

Planung zur Modernisierung der Messwertaufnahme für die Messeinrichtung zur Bestimmung bidirektionaler Kennzahlen

Karl-Wilhelm Gutjahr, Stefan Gramm, Stephan Völker

Mit der Messeinrichtung zur Bestimmung bidirektionaler Kennzahlen können an der TU Berlin Tageslichtsysteme analysiert werden. In Abbildung 1 sind die wichtigsten Komponenten der Messanlage und das verwendete Koordinatensystem schematisch dargestellt. Das Tageslichtsystem wird dazu in der räumlichen Mitte der im Durchmesser 6 m großen Anlage mit Hilfe eines Probenhalters fixiert und kann unter jedem sinnvollen Azimut- und Höhenwinkel (α_1 bzw. γ_1) beleuchtet werden.

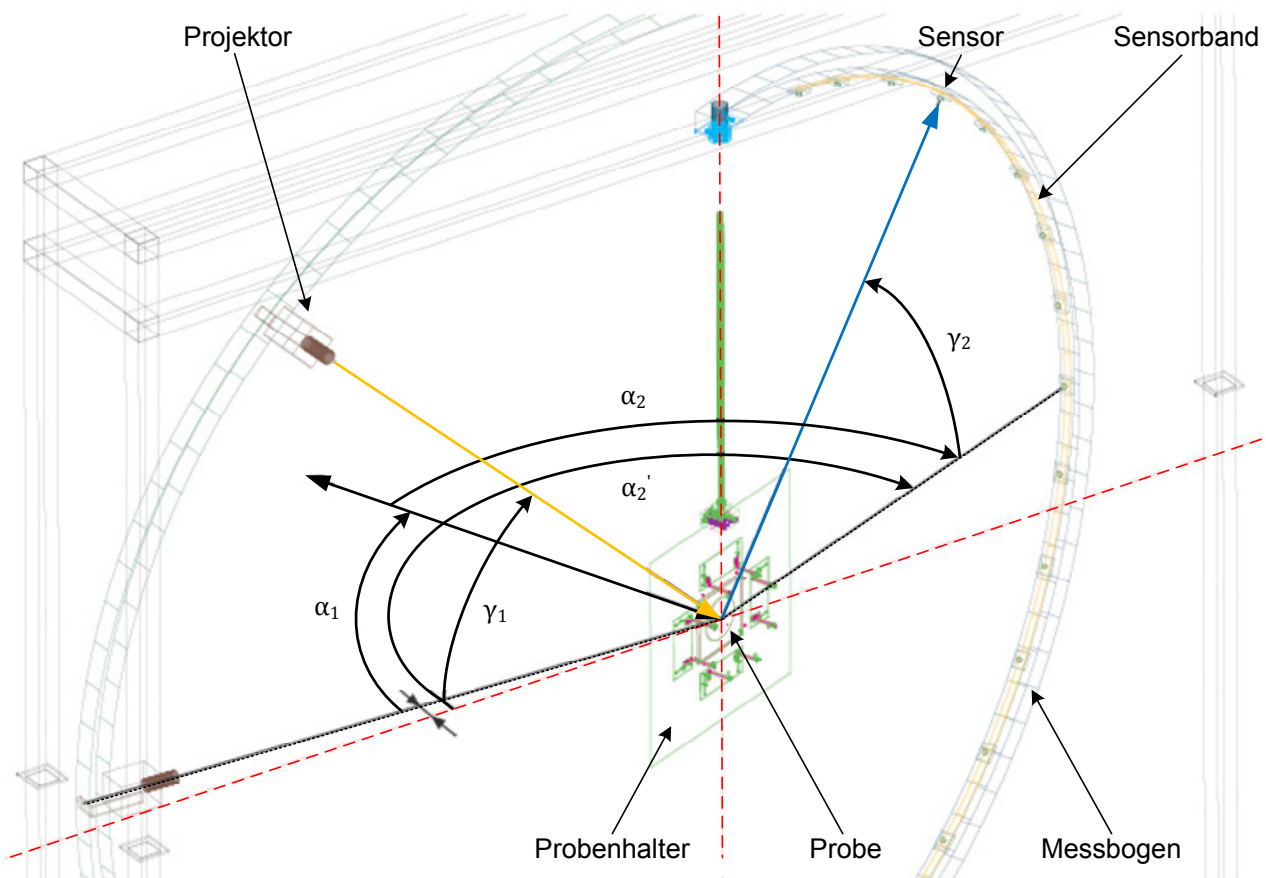


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Messeinrichtung mit ihren Hauptkomponenten und dem zugrunde liegenden Koordinatensystem
Quelle: [Thiel05]¹

Insgesamt sind 18 Sensoren auf dem Sensorband befestigt und können gemeinsam um bis zu 10° verschoben werden, wodurch der Höhenwinkel auf der Empfängerseite (γ_2) variiert werden kann. Durch eine Drehung des Messbogens kann jeder Azimutwinkel (α_2)

¹ Die Originalgrafik wurde mit Zustimmung des Autors überarbeitet.

erreicht werden. Somit lässt sich jeder Punkt auf einer um das Tageslichtsystem aufgespannten imaginären Kugeloberfläche vermessen.

Mit dem Messsystem wird die räumliche Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten (q) bestimmt, der nach [DIN5031] definiert ist als

$$q = \frac{L}{E} \left[\frac{cd}{m^2 lx} \right] \quad (1)$$

und somit das Verhältnis zwischen der von einer Lichtquelle auf einer Probe erzeugten Beleuchtungsstärke (E) und der von dieser Probe ausgestrahlten Leuchtdichte (L) beschreibt. Die Empfänger der Sensoren liefern in Abhängigkeit von der auf ihrer Fläche vorherrschenden Beleuchtungsstärke einen Fotostrom, der anschließend von einer zwei-stufigen Schaltung in eine Spannung gewandelt wird. Dabei verhält sich die Ausgangsspannung der Sensoren ($U_{Empfänger}$), die Werte zwischen ± 13 V annehmen kann, innerhalb des Bereichs von 0,01 lx bis 200 lx linear zu der Beleuchtungsstärke. Unter Berücksichtigung der geometrischen Anordnung ergibt sich aus Gleichung (1)

$$q(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) = \frac{1}{E_0} \cdot \frac{K \cdot r^2}{A_{Probe}} \frac{U_{Empfänger}}{\cos \alpha_1 \cos \gamma_1 \cos(180 - \alpha_2) \cos \gamma_2}. \quad (2)$$

Die Beleuchtungsstärke (E_0) wird mit einem Luxmeter bei senkrechtem Lichteinfall gemessen. Der konstante Faktor (K) wird über ein Transmissionsnormal bestimmt. Der Radius der Messanlage (r) sowie die leuchtende Probenfläche (A_{Probe}) sind ebenso wie die verschiedenen Winkel bekannt. Durch eine grafische Darstellung der räumlichen Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten, wie in Abbildung 2 beispielsweise gezeigt wird, lässt sich die Lichtlenkung von Tageslichtsystemen visualisieren. So wird vom untersuchten Lamellensystem ein Teil des Lichts in Richtung Zimmerdecke reflektiert, was auch bei den üblichen Anwendungen so gewünscht wird. Allerdings wird auch ein erheblicher Anteil derart in den Raum gelenkt, dass mit direkter Blendung zu rechnen ist. Zudem kann der Leuchtdichtekoeffizient nach [Kaase07] zur Berechnung des Transmissionsgrades des Tageslichtsystems (τ) herangezogen werden

$$\tau(\alpha_1, \gamma_1) = \int_{\alpha_2=\frac{\pi}{2}}^{\frac{3}{2}\pi} \int_{\gamma_2=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} q(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) \cdot |\cos(\alpha_2)| \cdot \cos^2(\gamma_2) d\gamma_2 d\alpha_2. \quad (3)$$

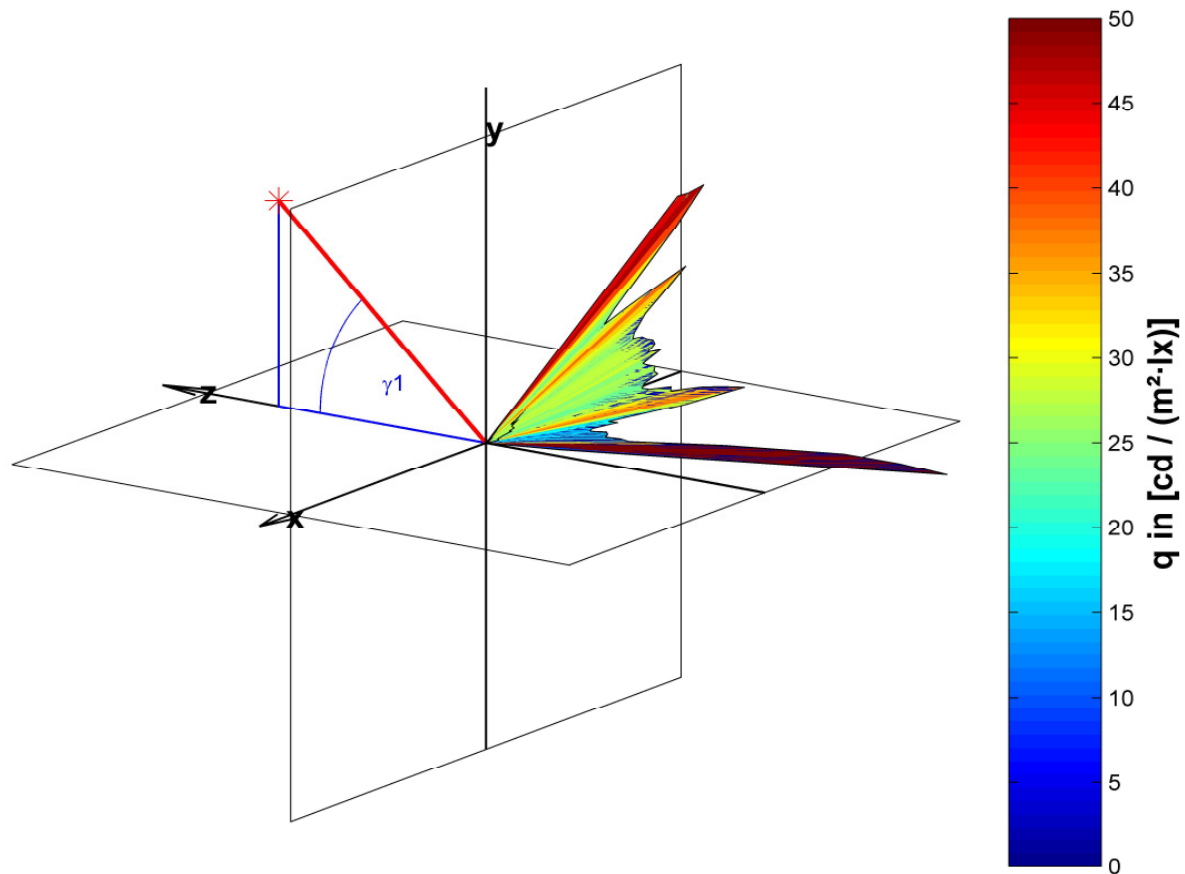


Abbildung 2: Räumliche Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten für $\alpha_1 = 0^\circ$ und $\gamma_1 = 42^\circ$

Beim bislang verwendeten Messsystem werden die Ausgangsspannungen der 18 Sensoren, die über einen Multiplexer nacheinander ausgewählt werden, von einem Digitalmultimeter gemessen. Der 22 Bit Analog-Digital-Umsetzer des Multimeters arbeitet nach dem zeitintensiven Doppelintegrations-Verfahren (Dual Slope Integration), wodurch eine sehr hohe Genauigkeit erreicht wird. Die lange Umsetzungsdauer des Analog-Digital-Umsetzers bedingt neben dem langsamen Schalten des Multiplexers und der zeitintensiven Softwareverarbeitung, dass das Messsystem zum Auslesen von allen 18 Sensoren mehrere Sekunden benötigt, währenddessen der Messbogen in der jeweiligen Position verharren muss. So werden für eine präzise Bestimmung der räumlichen Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten mehrere Stunden benötigt.

Eine Modernisierung der Messtechnik soll die Messzeit stark verkürzen, so dass im Idealfall während der Bewegung des Messbogens gemessen werden kann. Dabei muss eine hinreichend genaue Auflösung der Ausgangsspannungen der Sensoren, die in einem Bereich von 0,1 mV bis 10 V liegen kann, gewährleistet sein. Messungen an der bisherigen Messanlage haben ergeben, dass die Ausgangsspannung mit einem weißen Rauschen, das eine Standardabweichung von zirka 1 mV aufweist, überlagert ist. Dieses

Rauschen kann zum größten Teil durch eine Mittelwertbildung beseitigt werden.² So sind etwa 100 Einzelmessungen notwendig, damit der arithmetische Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% der tatsächlichen Ausgangsspannung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,25$ mV entspricht. Für diese Anforderungen sollte ein Analog-Digital-Umsetzer mindestens eine Auflösung von 16 Bit bei einem Messbereich von 0 V bis 10 V haben.

Eine Erfassung der Messwerte bei bewegtem Messbogen kann mit einer parallelen Datenerfassung, bei der jeder Sensor über einen eigenen Analog-Digital-Umsetzer verfügt, realisiert werden. Diese Maßnahme ist jedoch mit hohen Kosten verbunden. Eine Realisierung mit einer schnellen sequentiellen Datenaufnahme kann hingegen eine günstigere Alternative darstellen. In beiden Fällen ist die richtige Zuordnung der Messdaten zur jeweiligen Messposition wichtig, um eine korrekte räumliche Verteilung des Leuchtdichtekoeffizienten sicher zu stellen.

Beim Messen, während der Messbogen in Bewegung ist, treten zwei grundsätzliche Probleme auf. Erstens kann das Messsystem nicht ständig mit der Motorsteuerung kommunizieren und die aktuelle Position abfragen. Somit können Messwerte nur näherungsweise einer Messposition zugeordnet werden. Zweitens ist ein einzelner Messwert bei einem mit Rauschen belasteten Signal wenig genau, weshalb eine Mittelwertbildung aus den bereits erwähnten 100 Messdaten notwendig ist. Zu jeder Messposition werden also 1.800 Einzelmessungen benötigt. Bei einer parallelen Datenerfassung ist die korrekte Zuordnung weniger kritisch, da alle Messkanäle zeitgleich abgefragt werden. Dahingegen hat die Reihenfolge, in der die Sensoren ausgelesen werden, bei der sequentiellen Erfassung darauf einen Einfluss. Die Reihenfolge kann dabei fest sein oder immer wieder an die aktuelle Situation angepasst werden; letzteres wird im Folgenden als Maskierung bezeichnet. Das folgende Beispiel soll das Konzept detailliert erklären und seine Vorteile herausarbeiten.

Tabelle 1 gibt eine typische Messung mit Messsignalen wieder, die zum Teil deutlich über dem Dunkelspannungsniveau von 0,1 mV liegen. Den einzelnen Kanälen wird nun eine Priorität zugeordnet, die sich an der Amplitude des Messsignals orientiert. Je größer die gemessene Spannung ist, desto höher ist die Priorität des Sensors. In Tabelle 2 ist diese Zuordnung dargestellt. Bei der Messung wird nun der Messkanal mit der höchsten Priorität möglichst nah an der dazugehörigen Messposition ausgelesen. Dabei werden für jeden Sensor 50 Messwerte vor dem Erreichen der Messposition und 50 danach erfasst. Aus allen Einzelmessungen wird dann der arithmetische Mittelwert gebildet. Diese Aufteilung in zwei Messblöcke bewirkt, dass der Mittelwert eine lineare Interpolation der Daten darstellt. Im Vergleich zu einer Methode, bei der alle Einzelmessungen auf einmal durchgeführt

² Durch das Doppelintegrations-Verfahren wird die analoge Spannung über einer einstellbaren Zeitspanne, der Integrationsdauer, integriert. Dabei bildet das bislang verwendete Digitalmultimeter automatisch den arithmetischen Mittelwert aus dem analogen Eingangssignal.

werden, können so auch deutliche Änderungen des Messsignals besser antizipiert werden. Eine Aufteilung in zwei Messblöcke verbessert folglich die Erfassung der Beleuchtungssituation für alle Sensoren. In Abbildung 3 ist die Maskierung für das Beispiel dargestellt.

Tabelle 1: Messkanal und Messwert

Kanal	Messwert	Kanal	Messwert
1	-0,0001	10	0,2242
2	0,0003	11	0,4905
3	0,0005	12	0,6592
4	0,0006	13	0,0507
5	0,0003	14	0,0201
6	0,0009	15	0,0060
7	0,0033	16	0,0032
8	6,3237	17	0,0010
9	0,0013	18	0,0006

Tabelle 2: Priorität der Messkanäle

Priorität	Kanal	Priorität	Kanal
1	8	10	9
2	12	11	17
3	11	12	6
4	10	13	18
5	13	14	4
6	14	15	3
7	15	16	2
8	7	17	5
9	16	18	1

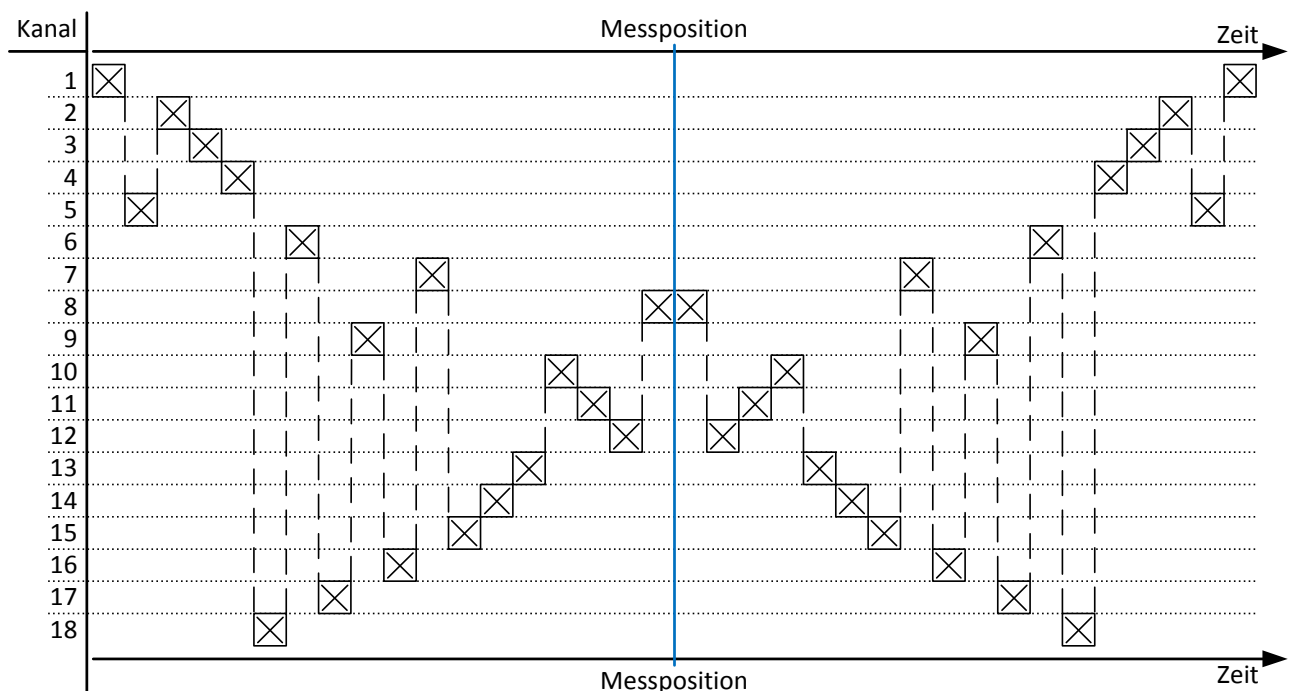


Abbildung 3: Maskierung der Messkanäle bei einer bestimmten Messposition

Mit „X“ wird der Zeitpunkt bzw. die Position bezeichnet, zu dem bzw. zu der die 50 Einzelmessungen vom entsprechenden Sensor ausgelesen werden.³ Der Kanal mit den höchsten Messwerten – in diesem Fall die Kanäle 8, 10, 11, 12 – werden so in

³ Die Schaltdauer des Multiplexers wird gegenüber der Messdauer für 50 Einzelmessungen als vernachlässigbar angenommen.

unmittelbarer Nähe zur Messposition abgefragt, wodurch die Beleuchtungssituation für diese Raumkoordinaten besonders exakt erfasst wird. Allerdings geschieht dies auf Kosten der Sensoren mit einer geringen Priorität, die jedoch bei einem Tageslichtsystem typischerweise auch nur sehr geringe Messsignale liefern. Insofern verbessert die Prioritätenbildung in den Fällen, bei denen nur einige wenige Sensoren eine Spannung weit oberhalb des Dunkelspannungsniveaus liefern, die Qualität der Messergebnisse.

Bei der praktischen Umsetzung sind jedoch verschiedene Probleme zu beachten. So muss die Festlegung der Prioritäten vor der Messung der einzelnen Kanäle erfolgen. Dies kann entweder durch eine Vorabmessung geschehen oder die Reihenfolge wird aus der vorangegangenen Messung abgeleitet. Die erste Möglichkeit benötigt zusätzliche Zeit, die gegebenenfalls nicht vorhanden ist. Dafür ist sie zeitnäher zur eigentlichen Messung. Bei der zweiten Möglichkeit können sich die Prioritäten zwischen den Messkanälen möglicherweise verschoben haben. Im Normalfall sollte jedoch der Einfluss davon auf die Messergebnisse vernachlässigbar sein. Wesentlich aufwändiger ist es, den Zeitablauf so zu realisieren, dass die gewünschte Messposition genau dann erreicht wird, wenn die ersten 50 Messungen vom Kanal mit der höchsten Priorität erfolgt sind. Für beide Probleme ist eine genaue Kenntnis über die aktuelle Position des Messbogens sowie seiner Geschwindigkeit und den Zeitbedarf des Messprogramms notwendig.

Mit der weltweit einzigartigen Messeinrichtung zur Bestimmung bidirektionaler Kennzahlen lassen sich Tageslichtsysteme unter allen sinnvollen Lichteinfallswinkeln umfassend analysieren. Durch eine Modernisierung des Messsystems lässt sich die Messdauer von mehreren Stunden auf einige Minuten reduzieren. Das Konzept der Maskierung ist dabei für eine sequentielle Datenerfassung eine sinnvolle Erweiterung, die hilft, die tatsächliche Beleuchtungssituation eines Tageslichtsystems korrekt zu erfassen.

Literatur:

- [Kaase07] Kaase, H., Rosemann, A., Aydinli, S., Krzyzanowski, J. & Kiwull, N. (2007). Tageslichtnutzung in Gebäuden II : Autoadaptiv- und Hybrid-Beleuchtungssysteme mit Tageslichteinkopplung. TU Berlin, FG Lichttechnik, Berlin. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt gefördert vom BMWi 032 9037 H - Forschungsbericht.
- [DIN5031] Norm DIN 5031 Teil 3. (1982). Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik.
- [Thiel05] Thiel, S. (2005). Entwicklung einer Steuerungs- und Auswertungssoftware für einen Bidirektional-Kennzahl-Messplatz. Berlin, Technische Universität, FG Lichttechnik. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit.