

Konzept zur adaptiven Innenraumbeleuchtung

*Adrian Eissfeldt, Prof. Tran Quoc Khanh, TU Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik,
Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt*

Einleitung

Heutzutage beschäftigen sich viele Studien mit der Erforschung der optimalen Beleuchtungsparameter, um den Benutzer in Abhängigkeit verschiedener Variablen wie z.B. Alter und Tätigkeit zu unterstützen. Um solche Ergebnisse in einem alltagstauglichen Beleuchtungssystem zu implementieren soll ein adaptives Beleuchtungssystem entwickelt werden. Dieses soll eine präzise und dynamische Einstellung der Beleuchtungssituation ermöglichen und dabei möglichst wirtschaftlich sein. Ein Großteil der Menschen hält sich viel im Innenraum auf, wo das Tageslicht oft durch künstliches Licht ergänzt wird. Das adaptive Beleuchtungssystem soll daher durch Messung des Tageslichts und Hinzumischen von LED-Licht in der Lage sein, verschiedene Zielspektren bereitzustellen.

Tageslichtsensor

In einem ersten Konzept zur Realisierung erfolgt die Messung des Tageslichts mit einem Farbsensor. Hierfür wird ein True-Color-Sensor verwendet, der mit seinen auf Interferenzfiltern basierenden Filterkurven die Normspektralwertfunktionen nachbildet, weswegen er sich für die Messung von Farbörtern im CIE-Normvalenzsystem (1931) eignet. Aufgrund der starken spektralen Winkelabhängigkeit muss bei Verwendung von Interferenzfiltern der Einfallswinkel des Lichts mit einer Blende begrenzt werden. Um das Licht aus einem größeren Winkelbereich messen zu können, wird der Farbsensor auf ein Referenzweiß in Form eines horizontal orientierten Lambertschen Reflektors (aus PTFE) gerichtet. Zusammen mit einer Energieversorgung und einer Elektronik, welche das drahtlose Auslesen des Sensors und das Variieren der Sensorparameter (Integrationszeit, Referenzstrom) ermöglicht, wird der Sensor in einem wetterfesten Gehäuse untergebracht (vgl. Abbildung 1). Diese gesamte Messkonstruktion wird im Folgenden als Tageslichtsensor bezeichnet.

Kalibrierung

Der Sensor liefert die CIE-1931-Tristimuluswerte X , Y und Z . Jedoch werden die Normspektralwertfunktionen mit den optischen Filtern nicht perfekt nachgebildet, was in fehlerbehafteten Farbortmessungen resultiert. Um diesen Fehler zu minimieren, muss der Tageslichtsensor kalibriert werden. Hierfür sind Referenzmessungen nötig, welche mit einem Spektrometer (Konica Minolta CS 2000) durchgeführt werden. Die auf den Spektrometernmessungen (S_p) basierenden Farbörter werden dafür in die Matrix T eingetragen.

$$T = \begin{pmatrix} x_{Sp,1} & \dots & x_{Sp,n} \\ y_{Sp,1} & \dots & y_{Sp,n} \\ z_{Sp,1} & \dots & z_{Sp,n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Farbkoordinaten aus den Messungen mit dem Tageslichtsensor (TLS) werden in die Matrix S eingetragen.

$$S = \begin{pmatrix} x_{TLS,1} & \dots & x_{TLS,n} \\ y_{TLS,1} & \dots & y_{TLS,n} \\ z_{TLS,1} & \dots & z_{TLS,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Durch die Matrizenoperationen

$$K = (T \cdot S^T) \cdot (S \cdot S^T)^{-1} \quad (3)$$

ergibt sich die Kalibriermatrix K . Mithilfe von K kann anschließend der korrigierte Farbort berechnet werden.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} x_{TLS} \\ y_{TLS} \\ z_{TLS} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Um genug Daten für diese Kalibrierung zu generieren wird über mehrere Tage unter freiem Himmel mit dem Tageslichtsensor und gleichzeitig mit dem Spektrometer gemessen. Ein zweites Spektrometer befindet sich im Innenraum, um einen Vergleich der Spektren zu ermöglichen (vgl. Abbildung 2).

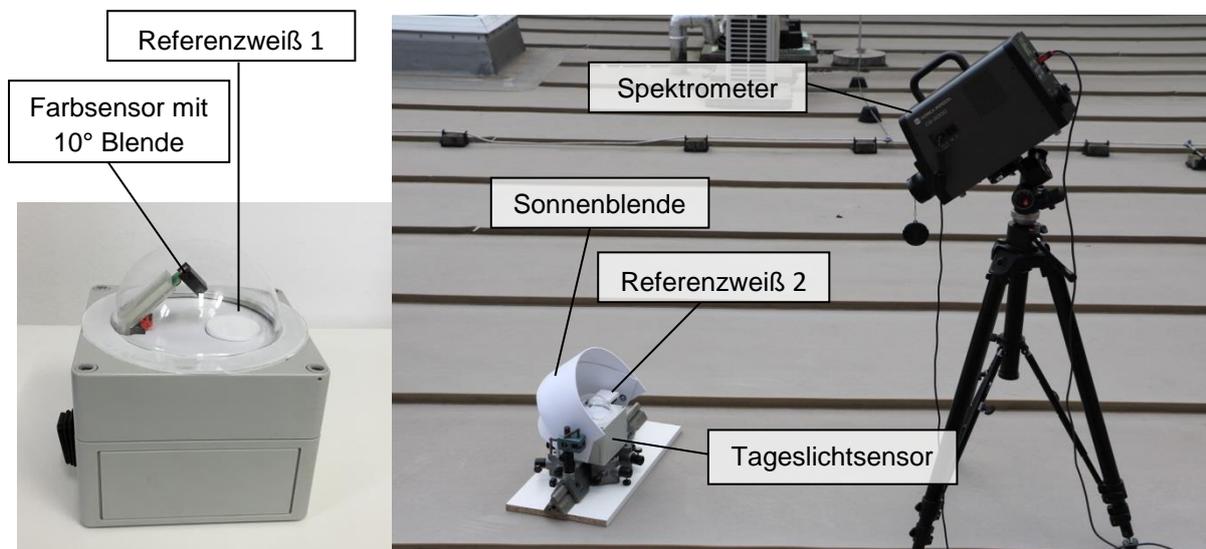


Abbildung 1 Links: Ein Farbsensor misst das auf das Referenzweiß 1 auftreffende Licht und bildet mit weiteren Komponenten im Gehäuse einen Tageslichtsensor. Rechts: Das Spektrometer misst auf das Referenzweiß 2, welches neben dem Tageslichtsensor platziert ist. Die Sonnenblende schattet direktes Sonnenlicht ab und ist in diesem Fall in Richtung Norden geöffnet.

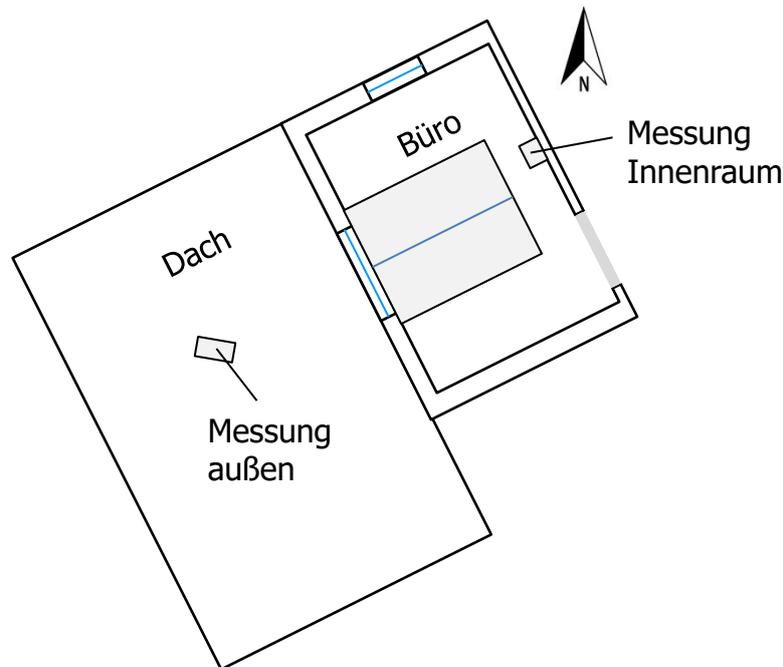


Abbildung 2: Grundriss der lokalen Gegebenheiten für die Kalibrierung (nicht maßstabsgetreu). Auf dem Dach misst der Tageslichtsensor und ein Spektrometer, im Innenraum befindet sich ein zweites Spektrometer.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der gemessenen Farbörter. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Messergebnisse des Spektrometers und des Tageslichtsensors sich mit einem durchschnittlichen Farbabstand von $\Delta u'v' = 6,7 \cdot 10^{-2}$ sehr stark unterscheiden. Während tagsüber die ähnlichste Farbtemperatur vergleichsweise konstant im Bereich von 6500 K liegt, steigt sie zum Sonnenuntergang auf ca. 18000 K und erreicht noch vor der Dunkelheit Werte um die 40000 K.

Die Farbörter des unkalibrierten Tageslichtsensors werden in zwei Bereiche unterteilt, um durch individuellere Kalibriermatrizen die Genauigkeit zu steigern. Die Grenze hierfür wird bei $y_{TLS} = 0,38$ gezogen. Durch Anwendung der zwei sich ergebenden Kalibriermatrizen auf die Farbkoordinaten des Tageslichtsensors ergeben sich wesentlich bessere Übereinstimmungen mit den Messungen des Spektrometers (vgl. Abbildung 4). An einem weiteren Tag werden unabhängige Kontrollmessungen durchgeführt, um die Kalibrierung zu testen. Die Abweichungen der Kontrollmessungen sind ähnlich zu den Kalibrierungen. Der Durchschnitt der Farbabstände zwischen Spektrometer und Tageslichtsensor liegt bei $\Delta u'v' = 1,7 \cdot 10^{-3}$ und ist somit im Durchschnitt nicht wahrnehmbar. Abbildung 5 zeigt die Farbabstände der einzelnen Messungen, wobei zwei Ausreißer auffallen. Die Abweichung von Messung 36 ist damit zu erklären, dass dessen Farbort außerhalb des Gamuts der Kalibrierdaten liegt. Messung 1 ist in die Kalibrierung miteingeflossen liegt jedoch als einziger Messpunkt unterhalb des Planckschen Kurvenzugs und könnte durch eine höhere Anzahl ähnlicher Messpunkte oder eine weitere Kalibriermatrix für den entsprechenden Bereich verbessert werden.

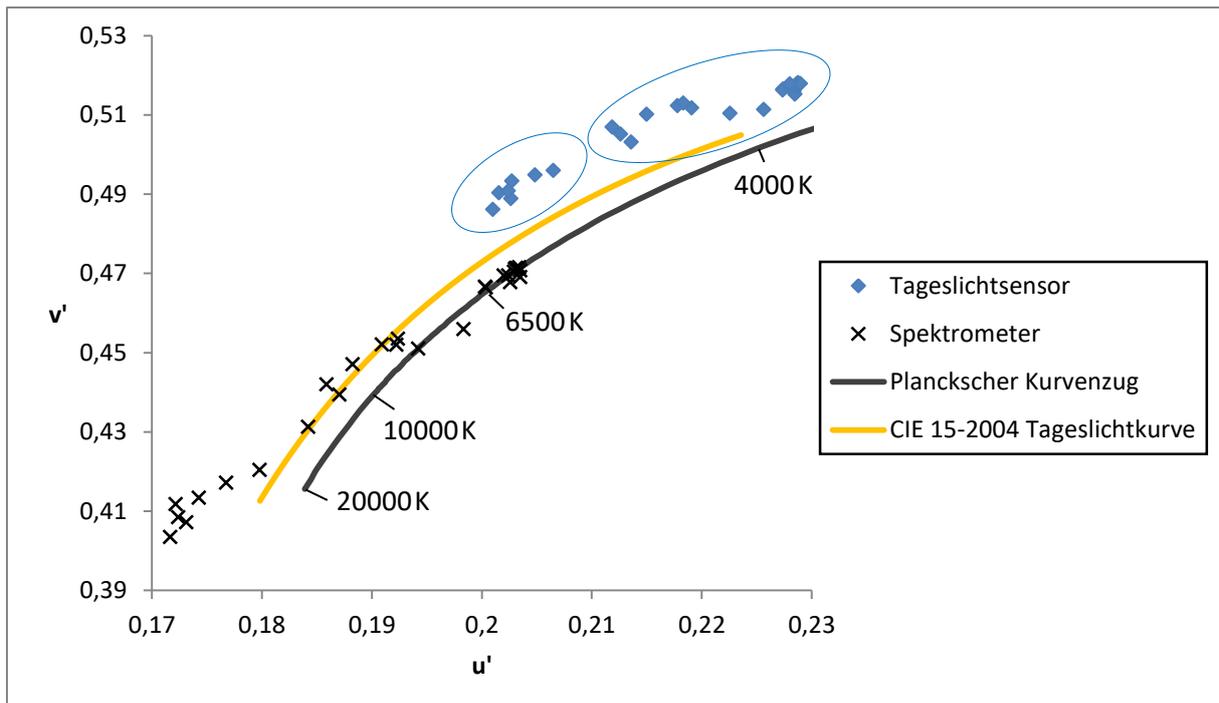


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen Farbörter des unkalibrierten Tageslichtsensors und des Spektrometers. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Tageslicht- und den Spektrometermessungen beträgt $\Delta u'v' = 6,7 \cdot 10^{-2}$. Es werden zwei Kalibriermatrizen erstellt, jeweils eine für die blau eingekreisten Farbörter.

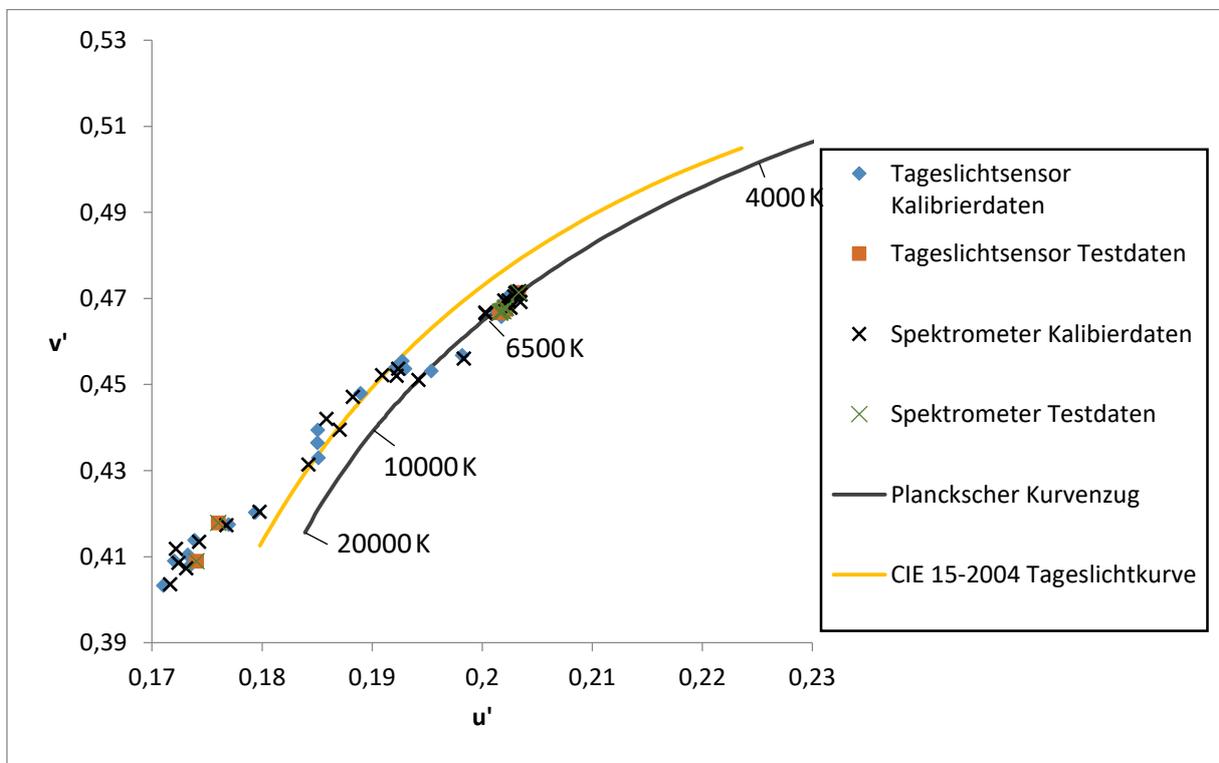


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen Farbörter des kalibrierten Tageslichtsensors und des Spektrometers. Beim Tageslichtsensor werden zusätzlich zu den zur Kalibrierung verwendeten Daten weitere Testdaten verwendet, um die Kalibrierung zu testen.

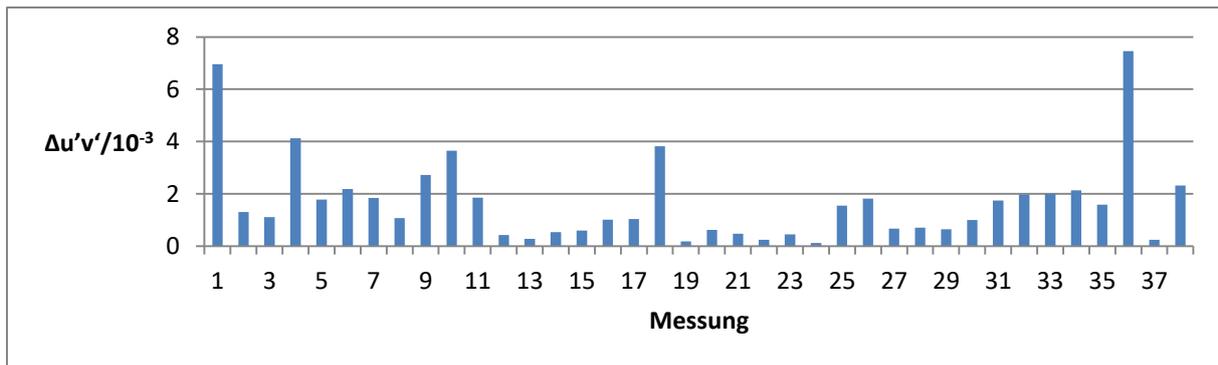


Abbildung 5: Farbabstand $\Delta u'v'$ zwischen dem Messergebnis des kalibrierten Tageslichtsensors und dem Spektrometer. Die Messungen 1-27 wurden zur Kalibrierung verwendet, Messung 28-38 sind unabhängige Testmessungen, um die Kalibrierung zu testen.

Rekonstruktion der Tageslichtspektren

Um anhand des Farborts das Spektrum des Tageslichts abzuschätzen, wird das Tageslichtmodell der CIE verwendet [1]. Dieses lässt sich für eine ähnlichste Farbtemperatur von 4000 K bis 25000 K verwenden. Das Spektrum des Tageslichts $S(\lambda)$ ergibt sich mit

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (5)$$

mit

$$M_1(\lambda) = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (6)$$

und

$$M_2(\lambda) = \frac{0,03 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (7)$$

wobei x_D und y_D für einen Punkt auf der Tageslichtkurve stehen (vgl. Abbildung 4) und S_{0-2} als Funktionen der Wellenlänge in 5nm-Intervallen tabelliert in [1] zur Verfügung stehen. Da das Tageslichtmodell auf Messungen im Bereich von 330 nm bis 700 nm beruht wurde für die Modellbildung im Bereich oberhalb von 700 nm extrapoliert. Im ultravioletten Bereich ist ebenfalls mit Abweichungen zu rechnen, bedingt durch die geographische Lage und die Jahreszeit.

Für jeden gemessenen Farbort des kalibrierten Tageslichtsensors wird die ähnlichste Farbtemperatur berechnet und (für den Bereich zwischen 4000 K und 25000 K) der Punkt auf der Tageslichtkurve mit derselben Farbtemperatur ausgewählt. Mithilfe der Formeln (5) bis (7) werden die Tageslichtspektren berechnet und mit den realen Spektren verglichen (vgl. Abbildung 6). Es zeigen sich im roten Bereich oberhalb von 650 nm zum Teil sehr große Abweichungen, welche vor allen nach Sonnenuntergang größer werden. So hat kurz vor Sonnenuntergang die maximale Abweichung einen Faktor von ca. 3 und nach wenigen Minuten später ist der Faktor bei ca. 5. Des Weiteren ist vor allem im roten Bereich ein Muster erkennbar, welches auf eine systematische Ungenauigkeit im Tageslichtmodell zurückzuführen ist. Im Bereich der Wahrnehmung des menschlichen Auges ist die Rekonstruktion vergleichsweise gut.

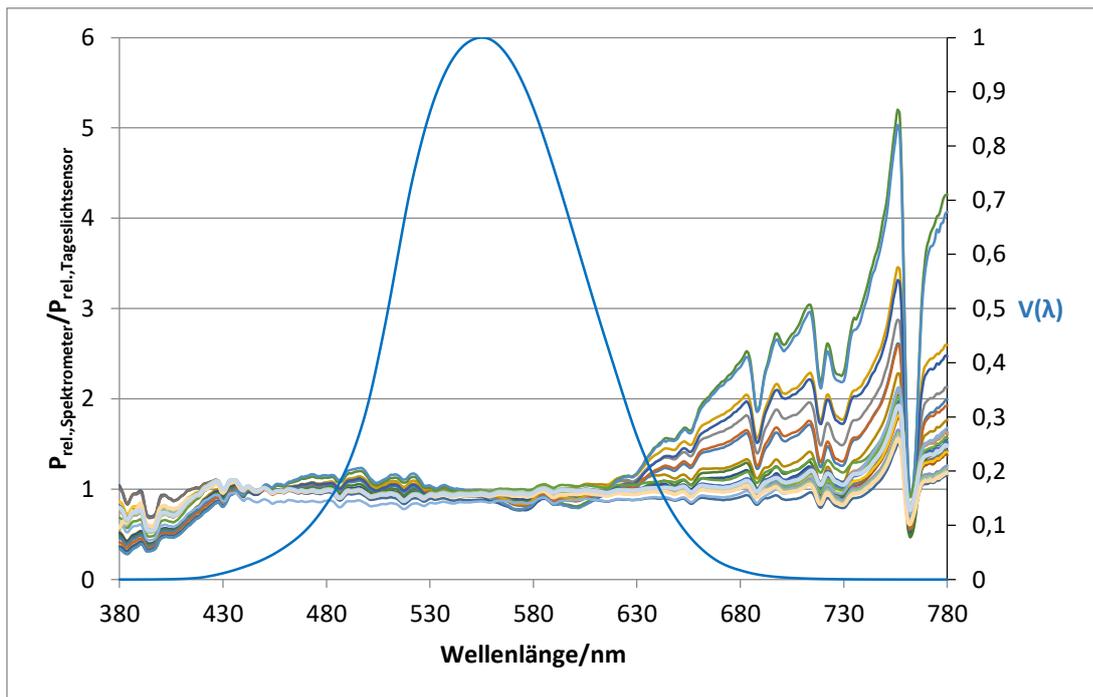


Abbildung 6: Verhältnis der relativen Spektren des Spektrometers und der rekonstruierten Spektren, welche auf Messungen mit dem Tageslichtsensor basieren.

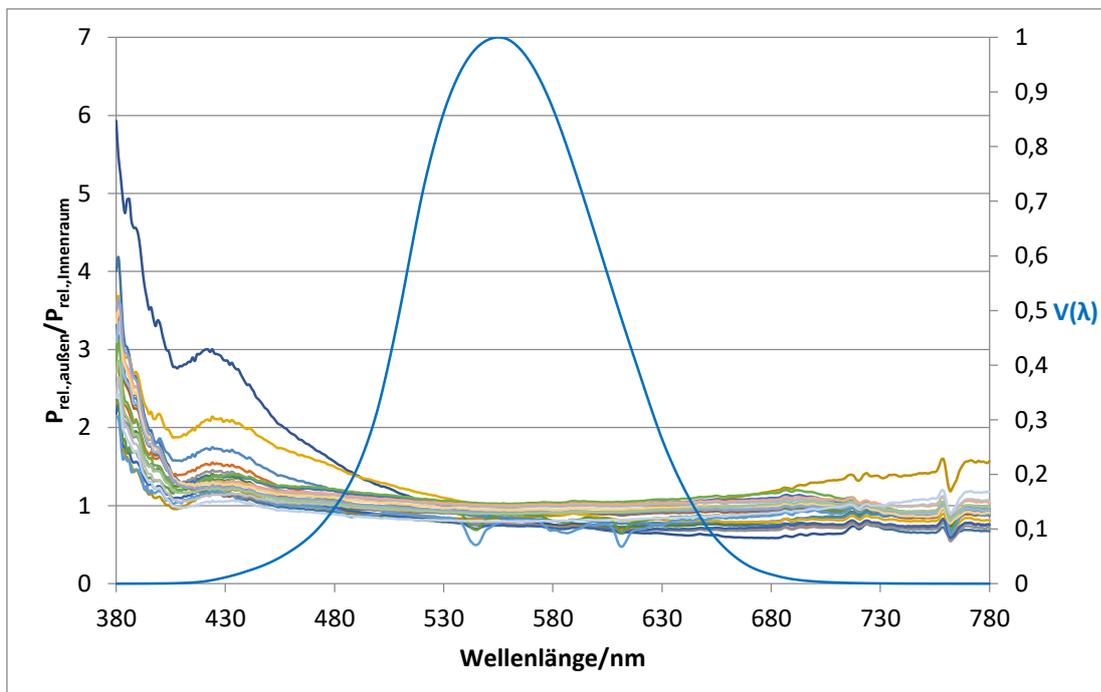


Abbildung 7: Verhältnis der relativen Spektren im Außenbereich zum Innenraum. Ein Verhältnis von größer als 1 bedeutet, dass für die entsprechende Wellenlänge im Außenbereich eine höhere Intensität gemessen wird als im Innenraum.

Vergleich der Spektren im Innen- und Außenbereich

Um ein Beleuchtungssystem im Innenraum mit einem Tageslichtsensor im Außenbereich zu steuern, ist es von Interesse inwiefern das relative Spektrum an beiden Orten sich ähnelt. Hierfür wird parallel zu den Messungen im Außenbereich mit einem zweiten Spektrometer im Innenraum gemessen (vgl. Abbildung 2). Aus den Messungen können zwar keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden, da die individuelle Gestaltung und Geometrie des Raumes die Lichtreflexionen beeinflusst, es ist jedoch ersichtlich, dass die Änderungen im sichtbaren Bereich oft größer sind als die Fehler in den rekonstruierten Spektren (vgl. Abbildung 7). Die Unterschiede steigen vor allem zum ultravioletten Bereich an, da die Fenster in diesem Bereich das Licht stärker absorbieren [2]. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass es charakteristische Verläufe gibt, die sich in einzelnen Bereichen hauptsächlich durch die Steigung und den Versatz unterscheiden.

Diskussion und Ausblick

Der zur Steuerung des adaptiven Beleuchtungssystems zu verwendende Tageslichtsensor kann durch eine Kalibrierung eine ausreichend hohe Genauigkeit der Farbortmessung liefern, sodass in den meisten Fällen keine wahrnehmbaren Unterschiede zwischen dem gemessenen und dem realen Farbort auftreten. Die zum Testen der Kalibrierung durchgeführte Kontrollmessung wurde wenige Tage nach den Messungen durchgeführt, welche die Basis der Kalibrierung sind. Dies begünstigt ein positives Testergebnis, welches aber nicht zwangsläufig zu anderen Jahreszeiten oder anderen Wetterbedingungen Gültigkeit besitzt. Um eine hohe Genauigkeit unabhängig von der Jahreszeit und Wetterlage zu erreichen, sollten über den Zeitraum von einem Jahr weitere Messungen durchgeführt werden.

Anhand eines Tageslichtmodells werden auf Basis der Farbörter die zugehörigen Tageslichtspektren rekonstruiert. Zwar lässt sich eine quantitative Aussage über die Genauigkeit treffen, eine konkrete qualitative Aussage wird aber nicht getroffen. Hierfür muss eine Mischung von rekonstruierten Tageslichtspektren zusammen mit LED-Spektren berechnet werden und mit dem in der Realität erzielten Spektrum verglichen werden. Dabei können die Farbortgenauigkeit, die Farbwiedergabe und weitere Parameter gemessen werden und somit eine qualitative Aussage über die Rekonstruktion der Tageslichtspektren getroffen werden. Des Weiteren kann das Tageslichtmodell der CIE durch ein eigenes Tageslichtmodell ersetzt werden, wenn dafür genug Messungen vorhanden sind. Dies hätte den Vorteil, dass das Tageslichtmodell der geographischen Lage entspricht und das ein kleineres Intervall als 5 nm gewählt werden kann.

Der exemplarische Vergleich zwischen den Spektren im Außen- und Innenbereich zeigt, dass das Verhältnis der Spektren nicht konstant ist, aber charakteristische Verläufe besitzt. Hier kann untersucht werden inwieweit sich durch Modellbildung des Raumes oder eine Kalibrierung ein direkter Zusammenhang zwischen den Spektren herstellen lässt.

Literatur

- [1] CIE, "Technical Report Colorimetry 15: 2004", CIE Central Bureau, Vienna, 2004.
- [2] J. de Boer, S. Aydinli, W. Cornelius, M. Knoop, J. Wienold, und G. Volz, "Tageslicht kompakt - Tageslichttechnik und Tageslichtplanung in Gebäuden", LiTG, Seite 22, 2016.