

Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben

RegNr.:	VF 090021
FuE-Einrichtung:	OUT e.V. (Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie)
Titel:	Entwicklung eines Tageslichtsimulators
Projektlaufzeit:	01.07.2009 – 30.06.2011
Projektleiter:	DiplIng. René Hegel
Kontaktdaten:	OUT e.V. (Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie) Köpenicker Str. 325, Haus 201 12555 Berlin
Telefon: Telefax: E-Mail: Internet:	+4930/609 88 72 73 +4930/65 76 26 72 hegel@out-ev.de www.out-ev.de



1. Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Die technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens ist eine Lichtquelle, die Sonnenlicht und andere Lichtstimmungen der natürlichen und künstlichen Umgebung wahrnehmungsgetreu reproduzieren kann. Diese Lichtquelle wird mit sehr wenigen LED-Typen (vier bis sieben) aufgebaut. Die minimal angestrebten technischen Funktionalitäten bestehen in

- Farbwiedergabeindex größer 98 für eine Lösung mit vier LED für den Bereich Weiß
- Farbwiedergabeindex größer 99 für eine Lösung mit fünf bis sieben LED
- Wirkungsgrad inklusive Ansteuerelektronik und Spannungsversorgung von größer 10 %
- Eine homogen leuchtende Fläche mit mindestens 10 x 10 cm² und Inhomogenitäten kleiner 5 % in Intensität, Spektrum und Zeitverlauf
- Selbständige Regelung der Farbe mit einer Stabilität unterhalb des Wahrnehmbaren (Farbortabweichung innerhalb einer McAdams-Ellipse)
- Datenbank für verschiedene auch künstliche Lichtsituationen nach Farbort und Farbwiedergabe

2. Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

AP 1: Wahl der LED

Für die Wahl der LED wurde eine umfassende Marktanalyse von Hochleistungs-LED durchgeführt. Die Auswahl von LED beschränkt sich aufgrund der Anforderungen an die Verfügbarkeit während der Projektlaufzeit auf die fünf größten Hersteller, die Hochleistungs-LED in allen Farben (rot, amber, grün, cyan, blau, royalblau, kaltweiss, warmweiss) anbieten. Weitere Kriterien für die Auswahl sind die Langzeitstabilität, Verfügbarkeit und hohe Wirkungsgrad der Bauelemente sowie die Möglichkeit der Farbselektion. In der Marktanalyse wurden u.a. folgende LED-Hersteller berücksichtigt:

- Philips Lumileds
- Cree
- Osram Opto Semiconductors
- LEXEDIŚ
- Seoul Semiconductors
- LedEngin
- Edison
- Nichia

- Vishay Semiconductors
- PerkinElmer
- Luminus
- Alpha-One Electronics
- Kingbright
- Citizen Electronics
- Ledman Optoelectronic
- Avago Technologies

Die aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads gewählten Bauelemente (Tabelle 1) wurden in Abhängigkeit vom Betriebsstrom bei konstanter Umgebungstemperatur charakterisiert. Eine Verschiebung der Spektraleigenschaften mit dem Strom hat direkten Einfluss auf die Reproduzierbarkeit in einem späteren Modul. Desweiteren wurde ein Peltiergekühlter optischer Messkopf entwickelt, mit welchem konstante Temperaturen und Temperaturzyklen im Bereich -40...+125°C eingestellt werden können.



Hersteller	Туре		
Osram Opto Semiconductors	Golden DRAGON Plus		
Osram Opto Semiconductors	Platinum DRAGON		
Osram Opto Semiconductors	Diamond DRAGON		
Philips Lumileds	LUXEON Rebel		
Cree	Xlamp XR-E		
Cree	Xlamp XR-C		
Nichia	NS6		
Seoul Semiconductors	P4 Series		

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten LEDs

Die Spektralmessung der LED wurde mit dem Spektroradiometer OL770 UV-VIS von Optronic Laboratories und einer kalibrierten Ulbrichtkugel durchgeführt (Abbildung 1).



Abbildung 1: Radiospektrometermessplatz für LED-Charakterisierung

Die Charakterisierung der Bauelemente beinhaltete weiterhin folgende Punkte: U-I-Kennlinie, optische Leistung, Farbortbestimmung (x-y-Koordinate), Schwerpunkt, Wirkungsgrad, Effizienz, Lichtstrom.

Die Auswertung der Charakterisierung ist in Abbildung 2 exemplarisch dargestellt.





Abbildung 2: Exemplarische Auswertung einer LED-Charakterisierung

Mit hoher Präzision werden im großen Umfang Lebensdaueruntersuchungen der Bauelemente durchgeführt. In Abbildung 3 ist der Lebensdauermessplatz des OUT e.V. dargestellt, mit dem verschiedenste LED untersucht werden.





Abbildung 3: Lebensdauermessplatz mit Konstantstromquellen

Diese Untersuchungen lieferten acht Spektralbereiche (Abbildung 4), für die hocheffiziente Bauelemente zur Verfügung stehen. Diese Spektralbereiche entsprechen den Farben tiefblau, blau, cyan, grün, amber, rot, tiefrot und kaltweiss.

AP 2: Wahl der LED-Kombinationen

Für die Auswahl der optimalen LED-Kombination ist der Farbort und die spektrale Breite zu beachten. Die am weitesten außen liegenden Farborte der farbigen LED sorgen in Kombination für eine größtmögliche Abdeckung des Farbraums (Abbildung 4), eine hohe spektrale Breite aller kombinierten LED liefert einen hohen Farbwiedergabeindex für die einzelnen Farborte.





Abbildung 4: Farborte der betrachteten LED

Für die verschiedenen Varianten (4 bis 7 LED in Kombination) wurden bisher unterschiedlich viele Kombinationen simuliert und analysiert. Eine Übersicht der betrachteten Kombinationen ist im Folgenden dargestellt.

Variante mit Anzahl LED	4	5	6	7
Anzahl der simulierten Kombinationen	21	29	4	-

Tabelle 2: Anzahl simulierter LED-Kombinationen

Ein für dieses Projekt entwickeltes Simulationsprogramm steuert die LED der gewählten Kombination virtuell unterschiedlich an (mit je 8 Bit), variiert somit deren Helligkeitswerte (256 verschiedene Helligkeitsstufen) und speichert entsprechend der offiziellen Berechnungsvorgaben der CIE den resultierenden Farbwiedergabeindex für den jeweiligen Farbort. Für den



sogenannten Unbuntpunkt (x = y = z = 1/3) sowie den maximalen CRI sind im Folgenden (Tabelle 3) einige Ergebnisse aufgeführt.

Anzahl LED	LED-Kombination Type, Farbe, Flussstrom [mA]	x	У	CRI (x = y = 1/3)	CRI max.
4	Seoul P4 RGBKW 700mA	0,3333	0,3340	90,22	97,19
4	Diamond_Dr_RGB_1400mA_Rebel_NW_700mA	0,3332	0,3338	86,69	96,25
4	Rebel RCBNW 350 mA	0,3330	0,3336	86,36	98,99
4	Cree_XRC_R_700mA_XRE_GrBKW_1000mA	0,3331	0,3322	83,90	93,36
5	Rebel_pcARBKW_SeoulP4_G_700	0,3331	0,3337	93,92	98,87
5	Rebel_pcARBKW_700_OSA_G_350	0,3331	0,3338	93,77	98,61
5	Rebel_pcARBKW_700_DDr_G_1400	0,3330	0,3326	93,69	98,56
5	Rebel_pcARB_OSA_G_350_Rebel_KW_700	0,3340	0,3333	92,54	98,76
5	Rebel_RCrBNW_700mA_OSA_G_350mA	0,3331	0,3339	91,47	99,35
5	Rebel_pcARrBKW_700mA_OSA_G_350mA	0,3333	0,3330	89,63	97,01
5	Rebel_pcARrBKW_700mA_DDr_G_1400mA	0,3332	0,3332	89,08	97,00
5	XRC_R700_rB500_XRE_KW1000_Rebel_C700_OSA_G350	0,3331	0,3340	87,56	99,19
5	Rebel_pcARKW_700_XRE_rB_1000_DDr_G_1400	0,3330	0,3339	85,64	97,00
6	Rebel_pcARCKW_700_DDr_G_1400_XRE_rB_1000	0,3332	0,3339	94,94	99,12
6	Rebel_pcARCBKW_700_DDr_G_1400	0,3330	0,3329	94,80	99,41
6	Rebel_pcACKW_700_DDr_RGrB_1400	0,3332	0,3339	94,45	98,18
6	Rebel_CKW_700_DDr_ARGB_1400	0,3330	0,3328	93,26	98,18

Tabelle 3: Farbwiedergabeindizes für verschiedene LED-Kombinationen

Die Simulationen werden auf zwei Hochleistungsrechnern durchgeführt. Die Rechenzeiten variieren mit der Anzahl der LED, sie liegen im Mittel für 4 LED bei 5 Minuten, für 5 LED bei 5 Stunden und bei 6 LED bei 6 Tagen (Abbildung 5). Für die Simulation einer 7 LED-Variante wird mit einer Rechenzeit von 4 bis 5 Wochen gerechnet. Diese Simulation wird gestartet, sobald ein ausreichende Anzahl an 5 und 6 LED-Varianten durchgeführt wurde.





Abbildung 5: Rechendauer bei verschiedener Anzahl LED

Der für dieses Projekt erworbene Hochleistungsrechner Grafik Workstation ProViz X59 verfügt u.a. über zwei Intel(R) Xeon™ W5580 Nehalem Quad-Core Prozessoren mit 3.20 Ghz, einen Intel 5520 Tylersburg Chipsatz und 24 GB DDR-3 RAM.

AP 3: Optimierung von Farbort und Farbwiedergabe

Im Laufe des Projektes wurde das Simulationsprogramm kontinuierlich weiterentwickelt, um zum einen die Rechendauer zu minimieren und zum anderen die Ergebnisse zu optimieren. Dazu zählen das Umschreiben des Quellcodes von C nach Java, besondere Berücksichtigung bzw. Wertung der Farbwiedergabeindizes für den Plankschen Strahlungszug sowie die Optimierung des Auswertungsprogramms. Darin sind verschiedene Filterfunktionen einstellbar, u.a. die x-y-Koordinaten, der CRI und die Farbtemperatur (Abbildung 6).

Simulationse	rgebnis		100			1		100		-		E 2
T	land.	1		LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6	х	у	cri
	1040			130	145	0	150	0	11	0.3996	0.2998	89.77
				1	40	50	200	0	5	0.3009	0.3004	96.28
				9	50	65	255	1	7	0.3021	0.3007	96.19
				8	35	45	175	1	5	0.3027	0.3007	96.09
Inter ranges	·			15	45	60	240	1	7	0.3038	0.3007	96.01
x range:	0.3	-	.4	11	25	35	135	0	4	0.3050	0.3006	95.89
v range:	0	-	1	19	45	60	240	0	7	0.3058	0.3008	95.77
CPI range:	-100		100	30	45	65	240	1	8	0.3068	0.3007	95.57
citi runge.	-100	1	100	30	35	55	210	0	7	0.3078	0.3007	95.45
LED 1 range:	0		255	19	18	30	115	0	4	0.3086	0.3007	95.22
LED 2 range:	0	-	255	20	19	30	110	0	4	0.3099	0.3004	95.05
LED 3 range:	0	-	255	50	35	60	220	2	9	0.3106	0.3005	94.87
LED 4 range	0		255	50	40	65	240	0	9	0.3116	0.3007	94.79
LED 4 range.	0	÷.	200	70	40	75	255	1	11	0.3126	0.3005	94.54
LED 5 range:	0	-	255	20	10	20	70	0	3	0.3135	0.3005	94.36
LED 6 range:	0	1.0	255	20	11	20	70	0	3	0.3145	0.3005	94.17
planckian ra	diator			65	30	60	195	0	9	0.3155	0.3005	93.97
T .	4000			90	35	75	255	0	12	0.3166	0.3006	93.76
12	1200	-	50000	85	30	65	210	2	11	0.3174	0.3007	93.55
steps:				105	35	80	255	0	13	0.3185	0.3006	93.38
				50	14	35	115	0	6	0.3194	0.3006	93.14
				95	25	65	200	0	11	0.3203	0.3007	93.00
	mahr filte			70	17	45	145	0	8	0.3213	0.3007	92.75
i	ipply filte	91		90	20	55	165	1	10	0.3224	0.3008	92.54
Iter applied: sh	owing 4	7138	entries	85	15	50	145	0	9	0.3233	0.3008	92.34

Abbildung 6: Auswertungsprogramm der LED-Simulation



Durch das Umschreiben des Quellcodes in Java wurde das Simulationsprogramm rechnerunabhängig, wodurch eine genaue Taktangabe nicht mehr anzugeben ist. Die Erfahrungen habe jedoch gezeigt, dass eine 5 LED-Variante gegenüber dem unoptimierten C-Quellcode um den Faktor 2 – 2,5 schneller berechnet wird.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine 5-LED-Variante mit den Farben orange, rot, grün, blau und kaltweiß optimale Ergebnisse für die Farbraumabdeckung und den erreichbaren Farbwiedergabeindex CRI liefert. Die Verwendung weiterer Farben erzielt keine wesentlichen Verbesserungen in diesen Punkten, wie die Tabelle 4 zeigt.

SIMULATION	5-LED-Variante Rebel pcARGBKW	6-LED-Variante Rebel pcARGBrBKW	delta	%
Anzahl Farborte [n]	190042	198217	8175	4,3
Farborte mit CRI > 95 [n]	20728	21122	394	1,9
CRI Farbtemperatur 2000 K	96,28	96,28	0	0
CRI Farbtemperatur 3000 K	97,1	97,1	0	0
CRI Farbtemperatur 4000 K	97,68	97,68	0	0
CRI Farbtemperatur 5000 K	97,89	97,89	0	0
CRI Farbtemperatur 6000 K	95,93	95,96	0,03	0,03
CRI Farbtemperatur 7000 K	97,84	97,91	0,07	0,07
CRI Farbtemperatur 8000 K	97,11	97,29	0,18	0,18
CRI Farbtemperatur 9000 K	95,33	95,78	0,45	0,47
CRI Farbtemperatur 10000 K	93,33	94,58	1,25	1,34

Tabelle 4: Vergleich von 5- und 6-LED-Variante (LED: Lumileds Luxeon Rebel)

AP 4: Modulentwicklung

Die Modulentwicklung konzentrierte sich im bisherigen Verlauf des Projektes und bis zum Erreichen einer optimalen 6 LED-Variante auf eine 5 LED-Variante, deren Simulationsergebnis einen Kompromiss aus maximalem CRI im gesamten Farbraum, maximalem CRI am Unbuntpunkt sowie maximaler Farbraumabdeckung darstellt.

Anhand dieses ersten Testmoduls konnten zu einem geeignet frühen Zeitpunkt des Projektes die Ergebnisse der Simulation verifiziert werden.

Für das Modul wurden die in Tabelle 5 dargestellten 5 LED-Typen verwendet.



Hersteller	Туре	Farbe	Flussstrom [mA]
Philips Lumileds	LUXEON Rebel	amber (Farbstoff)	700
Philips Lumileds	LUXEON Rebel	rot	700
Philips Lumileds	LUXEON Rebel	blau	700
Philips Lumileds	LUXEON Rebel	kaltweiss	700
Philips Lumileds	LUXEON Rebel	grün	700

Tabelle 5: LED des Testmoduls

Der simulierte maximale CRI beträgt im abgedeckten Farbraum 98,98 und am Unbuntpunkt 92,76 (bei x = 0,3331 und y = 0,3335). In Abbildung 7 ist der CRI farbcodiert im x-y-Diagramm dargestellt und zeigt die Farbraumabdeckung.



Abbildung 7: Simulationsergebnis des Testmoduls

Die folgende Abbildung 8 zeigt das Modul mit sechs Einheiten zu jeweils 5 LED. Die Entwärmung des Moduls erfolgt über einen Kühlkörper, an den das Modul mittels Wärmeleitpaste an die Umgebung angebunden ist.





Abbildung 8: OUT LED-Testmodul

Das Ergebnis der Spektralmessung des Moduls zeigt den Farbwiedergabeindex CRI bei der jeweils eingestellten Farbtemperatur ("CT soll" und "CRT"), die entsprechenden Farbkoordinaten ("Chrom x" und "Chrom y") und dem Lichtstrom in Lumen (Phi [Im]).

CT soll	Popt.	Phi	IPeak	FWHM	IDom.	Chrom x	Chrom y	CRT	CRI
[K]	[W]	[lm]	[nm]	[nm]	[nm]	[1]	[1]	[K]	[1]
2000	0,37	115	638,6	24,5	588,0	0,5317	0,4220	2.012	97,41
3000	1,29	414	639,2	28,4	583,1	0,4397	0,4041	2.954	98,69
4000	1,51	471	638,6	32,3	580,5	0,3836	0,3745	3.897	97,90
5000	1,04	316	638,6	35,4	573,6	0,3483	0,3550	4.892	96,83
6000	0,41	123	465,8	46,0	498,1	0,3239	0,3379	5.892	93,78
7000	1,24	352	465,8	47,1	484,1	0,3080	0,3189	6.873	95,29
8000	1,80	491	465,8	47,5	481,1	0,2968	0,3055	7.865	93,77

Tabelle 6: Ergebnisse Spektralmessung Testmodul

Ein derart hoher CRI eines LED-Moduls für die Farbtemperaturen entlang des Planckschen Strahlungszuges ist nach eigenen Erkenntnissen derzeit einzigartig in der Welt.

Im weiteren Verlauf wird eine universelle Leiterplatte für 7 LED mit drei Einheiten entworfen, die für alle Varianten (4 – 7 LED) eingesetzt werden kann.

AP 5: Entwickelung der Anschlusselektronik

Die folgenden Abbildungen 8a und 8b zeigen die Ansteuerplatine der ersten Modulversion mit Pulsweitenmodulation (PWM) für die Helligkeitsansteuerung der Einzel-LED sowie das Board mit der Leistungselektronik zur Ansteuerung der LEDs.





Abbildungen 8a und 8b: Boards mit Ansteuerelektronik (links) und Leistungselektronik (rechts)

AP 6: Entwicklung der Regelelektronik

Zur Entwicklung der Regelelektronik wurden als erste Variante zunächst eine Tabelle mit expliziten Ansteuerwerten im Mikrocontroller hinterlegt. Diese entsprechen den Intensitätskombinationen der im Modul verwendeten LED-Kombination für die Farbtemperaturen 2000 K bis 10000 K.

Diese Variante der Regelung der Ansteuerwerte wird derzeit untersucht, daher liegen hier noch keine Ergebnisse vor. Einer Funktionalität des LED-Moduls steht dies jedoch nicht entgegen; mit der ersten Variante kann das Modul betrieben und die Untersuchung an Probanden durchgeführt werden. Der Betrieb des Tageslichtsimulators ist in den Abbildungen 9 (bei maximaler Intensität aller LED) und 10 (ca. 2000 K Farbtemperatur) zu sehen.





AP 7: Optikentwicklung

Für die Testphase des LED-Moduls wurde der Einsatz einer Diffusoroptik gewählt. Hierbei musste ein optimales Verhältnis von Transmission (Helligkeit) zu Diffusion (Farbmischung) gefunden werden. Zur Evaluierung verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften wurde eine LED-Testplatine aufgebaut. Die folgende Abbildungen 11 bis 13 zeigen die Platine, eine Diffusorscheibe und die Messung an der Ulbrichtkugel.



In Tabelle 7 ist die Auswertung einer Untersuchung zweier Diffusorscheiben (Plexiglas WN370 und WN770 von evonik) dargestellt, die mit kaltweißen LED (Lumileds Rebel) hinterleuchtet wurden. Zu beachten ist, dass Farbortveränderungen (delta u'v') größer gleich 0,005 vom durchschnittlichen menschlichen Auge wahrgenommen werden.



Rebel kw	u'	V'	u'	v'
	350	mA	700	mA
ohne Diffusor	0,3877	0,4936	0,3950	0,4997
WN370	0,3831	0,4962	0,3889	0,4976
delta	0,0046	0,0026	0,0061	0,0021
WN770	0,3802	0,4913	0,3925	0,4955
delta	0,0075	0,0023	0,0024	0,0042

 Tabelle 7: Einfluss von Diffusorscheiben auf den Farbort
 1

Diese geringen Überschreitungen des "kritischen Wertes" (grau hinterlegt) können bei erfolgreicher Nachregelung (AP 12) berücksichtigt werden.

Für die Optikentwicklung kam außerdem die Lichtsimulationssoftware LightTools zum Einsatz. Die für das reale LED-Modul verwendeten Bauelemente Lumileds Rebel in den Farben orange, rot, grün, blau und kaltweiß wurden in der Software modelliert und der Ansatz der Diffusorplatte untersucht. Die Abbildungen 14 und 15 zeigen das Layout und das Simulationsergebnis mit allen LED angeschaltet als Echtfarbendarstellung.



Der violette Farbstich ist bereits in Abbildung 9 zu erkennen, wo ebenfalls alle LED mit voller Intensität eingeschaltet sind. Aufgrund der hohen Packungsdichte der LED erfolgt eine gute Durchmischung des farbigen Lichtes bereits unmittelbar hinter der Linsenebene. Eine einzusetzende Diffusorscheibe dient daher vor allem als Sichtschutz, um den direkten Blick in die Leuchtdioden zu verhindern. Bei für Beleuchtungsapplikationen aufgrund von thermischen Erwägungen sinnvollerweise geringerer Packungsdichte nimmt der Einfluss des Diffusors als Lichtmischer deutlich zu.

AP 8: Gehäusekonzept

In diesem Arbeitspaket wurde der mechanische Aufbau sowie das thermische Management für ein Laborexemplar des Tageslichtsimulators realisiert. Zur labormäßigen Arbeit mit dem Modul (optische Messungen, Ansteuerungsexperimente etc.) wurde zunächst eine zweckmäßige



Fassung gewählt. Die Entwärmung des Hochleistungs-LED-Moduls ist über ein Wasserkühler mit angeschlossenem Lüfter gewährleistet, die Leistungselektronik ist durch Standardkühlkörper gekühlt. In den Abbildungen 16 bis 18 sind die Ausführungen dargestellt. Eine Diffusoroptik kann durch die Verschraubungen an der Vorderseite des LED-Moduls angekoppelt werden.



AP 9: Kommunikation mit dem Modul

Aus praktischen Erwägungen wurde für das erste Laborexemplar des Tageslichtsimulators als sinnvolles Kommunikationsinstrument zwischen Anwender und Ansteuerelektronik mit LED-Modul eine serielle Schnittstelle gewählt. Wie in Abbildung 19 dargestellt, wurde in der ersten Ausführung die Benutzerschnittstelle in Form eines Java-Programmes ausgeführt und die Logikeinheit mit der Ansteuerelektronik (PWM-Treiber) zusammengefasst.





Abbildung 19: Benutzerschnittstelle des Tageslichtsimulators

Für weitere Ausführungen ist eine von einem speziellen PC mit installierter Java-Software unabhängige Lösung in Form eines TCP/IP-Protokolls angestrebt. Dazu wird das Logikmodul auf dem Modul der Ansteuerelektronik integriert. Über den Browser jedes beliebigen PC kann dieses Modul mit angeschlossener Stromquelle und LED-Platine dann angesteuert werden.

DMX- und Dali-Ansteuerungen, welche in der Architektur- und Bühnenbeleuchtung zum Einsatz kommen, sind vor allem für eine Vielzahl von hintereinander geschalteten Beleuchtungsmodulen geeignet. Da in diesem Projekt nur mit einer sehr geringen Anzahl von Modulen gearbeitet wird, fiel die Wahl im ersten Ansatz nicht auf diese Ansteuerungsmöglichkeiten. Sie werden von großem Interesse sein, wenn in einem potentiellen Folgeprojekt die Realisierung von großflächiger Beleuchtung ansteht.

Bezüglich der Farbe und Farbmetrik sind für alle drei Varianten keine Einflüsse aufgrund des Kommunikationsprotokolls zu erwarten, da ausschließlich vorher simulierte explizite Ansteuerwerte übermittelt werden.

AP 10: Lichtstimmungen und Beleuchtungsszenarien

Am Standort des OUT e.V. wurden Messungen des Tageslichtes und deren Änderung über den Tag aufgenommen und ausgewertet. Dazu wurden zum einen mit einer Ulbrichtkugel, zum anderen mit einer Glaskuppel und angeschlossenem Spiegelrohr gearbeitet. Diese Daten machen mit weiteren künstlichen Lichtquellen den Inhalt der erstellten Datenbank aus. In Tabelle 8 ist ein Auszug dieser Datenbank dargestellt. Neben den Farbkoordinaten stehen die kompletten Spektraldaten für jede Beleuchtungssituation zur Verfügung, um bei der Berechnung von Farbkoordinaten auch auf geänderte Farbmetriken reagieren zu können.



Quelle	x	У	Bemerkung
Halogenlampe	0,4497	0,4053	
Leuchtstoffröhre	0,3653	0,3886	
Glühlampe 60 W (matt)	0,4597	0,4135	
Glühlampe 7 W (klar)	0,4927	0,4171	
Kerze	0,4560	0,3914	
Berliner Gaslaterne (Methan)	0,4674	0,4323	
gelbe Methangasflamme	0,5202	0,4113	
blaue Methangasflamme	0,3262	0,2971	
Blauer Himmel	0,3068	0,3115	durch Fenster (9.10.2010 ca. 14 Uhr)
Direkte Sonne	0,3408	0,3574	durch Fenster (9.10.2010 ca. 12 Uhr)
Frühling ca. 10:00 Uhr	0,2662	0,3052	klar
Frühling ca. 10:00 Uhr	0,2258	0,2758	bedeckt, bewölkt, grauer Himmel
Frühling ca. 13:00 Uhr	0,2705	0,2772	klar, blauer Himmel
Frühling ca. 13:00 Uhr	0,2726	0,2771	bedeckt
Frühling ca. 16:00 Uhr	0,2537	0,2855	klar
Frühling ca. 16:00 Uhr	0,2338	0,2744	bedeckt
Sommer ca. 10:00 Uhr	0,2754	0,2926	klar
Sommer ca. 10:00 Uhr	0,2739	0,2867	bedeckt
Sommer ca. 13:00 Uhr	0,2735	0,2878	klar
Sommer ca. 13:00 Uhr	0,2757	0,2831	bedeckt
Sommer ca. 16:00 Uhr	0,2712	0,2751	klar
Sommer ca. 16:00 Uhr	0,1661	0,2053	bedeckt
Herbst ca. 10:00 Uhr	0,2765	0,4089	klar
Herbst ca. 10:00 Uhr	0,1839	0,2995	bedeckt
Herbst ca. 13:00 Uhr	0,2637	0,3075	klar
Herbst ca. 13:00 Uhr	0,1763	0,2879	bedeckt
Herbst ca. 16:00 Uhr	0,1783	0,4231	klar
Herbst ca. 16:00 Uhr	0,1927	0,3765	bedeckt
Winter ca. 10:00 Uhr	0,2876	0,2773	klar
Winter ca. 10:00 Uhr	0,2602	0,2430	bedeckt
Winter ca. 13:00 Uhr	0,2854	0,2745	klar
Winter ca. 13:00 Uhr	0,2707	0,2569	bedeckt
Winter ca. 16:00 Uhr	0,2425	0,2265	klar
Winter ca. 16:00 Uhr	0,2421	0,2209	bedeckt

 Tabelle 8: x-y-Koordinaten für verschiedene Lichtquellen und -situationen

AP 11: Physiologie der Beleuchtung

Es wurde eine Untersuchung mit den Mitarbeitern des OUT e.V. durchgeführt, um die Wirkung des Lichtes qualitativ bewerten zu lassen. Die Testgruppe umfasste insgesamt 15 Probanden. Mit dem Tageslichtmodul wurden Untersuchungen zur Zuordnung verschiedener Lichtstimmungen, zur natürlichen Wirkung von Objekten, zum Vergleich der Lichtqualität bei verschiedener Anzahl von LED-Typen und zum Vergleich von natürlichem zu künstlichem Licht durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind im Folgenden aufgeführt.

Die Untersuchung zur Zuordnung verschiedener Lichtstimmungen hat gezeigt, dass Objekte in der Umgebung eines bedeckten Herbsthimmels als unnatürlich bzw. sehr unnatürlich



wahrgenommen werden (55%), wohingegen Halogen-, Tages- und Kerzenlicht tendenziell eine natürliche Objekterscheinung bewirken (entsprechend 100%, 55% und 64%).

Der Vergleich der Lichtqualität bei verschiedener Anzahl von LED-Typen hat gezeigt, dass 91% der Probanden zwischen der 6- und 5-LED-Variante keinen bzw. nur einen schwachen Unterschied feststellen kann (27% schwacher, 27% sehr schwacher, 36% kein Unterschied feststellbar). Daraus lässt sich ableiten, dass mit die Variante mit 5 unterschiedlichen LED-Typen ausreichend gute Ergebnisse liefert, die sich von der 6-LED-Variante in der Wahrnehmung nicht unterscheiden.

Der Vergleich der 6- und 4-LED-Variante liefert eine etwaige Gleichverteilung der Ergebnisse (18% starker, 36% mittlerer und 27% schwacher Unterschied feststellbar).

Der direkte Vergleich des Kunstlichtquelle mit dem natürlichen Tageslicht (siehe Abbildung 20) hat gezeigt, dass ein Vergleich nur bei möglichst exakter Bestimmung und Einstellung der Farborte sinnvoll und dass das menschliche Auge im direkten Vergleich höchst sensibel ist. Es wurden hier in 91% der Fälle noch starke bzw. sehr starke Unterschiede wahrgenommen, was auf die sich ändernde Wetterlage (Wolken, etc.) zurückzuführen ist.



Abbildung 20: Vergleich künstliche (li) und natürliche (re) Lichtquelle

AP 12: Nachregelung des Ausgangslichts

Für das geübte menschliche Auge werden Farbänderungen wahrnehmbar ab einer Differenz von 0,003 (für die Farbkoordinaten u'v'). Daraus ergibt sich eine kritische Differenz für den hier betrachteten xy-Farbraum von $\pm 0,01$ für x und $\pm 0,005$ für y.

Bei der Nachregelung des LED-Moduls geht es darum, die durch Degradation verursachte Farbortverschiebung einzelner oder mehrerer LEDs auszugleichen, um sowohl konstante Farbeindrücke als auch Intensitäten zu gewährleisten. Für die Nachregelung des Ausgangslichts gibt es verschiedene Ansätze.

Intensitätsregelung bei Degradation mit konstanten Farborten



Geht man von einer linearen Abhängigkeit des elektrischen Stromes zur Intensität (des Lichtstroms) aus und davon, dass sich mit der Degradation der LEDs der spezifische Farbort nicht ändert, dann kann der Intensitätsverlust einer bzw. mehrerer LEDs durch die relative Anpassung der Intensität der übrigen LEDs ausgeglichen werden, um denselben Farbort beizubehalten. Anhand der Lebensdaueruntersuchungen lässt sich feststellen, wie viel Intensitätsüberschuss z.B. in Form von zusätzlichen LEDs oder durch bewusstes Reduzieren der anfänglichen Maximalintensität je Farbe vorhanden sein muss, um über eine bestimmte Betriebszeit eine effektive maximale Intensität zu erreichen.

Zunächst wurde die Degradation und das Spektralverhalten der verwendeten LEDs untersucht. Dazu wurden diese auf einem temperaturkonstanten Langzeitmessplatz aufgebaut und durchgehend bei einem konstanten Flussstrom von 700 mA betrieben und in regelmäßigen zeitlichen Abständen gemessen. Die Ergebnisse für eine Auswahl der verwendeten LEDs sind in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Gemessene Degradation für verwendete Lumileds Rebel LEDs

Die Daten zeigen, dass die verwendeten LEDs Lumileds Rebel eine Degradation von weniger als 20% in 13500 Stunden aufweisen; das entspricht 542 Tage im Dauerbetrieb. Bei einer durchschnittlichen Betriebszeit von 8 Stunden pro Tag beläuft sich die Betriebsdauer auf 1625 Tage, was etwa 4,5 Jahren entspricht.

Die Spektralanalyse über die Lebensdauer zeigt, dass bei den untersuchten LED-Farben über einen Dauerbetrieb von 13750 Stunden bei konstanten thermischen Bedingungen eine Spektralverschiebung von weniger als einem Nanometer auftritt, mit Ausnahme des gelben Farbstoffes in der kaltweißen LED (Tabelle 9).



	Wellenlänge [nm]							
Betriebszeit	royalblau	blau	rot	kaltweiß	kaltweiß			
[h]	,			(blauer Chip)	(Farbstoff)			
700	451,4	478,5	642,9	448,9	564,7			
13750	451,0	477,6	642,8	448,7	558,2			
delta	-0,41	-0,89	-0,13	-0,24	-6,44			

Tabelle 9: Spektralverschiebung über Lebensdauer, gemittelt über je 3 Exemplare

Der Ansatz der Intensitätsanpassung wird zweckmäßigerweise so umgesetzt, dass die durch Degradation der LED verursachte, von der Photodiode gemessene Intensitätsabnahme durch eine entsprechende Anhebung aller Relativintensitäten über die Ansteuerschaltung der LEDs kompensiert wird. Dazu muss ein Rückkoppelmechanismus mit Mikrocontroller vorhanden sein. Die Photodiode misst den Photostrom in regelmäßigen Abständen, z.B. beim Einschalten der Leuchte. Der Mikrocontroller empfängt die Daten und gleicht sie mit den Initialwerten ab. Bei einer Photostromabnahme wird der Flussstrom der LEDs über die Ansteuerelektronik über einen Korrekturfaktor relativ zueinander angepasst.

Im Folgenden ist das Beispiel aufgeführt, welches die Nachregelung zu einer entsprechenden Initialwertansteuerung simuliert (Tabelle 10).

Werte	lf [mA]	l [lm]	%
zu Beginn	494	141	100
nach der Degradation	494	113	80
nach der Regelung	618	141	80

Tabelle 10: Anpassung der Ansteuerwerte nach der Degradation einer LED

Die intensitätsmäßige Nachregelung des Ausgangslichts ist dann ausreichend, wenn die Degradation der LEDs sehr langsam verläuft bzw. in vertretbarem Verhältnis zur Einsatzdauer der Applikation steht. Wenn es für die Anwendung eines Tageslichtmoduls vertretbar ist, dass es z.B. bei einer Betriebszeit von acht Stunden pro Tag in 4,5 Jahren eine Degradation der LEDs von 20% aufweist und damit keine Farbortverschiebungen verbunden sind, rechtfertigt dies den Einsatz einer Regelung eventuell nicht.

Farbortregelung

Läuft die Degradation relativ schnell ab und ändert sich mit ihr der Farbort der Einzelemitter, was bei Degradation vor allem bei Farbstoff-LEDs und temperaturbedingt vor allem bei rot emittierenden LEDs auftritt, kann eine Farbort-Nachregelung etabliert werden. Hier werden zwei Ansätze untersucht.

Farbortregelung via Fuzzy-ähnlicher Logik



Hierbei wird der aktuelle Farbort des LED-Moduls gemessen (Ist-Wert) per Mikrocontroller mit dem eingestellten Soll-Wert verglichen. Die Logik kann so programmiert werden, dass eine Nachführung erst bei einer für das menschliche Auge wahrnehmbaren Farbortveränderung einsetzt. Dann werden ähnlich einer Fuzzy-Logik die Intensitäten einzelner LEDs variiert und der Farbort jeweils vorher und nachher gemessen. Ist das Ergebnis besser als der Ausgangswert, wird dieser übernommen und gilt fortan als neuer Soll-Wert für diesen Farbort.

Farbortregelung via Polynomauswertung des Gamut

Ein weiterer Ansatz ist, die komplette Intensitätsverteilung über ein mehrdimensionales Polynom abzubilden und bei gemessener Änderung von Farborten diese über Korrekturfaktoren zurückzusetzen. Dies ist im Rahmen des Projektes an die Grenzen der Umsetzbarkeit gestoßen, da eine exakte Nachbildung der Intensitätsverteilung der Einzel-LEDs im Rahmen der Projektarbeit nicht erreicht wurde. In Abbildung 22 ist die Intensitätsverteilung der auf dem Modul eingesetzten blauen LED zu sehen, Abbildung 23 zeigt die mit der Datenanalysesoftware IGOR Pro durchgeführte Polynomanpassung (jeweils über xy-Koordinaten mit relativen Einheiten). Es ist zu erkennen, dass die Polynomanpassung ein relativ gutes Ergebnis für die Intensitätsverteilung liefert, jedoch die Genauigkeit vor allem in den bei der Farbmischung wichtigen Grenzbereichen zu anderen LEDs (grüner Intensitätsbereich) nicht gegeben ist.



Aufgrund von zeitlichen Verzögerungen bei der Entwicklung einer Ansteuerelektronik mit Konstantstrom für das Tageslichtmodul konnte kein Testaufbau für eine Nachregelung etabliert werden. Die Vorbetrachtungen liefern jedoch wertvolle Erkenntnisse zur Umsetzung dieses Aufbaus.