Ausdehnung besitzen und nicht homogen sind, schwankt die Intensität der Strahlen in Abhängigkeit vom Ursprung und der Richtung. Um die Ausstrahlcharakteristik des Objektes vollständig zu beschreiben, muss die Verteilung der Leuchtdichten/Strahldichten auf der realen oder einer adäquaten virtuellen Oberfläche erfasst und als Strahlenfeld auf einer virtuellen Oberfläche gemessen werden. Die Leuchtdichten/Strahldichten müssen für jeden Ursprung (z.B. an der Oberfläche des Objektes) und die Lichtaustrittsrichtung bekannt sein - $L_e(x, y, z, \vartheta, \varphi)$. In manchen Fällen ist zusätzlich noch die Wellenlänge - λ von Interesse. Außerdem wird in seltenen Fällen die Richtung statt in Kugelkoordinaten in kartesischen angegeben.

Die Werte des Strahlenfeldes werden als Strahlendaten bezeichnet. Integriert man alle Leuchtdichten $L(x,y,z)$ gleicher Richtung (ϑ, φ) erhält man für diese Richtung die Lichtstärke und somit den Lichtstärkeverteilungskörper.

$$I(\vartheta, \varphi) = \int_{A_1} L(x, y, z, \vartheta, \varphi) \cdot \cos(\vartheta, \varphi) \cdot dA_1 \quad (1.6)$$

Bildet man das Integral über alle Lichtstärken erhält man den Lichtstrom der Lichtquelle (siehe Gleichung 1.2). Das Strahlenfeld kann auf die tatsächliche Oberfläche oder eine dieser sehr gut angenäherten virtuellen Oberfläche zurück gerechnet werden und wird dann als Strahlenkörper bezeichnet. Strahlendaten sind immer dann relevant, wenn mit dem Licht des Objektes in Abhängigkeit von dessen Ursprung unterschiedlich „gearbeitet“ wird. Dies ist zum Beispiel bei den meisten Leuchtmitteln der Fall. Die Strahlendaten werden benötigt, um für ein Leuchtmittel optische Elemente wie z.B. einen Reflektor so zu berechnen, dass die Leuchte mit dem Leuchtmittel eine gewünschte Wirkung erzielt. Zur Verdeutlichung zeigt die Abbildung 1.1 von links nach rechts eine LED, die graphische Darstellung der Ausstrahlcharakteristik durch den zugehörigen Strahlenkörper und die Simulation eines Scheinwerferreflektors für eine vorgegebene Richtungsverteilung des emittierten Lichtstroms unter Verwendung von Strahlendaten [FS09].

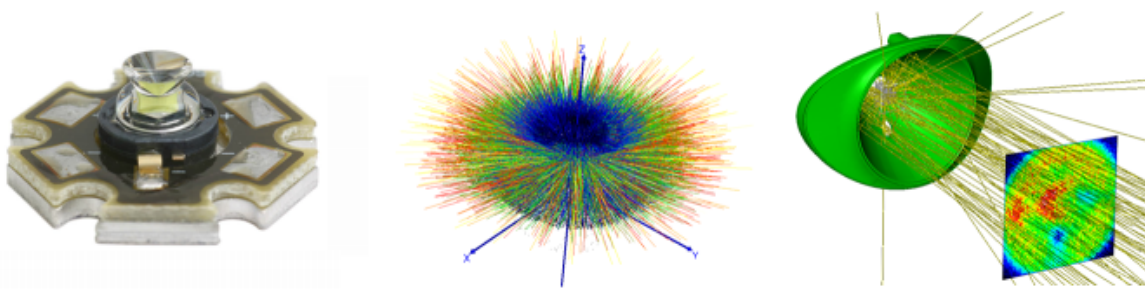


Abbildung 1.1.: Hochleistungs-LED, deren Strahlenkörper und Simulationbeispiel

Will man dagegen die Wirkung der Leuchte in großer Entfernung erfassen, genügt in der Regel die Messung der Lichtstärkeverteilung. Im Gegensatz zu den Strahlendaten beinhaltet die Lichtstärkeverteilung keine Informationen über den Ursprung des Lichtes. Das Objekt wird als Punktlichtquelle angenommen. Die Lichtaustrittsrichtung wird in Kugelkoordinaten angegeben. Damit ergibt sich: $I(\vartheta, \varphi)$. Die Lichtstärkeverteilung kann man einerseits aus den Strahlendaten ermitteln, in dem einfach Strahlen mit der gleichen Richtung zusammengefasst werden. Alternativ kann man sie direkt oder indirekt messen, indem man die Lichtstärke für verschiedene Richtungen erfasst (näheres in Kapitel 2 Seite 13). Letzteres ist nur möglich, wenn der Sensor weit genug vom Objekt entfernt ist, um es als Punktlichtquelle anzunähern.

Vereinfacht man ein reales Objekt zu einer Punktlichtquelle, macht man immer einen Messfehler. Dieser Fehler wird kleiner, wenn der Abstand zur Lichtquelle vergrößert wird. Den Abstand, ab dem der Fehler vernachlässigbar wird, bezeichnet man als Photometrische Grenzentfernung. Dieses Abstand - Fehler - Verhältnis hängt von der Größe des Objektes, der Komplexität der Lichtverteilung und der Größe des tolerierbaren Fehlers ab. Für einfache Objekte (z.B. eine homogen strahlende Fläche) lassen sich die Zusammenhänge relativ einfach berechnen. Hier sinkt der Fehler unter 1%, wenn die Messentfernung mindestens 10-mal größer als die maximale Ausdehnung des Objektes ist (Vergleich [Hen94]). Bei komplexeren Lichtverteilungen (z.B. bei Kfz-Scheinwerfern) rechnet man von vornherein mit größeren photometrischen Grenzentfernungen. Allgemein durchgesetzt hat sich hier eine Messentfernung von mindestens 10m. Für gesetzlich relevante Vermessungen werden 25m gefordert. Da die Lichtaustrittsfläche bei Scheinwerfern i. d. R. kleiner 25cm ist, bei Projektionsmodulen sogar kleiner 10 cm, ergibt sich daraus ein Verhältnis von Abstand zu Ausdehnung von > 100 .

Befindet man sich außerhalb der photometrischen Grenzentfernung, kann das photometrische Entfernungsgesetz angewandt werden.

$$E = \frac{I(\gamma_1)}{r^2} \cos(\gamma_2) \Omega_0 \quad (1.7)$$

1.2. „Die LVK“ - Notationen und Darstellungen

In Kapitel 1.1 wurde der Begriff Lichtstärkeverteilung bereits erklärt. In der Praxis fällt im Zusammenhang mit Lichtstärkeverteilungen häufig die Abkürzung „LVK“: „Die LVK

soll gemessen werden.“ „Die LVK sieht symmetrisch aus“ „Die LVK...“

Was ist „Die LVK“? LVK ist lediglich die Abkürzung für **Lichtstärkeverteilungskurve**. Die Lichtstärkeverteilungskurve ist eine von mehreren Darstellungsformen der Lichtstärkeverteilung. Die Lichtstärkeverteilung kann in der Ebene oder im Raum dargestellt werden. Bei der räumlichen Darstellung spricht man von dem Lichtstärkeverteilungskörper. Wird ein Schnitt durch diesen Körper gelegt und in der Ebene dargestellt ist das eine Lichtstärkeverteilungskurve. Außerdem kann der komplette Körper oder ein Teil des Körpers in kartesischer Form in der $\vartheta - \varphi$ -Ebene dargestellt werden. Meistens spricht man in diesem Zusammenhang ebenfalls von einer LVK.

In den meisten Fällen wird von einer LVK gesprochen, unabhängig davon, welche Darstellungsform gewählt ist. In dieser Arbeit soll mit LVK auch die Lichtverteilung im Allgemeinen gemeint sein. Welche Darstellungsform dahinter steht, ist in den meisten Fällen nebensächlich, erschließt sich aus dem Kontext oder wird explizit erwähnt.

1.2.1. A-,B- und C-Ebenen

A-,B- und C-Ebenen sind polare Darstellungen von Schnitten durch den Lichtstärkeverteilungskörper. In der Regel sind die Lichtstärken in den Ebenen auf einen Lampenlichtstrom von $1000 \text{ lm} = 1 \text{ klm}$ normiert. Die Schnitte der Ebenen gehen dabei immer durch das Zentrum des leuchtenden Objektes. Bei unsymmetrischen Lichtverteilungen benötigt man für eine eindeutige Beschreibung mehrere Schnitte. Diese sind dann zueinander um eine Achse durch das Zentrum des Objektes verdreht. Die Ausrichtung der Drehachse bestimmt die Bezeichnung der Ebenen, der Verdrehungswinkel den Index (Vergleich 1.2 - 1.3). Ist die Drehachse horizontal senkrecht zur Leuchtenachse, spricht man von A-Ebenen, ist die Drehachse gleich der Leuchtenachse, handelt es sich um B-Ebenen und verläuft die Drehachse entlang des Lotes der Leuchte, werden die Schnitte als C-Ebenen bezeichnet.

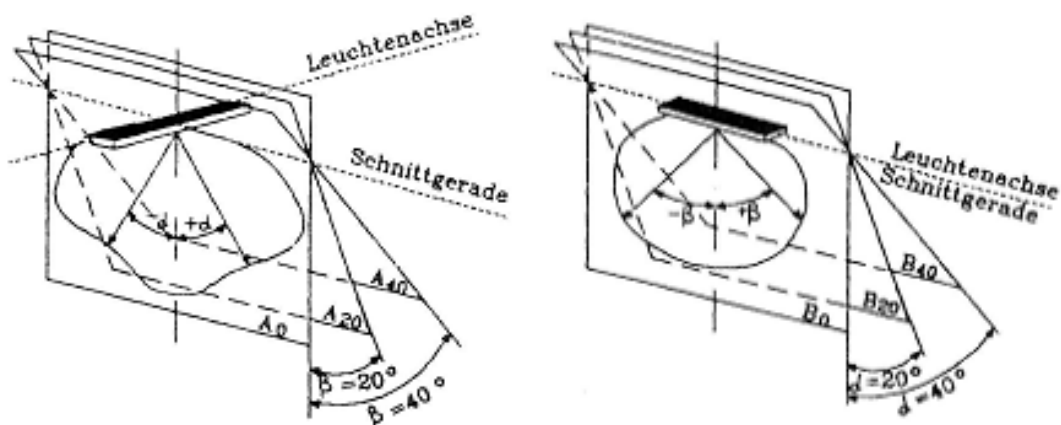


Abbildung 1.2.: A-Ebenen (links) und B-Ebenen (rechts) [www01]

Ist eine Lichtverteilung rotationssymmetrisch bezogen auf die Drehachse, so beschreibt ein einzelner Schnitt bereits die Verteilung eindeutig. Für viele Lampen und Leuchten lässt sich die Lichtverteilung als rotationssymmetrisch annähern. In solchen Fällen ist eine solche

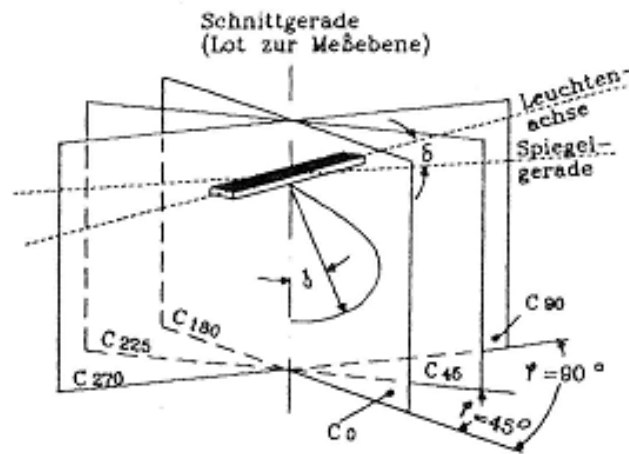


Abbildung 1.3.: C-Ebenen [www01]

vereinfachte Darstellung der Lichtverteilung ausreichend. Typischer Weise wird dann die 0te Ebene (A_0 -Ebene, B_0 -Ebene, C_0 -Ebene) angegeben.



Abbildung 1.4.: Halogen-Globelampe inkl. Einhausung

Am häufigsten ist die Darstellung in C-Ebenen zu finden. Als Beispiel sei das Messergebnis der in Abbildung 1.4 zu sehenden Globelampe¹ in der C-Ebenen-Darstellung (siehe Abb. 1.5) gezeigt. In Kapitel 1.2.3 ist die selbe LVK-Messung in räumlicher (Abb. 1.7) und projizierter (Abb. 1.6) Darstellung zu sehen. Die Globelampe wurde dabei wie in der Abbildung zu sehen stehend vermessen. Bei Darstellung der LVK in der C_0 -Ebene ist somit keine Rotationssymmetrie vorhanden. Sie beschreibt die LVK also nicht vollständig.

¹Halogenlampe mit homogener Lichtverteilung für $I(\vartheta = \pm 15^\circ, \varphi = \pm 15^\circ) = 72\text{cd} \pm 1,5\text{cd}$

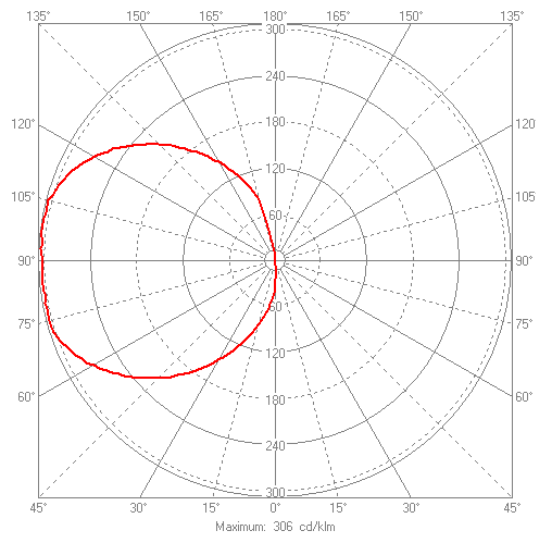


Abbildung 1.5.: Lichtstärkeverteilungskurve der Halogen-Globelampe

1.2.2. Darstellung in der Theta-Phi-Ebene

Von einer Darstellung der Lichtstärkeverteilung in der ϑ - φ -Ebene spricht man, wenn die Lichtstärke in einem 3-dimensionalen kartesischen Koordinatensystem über ϑ und φ aufgetragen ist. Dabei kann die Lichtstärke in Graustufen oder auch pseudocoloriert dargestellt (siehe Abbildung 1.6) werden. Häufig findet diese Form der Darstellung Anwendung, wenn nur ein Teil der Lichtstärkeverteilung analysiert werden soll. Dies ist z.B. der Fall, wenn es sich um Objekte mit gerichtetem Licht handelt oder für die spätere Anwendung nur das Licht in einem bestimmtem Raumwinkelbereich relevant ist. Abbildung 1.6 zeigt die Lichtstärkeverteilung der Globelampe in der ϑ - φ -Ebene.

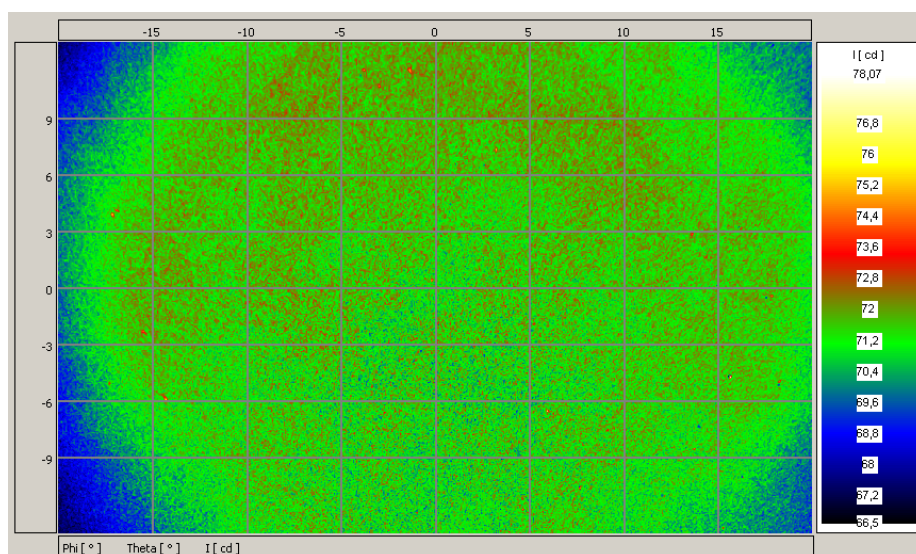


Abbildung 1.6.: Darstellung der Halogen-Globelampe in der ϑ - φ -Ebene

1.2.3. Lichtstärkeverteilungskörper

Der Lichtstärkeverteilungskörper ist die einzige Darstellung der Lichtstärkeverteilung in 3D. In einem geeignetem Programm dargestellt, ist der Körper schwenkbar, sodass man eine räumliche Vorstellung der Lichtstärkeverteilung bekommt. In Abbildung 1.7 sind verschiedene Blickwinkel auf den selben Lichtstärkeverteilungskörper zu sehen. Im Gegensatz zu einer einzelnen Ebenendarstellung beschreibt der Körper die Lichtstärkeverteilung immer komplett.

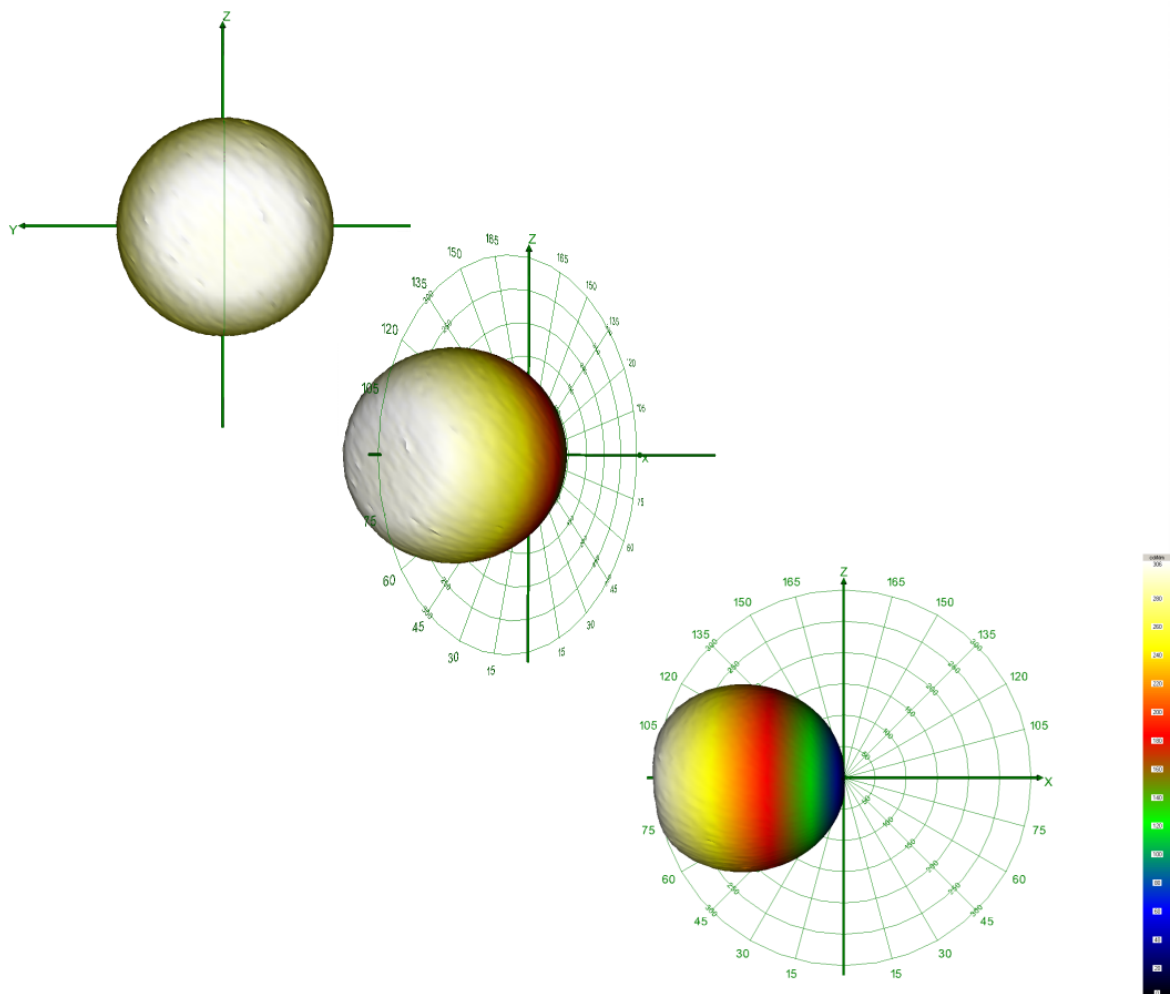


Abbildung 1.7.: Lichtstärkeverteilungskörper der Halogen-Globelampe

1.3. Lichtmesstechnik

Um Licht zu messen benötigt man einen Sensor, der die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges nachbildet (siehe Abb. 1.8) oder das komplette Spektrum im sichtbaren Bereich erfasst und spektral auflöst, damit es anschließend mit der Hellempfindlichkeit gewichtet werden kann.

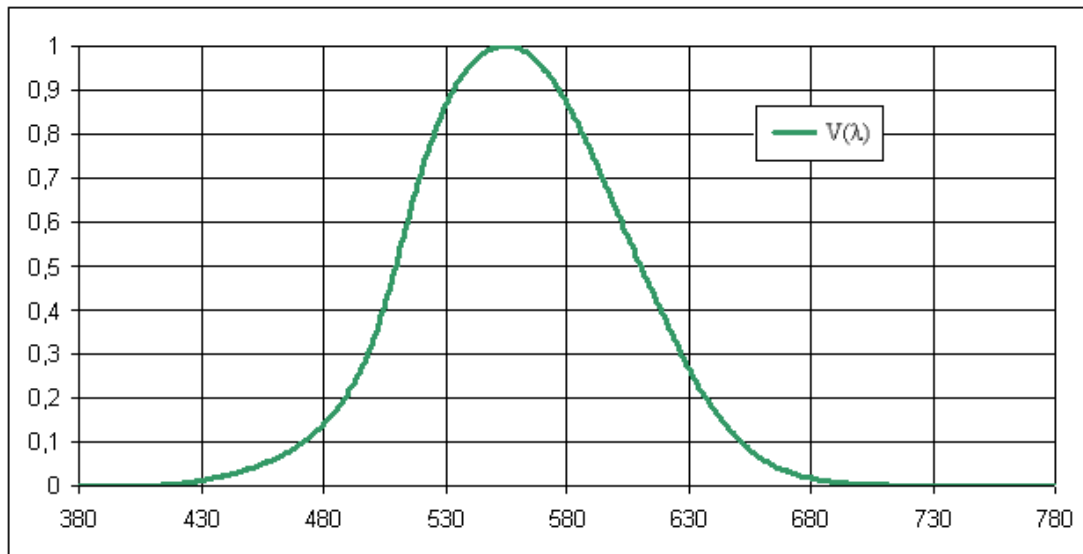


Abbildung 1.8.: spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges

Das Spektrum kann z.B. mit einem Spektrometer ermittelt werden. Bei einem Spektrometer wird das Licht (bzw. die Strahlung) mittels Prisma oder Gitter in die spektralen Anteile zerlegt. Für die LVK-Messung spielt das Spektrum aber eine untergeordnete Rolle. Lediglich bei Lichtquellen, wo das Licht in Abhängigkeit vom Ursprungsort unterschiedliche Farbe besitzt und im Nahfeld befindliche optische Elemente entsprechend so gestaltet werden müssen, dass das unterschiedlich farbige Licht entsprechend weitergeleitet wird, kann das Spektrum interessant sein. Häufig reicht in diesem Fall aber auch eine reduzierte Information wie z.B. die Farbkoordinate. Für die Ermittlung von Normfarbwerten müssen die spektralen Empfindlichkeiten der Normfarbwerte (X,Y,Z) entsprechend dem menschlichem Auge oder Linearkombinationen davon realisiert werden (siehe Abbildung 1.9). Der Y-Kanal entspricht dabei gleichzeitig der Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$.

Es gibt keine Sensoren, die die spektrale (Hell-)Empfindlichkeit des menschlichen Auges direkt realisieren. Üblicher Weise nimmt man einen Sensor, der über einen größeren Bereich der Strahlung empfindlich ist und bestückt diesen dann mit zusätzlichen Filtern, die die einfallende Strahlung entsprechend beschneiden und wichten. Eine spektrale Anpassung kann man mit Hilfe von Vollfiltern oder Partialfiltern erreichen. Bei beiden Methoden benötigt man mehrere Materialien (Gläser), um eine Gesamtempfindlichkeit von $V(\lambda)$ zu erreichen. Bei einem Partialfilter werden von den einzelnen Gläsern nur Teile des Empfängers bedeckt, weshalb die einfallende Strahlung möglichst homogen sein sollte. Durch die Stückelung ist

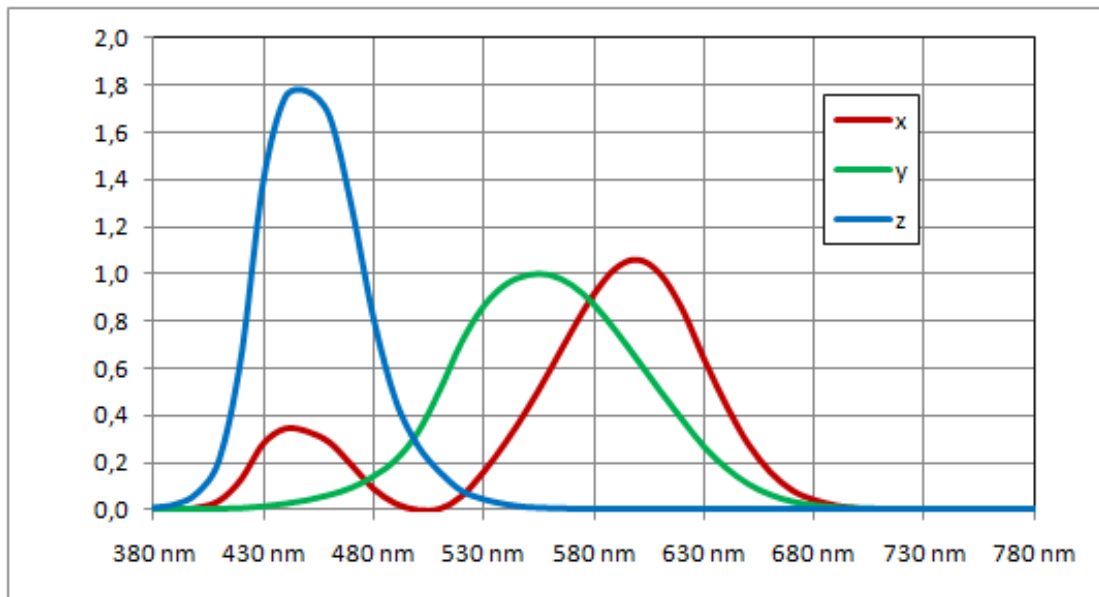


Abbildung 1.9.: spektrale Verteilung der Normfarbwerte

eine sehr genaue Anpassung an $V(\lambda)$ möglich ($f'_1 < 0,8\%$)². Es kann aber nur ein Messwert und keine orts aufgelöste Information gewonnen werden. Partialfilter finden vorwiegend in Photometerköpfen für Goniophotometer (siehe Kapitel 2) Anwendung. Für Farbmessungen werden entsprechend Sensorköpfe mit 3 Partialfiltern (für X, Y und Z) realisiert.

Abbildung 1.10.: Handluxmeter LMT Pocket Lux 2[[www02](#)]

Vollfilter bestehen ebenso wie Partialfilter aus mehreren Gläsern, die hier aber nur hintereinander und gleichmäßig über die komplette Fläche angeordnet sind. Im Gegensatz zu Partialfiltern können sie aber nicht nur in Einzelsensoren (z.B. Handluxmeter Vgl. 1.10)

²Integraler Qualitätsindex für die Abweichung der rel. spektralen Empfindlichkeit von $V(\lambda)$ (Details siehe DIN 5032 Teil 6 bzw. CIE Pub. 69)

sondern auch in Verbindung mit einem Matrixsensor (CCD oder CMOS) in einer Kamera zur orts aufgelösten Messung verwendet werden. Die CCD-Matrix als strahlungsempfindlicher Sensor (Empfindlichkeit siehe Abbildung 1.11) wandelt die einfallenden Strahlungsflussanteile in Signalladungen entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit.

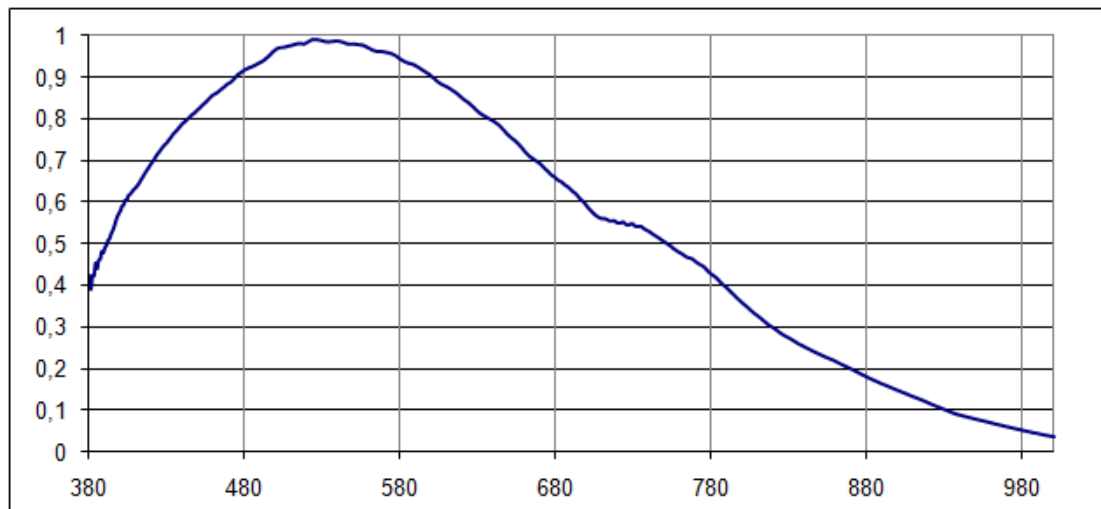


Abbildung 1.11.: normierte spektrale Empfindlichkeit eines CCD-Sensors

Soll das System photometrisch messen, muss die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems $V(\lambda)$ sein. Dazu wird für jede Kamera ein Vollfilter eingesetzt, das mit der spektralen Empfindlichkeit der jeweiligen CCD-Matrix und der spektralen Transmission des Objektivs insgesamt die normgerechte Empfindlichkeit des menschlichen Auges ergibt (siehe Abbildung 1.12).

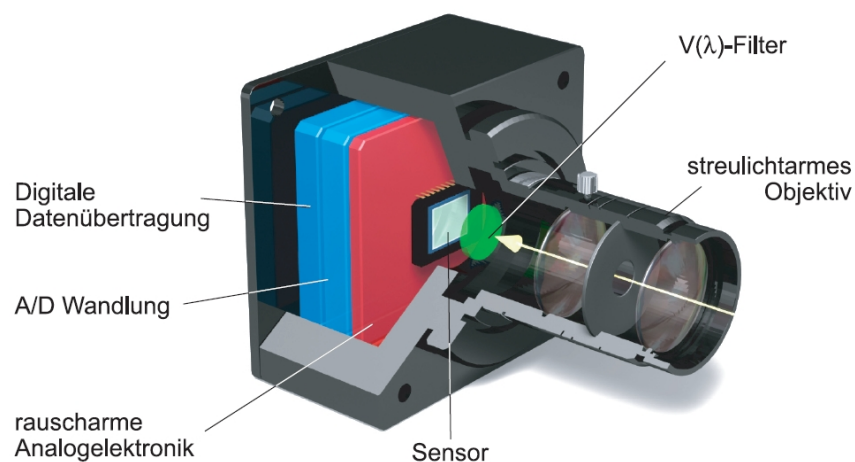


Abbildung 1.12.: Leuchtdichtemesskamera mit $V(\lambda)$ -Filter [www03]

Die spektralen Empfindlichkeiten der CCD-Matrizen müssen für jedes Exemplar gemessen werden, da selbst Exemplare einer Charge stark streuen können. Die Ortsabhängigkeit auf dem CCD-Chip selbst ist verschwindend, die Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit vom Einfallswinkel der Lichtstrahlen (bildseitige Feldwinkel der eingesetzten Objektive) ist zu prüfen und gegebenenfalls beim Filterdesign zu berücksichtigen [FS09].

Mit Vollfiltern ist prinzipbedingt keine so hohe $V(\lambda)$ -Anpassung erreichbar wie mit Partialfiltern. Der f_1 -Kennwert liegt mit kleiner 4% über dem eines guten Partialfilters.

Für Farbmessungen werden wie auch bei der Partialfilterung mehrere Filter verwendet. Für eine Farbmesskamera besteht dann die Möglichkeit mehrere Sensoren mit jeweils einem anderen Farbfilter zu bestücken (Mehr-Chip-Kamera) oder vor einem Sensor nacheinander die verschiedenen Farbfilter zu positionieren (Filterradkamera) und sequentiell zu messen. Abbildung 1.13 zeigt eine solche Farbfilterradkamera der Firma TechnoTeam.

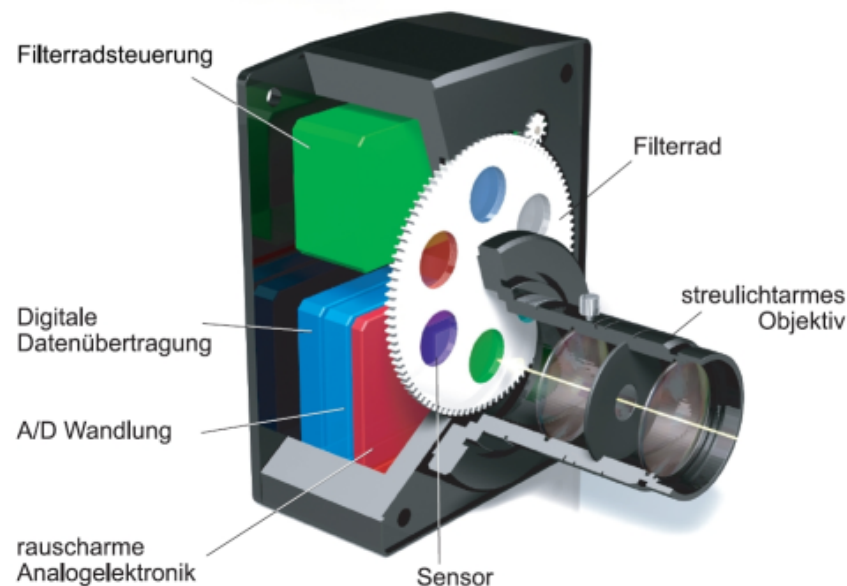


Abbildung 1.13.: Farbmesskamera mit 4 Farbvollfiltern [www03]

Als Alternative zu spektral angepassten Messsystemen lassen sich auch nicht angepasste verwenden. Diese Systeme müssen dann aber auf die zu messende Lichtquelle selbst kalibriert werden und lassen dann auch keine Messung anderer Lichtquellen zu. Die Genauigkeiten sind entsprechend schlechter und da es nicht möglich ist, sie ohne apriori Information auf beliebige Lichtquellen anzuwenden, werden sie hier nicht weiter betrachtet.

Für andere Bereiche der Strahlung werden andere Sensoren oder zumindest andere Filter benötigt. Da eine CCD auch Empfindlichkeiten außerhalb des sichtbaren Spektrums besitzt (siehe Abbildung 1.11), kann der Sensor ebenfalls zur Messung von Strahlung in diesem Bereich verwendet werden. Bei der Filterradkamera von TechnoTeam ist es z.B. möglich einen IR-Filter in das Filterrad zu integrieren.

2. LVK-Messtechnik

Eine LVK kann man im Fernfeld und im Nahfeld messen. Misst man außerhalb der Photometrischen Grenzentfernung (Vergleich Kapitel 1.1), so handelt es sich um eine Fernfeldmessung, andernfalls um eine Nahfeldmessung. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über existierende Fernfeld- und Nahfeldmesstechniken.

2.1. Fernfeld

Für die LVK-Messung im Fernfeld gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Messtechniken. Diese lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einsortieren: Die Direkte LVK-Messtechnik (2.1.1) und die Indirekte LVK-Messtechnik (2.1.2).

2.1.1. Direkt LVK-Messtechnik

Bei der Direkten LVK-Messung befindet sich mindestens ein lichtempfindlicher Sensor (Photometerkopf) in einem definierten Abstand zum Messobjekt und wird von diesem direkt bestrahlt. Der Sensor liefert die Beleuchtungsstärke und aufgrund des bekannten Abstandes lässt sich diese über das Photometrische Entfernungsgesetz (1.7) ohne Zusatzinformationen direkt in die Lichtstärke umrechnen. Der dazugehörige Winkel (ϑ, φ) ergibt sich aus der relativen Lage zwischen Messobjekt und Sensor. Um die Lichtstärke unter einem anderen Winkel zu ermitteln muss die Relativlage zwischen Messobjekt und Sensor entsprechend geändert werden. Dazu muss entweder der Sensor um das Messobjekt herum bewegt, das Messobjekt gedreht oder die relevanten Strahlenbündel zum Sensor hin umgelenkt werden. Das Messobjekt wird also sequentiell abgerastert. Messgeräte, die eine solche Drehbewegung des Sensors oder des Messobjektes zur sequentiellen Erfassung der Lichtverteilung nutzen, werden als Goniometer bezeichnet. Handelt es sich bei dem Sensor um ein Photometer, spricht man bei dem Gesamtgerät von einem Goniophotometer. Alternativ können als Sensor auch Farbmessköpfe zur Messung von Farbe, Spektrometer zur Messung des Spektrums oder andere Sensoren eingesetzt werden. Üblicher Weise wird das Abrastern auf einer Kugeloberfläche realisiert, in dem der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt während der Relativbewegung konstant gehalten wird. Das Raster ist dabei bei den meisten Geräten variabel wählbar, sodass die Auflösung an die Anforderungen des Messobjektes angepasst werden können.

2.1.1.1. Leuchtenwender

Beim Leuchtenwender wird das Messobjekt um zwei senkrecht zueinander, miteinander gekoppelte Achsen gedreht, d.h. eine Achse liegt starr im Raum und die andere wird von dieser

mit gedreht und ändert somit ihre Lage. Der Sensor ist fix im Raum in einem definierten Abstand senkrecht zur starren Rotationsachse montiert. Dabei muss man unterscheiden, welche Drehachse einen festen Bezug zum Raum hat. Je nach dem wird jeweils ein anderes Kugelkoordinatensystem realisiert. Die verschiedenen Kugelkoordinatensysteme sind untereinander nicht identisch, lassen sich aber uneindeutig ineinander überführen.

Je nach Messaufgabe bzw. in Abhängigkeit von den zu vermessenden Objekten, schwanken die Messentfernung sowie die Lage der Rotationsachsen im Raum von einem Leuchtenwender zum nächsten. Eine häufig zu findende Variante ist die für gesetzlich relevante Messungen von Kfz-Scheinwerfern. Deshalb sei an diesem Beispiel der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise eines Leuchtenwenders erklärt. Dieser Goniometertyp ist schematisch in Abbildung 2.1 und ein Beispielgerät der Firma Optronik in Abbildung 2.2 zu sehen.

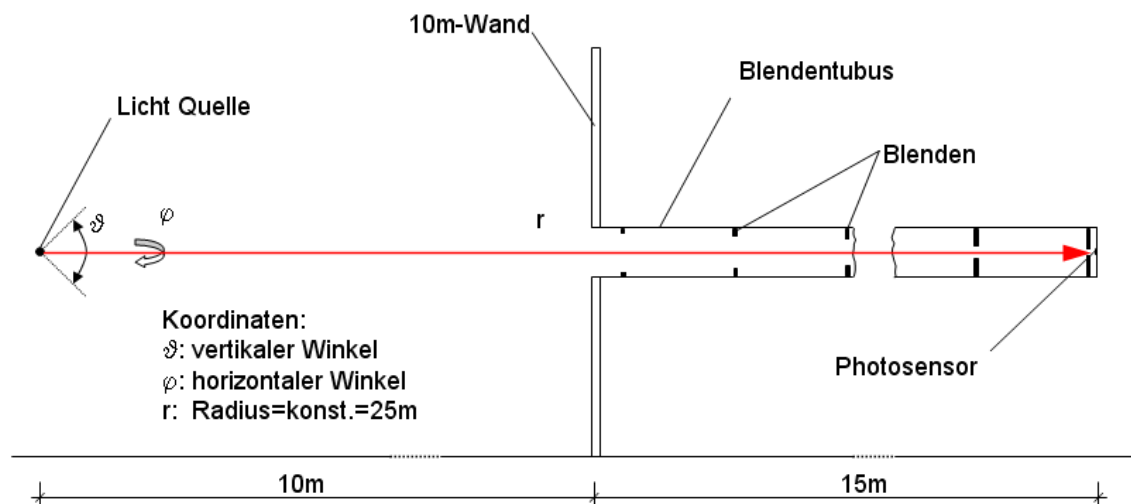


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung einer Kfz-Goniometermessstrecke; Seitenansicht

Ein solches Goniometer besitzt drei Translationsachsen (links-rechts, hoch-runter, vor-zurück) und zwei miteinander gekoppelte Rotationsachsen. Die horizontale Drehachse ist fix im Raum. Der Photometerkopf befindet sich in 25 m Entfernung. Er hat üblicher Weise einen Durchmesser von 30 mm, woraus sich bei 25 m Messentfernung eine Winkelauflösung von ca. $0,07^\circ$ ergibt. Vor der Messung wird mit Hilfe der Translationen der Lichtaustrittspunkt¹ des Scheinwerfers in den Schnittpunkt der beiden Rotationsachsen (also dem Drehzentrum) und auf Höhe des 25m entfernten Photoelementes gebracht. Zwischen Goniometer und Photoelement befindet sich in einem Abstand von 10m vor dem Goniometer eine Wand mit einem 30cm großen Loch in der Mitte, an welches sich ein 15m langer Tubus anschließt. Diese 10m-Wand dient unter anderem als Hilfsmittel zur Positionierung der Scheinwerfer und zur visuellen Beurteilung der Lichtverteilungen. Diese Art Goniometer kann i.d.R. horizontal und vertikal um $\pm 90^\circ$ schwenken. Außerdem können sie tlw. sehr genau verfahren ($0,01^\circ$ kleinste Schrittweite).

¹Häufig wird hier der Mittelpunkt des Leuchtmittels oder auch ein virtueller Punkt hinter dem Objekt gewählt. Bei derartig großen Messentfernungen sind die Fehler einer geringfügigen Falschpositionierung aber vernachlässigbar.



Abbildung 2.2.: Optronik Leuchtenwender SMS10C; Frontansicht[[www04](#)]

Damit das Photoelement ausschließlich das Lichtbündel misst, welches unter dem angefahrenen Winkel vom Scheinwerfer ausgesendet wird, sind in dem 15m langen Tubus mehrere Blenden zur Abschattung von Fremdlicht angebracht. Der kleinste messbare Beleuchtungsstärkewert eines solchen Goniometers beträgt etwa 0,001 lux. Bei 25 m Messentfernung entspricht das 0,625 cd. Die Reproduzierbarkeit der Messung ist sehr groß ([[Sch05](#)] Kapitel 3.1). Der Aufbau ist aufgrund des Blendentubus aus photometrischer Sicht sehr effektiv aber gleichzeitig äußerst platzraubend.

2.1.1.2. Drehspiegelgoniometer

Das Drehspiegelgoniometer besteht im Wesentlichen aus einer rotierbaren Leuchtenhalterung, einem Drehspiegel und einem Photometer. Beim Messvorgang wird die Leuchte in stets gleicher Arbeitslage auf einem Radius um den Drehspiegel geführt, welcher das Licht in Richtung Photometerkopf ablenkt, wobei die Spiegelmitte im Drehzentrum liegt. Die durch den Spiegel hervorgerufene spektrale Änderung wird durch eine spezielle Anpassung des Photometerkopfes an die Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges kompen-

siert [www05]. Das Photometer ist wie bei den Leuchtenwendern auch je nach Ausführung in unterschiedlicher aber fester Position montiert. Zur Streulichtreduzierung sind diverse Blenden im Messraum angebracht. Abbildung 2.3 zeigt den Aufbau eines solchen Goniometers und Abbildung 2.4 (links) ein solches Goniometer der Firma LMT.

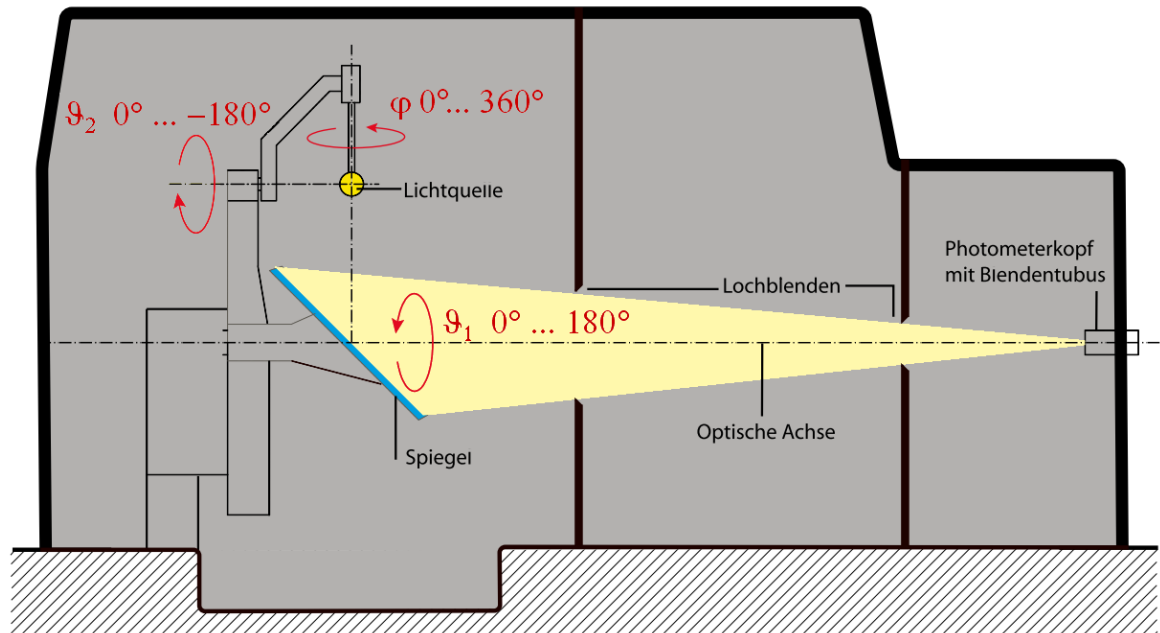


Abbildung 2.3.: Schem. Darstellung eines Drehspiegelgoniometers; Seitenansicht[www05]

Ein Drehspiegelgoniometer besitzt i. d. R. drei Drehachsen. Eine horizontale Thetaachse (ϑ_1) entlang der optischen Achse, an der der Drehspiegel mittig sitzt. Diese Achse dreht den Spiegel und gleichzeitig den Arm, an dem die zweite Thetaachse (ϑ_2) mit dem Lampen-/Leuchtenarm befestigt ist. Die zweite Thetaachse dreht sich entgegengesetzt zur ersten immer um den gleichen Winkel, um die Verkipfung zu kompensieren. Das Messobjekt wird lediglich durch die Phiachse (φ) in der Horizontalen gedreht.

Alternativ gibt es auch Drehspiegelgoniometer bei denen sich nicht das Messobjekt auf einer Kreisbahn um den Spiegel bewegt sondern anders herum. Ein solches Gerät ist in Abbildung 2.4 rechts oben zu sehen. Bei diesem Gerät gibt es nur eine Thetaachse, die sich auf der selben Höhe wie das Zentrum des Messobjektes befindet. Der verkippte Spiegel wird um diese Achse und um sich selbst gedreht. Das Messgerät wird auch als Exzenter-Drehspiegel-Goniometer bezeichnet. Bei dieser Art Konstruktion ist es möglich, die Entfernung zwischen Leuchte und Spiegel zu vergrößern und gleichzeitig die Gesamtbauhöhe zu verringern, wodurch vor allem Mehrfachreflexionen zwischen Leuchte und Spiegel vermieden werden ([Mar97]). Die Öffnung zum Photometerkopf ist dann entweder kegelförmig, damit das Licht aus den unterschiedlichen Raumpositionen erfasst werden kann und zwischen Photometer und Goniometer befindet sich in diesem Fall eine drehbare Streulichtblende, die das durch das Photometer erfassbare Raumwinkelsegment jeweils auf die Spiegelposition beschneidet. Oder aber das Photoelement wird zusammen mit dem Tubus synchron zum Spiegel mit dem gleichen Radius gedreht.

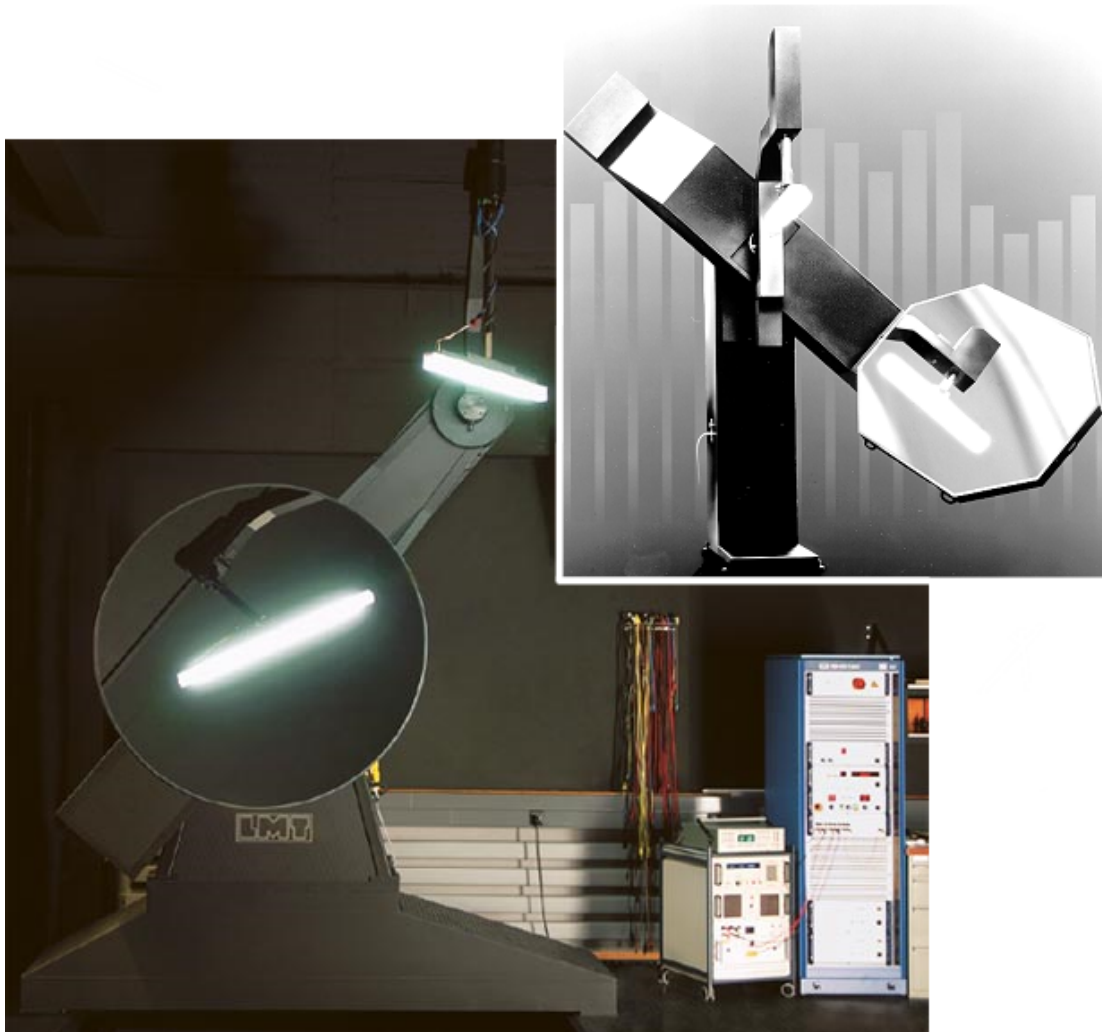


Abbildung 2.4.: Drehspeigelgoniometer: links - LMT[[www05](#)]; oben - LightLab[[www06](#)]

Das Spiegelgoniometer bildet bzgl. der Einsortierung in die Gruppe der direkten LVK-Messverfahren einen Grenzfall, da das Medium „Spiegel“ sich im Strahlengang befindet. Da der spektrale Einfluss des Spiegels aber kompensiert wird, das Licht rein gerichtet reflektiert und die Beleuchtungsstärke direkt gemessen werden kann, zählt es mehr zu den direkten als zu den indirekten Messverfahren.

2.1.1.3. Sonstige

Um das Messobjekt gar nicht oder zumindestens nur innerhalb der Gravitationsebene zu bewegen, wie es bei dem Spiegelgoniometer der Fall ist, gibt es verschiedene Geräte, die ohne ein zusätzliches Medium (Spiegel) auskommen, indem sie den Sensor um das Objekt herum bewegen. Diese Verfahren sind nur für kleinere Messobjekte mit geringer photometrischer Grenzentfernung anwendbar, da die Geräte sonst zu groß, „unhandlich“ und teuer werden.

Das in Abbildung 2.5 zu sehende Kompaktgoniometer dreht das Messobjekt lediglich um

seine vertikale Achse. Der Sensor fährt auf einer Kreisbahn, deren Drehachse senkrecht zur vertikalen Drehachse des Messobjektes steht, um das Objekt herum. Mit einem solchem Goniometer lässt sich die LVK von kleineren Objekten bestimmen. Für größere Objekte (wie auf dem Bild), wird die photometrische Grenzentfernung nicht eingehalten und somit kann dann nur eine integrale Größe wie der Gesamtlichtstrom mit dem Gerät ermittelt werden.

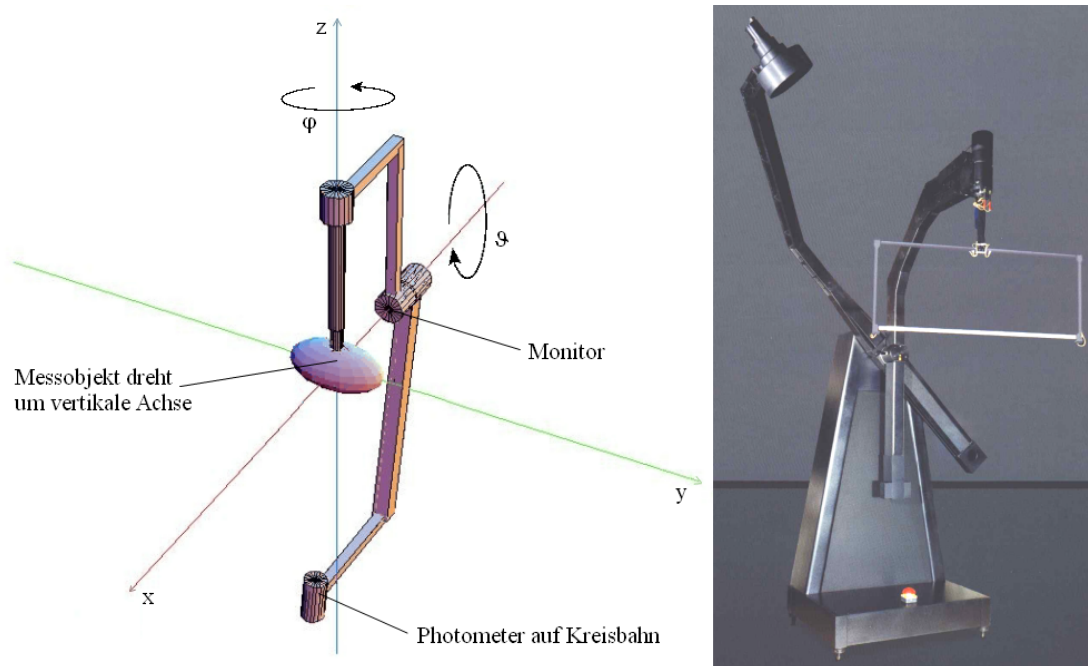


Abbildung 2.5.: GO-FI 2000 von LMT links - Schema; rechts - Frontansicht [Lin08]

Um das Messobjekt in einer beliebigen Brennweite zu positionieren und unbewegt in dieser die LVK zu messen, benötigt man Goniometer mit entsprechend mehr Freiheitsgraden. Beispiele hierfür sind das Kardan- und Robotergoniometer der PTB² sowie das Nahfeldgoniometer (Vergleich Kapitel 2.2), welches für kleinere Objekte natürlich auch als Fernfeldgoniometer eingesetzt werden kann.

Das Kardangoniometer (Abbildung 2.6) hat einen äußeren Rahmen (Alpha-Rahmen) mit dem das Messobjekt in unterschiedlichen Brennweiten positioniert werden kann. Die beiden inneren Rahmen (Theta- und Phi-Rahmen) fahren zum Messen auf einer Spiralbahn um das Messobjekt herum. Die Winkelgeschwindigkeit der Rahmen ist variabel aber während der Messung fest. Die Rahmen sind kardanisches aufgehängt und besitzen einen Radius von etwa 2,5 m. Hier können verschiedene Sensoren zum Einsatz kommen (Photometer, Farbmesskopf oder Spektroradiometer) [Lin08].

Das Robotergoniometer der PTB besitzt drei Roboterarme (Vergleich Anhang Abbildung A.1 und A.2). Ein Arm dient der freien Positionierung des Messobjektes. Mit ihm kann das Messobjekt in beliebige Brennweite gebracht und fixiert werden. Die beiden anderen Roboterarme besitzen jedes vier Gelenke und können jeweils einen Halbraum mit variablem

²PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt

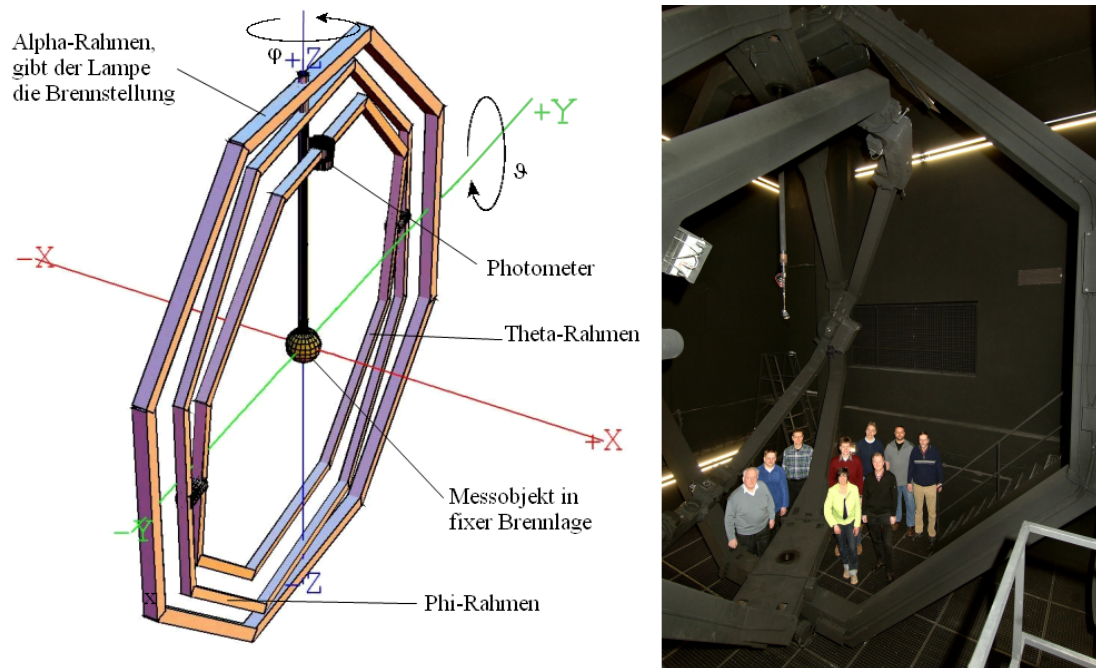


Abbildung 2.6.: Kardangoniometer: links - Schema; rechts - Ansicht [Lin08]

Durchmesser von 0,5 bis 6 m überstreichen. Dabei wird dynamisch auf Bahnen gemessen, da ein Start-Stopp-Betrieb viel zu langsam wäre. Die dafür notwendige Berechnung der Gelenkbewegungen ist teilweise sehr komplex (Vergleich Abbildung A.3 im Anhang). Es existiert kein allgemeines Lösungsverfahren. Teilweise finden analytische Lösung, teilweise numerische Näherungsverfahren Anwendung. Als Sensoren kommen auch hier je nach Anwendung Photometer, Farbsensoren oder Sensoren zur Gewinnung spektraler sowie radiometrischer Daten zum Einsatz. [Rie03] [Lin08]

2.1.2. Indirekt LVK-Messtechnik

Bei der Indirekten LVK-Messung wird nicht die Beleuchtungsstärke direkt gemessen, sondern es wird ein Medium außerhalb der Photometrischen Grenzentfernung in den Strahlengang gebracht. Verwendung finden hier üblicherweise Materialien, die lambertsche (diffus, streuende) Eigenschaften aufweisen und spektral neutral sind. Das Medium wird dann ortsaufgelöst durch eine Leuchtdichtemesskamera (kurz LMK) oder auch Farbmesskamera (kurz LMK-Color) erfasst. Dabei finden je nach Messaufgabe und dem daraus resultierenden realisierbaren Messaufbau entweder diffus reflektierende Oberflächen oder Streuscheiben Anwendung (Vergleich Kapitel 4). Im ersten Fall betrachtet die Kamera das Medium von einer Position im selben Halbraum aus dem es beleuchtet wird. Im zweiten Fall sitzt die Kamera i.d.R. gegenüber dem Messobjekt hinter der Streuscheibe auf der optischen Achse. Je nachdem welcher Raumwinkelbereich auf dem Medium abgebildet und von der Kamera erfasst wird, schwankt die Größe der erfassten Teil-LVK. Ist die Größe für den Anwendungsfall nicht ausreichend, besteht die Möglichkeit das Objekt zu schwenken und mehrere Teil-LVKs zu erfassen. Obwohl sich mittels Schwenken die komplette Kugel erfassen

sen ließe, finden sich in der Praxis meist nur feste Messaufbauten und einige bei denen das Messobjekt mehrfach um feste Winkelpositionen verschwenkt wird.

2.1.2.1. Bildverarbeitungs-Messplatz

Lässt man das Messobjekt auf ein Medium außerhalb der photometrischen Grenzentfernung strahlen, erzeugt der auf dem Medium auftreffende Lichtstrom eine Beleuchtungsstärke. Aus dieser resultiert eine Leuchtdichte, die bildauflösend gemessen werden kann. Darauf aufsetzend kann aus dem aufgenommenen Leuchtdichtebild bei Kenntnis der geometrischen Zusammenhänge (Position von Messobjekt, Medium und Kamera) das korrespondierende Beleuchtungsstärkebild sowie die LVK berechnet werden. Weil die Berechnung der LVK über ein zusätzliches Medium und ausgehend von der gemessenen Leuchtdichte in Pixelkoordinaten realisiert wird, spricht man von einer Indirekten LVK-Messung. Es sind zusätzliche Informationen und Rechenschritte nötig, um von der Leuchtdichte im Kamerakoordinatensystem auf die winkelabhängige Lichtstärke oder Beleuchtungsstärke zu schließen. Abbildung 2.7 verdeutlicht das Messprinzip am Beispiel einer Scheinwerfermessung. Hier sind typische Messentfernungen 10 m oder mehr. Bei anderen Anwendungen, wie z.B. LED-Messungen, sind wesentlich kürzere Messentfernungen ausreichend.

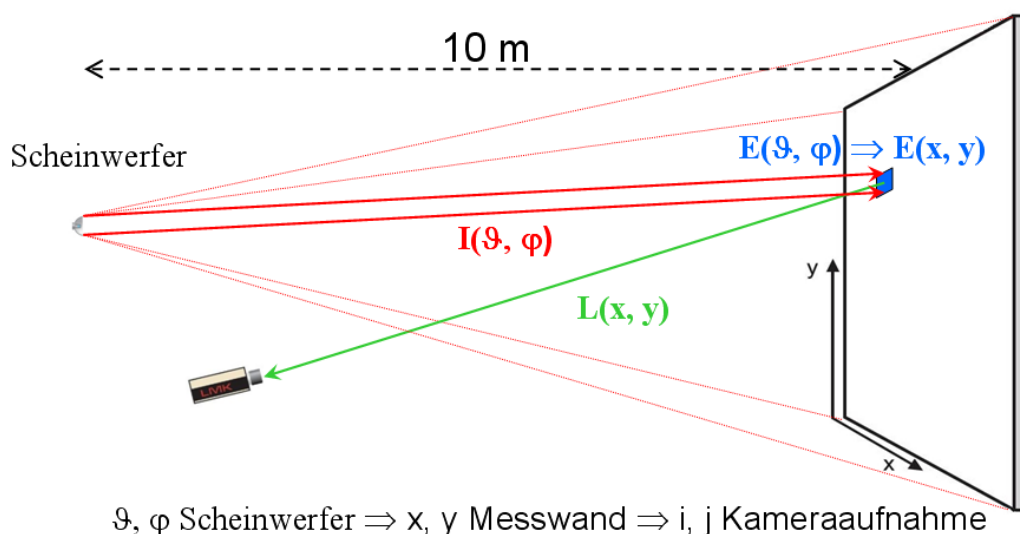


Abbildung 2.7.: Prinzip der Indirekten LVK-Messung

Ist die Reflexion rein diffus, dann ist die Leuchtdichte keine Funktion der Ausstrahlungsrichtung

$$L(x, y, \vartheta, \varphi) = L(x, y) \neq f(\vartheta, \varphi) \quad (2.1)$$

sondern für unterschiedliche Messrichtungen konstant und direkt proportional der Beleuchtungsstärke $E(x, y)$ mit einem Umrechnungsfaktor k :

$$E(x, y) = L(x, y) \cdot k = L(x, y) \cdot \frac{\pi \cdot \Omega_0}{\rho} \quad (2.2)$$

ρ - Reflexionsgrad

2.1.2.2. Kompaktmessplatz

Der Kompaktmessplatz (kurz: KMP) basiert auf den gleichen Grundlagen wie der BV-Messplatz. Zusätzlich verkürzt ein Abbildungssystem die Messentfernung, indem es die Lichtverteilung in die Brennebene abbildet. Messobjektstrahlen, die parallel verlaufen, werden durch das Abbildungssystem auf einen Punkt abgebildet. Strahlen, die unter einem anderen Winkel parallel verlaufen, werden auf einen anderen Punkt in der Brennebene abgebildet. Das Abbildungssystem muss so groß gewählt werden, dass alle relevanten Strahlenbündel vollständig auf das Abbildungssystem treffen und in die Brennebene abgebildet werden. Wenn man dann die Brennebene orts aufgelöst erfasst, können bei Kenntnis der geometrischen und photometrischen Zusammenhänge zwischen Messobjekt in Kugelkoordinaten und Brennebene in Kamerakoordinaten die Lichtstärken aus dem Leuchtdichtebild berechnet werden. Als streuendes Medium kommen auch hier Reflexionswände oder Streuscheiben zum Einsatz. Abbildung 2.8 zeigt das Messprinzip am Beispiel eines Scheinwerfers.

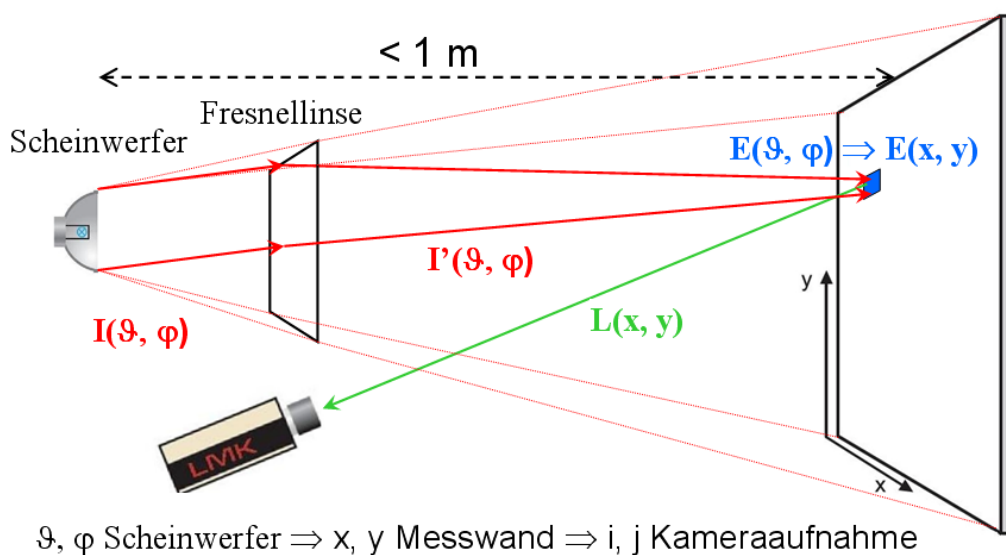


Abbildung 2.8.: Prinzip der Indirekten LVK-Messung am KMP

Beträgt die Messentfernung z.B. beim BV-Messplatz für einen Kfz-Scheinwerfer 10 m, so lässt sie sich bei Verwendung eines KMP auf 40 cm reduzieren. Je nach Messobjekt und den dadurch verwendbaren Abbildungssystem(en) kann die Messentfernung noch weiter verkürzt werden. Der dadurch entstehende Gesamtmessplatz ist sehr kompakt.

Da reale Abbildungssysteme von den theoretischen Idealeigenschaften abweichen, ergeben sich verschiedene Einschränkungen für die vermessbaren Objekte. Dabei spielt die Messobjektgröße eine wesentliche Rolle, weil günstige hochwertige Abbildungssysteme nur in begrenzter Größe existieren. Daher kommen als Abbildungssystem häufig Fresnellinsen zum Einsatz. Diese sind als Standardausführung in ausreichender Größe (60 cm oder mehr) erhältlich bringen aber aufgrund der prinzipbedingten Störflanken Abbildungsfehler mit

sich. Alternativ können Achromate oder Objektive mit großer Öffnungsweite verwendet werden. Diese besitzen gegenüber den Fresnellinsen eine wesentlich kleinere Öffnung (kleiner 10 cm) sind aber chromatisch korrigiert, was Farbmessungen ermöglicht und besitzen keine Störflanken sowie die damit verbundenen Fehler.

Je nach Anwendung kann ein KMP eine Einhausung und zusätzliche Blenden besitzen, um Störungen durch Umgebungs- und Streulicht zu reduzieren. Abbildung 2.9 zeigt einen KMP für die Messung von kleinen Projektionsscheinwerfern. Der KMP besitzt einen Achromaten, welcher die LVK von Objekte mit einer Lichtaustrittsfläche von bis zu 70 mm und einen Winkelbereich von $\pm 20^\circ$ horizontal und $\pm 13^\circ$ vertikal erfassen kann. Blenden, Reflektionswand und Kamera sind in der Messkammer eingefasst.

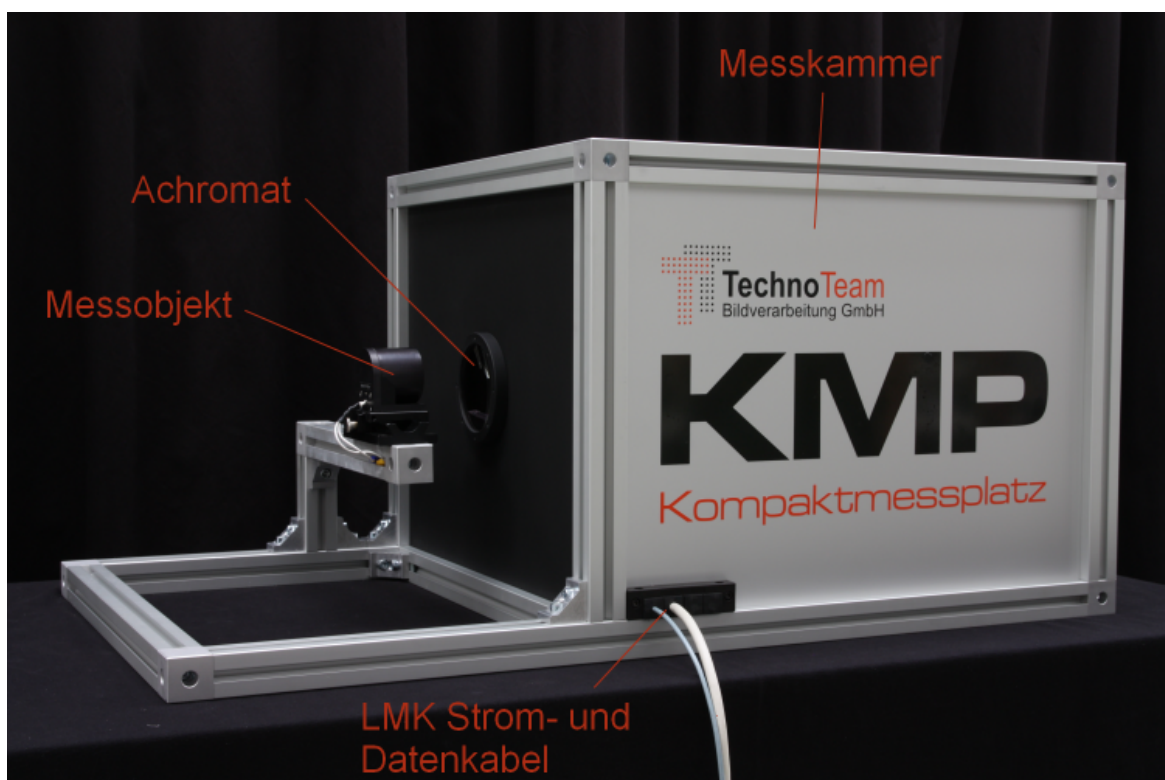


Abbildung 2.9.: KMP der Firma TechnoTeam [www07]

Ein KMP kann optional eine zweite Kammer besitzen. In dieser Proben- oder Objektkammer sind die Halterung und der zu vermessende Scheinwerfer positioniert. Alternativ kann die LMK hier verbaut werden. Zwischen den beiden Kammern befindet sich dann das Abbildungssystem.

2.1.2.3. Imaging Sphere

Es sind verschiedene Abwandlung der zwei vorgestellten Messtechniken zur Indirekten LVK-Messung denkbar. So kann z.B. eine gekrümmte anstatt eine ebene Reflexionsfläche verwendet werden. Auf gekrümmten Flächen sind orts aufgelöste Informationen mit ent-

sprechenden Genauigkeiten im Gegensatz zu integralen Informationen aber nur schwer zu gewinnen. Eine ausführliche Darlegung der Nachteile von gekrümmten Reflexionsflächen ist im Anhang aufgeführt A.2.

Ein Beispiel für einen Messaufbau mit gekrümmter Reflexionsfläche stellt die Imaging Sphere (siehe Abbildung 2.10) dar. Hier ist das Messobjekt mittig unter einer Halbkugel mit etwa 550 mm Durchmesser (alternativ ca. 10 mm) positioniert. Über einen konvexen Spiegel erfasst eine durch eine Öffnung in der Halbkugel schauende Kamera die Intensitätsverteilung auf der Halbkugel. Mit dieser Messtechnik kann die Teil-LVK von kleinere Objekte wie LEDs bestimmt werden. Außerdem ist es möglich Ausschnitte von Displays oder die Reflexionseigenschaften von Materialien zu untersuchen. Abbildung 2.10 zeigt den Messaufbau für eine LED-Messung.

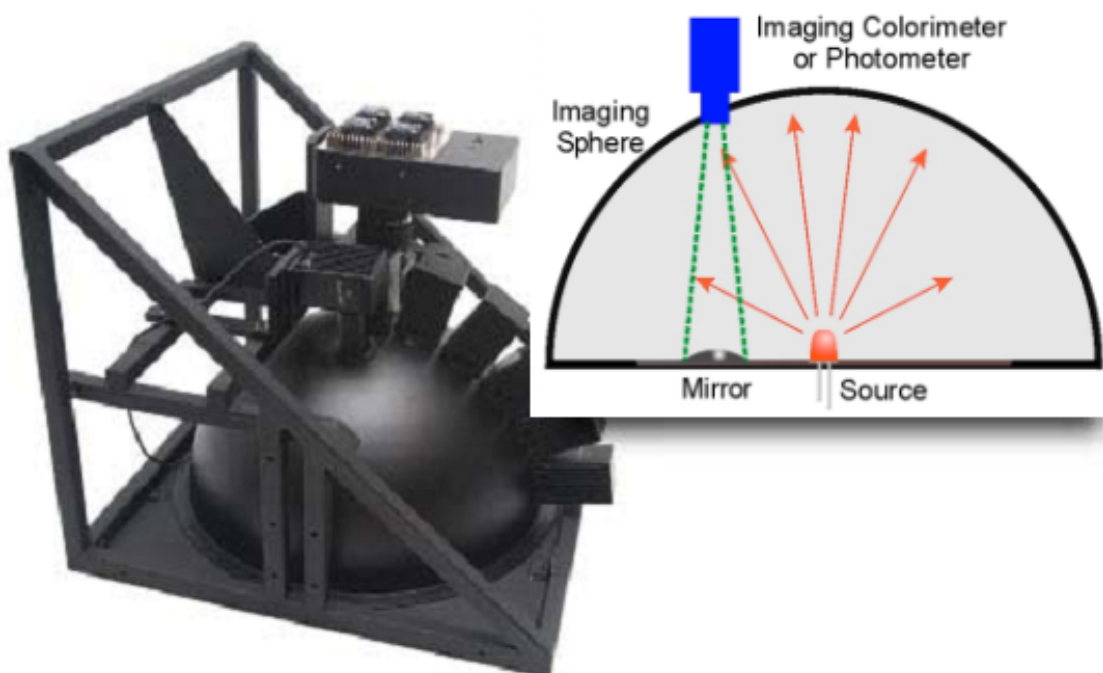


Abbildung 2.10.: Imaging Sphere von Radiant Imaging (links) und Schema einer LED-Messung (oben) [www08] [www09]

2.2. Nahfeld

Im Nahfeld kann eine LVK mit einem Nahfeldgoniophotometer oder mit einer Fourieroptik erfasst werden. Beide Systeme arbeiten mit einem orts aufgelösten Sensor (z.B. CCD) und können den Entstehungsort sowie die Richtung von Strahlen erfassen.

2.2.1. Nahfeldgoniophotometer

Das Nahfeldgoniophotometer besitzt eine Leuchtdichtemesskamera, die um das Messobjekt herum bewegt wird. Die Bewegung kann relativ zum Messobjekt ausgeführt werden und erfolgt auf einer fiktiven geschlossenen Hüllfläche, die durch Drehungen um wenigstens zwei sich senkrecht schneidende Achsen realisiert werden kann. Die Leuchtdichtemesskamera ist zum Gerätezentrum, dem Schnittpunkt der beiden Drehachsen gerichtet. Bei konstantem Abstand zum Schnittpunkt ist die fiktive Hüllfläche eine Kugel. Ihr Radius ist meist wesentlich kleiner als die photometrische Grenzentfernung. Mit der Leuchtdichtemesskamera werden in hinreichend vielen Richtungen (d.h. Punkte auf der Hüllfläche) Leuchtdichtebilder erfasst. [FS09]

Integriert man alle Leuchtdichten gleicher Richtung (ϑ, φ) erhält man, wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, für diese Richtung die Lichtstärke und somit die LVK. Abbildung 2.11 verdeutlicht dieses Prinzip am Beispiel von Richtung 1 - „rote“ Strahlen und Richtung 2 - „grüne“ Strahlen.

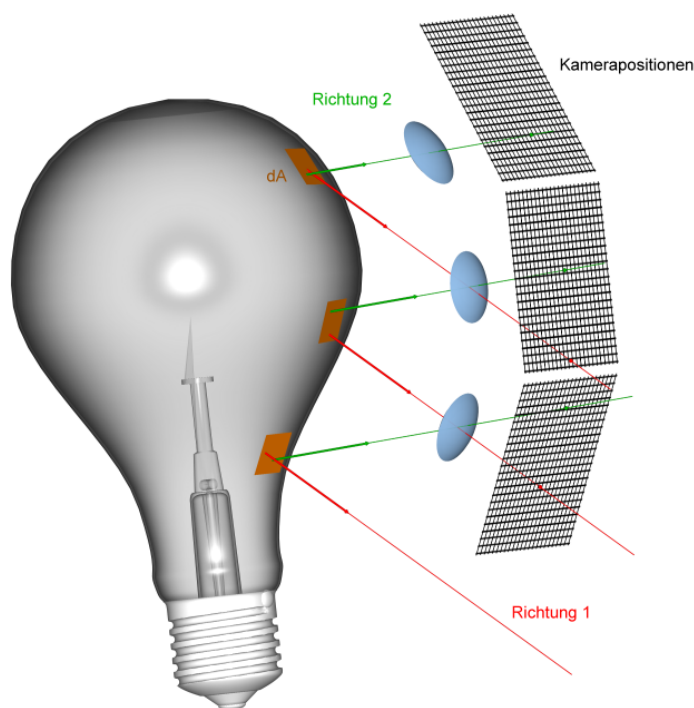


Abbildung 2.11.: Prinzip der LVK-Berechnung aus Lichtstromanteilen [www03]

Nahfeldgoniometer gibt es in unterschiedlichen Größen, je nachdem welche Objekte vermessen werden sollen und welcher Laborraum zur Verfügung steht. Dabei ist entscheidend,

dass das Messobjekt in die von der Kamera beschriebene Hüllkugel passt und mit einem entsprechenden Objektiv möglichst bildfüllend erfasst werden kann. Bei TechnoTeam stehen drei Goniometer-Basismodelle der RIGO801-Serie für Meßobjektgrößen von $6 \times 6 \times 6 \text{ mm}^3$ bis $2000 \times 2000 \times 2000 \text{ mm}^3$ zur Verfügung, die entsprechend den Anforderungen skaliert werden können (siehe Tabelle 2.1).

Anwendung	max. Messobjektgröße	Platzbedarf LxBxH
LED, kleine Lampen	Kugel mit $D = 6 \text{ mm}$ bis 50 mm	$0,6 \times 0,6 \times 0,8 \text{ m}^3$
Lampen, kleine Leuchten	Kugel mit $D = 20 \text{ mm}$ bis 300 mm	$1,3 \times 1,3 \times 1,9 \text{ m}^3$
Leuchten	Kugel mit $D < 2000 \text{ mm}$	$< 4 \times 4 \times 4,9 \text{ m}^3$

Tabelle 2.1.: Goniometermodell der RIGO801-Serie von TechnoTeam

Das kleinste der RIGO-Nahfeldgoniometer ist mit einer Gesamthöhe von etwa 70 cm das LED-Goniometer (siehe Abbildung 2.12). Hier werden die Sensoren auf einer Kreisbahn um das Messobjekt bewegt. Die Drehachse ist dabei die horizontal liegende ϑ -Achse. Die Drehung in φ -Richtung wird durch Drehung des Messobjektes um die vertikale Achse realisiert. Deshalb ist das LED-Goniometer das einzige aus der RIGO-Serie, welches das Messobjekt nicht in absoluter Ruhelage lässt. Allerdings wird das LED-Goniometer bevorzugt für LED-Messungen eingesetzt, wo eine Drehung in der Gravitationsebene keine Wirkung auf die Lichtausstrahlcharakteristik des Messobjektes hat. Als Sensoren kommen beim LED-Goniometer üblicher Weise eine LMK und ein Photoelement zum Einsatz. Alternativ lassen sich auch weiter/andere Sensoren, wie z.B. ein Spektrometer oder eine Farbmesskamera verbauen. In φ -Richtung geht der überstreichbare Winkel von 0° bis 360° . Aufgrund der Halterung für das Messobjekt lassen sich für ϑ Winkel von -140° bis $+140^\circ$ anfahren. [www03] Die beiden großen Goniometer sind in Abbildung 2.13 zu sehen. Bei beiden werden die Sensoren auf einer Kugelfläche um das Messobjekt herum bewegt. Ebenfalls wie beim LED-Goniometer kommen als Sensoren im Minimum eine LMK und ein Photometer zum Einsatz. Aber auch hier können weitere/andere Sensoren (Spektrometer usw.) verwendet werden.



Abbildung 2.12.: LED-Goniometer von TechnoTeam [www03]

Das Lampengoniometer besitzt einen äußeren Trägerrahmen mit einer Höhe von etwas mehr als zwei Metern. Der Theta- und Phi-Rahmen sind in diesem aufgehängt. Dadurch ist ähnlich wie bei dem Kardangoniometer (Vergleich Kapitel 2.1.1.3) ein Vermessen des Messobjektes in unterschiedlichen Brennlagen (α) möglich. Dabei kann in φ -Richtung etwas mehr und in ϑ -Richtung aufgrund der Messobjekthalterung etwas weniger als ein Vollkreis erfasst werden.

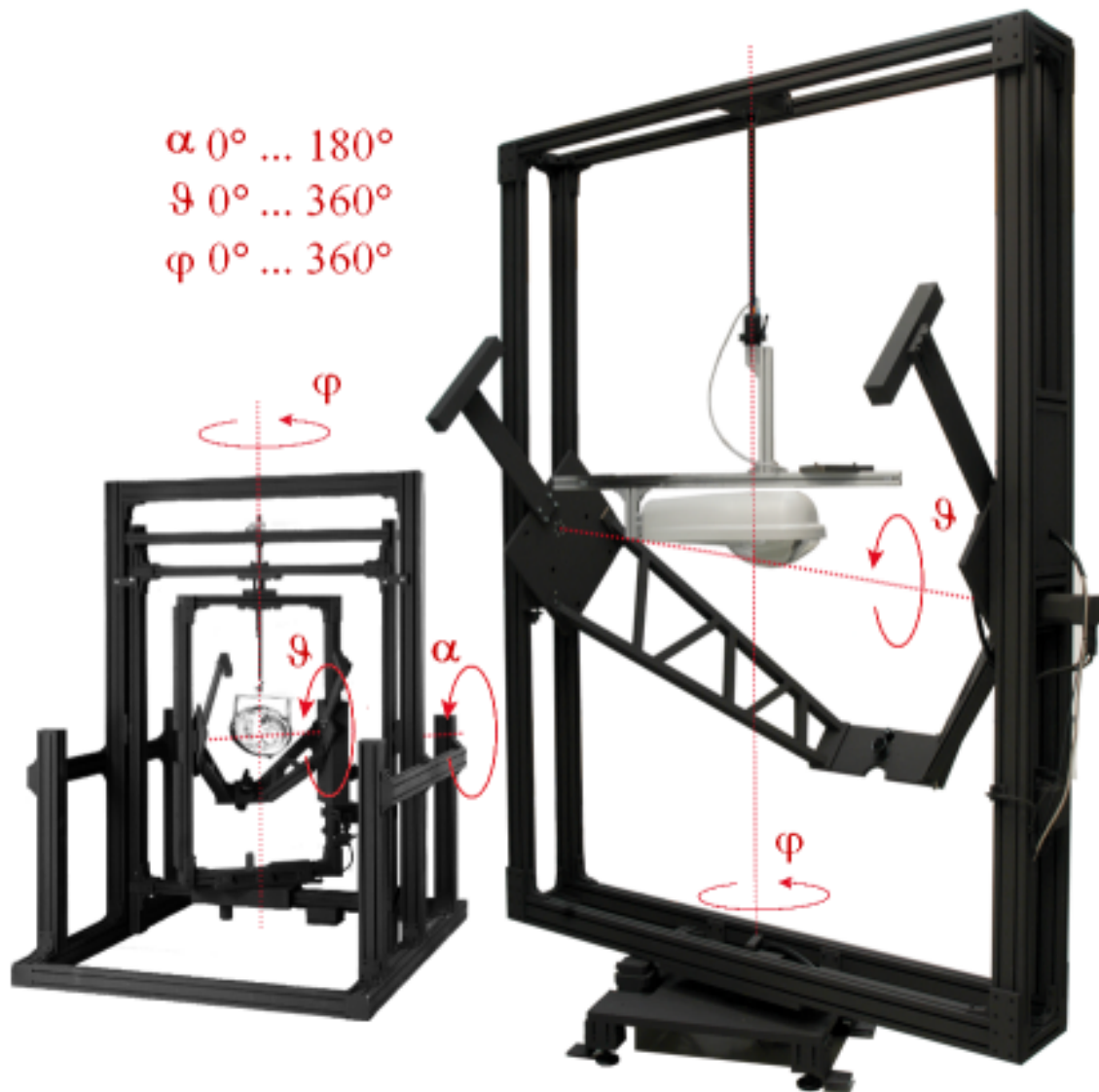


Abbildung 2.13.: Nahfeldgoniometer der Firma TechnoTeam; links Lampengoniometer; rechts Leuchtengoniometer [www03]

Das Leuchtengoniometer ist mit einer Höhe von bis zu 5 m das größte aus der RIGO-Serie. Hier können die Messobjekte in der senkrecht angebrachten Aufhängung fixiert werden. Diese lässt sich wahlweise unten oder oben anbringen, d.h. die Leuchten können hängend oder stehend positioniert werden. Der Erfassungsbereich (ϑ , φ) ist äquivalent zu dem des Lampengoniometers.

Misst man in einem Nahfeldgoniometer kleine Objekte, für die das Photoelement die Grenzentfernung bereits einhält, ist es auch möglich mit dem Photometer direkt die LVK zu messen ohne die Strahlendaten zu ermitteln.

2.2.2. Nahfeld-Fourieroptik

Mittels einer Fourieroptik können Richtungen von Strahlen in eine örtliche Information in einer Ebene (Brennebene) transformiert werden, ähnlich dem Prinzip des KMP. Wenn man als Objektiv ein Konoskop einsetzt, sind dabei Winkel von ca. $\pm 88^\circ$ erfassbar. Darüber hinaus kann mittels einer Irisblende die Größe der Fokusebene eingestellt werden, so dass die Messfleckgröße variabel ist [CIE]. Mit einem weiteren Objektiv (Ausgangsoptik) kann die Ebene mit den örtlich aufgelösten Richtungsinformationen auf einen Sensor (z.B. CCD) abgebildet werden. In *Abbildung 2.14* ist das Prinzip verdeutlicht.

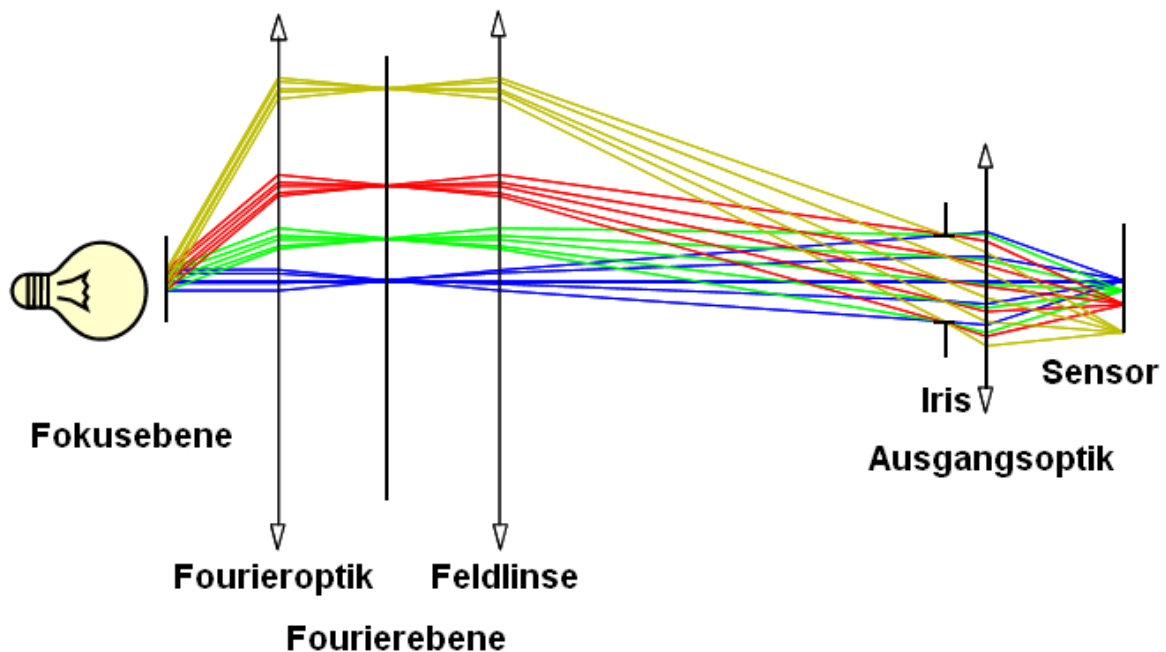


Abbildung 2.14.: Prinzip der Nahfeldmessung mit Fourieroptik [CIE]

Alle Strahlen, die den Messfleck in der Fokusebene durchqueren und Winkel kleiner gleich dem maximal erfassbaren ($\pm 88^\circ$) aufweisen, werden von dem System erfasst. Hat man ein sehr kleines Messobjekt mit entsprechend begrenztem Ausstrahlwinkel, wie z.B. eine LED, kann mit einer einzigen Messung die LVK erfasst werden. Wählt man den Messfleck entsprechend klein, kann das Messobjekt durch eine Translationsbewegung (x,y) vor der Fourieroptik abgerastert werden. Die Summe aller Messungen ergibt dann die LVK und alle Einzelbilder beachtet, ergeben die Strahlendaten des Messobjektes. Auf die gleiche Art können entsprechend größere Messobjekte vermessen werden.

Wie auch bei den Indirekten LVK-Messverfahren und der Imaging Sphere sind auch mit der Nahfeld-Fourieroptik keine Messungen der Vollkugel möglich. Im Gegensatz zu den Nah-

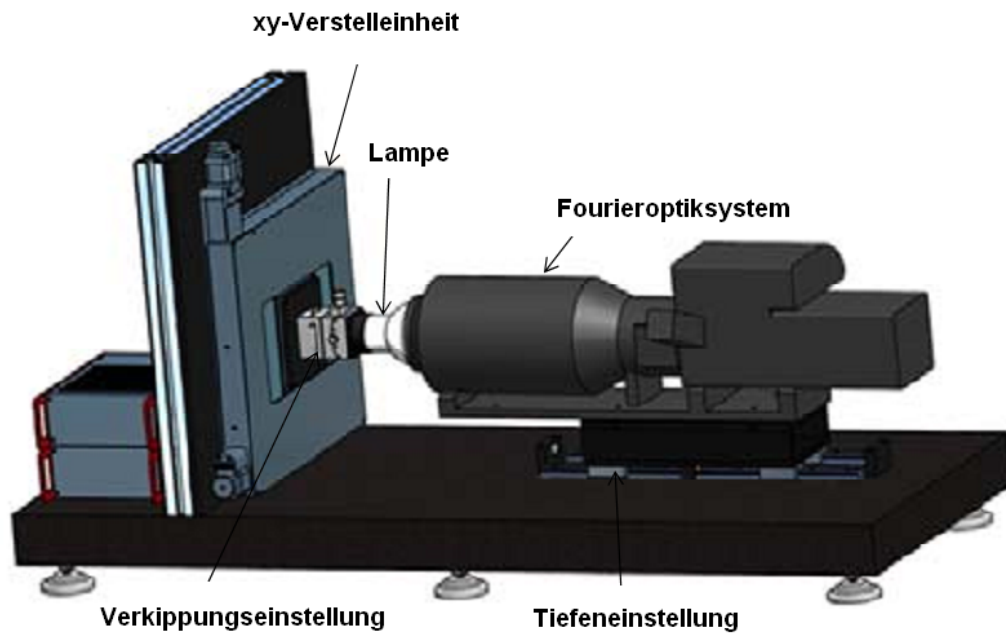


Abbildung 2.15.: Messplatz mit Fourieroptik für Messobjekte bis 150 mm [CIE]

feldgoniophotometern, wo die Winkelauflösung durch die Schrittmotoren begrenzt wird, wird bei der Nahfeldmessung mit Fourieroptik die Winkelauflösung durch die Sensorgröße und den erfassbaren Winkelbereich begrenzt. Bei Verwendung einer Standard-CCD mit etwa 1,3 Megapixeln ergibt sich bei Erfassung von $\pm 88^\circ$ daraus eine Winkelauflösung von $0,18^\circ$. Bei Verwendung einer 11 Megapixel CCD sind es $0,06^\circ$.

3. Gegenüberstellung der Messtechnik

Im vorangegangenen Kapitel 2 wurden verschiedene Messtechniken zur Ermittlung der LVK vorgestellt. Das folgende Kapitel soll aufzeigen, wo die Vor- und Nachteile der einzelnen Messmethoden liegen und damit Hilfestellung bei der Wahl der Messtechnik in Abhängigkeit von der zu bewältigenden Messaufgabe geben. Am Ende dieses Kapitels ist unter 3.2 eine tabellarische Übersicht der Eigenschaften der verschiedenen Messtechniken zu finden.

Die wohl wichtigste Frage vor der Wahl der Messmethode ist: „Welche Information wird benötigt?“ Die verschiedenen Messtechniken stellen entsprechend unterschiedliche Informationen bereit. Benötigt man Strahlendaten, kommt man um die Nahfeldmessung nicht herum. Benötigt man dabei eine Vollkugelmessung oder eine sehr feine Winkelauflösung, kommen nur die Nahfeldgoniophotometer in Frage. Für kleine Objekte, eingeschränkte Winkelbereiche und niedrigere Kontraste ist auch eine Nahfeldmessung mit Fourieroptik realisierbar. Beschränkt man sich auf die LVKs kommen für viele Messaufgaben verschiedene Möglichkeiten in Frage. Kriterien für die Wahl der geeigneten Messtechnik sind z.B. die Größe und Grenzentfernung des Messobjektes, die geforderte Genauigkeit, die Winkelauflösung (Messraaster) sowie der erfassbare Gesamtbereich (relevanter Raumwinkel), die Geschwindigkeit der Messung, der Platzbedarf der Messtechnik bzw. des Messaufbaus und häufige weitere, wie z.B. die Art der Lichtquelle, der Kontrast in der LVK oder einfach nur der Preis des Messsystems.

3.1. Übersicht der Kriterien

Wenn man ein Objekt vermessen möchte, sollten zumindest die Objekteigenschaften bekannt sein. Daraus ergeben sich bereits Einschränkungen für die Wahl der zu verwendenden Messtechnik. Ein wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist die Bewegung des Messobjektes während der Messung. Einige Messobjekte reagieren sehr sensibel auf Lageänderung im Raum (z.B. Leuchtstofflampen, T5). Führt die Lageänderung zu einer Veränderung der Lichtausstrahlcharakteristik die in der selben Größenordnung wie die geforderte Genauigkeit liegt, darf ein solches Messobjekt zwangsläufig während der Messung nicht bewegt werden. Somit kommen dann nur LVK-Messverfahren in Frage, die das Objekt in ruhender Position lassen.

3.1.1. Größe und Photometrische Grenzentfernung des Messobjekts

Wie in Kapitel 1.1 bereits geschrieben fällt für Objekte mit einer homogenen Ausstrahlcharakteristik die Photometrische Grenzentfernung kürzer aus als für komplexere Gebilde. Bei

einer ähnlichen Ausstrahlcharakteristik nimmt mit der Größe des Objektes auch die Photometrische Grenzentfernung zu. Die Grenzentfernung kann entweder berechnet (z.B. auf der Basis von Strahlendaten) oder experimentell ermittelt werden. Für eine Fernfeldmessung muss dann lediglich beachtet werden, dass der Sensor sich mindestens in der geforderten Entfernung befindet (Vergleich Tabelle 3.1 „Messentfernung“). Die Größe des Objektes spielt hier nur in sofern eine Rolle, da sie Einfluss auf die Photometrische Grenzentfernung hat. Die Objekte können also theoretisch eine beliebige Größe haben, werden aber durch praktische Grenzen (z.B. Gerätegröße, -kosten) limitiert. Für die Nahfeldmessung spielt wiederum die Photometrische Grenzentfernung keine Rolle (Vergleich Kapitel 2.2). Das gleiche gilt für den KMP, der durch die Abbildungsoptik theoretisch die Messung im Unendlichen ermöglicht. Für den KMP ist dafür die Größe des Messobjektes direkt ein ausschlaggebender Faktor. Beim KMP gibt es je nach der relevanten Information (z.B. Farbmessung oder Lichtstärke) unter Umständen unterschiedliche Abbildungsoptiken, woraus sich dann Einschränkungen für die maximale Ausdehnung der Lichtaustrittsfläche ergeben.

3.1.2. relevanter Raumwinkel

Es gibt kein Messverfahren, welches mit einem Messaufbau die komplette Vollkugel abfahren und somit das Licht im gesamten Raum erfassen kann, weil zumindest immer die Aufhängung des Messobjektes einen kleinen Winkelbereich blockiert. Da die Messobjekte selbst aber auch mit Sockeln, Halterungen, Stromversorgung usw. versehen sind und dadurch sowieso nicht in den kompletten Raum Licht abstrahlen, spielt das i. d. R. keine Rolle.

Der relevante Raumwinkel kann darüber hinaus dadurch eingegrenzt werden, dass entweder das Objekt nur in einen kleinen Teil des Raums Licht abstrahlt oder weil nur ein Teil des ausgesandten Lichts von Interesse ist. Ersteres ist bei Objekten mit gerichtetem Licht der Fall wie z.B. Halogenspots. Letzteres ist der Fall, wenn nur bestimmte Bereiche der Lichtverteilung in der späteren Anwendung genutzt werden. Das ist z.B. bei Kfz-Scheinwerfern der Fall, wo bei bestimmten Messaufgaben nur der Bereich der Lichtverteilung interessiert, der später die Straße beleuchtet.

In beiden Fällen muss natürlich nur das Licht erfasst werden, was auch von Interesse ist, wodurch die Messdauer bei den scannenden Messverfahren reduziert wird und die Messung mit den Erfassungsbereich begrenzenden Messverfahren überhaupt erst möglich wird.

3.1.3. Lichtquelle

Die Art der Lichtquelle spielt i.d.R. keine Rolle. Lediglich die Sensorik muss für die Erfassung ausgelegt sein. Eine kleine Ausnahme stellt in diesem Zusammenhang der KMP dar. Hier besteht wie bereits in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben, ein komplexer Zusammenhang zwischen Ausstrahlcharakteristik, Abbildungsoptik und Art der Lichtverteilung, weshalb auch die Art der Lichtquelle unter Umständen Auswirkungen auf die Wahl der optimalen Abbildungsoptik hat. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Leistung der Lichtquelle. Sie stellt nicht direkt ein Problem für eine Messtechnik dar. Ab einer bestimmten Leistung entsteht jedoch besonders bei den kompakteren Messsystemen (KMP, Imaging Sphere und Fourier-Nahfeldmessung) ein Wärmeproblem. So ist es z.B. nicht möglich in einem KMP einen

2kW Scheinwerfer zu vermessen. Die genaue Grenze hängt von dem konkreten Aufbau des Messsystems und der Konzentration der Wärme ab. Durch geeignete Hilfsmittel (passive oder aktive Kühlung) lässt sich zudem eine gewissen Menge Wärme abtransportieren und diese Grenze entsprechend verschieben.

3.1.4. relevanter Kontrast

Alle vorgestellten Messverfahren können problemlos homogene Lichtverteilungen erfassen. Sollen jedoch kontrastreiche Verteilungen erfasst werden, spielen verschiedene Faktoren eine Rolle. Heutige Sensoren decken den für hohe Kontraste erforderlichen Dynamikbereich prinzipiell ab. Einzelsensoren realisieren das über unterschiedliche Messbereiche die jeweils mehrere Bit Auflösung haben, orts aufgelöste Sensoren mittels unterschiedlicher Integrations-/Belichtungszeiten. Zusätzlich kann mit Neutralgraufiltern der Intensitätsbereich verschoben werden.

Bei Messverfahren, wo die Messungen schnell hintereinander erfolgen (z.B. scannende Messverfahren), ist es i.d.R. nicht möglich während einer Messung den Messbereich zu wechseln. Dadurch ist der Dynamikbereich dann auf die Messbereichsauflösung beschränkt, was für die meisten Anwendungsfälle aber ausreichend ist.

Ein weiteres Problem ist das Streulicht im Raum. Je höher der relevante Kontrast ist, desto mehr muss darauf geachtet werden, dass bei Messung von den dunklen Bereichen der LVK kein Licht der hellen Bereiche über (Mehrfach-)Reflexion mit erfasst wird. Bei den Fernfeldgoniometern wird das meist durch Blendentuben erreicht. Effizientestes Beispiel hierfür ist das Scheinwerfergoniometer (Vergleich 2.1.1.1). Ist der erfassbare Raumwinkelbereich wenig oder gar nicht eingeschränkt, wie bei den kompakteren Goniometern, muss dafür gesorgt werden, dass die Umgebung ausreichend geschwärzt ist, damit Lichtstrahlen aus hellen Bereichen ausreichend abgeschwächt werden, bevor sie durch Reflexion zum Sensor gelangen.

Für die indirekten Messverfahren kann das Streulicht im Raum durch geeignete Blenden und Schwärzung auf ein vernachlässigbares Maß reduziert werden. Bei der Imaging Sphere ist das aufgrund der Problematik mit gekrümmten Reflexionsflächen nicht möglich. Hier bleibt ein Reststreulicht, welches nur mit Korrekturalgorithmen, die eine exakte Kenntnis der Streulichtzusammenhänge voraussetzen, aus dem Bild heraus gerechnet werden kann. Zusätzlich zu dem Raumstreulicht haben orts aufgelöste Messverfahren das Problem von Streulicht innerhalb des Aufnahmesystems (Objektiv, CCD-Sensor, Filter), welches den Kontrast ebenfalls reduziert. Je nach Objektiv sind zum Teil schon Kontraste größer 1:100 nicht ohne geeignete Korrekturalgorithmen erfassbar. Je nach Korrekturverfahren lassen sich die messbaren Kontraste z.B. um den Faktor 10 vergrößern.

Außer dem an sich vorliegendem Kontrast hat der Gradient zwischen hellen und dunklen Bereich einen Einfluss auf den tatsächlich erfassbaren Kontrast. Das Streulicht in orts aufgelösten Systemen z.B. besteht nicht aus einem einfachen Offset, sondern weist lokale Effekte auf. Helle Bereiche streuen mehr Licht in ihre direkte Umgebung als in weiter entfernte. Somit werden dunkle Bereiche, die sehr nah an hellen Bereichen liegen, stärker überlagert als dunkle Bereiche die weiter entfernt sind. Solche Einflüsse werden in einigen Korrekturverfahren berücksichtigt.

Trotz Korrekturverfahren sind mit orts aufgelösten Messverfahren im Vergleich zu den Einzelsensoren die messbaren Kontraste am geringsten. Bei Kontrasten von 1:1000 sind trotz Korrekturverfahren häufig nur Messunsicherheiten im zweistelligen Prozentbereich zu erreichen, wodurch ihr Einsatz in solchen Bereichen entsprechend eingeschränkt ist.

Liegen dunkle und helle Bereiche sehr nah bei einander, ist der Gradient in der LVK also sehr steil, können auch Einzelsensoren selbst bei guter Abschattung an ihre Grenzen kommen. Da die Photometerköpfe meistens sehr groß sind (Vergleich [Unterabschnitt 2.1.1.1 Leuchtenwender](#)), wirken sie wie ein Boxfilter auf das gemessene Signal, was auch durch kleinere Schrittweiten oder bessere Abschattung nicht korrigiert werden kann.

3.1.5. Reproduzierbarkeit und Genauigkeit

Die Reproduzierbarkeit (Wiederholpräzision, Vergleichpräzision) der vorgestellten Messtechniken ist im Allgemeinen für alle Messaufgaben ausreichend. Bei der Messabweichung und Messunsicherheit hingegen ist das sehr unterschiedlich. Es gibt Messobjekte (im Wesentlichen kontrastreiche), für die sich nach dem jetzigen Stand der Technik die Indirekte- oder auch die Nahfeldmesstechnik nicht gut eignen. Die Messabweichungen lassen sich jedoch nicht pauschalisieren, da diese Größen stark vom Messobjekt und der detaillierten Messaufgabe abhängen (Vergleich [Kapitel 4 Anwendungsbeispiele](#)). Diese Abhängigkeit fällt bei den Fernfeldgoniometern deutlich weniger ins Gewicht.

3.1.6. Winkelauflösung der LVK

Bei den indirekten Messverfahren und der Fourier-Nahfeldmessung ergibt sich die Auflösung aus der Anzahl der Grad pro Pixel. Diese Auflösung kann mehr oder weniger äquidistant sein, je nachdem wie die Abbildung entsteht (Perspektive, Objektivverzeichnung, ebene oder gekrümmte Fläche usw.). Basierend auf dem erfassten Winkelbereich und der Pixelanzahl ergibt sich eine minimale Auflösung. Wird ein größerer Winkelbereich erfasst, reduziert sich die Auflösung entsprechend. Erhöht man die Pixelzahl des Sensors, vergrößert sie sich. In Abhängigkeit davon sind die unterschiedlichsten Auflösungen denkbar. Bei Verwendung einer 1,5 MegaPixel Kamera zur Erfassung eines Winkelbereiches von $\pm 15^\circ$ ergibt sich so z.B. eine Auflösung von ca. $0,02^\circ$ pro Pixel, wie sie durchaus üblich ist (Vergleich [Kapitel 4 Anwendungsbeispiele](#)).

Die Winkelauflösung bei Goniophotometern ergibt sich im Wesentlichen aus dem kleinsten möglichen Verfahrensweg, der häufig bei $0,01^\circ$ liegt. Diese Größe ist meist aber nur theoretisch, da der Verfahrensweg auch Unsicherheiten unterliegt (z.B. Hysterese) und die Größe des Sensorkopfes (Vergleich [Unterabschnitt 3.1.4](#)) die tatsächliche Winkelauflösung ebenfalls beeinträchtigt.

3.1.7. Messdauer

Die LVK kann mit Goniophotometern sequentiell gemessen werden. Die Messungen erfordern je nach Größe des abgescannten Raumwinkels und der Auflösung längere Zeiten von mehreren Minuten bis hin zu Stunden. Bei der Fourier-Nahfeldmessung ist das je nach

Messobjektgröße ähnlich, da auch hier große Objekte entsprechend zeitaufwändig abgescannt werden müssen. Hier liegt der Hauptvorteil der indirekten Messverfahren, denn diese sind in der Lage die Teil-LVK von großen und von kleinen Objekten sogar in Bruchteilen von Sekunden zu erfassen.

3.1.8. Platzbedarf

Der Platzbedarf lässt sich direkt aus den Messentfernungen und Gerätegrößen ableiten. Den meisten Raum benötigt somit das Drehspiegelgoniometer. Danach kommen die anderen Fernfeldgoniometer - Leuchtenwender, Robotergoniometer, Kardangoniometer und Kompaktgoniometer. Die Nahfeldmessgeräte und Indirekten Messverfahren bilden das andere Ende. In Tabelle 3.1 sind die Geräte nach Platzbedarf nummeriert. 1 benötigt dabei den wenigsten und 7 den meisten Platz.

Die KMP-Messtechnik ist aufgrund ihrer kompakten Größe wohl die einzige unter den vorgestellten LVK-Messtechniken, die in einen Produktionsprozess eingebunden werden kann. Die anderen Indirekten Messverfahren können aufgrund der kurzen Messzeiten noch produktionsbegleitend, die Direkten Messverfahren aber nur als Labormesstechnik eingesetzt werden.

3.1.9. Preis

Sowohl die Geräte selbst als auch der für das Messverfahren benötigte Raum verursachen Anschaffungs- und Unterhaltskosten. Große Messgeräte, die zudem viel Raum (Messentfernung) benötigen, sind i.d.R. auch die teureren. Um keine konkreten Zahlen nennen zu müssen, hier eine grobe Abschätzung der Gerätekosten. Von den reinen Messgeräten (ohne Messraum) sind die Indirekten Messtechniken die kleinsten und mit Preisen im 5-stelligen Eurobereich auch die günstigsten. Die Nahfeldmessgeräte bilden das Mittelfeld. Hier reichen die Preise vom 5-stelligen bis in den 6-stelligen Bereich. Auch für die Nahfeldgoniophotometer gilt je größer desto teurer. Ein Fourier-Nahfeldmessgerät ist aufgrund des teuren Spezialobjektivs und der ggf. großen Sensorauflösung trotz des kompakten Maßes entsprechend teurer und liegt vermutlich ebenfalls im 6-stelligen Bereich. Die Fernfeldgoniometer sind die teuersten und siedeln sich alle im 6-stelligen Bereich an. Da das Kardan- und das Robotergoniometer Einzel- bzw. Spezialanfertigungen sind, werden sie wohl die Spitzenreiter sein, dicht gefolgt vom Drehspiegelgoniometer, Leuchtenwender und Kompaktgoniometer. In Tabelle 3.1 sind die Geräte nach Kosten nummeriert. 1 ist dabei am günstigsten und 7 am teuersten.

Weil auch der Raum Geld kostet, werden häufig mehrere Messgeräte im selben Raum betrieben. So werden z.B. in manchen Laboren BV-Messstrecken in vorhanden Goniometermessstrecken eingebaut. Die 10m-Wand vor dem Goniometer wird in dem Fall gleichzeitig als Reflexionswand für den BV-Messplatz verwendet.

3.2. Tabellarische Gegenüberstellung der Messtechnik

Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht der unter Abschnitt 3.1 aufgezählten Kriterien.

	Fernfeld							Nahfeld			
	Leuch- ten- wender	Dreh- spie- gel-	Kom- pakt-	Kardan- Roboter-	BVMP	KMP	Imaging Sphere	LED-	Lam- pen-	Leuch- ten-	Fourier- optik
	Goniophotometer							Goniophotometer			
feste Brennlage	nein	tlw.	tlw.	ja	ja	ja	ja	tlw.	ja	ja	tlw.
Messobjekt- größe	<1 m	<2 m	<20 cm	<30 cm	<1 m	<20 cm	<5 cm	<5 cm	<30 cm	<2 m	<1 m
typ. Mess- entfernung	<30 m	<40 m	<2 m	<3 m	egal; 10 m	egal; 0,5 m	<1 m	egal; ≈10 cm	egal; ≈27 cm	egal; <2 m	egal
Raumwinkel	Vollkugel				$\vartheta \pm 45^\circ, \varphi \pm 45^\circ$		$\pm 85^\circ$	Vollkugel			$\pm 88^\circ$
Leistung	beliebig		Leistung beachten		beliebig	Leistung beachten					
messbarer Kontrast	>1:20.000		<1:20.000		<1:1000		<1:200	<1:500			<1:200
Auflösung	>0,04° abh. von Sensorgr. und -entfernung; 0,01° Schrittweite				0,01° abh. von Sensorgr. und Raumwinkel		0,5° abh. von Sen.gr.	0,1°			0,2° abh. von Sen.gr.
Messdauer	Minuten - Stunden				Sekunden			Minuten - Stunden			
Platzbedarf	6	7	4	5	6-1	2-1	2	1	3	4	1
Preis	5-6	6-7	5	-	1	2	3	3	4	5	4

Tabelle 3.1.: Gegenüberstellung der Messtechniken

4. Anwendungsbeispiele

Nachdem von den verschiedenen Messverfahren die grobe Funktionsweise sowie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede vorgestellt wurden, sollen abschließend einige Beispiele an Messobjekten und die jeweils anwendbaren Messverfahren aufgeführt werden.

4.1. Messung von Leuchten

Leuchten gibt es in den unterschiedlichsten Größen. Auf der einen Seite stellen sie die größten Messobjekte, die künstliches Licht ausstrahlen, dar. Auf der anderen Seite gibt es Leuchten, die kleiner sind als manch eine Lampe. Zur Messung von großen Leuchten, wie Straßenleuchten, Deckenleuchten usw., können Leuchtenwender, Spiegelgoniometer und Nahfeldgoniometer (für Leuchten) eingesetzt werden. *Abbildung 4.1* zeigt eine typische Deckenleuchte eingebaut in ein Nahfeldgoniometer (Vergl. *Abbildung 2.13* rechts).



Abbildung 4.1.: Deckenleuchte (z.B. Bürobeleuchtung) im Nahfeldgoniometer

Zum Messen einer solchen Leuchte sind alle drei Verfahren (Leuchtenwender, Spiegelgoniometer und Nahfeldgoniometer) gleichermaßen geeignet. Ausschlaggebend für die Wahl der Messtechnik sind in dem Fall im wesentlichen Brennweite, Preis und Platzbedarf. *Abbildung 4.2* zeigt das Ergebnis der Messung dieser Leuchte mit dem Nahfeldgoniometer.

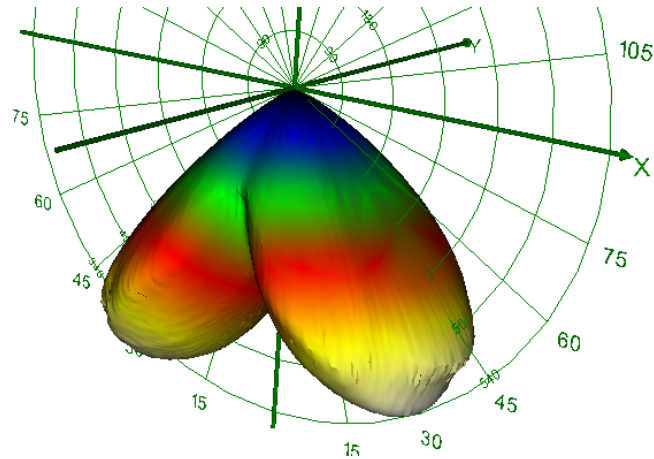


Abbildung 4.2.: LVK der Deckenleuchte aus *Abbildung 4.1*

4.2. Messung von Lampen

Auch Lampen existieren in den unterschiedlichsten Größen. Die großen unter ihnen, wie z.B. Leuchtstofflampen, müssen wie Leuchten gemessen werden. Die kleineren, wie Glühlampen, Halogenleuchtstofflampen, Hochdruckentladungslampen usw., können mit dem Nahfeldgoniometer (Leuchten- oder Lampen-), Kompaktgoniometer, Kardan- oder Robotergoniometer bewertet werden (Beispiel mit Messergebnis siehe *Abbildung 4.3*).

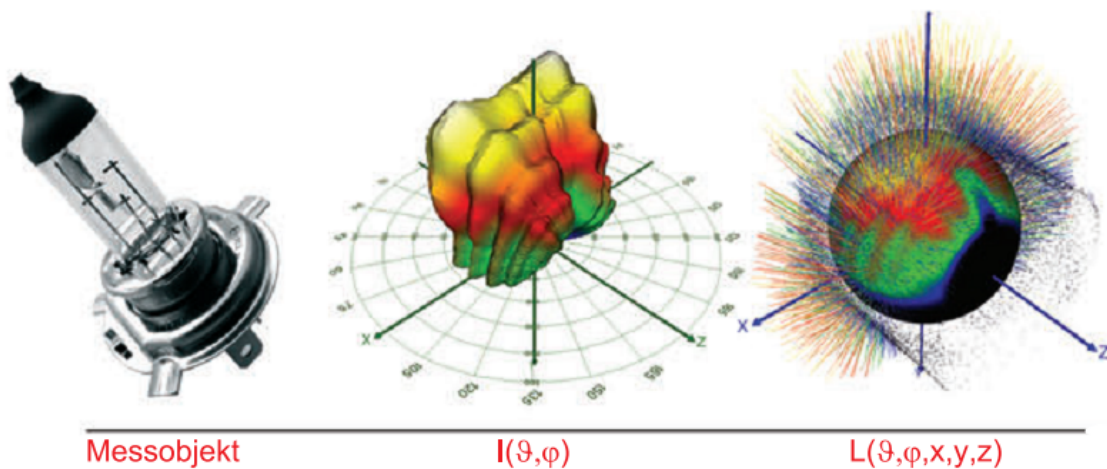


Abbildung 4.3.: Halogenleuchte, LVK und Strahlendaten

Senden die Lampen gerichtetes Licht aus, wie z.B. Kaltreflektorlampen, kann auch eine BV-Messstrecke oder der KMP zum Einsatz kommen. Der Geschwindigkeitsvorteil der letzteren beiden erlaubt sogar den Einsatz in der Produktion.



Abbildung 4.4.: Justageautomat zur Justage von Kaltreflektorlampen

So existieren für Kaltlichtreflektoren z.B. Justageautomaten zur Positionierung der Lampe im Reflektor, um einen bestimmten Halbwertswinkel bei gleichzeitig meist maximaler Lichtstärke im Zentrum zu erreichen. Die Messtechnik muss dazu innerhalb weniger Sekunden etliche LVKs ermitteln und auswerten. Basierend auf den gewonnenen Daten wird der Justageautomat entsprechend gesteuert.



Abbildung 4.5.: KMP-Messaufbau für Justage von Kaltreflektorlampen

Die selbe Messtechnik gibt es auch als manuelle Ausführung für den Labor-/Entwicklungseinsatz (siehe Abbildung 4.5), um z.B. optimale Positionen unabhängig von Justagealgo-

rhythmen zu finden oder neue Produkte auszutesten. Abbildung 4.6 zeigt die gemessene LVK eines solchen Messaufbaus.

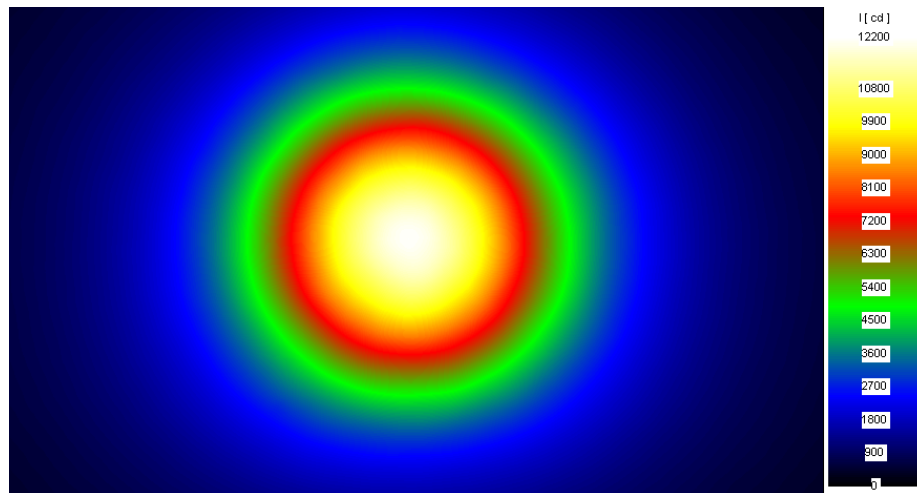


Abbildung 4.6.: LVK; gemessen im KMP-Messaufbau aus Abbildung 4.5

4.3. Messung von Scheinwerfern

Scheinwerfer senden im Gegensatz zu den meisten Leuchten und Lampen (stark) gerichtetes Licht aus. Je nach Art des Scheinwerfers sind fast alle vorgestellten Messtechniken mit Ausnahme der LED-Messtechniken (LED-Goniometer und Imaging Sphere) zur Messung von Scheinwerfern geeignet. Trotzdem ist die Wahl der Messtechnik nicht egal. Die Palette der Scheinwerfer ist sehr vielfältig. Für besonders große und/oder leistungsstarke Scheinwerfer zum Beispiel, ist der KMP nicht mehr verwendbar. Aufgrund des kompakten Baus kann es zu Überhitzungen kommen und die Abbildungsoptik beschränkt die Messobjektgröße (Vergleich Kapitel 2 und 3). Ist der Scheinwerfer dagegen sehr kontrastreich, wie z.B. Abblendlichtscheinwerfer aus dem Kfz-Bereich, bekommt man unter Umständen Probleme bei der Verwendung von Nahfeldgoniometern.



Abbildung 4.7.: Kfz-Projektionsscheinwerfer

Abbildung 4.7 zeigt einen Kfz-Projektionsscheinwerfer ¹. Dieser wird für gesetzlich relevante Messungen, wegen der höheren Genauigkeit im dunklen Bereich der Lichtverteilung, auf einem Leuchtenwendergoniometer mit 25 m Messentfernung gemessen. Für nicht gesetzlich relevante Messungen während der Entwicklung oder auch produktionsbegleitend werden solche Scheinwerfer ebenfalls auf BV-Messanlagen oder in Kompaktmessplätzen vermessen. Hier ist zwar in den dunklen Bereichen mit etwas größeren Messunsicherheiten zu rechnen. Die Messung ist aber um ein Vielfaches schneller. [Abbildung 4.8](#) zeigt die Seitenansicht eines solchen Messraums.

In [Abbildung 4.9](#) ist die LVK des Scheinwerfers zu sehen. Zur besseren Visualisierung des dunklen Bereiches (obere Hälfte) ist die Darstellung 4-fach logarithmisch. Es ist deutlich zu sehen, dass der Kontrast zwischen oberen und unteren Bereich größer 1:1000 ist.

¹Abblendlichtscheinwerfer bestehend aus Ellipsoidreflektor mit Halogenlampe im 1. Brennpunkt und einer Linse im 2. Brennpunkt; Lichtaustrittsfläche ca. 70 mm

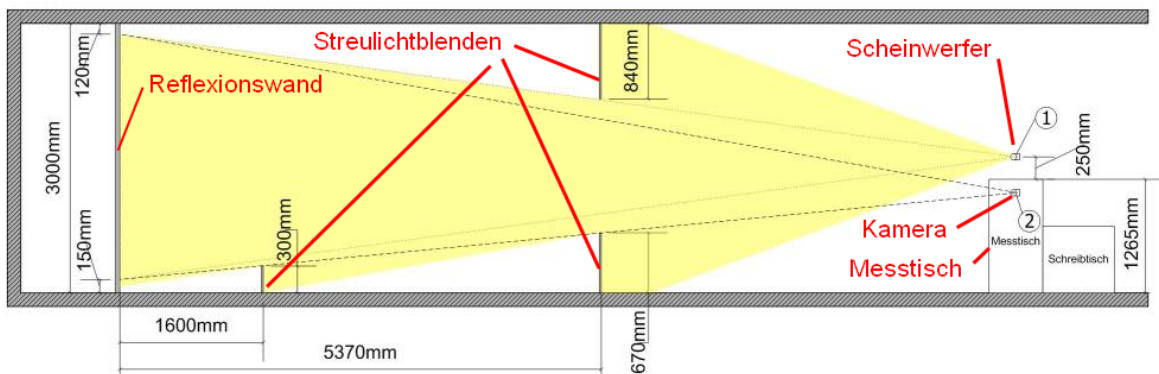


Abbildung 4.8.: BV-Messplatz Seitenansicht; vollständiger Grundriß siehe Abbildung A.4

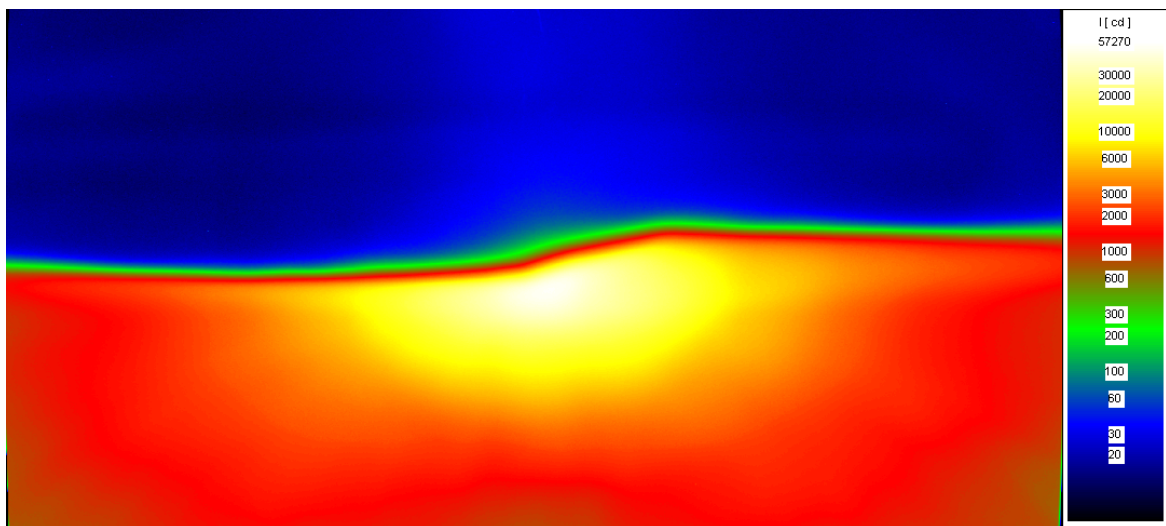


Abbildung 4.9.: LVK des Projektionsscheinwerfers; 4-fach log.

4.4. Messung von LED

LEDs sind die geometrisch kleinsten künstlichen Lichtquellen. Unter den SMD-LEDs sind einige mit bloßem Auge kaum noch zu erkennen. Die größeren unter den LEDs sind die so genannten High-Power LEDs. Eine solche ist in [Abbildung 4.10](#) zu sehen.



Abbildung 4.10.: High-Power LED

Einzelne LEDs können mit dem LED-Goniometer, der Fouriermesstechnik, der Imaging Sphere, dem BV-Messplatz und zum Teil auch mit dem Lampen- und Leuchtgoniometer gemessen werden. Die LVK der in [Abbildung 4.10](#) dargestellten LED ist in [Abbildung 4.11](#) zu sehen.

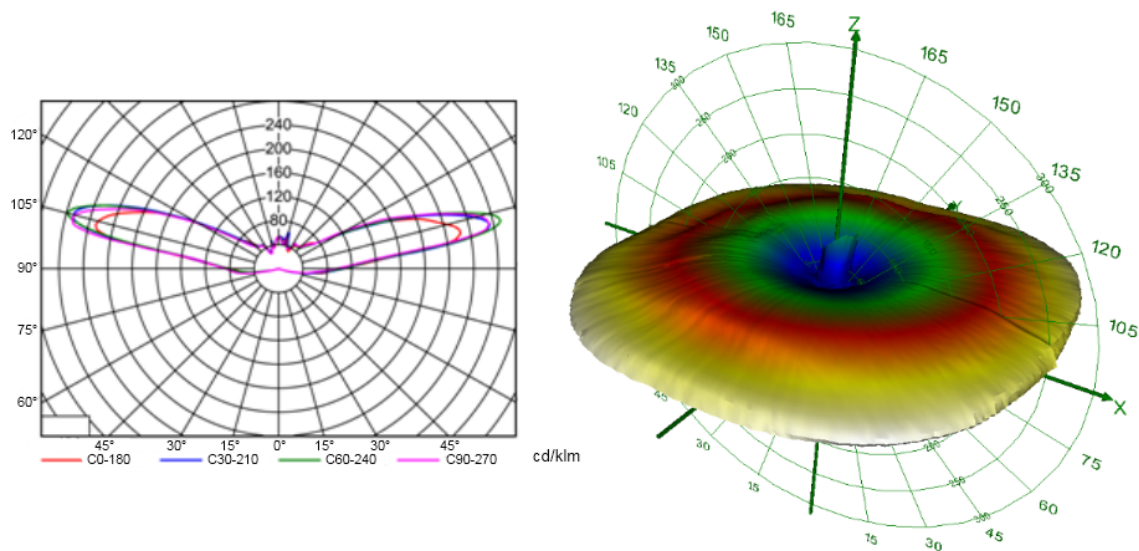


Abbildung 4.11.: LVK der High-Power LED; links - Ebenendarstellung, rechts - 3D

LEDs sind sehr flexible und werden häufig in Baugruppen verbaut. Diese können sehr groß ausfallen und müssen dann entsprechend mit den größeren Messgeräten gemessen werden.

A. Anhang

A.1. Robotergoniometer

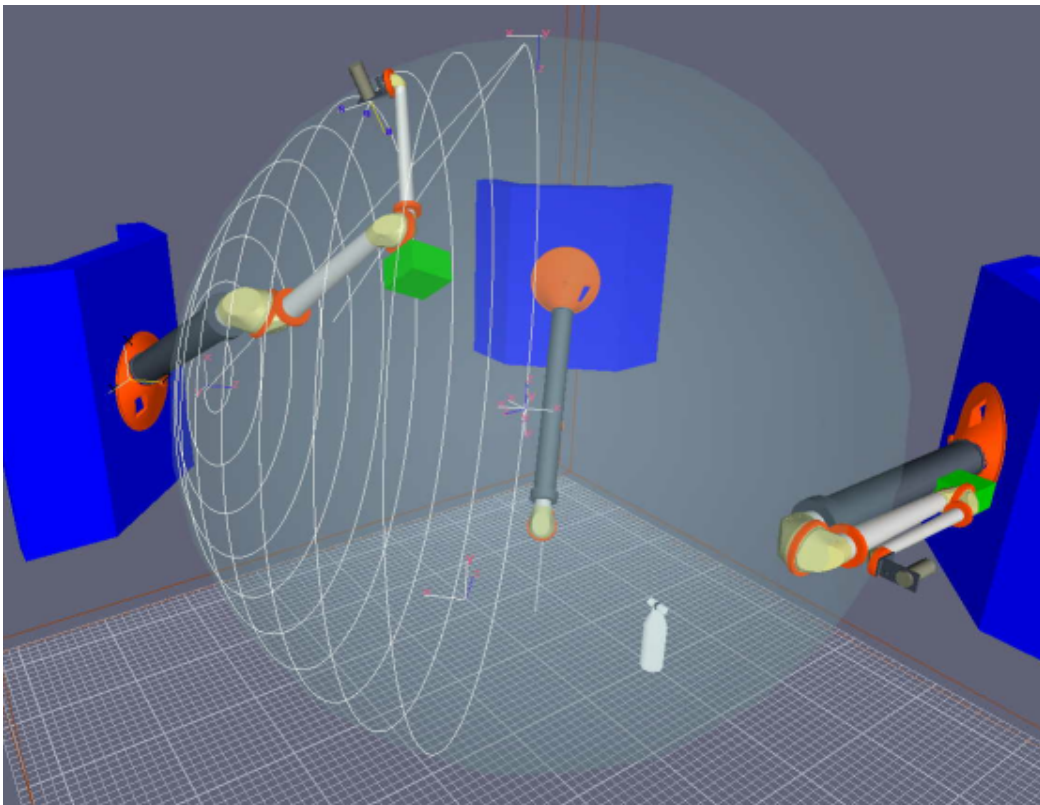


Abbildung A.1.: Schema Robotergoniometer der PTB[[Lin08](#)]

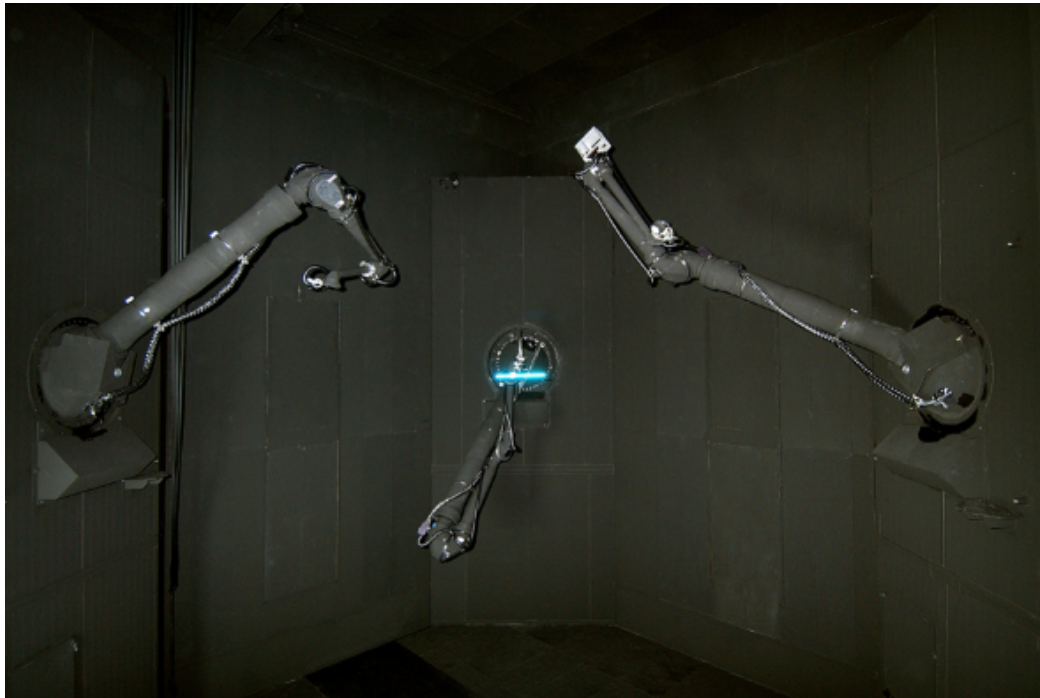


Abbildung A.2.: Ansicht Robotergoniometer der PTB [Lin08]

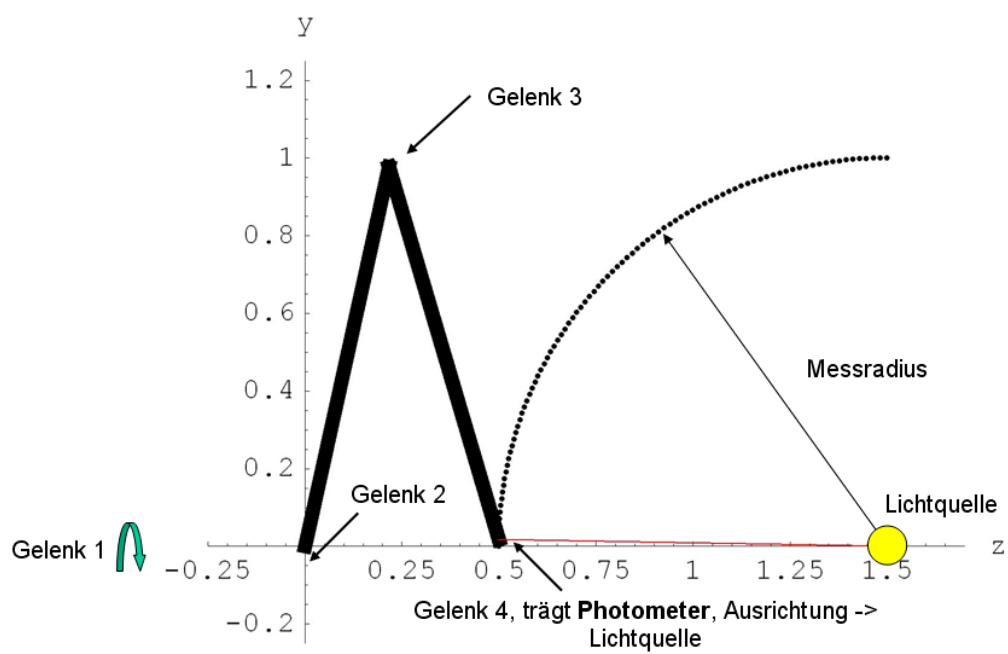


Abbildung A.3.: Funktionsprinzip eines Roboterarms [Lin08]

A.2. Messung auf gekrümmten Flächen

Hauptnachteil der Messung auf gekrümmten Flächen ist die Mehrfachreflexion. Da die Wand diffus reflektierend ist, reflektiert jedes Flächenelement der Wand Licht in den kompletten Halbraum vor sich. Meistens sind die Reflexionsflächen weiß (z.B. ρ 0,9). Das bedeutet dass 90% des zur Wand gestrahlten Lichtstroms von der Wand in den Raum zurück und somit auf alle anderen Flächen (Seitenwände, Decke Fußboden) reflektiert wird. Bei einer ebenen Projektionswand kann Licht nur durch Mehrfachreflexion über die anderen Flächen auf die Wand zurückgelangen. Sind diese ausreichend dunkel (ρ ca. 0,1), reduziert sich das mehrfach reflektiertes Licht auf ein vernachlässigbares Maß. Ist die Wand jedoch sphärisch, kann sie auf sich selber reflektieren. Die dadurch entstehenden Fehler werden besonders groß, wenn größere Winkelbereiche realisiert werden sollen oder bei Abblendlichtverteilungen, da dort die eine Hälfte der Wand um ein Vielfaches heller ist als die andere. Im Aktivbereich einer Abblendlichtverteilung sind etwa 98% des Gesamtlichtstroms, im Passivbereich die restlichen 2%. Bsp. (worst case - Abschätzung): In einem Messraum von etwa 6 m Breite, 3 m Höhe und 10 m Länge werden bei einer ebenen Messwand in den Passivbereich (2%) 0,3% des Ausgangslichtstroms reflektiert. Das entspricht einem Offset von 15% bezogen auf den eigentlichen Passivmesswert. Durch entsprechende Blendenanordnungen kann dieser Wert weiter reduziert werden. Bei einer sphärischen Messwand würde ein Anteil von über 3% in den Passivbereich reflektiert werden, was einem Offset von mehr als 150% entspricht. Darüber hinaus ist es nicht möglich mit Blenden diese direkte Reflexion zu verhindern.

Bereits ebene Wände sind bei entsprechender Größe schwieriger zu realisieren. Eine Messwand mit vergleichbarer Größe und Toleranz sphärisch zu bauen ist um ein Vielfaches aufwendiger und damit auch teuer.

A.3. BV-Messplatz

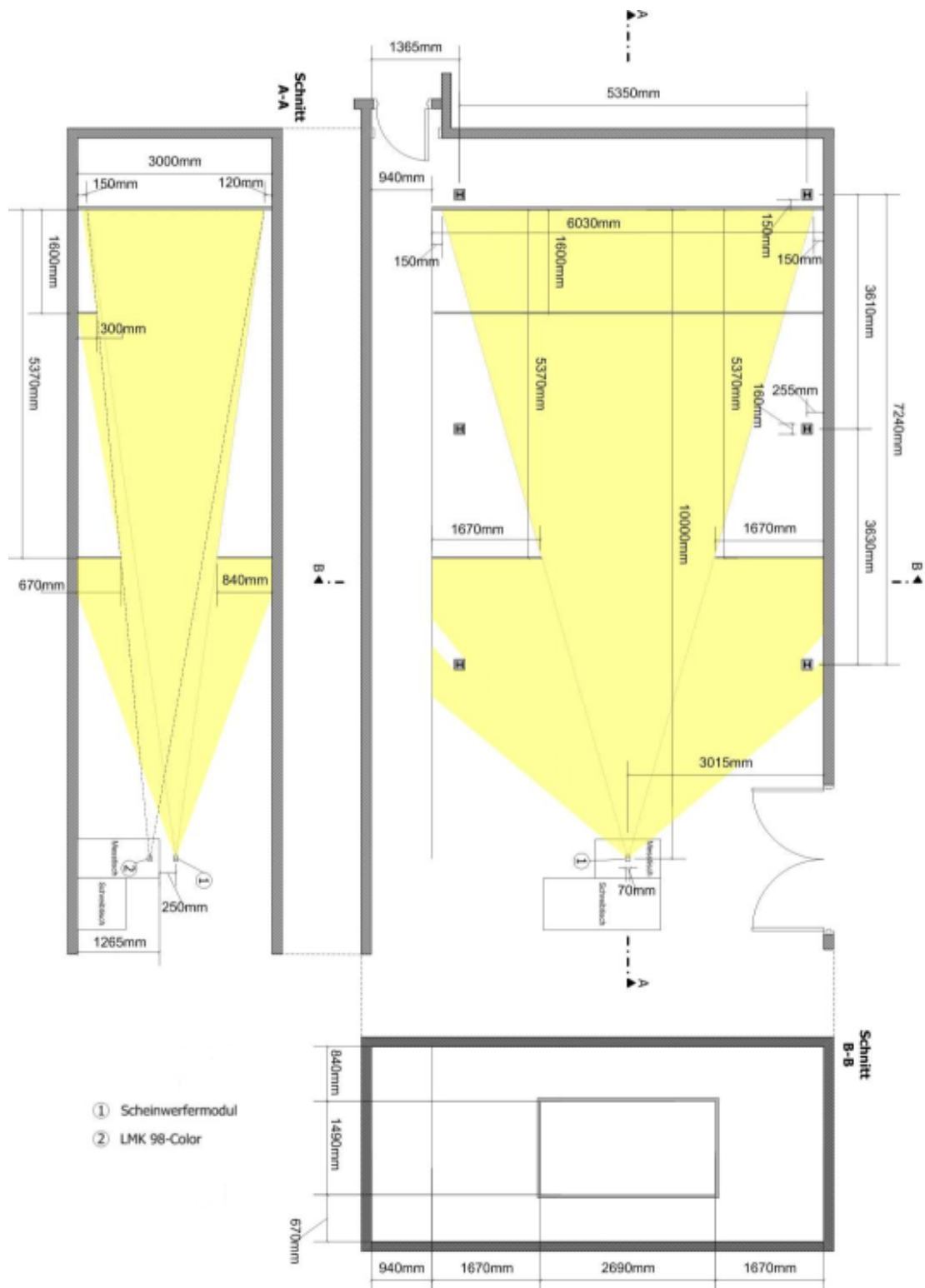


Abbildung A.4.: Grundriß, Aufriß eines BV-Messplatzes

Literaturverzeichnis

- [CIE] CIE: *PPROCEEDINGS of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency"*, CIE x035:2010. Wien : CIE
- [FS09] FRANZ SCHMIDT, PD Dr.-Ing. habil.: *Nahfeldgoniophotometer: Messmethode und Geräteeigenschaften*. 2009. – Normenvorschlag DIN FNL3
- [Hen94] HENTSCHEL, H.-J.: *Licht und Beleuchtung*. Hüthig, 1994
- [Lin08] LINDEMANN, Matthias: *Photometrieseminar der PTB*. 2008. – Goniophotometrie
- [Mar97] MARX, Prof. Dr.-Ing. P.: *Neue Goniophotometer für Lichttechnische Laboratorien*. Fachhochschule Berlin, Fachbereich Elektrotechnik, 1997
- [Rie03] RIEHLE, Fritz: *PTB Mitteilungen 113, Heft 4*. PTB, 2003
- [Sch05] SCHWANENGEL, Christian: *Analyse und Qualifizierung von Leuchtdichtemessmethoden und Vergleich zu Beleuchtungsstärkemessungen bei Kfz-Scheinwerfern*. TU-Ilmenau, 2005
- [www01] www01, FH M. (Hrsg.): *2007_vorlesung-studenten.pdf*. Version: 01. http://www.physik.fh-mannheim.de/homepages/kni/lehre/e/lit/2007_vorlesung-studenten.pdf, Abruf: 10. Nov. 2009
- [www02] www02, LMT B. (Hrsg.): *plux2*. Version: 02. <http://www.lmt-berlin.de/en/plux2.html>, Abruf: 29. Dez. 2009
- [www03] www03, TechnoTeam (Hrsg.): *web*. Version: 03. <http://www.technoteam.de>, Abruf: 29. Dez. 2009
- [www04] www04, Optronik Berlin G. (Hrsg.): *web*. Version: 04. <http://www.optronik.de/history.shtml>, Abruf: 16. Feb. 2010
- [www05] www05, Faktor Licht 1-2007 (Hrsg.): *web*. Version: 05. http://www.faktor.ch/pdf/21/36_38.pdf, Abruf: 16. Feb. 2010
- [www06] www06, LightLab I. (Hrsg.): *web*. Version: 06. http://www.lsa.com.au/downloads/brochure_R100.pdf, Abruf: 16. Feb. 2010
- [www07] www07, TechnoTeam BV G. (Hrsg.): *web*. Version: 07. http://www.technoteam.de/produkte/index_ger.html, Abruf: 19. Feb. 2010
- [www08] www08, Radiant I. (Hrsg.): *web*. Version: 08. <http://pdf.directindustry.de/pdf/tab/imaging-sphere.html#sePDF>, Abruf: 19. Feb. 2010

- [www09] www09, LightLab I. (Hrsg.): *web*. Version: 09. <http://www.sphereoptics.de/Englisch/Products/09/BRDF&BTDF%20measurements.pdf>, Abruf: 19. Feb. 2010