

# **Adaptives Beleuchtungssystem mit Hybridlampe**

*Matthias Knoll; Daniela Plep; Ulrich Biebel; Dr. Armin Konrad; Dr. Jürgen Reichardt  
OSRAM GmbH, FL/CFL D-A, Berliner Allee 65, 86153 Augsburg*

## **1. Einführung**

„Macht doch den zweiten Fensterladen auf, damit mehr Licht hereinkommt.“ sollen Johann Wolfgang von Goethes letzte Worte gewesen sein, so der Staatskanzler des Großherzogtums Sachsen-Weimar-Eisenach und enge Freund Goethes, Friedrich von Müller.

Seit jeher ist der Mensch geneigt, sich im Licht aufzuhalten. Licht übt Faszination aus, verbirgt und lüftet Geheimnisse. Licht wird in der Philosophie thematisiert und selbstverständlich auch in Wissenschaft und Forschung. Aber vor allem ist Licht lebensnotwendig und dessen Auswirkung auf den Menschen groß [1]. Wichtige, in diesem Zusammenhang genannte Stichworte, sind „circadianer Rhythmus“ und „Melatoninhaushalt“ [2]. An erster Stelle ist es das natürliche Licht, welches der Mensch braucht. So sind die Entwicklungen immer mehr dahingehend, dass das im Arbeitsumfeld oft rar vorhandene natürliche Licht künstlich nachempfunden werden muss.

## **2. Zielsetzung**

Diese Überlegungen dienen als Grundlage für ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen 13N 8308 gefördertes Projekt, das von verschiedenen Verbundpartnern bearbeitet wurde. Die Herstellung einer kompakten adaptiven Lichtquelle, welche sich der Dynamik des natürlichen Tageslichtverlaufes anpassen lässt war das gesetzte Ziel.

### 3. Anwendung

Anwendungsmöglichkeiten gibt es für eine Lampe dieser Art viele. Gutes Licht für gesunde und ästhetische Beleuchtung unterliegt stetig wachsender Nachfrage. Vor allem ist es dort von hoher Bedeutung, wo der Mensch Leistungen bringen muss bzw. in Situationen, in denen die äußeren Umstände ein Handeln wider den natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus verlangen. Zum einen eignet sich die Hybridlampe, in eine Schreibtischleuchte eingebaut, der Arbeitsplatzbeleuchtung im Büro zu dienen. Gerade hier ist es wichtig, dass dem circadianen Rhythmus Rechnung getragen wird und der Melantoninhaushalt entsprechend den erforderlichen Gegebenheiten gesteuert werden kann [3, 4]. Ein anderer Anwendungsbereich wäre zum Beispiel die Beleuchtung in Flugzeugen, vor allem auf Langstreckenflügen über mehrere Zeitzonen hinweg, um den Effekt des Jetlags zu minimieren. Auch kann Wohlbefinden, Gesundheit und damit Leistung von Schichtarbeitern vor allem während der Nachschicht positiv beeinflusst werden. Das so gesteigerte Wohlergehen und die erhöhte Leistungsfähigkeit ist nicht nur eine Folge, welche den Einzelnen betrifft. Diese Vorteile wirken sich natürlich auch auf das Arbeitsverhalten und somit letztendlich auf die Wirtschaft aus. Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes findet sich im medizinischen Bereich. Eine verbreitete Behandlungsmethode von saisonalen Depressionen (SAD) ist die Lichttherapie. In dieser wird der Patient gezielt einer Lichtquelle mit definierten Eigenschaften ausgesetzt. Auch hier ist das Ziel die Beeinflussung des Melantoninhaushaltes [5].

Grundsätzlich kann die Hybridlampe in allen nicht oder nur begrenzt mit Tageslicht beleuchteten Räumen eingesetzt werden, in denen sich Menschen über einen längeren Zeitraum aufhalten.

## 4. Hybridlampe

Die dem Konzept einer kompakten und adaptiven Lichtquelle zugrunde liegende Idee beruht auf der Lichtmischung mittels dreier, ein Farbdreieck aufspannender, Lichtquellen. Realisiert wurde es in Form einer Hybridlampe, die aus einer Kompaktleuchtstofflampe (engl.: compact fluorescent lamp, CFL) und Zwei-Komponenten-LEDs zusammengesetzt ist. Abbildung 1 zeigt die Hybridlampe halb geöffnet, so dass die einzelnen Komponenten zu erkennen sind.

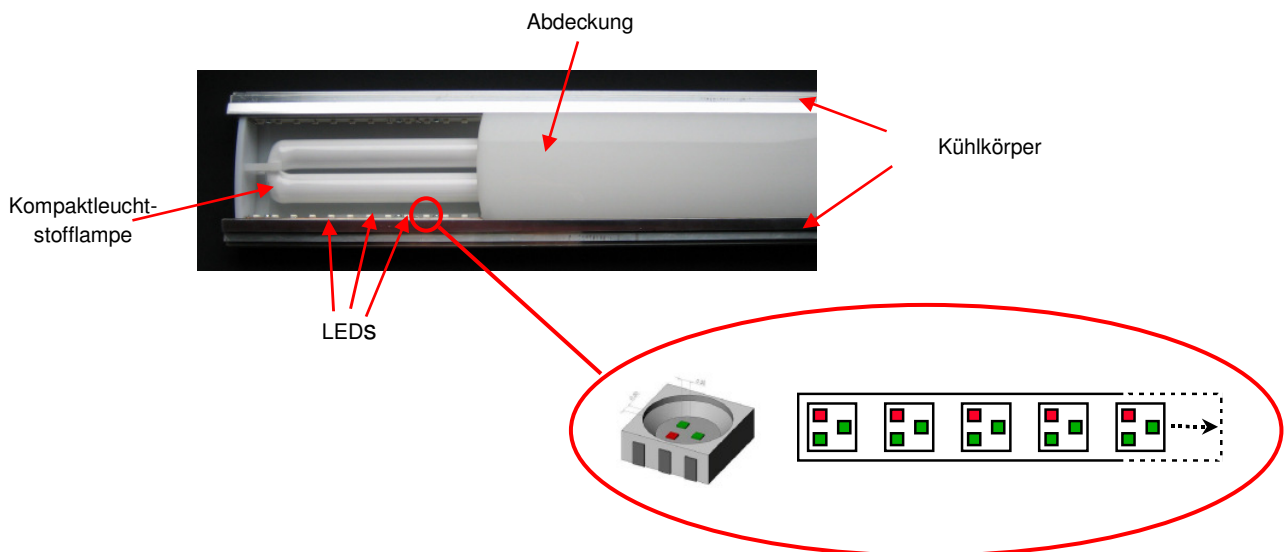


Abbildung 1: Ansicht des halbgeöffneten Hybriden von oben und schematischer Aufbau einer Zwei-Komponenten-LED sowie deren Anordnung auf der Platine

Die Wahl der Kompaktlampe fiel auf eine DULUX L 36W/860 CONSTANT, da hiermit die kompakte Bauform des Hybriden sichergestellt werden konnte. Gleichzeitig weisen diese Lampentypen den geringsten Wärmeeintrag und die geringste Zündspannung auf. Auch gibt es hier keine Abschattungen zwischen verschiedenen Bögen – wie sie beispielsweise für Lampen vom Typ DULUX T zu beobachten sind. Die verwendete Kompaktlampe besitzt eine Farbtemperatur von  $T_c = 6000\text{K}$ , einen Farbwiedergabeindex von  $Ra_8 \approx 80$  sowie eine Lichtstrom von  $\Phi \approx 2000\text{lm}$ .

Aufgrund der durch verschiedene Modellierung und Messungen erzielten Ergebnisse wurden Zwei-Komponenten-LEDs verwendet. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, handelt es sich um LEDs, die aus einem Gehäuse mit drei Chips bestehen. Ein gutes Ergebnis bezüglich der Farbwiedergabe konnte mit den Farben true-green und orange erreicht werden, wobei in jedem Gehäuse ein Chip der Farbe orange und zwei Chips der Farbe true-green vorliegen. Unter Verwendung von einfarbigen SingleChip-LEDs (ein Chips pro Gehäuse) konnte keine Farb- und Leuchtdichtehomogenisierung des von den LEDs emittierten Lichtes auf der Abdeckung erreicht werden. Während für die SingleChip-LEDs einzelne farbige Punkte auf der Streuscheibe zu sehen sind, ist die Farberscheinung für den Fall der Verwendung von Zwei-Komponenten-LED auf der Streuscheibe sehr homogen, da eine Lichtmischung bereits im Gehäuse statt findet. Die LEDs sind rechts

und links von der CFL angeordnet. Es sind auf jeder Seite des Hybriden je 36 LEDs angebracht.

Neben CFL und LEDs bilden zwei Kühlkörper, auf denen die LEDs angebracht sind, zusammen mit der Abdeckung in Form einer Streuscheibe aus milchigem Acrylglas zur Lichtmischung (Repsol Glass® Cast Acrylic von Repsol YPF) mit einer Dicke von 3mm, die Hybridlampe.

Angesteuert wird das gesamte System mit Hilfe entsprechender Vorschaltgeräte, die ein Dimmen der Komponenten unabhängig von einander ermöglichen. Die Möglichkeit einen Sensor einzubauen, welcher die Komponenten über einen  $\mu$ -Controller der eingestellten Farbtemperatur entsprechend einstellt, ist gegeben.

#### 4.1. Lichtmischung

Ziel ist es, mit einer Lampe kompakter Bauart die Farbtemperaturen von 6000K bis 2500K, mit dem entsprechenden Farbort auf dem Planckschen Kurvenzug bzw. der Daylightkurve liegend, einzustellen. Zudem werden – abhängig von der Farbtemperatur – verschiedene Helligkeitsstufen erreicht. Ähnlich dem natürlichen Verlauf des Tageslichtes wird mit abnehmender Farbtemperatur auch die Helligkeit reduziert. Dies kann in begrenztem Maße in verschiedenen Helligkeitsverläufen realisiert werden.

Die aus den Spektren (Abbildung 2) von CFL und LEDs resultierenden Farborte spannen ein Dreieck in der Normfarbtafel CIE 1931 auf (Abbildung 3).

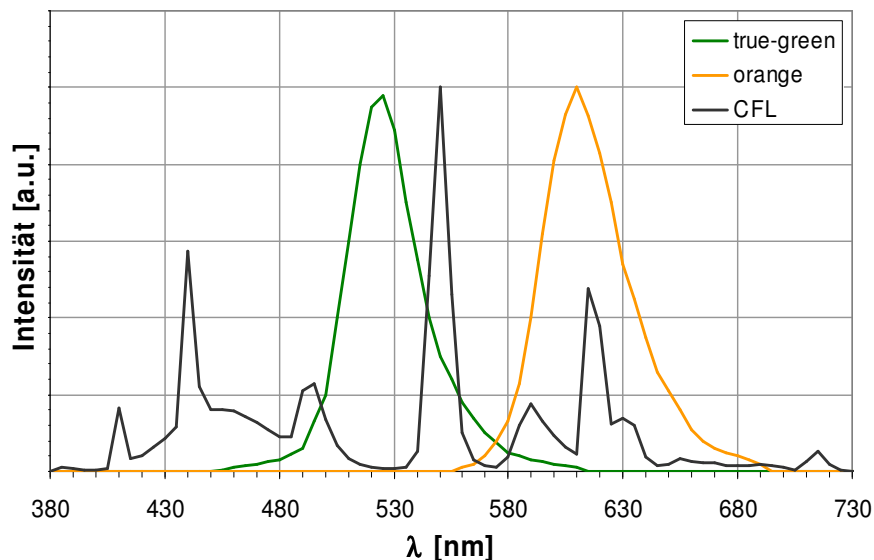


Abbildung 2: Spektren der Grundkomponenten LED (orange und true-green) sowie der CFL

Die Farbtemperatur der Kompaktleuchtstofflampe liegt bei 6000K auf der Daylightkurve. Die Farborte der grünen und roten LEDs bilden die beiden anderen Eckpunkte des Dreiecks. Die Berechnung der aus einem gemessenen Spektrum  $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$  hervorgehenden Normfarbwertanteile  $x$  und  $y$  zur Bestimmung des Farbortes erfolgt nach den von der CIE vorgeschlagenen Gleichungen [6]. Daraus resultieren für die Kompaktlampe Farbkoordinaten mit den Werten  $x = 0,317$  und  $y = 0,336$ . Für die grünen LEDs ist  $x = 0,192$  und  $y = 0,717$  und für die roten LEDs liegt  $x$  bei 0,647 und  $y$  bei 0,353.

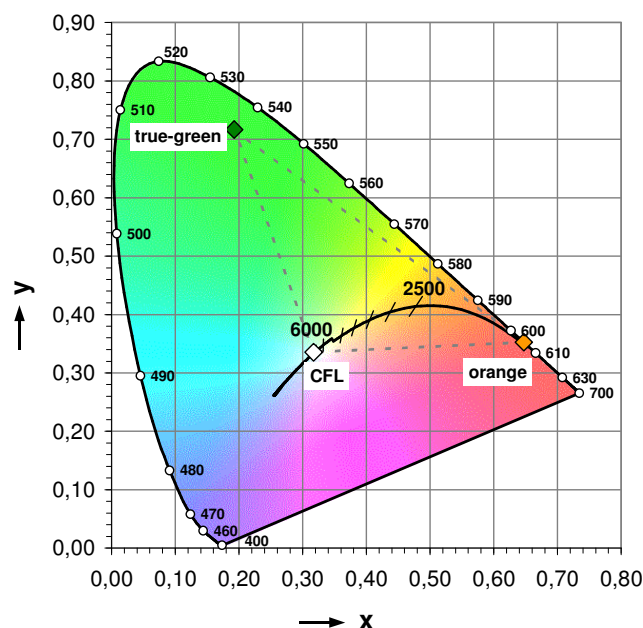


Abbildung 3: Normfarbtafel<sup>a</sup> CIE 1931 (2°-Gesichtsfeld) mit den Farbkoordinaten der Grundkomponenten

Abbildung 3 zeigt das von den Farborten der einzelnen Spektren aufgespannte Dreieck. Unter diesen Voraussetzungen ist es theoretisch machbar, jeden beliebigen Farbort in diesem Dreieck zu erreichen.

In der Praxis hat sich jedoch herausgestellt, dass das Erreichen eines jeden beliebigen Farbortes in dem aufgespannten Dreieck nicht möglich ist. Die Gründe hierfür liegen im temperaturabhängigen Verhalten der verwendeten Komponenten. Sowohl die LEDs als auch die CFL ändern ihre spektralen Eigenschaften bei veränderten Umgebungstemperaturen. Diesen Temperaturen werden wiederum maßgeblich durch die Intensitäten der Strahlung von den einzelnen Komponenten beeinflusst. Insbesondere der Wärmeeintrag durch die LEDs bei maximaler Intensität ist nicht zu vernachlässigen.

Die CFL zeigt bei veränderten Umgebungstemperaturen im Wesentlichen zwei Effekte. Zum einen ändert sich ihre Farbtemperatur für eine feste Dimmstellung durch die Erwärmung über einen längeren Zeitraum und zum anderen ändert sich ihre Farbtemperatur in Abhängigkeit von der jeweiligen Dimmstellung. Diese Eigenschaft ist auf die Abhängigkeit der Lampenintensität von der Intensität der Quecksilberstrahlung zurückzuführen. Letztere wiederum wird maßgeblich durch den Quecksilberdampfdruck in der Lampe beeinflusst. Durch das Zusammenspiel dieser beiden Effekte zeigt die Lampe im Hybriden ein komplexes temperaturabhängiges Verhalten.

Für die LEDs ergibt sich eine starke lineare Abnahme des Lichtstroms mit steigender Umgebungstemperatur. Diese Abhängigkeit ist für die verschiedenen LEDs unterschiedlich.

<sup>a</sup> Bei der hier verwendeten Normfarbtafel handelt es sich um die von der CIE 1931 empfohlenen und der nach DIN 5033 festgelegten Normfarbtafel für den 2°-Beobachter [Deutsche Norm, DIN 5033 Teil 2 (1992)]. Die graphische Darstellung dient lediglich der Veranschaulichung der Farbverteilung; eine genaue Zuordnung der Farbarten zu den jeweiligen Farborten ist – auch aus drucktechnischen Gründen – nicht realisierbar.

## **4.2. Optische und thermische Messungen**

### **4.2.1. Messeinrichtungen**

Zur vollständigen Charakterisierung des Hybriden dienten integrierende Messungen in einem Ulbrichtzylinder, Messungen der Lichtverteilungskurve (LVK) im Fernfeld sowie orts aufgelöste Messungen der Oberfläche des Hybriden und von Flächen, die mit dem Hybriden bestrahlt wurden. Mit einer Leuchtdichtekamera und einem Dioden-Array-Spektrometer mit angeschlossener Faseroptik konnten die Verteilungen der Leuchtdichte sowie der Farbtemperatur bzw. der Farbkoordinaten einerseits auf der Hybridoberfläche und andererseits auf Flächen, die mit dem Hybrid beleuchtet wurden, analysiert werden.

Aus den farbauflösenden LVK-Messungen mit einem Photogoniometer resultiert die Lichtverteilungskurve, mit deren Hilfe sich ein Eindruck über die Abstrahlcharakteristik der Hybridlampe im Fernfeld, also wie sie vom Benutzer als Punktlichtquelle wahrgenommen wird, ergibt.

Die Messungen im Ulbrichtzylinder dienten zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex, der ähnlichsten Farbtemperatur, der Farbkoordinaten, des Lichtstroms, der Temperatur und elektrischer Parameter. Diese integrierenden Messungen ermöglichten auch die Erstellung sog. Dimmkurven, welche die Anteile der jeweiligen Hybridkomponente für eine bestimmte Lichtfarbe angeben. Diese Dimmkurven ermöglichen anschließend die Einstellung der gewünschten Farbtemperaturen ohne weitere aufwendige Messungen. Es lagen zwei verschiedene Modelle integrierender Messeinheiten vor:

- Ulbrichtkugel
- Ulbrichtzylinder

Die Ulbrichtkugel ist die am häufigsten verwendete Form einer integrierenden Messeinheit. Die Messungen des Lichtstroms und der Farbkoordinaten der Kompaktlampe fanden in einer Ulbrichtkugel mit einem Durchmesser von 2,5m statt. Die erfahrungsgemäße Messunsicherheit im Lichtstrom beträgt 2%. Die Genauigkeit der Farbkoordinaten liegt innerhalb einer Größenordnung von vier Punkten (0.004) in x und y gegen einen Standard der Physikalisch Technischen Bundesanstalt. Somit erfolgten die Messungen nach CIE-Vorschriften.

Aufgrund der geometrischen Eigenschaften des Hybriden wurden Messungen an verschiedenen Prototypen in einer integrierenden Messeinheit in Form eines Zylinders durchgeführt. Die Länge des Ulbrichtzylinders betrug 200cm, der Durchmesser 125cm. Die Bestimmung der Messgenauigkeit der im Zylinder durchgeführten Messungen hinsichtlich licht- und farbertechnischer Parameter fand mittels Referenzmessung in der Ulbrichtkugel statt. Hierzu wurde eine Lampe des Typs T16 FH 28W/865 sowohl in der Kugel als auch im Zylinder vermessen. In Abbildung 4 ist die Intensität der Lampe in Abhängigkeit von der Wellenlänge für beide Messeinrichtungen aufgetragen. Außerdem sind die Farbkoordinaten dargestellt.

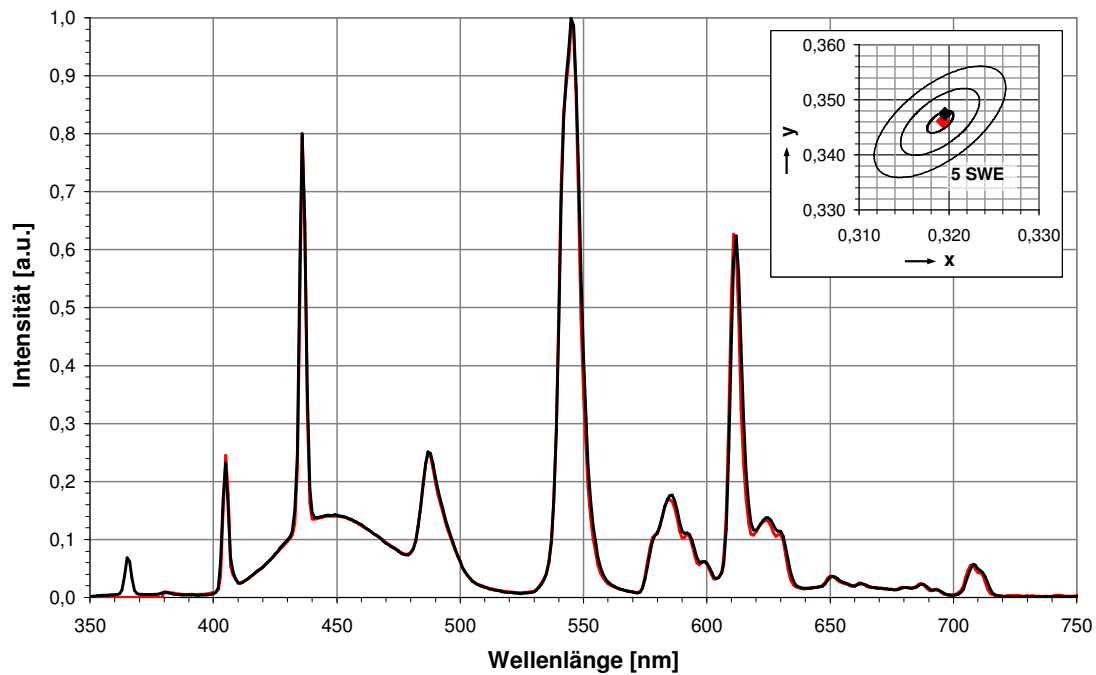


Abbildung 4: Spektren und Farborte der Messungen aus Ulbrichtkugel (rot) und -zylinder (schwarz)

Es ist in Abbildung 4 zu sehen, dass die beiden gemessenen Spektren aufeinander liegen. Die Abweichung der Farbkoordinaten beträgt weniger als eine Schwellwerteinheit (SWE). Diese Referenzmessung zeigt, dass der Zylinder für Messungen mit den vorhandenen Messinstrumenten verwendet werden kann und die Ergebnisse der beiden integrierenden Einheiten direkt miteinander vergleichbar sind. Der Vergleich der Lichtstrommessung mehrerer Kompaktlampen gleicher Bauart in Ulbrichtkugel und -zylinder ergab einen Korrekturfaktor von 2,78 für den Ulbrichtzylinder bezüglich der kalibrierten Ulbrichtkugel. Aus der im Ulbrichtzylinder gemessenen Beleuchtungsstärke kann somit analog der für die Ulbrichtkugel verwendeten Umrechnungsmethode ein Lichtstromwert ermittelt werden. Da es sich hier um einen der kalibrierten Kugel gegenüber korrigierten Wert handelt wird er im Folgenden als „ca. Lichtstrom“ oder „Helligkeit“ bezeichnet.

## 4.2.2. Ergebnisse

### Wärmehaushalt

Der Wärmehaushalt war neben den lichttechnischen Untersuchungen ein Bestandteil der Charakterisierung des Hybriden. Die Bestimmung des thermischen Verhaltens während des Hybridbetriebs stellt einen wesentlichen Punkt dar und wird daher vor den Ergebnissen der lichttechnischen Untersuchungen präsentiert. Es zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Temperatur in und auf der Hybridlampe von der eingestellten Farbtemperatur.

Die Messungen hierzu wurden mit an der Hybridlampe angebrachten Thermoelementen im Ulbrichtzylinder durchgeführt. Der zeitabhängige integrativ gemessene Temperaturverlauf für ausgewählte Farbtemperaturen bei maximal erreichbarem Lichtstrom ist in Abbildung 5 dargestellt.

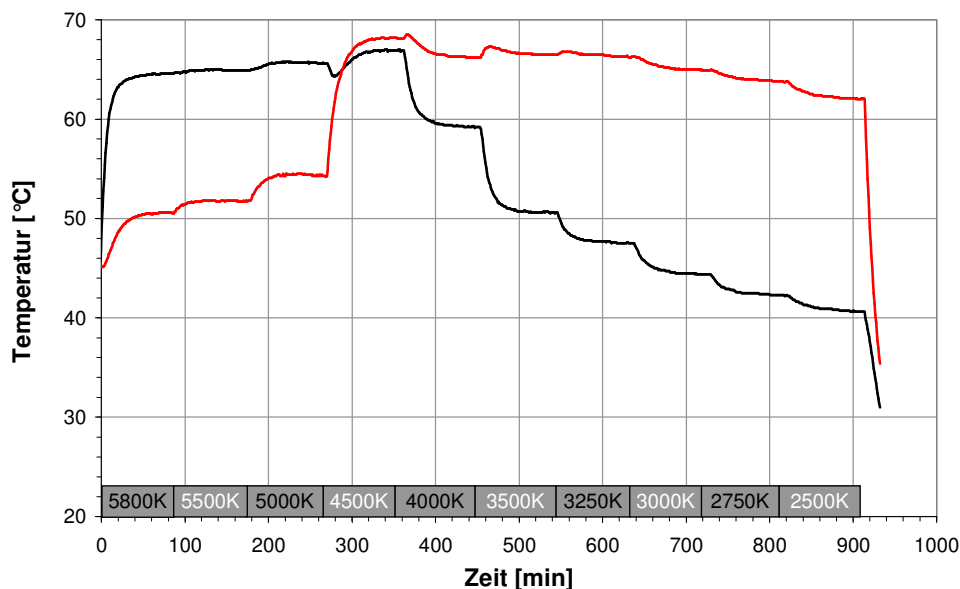


Abbildung 5: Temperaturverlauf im Hybriden (schwarz) und außen auf dem Kühlkörper (rot) in Abhängigkeit von der Zeit und der eingestellten Farbtemperatur

Die Temperatur wurde an zwei verschiedenen Stellen des Hybriden gemessen. Ein Thermoelement war auf der Außenseite des Kühlkörpers angebracht (im Diagramm rot dargestellt); das andere im Hybriden in der Nähe des Kompaktlampenbogens (im Diagramm schwarz dargestellt). Im Rahmen weiterer Arbeiten des Projektes konnte bereits gezeigt werden, dass die Temperaturverteilung auf dem Kühlkörper konstant ist. Mit dieser Anordnung der Thermoelemente war es möglich, Tendenzen im Temperaturverhalten, welche sich aus dem Zusammenspiel von CFL und LEDs ergeben, zu erkennen.

Jede Einstellung der Grundkomponenten bestand über einen Zeitraum von 90 Minuten. Dass dieser Zeitraum sinnvoll war, zeigt der Verlauf der Temperatur. Ein Gleichgewicht wird im Schnitt erst nach ca. 45 bis 60 Minuten erreicht. Eine Beeinflussung des



Lichtstroms und der Farbtemperatur durch die Temperatur liegt vor, was Messungen über längere Zeiträume notwendig macht, um der Dynamik des Systems gerecht zu werden. Der Temperaturverlauf beider Kurven zeigt einen Anstieg in den ersten vier Messintervallen der ähnlichsten Farbtemperaturen  $T_n$  von  $T_n = 5800\text{K}$  bis  $T_n = 4500\text{K}$ . Für  $4500\text{K}$  wird ein Maximum erreicht. Im weiteren Verlauf nimmt die Temperatur wieder ab. Deutlich ist der Temperaturhaushalt der einzelnen Komponenten zu erkennen und die gegenseitige thermische Beeinflussung. Nach dem Einschalten der CFL, was für  $5800\text{K}$  der Fall ist, erwärmt sich das ganze System. Durch langsames Zuschalten der LEDs durchlaufen beide Temperaturkurven einen leichten Anstieg. Bis zu einer Einstellung von  $5000\text{K}$  verlaufen die beiden Kurven annähernd parallel. Im Temperaturverlauf des Kühlkörpers ist ab  $4500\text{K}$  ein starker Temperaturanstieg zu verzeichnen, der direkt auf das Zuschalten der roten und grünen LEDs um jeweils ca. 40% der Maximalleistung zurückzuführen ist. Genaueres zu den Einstellungen der Komponenten wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert. Nach diesem Maximum, das maßgeblich durch die LEDs bestimmt ist, fallen beide Temperaturkurven ab, wobei nun die CFL diesen Abfall bestimmt. Die LEDs werden bis  $2500\text{K}$  immer stärker dazugeschaltet, während der Lichtstrom der CFL und damit auch deren Temperatur und die des ganzen Hybridsystems verringert wird. Bei der Hybridlampe handelt es sich also um ein dynamisches System, das – bedingt durch die kompakte Bauweise – sehr hohe Temperaturen von bis zu  $68^\circ\text{C}$  aufweist.

## Farbgang

Unter dem Farbgang der Hybridlampe ist das Zusammenspiel der Komponenten LED und CFL hinsichtlich des Verlaufes der ähnlichsten Farbtemperatur und des Lichtstroms zu verstehen. Ziel war es, einen linearen Verlauf des Lichtstroms von 100% bei 6000K bis 10% bei 2500K zu erreichen. Die Farborte der jeweiligen Farbtemperatur sollten dabei auf dem Verlauf des Planckschen Kurvenzugs bzw. der Daylightkurve liegen.

Zur Untersuchung dieser Eigenschaften wurde der Hybrid in den oben beschriebenen Ulbrichtzylinder eingebaut. Abbildung 6 zeigt den dazugehörigen Lichtstromverlauf in Abhängigkeit von der Farbtemperatur in einem Bereich von 5800K bis 2500K für ausgewählte Farbtemperaturen in einer Schrittweite von 250K bzw. 500K.

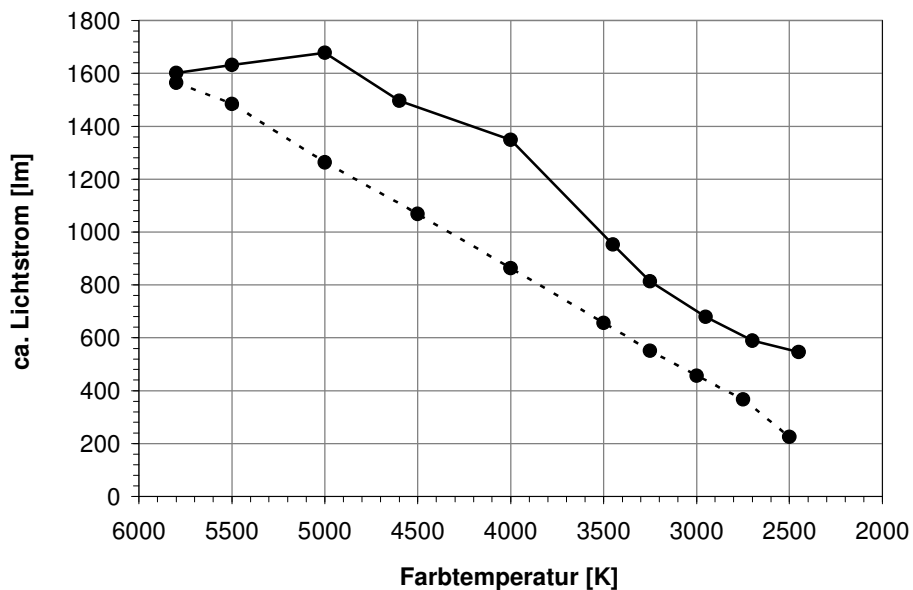


Abbildung 6: Linear abfallender [...] und maximaler [—] Lichtstromverlauf des Hybridens in Abhängigkeit von der Farbtemperatur

Der aus einer Vergleichsmessung in einer kalibrierten Messeinheit resultierende Umrechnungsfaktor rechtfertigt die Umrechnung der im Ulbrichtzylinder gemessenen Beleuchtungsstärke in einen Lichtstromwert. Der so abgeschätzte Wert ist in obigem Diagramm als „ca. Lichtstrom“ angegeben.

Eine Farbtemperatur von 6000K konnte mit den vorhandenen Komponenten nicht erreicht werden, da die verwendete Streuscheibe im blauen Wellenlängenbereich absorbiert. In dem Diagramm ist außerdem der Zielverlauf der Farbtemperatur für den maximal erreichbaren Lichtstrom des hybriden Systems dargestellt. Der maximal erreichbare Lichtstrom steigt von 5800K bis 5000K leicht an, erreicht dort sein Maximum und fällt bis 2500K stetig ab.

In Abbildung 7 sind die Einstellungen – im Folgenden auch als „Dimmstellung“ oder „Dimmstufe“ bezeichnet – der drei Komponenten für die beiden Helligkeitsverläufe in Abhängigkeit von der Farbtemperatur dargestellt. Die Prozentangaben der jeweiligen Dimmstellung beziehen sich bei der Kompaktlampe auf den maximalen Lichtstrom, bei den Leuchtdioden auf die Pulsweite.

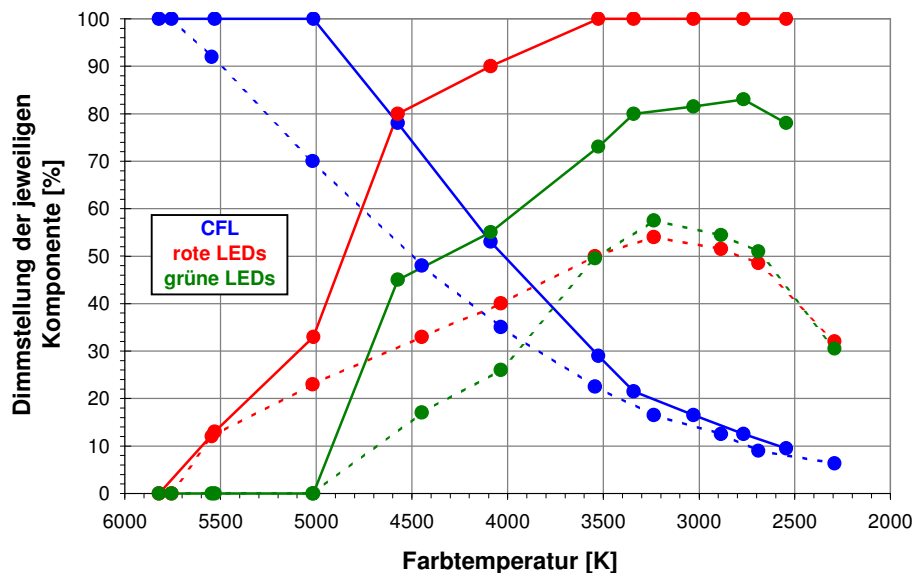


Abbildung 7: Dimmstellungen der einzelnen Komponenten für linear abfallenden [...] und maximalen [—] Lichtstrom

Es wird in dieser Abbildung die Komplexität des Systems deutlich. So nimmt der prozentuale Anteil der CFL mit sinkender Farbtemperatur jeweils stetig ab. Die Anteile der LEDs steigen bis zu einem Wert von  $T_n = 3250\text{K}$  an und nehmen dann wieder ab. Hinsichtlich der LEDs ist sowohl zwischen den beiden Farben als auch zwischen den verschiedenen Lichtstromverläufen zu differenzieren. Bei maximalem Lichtstrom ist eine gewisse Parallelität zwischen den Anteilen der roten und grünen LEDs vorhanden. Die grünen Anteile unterliegen dabei einer durchwegs niedrigeren Dimmstellung. Für den linear abfallenden Lichtstrom liegen die Anteile der grünen LEDs bis einschließlich einer Farbtemperatur von  $4000\text{K}$  unter denen der roten LEDs. Bei  $3500\text{K}$  befindet sich jedoch ein Schnittpunkt, ab dem die grünen LEDs eine um ca. zwei Prozentpunkte höhere Dimmstufe aufweisen, als die roten. Aus den Ergebnissen für die Dimmstellungen der LEDs stellt sich vor allem für den linearen Lichtstromverlauf die Frage, ob das System für die gestellten Anforderungen überdimensioniert ist und die Verwendung einer geringeren Anzahl von LEDs die Gesamteffizienz des Systems steigern könnte.

Gründe für die Komplexität des Hybridsystems sind zum einen die drei Komponenten – rote und grüne LEDs sowie die CFL – welche aufeinander abgestimmt und miteinander in entsprechenden Anteilen gemischt werden müssen. Zum anderen liegt eine sehr große Temperaturabhängigkeit des Lichtstroms, insbesondere der LEDs vor.

Diese Behauptung konnte in folgendem Versuch verifiziert werden: Das Dimmen der Komponenten auf 50% der für den maximalen Lichtstromverlauf ermittelten Werte sollte einen ebenfalls halbierten Lichtstrom zur Folge haben. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt.

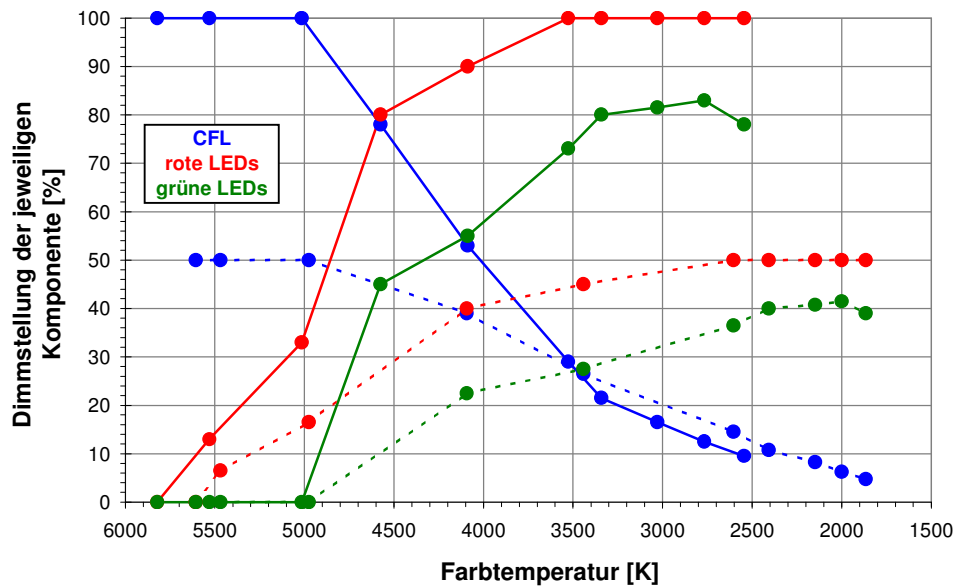


Abbildung 8: Dimmstellungen der einzelnen Komponenten mit 50% Einstellungen [...] des Verlaufes für maximalen [—] Lichtstrom aus Abbildung 7

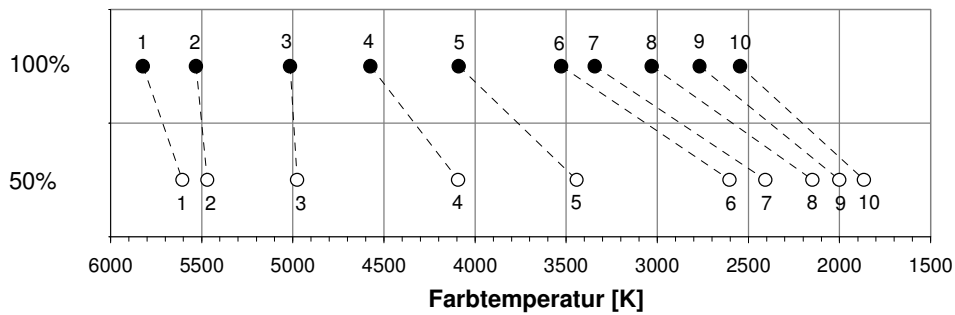


Abbildung 9: Vergleich der Farbtemperaturverlaufes für maximalen [●] Lichtstrom (100%) mit 50% Einstellungen [○]

Analog zu Abbildung 7 sind hier die Dimmstellungen der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit der Farbtemperatur dargestellt. Wie die Abbildungen Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen, war es nicht möglich, identische Zielfarbtemperaturen durch Halbieren der prozentualen Anteile der jeweiligen Komponente zu erreichen. Das kann nur dadurch erklärt werden, dass es sich in diesem Fall um geänderte Temperaturverhältnisse handelt, wie sie in Abbildung 10 dargestellt sind.

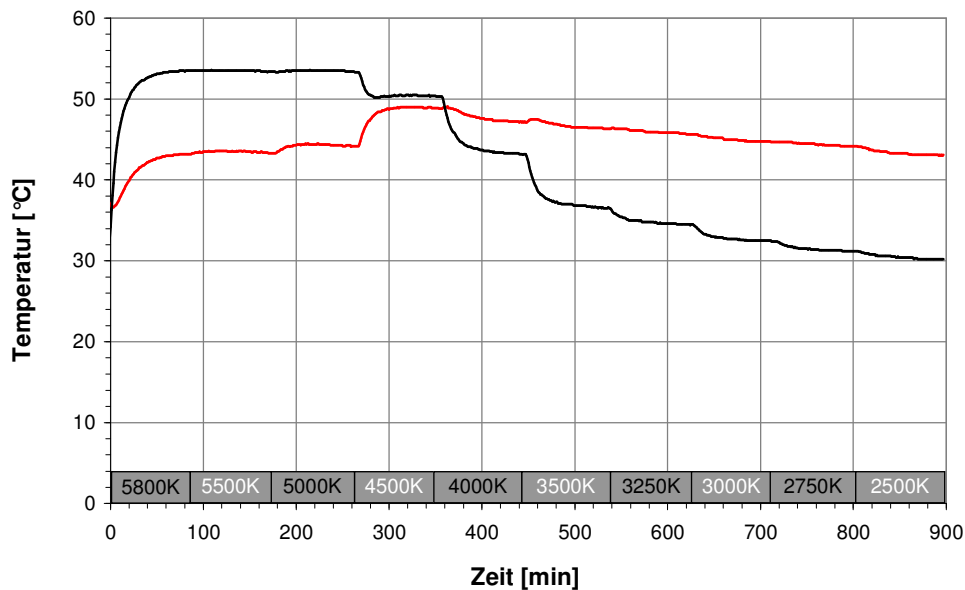


Abbildung 10: Temperatur im Hybriden (schwarz) und außen auf dem Kühlkörper (rot) in Abhängigkeit von der Zeit mit 50% Einstellungen des Verlaufes für maximalen Lichtstrom aus Abbildung 7

Die Temperaturen sind hier insgesamt geringer, als bei maximalem Lichtstrom, was bedeutet, dass die LEDs effizienter sind und somit niedrigere Dimmstellungen benötigen. Es reicht also nicht aus, die Dimmstufe zu verändern ohne auf den Einfluss der Temperatur zu achten. So bedeutet zum Beispiel die Veränderung der grünen LEDs von 50% auf 100% nicht eine Zunahme des Lichtstroms um 50%. Die LEDs nehmen in dem Fall zwar 50% mehr Leistung auf, erwärmen sich jedoch im gleichen Moment und werden damit ineffizienter. Da es sich bei der Hybridlampe um ein geschlossenes, kompaktes System handelt, hat die Regelung der CFL auch Auswirkungen auf die Umgebungstemperatur der LEDs und umgekehrt, wobei die Reaktion der LEDs auf Temperaturdifferenzen wesentlich schneller und empfindlicher ist als die der CFL. Es kann also vom maximalen Lichtstromverlauf nicht einfach auf einen z.B. 50%-Verlauf geschlossen werden, da hier andere Temperaturverhältnisse vorliegen, die LEDs wesentlich effizienter sind und somit die Dimmstellungen andere sein müssen. Die vorgestellten Parameter für den maximalen Lichtstrom sind Grundlage aller weiteren Betrachtungen.

## Ähnlichste Farbtemperatur

Die Analyse der ähnlichsten Farbtemperatur des Hybriden ist Gegenstand der Ausführungen dieses Abschnittes.

### Integrative Messung

Der zeitabhängige Verlauf der Farbtemperatur in Abbildung 11 zeigt, wie auch schon das Temperaturverhalten, dass es sich bei der Hybridlampe um ein sehr dynamisches System handelt.

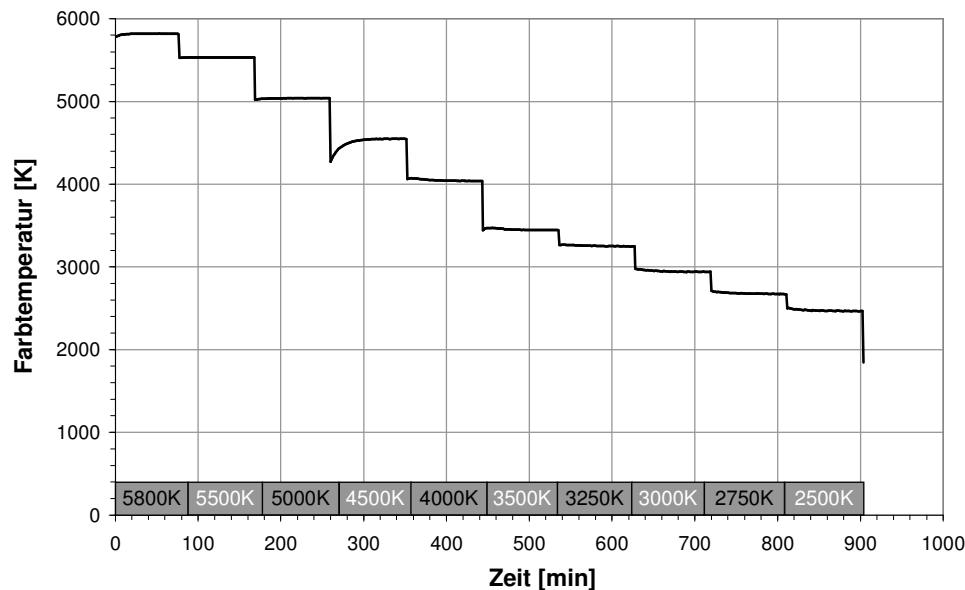


Abbildung 11: Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur  $T_n$  in Abhängigkeit von der Zeit für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Aus der Erkenntnis über das Temperaturverhalten lässt sich der Verlauf der Farbtemperatur in Abhängigkeit von der Zeit erklären. Die im vorherigen Kapitel beschriebene thermische Stabilisierungsdauer ist in Abbildung 11 durch das Erreichen der jeweiligen Plateaus zu erkennen. Erst bei stabilem Temperaturverhalten befindet sich auch die Farbtemperatur im Gleichgewicht. Dieses Erreichen des thermischen Gleichgewichtes variiert für verschiedene Farbtemperaturen, was auf die Dimmstellungen der einzelnen Komponenten und die dadurch erreichten verschiedenen Temperaturniveaus zurückzuführen ist. Es kann jedoch von einer durchschnittlichen Stabilisierungsdauer von mindestens 45 Minuten ausgegangen werden.

### Leuchtende Hybridoberfläche

Die laterale Verteilung der ähnlichsten Farbtemperatur auf der Oberfläche der Hybridlampe wurde mit dem Spektrometer und angeschlossener Lichtfaser bestimmt. Sie ist in Abbildung 12 dargestellt.

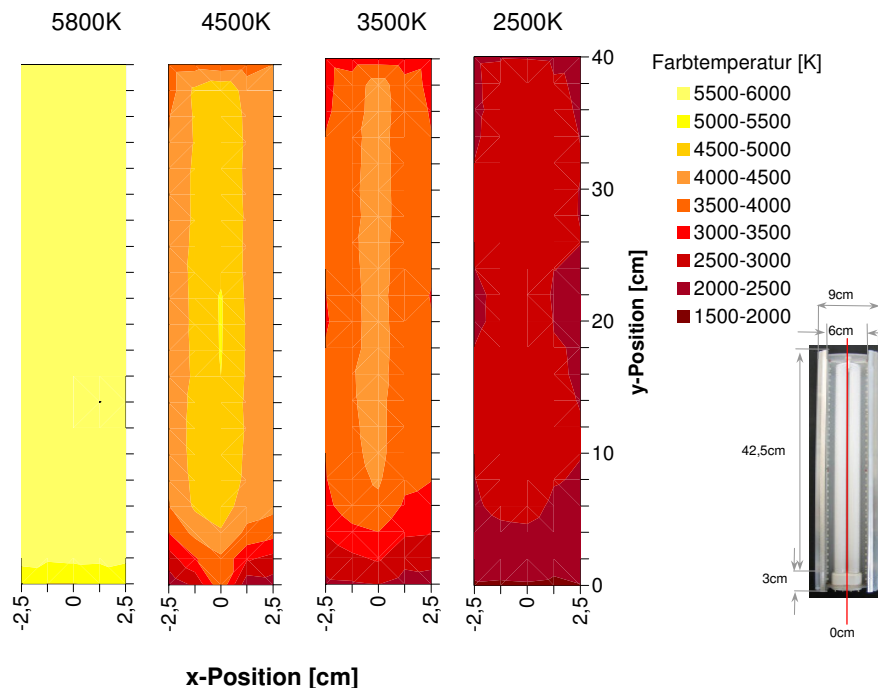


Abbildung 12: Verteilung der ähnlichsten Farbtemperatur auf der Hybridoberfläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Für  $T_n = 5800K$  ist die leuchtende Oberfläche komplett homogen, da hier nur die Kompaktlampe eingeschaltet ist. Mit zugeschalteten LEDs gibt es Differenzen von bis zu 1000K. Das ist ein gutes Ergebnis unter Beachtung der Tatsache, dass sich die Farbkoordinaten der einzelnen Komponenten nahezu über das ganze Farbdreieck erstrecken. Die Einstellung für 2500K weist lediglich einen Farbtemperaturunterschied von 500K auf – das reine LED-Licht wird also auf der Oberfläche stark homogenisiert.

### Beleuchtete Fläche

Die Messungen der beleuchteten Fläche ergaben, dass deren Ausleuchtung durch den Hybriden hinsichtlich der Farbtemperatur homogen erfolgt. Es waren bei allen vier Farbtemperaturen keine Inhomogenitäten zu verzeichnen.

## Fernfeld

Die Ergebnisse der Untersuchungen mittels Goniophotometer sind in dem Polardiagramm von Abbildung 13 dargestellt.

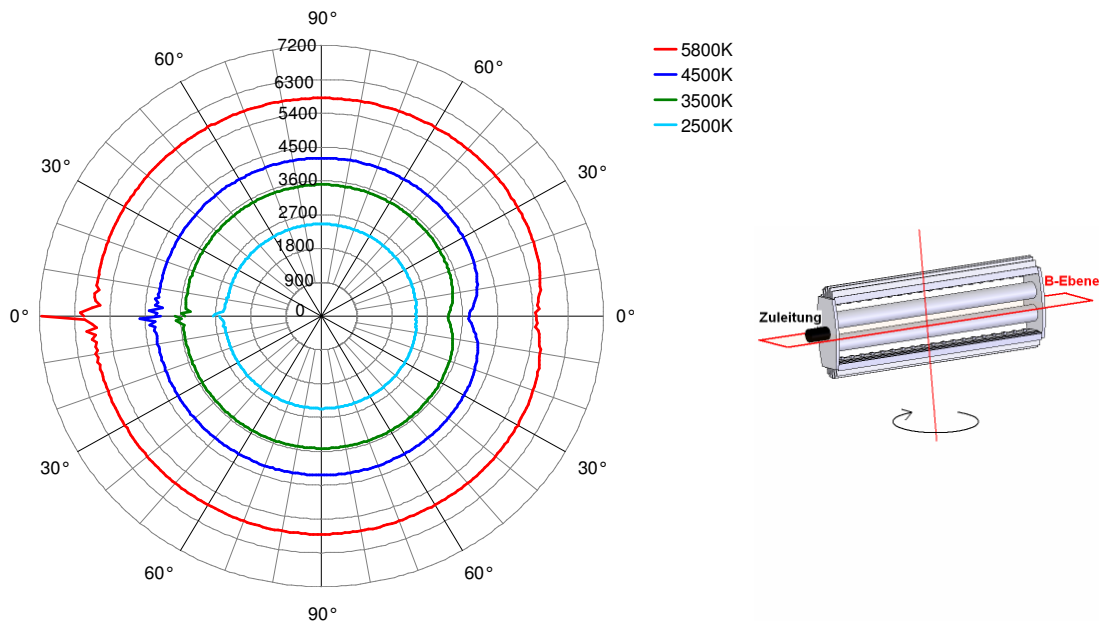


Abbildung 13: Ähnlichste Farbtemperatur  $T_n$  des Hybriden im Fernfeld für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Auch bei dieser Messung wurden nur die ausgewählten Einstellungen von  $T_n = 5800\text{K}$ ,  $4500\text{K}$ ,  $3500\text{K}$  und  $2500\text{K}$  untersucht. Wie zu erwarten war, ergaben sich aus der Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur vom Aufnahmewinkel keine Schwankungen im Farbtemperaturverlauf. Das für einen Winkel von  $\pm 0^\circ$  vorhandene Rauschen ist auf die Asymmetrie des Hybriden zurückzuführen. An den beiden Stirnseiten emittiert der Hybrid nahezu kein Licht, so dass an diesen Punkten die Information über die Farbtemperatur kein repräsentatives Ergebnis darstellt und keiner weiteren Interpretation bedarf.



## Normspektralwertanteile

In direktem Zusammenhang zu der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Farbtemperatur stehen die Normspektralwertanteile  $x$  und  $y$ . Diese liefern eine differenziertere Aussage über das Farbverhalten der Hybridlampe und sind Inhalt dieses Abschnittes.

### Integrative Messung

In Abbildung 14 sind die integrativ bestimmten Farbkoordinaten, für verschiedene Farbtemperaturen zu sehen. Die verwendeten Dimmstellungen entsprachen dabei denjenigen des Farbgangs mit maximalem Lichtstromverlauf.

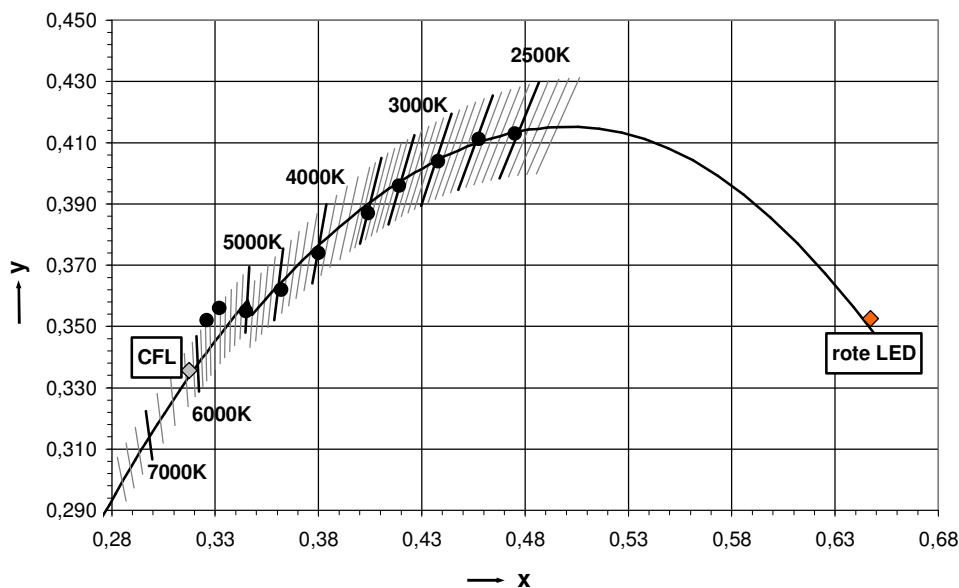


Abbildung 14: Farbkoordinaten für die integrativ untersuchten Farbtemperatureinstellungen für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Dargestellt ist in diesem Diagramm ein Ausschnitt aus der CIE 1931 Normfarbtafel (2°-Gesichtsfeld) mit Daylightkurve und Planckschem Kurvenzug, sowie Juddsche Geraden mit einer Länge von 5,4 SWE. Eingetragen sind die Farborte der Kompaktlampe und der roten LEDs sowie die Farborte, welche aus den Einstellungen für den Farbgang des Hybriden (siehe Abbildung 7) resultieren. Zielvorhaben war das Erreichen der Daylight- bzw. Planckkurve für Farbtemperaturen von 6000K bis 2500K. Für Farbtemperaturen von 2500K bis einschließlich 5000K konnten sehr gute Ergebnisse verzeichnet werden. Für  $T_n=5500K$  und  $T_n=5800K$  konnte der Verlauf der Daylightkurve nicht erreicht werden. Ebenso war es nicht möglich, eine Farbtemperatur von 6000K einzustellen. Beides beruht auf der im Blauen absorbierenden Streuscheibe der Hybridlampe.

## Leuchtende Hybridoberfläche

Zur vollständigen Hybridcharakterisierung sind auch Informationen, welche die Änderung der Normspektralwertanteile  $x$  und  $y$  über die Hybridoberfläche betreffen, notwendig. Abbildung 15 ( $x$ ) und Abbildung 16 ( $y$ ) zeigen die aus dieser Messung resultierenden Ergebnisse.

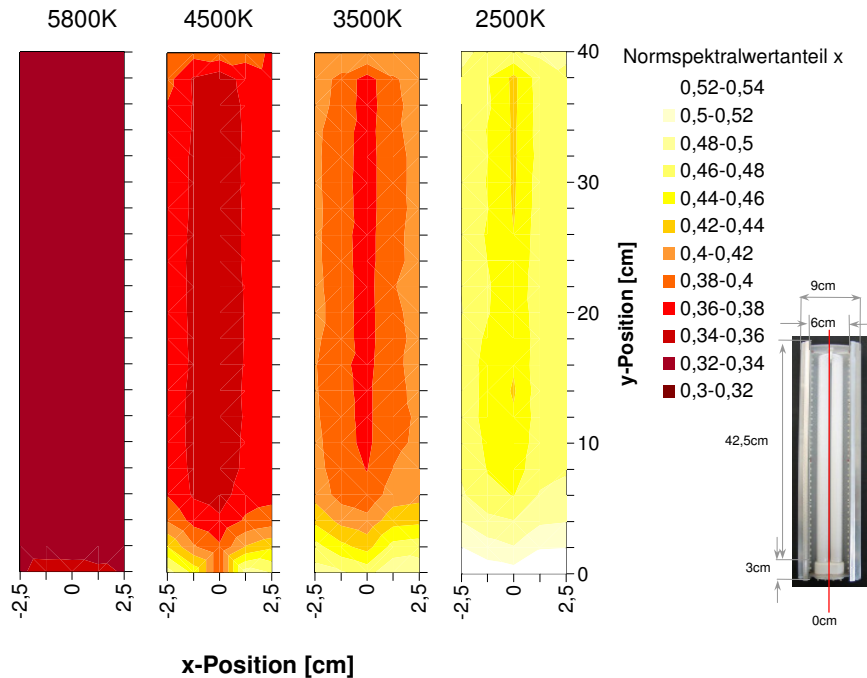


Abbildung 15: Verteilung des Normspektralwertanteils  $x$  auf der Hybridoberfläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

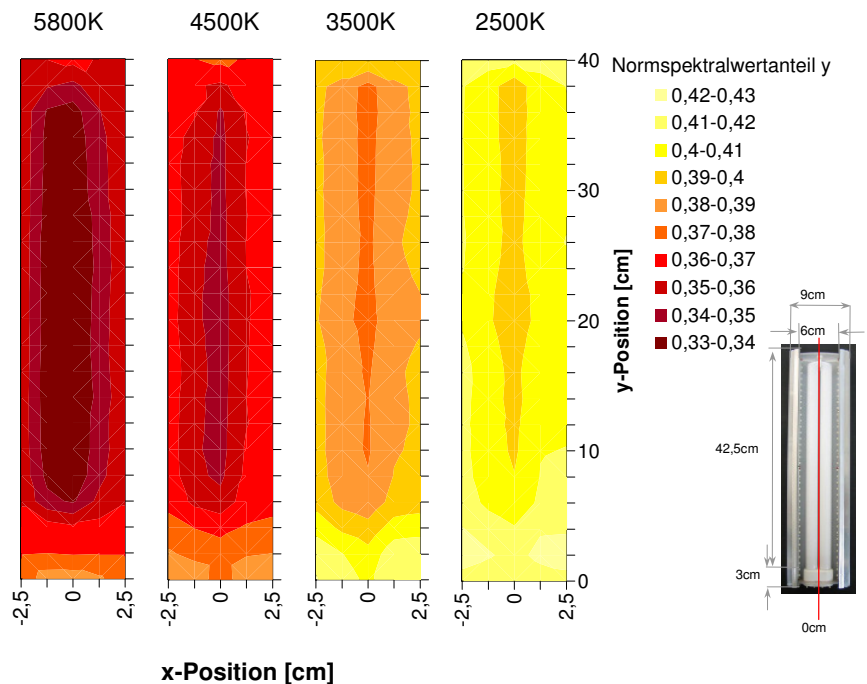


Abbildung 16: Verteilung des Normspektralwertanteils  $y$  auf der Hybridoberfläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Die hohe Homogenität der Farbtemperatur setzt eine ebenfalls homogene Verteilung der Normspektralwertanteile voraus. Diese ist gegeben, wie die Diagramme zeigen. So bewegen sich die Abweichungen der Werte im Rahmen von lediglich zehn bis zwanzig Punkten.

Um die Abweichungen zu visualisieren, ist in Abbildung 17 die Verteilung der Schwellwerteinheiten auf der Hybridoberfläche farblich skaliert dargestellt.

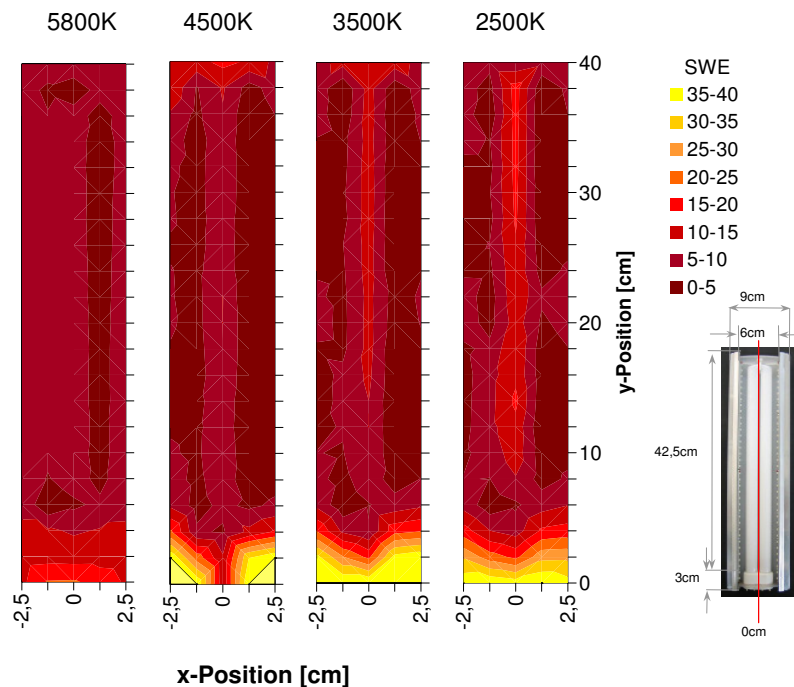


Abbildung 17: Verteilung der SWE auf der Hybridoberfläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Für die vier Farbtemperaturen 5800K, 4500K, 3500K und 2500K wurden die Schwellwerteinheiten für alle Messpunkte berechnet. Als Zielfarbart galt der über die gesamte Oberfläche gemittelte Farbart. Um die Helligkeitsunterschiede mit einzubeziehen, wurden die Werte für X, Y und Z gemittelt und daraus dann erst die Farbkoordinaten berechnet. In Tabelle 1 sind die aus dieser Berechnung resultierenden Zielfarborte dargestellt.

Farbtemperatur	Zielfarbart für die SWE-Berechnung	
	Normspektralwertanteil x	Normspektralwertanteil y
5800K	0,324	0,345
4500K	0,362	0,358
3500K	0,395	0,388
2500K	0,467	0,406

Tabelle 1: Zielfarborte für die SWE-Berechnung

### Beleuchtete Fläche

Auf einer beleuchteten Fläche wurden nur Abweichungen der Normspektralwertanteile gemessen, die sich im Rahmen der Messgenauigkeit bewegen. Es kann folglich von einer einheitlichen Ausleuchtung einer Fläche gesprochen werden.

## Fernfeld

Wie sich die Normfarbwertanteile im Fernfeld verhalten, macht Abbildung 18 deutlich.

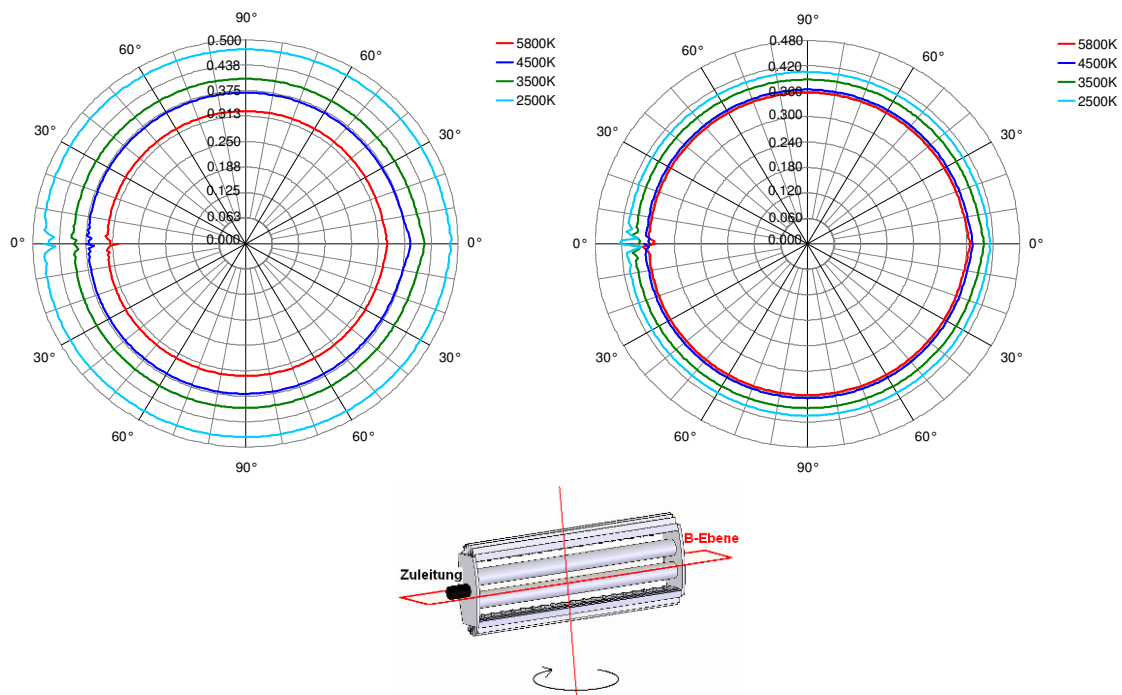


Abbildung 18: Normfarbwertanteile  $x$  und  $y$  des Hybriden im Fernfeld für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Analog zu der bereits vorgestellten Verteilung der Farbtemperatur im Fernfeld weisen auch die Normspektralwertanteile für alle Betrachtungswinkel die gleichen Werte auf. An den beiden nahezu lichtundurchlässigen Stirnseiten des Hybriden zeigt sich wieder das Rauschen, da hier keine Farbinformationen gewonnen werden können.

## Farbwiedergabeeigenschaften

Die Farbwiedergabeeigenschaften werden mit Hilfe des allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra8 beschrieben.

### Integrative Messung

Abbildung 19 zeigt den Verlauf des Farbwiedergabeindex Ra8 in Abhängigkeit von der eingestellten Farbtemperatur für die integrative Messung im Ulbrichtzylinder.

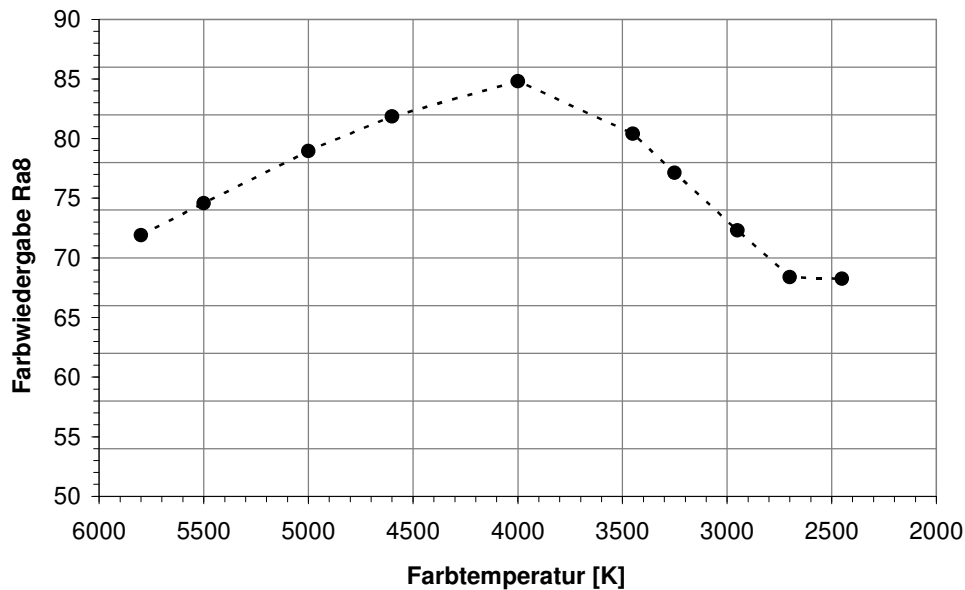


Abbildung 19: Verlauf des Farbwiedergabeindex Ra8 (integriert) in Abhängigkeit von der Farbtemperatur für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Die Farbwiedergabe bewegt sich zwischen einem Wert von 68 im Minimum für eine Farbtemperatur von  $T_n = 2500\text{K}$  und einem Maximalwert von 85 für  $T_n = 4000\text{K}$ . Das Ziel, einen Ra8-Wert von über 80 zu erreichen, ist nur für Farbtemperaturen zwischen  $T_n = 3500\text{K}$  und  $4500\text{K}$  erreicht worden. Gemäß EN 12464 sollten Lampen mit einem allgemeinen Farbwiedergabeindex kleiner als 80 nicht in Räumen verwendet werden, in denen sich Menschen für längere Zeit aufhalten [7]. Die Möglichkeit zur Steigerung der Farbwiedergabe werden in einem späteren Abschnitt näher erläutert: die Verwendung von LEDs mit anderen Eigenschaften.

### Leuchtende Hybridoberfläche

Die Abrasterung der Hybridoberfläche mit einem Lichtwellenleiter und der entsprechenden Spektrometerauswertung ergibt für die vier ausgewählten Farbtemperaturen von 5800K, 4500K, 3500K und 2500K die in Abbildung 20 gezeigten Verläufe des Farbwiedergabeindex Ra8.

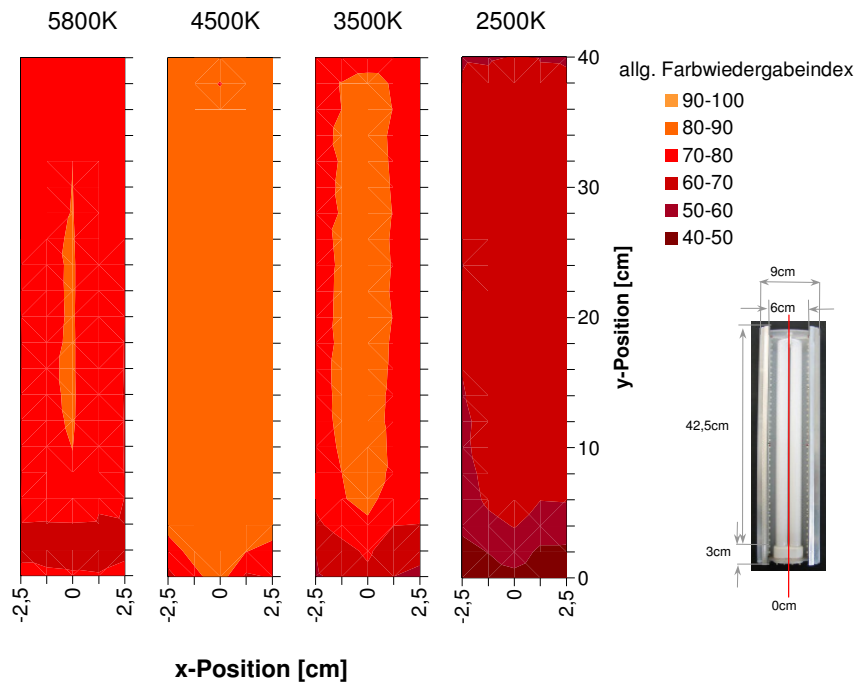


Abbildung 20: Verteilung des Farbwiedergabeindex Ra8 auf der Hybridoberfläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

In allen vier Diagrammen ist eine sehr große Homogenität auf dem größten Teil der leuchtenden Hybridoberfläche zu verzeichnen. Im unteren Randbereich, auf Höhe des Lampensockels, ergeben sich Unregelmäßigkeiten. Auch bei dieser ortsauflösenden Messung ist zu sehen, dass der Farbwiedergabeindex bei 4500K sein Maximum erreicht. Zudem liegt bei dieser Farbtemperatur die größte Homogenität vor. Bei einer Farbtemperatur von 2500K kann man ebenfalls von einer sehr homogenen Verteilung des Farbwiedergabeindex sprechen. Für 5800K ist die Homogenität lediglich in der Mitte durch eine leichte Erhöhung im Vergleich zur übrigen Fläche unterbrochen. Bei 3500K liegt ca. 50% der Hybridoberfläche bei einem höheren Farbwiedergabeindex als der Rest. Unter Betrachtung der Lage der CFL im Hybriden wird die Erklärung für die Artefakte am unteren Randbereich des Hybriden offensichtlich. In obiger Abbildung sieht man, dass sich in den unteren 3cm der Sockel der Kompaktlampe befindet. Außerdem liegen direkt über dem Lampensockel die Wendeln, was bedeutet, dass dort Abschattungen entstehen. Das erklärt die Änderung des Ra8-Wertes an dieser Stelle, welche somit nicht weiter beachtet werden muss.

### Beleuchtete Fläche

Die beleuchtete Fläche von 80x80cm<sup>2</sup> weist bei allen Einstellungen der Farbtemperatur lediglich eine Differenz von ein bis zwei Punkten im Ra8-Wert auf. Der Farbwiedergabeindex der beleuchteten Fläche ist somit homogen.

### Photometrie

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu Untersuchungen der Messgrößen Lichtstrom, Lichtstärke und Leuchtdichte präsentiert.

### Integrative Messung

Die beiden untersuchten Lichtstromverläufe der Hybridlampe wurden bereits in Abbildung 6 dargestellt. Wie dort zu sehen war, liegt der Lichtstrom des Hybriden für eine Farbtemperatur von 5800K bei ca. 1600lm und fällt für einen linearen Verlauf auf ca. 200lm bei 2500K ab. Der Verlauf für maximal erreichbaren Lichtstrom beginnt ebenfalls bei ca. 1600lm für 5800K, steigt bis zu einer Farbtemperatur von 5000K auf knapp ca. 1700lm an und erreicht bei einer Farbtemperatur von 2500K den Wert von ca. 550lm.

### Leuchtende Hybridoberfläche

Ausgehend von der integrativen Messung fanden wiederum für die vier Einstellungen von  $T_n = 5800\text{K}$ , 4500K, 3500K und 2500K bei maximalem Lichtstrom weitere Untersuchungen zur Verteilung der Helligkeit auf der Hybridoberfläche, der beleuchteten Fläche und im Fernfeld statt. In Abbildung 21 ist die leuchtende Oberfläche des Hybriden dargestellt.

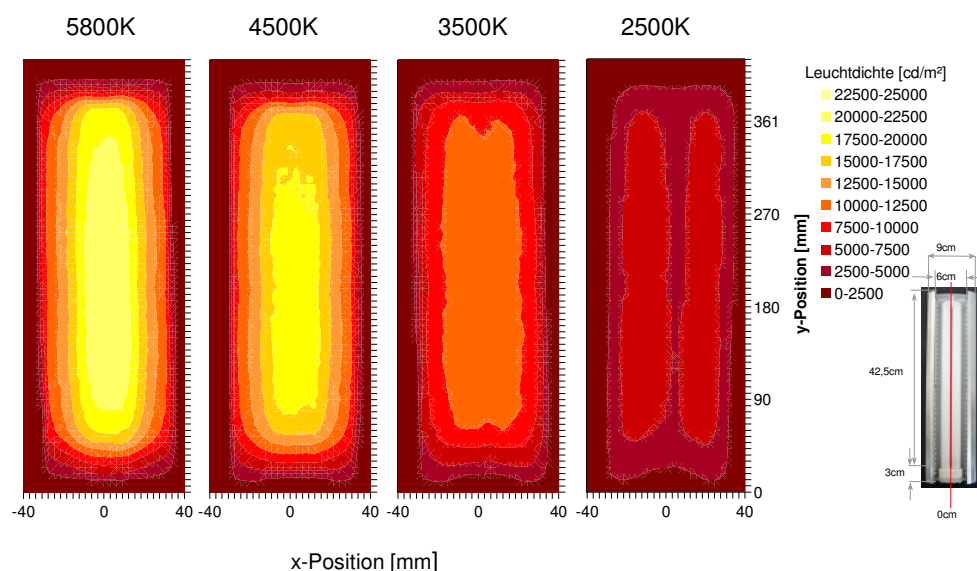


Abbildung 21: Verteilung der Leuchtdichte auf der Hybridoberfläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Eine gleichmäßige Verteilung der Leuchtdichte auf der Hybridoberfläche kann mit dem aktuellen Hybridprototypen nicht erreicht werden. Es existieren Leuchtdichtedifferenzen

von bis zu  $12500\text{cd/m}^2$ . Unter Abnahme des Lichtstroms der Kompaktlampe wird die Verteilung der Leuchtdichte homogener.

### *Beleuchtete Fläche*

Für die vier ausgewählten Farbtemperaturen 5800K, 4500K, 3500K und 2500K erfolgte neben der Untersuchung der Oberfläche auch eine Charakterisierung einer vom Hybriden beleuchteten Fläche. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 22 dargestellt.

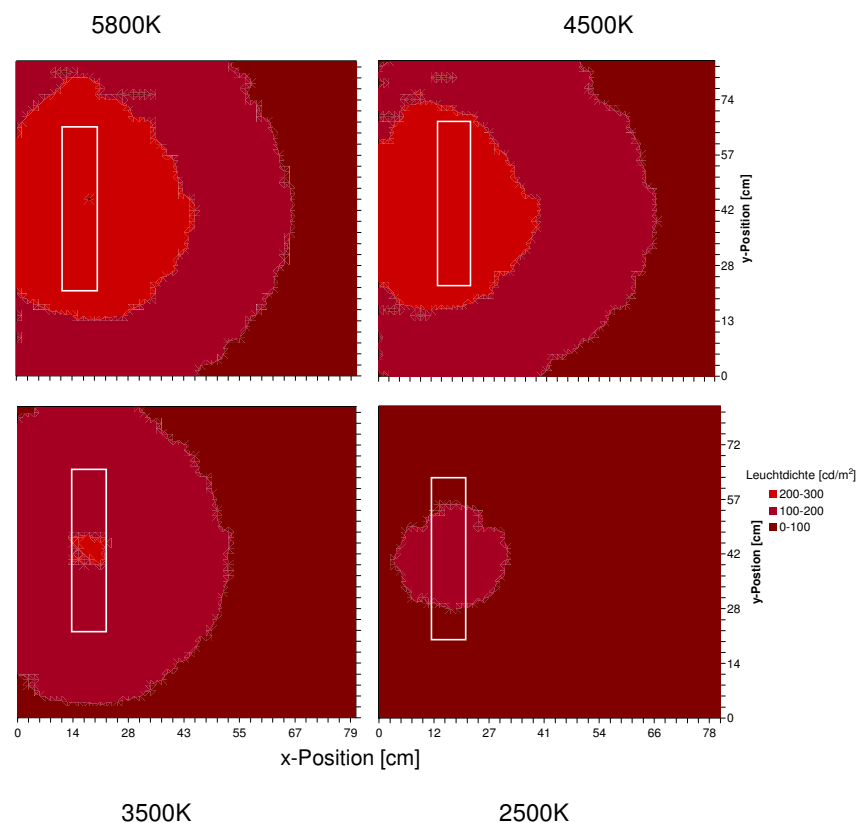


Abbildung 22: Verteilung der Leuchtdichte auf einer vom Hybriden beleuchteten Fläche für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Obige Abbildung zeigt deutlich den konzentrischen Leuchtdichteverlauf. Von der Stelle senkrecht unter dem Hybriden nimmt die Leuchtdichte zum Rand hin gleichmäßig ab. Zwischen 5800K und 4500K liegt praktisch kein Unterschied in der Flächenausleuchtung vor. Bei einer Einstellung von 3500K ist eine deutliche Abnahme der Leuchtdichte der beleuchteten Fläche festzustellen. Für 2500K ist lediglich in einem kleinen Bereich direkt unter der Hybridlampe eine Leuchtdichte von über  $100\text{cd/m}^2$  vorhanden. Der größte Teil der Fläche hat hier eine Leuchtdichte von unter  $100\text{cd/m}^2$ . Eine Leuchtdichte von unter  $100\text{cd/m}^2$  fällt in den Bereich des mesopischen Sehens. Daher müsste eine entsprechende Gewichtung der Werte aus der Leuchtdichtemessung erfolgen. Nach Untersuchungen von S. Kokoschka (1972) entspricht der mesopische Hellempfindlichkeitsgrad bei einer Leuchtdichte von  $10\text{cd/m}^2$  jedoch nahezu dem Verlauf des photopischen Hellempfindlichkeitsgrades [8], so dass eine Korrektur der Messergebnisse nicht erforderlich ist.



## Fernfeld

Aus den LVK-Messungen im Fernfeld konnten Erkenntnisse über die Verteilung der Lichtstärke der Hybridlampe gewonnen werden (Abbildung 23).

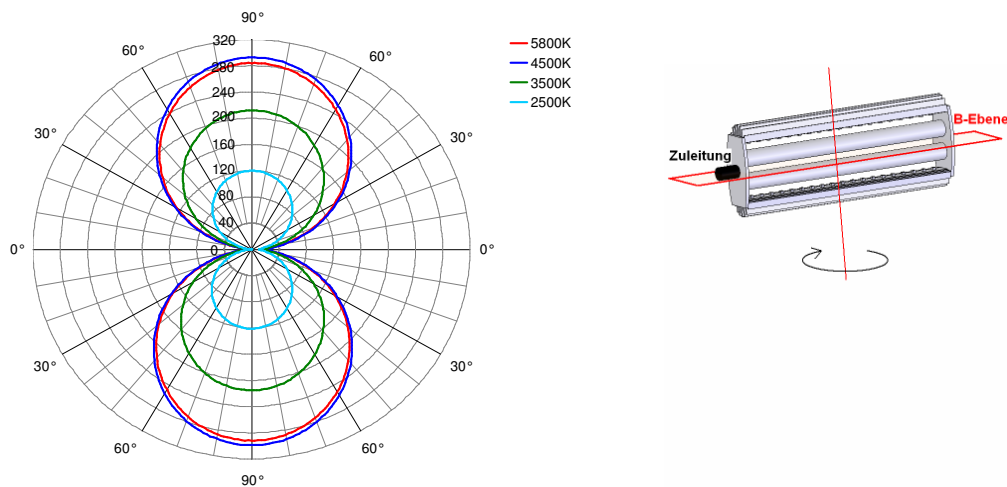


Abbildung 23: Lichtstärke [cd] des Hybriden im Fernfeld für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Der Hybrid als Punktlichtquelle betrachtet strahlt in zwei gegenüberliegende Raumhälften. An Winkeln von  $\pm 90^\circ$  weist er seine Maxima in der Lichtstärke auf. Je nach Farbtemperatur und dazugehöriger Helligkeit wird eine Lichtstärke zwischen 120cd und 290cd erreicht. Auf der Seite des Sockels ist die Lichtstärke gleich Null, auf der anderen Stirnseite nahe Null. Die Verwendung unterschiedlich transparenter Materialien an den Stirnseiten führt zu diesem Effekt.

## Elektrische Leistung und Lichtausbeute

In diesem Kapitel wird auf die elektrischen Daten des Hybriden eingegangen. Es werden die Lichtausbeute und die von der Hybridlampe aufgenommene elektrische Leistung vorgestellt und diskutiert. Diese beiden Parameter werden sowohl auf die einzelnen Komponenten als auch auf das Gesamtsystem bezogen betrachtet. Sie stehen jeweils im Zusammenhang mit der Farbtemperatur und den hierfür erforderlichen Dimmstellungen der Komponenten. Zunächst wird auf die aufgenommene Leistung eingegangen (Abbildung 24).

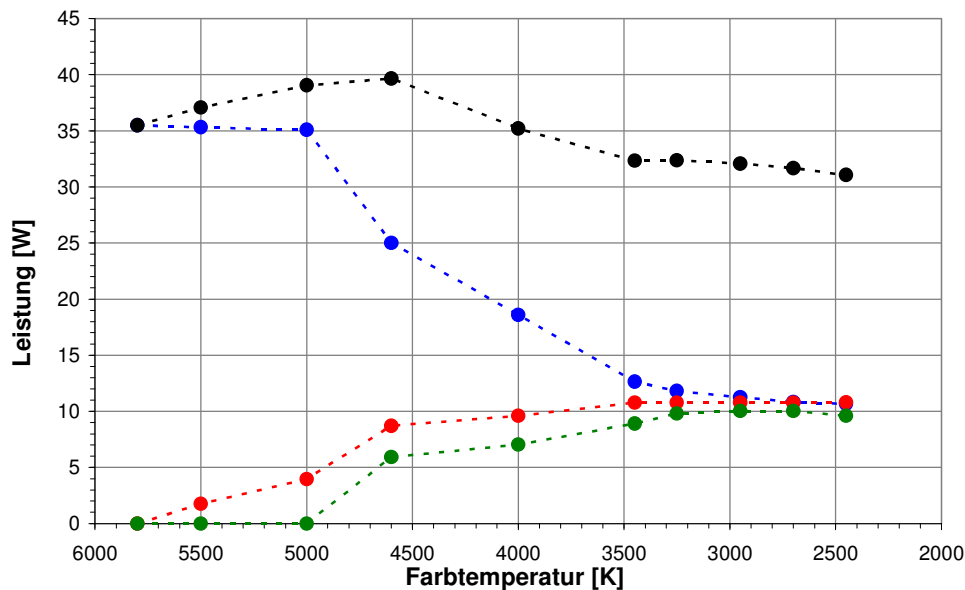


Abbildung 24: Leistungsaufnahme der einzelnen Komponenten (Gesamtleistungsaufnahme (schwarz), CFL (blau), rote LEDs (rot), grüne LEDs (grün)) in Abhängigkeit von der Farbtemperatur für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Zu sehen ist in obiger Abbildung die aufgenommene Leistung für verschiedene Farbtemperaturen und den maximal möglichen Lichtstrom. In schwarz ist die Gesamtleistung des Systems aufgetragen, welche sich aus der Addition aller Einzelleistungen ergibt. Bis zu  $T_n = 5000\text{K}$  ist das hohe Niveau von nahezu 40W maßgeblich von der Kompaktlampe (im Diagramm blau) geprägt, die dazu einen Beitrag von 36W liefert. Für eine Farbtemperatur von 4500K wird die Leistung der CFL um 11W auf 25W reduziert. Das Zuschalten der LEDs (im Diagramm rot und grün) um insgesamt den gleichen Betrag sorgt dafür, dass eine Gesamtleistung von fast 40W erhalten bleibt. Ab 4000K fällt die Gesamtleistung um ca. 5W. Die LEDs nehmen etwas mehr Leistung im Vergleich zur vorherigen Dimmstellung auf, während die Leistung der CFL um weitere 7W abnimmt. Im Bereich zwischen 3500K und 2500K beträgt die Gesamtleistung zwischen 31 und 33W. Die einzelnen Komponenten nähern sich alle einer aufgenommenen Leistung von ca. 10W.

Aus der aufgenommenen elektrischen Leistung und dem bereits diskutierten Lichtstrom kann die Lichtausbeute berechnet werden. Sie ist das Verhältnis von Lichtstrom zu aufgenommener Leistung und ist in Abbildung 25 vorgestellt.

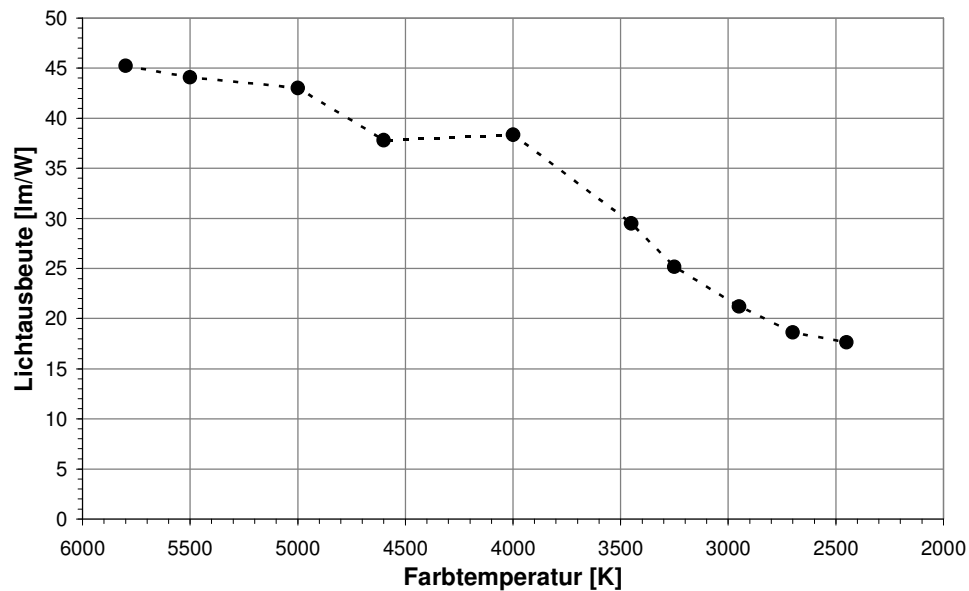


Abbildung 25: Lichtausbeute des gesamten Hybriden in Abhängigkeit von der Farbtemperatur für den Verlauf des maximalen Lichtstroms aus Abbildung 7

Mit ca. 48 lm/W ist die Lichtausbeute in dem vorliegenden Verlauf für eine Einstellung von  $T_n = 5800\text{K}$  maximal. Mit abnehmender Farbtemperatur und abnehmendem Lichtstrom wird auch die Lichtausbeute reduziert. Ein großer Sprung ist zwischen der Einstellung für 4000K und derjenigen für 3000K zu verzeichnen. Ab  $T_n = 3500\text{K}$  befindet sich die CFL auf einem Leistungsniveau vergleichbar mit den LEDs und liegt nicht mehr entscheidend darüber. Das zeigt, in Bezug auf Abbildung 24, dass die Kompaktlampe auch im Dimmbetrieb effizienter ist als die LEDs.

### 4.2.3. Weiterführende Untersuchungen: Einsatz von warmweißen und pure-green/orange LEDs

Ein weiterführender Versuch bestand in der Verwendung alternativer LEDs. Zum einen wurde die Möglichkeit untersucht, ob mit einem Zweikomponentensystem, bestehend aus CFL und warmweißen LEDs, ebenfalls der gewünschte Farbgang möglich sei. Zum anderen wurde geprüft, ob sich durch Einsatz von LEDs mit anderem Spektrum der gleiche Farbgang, wie er mit den Zwei-Komponenten-LEDs möglich ist, jedoch mit höherem Farbwiedergabeindex realisieren lässt. Hierzu standen Advanced Power TOPLED® in den Farben „orange“ und „pure-green“ zu Verfügung. Die LEDs der Farbe „pure-green“ weisen einen anderen Farbort auf, als die LEDs der Farbe „true-green“. Die Farbkoordinaten aller verwendeten LEDs werden in Abbildung 26 gezeigt.

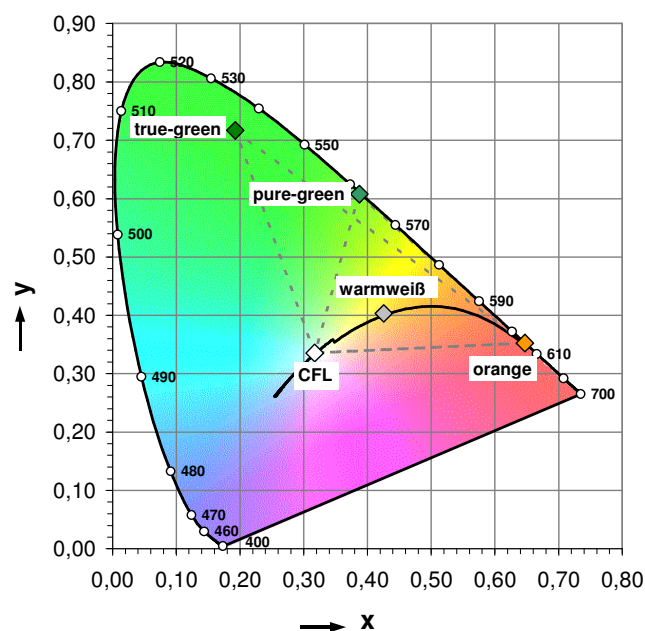


Abbildung 26: Normfarbtabelle CIE 1931 (2°-Gesichtsfeld) mit Farbkoordinaten der verwendeten Lichtquellen

Rote und grüne LEDs waren alternierend auf der Platine entlang der CFL angebracht. Das Ergebnis der Untersuchungen im Ulbrichtzylinder den Farbgang betreffend ist in Abbildung 27 dargestellt.

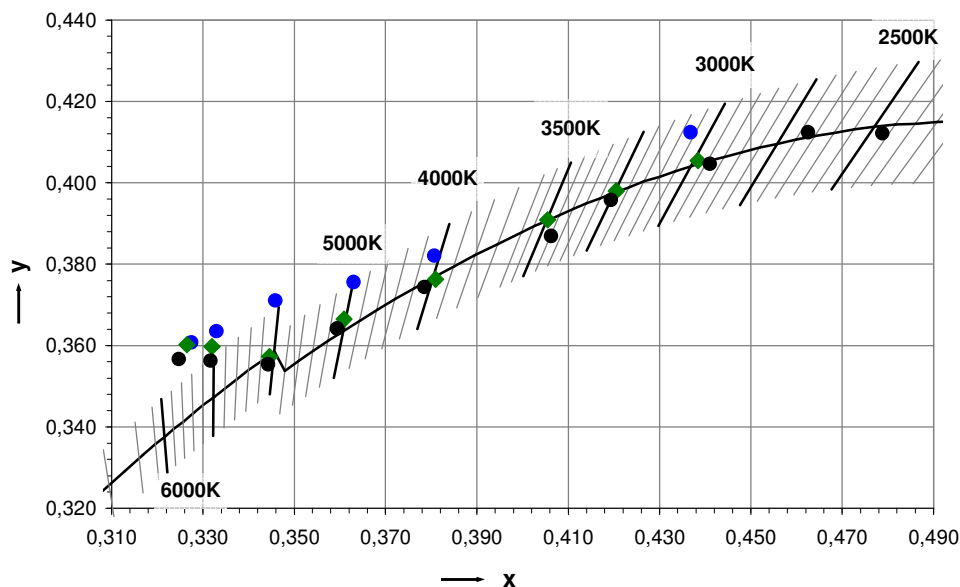


Abbildung 27: Farbkoordinaten für Hybridmodelle mit verschiedenen LEDs: „true-green“/„orange“ (schwarz), „pure-green“/„orange“ (grün), „warmweiß“ (blau) für den Verlauf des jeweils maximal möglichen Lichtstroms

In das Diagramm sind die Farbkoordinaten für die Farbgänge der drei Hybridvariationen eingetragen. Der schwarze Graph stellt den schon bekannten Farbgang für den als Standard definierten Hybriden dar. Der grüne Graph zeigt den entsprechenden Verlauf für den Hybriden mit LEDs der Farben „pure-green“ und „orange“. In blau ist der Farbgang des Zweikomponentenhybriden dargestellt. Mit den roten und grünen LEDs ist trotz anderem Spektrum der Farbgang des Standardhybriden erreichbar, jedoch nur bis zu einer Farbtemperatur von 3000K, was an den Farbkoordinaten der LEDs liegt. Unter Verwendung der warmweißen LEDs ist der Farbgang nur annähernd realisierbar. Die Krümmung der Kurvenzüge kann nicht nachvollzogen werden, da eine dritte Komponente fehlt und somit nur Farbkoordinaten auf der Verbindungsgeraden zwischen den Koordinaten der CFL und denen der LEDs einstellbar sind. Aufgrund der aus dem niedrigen Lichtstrom der warmweißen LEDs resultierenden geringen Hebelwirkung derselben kann der Farbgang lediglich im Bereich zwischen 5800K und 4000K verwirklicht werden. Die Kompaktlampe müsste dann auf ein Niveau herunter gedimmt werden, für das sie sich in einem instabilen Entladungszustand befindet. Zu den Farbtemperaturen zwischen 5800K und 4000K ist eine Farbtemperatur von ca. 3100K möglich, wenn nur die LEDs eingeschaltet sind. Der sich aus dem Farbgang ergebende Verlauf für den Lichtstrom in Abhängigkeit von der Farbtemperatur ist in Abbildung 28 zu sehen.

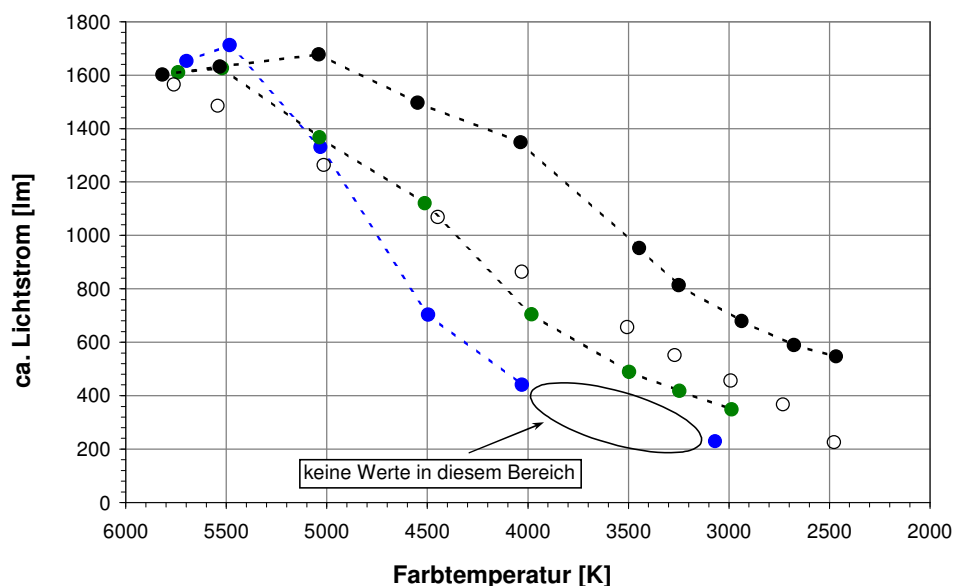


Abbildung 28: Lichtstrom in Abhängigkeit von der Farbtemperatur für Hybridmodelle mit verschiedenen LEDs für maximalen [●] und linearen [o] Lichtstromverlauf: „true-green“/„amber“ (schwarz), „pure-green“/„amber“ (grün), „warmweiß“ (blau)

Die gestrichelte schwarze Kurve zeigt den maximal möglichen Lichtstrom des Zwei-Komponenten-LED-Hybriden, die schwarzen Kreise den linearen Verlauf. Der maximale Lichtstromverlauf des Hybriden mit LEDs der Farben „pure-green“ und „orange“ entspricht nahezu dem linearen Lichtstromverlauf des Standardhybriden. Die Verwendung dieser LEDs hat somit einen Helligkeitsverlust im Vergleich zur Verwendung der Zwei-Komponenten-LEDs zur Folge. Ein Helligkeitsverlust ist auch beim Einsatz der warmweißen LEDs (blau im Diagramm) zu vermerken. Lediglich im Bereich über 5500K liegt diese Hybridvariation im Lichtstrom bis zu 100lm über den anderen beiden. Da die Farbtemperaturen zwischen 4000K und 3000K nicht einzustellen sind, liegt hier auch keine Aussage über die Helligkeit vor. Auch über das Verhalten des Farbwiedergabeindexverlauf der drei Hybriden in Abhängigkeit von der Farbtemperatur wird in nachfolgender Abbildung 29 vorgestellt.

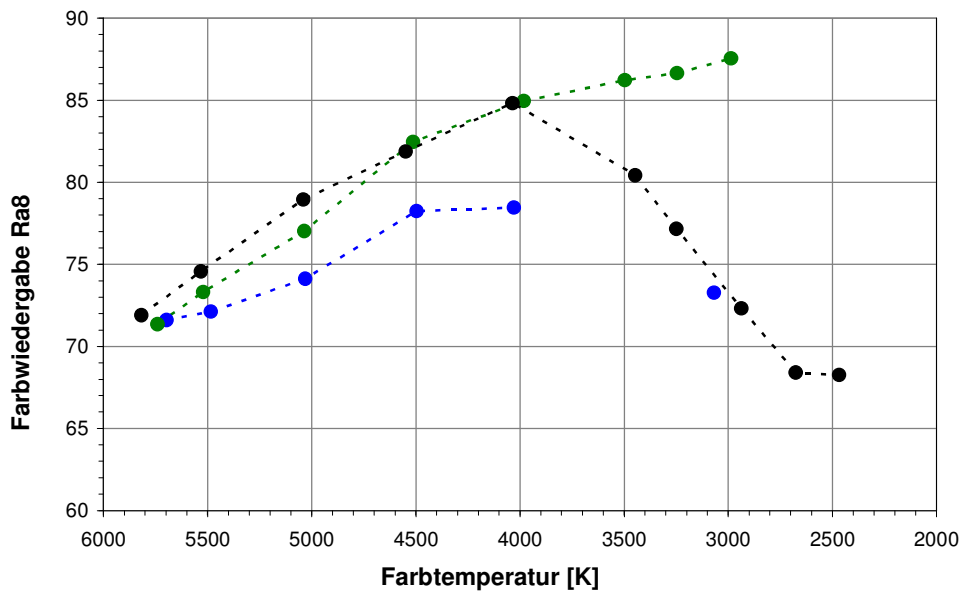


Abbildung 29: Farbwiedergabeindex in Abhängigkeit von der Farbtemperatur für Hybridmodelle mit verschiedenen LEDs: „true-green“/„orange“ (schwarz), „pure-green“/„orange“ (grün), „warmweiß“ (blau) für den Verlauf des jeweils maximal möglichen Lichtstroms

Der Verlauf der Farbwiedergabeindizes für den Standardhybriden (im Diagramm rot) wurde bereits erläutert. Der in grün abgebildete Verlauf der Farbwiedergabeindizes für den Hybriden mit LEDs der Farben „pure-green“ und „orange“ macht deutlich, dass eine wesentliche Steigerung der Ra8-Werte im niedrigeren Farbtemperaturbereich möglich ist, wenn die grünen LEDs ein zu höheren Wellenlängen verschobenes Spektrum aufweisen. Für Farbtemperaturen bis 4000K ergeben sich daraus keine Veränderungen.

### 4.3. Optische Simulation

Die beschriebenen Messungen – insbesondere die orts aufgelösten – dienten zum Vergleich mit der durchgeführten optischen Modellierung. So konnten auf Basis der Messungen die für die Modellierungen notwendigen Parameter, wie z.B. die Streueigenschaften der verwendeten Materialien, auf den Hybriden angepasst werden. Ein Vergleich der aus den Simulationen gewonnenen Ergebnissen mit denen aus den optischen Messungen zeigte die gewünschten Korrelationen, aber auch Abweichungen, die mittels entsprechender Parameteranpassung verringert werden konnten.

#### 4.3.1. Optische Modellierung

Die optische Modellierung war ein Instrument zur Untersuchung verschiedener Hybridgeometrien und Anordnungen der Komponenten sowie für die optischen Eigenschaften der verwendeten Streumaterialien.

##### *Erstellung eines Rechenmodells*

Durch die Vorgaben zum Bau des Hybriden aufgrund des untersuchten Wärmehaushalts wurde ein Rechenmodell erstellt, welches dem tatsächlichen Hybriden entsprach. In Abbildung 30 ist dieses Modell gezeigt.

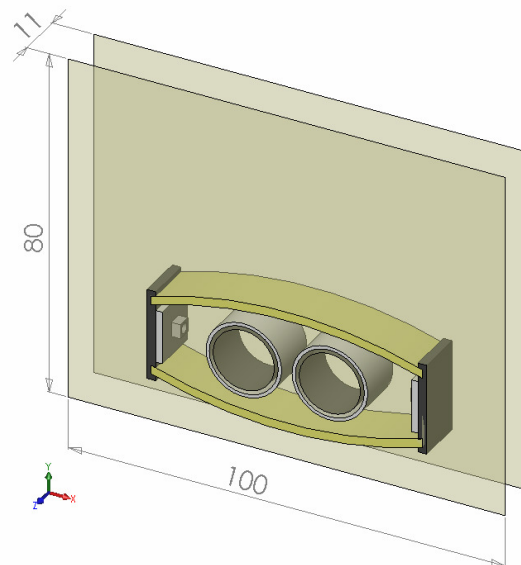


Abbildung 30: Rechenmodell zur optischen Modellierung des Hybriden

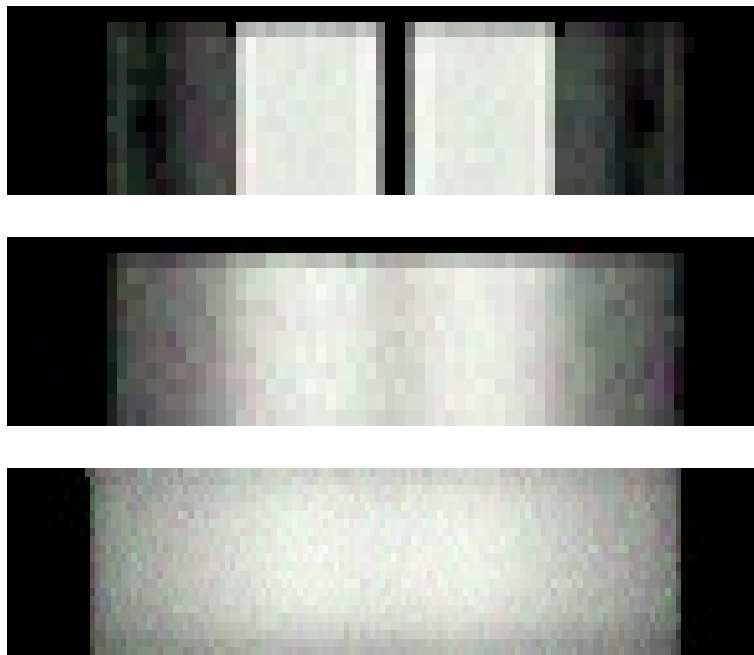
Das Rechenmodell zur optischen Modellierung des Hybriden besteht aus einem Ausschnitt des Hybriden, der auf jeder Seite genau eine LED aufweist. Durch an den Stirnseiten angebrachte „Spiegel“ werden periodische Randbedingungen geschaffen, welche die Rechenzeiten zur Erstellung einer optischen Simulation wesentlich verkürzen. Weiterhin konnte in diesem Rahmen ein Modell der Leuchtstofflampe realisiert werden. In den zylinderförmigen Glaskörper wird dazu ein zweiter Zylinder eingesetzt. Dieser hat einen etwas geringeren Durchmesser als der Glaskörper und besteht aus sphärischen



Partikeln. Durch Zuweisung der entsprechenden optischen Eigenschaften (Absorption, Remission, Transmission und Emission) an diesen inneren Zylinder können Funktionen der Leuchtstoff- und Schutzschichtbeschichtung angenähert werden. Ein Vergleich mit Messungen zeigte hier eine sehr gute Übereinstimmung.

### ***Durchgeführte optische Simulationen***

Neben den Versuchen zur Übereinstimmung zwischen Rechenmodell und realem Experiment lag das Hauptaugenmerk der optischen Modellierung auf Untersuchungen zur Lichtmischung an der Hybridoberfläche. Der Unterschied zwischen verschiedenen Materialien der Streuscheibe wird in der Aufsicht des Hybriden in Abbildung 31 deutlich.



*Abbildung 31: Modellierung des Materials der Streuscheibe; transparent (oben), milchig (Mitte) und lambertsch (unten)*

Für die in Abbildung 31 gezeigten Ergebnisse fanden drei verschiedene Materialien der Streuscheibe Verwendung. Als Lichtquelle diente für diese Modellierungen nur die Kompaktlampe. Transparenter und milchiger Kunststoff zeigen bereits deutliche Unterschiede in der Lichthomogenität. Während für den transparenten Kunststoff die beiden Lampenkolben sichtbar sind, ist ihre Struktur für den milchigen Kunststoff bereits verwischt. Weiterhin wird der Fall einer vollständig lambertschen Streuscheibe gezeigt. Hier ist die beste Lichthomogenität zu erkennen.

Zur Untersuchung der Lichtmischung in Bezug auf die LEDs wurden unterschiedliche Modelle erprobt. In der Realität einsetzbare Lösungen könnten z.B. mit strukturierten Streuscheiben erreicht werden. Während dieser Simulationen waren die Kompaktlampe aus- und die LEDs eingeschaltet. In der nachfolgenden Abbildung 32 sind die Ergebnisse der Simulationen an unterschiedlich strukturierten Streuscheiben gezeigt.

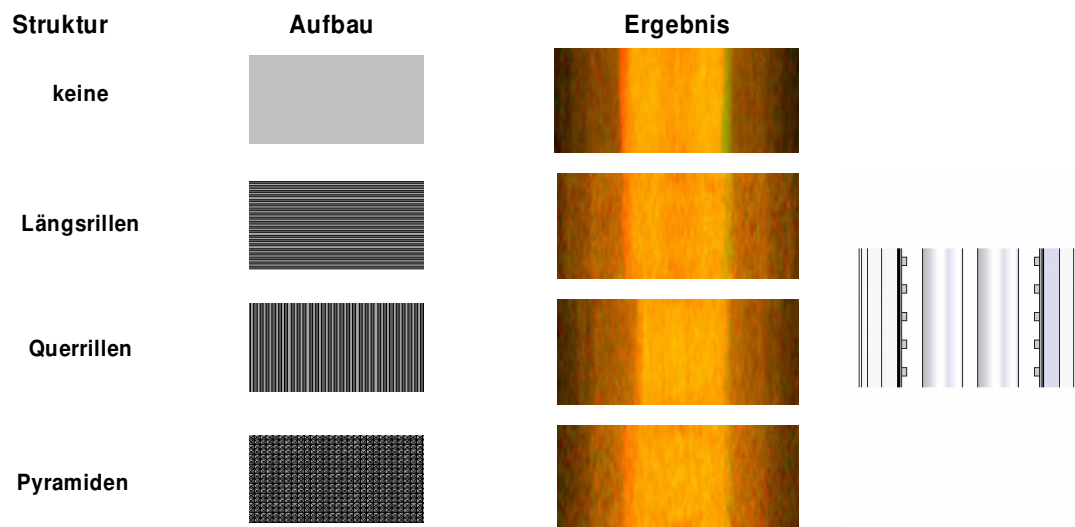


Abbildung 32: Ergebnisse (Mitte) der Simulationen mit einer strukturierten Streuscheibe (links) und zugehörige Skizze der betrachteten Hybridposition (rechts)

Die Ergebnisse der Modellierungen des Hybriden mit einer strukturierten Streuscheibe zeigen in der Aufsicht Vor- und Nachteile unterschiedlicher Strukturen auf. So ist im Falle einer nicht-strukturierten Oberfläche keine ausreichende Farbhomogenisierung der LED-Strahlung zu erzielen. Im linken Bereich ist eine Erhöhung des Rotanteils und im rechten Bereich eine Erhöhung des Grünanteils zu sehen. Dieser Effekt ist auf die asymmetrische Anordnung der LEDs im jeweiligen Gehäuse zurückzuführen (vgl. Abbildung 1). Durch diese asymmetrische Anordnung sind entweder die roten oder die grünen Chips nach oben, d.h. näher an der Streuscheibe, ausgerichtet und dementsprechend ist das jeweilige Licht auf der Streuscheibe intensiver. Dieser Effekt war auch in den jeweiligen Messungen beobachtbar.

Es zeigt sich weiterhin, dass durch die Strukturierung der Streuscheibe entweder in Längs- oder Querrichtung dieser Effekt abgeschwächt wird. Die Strukturierung bestand dabei aus einer Vertiefung mit dreieckigem Querschnitt. Für den Fall quer verlaufender Vertiefungen ist die Lichtmischung besser als im Fall von längs verlaufender. Werden Vertiefungen in beide Richtungen angebracht, so erhält man eine Pyramidenstruktur auf der Streuscheibe. Diese Art von Strukturierung zeigt für alle aufgeführten Möglichkeiten die beste Form der Lichtmischung.

## 5. Fazit

Die Hybridlampe ist eine farbadaptive Lichtquelle, welche ~~dieser~~der gestellten Anforderung im Rahmen des BMBF-Projektes gerecht wird;~~da-s~~ Sie erzielt die erforderlichen Eigenschaften der situationsangepassten Beleuchtung~~erzielt~~. Durch ihre kompakte Bauart ist sie flexibel in verschiedensten Bereichen einsetzbar. Die Kombination von Kompaktleuchtstofflampe und LEDs in einem hybriden System stellt eine zukunftsorientierte Anwendungsmöglichkeit der Komponenten dar.

Die vorgenommene Charakterisierung der Hybridlampe hinsichtlich ihrer farbmétrischen und lichttechnischen Eigenschaften zeigte, dass es sich bei dem vorliegenden Prototypen um eine farb- und helligkeitsadaptive Lichtquelle handelte, die dem natürlichen Tageslichtverlauf und damit dem circadianen Rhythmus angenähert werden konnte.

## 6. Literaturnachweis

- [1] H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik* (Hüthig Buchverlag Heidelberg, 5. neu bearbeitete und erweiterte Auflage (2002)
- [2] G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. D. Rollag, *Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor*, J. Neurosc. **21**, 6405 – 6412 (2001)
- [3] D. Gall, V. Lapuente, *Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums: Teil 1: Allgemeine Aspekte bei der Lampenauswahl*, Licht, **54**, 7-8, 860-871 (2002)
- [4] D. Gall, *Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums: Teil 2: Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung*, Licht, **54**, 11-12, 1292-1297 (2002)
- [5] H. Piazena, D. Kockott, R. Uebelhack, *Bewertung der individuellen circadianen Wirksamkeit solarer und künstlich erzeugter Strahlung*, Tagungsband zum 10. Europäischen Lichtkongress „Lux Europa“, Berlin, 29-32 (2005)
- [6] DIN 5033, Ausgabe Mai/ Juli 1992, Farbmessung
- [7] Deutsche Fassung EN 12464-1:2002, Ausgabe März 2003, *Licht und Beleuchtung: Beleuchtung von Arbeitsstätten*
- [8] G. Wyszecki, W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods. Quantitative Data and Formulae*, Wiley-Interscience, USA, 2nd Edition (1982)