

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19278 N

Thema

Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LED-Komponenten, Modulen und Systemen und Konsequenz für die Auslegung langzeitstabiler LED/OLED-Leuchten

Berichtszeitraum

01.12.2016 - 30.09.2019

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach

Darmstadt, 24.01.2020

Prof. Dr.-Ing. habil Tran Quoc Khanh

Darmstadt, 24.01.2020

Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann

Offenbach, 29.01.2020

Dragana Zdravkovic-Stojanovic

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis.....	V
Zusammenfassung	1
1. Einleitung	2
1.1 Technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
1.1.1 LED-Straßenbeleuchtung	3
1.2.1. Innenraumbeleuchtung.....	4
1.2.2. Fazit	6
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU.....	6
1.3 Wissenschaftlich-technischer Ansatz	7
1.4 Arbeitshypothese	9
1.5 Über das Projekt und die Projektpartner	9
2. Alterung von LED-Packages	12
2.2. Weiße Hochleistungs-LEDs (HP-LEDs)	12
2.2.1. Beschreibung von LM 80 und TM21.....	12
2.2.2. Auswahl der LED-Typen	14
2.2.3. Langzeitdaten über 24.000 h	18
2.2.4. Weiße High Power LED-Packages von 2014	19
2.3. Chip-On-Board-LEDs (COB)	21
2.3.1. Alterung und Messaufbau für COB-LED-Module	21
2.3.2. Ergebnisse	22
2.3.3. Entwicklung eines Alterungsmodells.....	22
2.4. LED-Module und Verknüpfung.....	24
2.4.1. Messaufbau für LED-Module	24
2.4.2. Ergebnisse	25
2.4.3. Verknüpfung von Modul und Leuchte	26
2.5. RGB-LEDs	28
2.5.1. Ziel.....	28
2.5.2. Versuchsbedingungen.....	29
2.5.3. Initiale Charakteristik und Degradation	30
2.5.4. Fazit	36
2.6. Midpower LEDs	37
2.6.1. Optische Alterung.....	38
2.6.2. Thermische Alterung	42
2.7. Chip Scale Package LEDs	49
2.7.1. Aufbau und Besonderheiten von CSP LEDs	50
2.7.2. Optische Alterung	50
2.7.3. Elektrische Alterung.....	54

2.7.4.	Thermische Alterung	56
2.8.	High CRI LEDs	57
2.8.1.	Besonderheiten von High CRI LEDs	58
2.8.2.	Optische Alterung.....	59
2.8.3.	Optische Alterung.....	64
3.	Lebensdaueruntersuchung an LED-Betriebsgeräten	65
3.2.	Einleitung	65
3.3.	Fragestellungen und experimenteller Lösungsansatz.....	65
3.4.	Messaufbau für die beschleunigte Alterung	66
3.5.	Getestete LED-Betriebsgeräte	68
3.6.	Alterung bei trockener Hitze (HTOL)	69
3.7.	Vergleich zwischen hochwertigen und preiswerten LED-Betriebsgeräten.....	70
3.7.1.	Ziel und statistischer Lösungsansatz.....	70
3.7.2.	Voraussetzungen des t-Tests	70
3.7.3.	Auswertung des Tests	72
3.8.	Fehlerbilder und Analyse	73
3.8.1.	Filmkondensatoren	73
3.8.2.	Varistoren.....	74
3.8.3.	Korrosion.....	74
3.9.	Modell zur Berechnung der Lebensdauer bei unterschiedl. Umgebungsbedingungen ..	75
3.9.1.	Lebensdauermodell für Temperatur und Luftfeuchtigkeit.....	75
3.9.2.	Bestimmung der Modellparameter	76
3.10.	Zusammenfassung.....	78
4.	Alterung von Leuchten.....	80
4.2.	Innenraumbeleuchtung.....	81
4.3.	Straßenbeleuchtung.....	86
4.3.1.	Analyse der Leuchten-Alterungsdaten	90
4.3.2.	Analyse der Leuchten-Erwärmungsdaten	90
4.3.3.	Zusammenfassung	92
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	93
5.2.	Leuchtenmessung	93
5.3.	Treiber-Elektronik-Tests.....	93
5.4.	LED-Tests	94
5.5.	Ausblick.....	94
6.	Nutzen und die wirtschaftliche Bedeutung für KMU	95
7.	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendung	97
8.	Ergebnistransfer in die Wirtschaft – Überblick	98
9.	Literatur	101
Anhang.....		104
A	Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Veranstaltungen	105
B	Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Publikationen	108



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Lichtausbeute verschiedener Lampentypen im Vergleich (nach Osram)	3
Abbildung 1.2: Downlight mit Chip-On-Board-Technik (COB)	5
Abbildung 1.3: Übersicht der Projektstruktur	10
Abbildung 1.4: Kommunikation und Datenaustausch zwischen den Forschungspartnern und dem Projektbegleitenden Ausschuss.....	11
Abbildung 2.1: Schema der Ursachen für die LED-Alterung.....	12
Abbildung 2.2: Aufbau einer High-Power-LED	13
Abbildung 2.3: Alterungsaufbau an der TU Darmstadt	15
Abbildung 2.4: Messaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt	16
Abbildung 2.5: Neuer Messplatz für LED-Messungen	16
Abbildung 2.6: Aufbau der Mess- und Alterungsplatine für die LEDs	17
Abbildung 2.7: Links: Rückgang des Strahlungsflusses von jeweils zehn High Power LEDs.....	18
Abbildung 2.8: Links: Rückgang des Strahlungsflusses von jeweils zehn High Power LEDs.....	19
Abbildung 2.9: Rückgang des Strahlungsflusses von jeweils zehn High Power LEDs.....	20
Abbildung 2.10: Alterung von vier COB-Modulen auf einem Kühlkörper	21
Abbildung 2.11: Rückgang des relativen Lichtstroms für 3300 mA und vier Temperaturen.....	22
Abbildung 2.12: Arrheniusgraph für vier Temperaturen.....	23
Abbildung 2.13: Lebensdauerfunktion L85(T,I).....	24
Abbildung 2.14: Messplatz für LED-Module	25
Abbildung 2.15: Zeitlicher Verlauf der Lichtströme jedes einzelnen LED-Packages	26
Abbildung 2.16: Zeitlicher Verlauf der relativen Lichtströme von Modul und Leuchte	27
Abbildung 2.17: Direkter Vergleich der Farbdrifte von Modul und Leuchte im UCS-Farbraum ..	27
Abbildung 2.18: Ladungsträgertransport in einer vereinfachten Quantentrogstruktur	31
Abbildung 2.19: Externe Quanteneffizienz grüner Highpower LEDs	31
Abbildung 2.20: Abnahme der optischen Leistung für verschiedene Messströme	32
Abbildung 2.21: Ladungsträgertransport in einer vereinfachten Quantentrogstruktur	32
Abbildung 2.22: Änderung der Strom-Spannungs-Kennlinie.....	33
Abbildung 2.23: Änderung der relativen optischen Leistung grüner LEDs.....	34
Abbildung 2.24: Externe Quanteneffizienz blauer Highpower LEDs	35
Abbildung 2.25: Änderung der relativen optischen Leistung blauer LEDs	35
Abbildung 2.26: Änderung der relativen optischen Leistung roter LEDs	36
Abbildung 2.27: Änderung der relativen optischen Leistung tiefroter LEDs	36

Abbildung 2.28: Lichtstromrückgang der drei LED-Typen	39
Abbildung 2.29: Farbverschiebung der LED CS 1 bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen ...	40
Abbildung 2.30: Farbverschiebung der LED-Typen M1, M2 und M3	41
Abbildung 2.31: Spektrum einer LED der drei LED-Typen M1, M2 und M3	42
Abbildung 2.32: Grober Aufbau einer typischen Mid-Power LED [1]	43
Abbildung 2.33: Beispielhaftes thermisches Verhalten einer Mid-Power-LED.....	44
Abbildung 2.34: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 0 h.....	45
Abbildung 2.35: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 4000 h	45
Abbildung 2.36: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 4000 h	46
Abbildung 2.37: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 0 h.....	46
Abbildung 2.38: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 0 h.....	47
Abbildung 2.39: Thermisches Verhalten der LED: M2 bei 0 h.....	48
Abbildung 2.40: Thermisches Verhalten der Einzel-LEDs: M3 bei 0 h	48
Abbildung 2.41: Thermisches Verhalten der drei LED-Typen über 0 h, 2000 h, 4000 h	49
Abbildung 2.42: Aufbau von verschiedenen LEDs: (a) laterale LED, (b) Chip Scale Package LED ...	50
Abbildung 2.43: Lichtstromrückgang der LED CS1	51
Abbildung 2.44: Farbverschiebung der LED CS 1	52
Abbildung 2.45: Lichtstromrückgang der LED CS2	53
Abbildung 2.46: Farbverschiebung der LED CS 2	54
Abbildung 2.47: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild einer LED	55
Abbildung 2.48: Thermisches Verhalten der LEDs CS1 und CS2.....	56
Abbildung 2.49: Temperaturantworten der LEDs CS1 0h, CS1 4 kh, CS2 0h, CS2 4 kh.	57
Abbildung 2.50: Spektren der vermessenen High CRI LEDs.....	59
Abbildung 2.51: Verlauf des Lichtstroms nach einer initialen Voralterung.....	60
Abbildung 2.52: Farbverschiebung aller Stichproben über 4000 h im u'v'-Diagramm.	63
Abbildung 2.53: Veränderung der Vorwärtsspannung für die LED 4000K.....	64
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.....	66
Abbildung 3.2: Fotos des Messaufbaus am Fachgebiet IES.	67
Abbildung 3.3: Vergleich der Leistungsaufnahme mit der im Test erreichten Lebensdauer	71
Abbildung 3.4: Quantil-Quantil-Diagramm hochwertige und preiswerte LED-Betriebsgeräte	71
Abbildung 3.5: Aufgebrochene und geschmolzene Filmkondensatoren.....	73
Abbildung 3.6: Aufgeplatzter Varistor (RV2) neben beschädigtem Filmkondensator.	74
Abbildung 3.7: Korrosionsschäden am Beispiel eines preiswerten LED-Betriebsgerätes.....	75
Abbildung 3.8: Ausfallmechanismus für den Betriebsgerätetyp 7.....	77

Abbildung 4.1: Alterungsstrecken des VDE Lichtlabors.....	80
Abbildung 4.2: Degradation des relativen Lichtstroms im Laufe der 20.000 Betriebsstunden.....	82
Abbildung 4.3: Farbwiedergabeindex im Verlauf der 20.000 Betriebsstunden	83
Abbildung 4.4: Farbortverschiebung nach 20.000 Betriebsstunden.....	84
Abbildung 4.5: Farbtemperaturveränderung nach 20.000 Betriebsstunden	85
Abbildung 4.6: Degradation des rel. Lichtstroms im Laufe der 20.000 Alterungsstunden.....	86
Abbildung 4.7: Degradation des relativen Lichtstroms im Laufe der 20.000 Betriebsstunden....	87
Abbildung 4.8: Farbwiedergabeindex über 20.000 Betriebsstunden.	88
Abbildung 4.9: Farbortverschiebung nach 20.000 Betriebsstunden.....	88
Abbildung 4.10: Farbtemperaturveränderung nach 20.000 Betriebsstunden.	89
Abbildung 4.11: Degradation des relativen Lichtstroms im Laufe der 20.000 Alterungsstunden	90
Abbildung 4.12: Temperaturverhältnisse der tc-Punkte der Betriebsgeräte.....	91
Abbildung 4.13: Temperaturverhältnisse der tc-Punkte der LED-Module.....	91

Zusammenfassung

Projektname: Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LED-Komponenten, Modulen und Systemen und Konsequenz für die Auslegung langzeitstabiler LED-Leuchten (PQL II)

Projektzeitraum: 1.12.2016 bis 30.09.2019

Forschungsstellen: TU Darmstadt, VDE Institut

Ziel des Projekts: Erarbeitung normativer Grundlagen für die Kriterien eines Performance Quality Labels (PQL) für LED-Leuchten. Unter dem PQL wird ein Qualitäts- und Energielabel verstanden, das für LED-Produkte auf Grundlage der aktuellen und sich entwickelnden Normensituation erarbeitet werden soll. Durch das Bestimmen der für eine gute Produktqualität erforderlichen Faktoren, soll durch die beteiligten Forschungseinrichtungen ein Katalog von Mindestanforderungen für LED-Leuchten entwickelt werden. Auf der anderen Seite sollen der Leuchtenindustrie konkrete Hinweise für die Entwicklung und Optimierung von LED-Leuchten bezüglich der im Markt geforderten Werte zur Verfügung gestellt werden.

Ergebnis: Es wurde die Alterung von Hoch- und Mittelleistungs-LEDs sowie CSP-LEDs (Chip Scale Package) bei verschiedenen Strömen und Boardtemperaturen hinsichtlich Lichtstrom, Farbort, Spektren und Änderung des thermischen Widerstands untersucht, um die Lebensdauer der LEDs herstellerunabhängig ermitteln und den Leuchten-Herstellern verfügbar zu machen. Durch umfangreiche Untersuchungen zum Temperatur- und Stromverhalten der neuen LED-Typen ab Baujahr 2015 war eine thermische und elektrische Modellierung möglich. Zudem lassen sich Hinweise ableiten, wie zukünftige LED-Leuchten mit RGB- und weißen LEDs auf Farbort- und Lichtstromkonstanz bei verschiedenen Temperatur- und Stromänderungen geregelt werden können. Durch die Vergleichsmessungen von LED-Leuchten konnten Schwachstellen und Unzulänglichkeiten in der qualitätssichernden Kette ermittelt und mit den Firmen besprochen werden. Die Auswertung der in VDE-Lichtlabor gealterten LED-Leuchten und der an der TU Darmstadt gealterten LEDs, LED-Module und Treiberelektroniken konnte der Leuchtenindustrie konkrete Hinweise über Alterungsmechanismen, thermisches Management bei verschiedenen Betriebstemperaturen und die Wirkungen von Feuchtigkeit geben. Zudem wurden Faktoren erarbeitet, wie die LED-Leuchte durch Materialauswahl und Elektronik-Auswahl an Zuverlässigkeit gewinnen kann. Eine Datenbank mit einer Typisierung der LED-Fehler, Entstehungsorte, Ursachen und wirtschaftlicher Folge konnte erstellt und mit der Leuchtenindustrie und professionellen Anwendern ausgetauscht und gepflegt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden durch Vorträge der Projektnehmer auf den Jahrestagungen vom ZVEI-Lichtverband, auf den Tagungen der Straßenbeleuchtung (ETP-Tagung), auf der weltweit größten LED-Konferenz in Bregenz 2018 und 2019 (die Vorträge gehören zu den besten fünf besten Vorträgen), im Workshop von TÜV-Rheinland (Oktober 2019 in Köln) kommuniziert. Halbjährig fand eine ganztägige Sitzung der Forschungspartner mit den beteiligten Lichtfirmen mit Vorträgen statt. Die Testergebnisse führten zu zahlreichen studentischen Arbeiten und einer fertigen Doktorarbeit (Dr. Max Wagner, verteidigt in 2018) und zu einer baldigen Einreichung der Doktorarbeit (A. Herzog, voraussichtlich Februar 2020).

Die Projektziele wurden erreicht.

1. Einleitung

Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Überblick zur Zielstellung des Projektes bei Einreichen des Antrages und erläutert die Motivation für den gestellten Antrag sowie die durchgeführten Untersuchungen.

1.1 Technische und wirtschaftliche Problemstellung

Wirtschaftliche Relevanz für KMU

Nach anfänglichen Schwierigkeiten und einer beginnenden Neustrukturierung der Märkte durch die Einführung der LED als Lichtquelle zeichnet sich in der Beleuchtungsbranche durch intensive Bemühungen der Jahre 2006-2014 – auch im Rahmen des IGF-Projektes 14 LBG / „PQL“ (Khanh et al. 2014 [16]) - eine positive Entwicklung ab. Das vorliegende Projekt PQL 2 hat zum Ziel, den mittelständischen Leuchtenherstellern (KMU) im Rahmen der stark steigenden technologischen und qualitativen Anforderungen verbindliche Empfehlungen zur Konstruktion von LED-Leuchten zu geben. Im Fokus stehen Erkenntnisse zu Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Farbqualität und allgemeiner Performance bei LEDs, LED-Modulen, Treiberelektronik und Leuchtensystemen anhand praktischer und realitätsnaher Laboruntersuchungen. Nachfolgend werden die aktuell identifizierten Problemstellungen der überwiegend mittelständisch geprägten Lampen- und Leuchtenindustrie in Deutschland beschrieben.

Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Eine grundlegende Motivation für die vorliegende Projektkonzeption bilden die dynamische Entwicklung der weißen LED in den vergangenen 10 Jahren von 2004 bis 2014 sowie ihr unaufhaltbarer Einzug in alle Bereiche der Beleuchtungstechnik. Dadurch sieht sich eine ganze Branche im Bereich der mittelständischen Industrie mit einem enormen Anpassungsdruck sowie der damit verbundenen Umstrukturierung konfrontiert. Durch das IGF-Projekt „Grundlagen der Normung für ein Performance Quality Label für LED Leuchten (PQL)“ – gefördert durch das BMWi – konnte wichtiges Basiswissen im Bereich der LED-Beleuchtung erarbeitet und an die Industriepartner (insb. KMU) vermittelt werden, um die Herausforderungen in der Anwendung der noch jungen Technologie zu bewältigen (Khanh et al. 2014 [16]). Der vorliegende Projektrahmen hat zum Ziel, die durch die enge Kooperation mit den Herstellern aktuell erkannten Herausforderungen der Industrie im Rahmen der LED-Beleuchtung zu beheben. Das schließt sowohl die Verbesserung bereits bestehender Produkte, insbesondere jedoch auch das Umsetzen erweiterter Ideen zur Erschließung neuer Anwendungsfelder in der lichttechnisch und technisch anspruchsvollen Beleuchtung mit LEDs ein. Nachfolgend werden die erkannten Problemfelder der Industrie anhand der wichtigsten Anwendungsgebiete in der LED-Beleuchtung konkret erläutert.

1.1.1 LED-Straßenbeleuchtung

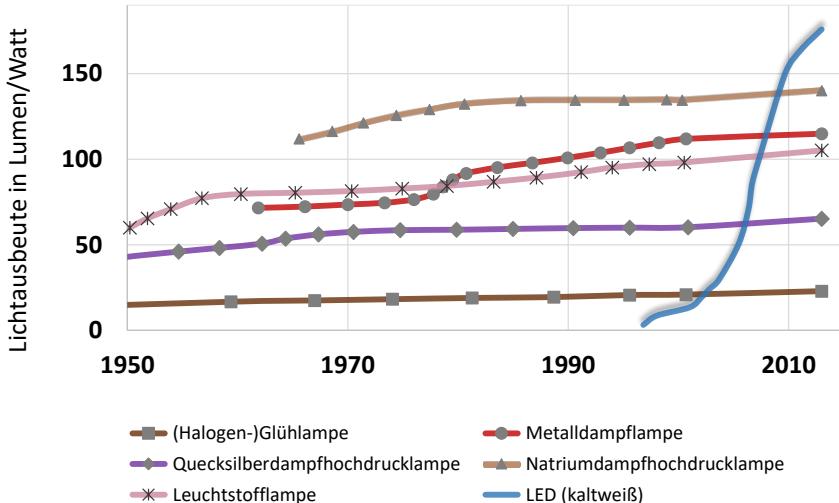


Abbildung 1.1: Lichtausbeute verschiedener Lampentypen im Vergleich (nach Osram)

Die erste LED-Straßenleuchte, die alle erforderlichen Normen erfüllt, wurde im Jahr 2003 als Prototyp vorgestellt (Hess AG 2011 [7]). Etwa ab dem Jahr 2006 hielt die LED mit zunehmender Lichtausbeute in der Straßenbeleuchtung Einzug (vgl. Abbildung 1.1). Die ersten verfügbaren LED-Straßenleuchten zeigten jedoch sehr schnell, dass die bis dahin angewendete Vorgehensweise bei Entwicklung, Produktion und Vertrieb nicht auf die LED übertragbar waren. Hohe Ausfallraten und zahlreiche „Kinderkrankheiten“ traten selbst bei LED-Leuchten von etablierten Herstellern auf. Hinzu kam, dass eine unüberschaubare Anzahl an kleinen neuen Anbietern diese Tendenz mit einer häufig schlechten Produktqualität förderte. Auf der Anwenderseite führte das schnell zu dem Eindruck, dass LED-Leuchten nicht praxistauglich seien. In den vergangenen Jahren hat sich – auch durch die Arbeit im Projekt PQL (Khanh et al. 2014 [17]) - eine Reihe von umfangreichen Änderungen im Entwicklungs- und Produktionsprozess der Leuchtenhersteller ergeben. Dies äußert sich durch teils fundamentale Änderungen in der Unternehmenskultur und -struktur. Dabei lässt sich eine Entwicklung beobachten, die die LED-Leuchte als Gesamtsystem berücksichtigt und die LED als wichtigste Komponente in den Mittelpunkt stellt. LED-Leuchten wurden qualitativ hochwertiger und deutlich effizienter. Am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt wurden in den Jahren 2013/2014 38 verschiedene LED-Leuchtentypen vermessen. Die Systemlichtausbeute hochqualitativer Straßenleuchten übertrifft mit mehr als 100 lm/W die Werte konventioneller Leuchten mit Entladungslampen sehr deutlich (vgl. Schiller et al. 2010 [30]). Seit einiger Zeit treten neben der Lichtausbeute und Energieeffizienz weitaus wichtigere Fragestellungen in den Vordergrund. Diese erfordern einen fundierten Entwicklungsprozess bei LED-Leuchten. Sie äußern sich u.a. in folgenden Überlegungen:

Wartungsfaktor und Wirtschaftlichkeit (vgl. KHANH & GANEV 2014 [15])

Zur Berechnung eines korrekten Wartungsfaktors als Basis einer Wirtschaftlichkeitsberechnung sind verschiedene Informationen zwingend erforderlich. Hierzu zählen als Grundbaustein die photometrischen, kolorimetrischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften der LED-Bauelemente sowie der elektronischen Baugruppen unter realen Arbeitsbedingungen (Temperatur, Strom, Arbeitspunkt). Hinzu kommen Daten über die Lebensdauer dieser Baugruppen (Lichtstromdegradation, Farbortverschiebung), die über 6000 Stunden hinausgehen sollen. Nur so können langlebige und qualitativ hochwertige LED-Leuchten sachgemäß entwickelt werden, die eine solide Lichtplanung für den Anwender und die Kalkulation einer sinnvollen Garantiezeit für den Hersteller ermöglichen. Der entscheidende Aspekt ist dabei die Frage nach der zuverlässigen Ermittlung dieser Daten.

Modularität

Aktuell zeichnet sich ein Trend zur Modularität der Leuchten und der Austauschbarkeit von LED-Modulen ab, z. B. durch Zhaga-Module (vgl. ZHAGA 2015 [38]). Für eine wettbewerbsfähige und modular aufgebaute Leuchte ist es jedoch zwingend nötig, die LED-Module in Bezug auf mechanische Austauschbarkeit und Lebensdauer sowie elektrische, thermische und optisch/photometrische Eigenschaften korrekt bewerten zu können. Nur so können sich die Modul-Käufer (Leuchtenhersteller, Stadtwerke) korrekt informieren.

Langzeitstabilität des Gesamtsystems

LED-Straßenleuchten sind für die Straßenbeleuchtungsbetreiber und kommunalen Entscheider als Investition nur interessant, wenn die Lebensdauer der ganzen Leuchte (LEDs, LED-Module und Elektronik) über die Dauer von mehr als 12 Jahren (etwa 50.000 Stunden) hinausreicht. Daher muss die Aufmerksamkeit der Zuverlässigkeitssichtung nicht nur auf die LEDs allein, sondern konsequent auch auf die elektronischen Baugruppen, auf die Kabelverlegung und auf die thermische Anbindung (z.B. Klebstoffstellen, Leiterplattenmaterialien) gelegt werden.

1.2.1. Innenraumbeleuchtung

Die Entwicklung in der Innenraumbeleuchtung bezüglich der LED als Lichtquelle ist in den letzten Jahren durch die nachfolgend beschriebenen Aspekte gekennzeichnet. Diese Tendenzen werden sich fortsetzen.

Beleuchtung mit hohen Lichtstromanforderungen (z.B. Hallenbeleuchtung)

In der Beleuchtung von großen Industriehallen sind Strahler mit einem hohen Lichtstrom und einer entsprechenden elektrischen Leistung notwendig.



Abbildung 1.2: Downlight mit Chip-On-Board-Technik (COB)

Aus optischen und geometrischen Gründen ist die zu diesem Zweck benötigte große Anzahl an Hochleistungs-LEDs in der bisher üblichen SMD-Technik nicht einsetzbar. Stattdessen wurde die Chip-on-Board-Technologie (COB) entwickelt. Die LED-Chips sind dabei sehr dicht gepackt und werden mit einem Leuchtstoff hoher Qualität vergossen (vgl. Abbildung 1.2). Diese Technik hat hohes Potenzial, da sie optisch sehr wirksam und demzufolge energieeffizient ist. Auch in der Beleuchtung von Verkaufsräumen, Hotels und Büros entsteht für die COB-Technologie mehr und mehr ein Markt. Die Untersuchung der thermischen, optischen und elektrischen Eigenschaften von COB-LEDs und deren korrekte Beschreibung sind daher für die Entwicklung von LED-Leuchten entscheidend.

Beleuchtung von Arbeitsstätten, Verkaufsflächen und privaten Räumen

Die Anforderung einer hohen Farbwiedergabe ($CRI > 90$) kann und wird mittlerweile beispielsweise durch LED-Systeme mit einer Kombination von roten und grünen Leuchtstoffen realisiert. Die entscheidende Herausforderung besteht in Zukunft darin, das Potenzial der LED-Beleuchtung vollständig auszuschöpfen. Bei Vorhandensein einer hohen Farbwiedergabe besteht ein wesentlicher Vorteil von LED-Systemen gegenüber anderen Beleuchtungslösungen darin, dass Lichtverteilung und Lichtstrom intelligent angepasst und die Farbtemperatur je nach Bedarf flexibel zwischen 2700 K und 6500 K variiert werden kann. Damit kann beispielsweise:

- in Arbeitsstätten mit **Human Centric Lighting** ein biologisch wirksames dynamisch angepasstes Licht über die Tageszeit unabhängig von Wetter und Jahreszeit realisiert werden (vgl. KHANH & BODROGI 2015 [13]),
- im Wellness-/Erholungsbereich das passende Licht nach bevorzugter Lichtart (diffus, gerichtet, farbig, Farbtemperatur) individuell eingestellt werden,
- im Museum und in Verkaufsräumen das Spektrum, der Farbort und die Farbtemperatur abhängig von den ausgestellten Objekten eingestellt werden. Hierfür müssen LED-Leuchten aus weißen und farbigen LEDs (rot, grün, amber und blau) bestehen. Auf diese Weise wurde beispielsweise auch die Museumsbeleuchtung im Lenbachhaus in München realisiert (vgl. PEPLER et al. 2013 [26]).

Die Lebensdauer des Leuchtensystems wird maßgebend durch alle verwendeten LEDs, die elektronischen Komponenten sowie die eventuell erforderlichen Farbsensoren bestimmt. Alle Baugruppen und Komponenten müssen auf ihre Zuverlässigkeit geprüft werden. Daher ist die Untersuchung der thermischen, optischen und elektrischen Eigenschaften von weißen und farbigen LEDs erforderlich.

1.2.2. Fazit

Zusammenfassend lassen sich folgende Beobachtungen festhalten:

- Das Gesamtsystem einer LED-Leuchte unterscheidet sich bezüglich Wertschöpfungskette, Abhängigkeiten von Zulieferern, Modularität, Zuverlässigkeit bzw. Ausfallursachen usw. wesentlich von bisherigen Leuchtenkonzepten. Zusammen mit der raschen Durchdringung von LED-Leuchten in de-facto alle Segmente des Marktes stehen vor allem etablierte, qualitätsorientierte Leuchtenhersteller vor der Situation sich diesen neuen Herausforderungen zu stellen oder mittelfristig massiv Marktanteile zu verlieren bzw. sogar aus dem Markt zu verschwinden.
- Die Verwendung von standardisierten LED-Lichtmodulen in der Außenbeleuchtung erfordert, dass diese zuverlässig charakterisiert werden müssen. In der Innenraumbeleuchtung hingegen besteht neben der Erhöhung der Lichtqualität durch eine bessere Farbwiedergabe die Tendenz, die Beleuchtungssituationen in Abhängigkeit der Anwendung flexibel anzupassen.
- Eines der drängendsten Probleme besteht in der Gewinnung von realitätsnahen und aussagekräftigen Daten, mit denen das Thema „Alterung“ von Komponenten und ganzen Beleuchtungssystemen erfasst wird. Die derzeitige Unsicherheit bezüglich der zu erwartenden Lebensdauer und Ausfallmechanismen des gesamten LED-Leuchtensystems stellt sich zunehmend als Hemmnis für den Einsatz und als unkalkulierbares Risiko für Käufer/Investoren sowie Leuchtenhersteller dar.
- Basierend auf den Daten in diesem Vorhaben sollen über alle Anwendungen und Technologien hinweg Modelle geschaffen werden, die insbesondere für Leuchtenhersteller eine erheblich höhere Planungssicherheit bezüglich der Lebensdauerabschätzung als Mehrwert schaffen.
- Unabhängig von der laufenden Neustrukturierung der Märkte zeichnet sich derzeit ein vielversprechendes Marktsegment vor allem für KMU Leuchtenhersteller ab. Jedoch benötigen diese aufgrund systemimmanent begrenzter Ressourcen massiv Unterstützung zur Klärung dieser technischen Sachverhalte.

1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Nach der rasanten Entwicklung der LED-Technologie vom Jahr 2006 bis heute kann man feststellen, dass nahezu alle Neuentwicklungen der Leuchtenindustrie auf dieser Technologie basieren. Das Potenzial von LEDs sind für etablierte und neue Hersteller u.a. neue Möglichkeiten der Formgebung von Leuchten. Durch den erheblichen Energieeinspareffekt entstehen neue Märkte und die Produktvielfalt ist in den vergangenen Jahren stark angewachsen. Dadurch entsteht eine Vielzahl neuer Arbeitsplätze. Es entstehen jedoch auch neue Risiken, die bei konventionellen Leuchtmitteln zumindest nicht in dieser Größenordnung von Bedeutung waren. Nicht selten führen Fehlkonstruktionen von Leuchten zu Ausfällen oder lichttechnischen Defiziten mit hohen Reklamationsraten. Diese wiederum erzeugen eine Marktunsicherheit. Als Grund dafür ist vielerorts eine Unkenntnis der Technologie auszumachen, wobei KMU hier aufgrund kleinerer personeller Ausstattung

und generellen strukturellen Nachteilen (geringere Spezialisierung) gegenüber größeren Unternehmen erheblich im Nachteil sind. Vor allem KMUs sind darauf angewiesen, verlässliche Rahmenbedingungen (Normen, Erfahrungswerte/Richtlinien zum Entwurf) vorzufinden, auf die sie ihre Produktentwicklung aufsetzen können ohne den Markennamen zu gefährden. LED-Leuchten werden heute standardmäßig mit 50.000 bis 100.000 Stunden Lebensdauer bei einem Lichtstromrückgang von bis zu 20 % (L80) oder 30 % (L70) angegeben. Tatsächliche Messdaten und Erfahrungen gibt es auf diese lange Zeit jedoch bislang nicht. Dennoch bilden diese Werte in der Praxis die Basis für die Angabe von Garantiezeiten und Amortisationsberechnungen. Die Ergebnisse des Projektes fokussieren auf die Steigerung der Zuverlässigkeit aller relevanten Leuchtenkomponenten sowie des „Gesamtsystems LED-Leuchte“. Maßgebend dafür sind Untersuchungen an den LED-Packages, der Elektronik und den LED-Modulen sowie die Entwicklung von praxistauglichen Modellen zur Lebensdauer-Vorhersage.

Die zu erzielenden Ergebnisse des Projektes bieten damit insbesondere für die mittelständischen Leuchtenhersteller (KMU) ein großes Innovationspotenzial. In zweiter Linie profitieren sowohl LED-Hersteller, aber auch die Endkunden stark von den Erkenntnissen. Die Leuchtenhersteller werden in die Lage versetzt, gegenüber den LED-Herstellern und Elektroniklieferanten präzisere Anforderungen an Komponenten zu stellen. Gegenüber den Kunden können auf der anderen Seite zuverlässigere Angaben zu ihren Produkten geliefert werden. Dadurch entstehen gegenüber Mitbewerbern deutliche Wettbewerbsvorteile. Durch die Fokussierung der Untersuchungen auf hochqualitative und langlebige Beleuchtung werden die Leuchtenhersteller in die Lage versetzt, ihr bestehendes Produktsortiment und die bestehenden Geschäftsfelder über die klassische „Massenbeleuchtung“ hinaus zu erweitern. Da die Beleuchtung mit LEDs bei gleichzeitig hoher Farbqualität und langzeitstabilen Lösungen gerade in den Anfängen ist, können die erzielten Erkenntnisse auch als Beitrag von Normen und Standards dienen. Ebenso können sie beispielsweise zur Präzisierung von Ausschreibungen herangezogen werden.

1.3 Wissenschaftlich-technischer Ansatz

Stand der Forschung und Entwicklung

Für weiße LEDs der Generationen bis zum Jahr 2012 sind die relevanten Degradationsmechanismen u.a. durch die Arbeit im IGF-Projekt PQL bekannt. Zu nennen sind hier das Packaging, die Klebstoffe, fehlerhafte Lötstellen, übermäßige Alterung der Leuchtstoff-Silikon-Mischung sowie ungeeignete Leiterplattenmaterialien (vgl. Khanh et al. 2014 [17], Ganev & Khanh 2014 [4], Hartmann 2014 [6]). Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurden neue LED-Generationen entwickelt, die optimierte Packaging-Strukturen, neue Leuchtstoffsysteme und angepasste Leuchtstoffaufguss-Verfahren nutzen. Es besteht die Möglichkeit eines direkten Aufgusses, die Trennung von Chip und Leuchtstoff sowie die Einlagerung der Leuchtstoffpartikeln in Keramikplatten. Bislang liegen sehr wenige und in sich nicht schlüssige Berichte über das Alterungsverhalten anhand von LM-80-Berichten (LM-80-08 [8]) vor. Das Verfahren zur Vorhersage des Lichtstromrückgangs nach TM 21 (TM-21-11 [9]) stimmt nicht bei allen Packaging-Strukturen mit den in der Praxis gewonnenen Alterungswerten überein (vgl. Jacob 2014 [10]). Bei vielen LED-Typen können Lebensdauervorhersagen deshalb nicht mit ausreichender Sicherheit getroffen werden (Wagner 2014 [33]). Zu-

dem ist der Rückgang des Lichtstroms nur die Änderung eines photometrischen Parameters. Angaben zum Alterungsverhalten und dessen Vorhersage fehlen bisher für weitere wichtige farbmetrische und spektrale Parameter, wie den Farbort oder die Änderungen im kurz- und längerwelligen Spektralbereich. Für die Dimensionierung intelligenter Innenraumleuchten und deren Lebensdauervorhersage fehlt damit die entscheidende Grundlage.

Eine Untersuchung der Alterung von elektronischen Baugruppen bei LED-Leuchten ist bisher noch nicht systematisch durchgeführt worden. Es ist bisher lediglich bekannt, dass Elektrolyt-Kondensatoren häufig lebensdauerlimitierende Bauelemente sind, gefolgt von ungenügendem ESD-Schutz für Halbleiterbauelemente (Gate-Oxid-Schutz). Das Thema „Überspannungsschutz“ befindet sich noch in intensiver Diskussion. Die Normvorgaben für einen Überspannungsschutz bis 4 kV reichen bei bestimmten Blitzeinschlägen nicht aus. Des Weiteren ist bekannt, dass Leiterbahnen nur bei korrekter Dimensionierung (Elektromigration (Jung et al. 2014 [12]), Kontaktierung (vgl. Kwon et al. 2009 [19], Härter et al. 2012 [5]), Isolation (Pompl et al. 2006 [27]), Schutz gegen Korrosion (Shuang Yang et al. 2009 [31])) nicht lebensdauerbeeinträchtigend wirken. Ein neueres Thema bei der Schalttransistorzuverlässigkeit ist NBTI (Negative Bias Temperature Instability (Miyoshi et al. 2013 [25], Lenahan 2003 [21])), d.h. ein Anstieg der Schwellspannung des Transistors aufgrund eindiffundierender Fremdatome. Insgesamt ist die Lebensdauer der elektronischen Baugruppen ebenfalls stark temperaturabhängig (vgl. Khazaka et al. 2015 [18], Ma et al. 2014 [23]). Es existieren jedoch auch noch nicht systematisch untersuchte Abhängigkeiten zur konstanten und abrupten Belastung (vgl. Preussger et al. 2003 [29], Preussger 2006 [28], Lall et al. 2009 [20]). In jedem Fall besteht ein bislang nicht untersuchter Zusammenhang zwischen der Alterung der elektronischen sowie der Alterung der LED-Baugruppen. Im Allgemeinen stehen systemische Betrachtungen zur Zuverlässigkeit komplexer Systeme erst am Anfang (vgl. Dominguez-Garcia 2012 [3], Li et al. 2014 [22], Mihan et al. 1995 [24]). Die Betrachtung der vertikalen Struktur „LED-Bauelement – (Zhaga-)LED-Modul - LED-Leuchte als System“ ist bisher unzureichend betrachtet worden.

Die bisherigen Alterungsergebnisse zeigen Folgendes (vgl. KHANH et al. 2014 [14]):

- Temperatur und Betriebsstrom sind entscheidende Faktoren für die Alterung. Hohe Ströme ($> 700 \text{ mA}$) sind daher möglichst zu vermeiden.
- Die Empfindlichkeit der Leuchtstoff-Silikon-Mischung in Verbindung mit erhöhter Temperatur und Kontakt mit aggressiven chemischen Substanzen (z.B. Abgase) sind ebenfalls ursächlich für eine signifikante Alterung der Leuchten. Die Alterung im Chipaufbau entsteht u.a. durch ohmsche Brücken im pn-Übergang, so dass immer weniger Rekombinationen stattfinden und weniger optische Strahlung erzeugt wird.
- Die Alterung ist von LED-Typ zu LED-Typ sehr unterschiedlich. Bei 1000 mA und 95 °C ist die L70-Lebensdauer häufig bereits nach 11.000 Stunden erreicht.
- Zum Nachweis der Alterungseffekte sind neben optisch-lichttechnischen Messungen auch die Messung der *I-U*-Kennlinie (besonders im Sperrbereich) und der thermischen Widerstände notwendig und sinnvoll.

Ziel dieser hier zu beschreibenden Forschungsarbeit ist es, in neuen, diese Erkenntnisse berücksichtigenden Messreihen Daten zur Lebensdauer zu generieren. Dabei wird erstmals der konsequente Schritt der vollständigen Betrachtung sowohl der Teilsysteme (LED-Bauelement, -Modul und Elektronik), als auch des Gesamtsystems „LED-Leuchte“ vollzogen. Es ist ferner beabsichtigt, sowohl die Lebensdauermodelle der Teilsysteme um weitere Einflussgrößen erheblich zu erweitern

und somit zu präzisieren, als auch diese Teilmodelle zu einem mathematischen Gesamtmodell zur Lebensdauer- und Zuverlässigkeitssprognose des Gesamtsystems „LED-Leuchte“ zu integrieren. Mit diesem Modell wird es den Leuchtenherstellern erstmalig möglich sein, eine verlässliche Prognose zur Lebensdauer und Zuverlässigkeit ihrer Produkte auf der Basis einer Vielzahl von technischen und ökonomischen Eingabegrößen vorzunehmen (z.B. Qualität der Teilsysteme und Komponenten).

1.4 Arbeitshypothese

- Die Bestimmung der Lebensdauer der LEDs über die Berechnung der Aktivierungsenergie ist praxistauglich und sinnvoll (vgl. JORDAN 2014 [11]).
- Häufig ist nicht der Chip für die schnelle Degradation zuständig. Oft weist die Silikonmischnung die höchste Temperatur auf (YAZDAN MEHR et al. 2014 [37]) und sollte deshalb zur Überwachung und Modellierung der Lebensdauer verwendet werden.
- Die Lebensdauer-Berechnung über die optische Leistung und Änderungen im optischen Spektrum statt über den Lichtstrom ist ebenfalls möglich und für die LED-Anwender praktikabler (TUTTLE 2014 [32]).
- Die Lebensdauer von weißen und farbigen LEDs und die Änderung ihrer spektralen und farbmétrischen Eigenschaften unterscheiden sich. Die Degradation dieser LEDs muss unterschiedlich kompensiert werden, um über längere Zeit einen definierten Weißpunkt halten zu können.
- Es ist sehr schwierig bis unmöglich, die Lebensdauer von LEDs für normale Betriebsbedingungen (z.B. 350 mA, 60 °C) aus den Daten der beschleunigten Alterung unter erhöhten Arbeitsbedingungen (z.B. 1000 mA, 105 °C) berechnen zu können (YANG et al. 2014 [36]).
- Der Wartungsfaktor einer ganzen Leuchte hängt nicht nur von der Lebensdauer der LEDs ab. Auch die eingesetzten LED-(Zhaga-)Module und die elektronischen Komponenten müssen unter ihrer wechselseitigen Beeinflussung berücksichtigt werden.

1.5 Über das Projekt und die Projektpartner

Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Ermittlung der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit von LED-Produkten in den drei vertikal von unten nach oben aufgebauten Stufen LED-Bauelemente, LED-Module und LED-Leuchten (System). Der Fokus richtet sich auf die Ermittlung der drei wesentlichen Fehlermechanismen von LEDs. Die detaillierte Untersuchung des Lichtstromrückgangs, des Color Shifts (Farbverschiebung, Änderung des Spektrums) und der Totalausfälle kann bereits deutliche Hinweise auf das Verhalten von Leuchten geben. In Kombination mit einer gezielten Alterung der LEDs, belastbaren Extrapolationsverfahren und der Lebensdauerberechnung kann eine aussagekräftige Beurteilung der Lebensdauer erfolgen. Durch die gezielte Alterung entsteht eine Vergleichsmöglichkeit mit den LM-80 Tests der LED-Hersteller (LM-80-08 [8]).

Die fachliche Zusammensetzung der am Projektantrag beteiligten Forschungseinrichtungen ist aus Abbildung 1.3 abgeleitet worden. Nach einer fachlichen Abstimmung der Forschungspartner unter der Koordination der Technischen Universität Darmstadt wurde eine inhaltliche Festlegung für

einzelne Forschungsböcke getroffen, die jede Forschungseinrichtung im Rahmen des Projektes realisieren wird. Die Auflistung der einzelnen Pakete orientiert sich am Produktentstehungsprozess von der einzelnen Komponente hin zum Gesamtsystem einer Leuchte (Abbildung 1.3) und allen darüber hinaus gehenden Faktoren bis hin zum PQL. In Abbildung 1.3 sind die am Projekt beteiligten Forschungsböcke und Forschungsstellen aufgeführt.



Abbildung 1.3: Übersicht der Projektstruktur

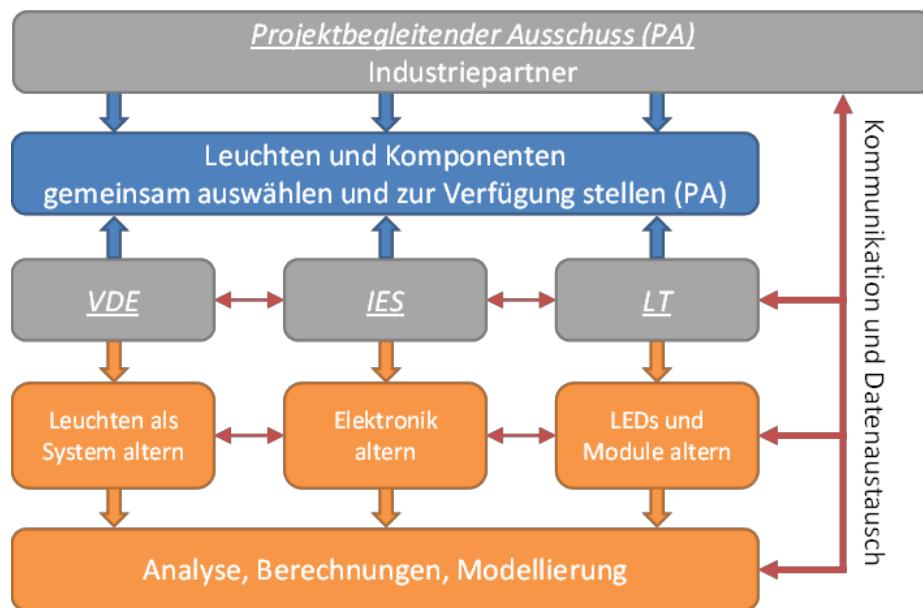


Abbildung 1.4: Kommunikation und Datenaustausch zwischen den Forschungspartnern und dem Projektbegleitenden Ausschuss

Dementsprechend ist der vorliegende Abschlussbericht in fünf Hauptkapitel gegliedert:

- Kapitel 2: Alterung von LED-Packages
- Kapitel 3: Lebensdaueruntersuchung an LED-Betriebsgeräten
- Kapitel 4: Alterung von Leuchten
- Kapitel 5: Zusammenfassung und Ausblick
- Kapitel 6: Literatur

Darüber hinaus sind im Anhang eine Auflistung der Publikationen und Vorträge im Rahmen der Projektarbeit sowie weitere Veranstaltungen zum Transfer in die Wirtschaft aufgeführt.

2. Alterung von LED-Packages

Im Rahmen von Projekt PQL2 wurden am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt die folgenden LED-Typen gealtert und untersucht:

- Weiße High-Power LEDs (HP-LEDs, Baujahr 2011 vom Projekt PQL1) und Baujahr 2015 zum Beginn des Projekts PQL2, mit unterschiedlichen Herstellern, Stromstärken und Temperaturen
- Module von weißen LEDs
- Farbige LEDs (rot, tiefrot, grün, blau) mit unterschiedlichen Wellenlängen und Materialsystemen
- Midpower-LEDs
- Chip-Scale- Packaging LEDs (CSP) und weiße HP-LEDs mit sehr hoher Farbwiedergabe (und mit hochkomplexen Leuchtstoffsystemen für hochqualitative Innenraumbeleuchtung)
- Chip-on-Boards LEDs mit hohen elektrischen Leistungen

2.2. Weiße Hochleistungs-LEDs (HP-LEDs)

2.2.1. Beschreibung von LM 80 und TM21

Die Lichtausbeute einer LED nimmt bei konstanten Bedingungen im Laufe der Zeit kontinuierlich ab. Dieses Verhalten, welches auch als Degradation bezeichnet wird, resultiert aus der Veränderung des Halbleiterchips und seinem Gehäuse sowie der sich anschließenden Primäroptik. Ein unmittelbarer Ausfall der LED, ähnlich dem Versagen einer Glühlampe, tritt nicht auf, solange die LED korrekt angesteuert wird. Allerdings beeinflussen viele Umwelteinflüsse die LED während ihrer Laufzeit (Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Schema der Ursachen für die LED-Alterung

Abbildung 2.2 zeigt den Schnitt durch eine bereits geschädigte LED. Über dem Leuchtstoff und an den Seiten der Primäroptik deutet die schwarze Verfärbung auf eine Vorschädigung hin. Die Primäroptik ist anfällig für mechanischen Stress, Trübung und Umwelteinflüsse. Der LED-Leuchtstoff reagiert auf Feuchtigkeit, hohe Temperatur und chemische Einflüsse. Schädliche Substanzen, die

insbesondere eine Veränderung des Leuchtstoffs bewirken, sind in einer Liste der Firma Cree veröffentlicht. Der LED-Die ist anfällig für thermischen Stress, ESD, chemische Dämpfe und Delamination. Die äußeren Einflüsse und daraus resultierenden Schädigungen während des Betriebs der LED sind Gegenstand dieses Forschungsprojektes.

Die Lebensdauer von LEDs wird von den Herstellern meist in der Form „L70 (9k) >50.000“ angegeben. Dieser Ausdruck bezeichnet das Absinken des LED-Lichtstroms auf 70 % nach frühestens 50.000 Betriebsstunden, ausgehend von einer 9.000-stündigen Testreihe.

Um diese Lebensdauer zu ermitteln, haben sich zwei Standards international durchgesetzt. Zum einen das Messverfahren nach LM-80 zum anderen die Berechnungsmethode nach TM-21 [9].

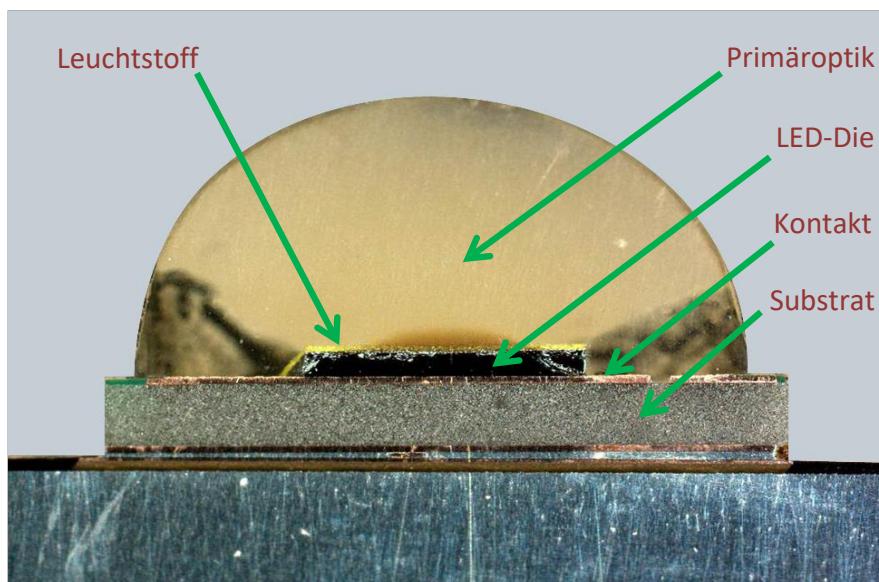


Abbildung 2.2: Aufbau einer High-Power-LED

Bei dem LM-80-Verfahren handelt es sich um einen reinen Lebensdauertest. Hier wird der Lichtstrom über der Zeit für drei verschiedene Gehäusetemperaturen aufgezeichnet. Die Temperatur der umgebenden Luft darf nur eine Abweichung von max. $+/- 5^{\circ}\text{C}$ aufweisen und die Gehäusetemperatur nur eine Abweichung von max. $+/- 2^{\circ}\text{C}$. Luftströme über dem Prüfling, also eine aktive Kühlung, darf nicht erfolgen. Die minimale Testdauer beträgt dabei 6000 Betriebsstunden. Messwerte sollen im Idealfall alle 1000 h aufgenommen werden.

Die TM-21 dagegen stellt kein Testverfahren, sondern ein Verfahren zur Extrapolation über den Messzeitraum hinaus dar. Dazu werden die ermittelten LM-80-Werte genutzt und daraus die voraussichtliche weitere Lichtstromabnahme berechnet. Das Verfahren wird auf die sechsfache Testdauer des LM-80-Tests begrenzt. Werden also 50.000 Betriebsstunden oder mehr nach dem TM-21-Verfahren angegeben, muss das Leuchtmittel über 8.000 h getestet worden sein.

Die Angabe der Lebensdauer erfolgt dann über den L70-Wert, also den Zeitraum, bis zu dem nur noch 70 % des Lichtstroms verglichen mit dem Neuzustand emittiert werden.

2.2.2. Auswahl der LED-Typen

Für die LED-Alterung wurden zwei LED-Typen vom Baujahr 2011 vom früheren Projekt PQL 1 ausgewählt, die zu Beginn des Projekts PQL 1 zu den meistverkauften LED-Produkten gehörten. Die Anzahl der Testmuster pro Alterungsbedingung betrug 20 Stück. Diese Anzahl erlaubt eine gute statistische Auswertung der Daten. Die LEDs haben eine ähnliche Farbtemperatur $T_{CP}=4000$ K und einen Farbwiedergabeindex $R_a>80$. LEDs mit solchen Charakteristiken werden primär in der Innenraumbeleuchtung eingesetzt. Neben den weißen LEDs werden pro LED-Typ auch 20 blaue LEDs ohne den aufgebrachten Leuchtstoff gealtert. Dies erweist sich als hilfreich bei der Suche nach den Ursachen, wodurch die Lichtstromdegradation verursacht wurde.

Als Alterungsbedingungen wurden die Kriterien der LM80-08 übernommen. Diese definiert als Pflichttemperaturen 55 °C und 85°C. Die dritte, frei wählbare, Temperatur, wurde an der TU Darmstadt mit 95°C festgelegt. Die Ströme betrugen dazu 350 mA, 700 mA und 1000 mA. Diese Messobjekte werden im Bericht als Langzeitdaten bezeichnet.

Neben dem Betrieb der Bauelemente aus dem Jahr 2011 wurden neue weiße LEDs neuerer Bauart (Jahr 2015) beschafft und betrieben. Hierbei hat sich die Zahl der Betriebsbedingungen und Testobjekte reduziert, um eine höhere Zahl an verschiedenen LED-Typen zu untersuchen. Eine Übersicht der Bedingungen und Anzahl wird in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Bedingungen für die Alterung der HP-LEDs an der TU Darmstadt

Hersteller	LED-Typ	700mA 85 °C	1200mA 85 °C	700mA 100 °C	1200mA 100 °C
C	1	x	x	x	x
	2	x	x	x	x
	3	x	x	x	x
D	1	x	x	x	x

Der Alterungsaufbau ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Für die Regelung der Temperatur und die Aufnahme der elektrischen Werte wurden eigene Soft- und Hardwarelösungen entwickelt.

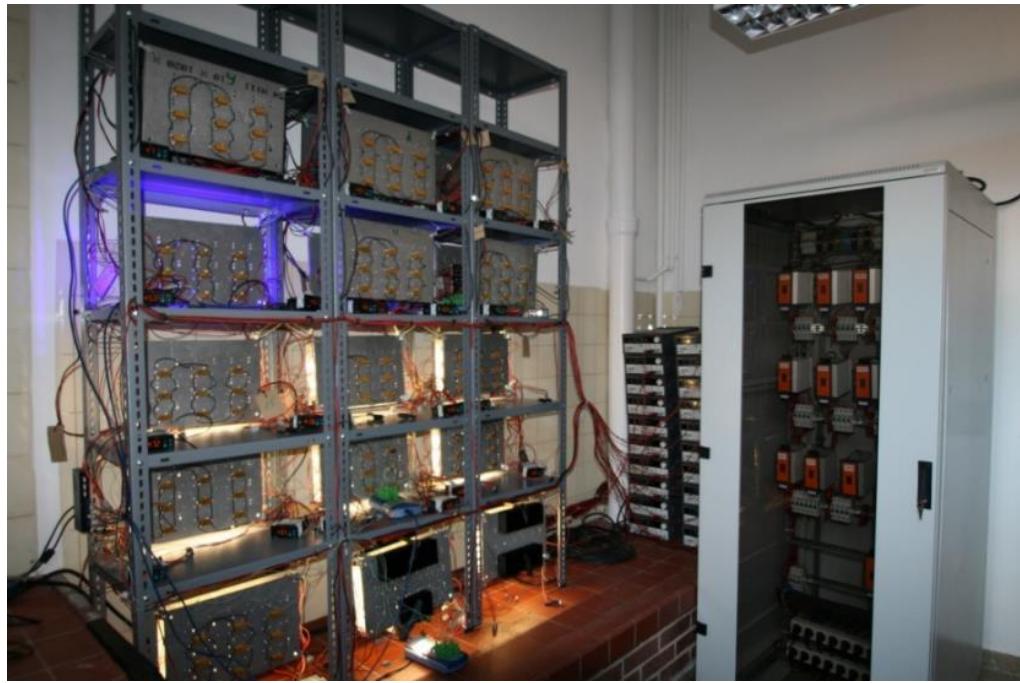


Abbildung 2.3: Alterungsaufbau an der TU Darmstadt

Der elektrische Betrieb der LEDs wird durch mehrere Source-Meter (Präzisionsschaltnetzteile) der Fa. Keithley realisiert. Diese gewährleisten eine hohe Zuverlässigkeit und den besonders wichtigen Schutz gegen Überspannung im Falle vom Ausfall einer der in Reihe geschalteten LEDs. Außerdem liefern die Geräte, dank universeller Schnittstelle, alle notwendigen elektrischen Daten an die Überwachungssoftware, die aus diesen einen LED-Totalausfall unabhängig, ob Kurzschluss oder Leerlauf sofort erkennt und protokolliert. Für die Erzeugung der festgelegten Temperaturen wird elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Diese kostengünstige Methode bietet eine ausreichende Genauigkeit in relativ engen Toleranzen, so wie in LM-80-08 gefordert. Die Temperaturüberwachung wird auch von der Steuersoftware übernommen.

Messung der LEDs

Was die LED-Alterung betrifft, stellt die Messung der LEDs die größte Herausforderung während der gesamten Projektphase dar. Die Alterung soll sich über mehrere tausend Stunden erstrecken, was eine sehr hohe Stabilität der Messanlage voraussetzt. Abbildung 2.4 zeigt den Messaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt.

Da aber die verwendeten Geräte (insbesondere die Ulbricht-Kugel) einer natürlichen Alterung unterliegen, müssen die entstandenen Abweichungen kompensieren werden. Für diesen Zweck wurden pro LED-Typ nicht gealterte LEDs der gleichen Produktionscharge als Referenz-LEDs bestimmt, die vor jeder Messung vermessen wurden. Den Mittelwert aller Referenz-Werte bildete die neue Null-Linie, um so die Änderung der U-Kugel-Beschichtung zu kompensieren.

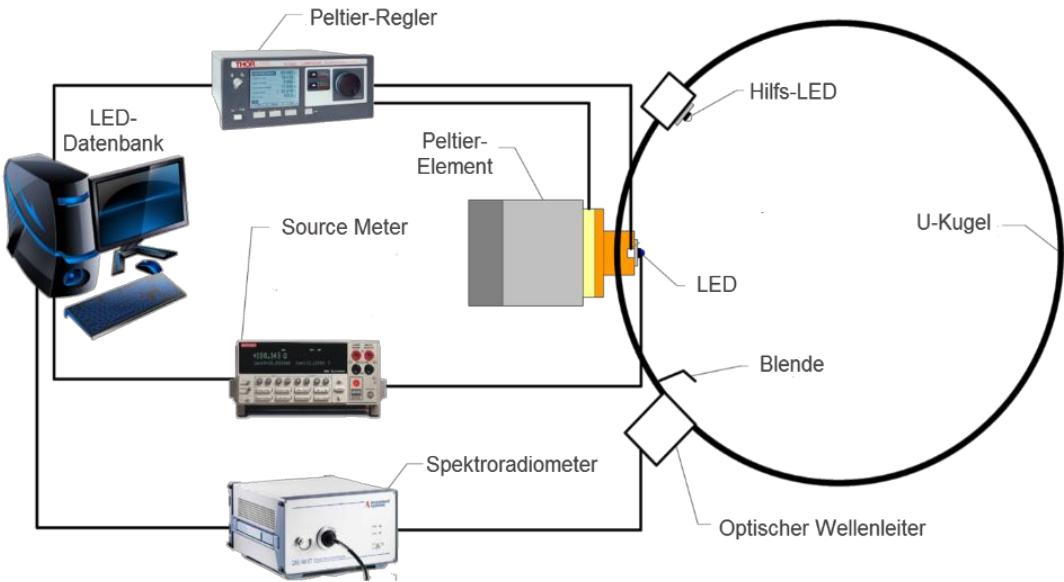


Abbildung 2.4: Messaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt

Für die geplanten wiederkehrenden Alterungsmessungen sind Messplätze nötig, die über einen langen Zeitraum sehr stabile Ergebnisse gewährleisten müssen. Das bereits vorhandene Messsystem genügt den neuen Anforderungen der aktuellen Messobjekte nicht mehr. Daher mussten am Anfang des Projekts ein System neu aufgebaut werden (Abbildung 2.8).

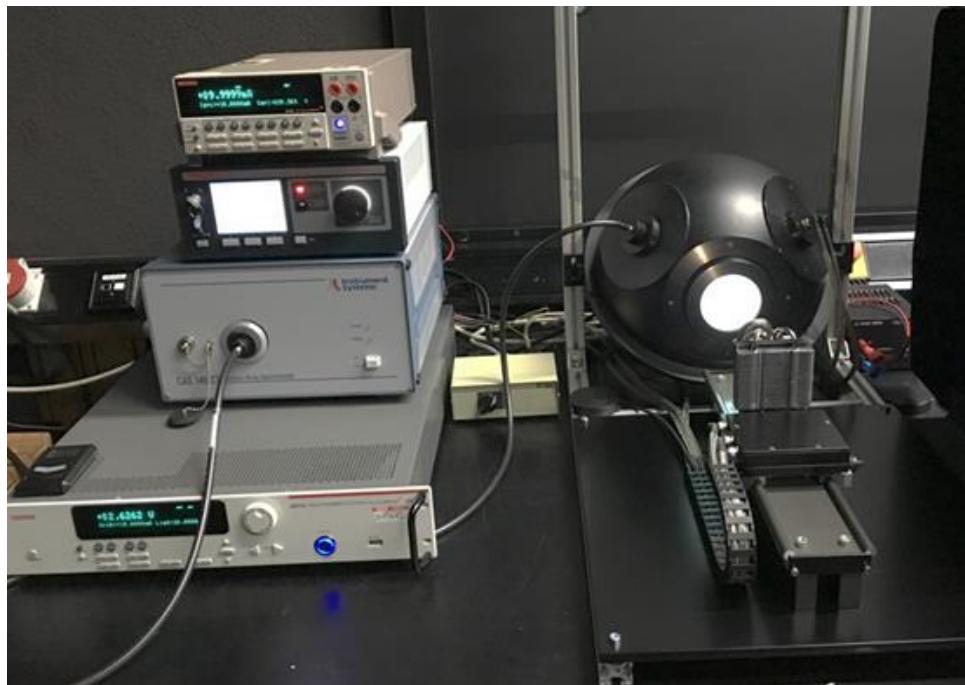


Abbildung 2.5: Neuer Messplatz für LED-Messungen

Für die LED-Messungen wurde ein neuer Messstand entwickelt, der einerseits spektrale, andererseits elektrische Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen gewährleisten kann (Abbildung 2.5). Eine hohe Reproduzierbarkeit der optischen Messung wurde unter anderem mit Hilfe einer genauen und präzisen Linearführung erreicht. Bei der Messung von geringen Strömen kommt es oft zu Störsignalen, daher wurden die Leitungen elektrisch sehr gut abgeschirmt.

Alle LEDs werden auf speziellen Messplatten gealtert, die für die Messungen einen thermischen Sensor integriert haben. Verschiedene LED-Typen weisen andere Lötpads auf, die beim Entwurf der Messplatten beachtet werden müssen. Die Platten wurden bei einer externen Firma gefertigt und mit LEDs und Thermosensoren bestückt. Der Aufbau einer solchen Platine ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

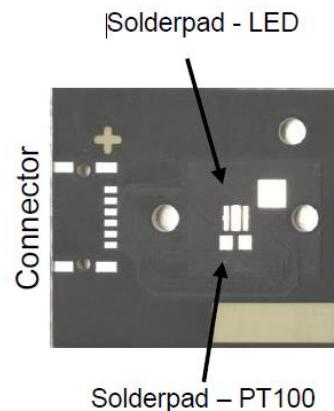


Abbildung 2.6: Aufbau der Mess- und Alterungsplatine für die LEDs

Auf der Platine ist ein Temperatursensor (Pt100) vorgesehen. Dazu kommt eine Steckverbindung, die ein schnelles und sicheres Verbinden mit der Source-Meter-Unit und dem Temperaturregler gewährleistet. Während der Messung wurden die LEDs immer auf einer Gehäuse-Temperatur von 25 °C konstant gehalten. Es wurde entschieden die LEDs während der Messung durch Pulse mit einer Dauer $T_D=20$ ms zu betreiben. Dies minimiert den Effekt der Selbstaufheizung des LED-Dies und die daraus resultierende Verfälschung der LED-Charakteristiken.

Als Messströme wurden in der Regel die Betriebsströme ($I_F=350, 700$ und 1000 mA) gewählt. So konnte eine optimale Aussteuerung des Spektrometers erreicht werden, ohne die Messzeit unnötig zu verlängern.

2.2.3. Langzeitdaten über 24.000 h

Die im Vorgängerprojekt gealterten LED-Packages wurden weiter betrieben, so dass eine gesamte Alterungszeit von 24.000 h erreicht wurde. Nach TM-21 wäre hiermit die sechsfache Zeit durch Extrapolation vorhersagbar, was 144.000 h beträgt. Abbildung 2.7 zeigt den Rückgang des relativen Strahlungsflusses für einen Betriebsstrom (700 mA) und zwei Temperaturen (55 °C und 85 °C). Jeweils zehn LED-Packages wurden gealtert, wobei der Mittelwert aufgetragen ist und die vertikalen Balken den Standardabweichungen entsprechen.

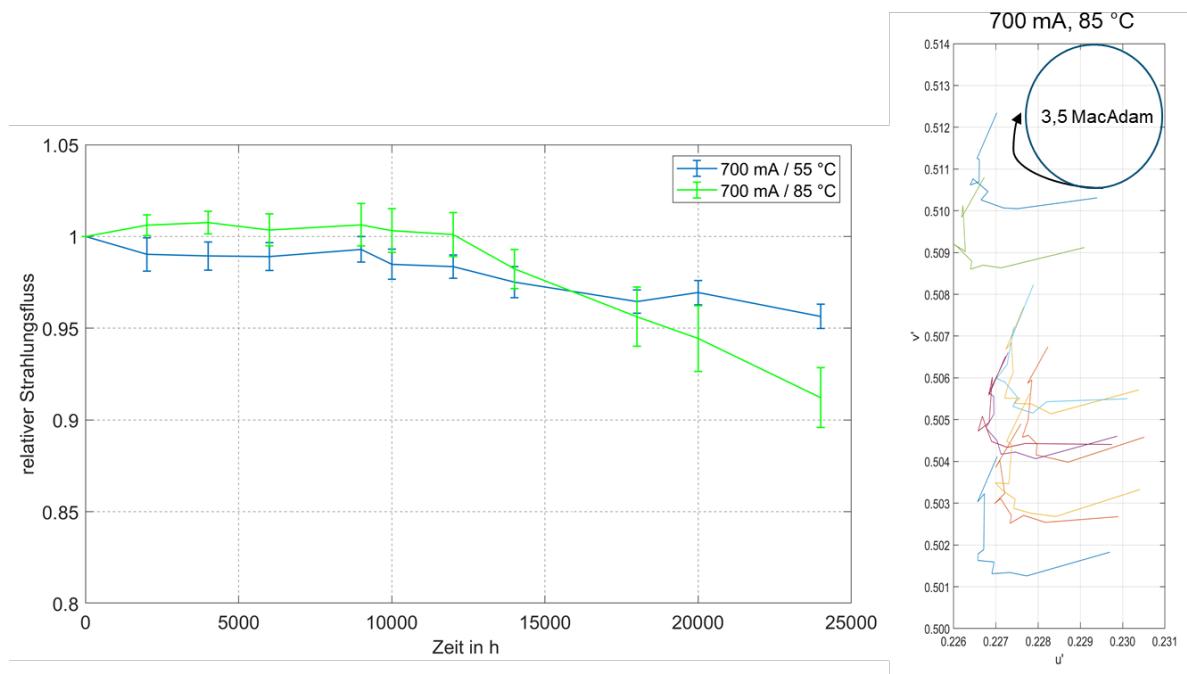


Abbildung 2.7: Links: Rückgang des Strahlungsflusses von jeweils zehn High Power LED-Packages für einen Betriebsstrom (700 mA) und zwei Temperaturen (55 °C und 85 °C), Rechts: Farbdrift während der Alterung im $u'v'$ -Farbraum, nach links bedeutet in Richtung grün, nach oben in Richtung gelb

Die höhere Temperatur hat zur Folge, dass der Strahlungsfluss zu Beginn ansteigt, was durch die Ausheilung im Kristall hervorgerufen werden kann. Bis zum Zeitpunkt von 12.000 h bleibt der Strahlungsfluss dann konstant. Dies bedeutet, dass eine Vorhersage der Lebensdauer bis dann nicht möglich ist. Nach diesem Zeitpunkt fällt die grüne Kurve nahezu linear bis zum Ende hin ab. Hieraus ließe sich eine Extrapolation erstellen, wenn der vorherrschende Alterungsprozess weiterhin anhält. Für die geringere Temperatur von 55 °C ist der Beginn des Strahlungsflussrückgangs nicht so deutlich ausgeprägt. Insgesamt bleiben die Werte bis zum Ende des Tests oberhalb von 95 %. Deutlich wird, dass die höhere Temperatur den Alterungsprozess zwar beschleunigt, dieser jedoch erst spät einsetzt und somit schwer vorherzusagen und zu extrapoliieren ist.

Die Betrachtung der Farbverschiebung geschieht im CIE 1976 UCS Farbraum (Abbildung 2.7). Hierbei wird der Farbdrift aller zehn LED-Packages dargestellt. In den ersten 2.000 h bewegen sich die Messobjekte nach links, das bedeutet in Richtung grün. Danach ändern sich die Farbkoordinaten nur noch im Bereich von Werten von etwa 0,001, um dann in der letzten Phase stark anzusteigen. Dies entspricht einem gelben Farbdrift, was bei High Power LEDs oft beobachtet wird. Die

Bewegung in Richtung gelb setzt zeitgleich mit dem Beginn des Strahlungsflussrückgangs auf, so dass diese beiden Beobachtungen sehr wahrscheinlich durch einen gemeinsamen Alterungsmechanismus hervorgerufen werden.

2.2.4. Weiße High Power LED-Packages von 2014

Im Laufe des Projekts PQL I wurden weiße LED-Packages von damals aktueller Bauart angeschafft und in die Alterung gebracht. Ein Teil der Bauteile wurde ausgewählt und bei verschiedenen Bedingungen weiter betrieben (siehe Tabelle 2.1).

Die Alterungszeit betrug beim Start des Projekts lediglich bis zu 2.000 h. Aufgrund der entstandenen Lagerungszeit wurden die LED-Packages zu Beginn erneut vermessen. Dabei zeigte sich eine Abweichung zu den letzten Werten, die vor der Lagerung aufgenommen wurden. Nach weiteren 1.000 h erreichten die lichttechnischen Werte wieder den vorherigen Zustand. Alle LED-Packages wiesen sowohl einen Lichtstromverlust auf, als auch eine Farbverschiebung in Richtung gelb. Beides wurde durch den weiteren Betrieb wieder rückgängig gemacht. Der Lichtstrom stieg wieder und die Farbverschiebung ging zurück in Richtung blau. Die Hauptursache für diesen Effekt stellt die Einlagerung von Feuchtigkeit in der Silikonverkapselung des LED-Packages dar. Diese führt unter anderem zu einer Lichtstromreduktion. Außerdem tritt ein geringer Anteil an blauer Strahlung aus, was zum Gelbshift führt. Bei langen Lagerungszeiten ist somit zu beachten, dass sich das gemessene Spektrum einer LED zu Beginn des Betriebs noch stark ändern kann.

Im Folgenden werden die Ergebnisse von D1 (siehe Tabelle 2.1) bei vier unterschiedlichen Alterungsbedingungen gezeigt (Abbildung 2.8). Zu beachten ist hierbei, dass bereits eine Voralterung von 2.000 h erfolgte, die hier nicht mit in den Daten abgebildet ist.

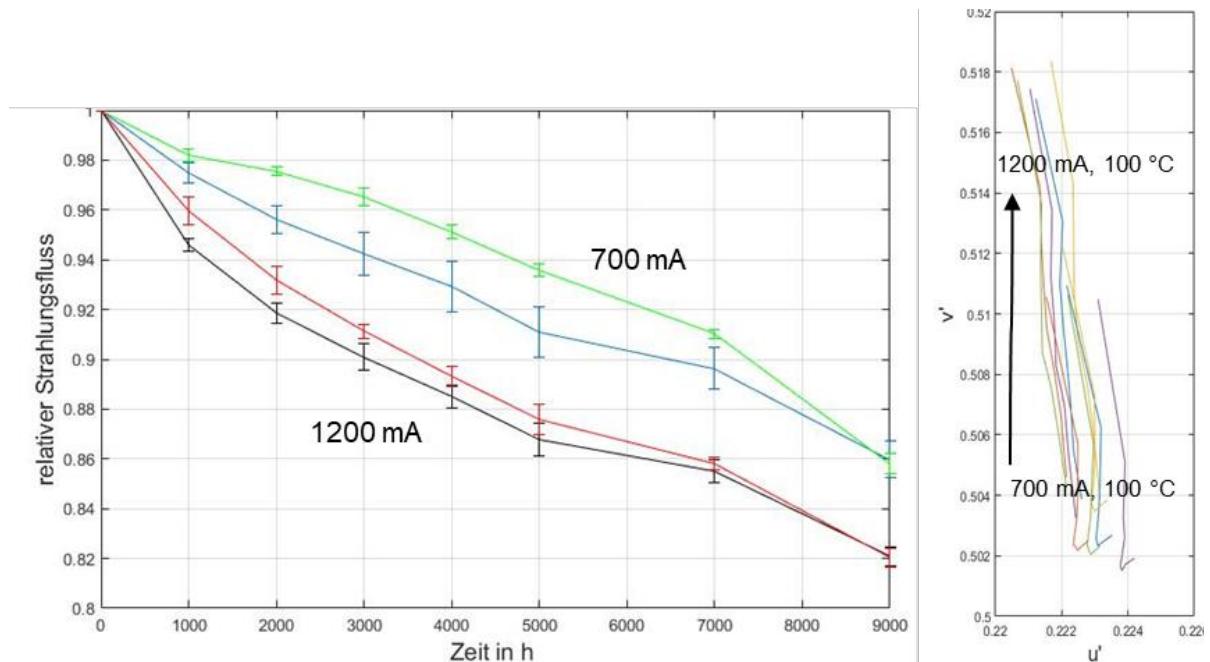


Abbildung 2.8: Links: Rückgang des Strahlungsflusses von jeweils zehn High Power LED-Packages für zwei Betriebsströme (700 mA und 1200 mA) und zwei Temperaturen (85 °C und 100 °C)

Rechts: Farbdrift in Richtung gelb während der Alterung bei 100 °C und zwei Strömen

Der Rückgang des Strahlungsflusses wird maßgebend durch die Höhe des Vorwärtsstroms bestimmt. Die Kurven fallen bis 6.000 h so stark ab, dass möglicherweise eine Alterungsfunktion oder auch Extrapolation möglich wäre. Ein Vergleich mit dem ebenfalls untersuchten Farbdrift zeigt, dass fast unmittelbar zu Beginn ein starker Drift ($\Delta u'v' > 0,01$) in Richtung gelb erfolgt (Abbildung 2.8, rechts). Die Farbverschiebung steigt hierbei mit höherem Strom. Es lässt sich wiederum schließen, dass der vorherrschende Alterungsmechanismus sowohl eine Farbverschiebung, als auch einen Strahlungsfluss- und Lichtstromrückgang bewirkt.

Die Untersuchung der High Power LEDs eines anderen Herstellers zeigt deutlich andere Ergebnisse. In Abbildung 2.9 ist der Rückgang des relativen Strahlungsflusses für drei Bedingungen dargestellt. Wiederum wird deutlich, dass eine Erhöhung des Stromes zu einer stärkeren Degradation führt.

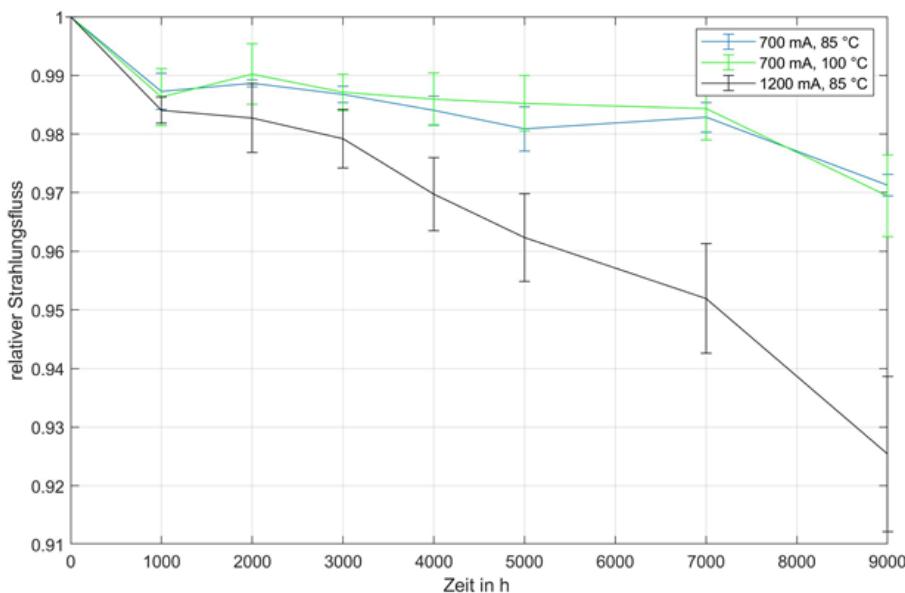


Abbildung 2.9: Rückgang des Strahlungsflusses von jeweils zehn High Power LED-Packages für zwei Betriebsströme (700 mA und 1200 mA) und zwei Temperaturen (85 °C und 100 °C)

Bei einem Vorwärtsstrom von 700 mA unterscheiden sich die Alterungsverhalten bei 85 °C und 105 °C nicht, nach einem leichten anfänglichen Rückgang sind die LED-Packages stabil bis 7000 h und sinken dann leicht ab. Beim Vorwärtsstrom von 1200 mA (schwarze Kurve) fällt der Strahlungsfluss kontinuierlich und stärker ab und hat nach 7000 h bereits 5 % des Anfangswerts verloren. Die höchste Alterungsbedingung bei 1200 mA und 100 °C führt bereits nach 2000 h zu einem Quasi-Totalausfall und wird daher nicht mit in dem Diagramm dargestellt. Die Alterungsbedingungen liegen hier jedoch oberhalb der im Datenblatt angegebenen Toleranzgrenze.

Die vorliegenden Daten zeigen, dass eine Extrapolation nur dann aus den Daten erfolgen kann, wenn diese bei Bedingungen erzeugt werden, die die Alterung stark beschleunigen. Andernfalls

tritt ein Rückgang des Strahlungsflusses erst nach 6.000 h auf, eine Zeitdauer, die für die meisten Anwender nicht akzeptabel ist.

2.3. Chip-On-Board-LEDs (COB)

Im Folgenden wird die Untersuchung von Chip-On-Board-LEDs (COB-LEDs) vorgestellt. Der große Unterschied zu den bisher betrachteten High Power LEDs besteht darin, dass viele LED-Chips auf einem Board aufgebracht sind und somit die Leistungsaufnahme um ein Vielfaches höher liegt.

2.3.1. Alterung und Messaufbau für COB-LED-Module

Aufgrund der hohen thermischen und optischen Leistungen sind sowohl ein neuer Alterungsstand, als auch eine Erweiterungen an der Ulbricht-Kugel nötig (Abbildung 2.10). Jeweils vier COB-Module befinden sich auf einem Kühlkörper, wobei die Temperatur durch unterschiedlich starke Luftströme eingestellt werden kann. Der Temperaturmesspunkt befindet sich auf jedem Bauteil direkt neben der lichterzeugenden Fläche. Jedes COB Modul wird von einem Vorschaltgerät mit einem Konstantstrom betrieben und benötigt dafür eine Spannung von etwa 38 V.

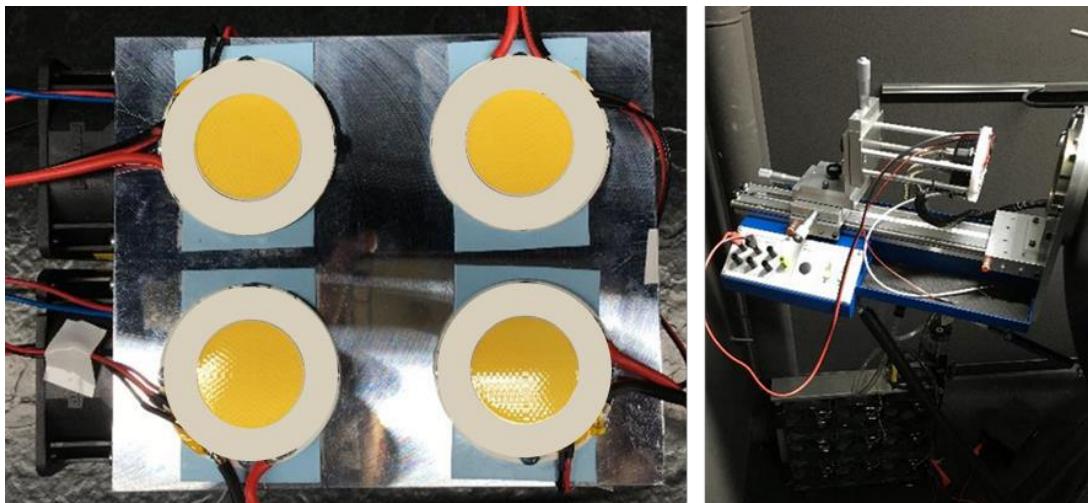


Abbildung 2.10: Links: Vier COB-Module auf einem Kühlkörper, jeweils mit einem Temperatursensor (PT100) Rechts: Messanschluss für COB-Module an der Ulbricht-Kugel (1 m) mit Wasserkühlung

Für die Messung werden die Module mit ihrer Rückseite direkt auf eine Oberfläche angebracht, die mit Wasser durchströmt wird. In Abbildung 2.10 ist rechts der neue seitlichen Anschluss für Messungen an der Ulbricht-Kugel dargestellt.

2.3.2. Ergebnisse

Die COB-Module wurden 6.000 h lang betrieben und jede 1.000 h spektral an der Ulbricht-Kugel vermessen. Die daraus bestimmten Lichtströme werden in Abbildung 2.11 für den Vorwärtsstrom von 3.300 mA und vier Temperaturen aufgezeigt.

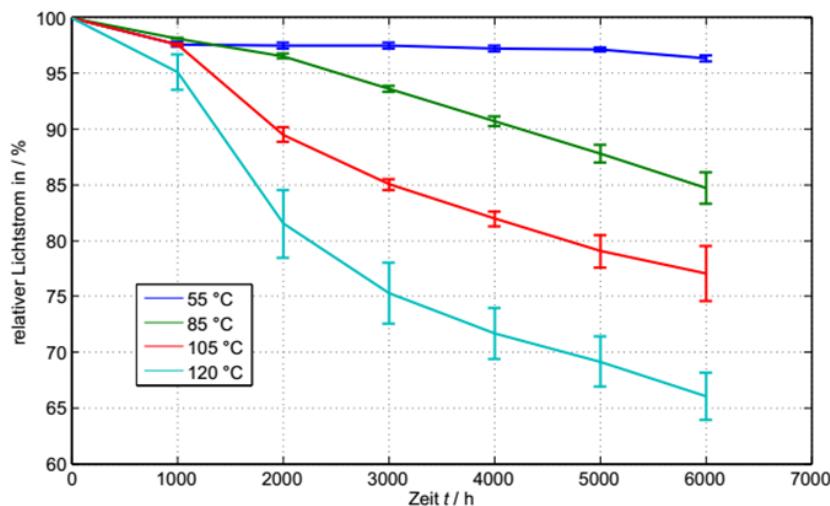


Abbildung 2.11: Rückgang des relativen Lichtstroms für 3300 mA und vier Temperaturen

2.3.3. Entwicklung eines Alterungsmodells

Bei nahezu allen Bedingungen stellten sich so starke Lichtstromrückgänge ein, dass 90 % und 85 % des Anfangswerts erreicht wurden. Daher müssen diese Zeitpunkte nicht extrapoliert werden, sondern können direkt für die weitere Analyse verwendet werden. Oft verhalten sich temperaturbeschleunigte Prozessen nach dem Arrhenius-Gesetz. Dieses kann über eine spezielle Auftragung im sogenannten Arrheniusgraphen (logarithmische Darstellung der zu testenden Größe über die inverse Temperatur) überprüft werden. Abbildung 2.12 zeigt dies für die Daten der Module bei einem Vorwärtsstrom von 3.300 mA und allen vier Temperaturen.

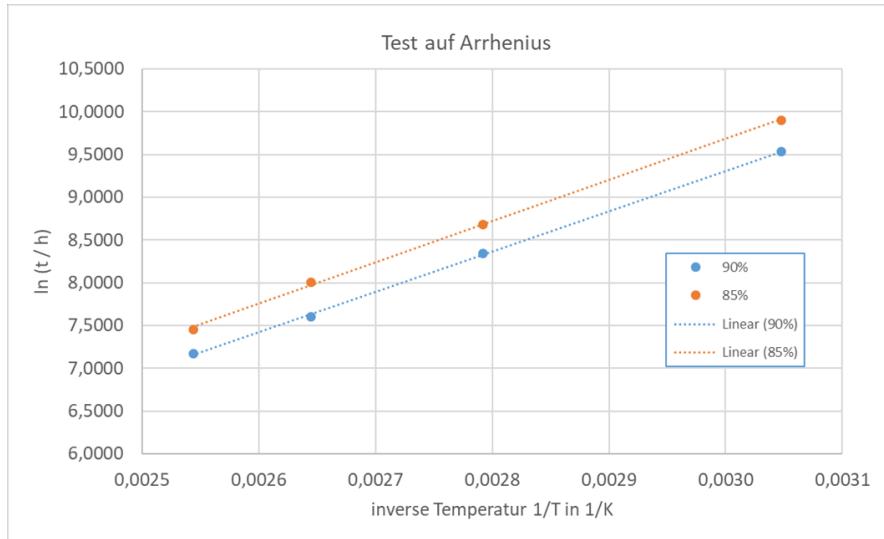


Abbildung 2.12: Arrheniusgraph für vier Temperaturen

Aus der Steigung der Gerade in Abbildung 2.12 lässt sich ein Parameter des Lebensdauermodells herausziehen. Viele Alterungsprozesse werden ebenfalls durch die Erhöhung der elektrischen Stromdichte beschleunigt. Der Zusammenhang kann oft über eine Potenzfunktion abgebildet werden. Die Abhängigkeit des zeitlichen Verhaltens von Temperatur und Strom kann nun in einer Lebensdauerfunktion abgebildet werden:

$$L_x(T, I) = L_0 \cdot \exp\left(\frac{D}{T}\right) \cdot \frac{1}{I^n} \quad \text{Gl. 1}$$

Die ausführliche Herleitung der Gleichung 1 und die Umsetzung mit realen Alterungsdaten findet sich bei Wagner [1]. Nach Bestimmung der Parameter kann nun die Lebensdauer für jede Temperatur und jeden Vorwärtsstrom aus Gleichung 1 berechnet werden. Abbildung 2.13 zeigt das Ergebnis in Form einer dreidimensionalen Fläche.

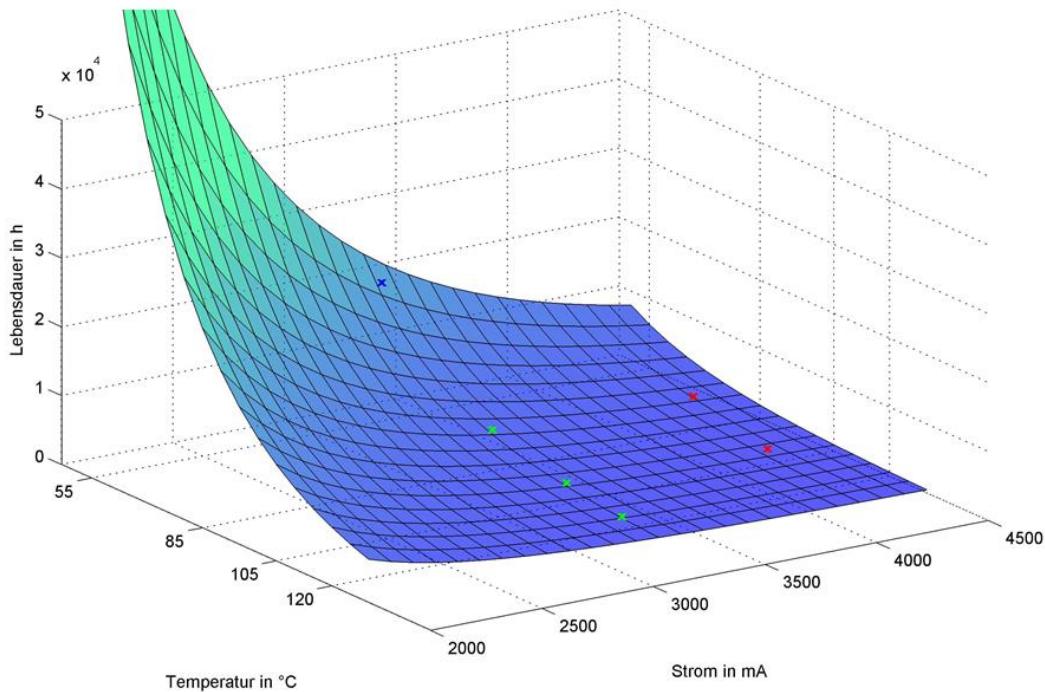


Abbildung 2.13: Lebensdauerfunktion $L_{85}(T,I)$, die grünen und roten Punkte bilden die Basis zur Parameterbestimmung, der blaue Punkt (3.300 mA und 55 °C) ist ein zu vergleichender Messwert

Die Fläche, die die Lebensdauer bis 85 % des Anfangslichtstroms darstellt, steigt mit fallender Temperatur und Strom an. Die drei grünen und zwei roten Messpunkte bilden die Basis für die Parameterbestimmung des Modells. Der blaue Punkt stellt einen Messpunkt für 3.300 mA und 55 °C dar. Da dieser Punkt nahezu auf der Fläche liegt, liefert das Modell hier auch für extrapolierte Werte ein gutes Ergebnis.

Literatur des Abschnitts 2.3

- [1] Wagner, Max: Einfluss von Temperatur und Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen, Dissertation TU Darmstadt, Mai 2018

2.4. LED-Module und Verknüpfung

Im Rahmen des Projekts wurden LED-Module gealtert, die ebenfalls in den Leuchten eingesetzt werden. Für die Messung der Module wurde ein Messstand entwickelt, der jedes einzelne LED-Package des Moduls spektral vermessen kann.

2.4.1. Messaufbau für LED-Module

Für die Messung von LED-Modulen wurde im Rahmen eines praktischen Entwicklungsprojekts für Elektrotechnik-Studierende (PEM II) ein neuer Messplatz entwickelt und aufgebaut (Abbildung 2.14). In diesem Aufbau wird ein lichttechnisches Messgerät mit Hilfe eines elektromechanischen

Aufbaus an die gewünschten Positionen gefahren. Dabei sind sowohl horizontale Bewegungen (in x-y-Richtung), als auch vertikale Bewegungen (in z-Richtung) möglich. Das Messgerät in Form eines Spektrometers nimmt die emittierte Strahlung jeder einzelnen LED des zu messenden Moduls auf. Somit können später ebenfalls statistische Auswertungen der LED-Packages eines Moduls erfolgen. Außerdem lassen sich aus dem Spektrum zahlreiche lichttechnische Parameter ermitteln.

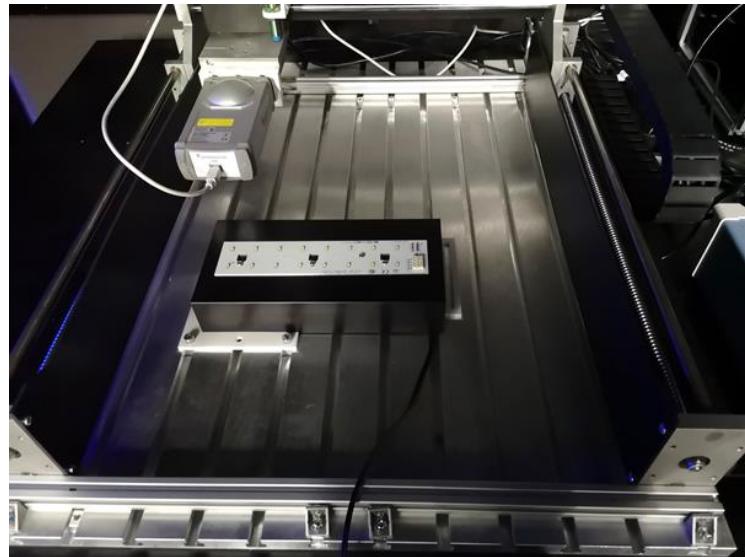


Abbildung 2.14: Messplatz für LED-Module bestehend aus einem kleinen Spektrometer mit optischem Aufsatz, welches oberhalb eines LED-Moduls mit Hilfe einer elektromechanischen Konstruktion zu den Orten der einzelnen LEDs positionierbar ist

2.4.2. Ergebnisse

Die Module werden bei jedem Messzeitpunkt auf den Messplatz positioniert und die einzelnen LED-Packages spektral gemessen. Aus den Spektren lassen sich die Teillichtströme berechnen, welche zusammen den Gesamtlichtstrom des Moduls bilden. Das in Abbildung 2.15 dargestellte Diagramm zeigt die Ergebnisse eines Moduls mit sechzehn High Power LEDs für einen Alterungszeitraum von 4.000 h.

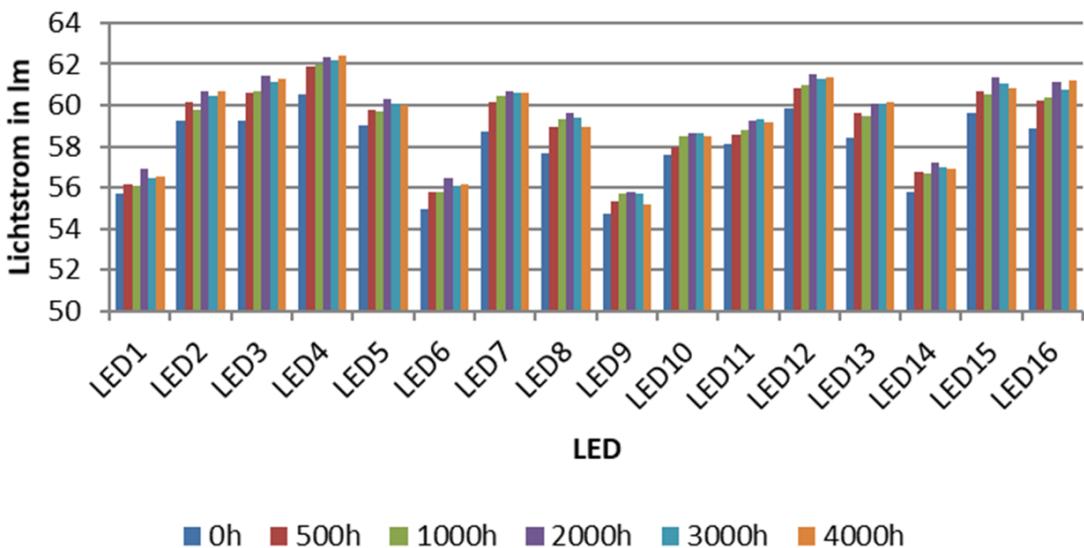


Abbildung 2.15: Zeitlicher Verlauf der Lichtströme jedes einzelnen LED-Packages auf einem Modul

Die Anfangslichtströme der LEDs unterscheiden sich bereits zu Beginn. Die Mehrzahl weist einen Lichtstrom von $85 \text{ lm} \pm 2 \text{ lm}$ auf. Vier LED-Packages weichen davon deutlich nach unten ab, sie besitzen auch einen anderen Farbort (siehe Abbildung 2.17). Das zeitliche Verhalten im Durchschnitt ähnlich ab: zu Beginn findet der stärkste Anstieg statt, der in den letzten Messzeitpunkten in eine Stagnation übergeht. Neben der anfänglichen Ausheilung von Kristaldefekten im Halbleitermaterial kann ebenso das Verflüchtigen von Feuchtigkeit aus der Primärlinse einen Anstieg des Lichtstroms mit sich führen.

2.4.3. Verknüpfung von Modul und Leuchte

Zum Vergleich des Alterungsverhalten wurden Module ausgewählt und gealtert, welche ebenfalls in den Leuchten eingesetzt werden. Die Temperatur am Modul wurde bei der Alterung so eingestellt, dass sie der Temperatur in der Leuchte während des Betriebs entspricht. Abbildung 2.16 zeigt den zeitlichen Verlauf der relativen Lichtströme von Modul und Leuchte.

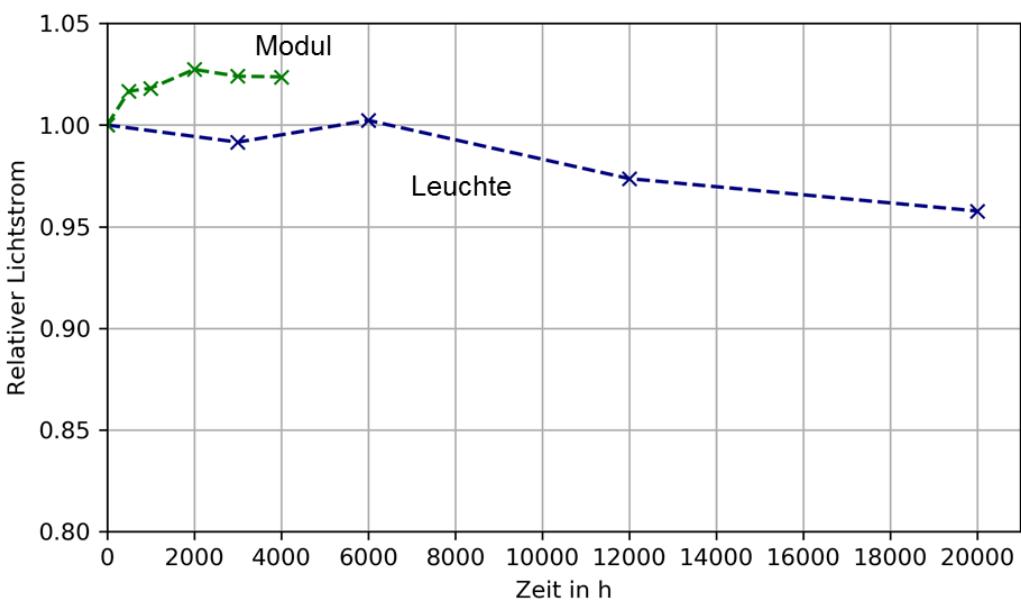


Abbildung 2.16: Zeitlicher Verlauf der relativen Lichtströme von Modul und Leuchte

Der Farbdrift von Modulen und Leuchten aufgrund sich verändernden Spektren soll im Folgenden untersucht werden. Dazu wird das zeitliche Verhalten im UCS-Farbraum für ein Modul und eine Leuchte dargestellt (Abbildung 2.17). Es handelt sich dabei um das gleiche Modul, was in der Leuchte eingesetzt wird.

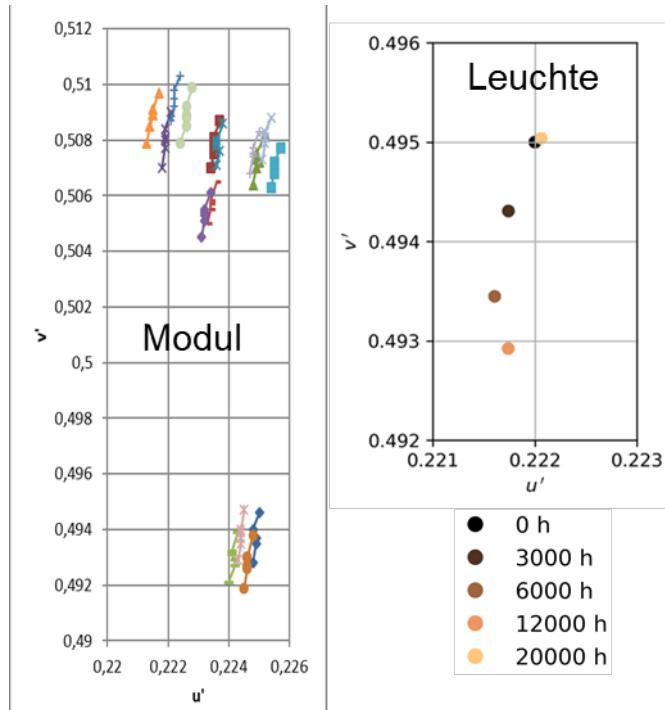


Abbildung 2.17: Direkter Vergleich der Farbdrifte von Modul und Leuchte im UCS-Farbraum

Das Modul wurde über 4.000 h betrieben, die einzelnen Messpunkte sind im Farbraum aufgetragen und zeichnen eine Linie nach unten, also in negativer v' -Richtung. Eine ähnliche Bewegung ist ebenfalls bei der Leuchte in den ersten 3.000 h zu erkennen. Dies stellt eine Farbverschiebung in Richtung blau dar, der möglicherweise durch eine Veränderung der Silikonverkapselung (Austrieb von Feuchtigkeit) zustande kommt. Bei der Leuchte stellt sich nach 12.000 h eine Verschiebung zurück ins Gelbe ein, was zu einem typischen Alterungsmechanismus von High Power LEDs zugeordnet werden kann.

Insgesamt ist jedoch zu beachten, dass die Spektren von Modul und Leuchte unterschiedlich aufgenommen worden sind. Die Leuchte wird aus einer Richtung (senkrecht zur leuchtenden Fläche) spektral gemessen, beim Modul werden die einzelnen LED-Packages mittels Ulbricht-Kugel integral spektral gemessen. Daher sind die Farbverschiebungen nur mit Einschränkung untereinander vergleichbar.

2.5. RGB-LEDs

2.5.1. Ziel

In den vergangenen Jahren hat sich die LED-Technologie im Bereich der Allgemeinbeleuchtung aufgrund ihrer Energieeffizienz und kompakten Bauweise zunehmend etabliert. Speziell phosphor-konvertierte weiße Halbleiterlichtquellen sind in der Allgemeinbeleuchtung von großer Bedeutung und wurden aufgrund dessen stetig optimiert und weiterentwickelt. Durch eine Variation der auf dem Chip aufgebrachten Leuchtstoffe lässt sich eine Vielzahl polychromatischer Spektren realisieren, die nahezu jede Farbtemperatur eines Planckschen Strahlers annehmen können. Eine Kombination von zwei Emittoren mit variablen Farbtemperaturen ermöglicht die Umsetzung dynamischer Beleuchtungskonzepte, die je nach Tageszeit an die Umgebungsbedingungen angepasst werden können. In verschiedenen Untersuchungen haben diesen zweikanaligen dynamischen Systemen positive Effekte auf exponierte Probanden nachgewiesen werden können, die sich beispielsweise in einer erhöhten Aufmerksamkeit und Wohlbefindlichkeit der Probanden äußerte. Infolgedessen haben Beleuchtungssysteme, bei denen der Mensch im Fokus des Beleuchtungssystems steht (HCL) zunehmend an Bedeutung gewonnen. Da zukünftige HCL-Beleuchtungssysteme die Möglichkeit bieten sollen beliebige Farbörter und Spektren realisieren zu können, ist eine Erhöhung der Anzahl der Farbkanäle erforderlich. Zweikanalige tunable-white Lösungen werden deshalb um quasimonochromatische Kanäle erweitert (z.B. rot 610-625 nm, grün um 520 nm, blau um 450 nm, tiefrot um 660 nm) und ermöglichen eine präzise spektrale Anpassung an Tageslichtspektren oder Beleuchtungssituationen. Alternativ kann, je nach Anwendungsgebiet, auch auf drei-kanalige Systeme zurückgegriffen werden, die ausschließlich auf einer Mischung der Primärvalenzen rot, grün und blau basieren. Um derartige Beleuchtungssysteme jedoch farbmetrisch präzise und zuverlässig auslegen zu können, ist es erforderlich das spektrale Verhalten der Halbleiteremitter für verschiedene Temperaturen und Ströme zu kennen. Darüber hinaus ist die Kenntnis über das Degradationsverhalten der Halbleiter essentiell, sofern ein langzeitig farbmetrisch stabiles Beleuchtungssystem angestrebt wird.

Aufgrund des Zusammenspiels unterschiedlicher Alterungseffekte, können sich diese durch eine Abnahme der optischen Leistung, eine temperaturbedingte Verschiebung des Spektrums oder einen Package- oder Halbleiter-induzierten Farbdrift auf die Farbstabilität der Systeme auswirken. Die Komplexität dieser Alterungsmechanismen macht eine experimentelle Bestimmung des Degradationsverhaltens nahezu unerlässlich.

2.5.2. Versuchsbedingungen

Im Rahmen der Untersuchungen wurden kommerziell verfügbare blaue, rote, grüne und tiefrote Highpower LEDs charakterisiert und gealtert. Die SMD-Packages mit Silikon-Verguss wurden auf einer Metallkern-Platine montiert und mit einem PT100 Temperatursensor in direkter Nähe des LED-Lötpunktes versehen. Mit Hilfe des Temperatursensors wird die Temperatur der LED sowohl während der Degradation als auch während des Messvorgangs auf einen definierten Sollwert geregelt. Eine Auflistung charakteristischer Eigenschaften der untersuchten Bauteile findet sich in Tabelle 2.2.

Die optischen Messungen werden mit einem CAS140CT Spektrometer in Kombination mit einer PTFE Ulbricht-Kugel durchgeführt. Das System ist absolut kalibriert und erlaubt Rückschluss auf das Elektrolumineszenz-Spektrum, sowie den absoluten Strahlungsfluss. Die erweiterte Messunsicherheit (95%) des Systems für absolute Messungen des Strahlungsflusses kann mit $\pm 2,7\%$ bezifert werden, während wiederholte Messungen nach Korrektur durch eine Referenz-LED eine erweiterte Messunsicherheit von $\pm 0,45\%$ aufweisen. Bei relative Alterungsdaten ist bedingt durch die Normierung auf den Initialwert eine relative erweiterte Messunsicherheit von $\pm 0,9\%$ anzunehmen.

Die elektrische Versorgung der LEDs erfolgt über ein Keithley 2450 mit Vierleiteranschluss und findet bei Messströmen $> 1\text{mA}$ gepulst zur optischen Messung statt um Effekte der Eigenerwärmung zu reduzieren. Die Temperatur der LEDs wird während der Messung mit einem Peltierelement in Kombination mit einem Thorlabs ITC 4020 Peltiercontroller geregelt.

Nach einer initialen optischen, elektrischen und thermischen Charakterisierung im Temperaturbereich von 25-70°C, werden jeweils fünf Bauteile bei einem Konstantstrom von 350/700 mA und zwei verschiedenen Lötpunkttemperaturen T_s gealtert (55 °C, 85 °C).

Tabelle 2.2: Untersuchte LEDs mit charakteristischen Eigenschaften

Elektrische und optische Eigenschaften der LEDs ($T_c=25^\circ\text{ C}$ und $I = 350 \text{ mA}$)				
Parameter	450 nm	530 nm	630 nm	660 nm
Vorwärts - spannung (V)	$3,1 \pm 0,065$	$3,41 \pm 0,0316$	$2,09 \pm 0,023$	$2,072 \pm 0,0115$
Optische Leistung (mW)	$547 \pm 5,8$	$194 \pm 5,5$	$332 \pm 12,3$	$364 \pm 3,1$
Externe Quanten Effizienz (%)	$50,4 \pm 1,16$	$16,2 \pm 0,43$	$45,27 \pm 1,48$	$50,17 \pm 0,55$
Material-System	InGaN/GaN	InGaN/GaN	AlGaN/P	AlGaN/P

2.5.3. Initiale Charakteristik und Degradation

Grüne High-power LEDs

Obwohl die Entwicklung InGaN-basierter Halbleiter mit Green-Gap-Problematik in den vergangenen Jahren vorangetrieben wurde, bestätigt Tabelle 2.2, dass die Problematik geringer optischer Effizienz im grünen Spektralbereich nach wie vor besteht. Ursächlich ist der geringe Überlapp der Wellenfunktionen innerhalb der Quantentröge grüner Halbleiteremitter, der sich mit steigendem Indiumgehalt verringert und in einer verringerten Wahrscheinlichkeit für strahlende Rekombinationsprozesse resultiert. Hinzukommend ist in Indium-reichen Quantentopfstrukturen eine starke Verzerrung der Bandstruktur zu verzeichnen, die speziell bei hohen Stromdichten Prozesse der nicht-strahlenden Rekombination (Auger-Rekombination) und das Entkommen der Ladungsträger aus der aktiven Zone des Halbleiters begünstigt, s. Abbildung 2.18.

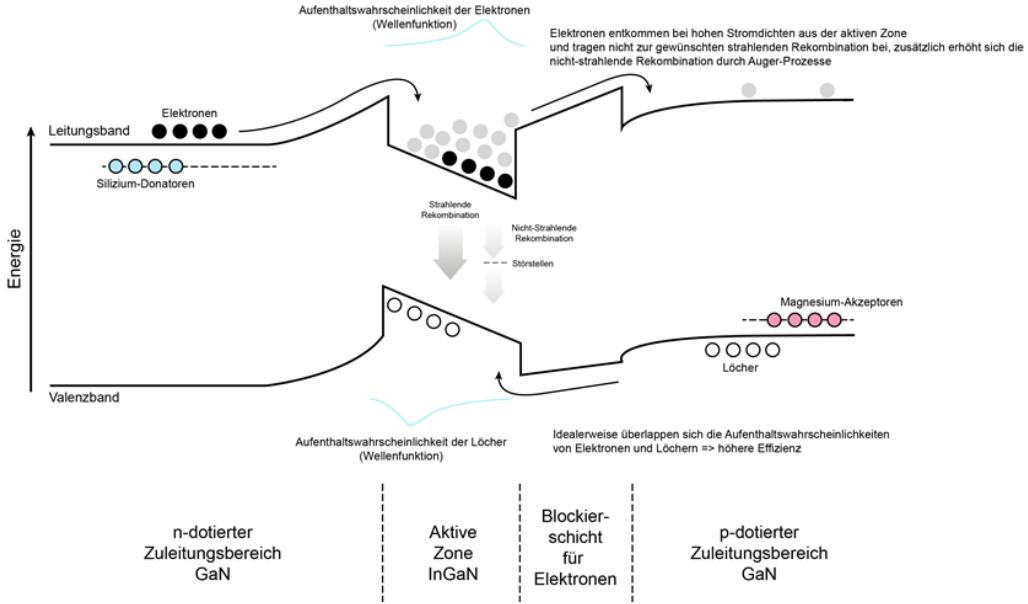


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung des Ladungsträgertransports einer vereinfachten Quantentrogstruktur eines GaN/InGaN-Halbleiters

Bedingt durch die zuvor beschriebenen Mechanismen ist eine starke Abnahme der externen Quanteneffizienz mit steigender Stromdichte zu beobachten. Abbildung 2.10 (links) zeigt die stromabhängige Effizienz eines untersuchten Bauteils. Während sich bei applizierten Vorwärtsströmen im Bereich von 3-10 mA ein Maximum der Effizienz ausmachen lässt, nimmt diese nach dessen Überschreiten um etwa 50% ab. Demzufolge ist die Effizienz von grünen High Power LEDs im relevanten Betriebsbereich (200-700 mA) deutlich geringer als die der Bauteile im Midpower-Bereich (10-70 mA). Speziell für Anwendungen, in denen mit Stromdimmung gearbeitet wird, ergibt sich durch die Effizienzabnahme eine starke Nichtlinearität die in Abbildung 2.10. rechts dargestellt ist und entsprechend berücksichtigt werden muss.

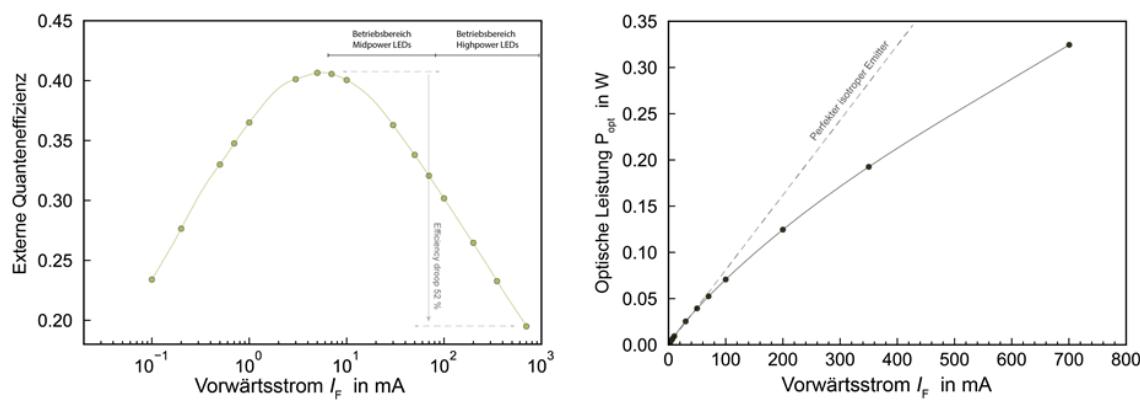


Abbildung 2.19: (links) Externe Quanteneffizienz grüner Highpower LEDs in Abhängigkeit des Vorwärtsstroms. (rechts) Nichtlinearität der optischen Leistung mit steigendem Vorwärtsstrom

Wird die im Anschluss an die initiale Charakterisierung durchgeführte Degradation der Halbleiter ausführlich betrachtet, so zeigt sich, dass die Abnahme der optischen Leistung eine starke Abhängigkeit vom Messstrom aufweist. Abbildung 2.11 zeigt die Abnahme der optischen Leistung bei einer Alterung mit einer Gehäusetemperatur von 55 °C und einem Vorwärtsstrom von $I_F = 700$ mA für unterschiedliche Messströme. Zusätzlich ist die Änderung der externen Quanteneffizienz über den Alterungszeitraum dargestellt. Die Abbildungen 2.11 links und rechts zeigen deutlich, dass während der Alterung kein Degradationsmechanismus auszumachen ist, der die Effizienz der LED einheitlich reduziert, wie es beispielsweise bei einer Änderung der Extraktionseffizienz zu beobachten wäre. Vielmehr unterliegt speziell die optische Leistung bei geringer Stromdichte einer starken Degradation, was auf die Entstehung nichtstrahlender Rekombinationszentren zurückzuführen ist. Steigt die Stromdichte im Halbleiter, so reduziert sich der Einfluss der Störstellen. Schematisch ist dieses Verhalten in Abbildung 2.12. dargestellt.

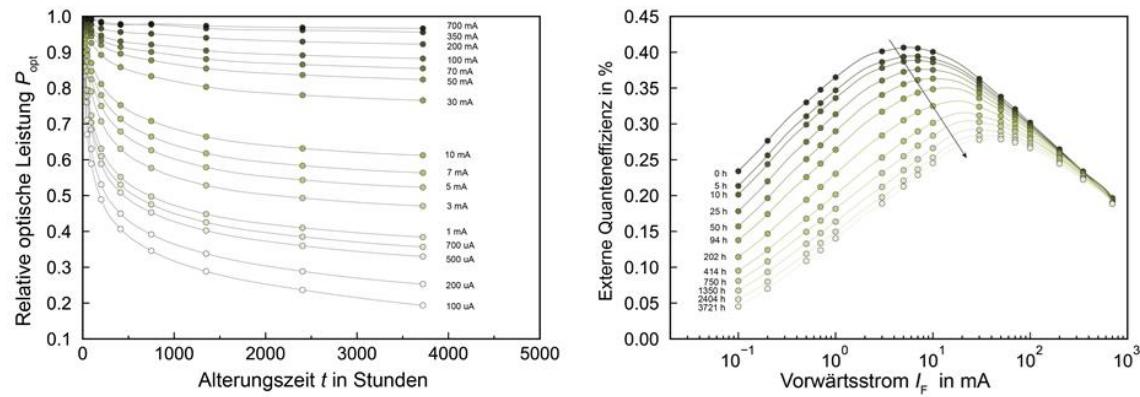


Abbildung 2.20: (links) Abnahme der optischen Leistung für Messströme im Bereich von 100 uA – 700 mA bei einer Alterung mit 700 mA und 55°C

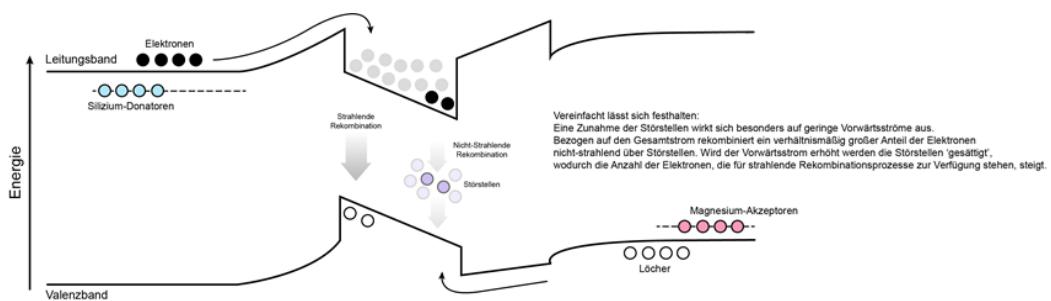


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung des Ladungsträgertransports einer vereinfachten Quantentrogstruktur eines GaN/InGaN-Halbleiters für geringe Vorwärtsströme

Bestätigen lässt sich dieser Mechanismus unter Berücksichtigung der in Abbildung 2.13. dargestellten Strom-Spannungs-Kennlinien, die in halblogarithmischer Darstellung eine Zunahme parasitärer Diodenströme indizieren. Letztere sind nach [1], [2] und [3] auf die Entstehung nichtstrahlender Rekombinationszentren (Störstellen) zurückzuführen und korrelieren im Bereich von etwa 1 nA nahezu linear mit der Abnahme der optischen Leistung.

Hinzukommend ist nach Abbildung 2.10 aufgrund des messstromabhängigen Degradationsverhaltens eine deutliche Änderung des Dimmverhaltens bei Stromdimmung zu erwarten. Wird die maximale Helligkeit des LED-Kanals jedoch initial bei einem Vorwärtsstrom von 700 mA gesetzt, so ergibt sich bei der Dimmung eine maximale prozentuale Abweichung von 4%, wodurch sich das Dimmverhalten unter den getroffenen Annahmen nur geringfügig verändert. Für mehrkanaligen Leuchten kann diese Differenz jedoch bereits in einer visuell wahrnehmbaren Farbverschiebung resultieren.

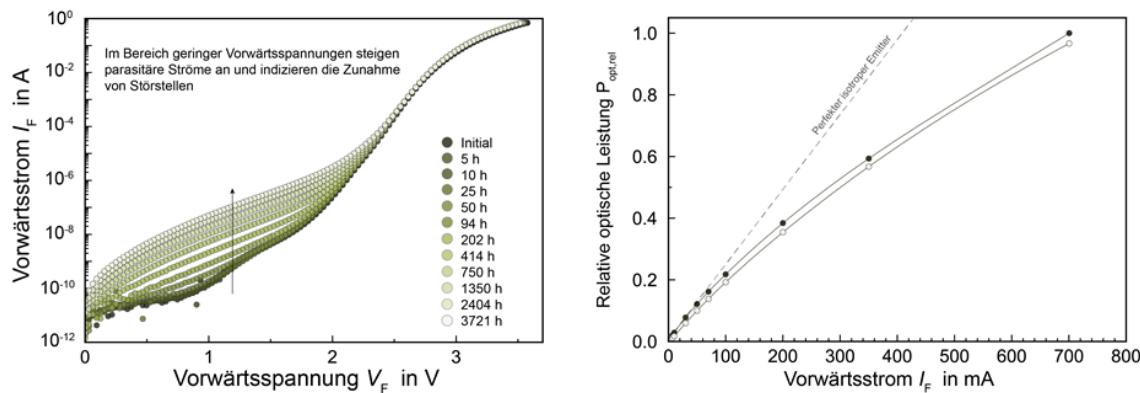


Abbildung 2.22: (links) Änderung der Strom-Spannungs-Kennlinie über den Alterungszeitraum
(rechts) Änderung der Nichtlinearität bei Stromdimmung

Neben den zuvor beschriebenen Analysen der Degradationsmechanismen wird abschließend der Einfluss von Betriebsstrom und Gehäusetemperatur auf die Progression der Mechanismen über den Alterungszeitraum diskutiert. Abbildung 2.14 zeigt die Abnahme der optischen Leistung für den Messstrom $I_{meas}=50$ mA (links) und $I_{meas}=700$ mA (rechts) bei den entsprechenden Alterungsbedingungen. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der fünf gealterten LEDs mit entsprechender Standardabweichung. Aufgrund der höheren Sensitivität geringerer Messströme in Bezug auf Degradationsprozesse, eignet sich die Darstellung der Degradationskurven bei 50 mA um den Einfluss der gewählten Versuchsbedingungen beurteilen zu können.

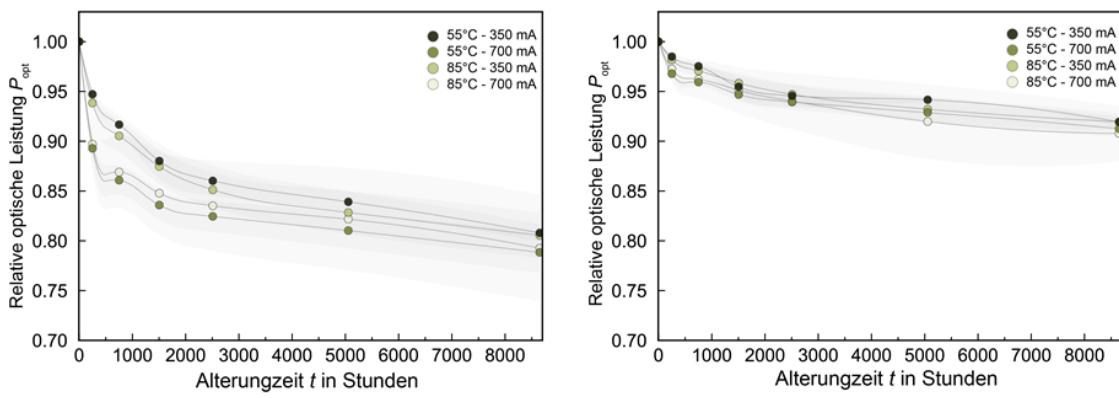


Abbildung 2.23: (links) Änderung der relativen optischen Leistung grüner LEDs bei einem Messstrom von 350 mA (rechts) Änderung der relativen optischen Leistung grüner LEDs bei einem Messstrom von 700 mA

Anhand der Degradationskurven lässt sich innerhalb der ersten 3500 Stunden eine Beschleunigung der Degradationsprozesse durch Erhöhung des Vorwärtsstroms ausmachen. Die Messdaten der Alterungsbedingungen mit einem Vorwärtsstrom von 700 mA liegen in diesem Zeitraum deutlich unter den Bedingungen mit 350 mA. Mit zunehmender Degradationszeit lässt sich aufgrund der Streuung der Messdaten kein signifikanter Unterschied zwischen den Alterungsbedingungen ausmachen. In vergleichbaren Untersuchungen InGaN-basierter Halbleiter konnte am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt eine Beschleunigung der Degradationsmechanismen mit steigendem Strom nach dem Potenzgesetz nachgewiesen werden. Aufgrund der geringen Versuchsbedingungen lässt sich dieser Zusammenhang anhand der gegebenen Messdaten nicht nachweisen. Eine temperaturbedingte Beschleunigung der Alterungsprozesse lässt sich ebenfalls nicht nachweisen.

Blaue High-power LEDs

Im Vergleich zu InGaN-basierten grünen Highpower LEDs weisen blaue Emitter desselben Materialsystems eine deutlich höhere Effizienz auf, was sich auf den geringeren Indium-Anteil der Quantentöpfe zurückführen lässt. Aufgrund der geringeren Verzerrung der Bandstruktur ergibt sich einer größerer örtlicher Überlapp der Wellenfunktionen wodurch eine deutlich höhere Quanteneffizienz erzielt wird. Nach Abbildung 2.15 verringert sich die stromabhängige Effizienzabnahme auf 25% wodurch sich das Dimmverhalten dem eines perfekten isotropen Emitters annähert.

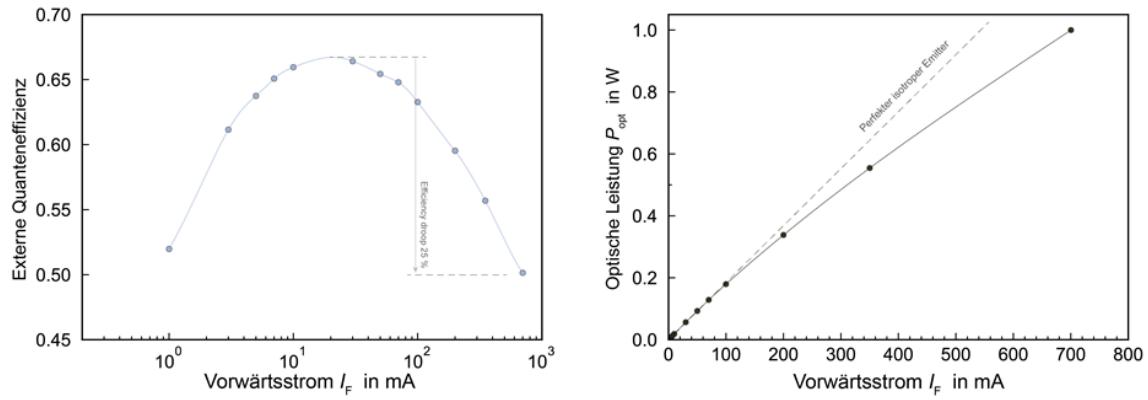


Abbildung 2.24: (links) Externe Quanteneffizienz blauer Highpower LEDs in Abhängigkeit des Vorwärtsstroms, (rechts) Nichtlinearität der optischen Leistung mit steigendem Vorwärtsstrom

Das in Abbildung 2.16 dargestellte Degradationsverhalten ist für beide dargestellten Messströme nur geringfügig ausgeprägt. Bei einem Messstrom von 700 mA bewegen sich die Messdaten teils innerhalb der erweiterten Messunsicherheit von $\pm 1\%$. Der degradationssensitivere Messstrom von 50 mA weist für die gegebenen Alterungsbedingungen ebenfalls nur eine geringe Abnahme der optischen Leistung auf. Aufgrund der Streuung der Messdaten und der geringen Differenzen zwischen den Alterungsbedingungen lässt sich kein funktionaler Zusammenhang von Alterungsbedingung und Degradationsverhalten ausmachen. Lediglich die Messdaten der Degradation bei 350 mA und 55 °C unterscheiden sich signifikant von den Bedingungen mit höherer Sperrsichttemperatur.

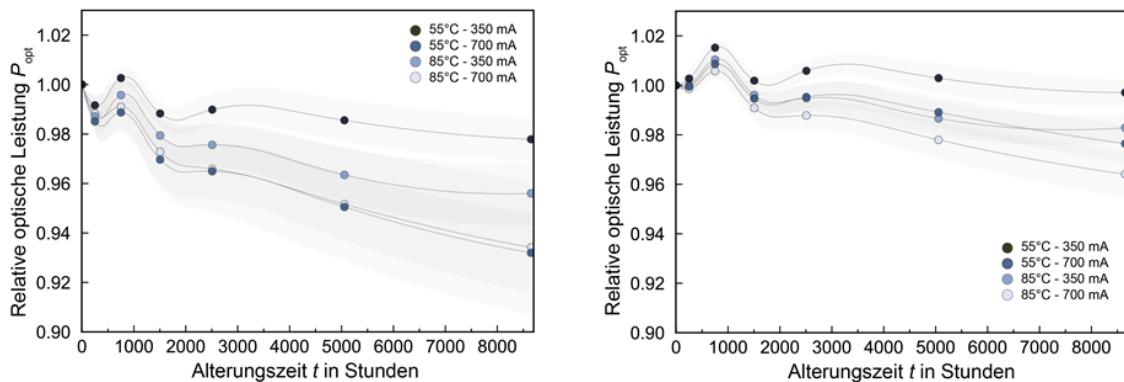


Abbildung 2.25: (links) Änderung der relativen optischen Leistung blauer LEDs bei einem Messstrom von 50 mA, (rechts) Änderung der relativen optischen Leistung blauer LEDs bei einem Messstrom von 700 mA

Rote (630 nm) und Tiefrote (660 nm) High-power LEDs

Abschließend wird auf das Degradationsverhalten AlInGaP-basierter roter und tiefroter Halbleiteremitter eingegangen. Beide LED-Typen weisen bei den dargestellten Messströmen nur ein schwach ausgeprägtes Degradationsverhalten auf, was sich mit einer maximalen Abnahme des

Strahlungsflusses von 9 % beziffern lässt. Die geringeren Messströme weisen ebenfalls eine höhere Sensitivität für Degradationsprozesse auf und indizieren, dass die Alterung bei 350 mA und 55 °C signifikant geringer ausgeprägt ist. Demnach ist sowohl durch eine erhöhte Sperrsicht-Temperatur, als auch durch eine Steigerung der Vorwärtsstroms eine Beschleunigung der Degradationsprozesse zu induzieren. Ein funktionaler Zusammenhang, der die Strom- oder Temperaturabhängigkeit beschreibt, lässt sich aus den gegebenen Daten nicht ableiten oder separieren.

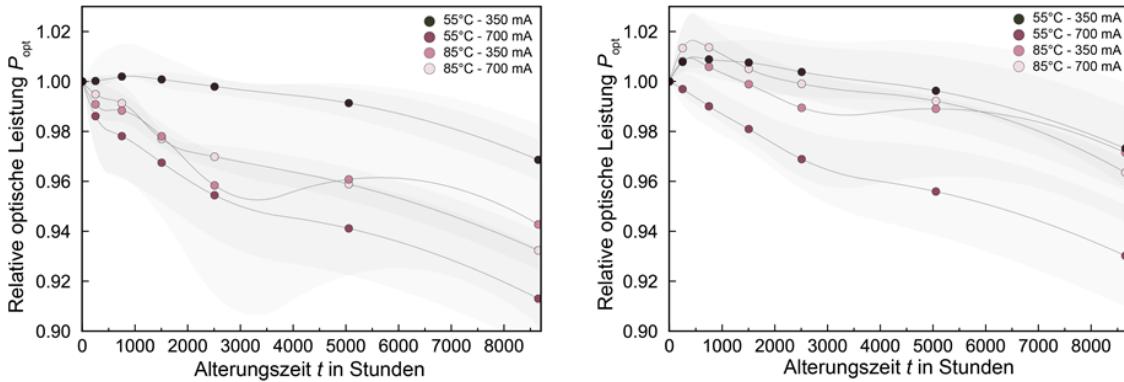


Abbildung 2.26: (links) Änderung der relativen optischen Leistung roter LEDs bei einem Messstrom von 50 mA, (rechts) Änderung der relativen optischen Leistung roter LEDs bei einem Messstrom von 700 mA

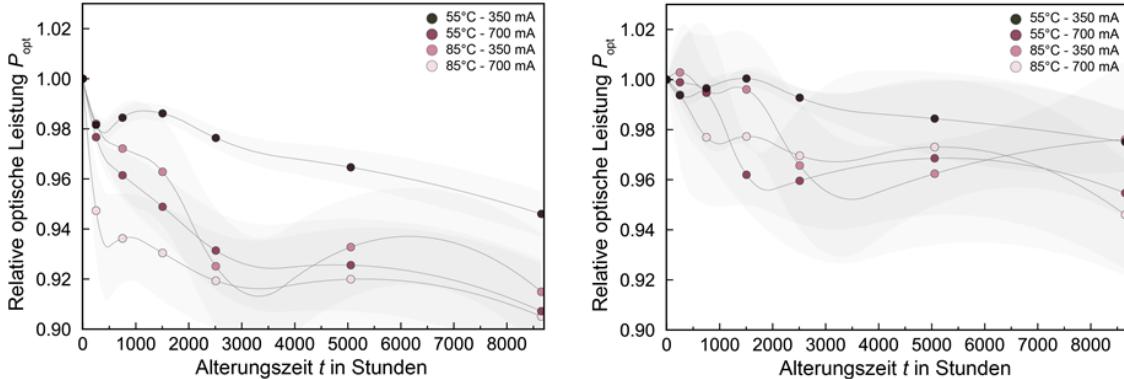


Abbildung 2.27: (links) Änderung der relativen optischen Leistung tiefroter LEDs bei einem Messstrom von 50 mA, (rechts) Änderung der relativen optischen Leistung tiefroter LEDs bei einem Messstrom von 700 mA

2.5.4. Fazit

Die untersuchten quasi-monochromatischen Halbleiter weisen in Abhängigkeit des Materialsystems und der Alterungsbedingungen ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Degradationsverhalten auf, was sich auf die Entstehung nichtstrahlender Rekombinationszentren zurückführen lässt. Mit Änderung des verwendeten Messstroms variiert die Abnahme der optischen Leistung, weshalb sich speziell Messströme unterhalb der Betriebsbedingung als sensitiv für Degradationsprozesse des

Halbleiter erweisen. Basierend auf den Daten geringerer Messströme lässt sich die Progression der Degradationsprozesse besser beurteilen, da sich die Daten meist deutlich außerhalb der erweiterten Messunsicherheit des Systems bewegen. Der Einfluss von Strom und Temperatur auf die Degradationsmechanismen lässt sich auf diese Weise ebenfalls evaluieren und konnte in vergleichbaren Untersuchungen genutzt werden um eine beschleunigte Degradation nach dem Arrhenius- oder Potenzgesetz zu bestätigen. Zusätzlich kann ein Fortschreiten der Degradation unter Einbeziehung der Strom-Spannung-Kennlinien beurteilt werden.

Literatur des Abschnitts 2.5

- [1] Monti, D., Meneghini, M., De Santi, C., Meneghesso, G., & Zanoni, E. (2016). Degradation of UV-A LEDs: physical origin and dependence on stress conditions. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 16(2), 213-219.
- [2] Yan, D., Lu, H., Chen, D., Zhang, R., & Zheng, Y. (2010). Forward tunneling current in GaN-based blue light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 96(8), 083504.
- [3] Jung, E., Lee, J. K., Kim, M. S., & Kim, H. (2015). Leakage current analysis of GaN-based light-emitting diodes using a parasitic diode model. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(10), 3322-3325.

2.6. Midpower LEDs

Während der Projektlaufzeit wurden drei Typen von Mid-Power LEDs gealtert. Die drei Typen sind von drei unterschiedlichen Herstellern und haben eine Farbtemperatur von CCT= 4000 K. Tabelle 2.3 zeigt die maximale Vorwärtsspannung, -strom, den typischen thermischen Widerstand der LED-Typen. Weiterhin sind die zwei Alterungsströme und die zwei Alterungstemperaturen pro LED dargestellt. Somit ergeben sich vier Alterungsbedingungen.

Tabelle 2.3: Drei Typen von Mid-Power LEDs mit den maximalen Datenblattwerten der Vorwärtsspannung, Vorwärtstrom und des typischen thermischen Widerstandes. Angabe der Alterungsbedingungen von Strom und Temperatur

Typ	$V_{F,max}$ in V	$I_{F,max}$ in mA	R_{TH} in K/W	I_{test} in mA	T_{test} in °C
M1	3,4	120	35	80, 120	55, 85
M2	2,95	200	7,5	120, 180	55, 85
M3	3,2	180	13	120,180	55, 85

Für jede Bedingung wurden jeweils sieben LEDs genutzt. Davon wurden fünf LEDs gealtert und zwei LEDs dienten als Referenz und wurden nicht gealtert. Die Alterung der Mid-Power-LEDs wird in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert und teilt sich in die optische und die thermische Alterung.

2.6.1. Optische Alterung

Im Folgenden wird die Änderung der optischen Parameter der untersuchten MidPower-LEDs über der Zeit betrachtet. Hierzu wird zuerst der Lichtstromrückgang, die Farbverschiebung und das Spektrum untersucht. Für alle Messungen wurden die LEDs mit einem Peltierelement auf 25 °C stabilisiert.

Lichtstromrückgang

Abbildung 2.28 zeigt den relativen Lichtstromrückgang über den Alterungszeitraum von $T = 4000$ h der drei LED-Typen. Der stärkste Lichtstromrückgang ist bei den härtesten Bedingungen der LEDs zu verzeichnen (höchster Strom/höchste Temperatur). Der maximale Lichtstromrückgang der LED-Typen beträgt: M1: ca. 0,5 %, M2: ca. 1 %, M3: ca. 4 %. Hierbei ist zu erwähnen, dass Ausheilprozesse innerhalb der LEDs M1 und M2 bis ca. 1000 h stattgefunden haben. Die Ausheilung bewirkte einen Lichtstromzuwachs von ca. 1,5 % (M1) bzw. ca. 1,2 % (M2) bei der härtesten Bedingung. Innerhalb der LED M3 hat initial kein Ausheilprozess stattgefunden, wodurch eine stärkere Alterung ab Stunde 0 eingetreten ist. Die Alterung von M3 mit 4 % nach 4000 h ist als kritisch anzusehen.

Die Streuung der Mittelwerte über die vier Bedingungen, der drei LED Typen ist mit kleiner 1 % gering. Für tiefergehende Aussagen muss die LED weiter gealtert und der Trend der Verläufe analysiert werden. Bei der 4000 h Messung ist zu sehen, dass der Strom eine stärkere Alterung als die Temperatur hervorruft (LED: M1, M3). Diese Hypothese sollte durch eine längere Alterung weiterhin evaluiert werden.

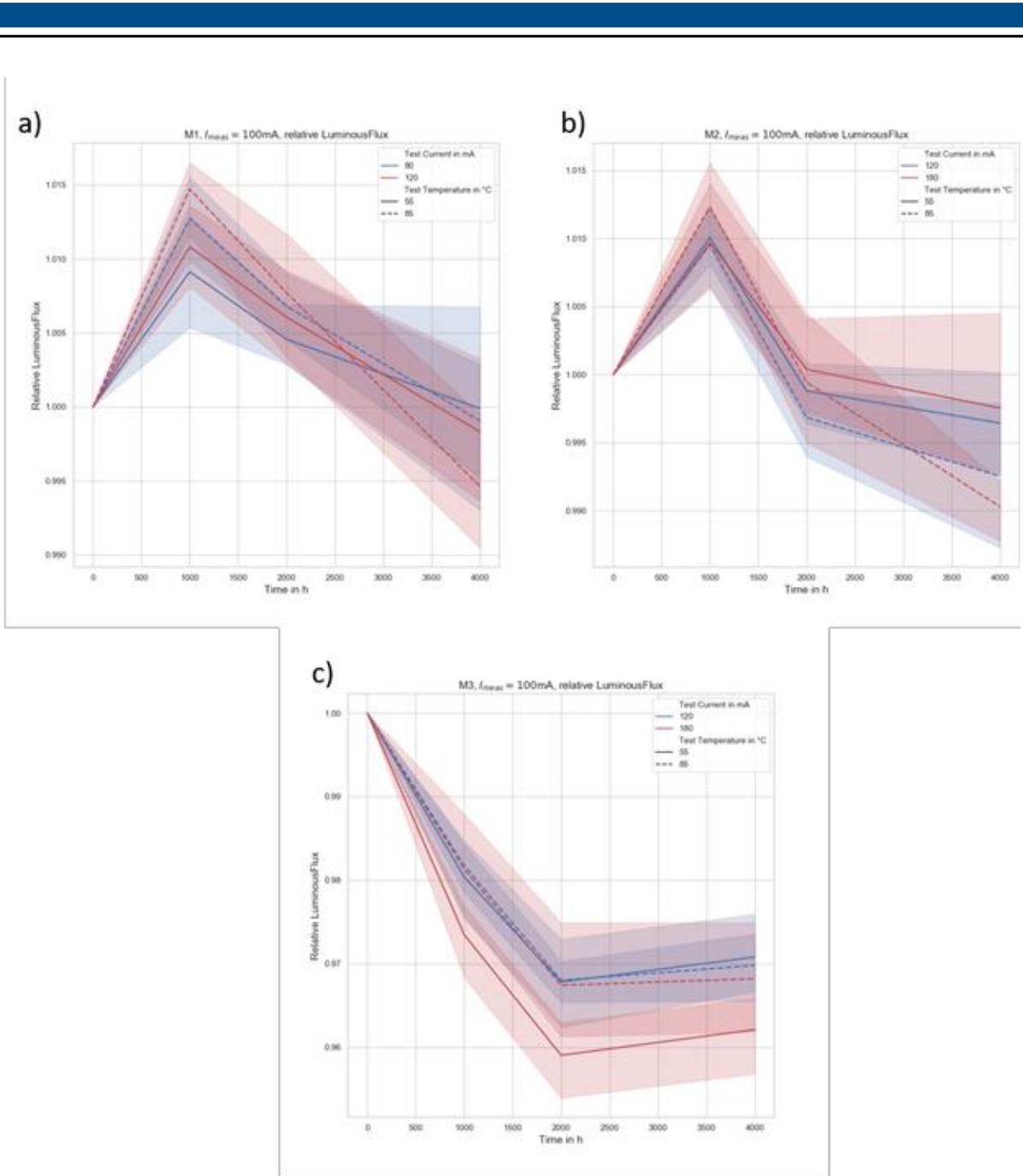


Abbildung 2.28: Lichtstromrückgang der drei LED-Typen für die vier Testbedingungen der jeweiligen LED-Typen in einem Zeitraum von 4000 Stunden.

Farbverschiebung

Im Bereich der Farbverschiebung lassen sich nach 4000 h Degradation von maximal ca. 2 Step MacAdam zwischen Initial- und 4000 h-Messung feststellen (LED-Typ M1 ca. 2 Step MacAdam, M2 ca. 1 Step MacAdam, M3 ca. 0,6 Step MacAdam). Bei der Betrachtung der Auswirkungen unterschiedlicher Alterungsbedingungen des LED-Typs M1 in Abbildung 2.20 fällt ein qualitativer Unterschied in der Ausprägung des Verlaufes der Farbverschiebung auf. Mit steigender Temperatur stellt sich eine charakteristische „C“-Form ein. Ursache dieser Farbverschiebung ist eine Degrade-

dation des Phosphorsystems. Das Phosphorsystem der LED M1 besteht aus zwei Phosphorkomponenten: Grün und Rot. Somit lässt sich die anfängliche Verschiebung in den grünen Farbbereich ($t=1000$ h) auf die Degradation des roten Phosphors zurückführen. Die folgende Gelbverschiebung lässt sich einerseits auf Degradation des grünen Phosphors zurückführen. Weiterhin sind Vergilbungseffekte im Silikon sowie Delaminierungseffekte an der Grenzschicht zwischen LED-Chip und Phosphor anzunehmen.

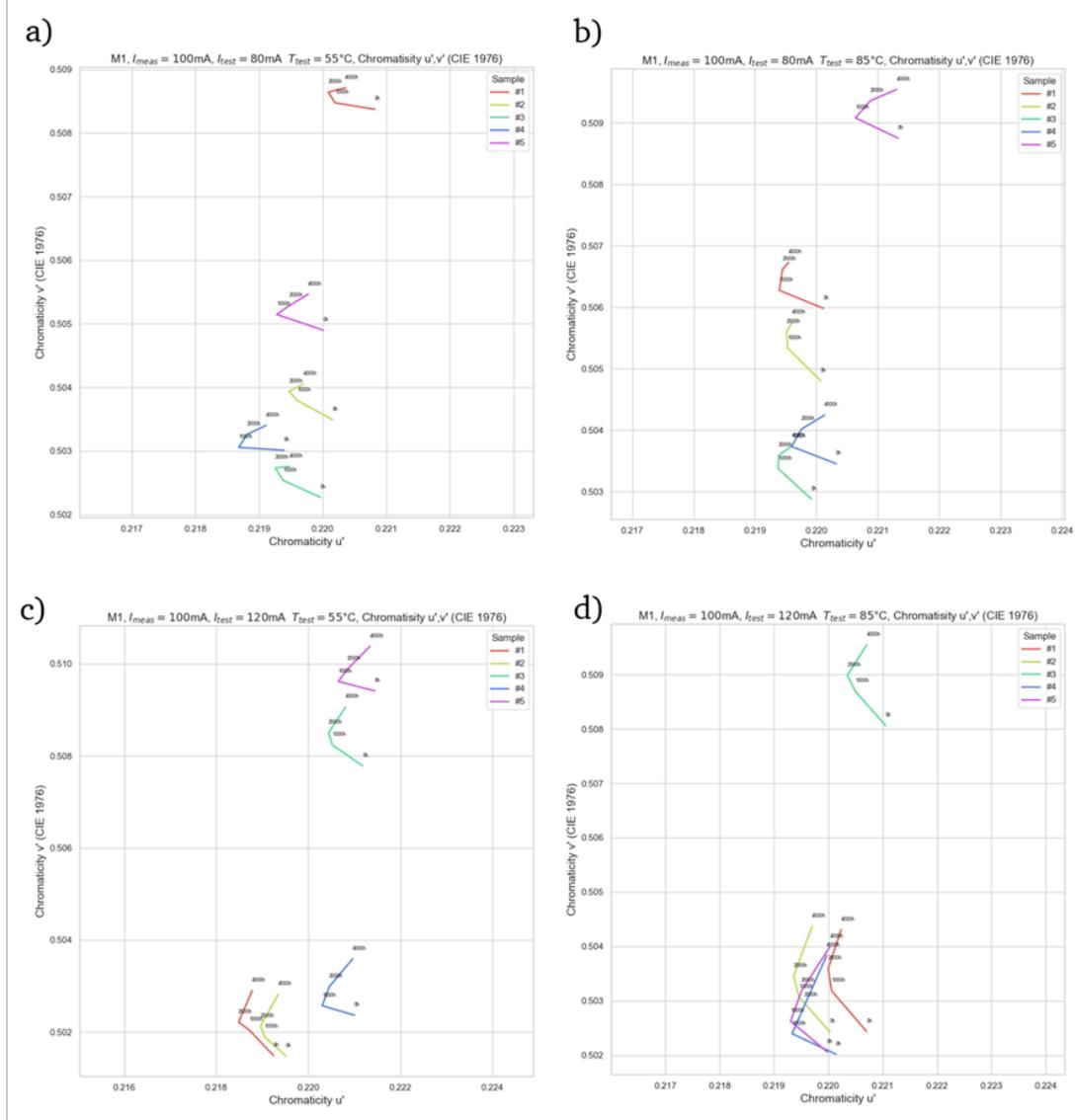


Abbildung 2.29: Farbverschiebung der LED CS 1 bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen: (a) $80\text{mA}/55^\circ\text{C}$, (b) $80\text{mA}/85^\circ\text{C}$, (c) $120\text{mA}/55^\circ\text{C}$, (d) $120\text{mA}/85^\circ\text{C}$.

Abbildung 2.29 zeigt die Farbverschiebung der drei LED-Typen in der jeweils höchsten Temperatur und Strom-Bedingung. Hier ist die charakteristische „C“-Form bei den Typen M1 und M3 zu sehen.

Jede der fünf LEDs des LED-Typs M2 verhält sich individuell. Eine Tendenz in Richtung blau könnte vermutet werden. Dies könnte die Alterung beider Leuchtstoffe (rot, grün) gleichermaßen als Auslöser haben. Durch weitere Alterung muss diese Annahme jedoch bestätigt werden. Die Alterungsbedingungen des Typs M2 verhalten sich mit der charakteristischen „C“-Form.

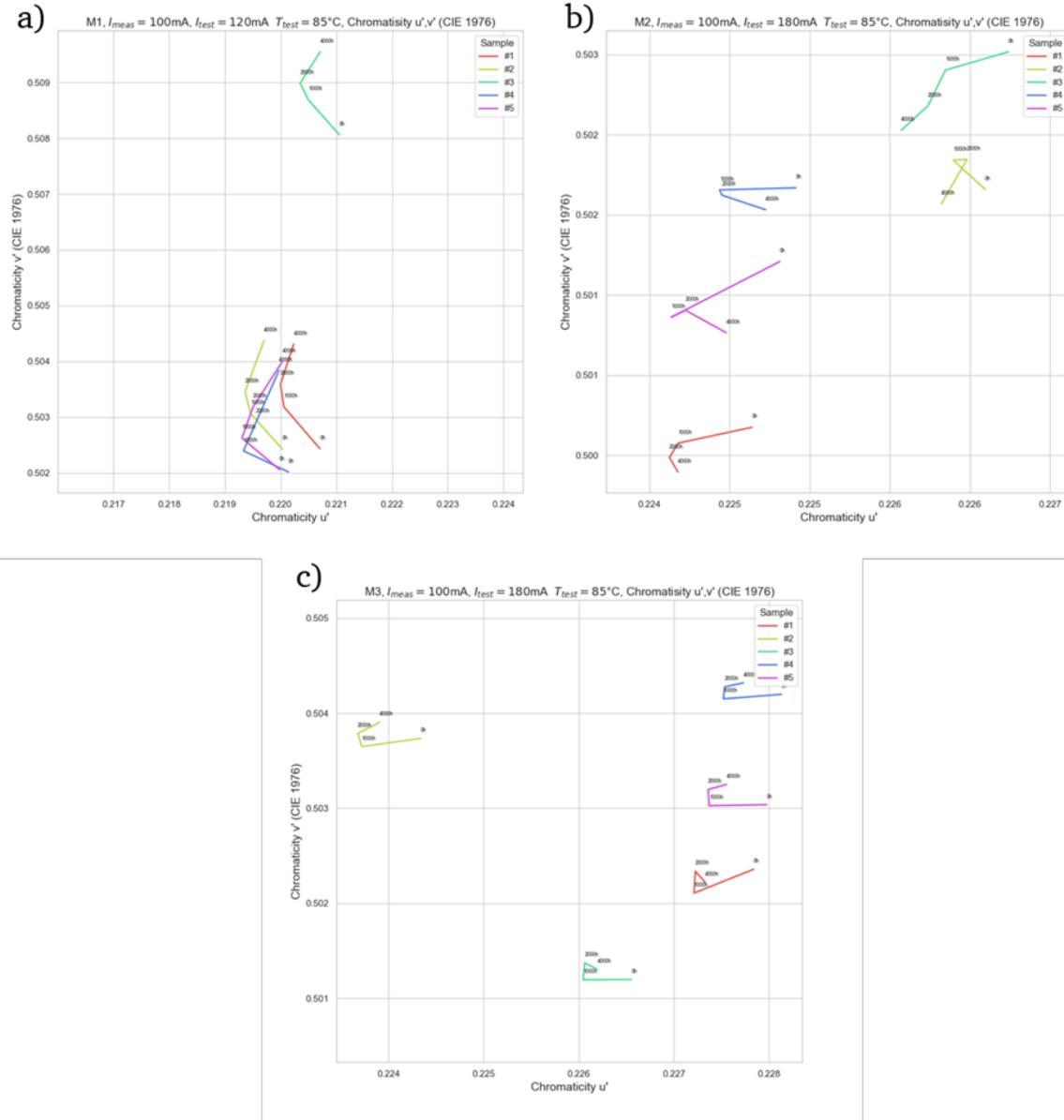


Abbildung 2.30: Farbverschiebung der LED-Typen M1, M2 und M3 dem jeweils höchsten Strom und Temperatur

Spektrum

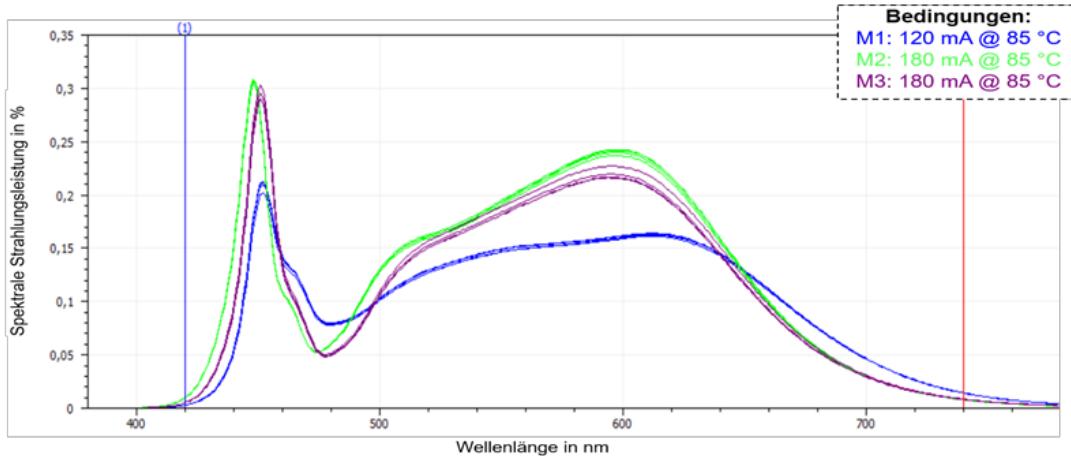


Abbildung 2.31: Spektrum einer LED der drei LED-Typen M1, M2 und M3 mit dem jeweils höchsten Strom und Temperatur

Abbildung 2.31 zeigt die Spektren der drei LED-Typen. Hierbei sind für die drei Typen jeweils die Spektren für 0 h, 1000 h, 2000 h und 4000 h Alterung angegeben. Stellvertretend für die Alterung wurden für die LED-Typen jeweils eine LED ausgewählt, die unter der härtesten Alterungsbedingung gealtert wurde. Das Spektrum kann zur Untersuchung der Alterung in zwei Bereiche aufgeteilt werden: Der Bereich des blauen Halbleiterchips und der Bereich des Leuchtstoffs. Tabelle 2.4 zeigt die prozentuale Änderung der beiden Bereiche.

Tabelle 2.4: Prozentuale Alterung des Halbleiterchips und des Leuchtstoffs einer LED innerhalb von 0 h zu 4000 h der drei LED Typen: M1, M2 und M3

LED-Typ	Alterung im LED-Chip in %	Alterung im Leuchtstoff in %
M1	-4,67	-1,04
M2	-0,52	-1,82
M3	-4,1	-4,85

Die Farbtemperatur und der CRI ändern sich über die 4000 h Alterung unter $\pm 1\%$ und wurde daher nicht weiter betrachtet.

2.6.2.Thermische Alterung

Die Abbildung 2.32 zeigt den typischen Aufbau einer Mid-Power LED. Hierbei ist für die weitere thermische Betrachtung, der Fokus auf den LED-Chip sowie der Kontakt zu den Anschlussklemmen gelegt. Der LED-Chip ist mittels eines Klebers mit dem Gehäuse, dass gleichzeitig als Reflektor dient, darstellt. Das Gehäuse ist bei Mid-Power LEDs oft aus Plastik. Die Anschlusskontakte sind mittels Bond-Drähte am LED-Chip elektrisch verbunden. Die LED kann mit den Anschlussklemmen auf eine Platine gelötet werden. Häufig werden ebenfalls die Anschlussklemmen zur thermischen

Übertragung der Wärme vom LED-Chip zu einer externen Fläche, wie beispielsweise einer Platine, genutzt. Das System hinter den Anschlussklemmen der LED muss thermisch so dimensioniert sein, dass die Wärmeleistung der LED soweit abgeführt werden kann, dass diese unter der im Datenblatt geforderten, LED spezifischen, maximalen Temperatur bleibt.

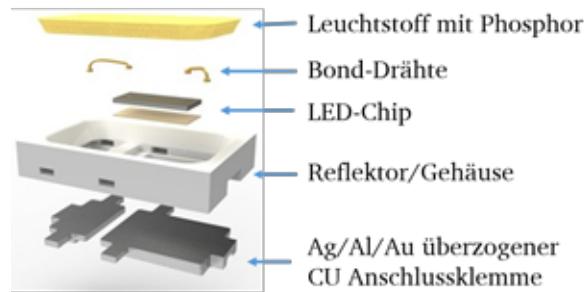


Abbildung 2.32: Grober Aufbau einer typischen Mid-Power LED [1]

Während der Alterung wurden die LEDs jede 2000 h mit einem T3Ster-System (Thermal Transient Tester for Thermal Characterization of LEDs) vermessen. Mithilfe dieses Systems und der mathematischen Rekonstruktion durch ein Cauer-Netzwerk, können thermische Pfade innerhalb der LED näher untersucht werden. Die Mid-Power LEDs wurden hierbei für 60 s aufgeheizt und für 60 s während des Abkühlvorgangs vermessen.

Abbildung 2.33 zeigt einen beispielhaften Verlauf der thermischen Kapazität über den thermischen Widerstand des LED-Typs M2. In der Abbildung 2.33 sind verschiedene die verschiedenen Schichten der Mid-Power LED ausgewiesen. Die Einteilung der Schichten erfolgte hierbei auf Erfahrungswerten und den Unterschieden der gealterten LEDs. Die Einteilung in die verschiedenen Schichten verdeutlichen den Einfluss der Schichten auf die am Ende im Datenblatt gegebenen thermischen Widerstände. Im beispielhaften Verlauf in Abbildung 2.33 wird verdeutlicht, dass der Einfluss der Anbringung des Halbleiter-LED-Chip im Gehäuse, sowie das Gehäuse einen starken Einfluss auf den thermischen Widerstand hat. Ebenfalls hat das Dielektrikum und die Alu-Platine einen großen thermischen Einfluss.

Im weiteren Verlauf wird detailliert auf das thermische Verhalten der drei LED-Typen und dessen Alterung eingegangen.

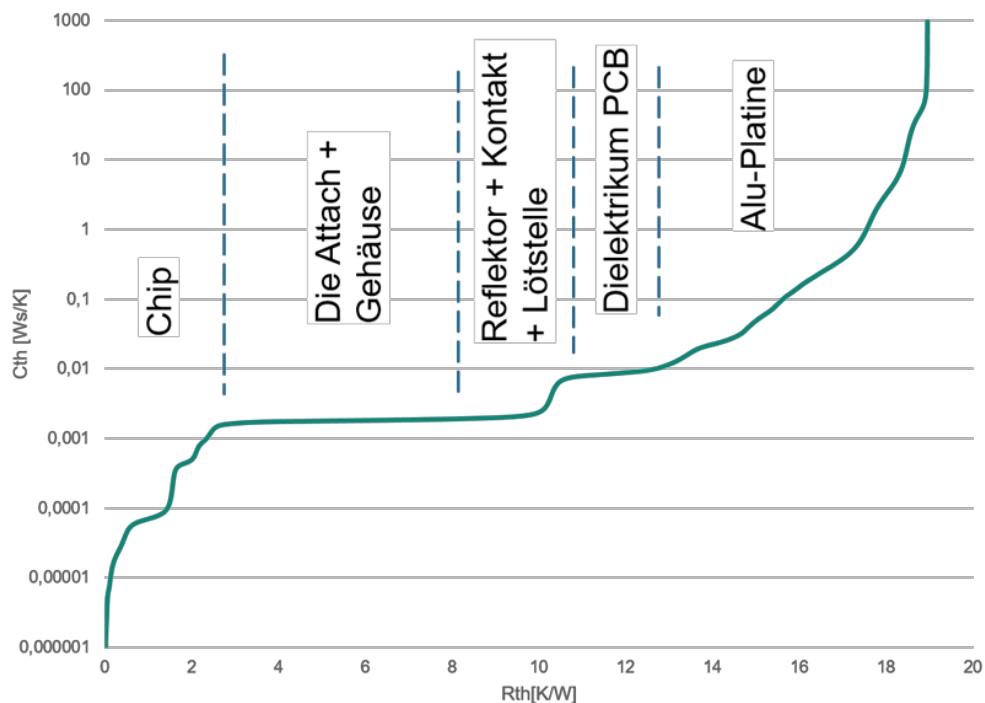


Abbildung 2.33: Beispielhaftes thermisches Verhalten einer Mid-Power-LED mit Erklärung der einzelnen Bereiche des thermischen Widerstandes

LED-Typ: M1

Das thermische Verhalten des LED-Types M1 weist starke Schwankungen auf. Abbildung 2.34 stellt das thermische Verhalten vor der Alterung bei 0 h dar. Hierbei kann eine Region mit starken Schwankungen identifiziert werden, oberhalb von ca. 35 K/W, dies entspricht den Schichten des Die Attachs, dem Kleber, der den Halbleiterchip mit dem Gehäuse verbindet, dem Gehäuse und der Lötstelle. Hierbei ergibt sich ein maximaler Unterschied im thermischen Widerstand von $\Delta R_{th,max} = 56,75 \text{ K/W}$, bei einem maximalen, gemittelten thermischen Widerstand mit Alu-Platine von $R_{th,mittel,max} = 80,18 \text{ K/W}$. Die Schwankungen im LED-Chip, welche bis ca. 18 K/W auftreten sind im Vergleich gering.

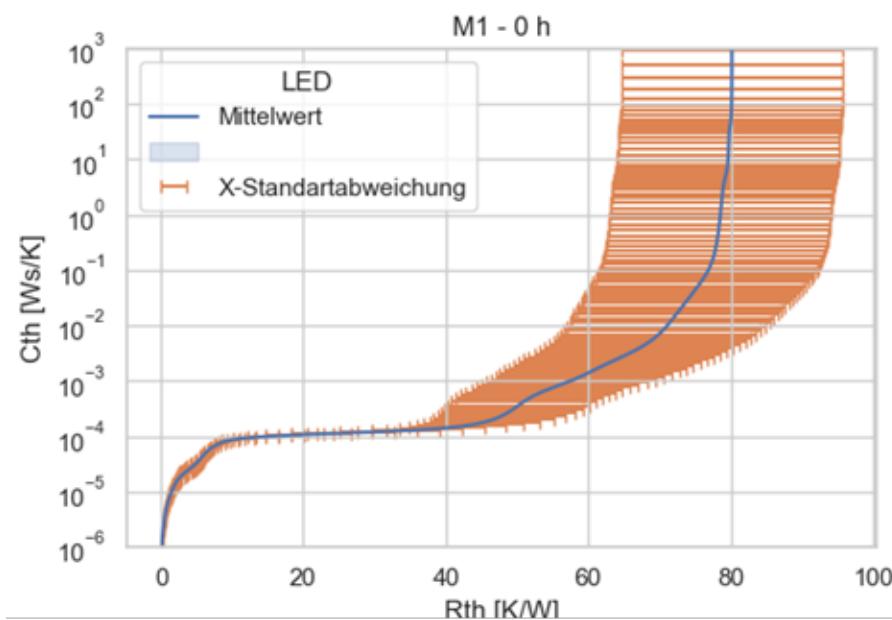


Abbildung 2.34: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 0 h

Diese Schwankungen verändern sich über die Alterung von 4000 h nicht. Abbildung 2.35 zeigt den Mittelwert und die Standardabweichung der 4000 h gealterten LED M1.

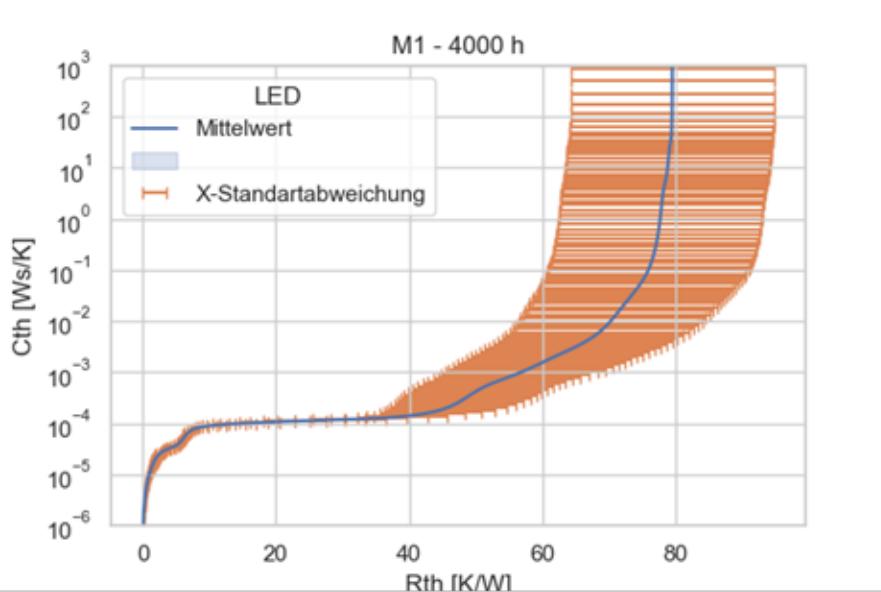


Abbildung 2.35: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 4000 h

Hierbei beträgt der maximale Unterschied im thermischen Widerstand $\Delta R_{th,max} = 53,95 \text{ K/W}$, bei einem maximalen, gemittelten thermischen Widerstand mit Alu-Platine von $R_{th,mit,el,max} = 79,48 \text{ K/W}$. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Schwankungen schon im Herstellungsprozess der LEDs verursacht wurden.

Bei der Messung wurde die aufgelötete LED auf eine Alu-Platine betrachtet. Für die weitere Untersuchung wurde die Ursache der Streuung näher untersucht. In Abbildung 2.36 ist die Streuung des Übergangs von LED zur Lötstelle und somit zur Platine eingezeichnet. Mit einer Schwankung von $\Delta R_{th} \sim 38 \text{ K/W}$ zu einer Gesamtsystemschwankung von $\Delta R_{th,max} \sim 53,95 \text{ K/W}$, stellt die LED internen Streuungen den größeren Teil im Bezug zur Fertigungstoleranz dar.

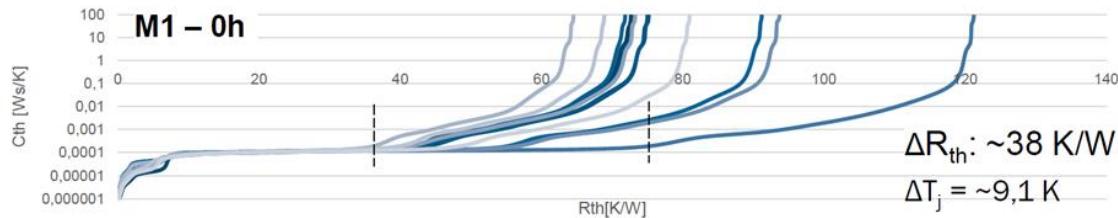


Abbildung 2.36: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 4000 h

Die Betrachtung der einzelnen LEDs in der Messung wird in Abbildung 2.37 gezeigt. Die Streuung der einzelnen LEDs ist hierbei deutlich zu erkennen. Weiterhin gibt es eine LED die mit ca. 120 K/W einen erhöhten thermischen Widerstand aufweist. Dies ist auf die Schicht von Die Attach und Gehäuse, die einen deutlich höheren thermischen Widerstand aufweist, zurückzuführen. Dies lässt die Vermutung zu, dass beim Fertigungsprozess der Halbleiterchip thermisch schlechter mit dem Gehäuse und den LED-Kontakten verbunden ist.

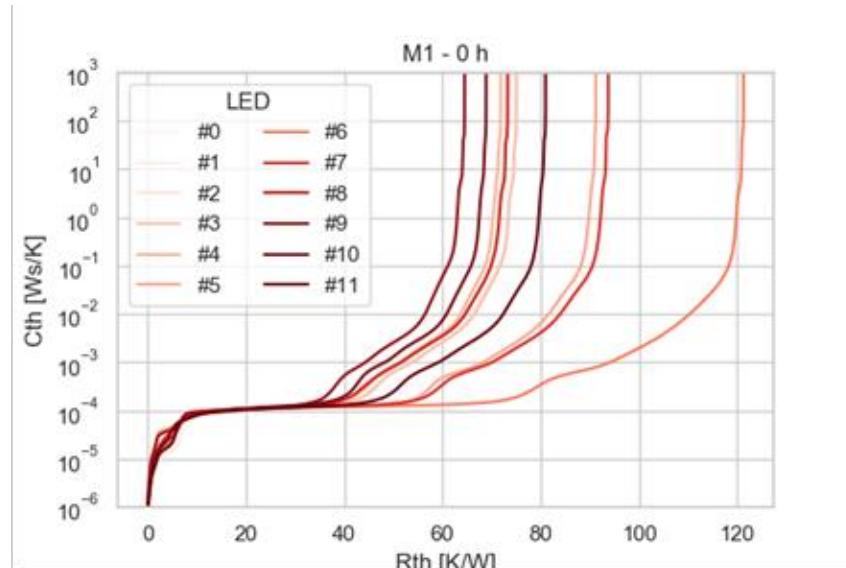


Abbildung 2.37: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 0 h

Eine Konsequenz der Streuung der thermischen Widerstände ist in Abbildung 2.38 dargestellt. Hierbei ist die Temperatur über der Zeit dargestellt und verdeutlicht, durch die Streuung der thermischen Widerstände ergibt sich ein Temperaturunterschied von $\Delta T_j = 12 \text{ K}$. Die Temperatur von

der LED mit dem geringsten thermischen Widerstand zur LED mit dem höchsten thermischen Widerstand unterscheidet sich somit um 12 K. Dieses Verhalten verändert sich nicht während der Alterung von 4000 h.

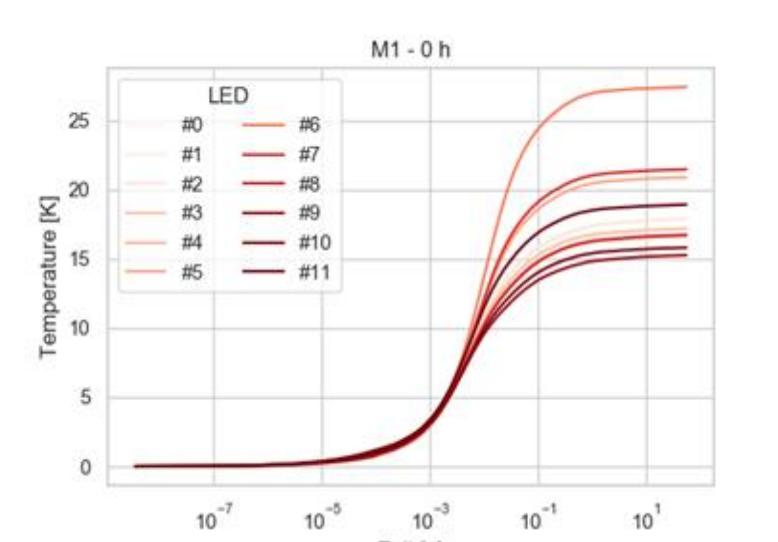


Abbildung 2.38: Thermisches Verhalten der LED: M1 bei 0 h

LED-Typen: M2 und M3

Das thermische Verhalten des LED-Typs M2 ist in Abbildung 2.39 dargestellt. Hierbei ergibt sich ein maximaler Unterschied im thermischen Widerstand bei 0 h von $\Delta R_{th,max} = 2,15 \text{ K/W}$, bei einem maximalen, gemittelten thermischen Widerstand mit Alu-Platine von $R_{th,mittel,max} = 19,026 \text{ K/W}$. Nach der Alterung von 4000 h ergibt sich $\Delta R_{th,max} = 1,6 \text{ K/W}$ und $R_{th,mittel,max} = 19,47 \text{ K/W}$. Der Unterschied des thermischen Verhaltens durch die Alterung ist sehr gering und kann als konstant angesehen werden. Ebenfalls ist die Streuung innerhalb des LED-Typs als gering anzusehen. Dies weist auf geringere Fertigungsschwankungen hin. In Abbildung 2.40 ist das thermische Verhalten des LED-Typs M3 dargestellt und weist ein ähnliches Verhalten wie LED-Typ M2 auf.

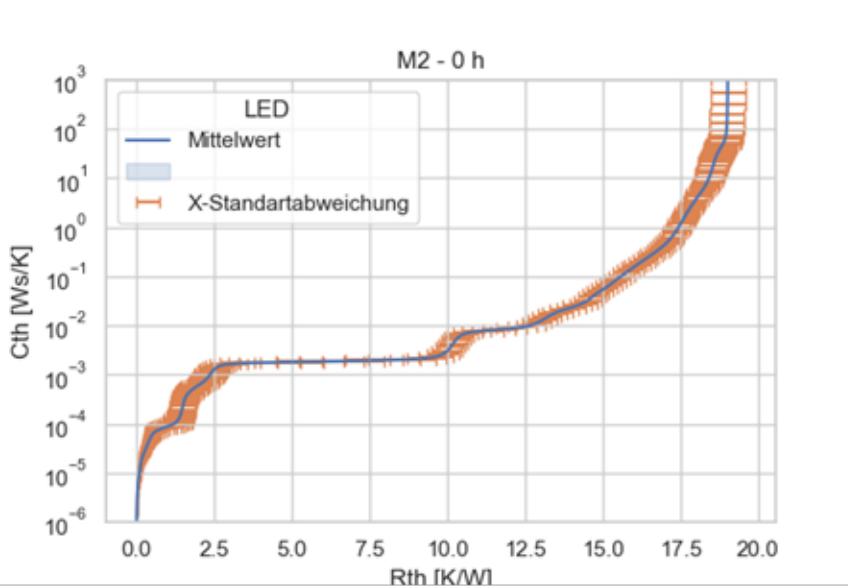


Abbildung 2.39: Thermisches Verhalten der LED: M2 bei 0 h

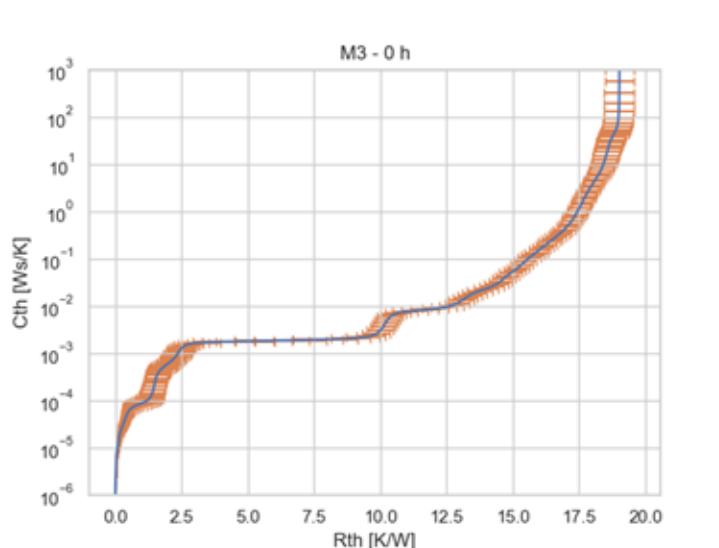


Abbildung 2.40: Thermisches Verhalten der Einzel-LEDs: M3 bei 0 h

Thermisches Verhalten von zwei Mid-Power LED-Typen

Abbildung 2.41 zeigt den Mittelwert des thermischen Verhaltens der zwei LED-Typen: M1 und M2. Hierbei wird der Unterschied der thermischen Widerstände zwischen den LED-Typen sichtbar. Die Varianz der Alterung auf den Mittelwert ist hierbei als gering anzusehen. Ebenfalls ist über den zeitlichen Verlauf keine feste Richtung des Mittelwertes zu verzeichnen, wodurch gefolgert werden kann, dass die Alterung von 4000 h auf das thermische Verhalten der LEDs im Mittel keinen signifikanten Unterschied macht. Weiterhin ist die 0 h Messung des Typs M3 enthalten. Während der Alterung wurden für diesen Typ keine weiteren Daten aufgenommen.

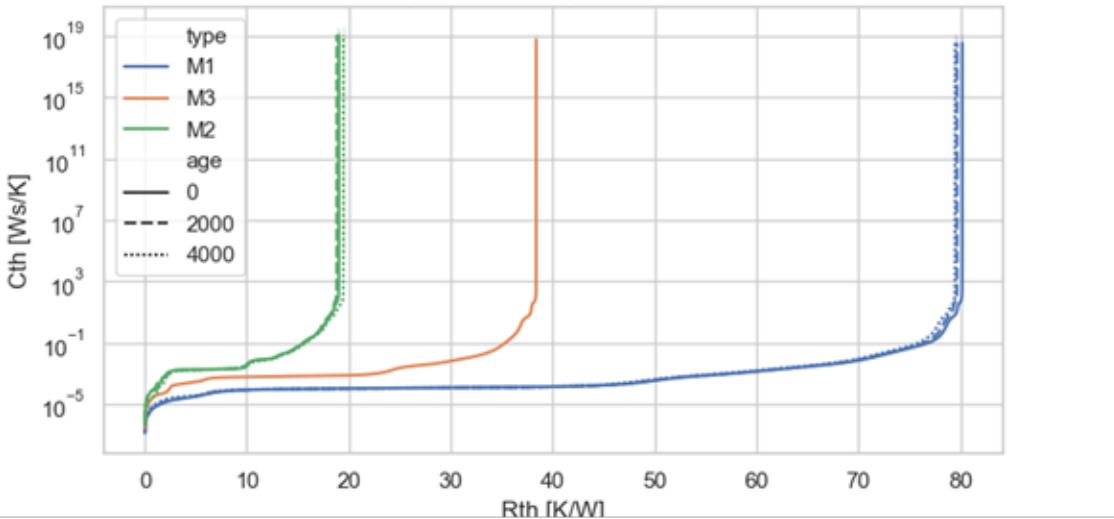


Abbildung 2.41: Thermisches Verhalten der drei LED-Typen über die Zeit von 0 h, 2000 h, 4000 h

Literatur des Abschnitts 2.6

- [1] Tao, Guoqiao. (2015). Reliability excellence in SSL manufacturing. Conference: 2015 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCH-INA) 71-74. DOI: 10.1109/SSL-CHINA.2015.7360692.

2.7. Chip Scale Package LEDs

Im Laufe des Projektes wurden zwei Typen von Chip Scale Package (CSP) LEDs unterschiedlicher Hersteller gealtert. Charakteristische Werte aus den Datenblättern der LEDs sind in Tabelle 2.5 aufgetragen. Weiterhin sind die jeweiligen Alterungsbedingungen dargestellt. Es ergeben sich insgesamt vier Alterungsbedingungen je LED-Typ. Es ist zu beachten, dass die LED CS 1 dem Mid Power Bereich und die LED CS 2 dem High Power Bereich zuzuordnen sind.

Tabelle 2.5: Prozentuale Alterung des Halbleiterchips und des Leuchtstoffs einer LED innerhalb von 0 h zu 4000 h der drei LED Typen: M1, M2 und M3

Typ	$V_{F,max}$ in V	$I_{F,max}$ in mA	R_{TH} in K/W	I_{test} in mA	T_{test} in °C
CS1	3,3	130	40	80, 120	55, 85
CS2	3,2	700	10	120, 180	55, 85

Für jede Bedingung wurden jeweils sieben LEDs gewählt. Davon wurden fünf LEDs (Sample #1 bis #5) gealtert und zwei LEDs dienten als Referenz, welche nicht gealtert wurden.

2.7.1. Aufbau und Besonderheiten von CSP LEDs

Im Bereich Package-Technologien stellen Chip Scale Package LEDs derzeit die aktuellste Entwicklungsstufe hinsichtlich hoher Packungsdichte, hohem Lumen zu Preis Verhältnis sowie geringem Wärmewiderstand dar. Im Gegensatz zur lateralen Fertigung bei konventionellen LEDs werden Chip Scale Package LEDs im Flip Chip Verfahren gefertigt. Dabei wird der Halbleiterchip (Die) direkt an die Kontaktierung zur Außenseite des Gehäuses angebunden, wodurch keine Bonddrähte benötigt werden. Abbildung 2.42 zeigt den Aufbau einer solchen LED. Aufgrund des Phosphorgusses handelt es sich um eine kantenemittierende LED. Durch das Einsparen der Bonddrähte ergibt sich eine kleinere Abmessung des gesamten Packages. Somit wird die Packungsdichte erhöht. Gleichzeitig ergibt sich durch die direkte Kontaktierung des Dies mit den elektrischen Anschlüssen ein geringerer thermischer Widerstand. Der Aufbau einer CSP LED ist in Abbildung 2.42b dargestellt.

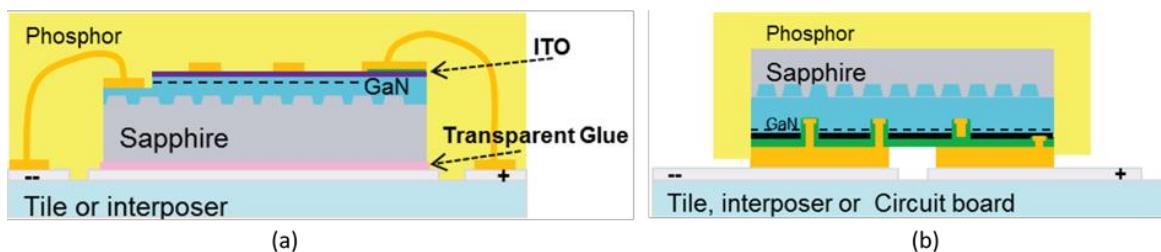


Abbildung 2.42: Aufbaus verschiedener LEDs: (a) laterale LED, (b) Chip Scale Package LED [1]

2.7.2. Optische Alterung

Im Folgenden soll die Änderung der optischen Parameter der untersuchten CSP LEDs über der Zeit betrachtet werden. Hierzu wird zuerst der Lichtstromrückgang und anschließend die Farbverschiebung untersucht.

Lichtstromrückgang CS1

Innerhalb des Alterungszeitraums von $t=4000$ h ergab sich für die LED CS 1 ein Rückgang des Lichtstroms von ca. 3,5 % bei einem Messstrom von 50 mA. Abbildung 2.43 stellt dies dar. Aufgrund des Unterschiedes von <1 % zwischen den einzelnen Messbedingungen lässt sich zum aktuellen Messzeitpunkt keine Aussage über einen Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und der Degradation treffen. Auffällig ist an dieser Stelle jedoch, dass es bei der LED CS 1 zu keinen Ausheilungsprozessen innerhalb der ersten 2000 Stunden Betriebszeit kommt.

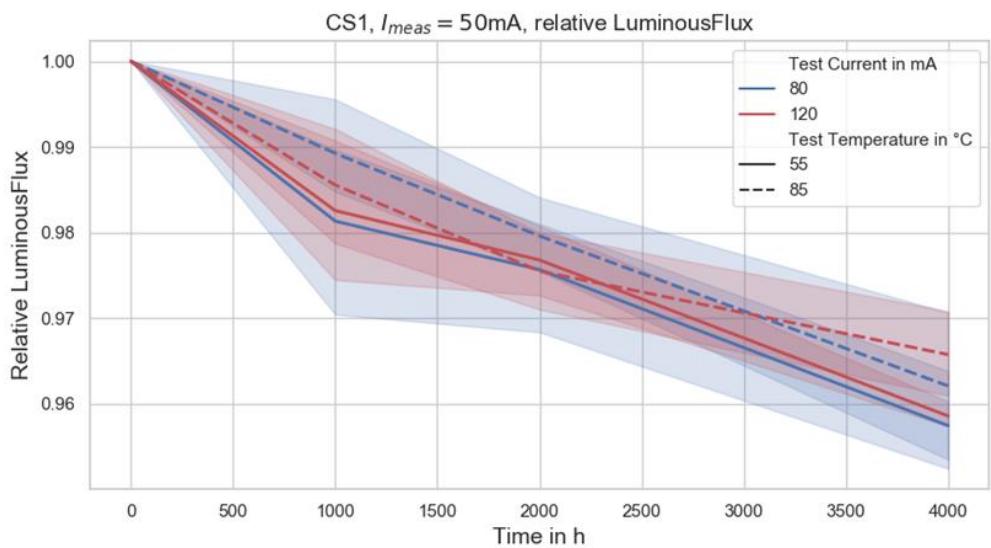


Abbildung 2.43: Lichtstromrückgang der LED CS1 für die Testbedingungen 80mA/55°C, 80mA/85°C, 120mA/55°C und 120mA/85°C in einem Zeitraum von 4000 Stunden.

Farbverschiebung CS1

Im Bereich der Farbverschiebung lassen sich nach 4000 h Degradationen von maximal ca. 2 Step MacAdam zwischen Initial- und 4000 h-Messung feststellen. Bei Betrachtung der Auswirkung unterschiedlicher Alterungsbedingungen in Abbildung 2.44 fällt ein qualitativer Unterschied in der Ausprägung des Verlaufes der Farbverschiebung auf. Mit steigender Temperatur stellt sich eine charakteristische „C“-Form ein. Diese ist auch in einzelnen Ansätzen bei der Alterungsbedingung 120 mA/55 °C (Samples: #2, #3, #5, Abbildung 2.44c) vorhanden. Ursache dieser Farbverschiebung ist eine Degradation des Phosphorsystems. Das Phosphorsystem der LED CS1 besteht aus zwei Phosphorkomponenten: Grün und Rot. Somit lässt sich die anfängliche Verschiebung in den grünen Farbbereich ($t=1000$ h) auf die Degradation des roten Phosphors zurückführen. Die folgende Gelbverschiebung lässt sich einerseits auf Degradation des grünen Phosphors zurückführen. Weiterhin sind Vergilbungseffekte im Silikon sowie Delaminierungseffekte an der Grenzschicht zwischen Die und Phosphor anzunehmen.

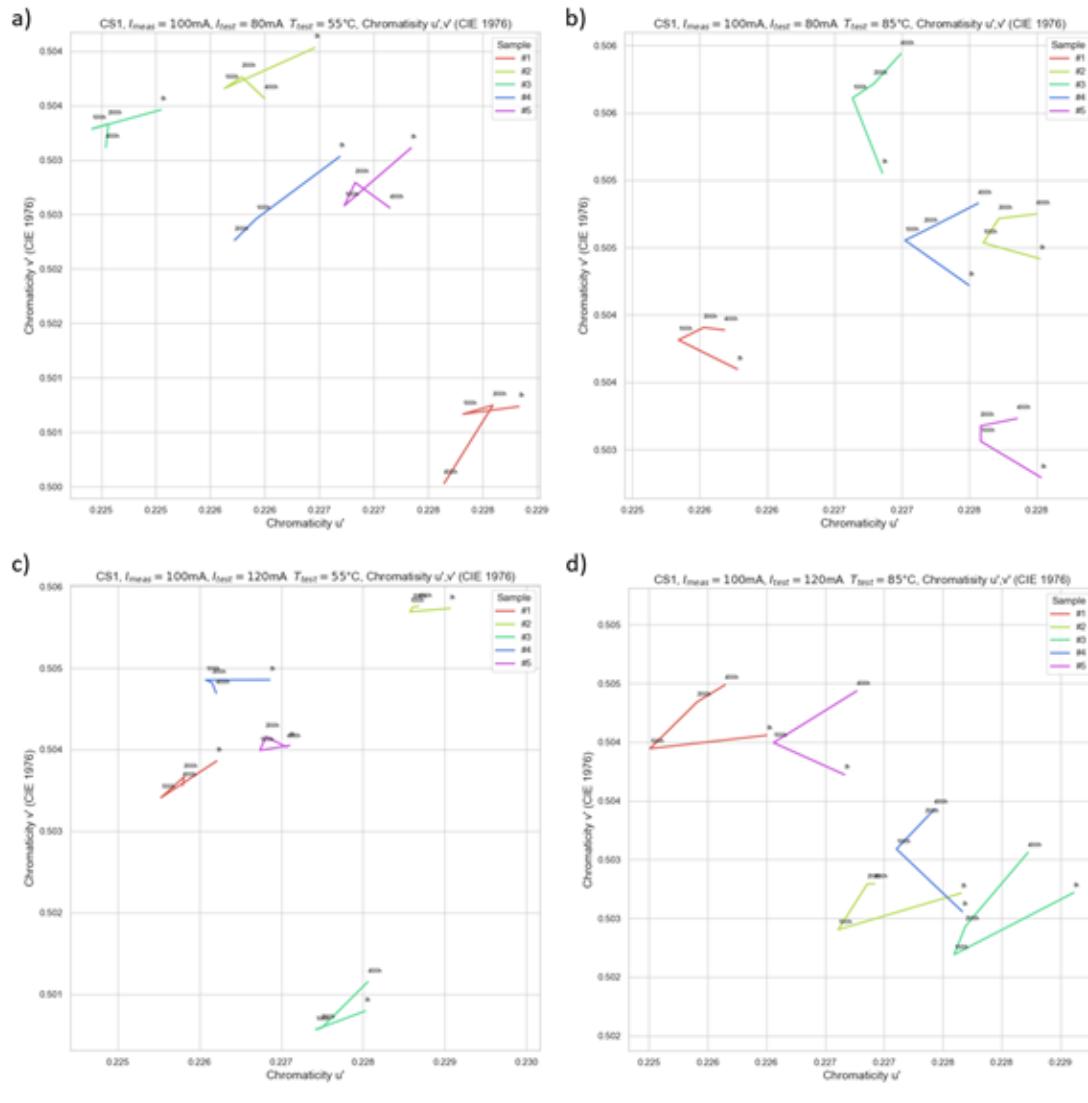


Abbildung 2.44: Farbverschiebung der LED CS 1 bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen: (a) 80mA/55°C, (b) 80mA/85°C, (c) 120mA/55°C, (d) 120mA/85°C.

Lichtstromrückgang CS2

Die LED CS2 weißt im Gegensatz zu CS1 eine deutliche Lichtstromdegradation auf (Abbildung 2.45). Diese zeigt eine Abhängigkeit der Alterungsbedingungen. So erhöht sich die Degradationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Betriebsstrom und Betriebstemperatur. Auch sind deutliche Ausheilungseffekte feststellbar. Deren Maxima verschieben sich abhängig von den Alterungsbedingungen zu früheren bzw. späteren Zeitpunkten. Insgesamt lassen sich bedingt durch die Ausheilung kurzzeitige Verbesserungen des Lichtstroms von bis zu ca. 4 % feststellen. Nach 4000 h Alterung kommt es jedoch zu einer teils erheblichen Lichtstromdegradation von bis zu 6 % bei der höchsten Alterungsbedingung. Abbildung 2.45 zeigt den Alterungsverlauf des Lichtstroms für eine Betriebszeit von 4000 h.

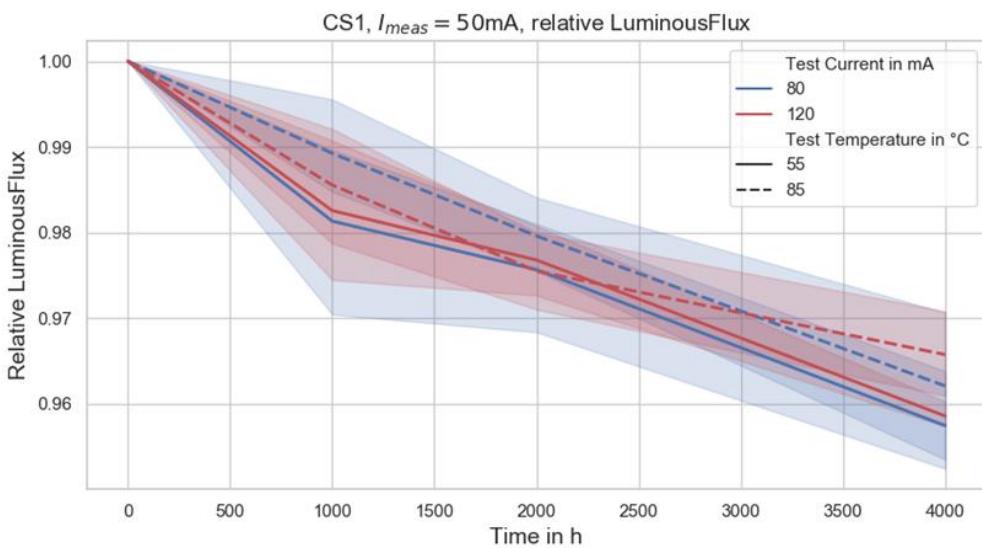


Abbildung 2.45: Lichtstromrückgang der LED CS2 für die Testbedingungen 180mA/55°C, 180mA/85°C, 700mA/55°C und 700mA/85°C in einem Zeitraum von 4000 Stunden.

Farbverschiebung CS2

Über alle Alterungsbedingungen zeigt die LED CS2 eine starke Gelbverschiebung in den ersten 2000 h. Diese nimmt mit erhöhten Betriebsparametern deutlich zu. Danach bildet sich eine Verschiebung in den orangenen Bereich. Mit höherer Alterungsbedingung bildet sich dieses Verhalten deutlicher aus. Weiterhin ist das Testobjekt #1 der 180 mA/55 °C Bedingung als Ausreiser zu werten, da es sehr stark in Initialfarbort und Farbverschiebungsverhalten von den Stichproben #2-#5 abweicht (Abbildung 2.46a). Zusammenfassend ist anzumerken, dass es nach 4000 h bei erhöhter Temperatur und Strombedingungen (Abbildung 2.46, b-d) zu einer deutlichen Farbverschiebung ca. 3-5 Step MacAdam kommt.

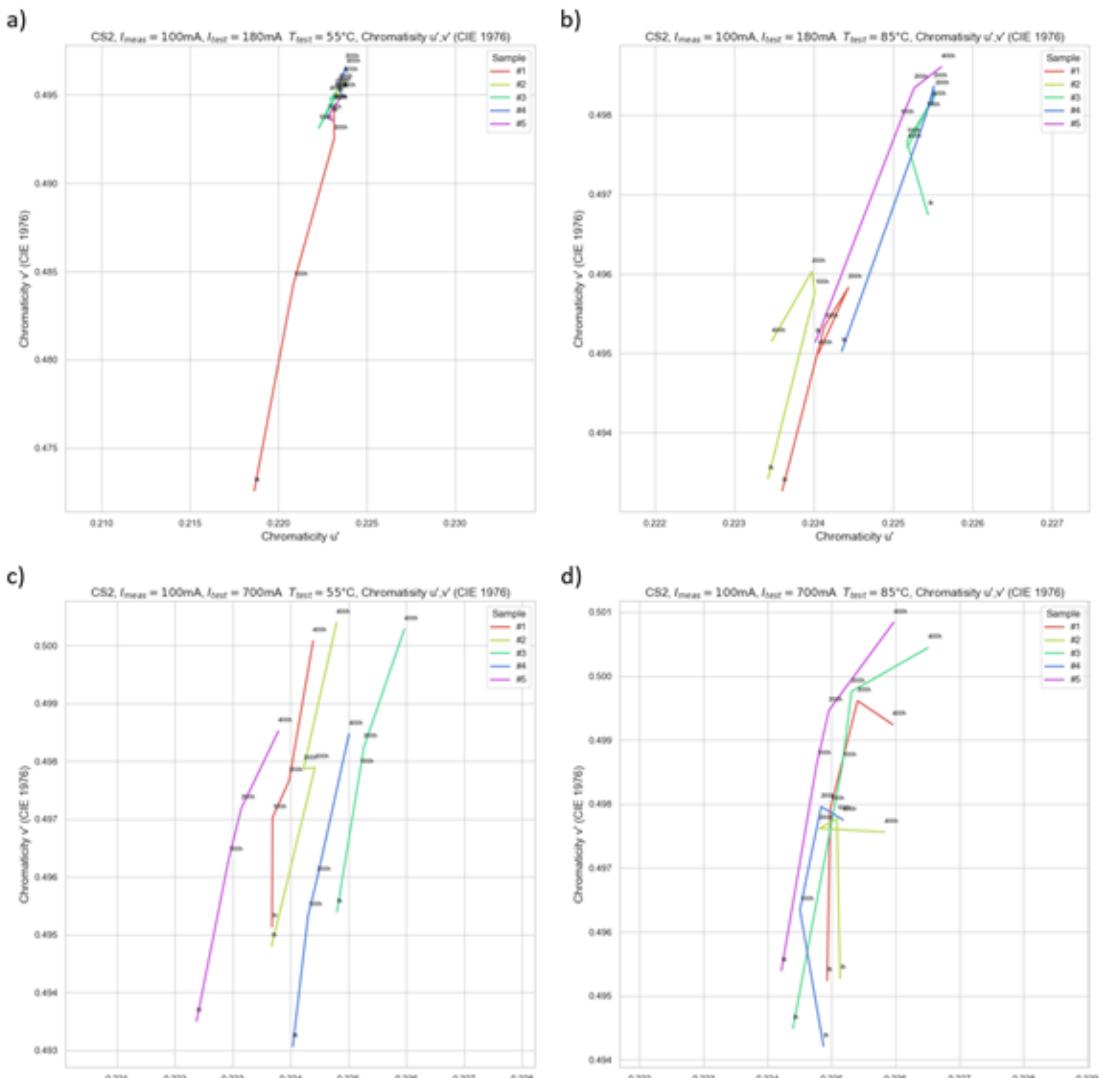


Abbildung 2.46: Farbverschiebung der LED CS 2 bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen:
 (a) 180mA/55°C, (b) 180mA/85°C, (c) 700mA/55°C, (d) 700mA/85°C.

2.7.3. Elektrische Alterung

Bei betrachten der elektrischen Parameter zeigt sich eine feststellbare Veränderung der Vorwärtsspannung. Tabelle 2.6 stellt die Vorwärtsspannungen für verschiedene Messströme für CS1 und CS2 dar. Die Vorwärtsspannung ist dabei gemäß der Shockley-Gleichung in Durchlassrichtung, umgestellt nach der Vorwärtsspannung, abhängig von Temperatur und Vorwärtsstrom (Gl. 1). Somit skaliert die Vorwärtsspannung mit der Temperatur und dem Vorwärtsstrom.

$$I_F = I_S(T) e^{-\frac{V_F}{V_T}} \leftrightarrow V_F = V_T \cdot \ln \frac{I_F}{I_S(T)} = \frac{kT}{q} \cdot [\ln(I_F) - \ln(I_S(T))] \quad (\text{Gl. 1})$$

Wird die LED weiterhin als äquivalenter Ersatzwiderstand $R_{eq}(v, i)$ im Arbeitspunkt $\{I_F, V_F\}$ betrachtet, so lässt sich die Vorwärtsspannung V_F gemäß dem Ohm'schen Gesetz zu $V_F = R_{eq} I_F$ beschreiben. Abbildung 2.38 zeigt das vereinfachte elektrische Ersatzschaltbild für R_{eq} .

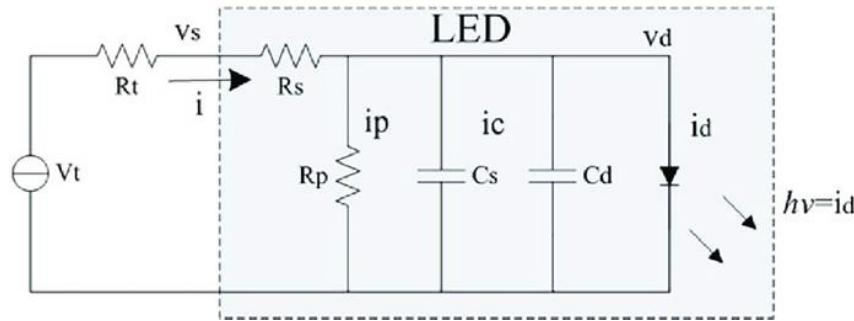


Abbildung 2.47: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild einer LED [2]

Während CS1 einen Anstieg der Vorwärtsspannung innerhalb der Alterungszeit von 4000 h aufzeigt verringert sich die Vorwärtsspannung bei CS2. Ein Anstieg der Vorwärtsspannung von CS1 lässt sich auf den Anstieg des Serienwiderstands R_s zurückführen. CS2 weist einen starken Abfall der Vorwärtsspannung in den ersten 1000 h auf. Es ist anzunehmen, dass im Zuge von Ausheilungsprozessen im Halbleiterkristall Störstellen abgebaut wurden. Dies führt zu einer Verringerung des Parallelwiderstands R_p und somit zu einer Verringerung der Vorwärtsspannung.

Tabelle 2.6: Veränderung der Vorwärtsspannung von CS1 und CS2 zwischen Initialmessung und 4000 h-Messung bei verschiedenen Messströmen

Typ	I_{Test} in mA	T_{Test} in °C	$\Delta V_{I_F=25mA}$ in mV	$\Delta V_{I_F=50mA}$ in mV	$\Delta V_{I_F=100mA}$ in mV
CS1	80	55	+5,0	+11,0	+21,0
		85	+5,0	+10,0	+19,5
	120	55	+4,0	+10,0	+18,0
		85	+4,5	+10,0	+20,0
CS2	180	55	-19,0	-31,0	-48,0
		85	-24,5	-39,0	-57,0
	700	55	-21,5	-34,0	-54,0
		85	-20,0	-33,5	-51,5

2.7.4. Thermische Alterung

Bezüglich der thermischen Alterung der CSP LEDs soll zuerst das thermische Verhalten hinsichtlich der Veränderung des thermischen Widerstands R_{th} betrachtet werden. Das arithmetische Mittel des Verlaufs des thermischen Widerstands über der Wärmekapazität für die verschiedenen Messzeitpunkte ist in Abbildung 2.39 abgebildet. Die empirische Standardabweichung der thermischen Widerstände bei $s_{R_{th}} \sim 3,5 \frac{K}{W}$. Für CS1 zeigt sich ein Anstieg von $\Delta R_{th} \approx 3 \frac{K}{W}$. Dieser lässt sich insbesondere mit einer Degradation innerhalb des Packages am Übergang zwischen Die und Phosphor begründen. Ein ähnliches Verhalten zeigt die LED CS2 mit einem Anstieg des thermischen Widerstands um $\Delta R_{th} \approx 1,5 \frac{K}{W}$.

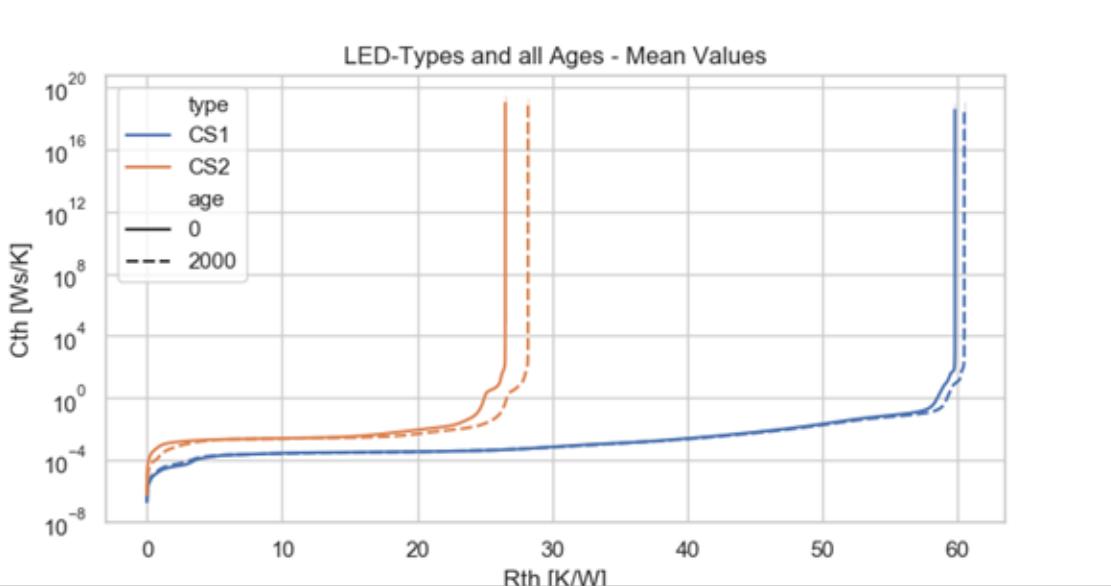


Abbildung 2.48: Thermisches Verhalten der LEDs CS1 und CS2 für 0 h, 2000 h und 4000 h.

Die in Abbildung 2.49 dargestellten Temperaturantworten für beide LEDs zeigen im Alterungszeitraum keine signifikanten Änderungen unabhängig der Betriebsbedingungen. Es fällt jedoch auf, dass eine Abnahme der empirischen Standardabweichung der einzelnen Stichproben im Anstiegsbereich im Zeitraum von $10^{-5}s < t < 10^{-2}s$ stattfindet. Ab $t > 10^{-1}s$ konvergieren insbesondere bei CS1 die Mehrheit der einzelnen Messwerte gegen die gleiche Temperaturdifferenz von $\Delta T(t > 10^1 s) \approx 13K$. Gleichzeitig zeichnen sich erste mögliche Ausreiser ab: CS1(#5-#7) und CS2(#6).

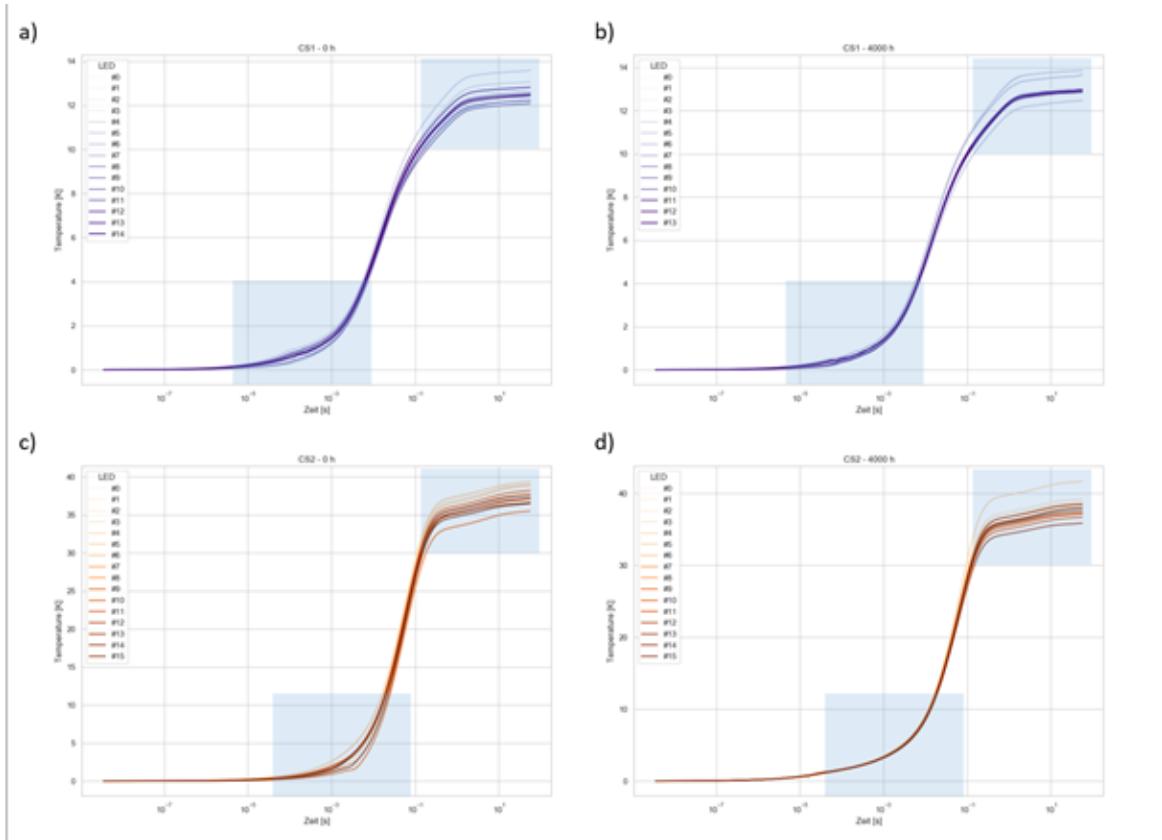


Abbildung 2.49: Temperaturantworten der LEDs (a) CS1 0h, (b) CS1 4000h, (c) CS2 0h, (d) CS2 4000h.

Literatur des Abschnitts 2.7

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2017. Assessment of Solid-State Lighting, Phase Two. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24619>.
- [2] Deng, Peng. (2017). Real-Time Software-Defined Adaptive MIMO Visible Light Communications. 10.5772/intechopen.68919.

2.8. High CRI LEDs

Im Laufe des Projektes wurden fünf LED Typen mit hohem Farbwiedergabeindex (High CRI) gealtert. Charakteristische Werte aus den Datenblättern der LEDs sind in Tabelle 2.1 aufgetragen. Weiterhin sind die jeweiligen Alterungsbedingungen dargestellt.

Tabelle 2.7: Maximale Datenblattwerte für die High CRI LEDs sowie deren Alterungsbedingungen

Typ	$V_{F,\max}$ in V	$I_{F,\max}$ in mA	CRI	I_{test} in mA	T_{test} in °C
2700K	2,8	1800	>90	700	85
3000K	2,8	1800	>90	700	85
4000K	2,8	1800	>90	1200	100
5700K	2,8	1800	>90	700	85
6500K	2,8	1800	>90	700	85

Für jede Bedingung wurden jeweils sieben LEDs gewählt. Davon wurden fünf LEDs (Sample #1 bis #5) gealtert und zwei LEDs dienten als Referenz, welche nicht gealtert wurden.

2.8.1. Besonderheiten von High CRI LEDs

LEDs mit einem hohen Farbwiedergabeindex R_a werden typischerweise in Applikationen eingesetzt, die eine möglichst farbechte Wiedergabe des beleuchteten Objektes fordern. Beispiele hierfür sind Museumsbeleuchtung oder Retail-Beleuchtung. Der Farbwiedergabeindex berechnet sich gemäß DIN 6169 aus 14 Testfarben R_i mit $i \in [1; 14]$, wobei über die ersten acht Testfarben das arithmetische Mittel gebildet wird wie in der unteren veranschaulicht.

$$R_a = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_8}{8}$$

Um einen entsprechend hohen Farbwiedergabeindex zu erreichen werden blaue (High Power) Halbleiter-LEDs mit einem mehrstufigen Phosphorsystem versehen. Abbildung 2.50 zeigt die Spektren der vermessenen LEDs. Der blaue Halbleiter emittiert bei 440 nm (4000 K-6500 K) bzw. 450 nm (2700 K-3000 K). Zwei weitere Maxima bei ca. 540 nm und ca. 625-630 nm geben Aufschluss über die Verwendung eines zweistufigen Phosphorsystems. Über das Mischverhältnis der beiden Leuchtstoffe wird die Farbtemperatur der LEDs eingestellt.

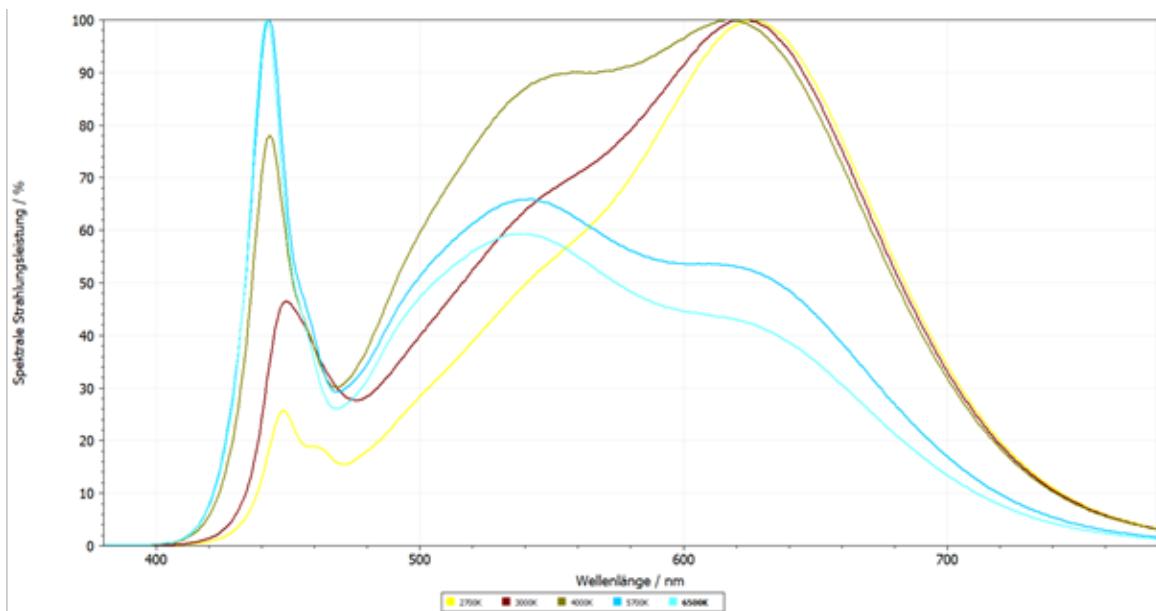


Abbildung 2.50: Spektren der vermessenen High CRI LEDs

2.8.2. Optische Alterung

Im Folgenden soll die Änderung der optischen Parameter der untersuchten High CRI LEDs über der Zeit betrachtet werden. Hierzu wird zuerst der Lichtstromrückgang und anschließend die Farbverschiebung untersucht. Initial wurden die LEDs vorgealtert um etwaige Einbrenn- und Ausheilungseffekte vernachlässigen zu können. Anschließend wurde die Alterung nach einer Einlagerungszeit von ca. 6 Monaten durchgeführt.

Lichtstromrückgang

Obgleich die LEDs einer Voralterung unterlagen zeichnet sich bei allen LEDs ein anfänglicher Anstieg des Lichtstroms, wie in Abbildung 2.51 dargestellt, ab. Dieser ist insbesondere auf Ausdunstungen von Luftfeuchtigkeit aus Silikon und Phosphor zurückzuführen. Anschließend beginnt die eigentliche Degradation des Lichtstroms. Tabelle 2.8 zeigt den entsprechenden relativen Lichtstromanstieg bzw. -abfall bei unterschiedlichen Messströmen.

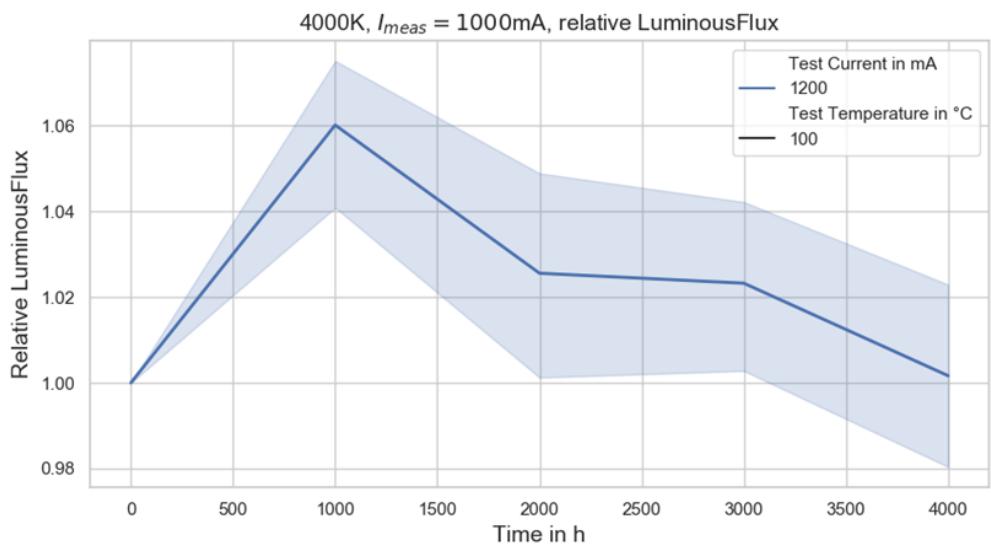


Abbildung 2.51: Verlauf des Lichtstroms nach einer initialen Voralterung mit einer erneuten Einbrennphase innerhalb der ersten 1000 h.

Tabelle 2.8: Maximale Datenblattwerte High CRI LEDs sowie deren Alterungsbedingungen

Typ	$\Delta\Phi_{rel,0-1000h}$ in %			$\Delta\Phi_{rel,1000-4000h}$ in %		
	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$
2700K	+3,2	+3,0	+3,0	-1,8	-1,7	-1,9
3000K	+5,0	+4,8	+4,6	-2,6	-2,5	-2,6
4000K	+6,2	+6,2	+6,0	-5,2	-5,7	-5,8
5700K	+4,0	+3,8	+3,6	-2,7	-2,5	-2,4
6500K	+2,1	+2,0	+1,8	-2,5	-2,5	-2,3

Farbverschiebung

Neben der eigentlichen Verschiebung der Farbkoordinaten soll in diesem Abschnitt auch die Farbtemperatur und der Farbwiedergabeindex betrachtet werden. So zeigt sich entsprechend Tabelle 2.9 eine Farbtemperaturabweichung zum Datenblattwert von teils über 10 % nach der Einlagerungsphase. Nach der 1000 h Ausdunstungsphase verringerten sich diese Abweichungen um bis zu ca. 3 %. Insgesamt nimmt die Abweichung bei den erhobenen Stichproben mit steigender Farbtemperatur tendenziell zu.

Tabelle 2.9: Veränderung der Farbtemperatur aller LEDs während der Ausdunstungsperiode innerhalb der ersten 1000h sowie der anschließende Rückgang im Zeitraum bis 4000h

Typ	CCT_{0h} in K			$\Delta\text{CCT}_{0-1000h}$ in K			$\Delta\text{CCT}_{1000-4000h}$ in K		
	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$
2700K	2572	2605	2628	+40	+40	+42	-4	-4	-6
3000K	2960	2996	3022	+86	+86	+88	-16	-12	-14
4000K	3700	3730	3760	+175	+180	+175	-110	-110	-105
5700K	5080	5110	5130	+230	+220	+210	-45	-35	-10
6500K	5800	5815	5820	+70	+65	+70	-50	-45	-50

Bis zum Messzeitpunkt 4000h zeigen die geprüften LEDs einen stabilen Farbwiedergabeindex auf. Dieser zeigt eine Änderung $|\Delta R_a| < 1$ nach der initialen Ausdunstungsphase auf. Tabelle 2.10 verdeutlicht dies. Auffällig ist jedoch die tendenzielle Abnahme des CRI zu höheren Farbtemperaturen hin. Insbesondere die LEDs mit 4000K – 6500K entsprechen nicht den im Datenblatt angegebenen Werten mit $\text{CRI} > 90$.

Tabelle 2.10: Veränderung des Farbwiedergabeindex aller LEDs während der Ausdunstungsperiode innerhalb der ersten 1000h sowie der anschließende Rückgang im Zeitraum bis 4000 h

Typ	CRI_{0h}			$\Delta\text{CRI}_{0-1000h}$			$\Delta\text{CRI}_{1000-4000h}$		
	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$	$I_{test} = 350\text{mA}$	$I_{test} = 700\text{mA}$	$I_{test} = 1000\text{mA}$
2700K	92,9	92,5	92,2	+0,5	+0,4	+0,4	-0,1	-0,3	-0,1
3000K	92,5	91,9	91,5	+0,9	+0,9	+0,9	-0,3	-0,3	-0,3
4000K	90,1	89,5	89,1	+1,1	+1,1	+1,0	-0,6	-0,5	-0,5
5700K	87,5	87	86,8	+0,7	+0,7	+0,7	-0,1	-0,1	-0,1
6500K	87,4	87,0	86,5	+0,1	+0,1	+86,9	-0,1	-0,1	-0,2

In Abbildung 2.52 a-e ist die Farbverschiebung für den Alterungsverlauf der LEDs dargestellt. Dort lässt sich ebenfalls das Ausdunstungsverhalten innerhalb der ersten 1000 h in Form einer Verschiebung in den blauen Bereich feststellen. Anschließend stellt sich mit einer Verschiebung in den gelben Bereich ein. Diese ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei 2700 K (Abbildung 2.52 a) sind diesbezüglich nur Tendenzen zu erkennen. Im Gegensatz dazu zeichnet sich bei 6500 K (Abbildung 2.52 e) eine deutliche Verschiebung in Richtung des gelben Bereichs ab. Diese ist auf Vergilbungs- und Delaminierungseffekte des Phosphor-Silikon-Komplexes zurückzuführen. Im eigentlichen Alterungsprozess ab 1000 h sind für die LEDs 2700 K, 3000 K, 5700 K und 6500 K keine signifikant sichtbaren Farbverschiebungen ($\Delta u'v' < 3 \cdot 10^{-3}$) feststellbar. Einzig die LED 4000 K weist eine sichtbare Farbverschiebung auf. Diese ist im Vergleich zu den übrigen Stichproben auf die höheren Betriebsbedingungen von $I_{test} = 1200$ mA und $T_{test} = 100^\circ\text{C}$ zurückzuführen.

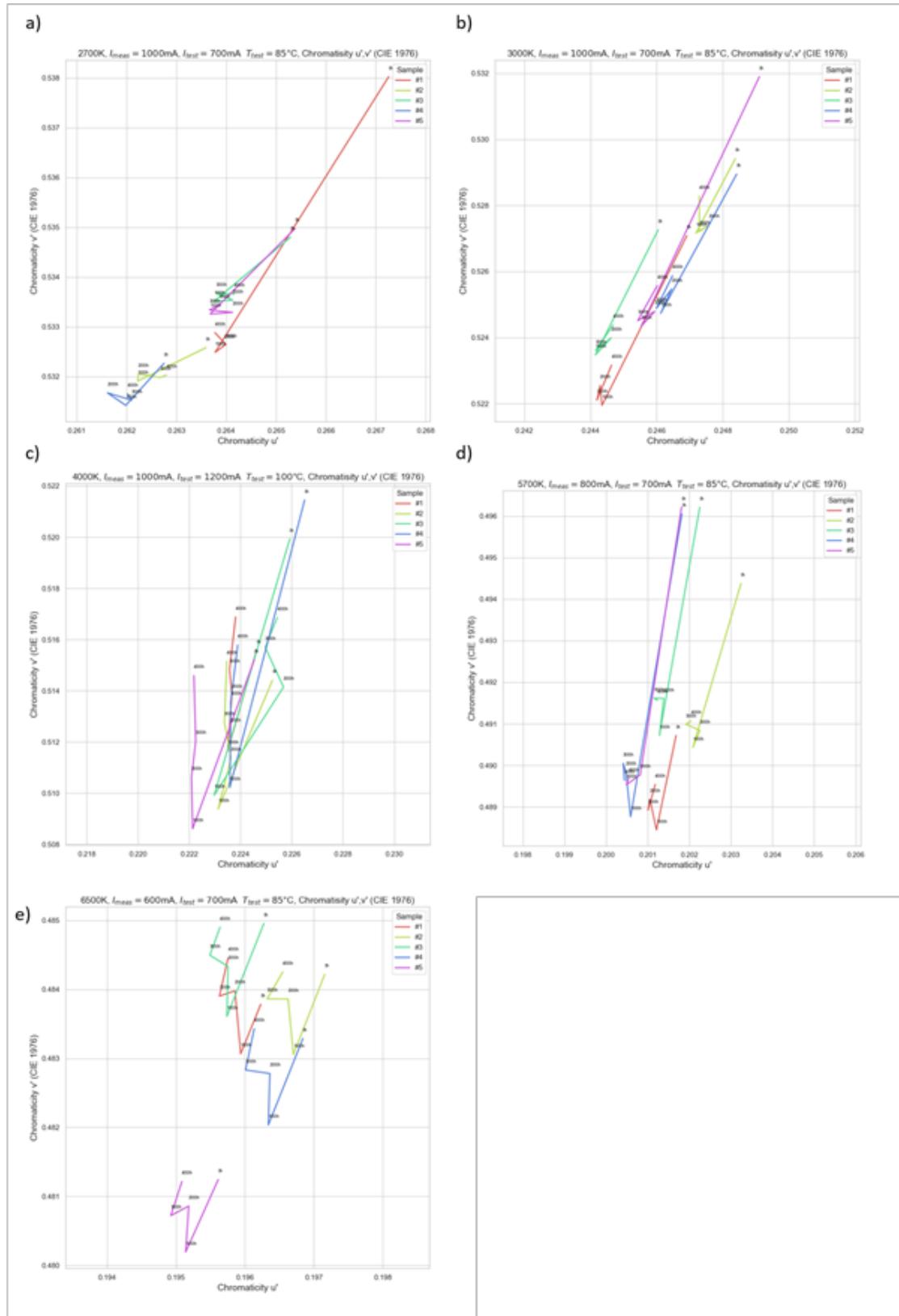


Abbildung 2.52: Farbverschiebung aller Stichproben über den Alterungszeitraum von 4000h im $u'v'$ -Diagramm.

2.8.3. Optische Alterung

Um den Einfluss des Halbleiters auf die Veränderungen der optischen Eigenschaften innerhalb der ersten 1000 h Betriebszeit ausschließen zu können, wurde die Vorwärtsspannung betrachtet. Diese zeigt keine Korrelation zu den gemessenen optischen Parametern. Die LEDs 2700 K, 3000 K, 5700 K und 6500 K weisen ein stabiles Verhalten der Vorwärtsspannung auf mit einer Schwankung von $\Delta U_F \leq \pm 5\text{mV}$ auf. Diese Schwankung liegt noch im Bereich der Messunsicherheit der verwendeten Messgeräte. Einzig bei der LED 4000 K stellt sich ein durchschnittlicher Anstieg der Vorwärtsspannung um $\Delta U_F \cong +40\text{ mV}$ ein. Dieser Anstieg lässt sich mit einer, durch den hohen Betriebsstrom $I_{test} = 1200\text{ mA}$, verstärkte Degradation des Halbleiters begründen. Abbildung 4 veranschaulicht diesen Anstieg.

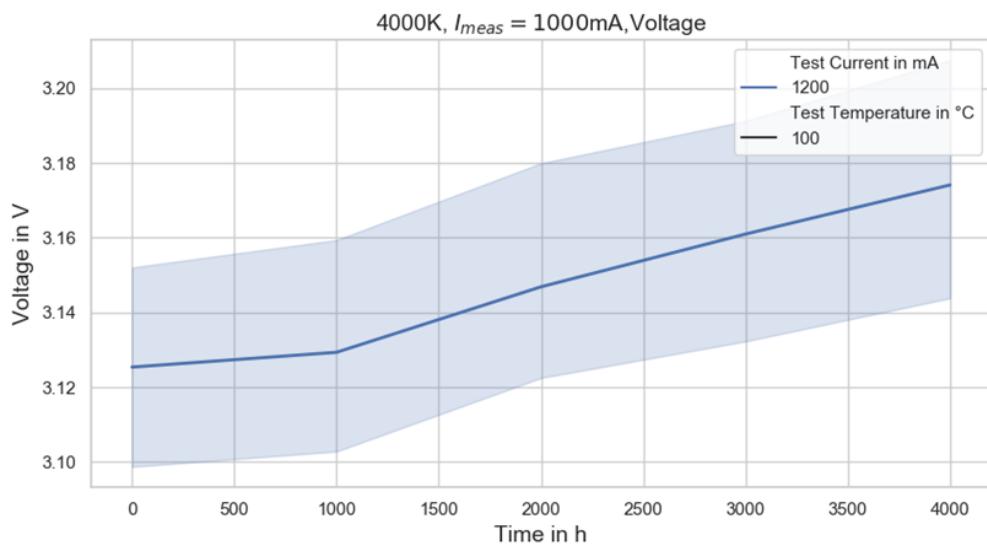


Abbildung 2.53: Veränderung der Vorwärtsspannung für die LED 4000K.

3. Lebensdaueruntersuchung an LED-Betriebsgeräten

3.2. Einleitung

Nachdem die Alterung bzw. die Lebensdauer der Leuchtdioden (LED) in der Vergangenheit bereits im Fokus vieler ausführlicher Studien waren, rückt das LED-Betriebsgerät nun mehr in den Vordergrund. Umfragen in der Beleuchtungsindustrie als auch Untersuchungen an Feldrückläufern haben die LED-Betriebsgeräte als die am häufigsten ausfallende Komponente in LED Leuchten identifiziert [Literatur des vorliegenden Kapitels, Literaturen 1, 2]. Für die Bestimmung der Lebensdauer einer kompletten LED-Leuchte muss das Alterungsverhalten des Betriebsgerätes daher ebenso gut erforscht sein wie das der LED. In diesem Kapitel werden die Maßnahmen zur Untersuchung der Lebensdauer von LED-Betriebsgeräten vorgestellt.

3.3. Fragestellungen und experimenteller Lösungsansatz

Zur Bestimmung der Lebensdauer einer kompletten Leuchte, also dem System aus LED und Betriebsgerät, muss die Lebensdauer aller Komponenten bei den angestrebten Betriebsbedingungen bekannt sein. In den Datenblättern aktueller LED-Betriebsgeräte finden sich jedoch Lebensdauerangaben von bis zu 100.000 Stunden, was einen Test in Echtzeit unmöglich macht. Daher wurde der Ansatz beschleunigter Lebensdauertests (engl. Accelerated Life Test, ALT) gewählt. Bei diesem Ansatz wird der Prüfling unter erhöhtem externen Stress betrieben. Als Stress können dabei alle Parameter gewählt werden, die keine Modifikation des Prüflings erfordern und die weiterhin dessen korrekte Funktion gewährleisten. Klassische Beispiele sind die Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, elektrische Last, Spannung oder mechanische Vibration [3].

Eine weitere Herausforderung ist die Komplexität moderner LED-Betriebsgeräte: als elektronische Schaltungen werden sie aus einer Vielzahl von Komponenten aufgebaut, weshalb sich auch Geräte mit ähnlichen Spezifikationen teils drastisch im Aufbau unterscheiden. Für die Entwicklung neuer, robusterer Betriebsgeräte sowie für die Auslegung von Lebensdauertests müssen die lebensdauerbegrenzenden Komponenten des Betriebsgerätes bestimmt werden. Hierzu wird nach einem Lebensdauertest eine post mortem Analyse der Prüflinge durchgeführt. Bei dieser Analyse wird die Ausfallursache sowie der Ausfallmechanismus auf Komponentenebene bestimmt.

Besondere Beachtung wurde bei der Analyse auf Komponentenebene auf den Elektrolytkondensator auf der Ausgangsseite des LED-Betriebsgerätes gelegt. Dieser wurde in mehreren Studien als lebensdauerbegrenzendes Bauteil in Schaltnetzteilen im Allgemeinen und LED-Betriebsgeräten im Speziellen identifiziert [4]. Eine Degradation des Ausgangskondensators schlägt sich in einer erhöhten Stromwelligkeit des Ausgangstromes nieder. Im Experiment wurde daher eine kontinuierliche Überwachung der Stromwelligkeit vorgesehen. Da Elektrolytkondensatoren hauptsächlich aufgrund der Verdunstung des namensgebenden flüssigen Elektrolyten altern, wurde mit einem Test bei trockener Hitze (englisch High Temperature Operating Life, HTOL) begonnen. Bei diesem Test wird der Prüfling bei einer Temperatur von 85 °C ohne Zugabe von Feuchtigkeit betrieben.

Die relative Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer liegt bei diesem Test im einstelligen Prozentbereich, daher auch die Bezeichnung trockene Hitze.

Die weiteren Tests fallen in die Kategorie der sogenannten Temperatur-Feuchte-Betriebsspannungstests (englisch Temperature Humidity Bias, THB). Dabei wird der Prüfling bei kontrollierter Temperatur und kontrollierter Umgebungsluftfeuchtigkeit betrieben. Diese Art von Test setzt zwingend eine Klimakammer voraus, da nur hier über längere Zeit konstante Umgebungsbedingungen erzeugt werden können. Neben der Erkenntnis welche Ausfallmechanismen durch Feuchtigkeit in den LED-Betriebsgeräten ausgelöst werden, kann auch ein Modell gebildet werden, dass die Berechnung der Lebensdauer bei beliebigen Temperatur-Luftfeuchtigkeitskombinationen erlaubt. Die zugrundeliegenden physikalischen Modelle hierfür sind bekannt und werden in einem späteren Abschnitt eingehend erläutert. Um die Parameter des Modells zu bestimmen muss ein Prüfling den Test bei mindestens drei verschiedenen Temperatur-Luftfeuchtigkeitskombinationen durchlaufen, da die Lage der von Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Raum der Lebensdauer aufgespannte Ebene nur dann eindeutig definiert werden kann.

3.4. Messaufbau für die beschleunigte Alterung

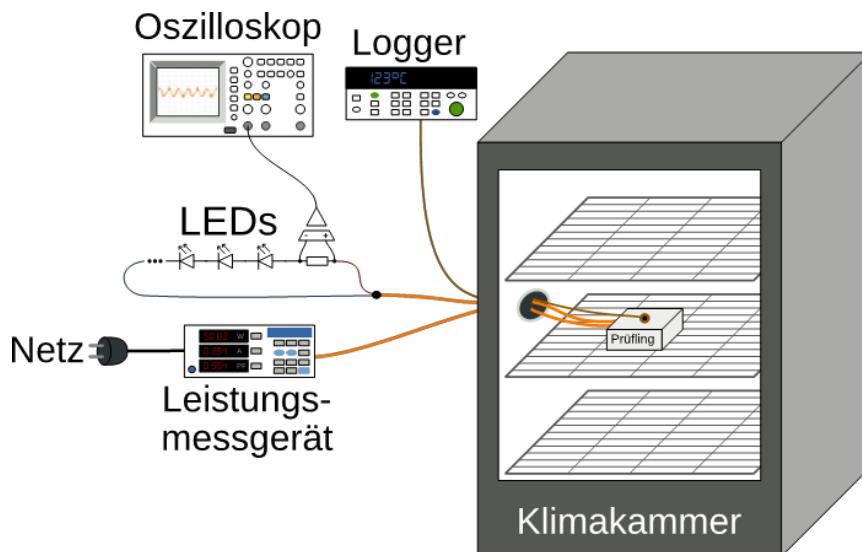


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Für die Durchführung der Alterungsversuche wurde ein automatisierter Messaufbau am Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme der Technischen Universität Darmstadt errichtet. Das Diagramm in Abbildung 3.1 illustriert diesen Aufbau. Den Kern des Aufbaus bilden zwei Klimakammern, in denen nahezu beliebige Temperatur-Luftfeuchtigkeits-Kombinationen simuliert werden können. Die technischen Daten der Klimakammern sind in Tabelle 3.1 dargestellt. In den Klimakammern befinden sich während der Versuche die LED-Betriebsgeräte, wohingegen die LED-Module außerhalb des Schrankes gelagert werden. Im Foto in Abbildung 3.2 ist dieser Aufbau klar zu erkennen. Die LED-Module werden bei den Messungen nur als elektrische Last verwendet und sollen möglichst nicht altern. Die elektrischen Leistungsdaten der Prüflinge werden mittels eines

Leistungsmessgerätes aufgezeichnet. Dieses ist in die Netzleitung eines jeden Prüflings zwischen geschaltet. Auf der Ausgangsseite der Betriebsgeräte wird der Strom beziehungsweise die Stromwelligkeit mittels eines galvanisch getrennten Strommessverstärkers und eines Oszilloskops gemessen. Zu guter Letzt wird noch die Temperatur am Tc-Punkt der Prüflinge mit Hilfe eines Mehrkanaldatenerfassungsgerätes überwacht. Sämtliche Messgeräte sind mit einem Laborrechner verbunden, der die Datenaufzeichnung steuert und diese dauerhaft ablegt.

Tabelle 3.1: Technische Daten der eingesetzten Klimakammern		
Hersteller	ESPEC	
Modell	PL-3K	PR-3J
Innenvolumen	408 l	
Temperaturbereich	-40 bis 100 °C	-20 bis 150 °C
Luftfeuchtigkeit	bis 98 %	
max. Temperaturänderung	3,0 °C / min.	

Die Versuche bei feuchter Hitze stellen erhöhte Anforderungen an den Versuchsaufbau. Die Komponenten des Aufbaus die in der Klimakammer der alternden Umgebung ausgelegt sind müssen besonders robust ausgelegt werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass diese Komponenten schneller altern als die Prüflinge und durch ihren Ausfall zu einer Unterbrechung oder sogar einem vorzeitigen Ende des Tests führen. Für die Kabel, die die Prüflinge mit Strom versorgen beziehungsweise sie mit den LED Lasten verbinden, wurde eine Hochtemperaturleitung mit Silikomantel eingesetzt. Die Kabel haben über die gesamte Versuchsdauer keine Alterungerscheinungen gezeigt



Abbildung 3.2: Fotos des Messaufbaus am Fachgebiet IES. Links: ein Klimaschrank mit LED-Lasten im Regal. Rechts: Laborrechner mit Messtechnik.

Für die Temperaturmessung am Tc-Punkt der Prüflinge wurden handelsübliche Typ-K-Thermoelemente mit Glasfasermantel eingesetzt. Da die Drähte der Thermoelemente bei feuchter Hitze korrodiert wurden die Fühler nach jedem Versuchsdurchlauf getauscht. Eine besondere Herausforderung war der elektrische Anschluss der LED-Betriebsgeräte an die in die Klimakammer geführten Hochtemperaturleitungen. Die bei den ersten Versuchen eingesetzten Verbindungsklemmen mit Kunststoffkörper degradierten so stark, dass sie nach Versuchsende nicht beschädigungsfrei entfernt werden konnten. Bei späteren Versuchen wurden daher Porzellanverbindungsklemmen eingesetzt.

3.5. Getestete LED-Betriebsgeräte

Tabelle 3.2: Übersicht über die getesteten LED-Betriebsgeräte.

Typ	Hersteller	max. Leistungsaufnahme / W	max. Ausgangsstrom / mA	Schnittstellen	Low-Cost?	Durchgeführte Tests
1	A	40	1050	Ja	-	HTOL, 8585, 7575, 6590
2	A	165	1050	Ja	-	
3	A	38	700	-	-	
4	A	60	550	Ja	-	
5	A	90	1000	Ja	-	
6	B	168	700	Ja	-	
7	C	35	-	-	-	
8	C	36	1050	-	-	
9	D	50	1500	-	-	
10	D	44	700	-	-	
11	D	70	300	-	-	
12	E	25	500	Ja	-	
13	F	66	1050	-	-	
14	G	40	700	-	-	
15	G	84	700	Ja	-	
16	H	29	700	Ja	Ja	8585
17	C	67	360	-	Ja	
18	E	57	1050	-	Ja	
19	G	45	1050	-	Ja	
20	G	65	350	-	Ja	
21	I	54	450	-	Ja	
22	J	22	160	-	Ja	
23	J	52	410	-	Ja	
24	K	24	280	-	Ja	
25	K	65	420	-	Ja	

Um einen möglichst vollständigen Überblick über die am Markt verfügbaren LED-Betriebsgeräte zu bekommen, wurden insgesamt 25 verschiedene Typen von Betriebsgeräten getestet. Die Betriebsgeräte stammen von elf Herstellern und wurden durch die im Projekt beteiligten Unternehmen ausgewählt und zur Verfügung gestellt. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die Typen. In Absprache mit den beteiligten Unternehmen sind die tatsächlichen Hersteller und Typenbezeichnungen anonymisiert. Neben den wichtigsten Leistungsparametern der Geräte ist auch aufgeführt welche Tests jeweils durchgeführt wurden. Die für die Tests verwendeten Kürzel sind:

- HTOL –trockene Hitze bei 85 °C;
- 8585 – feuchte Hitze bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit;
- 7575 – feuchte Hitze bei 75 °C und 75 % relativer Luftfeuchtigkeit;
- 6590 – feuchte Hitze bei 65 °C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Alle Tests wurden unter Spannung – also im Betrieb – durchgeführt.

Es ist klar zu erkennen, dass ein breites Spektrum an Geräten getestet wurde. Besonders zu beachten sind hierbei die Spreizung der Leistungsaufnahme sowie das ausgewogene Verhältnis von Typen mit Kommunikationsschnittstelle und ohne.

Zur Mitte der Projektlaufzeit wurden die beteiligten Unternehmen gebeten eine weitere Auswahl an LED-Betriebsgeräten für die Versuche zur Verfügung zu stellen. Dabei handelt es sich um – im Vergleich zu den ersten 15 Typen – einfachere und preiswerte Geräte. Diese wurden bei feuchter Hitze (85 °C, 85 % rel. Feuchtigkeit) beschleunigt getestet. Anschließend wurden die Ergebnisse mit denen der hochwertigen LED-Betriebsgeräte verglichen. In einem separaten Abschnitt wird die ausführliche Analyse der Daten vorgestellt.

3.6. Alterung bei trockener Hitze (HTOL)

Die Alterung bei trockener Hitze stellt einen in der Industrie weit verbreiteten Test dar [5]. Die trockene Hitze beschleunigt insbesondere die Degradation der Elektrolytkondensatoren, da die Verdunstung des Elektrolyten schneller vonstattengeht [6]. Daher wurde ein Versuch mit den in Tabelle 2 angegeben 15 Typen von hochwertigen LED-Betriebsgeräten durchgeführt. Die Geräte wurden über einen Zeitraum von über 14.000 Stunden bei einer konstanten Temperatur von 85 °C betrieben. Nach Abbruch des Versuchs konnte nur bei einem Prüfling ein Ausfall festgestellt werden. Die am Ausgang der Prüflinge gemessene Stromwelligkeit ist über die Versuchszeit nicht signifikant angestiegen. Bei der nach Versuchsende durchgeföhrten Zerlegung der Betriebsgeräte konnten keine Beschädigungen an den Elektrolytkondensatoren festgestellt werden.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass eine Alterung bei trockener Hitze bei modernen LED-Betriebsgeräten nicht zu einer signifikanten Beschleunigung der Degradation führt. Es kann darüber hinaus davon ausgegangen werden, dass die Elektrolytkondensatoren häufig nicht mehr das Lebensdauerbegrenzende Bauteil sind. Diese Erkenntnisse können beim Entwurf und der Qualifizierung neuer Betriebsgeräte berücksichtigt werden.

3.7. Vergleich zwischen hochwertigen und preiswerten LED-Betriebsgeräten

3.7.1. Ziel und statistischer Lösungsansatz

Am Markt ist eine breite Auswahl von LED-Betriebsgeräten verfügbar. Diese unterscheiden sich natürlich in ihren Leistungsparametern wie der elektrischen Ausgangsleistung oder dem Vorhandensein einer Kommunikationsschnittstelle. Darüber hinaus gibt es aber häufig auch vergleichbare Geräte, die sich vor allem durch ihren Preis unterscheiden. Die günstigeren Geräte stammen mehrheitlich von asiatischen Herstellern, wobei auch namhafte europäische Hersteller mit günstigen Geräteserien am Markt vertreten sind. Die Preisvorteile werden in der Regel durch Einsparungen bei den Produktionsprozessen oder den verwendeten Komponenten erzielt.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob diese Einsparungen die Qualität und insbesondere die Lebensdauer der Geräte vermindern. Um dieser Frage nachzugehen wurden, wie bereits zu Beginn des Kapitels beschrieben, preiswerte LED-Betriebsgeräte durch die am Projekt beteiligten Unternehmen für Versuche zur Verfügung gestellt. Diese wurden bei feuchter Hitze (85 °C, 85 % rel. Feuchtigkeit) beschleunigt getestet und die erzielten Lebensdauern anschließend mittels einer statistischen Methode mit denen der hochwertigen LED-Betriebsgeräte verglichen.

Als statistischer Ansatz wurde hier der t-Test für zwei unabhängige Stichproben gewählt. Dieser Test prüft ob die Mittelwerte zweier Stichproben signifikant verschieden sind. Die oben genannte Frage lässt sich wie folgt umformulieren um sie mit dem t-Test zu prüfen: ist die mittlere Lebensdauer der hochwertigen LED-Betriebsgeräte signifikant höher als die mittlere Lebensdauer der preiswerten LED-Betriebsgeräte.

3.7.2. Voraussetzungen des t-Tests

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten müssen zunächst die Voraussetzungen des Tests geprüft werden. Diese sind [7]:

1. Die Stichproben wurden zufällig aus den jeweiligen Populationen gewählt.
2. Die den Stichproben zugrundeliegenden Populationen folgen einer Normalverteilung.
3. Die Varianzen der den Stichproben zugrundeliegenden Populationen ist gleich.

Es wird davon ausgegangen, dass die Zufälligkeit der Stichprobe gewahrt ist, da die Auswahl durch die beteiligten Unternehmen anhand ihres aktuellen Produktpportfolios getätigt wurde. Zur Überprüfung der durch das experimentelle Design angestrebten Zufälligkeit sind die erzielten Lebensdauern in Abbildung 3.3 in einem Streudiagramm den Parametern Leistungsaufnahme und Ausgangstrom gegenübergestellt. Es zeigen sich keine klar erkennbaren Muster in den Datenpunkten, sondern eine breite, zufällige Streuung. Die Zufälligkeit der Stichproben ist damit gezeigt.

Entstammt eine Stichprobe einer normalverteilten Population, so ist diese ebenfalls normalverteilt. Die Überprüfung der Normalverteilung einer Stichprobe kann mittels statistischer Tests erfolgen. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Stichproben ist Aussagekraft dieser Tests aber in diesem

Fall begrenzt. Es wurde daher die grafische Methode des Quantil-Quantil-Diagramms (Q-Q-Diagramm) gewählt. Bei diesem Diagramm werden die empirischen Quantile der Stichprobe gegen die Quantile einer theoretischen Verteilung aufgetragen. Folgen die Daten dieser Verteilung, liegen die eingezeichneten Punkte auf einer Geraden. Somit können Daten graphisch auf das Vorhandensein einer bestimmten Verteilung geprüft werden. In Abbildung 3.4 wurden die Lebensdauerdaten der hochwertigen und preisgünstigen LED-Betriebsgeräte gegen eine Normalverteilung aufgetragen. Zusätzlich wurde eine Regressionsgerade eingezeichnet um die graphische Analyse zu erleichtern. Bei beiden Stichproben sind die Abweichungen zur Regressionsgerade gering und können durch die kleine Stichprobengröße erklärt werden. Es kann von normalverteilten Populationen ausgegangen werden.

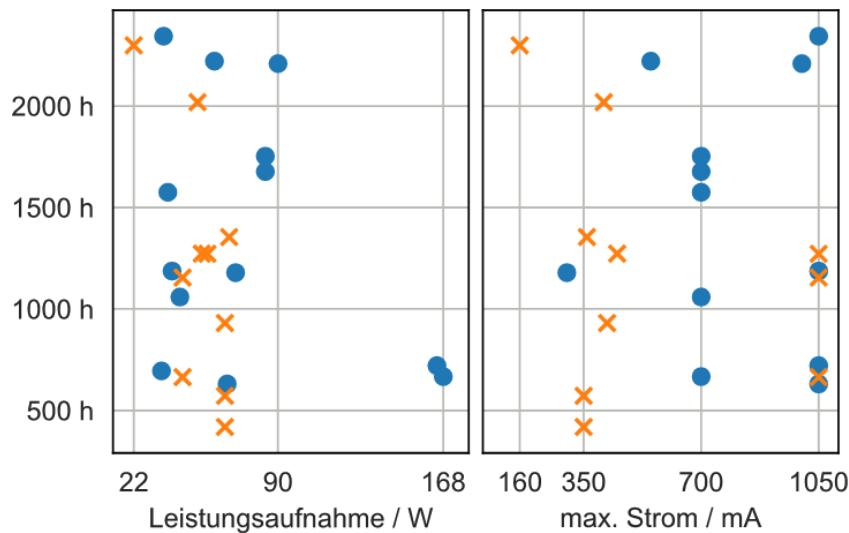


Abbildung 3.3: Vergleich von Strom bzw. Leistungsaufnahme mit der im Test erreichten Lebensdauer (Streudiagramm).

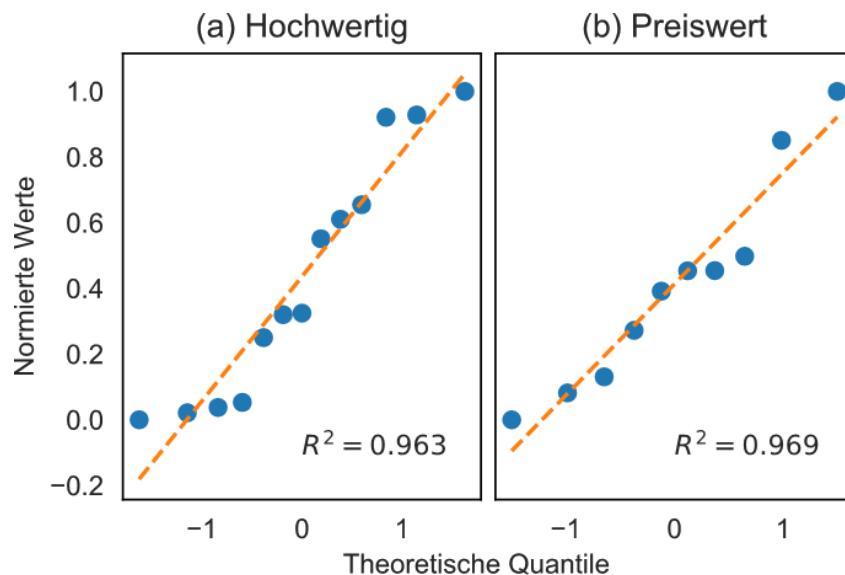


Abbildung 3.4: Quantil-Quantil-Diagramm für die hochwertigen und preiswerten LED-Betriebsgeräte.

Schließlich muss noch die Gleichheit der Varianzen geprüft werden. Da die Standardabweichung σ und die Varianz s^2 über die Gleichung $\sigma = \sqrt{s^2}$ verknüpft sind, kann der Vergleich auch anhand der Standardabweichung erfolgen. Die Standardabweichung wurde gewählt, da ihre Interpretation im Ingenieurwesen geläufiger ist. Die berechneten Werte für die Standardabweichung sind für die preiswerten LED-Betriebsgeräte $\sigma_{pw} = 572$ h und für die hochwertigen LED-Betriebsgeräte $\sigma_{hw} = 604$ h. Die Standardabweichungen haben nahezu identische Werte, die Voraussetzung der Gleichheit der Varianz wird als gegeben angesehen.

3.7.3. Auswertung des Tests

Die Nullhypothese des gewählten Tests ist $H_0: \mu_{pw} = \mu_{hw}$, was bedeutet, dass die Mittelwerte der zwei den Stichproben zugrundeliegenden Populationen nicht gleich sind. Als alternative Hypothese wurde $H_1: \mu_{pw} < \mu_{hw}$ gewählt oder dass der Mittelwert Lebensdauer der Population der preisgünstigen LED-Betriebsgeräte geringer ist als der der hochwertigen. Da die zwei Stichproben unterschiedlich groß sind, wurde die allgemeine Form des t-Tests für zwei unabhängige Stichproben gewählt [7]. Die Teststatistik ist definiert als

$$t = \frac{\bar{X}_{pw} - \bar{X}_{hw}}{\sqrt{\left[\frac{(n_{pw} - 1)\tilde{s}_{pw}^2 + (n_{hw} - 1)\tilde{s}_{hw}^2}{n_{pw} + n_{hw} - 2} \right] \left[\frac{1}{n_{pw}} + \frac{1}{n_{hw}} \right]}}$$

wobei \bar{X}_i der Mittelwert der Stichprobe i , n_i die Stichprobengröße und \tilde{s}_i^2 die geschätzte Stichprobenvarianz ist. Diese wird berechnet mittels

$$\tilde{s}_i^2 = \frac{\Sigma X_i^2 - (\Sigma X_i)^2/n_i}{n_i - 1}$$

wobei X_i die Werte der Stichprobe i bezeichnet. Mit diesen Gleichungen kann der Wert der Teststatistik $t = 0.708$ berechnet werden.

Tabelle 3.3: Kritische Werte der t-Verteilung

	$t_{.05}$	$t_{.01}$
Kritischer Wert	2,080	2,831

Zur Überprüfung der Nullhypothese wird der Wert der Teststatistik mit kritischen Werten verglichen. Diese Werte können Tabellen entnommen werden. Für die Irrtumsniveaus 0,05 und 0,01 (entspricht den Konfidenzniveaus 95 % und 99 %) sind die Werte in Tabelle 3.3 angegeben. Der Wert der Teststatistik wird nun mit den kritischen Werten verglichen, wobei die Nullhypothese abgelehnt werden kann, wenn der Wert positiv und gleich oder größer als der kritische Wert ist. In diesem Fall kann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden, da der berechnete Wert der Teststatistik kleiner ist als die kritischen Werte für die Irrtumsniveaus 0,05 und 0,01. Die Interpretation

dieses Ergebnis ist, dass die mittlere Lebensdauer der hochwertigen LED-Betriebsgeräte nicht signifikant höher ist als die der preisgünstigen.

3.8. Fehlerbilder und Analyse

Bei der Analyse der Fehlerbilder der im Versuch ausgefallenen Betriebsgeräte sind zwei Komponenten durch ihren gehäuften Ausfall aufgefallen: Filmkondensatoren und Varistoren. Darüber hinaus kam es insbesondere bei preiswerten Betriebsgeräten häufig zu Korrosionsschäden. In den folgenden Abschnitten werden diese Effekte eingehend analysiert.

3.8.1. Filmkondensatoren

Filmkondensatoren finden häufige Verwendung in Schaltnetzteilen wie LED-Betriebsgeräten. Aufgrund ihrer Selbstheilung sind sie für bestimmte Anwendungen wie zum Beispiel primärseitige EMV Filter unersetztbar. Im Vergleich zu Elektrolytkondensatoren sind sie außerdem deutlich weniger hitzeempfindlich. Aktuelle Forschungsergebnisse haben Feuchtigkeit allerdings als einen der wichtigsten Einflussfaktoren in Bezug auf die Lebensdauer von Filmkondensatoren identifiziert [6]. Das Eindringen von Feuchtigkeit in den Kondensator führt zu drei Ausfallmechanismen [8]: Korrosion der Metallelektrode, was einen Anstieg des Serienwiderstands nach sich zieht; Abnahme der Isolationswirkung des Dielektrikums, was zu erhöhten Leckströmen führt; Koronaentladungen an lokalen Feldmaxima, die zu einer verringerten Kapazität führen. Die ersten beiden Effekte verursachen in Folge eine erhöhte Verlustleistung im Kondensator und damit einen Temperaturanstieg der Komponente. Sie können schließlich das thermische Durchgehen der Komponente auslösen, was wiederum zum Schmelzen oder gar zur Explosion des Bauteils führt.



Abbildung 3.5: Aufgebrochene und geschmolzene Filmkondensatoren rechts neben dem Diodengleichrichter.

Diese Effekte konnten auch in den Versuchen beobachtet werden. In Abbildung 3.5 ist ein besonders dramatisches Beispiel dargestellt. Bei diesem Fall sind die Wicklungen der Kondensatoren geschmolzen und haben die Anschlüsse des benachbarten Dioden-gleichrichters kurzgeschlossen. In der Folge hat die primärseitige Sicherung des Betriebsgerätes ausgelöst.

3.8.2. Varistoren

In den Versuchen hat sich gezeigt, dass auch Varistoren mit Kunststoffgehäuse in feuchten Umgebungen Schaden nehmen können. Diese Komponenten werden auf der Primärseite zum Schutz gegen Überspannung (z.B. Blitzschlag) eingesetzt. In der Literatur finden sich bisher kaum Studien zu diesem Effekt. Es wird davon ausgegangen, dass die eindringende Feuchtigkeit Leckströmen in der Komponente verursacht. Die Leckströme führen zu einer Erhitzung der Komponente und schließlich zum thermischen Durchgehen.

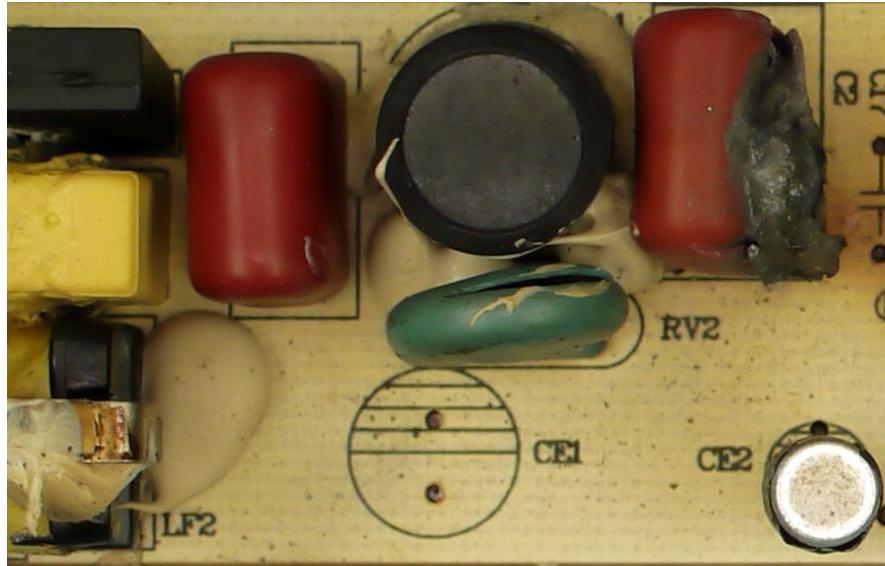


Abbildung 3.6: Aufgeplatzter Varistor (RV2) neben einem ebenfalls beschädigten Filmkondensator.

In Abbildung 6 ist ein Beispiel für einen derart beschädigten Varistor gezeigt. Beim thermischen Durchgehen kann es zu einer großen Hitzeentwicklung in der Komponente kommen. Wird das Bauteil in diesem Fall nicht durch eine primärseitige Sicherung vom Netz getrennt, kann es zu beträchtlichen Schäden an der Baugruppe kommen.

3.8.3. Korrosion

Es ist allgemein bekannt, dass es in sehr feuchten Umgebungen zu Korrosion auf elektronischen Baugruppen kommen kann. Eine besondere Herausforderung stellen in diesem Zusammenhang moderne no-clean Prozesse dar. Der Großteil der heutigen Lötprozesse ist vom no-clean Typ und verzichtet auf eine Reinigung der Baugruppen nach der Bestückung [9]. Die aktiven Komponenten in den angewandten Flussmitteln werden durch Erhitzen deaktiviert. Aufgrund von ungleicher

Hitzeverteilung beim Lötvorgang ist dies nicht immer gegeben [10]. Bleiben nun schwache organische Säuren (englisch Weak Organic Acids, WOA) auf der Leiterplatte zurück können diese Rückstände Feuchtigkeit anziehen und in Lösung gehen [11]. Die Rückstände können nun zwei Fehlermechanismen auslösen: die galvanische Korrosion zwischen unterschiedlichen Metallen in der Anwesenheit eines Wasserfilms; elektrolytische Korrosion bei der die angesprochene Lösung als Elektrolyt fungier [12, 13].

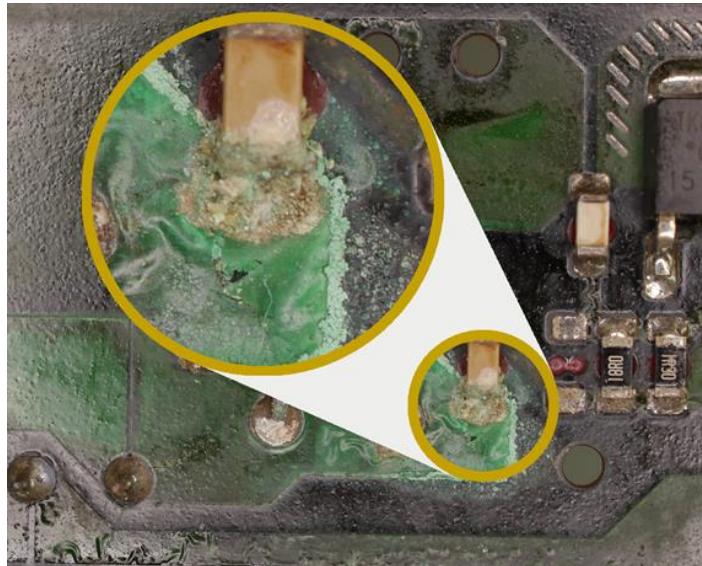


Abbildung 3.7: Korrosionsschäden am Beispiel eines preiswerten LED-Betriebsgerätes.

Eine Reinigung der Baugruppe nach dem Lötvorgang kann diesen Effekten vorbeugen. Allerdings ist dieser Prozess mit Kosten verbunden und entfällt daher regelmäßig. Dies gilt insbesondere für die preiswerten LED-Betriebsgeräte. Hier zeigten sich im Versuch teils drastische Korrosionsschäden. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.7 gezeigt. Um den unteren Anschluss des Keramikkondensators hat sich poröses grünes Kupferoxid gebildet. Die Endkappe des Kondensators ist ebenfalls angegriffen. Auf dem Körper des Widerstands hat sich eine weiße Verfärbung gebildet, die möglicherweise im späteren Verlauf zu einem Kurzschluss des Bauteils geführt hätte.

3.9. Modell zur Berechnung der Lebensdauer bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

3.9.1. Lebensdauermodell für Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Ein zentrales Ziel des Projekts ist die Bildung eines Modells zur Berechnung der Lebensdauer eines LED-Betriebsgerätes bei gegebenen Umgebungsbedingungen. Die Parameter des Modells sollen dabei aus den Ergebnissen der beschleunigten Lebensdauerversuche berechnet werden. Für die im Projekt betrachteten Einflussfaktoren Temperatur und Luftfeuchtigkeit gibt es etablierte Rechenmodelle zur Bestimmung der Beschleunigung der Alterung. Eines der meist verwendeten Modelle

ist die nach ihrem Entdecker benannte Peck Gleichung [Peck1986] mit der sich die mittlere Lebensdauer τ eines Prüflings berechnet gemäß

$$\tau = A(RF)^{-n} \exp[E_A/(kT)]$$

wobei A und n zu bestimmende Konstanten sind, RF die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent, E_A die Aktivierungsenergie des temperaturabhängigen Fehlermechanismus in Elektronenvolt, k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur in Kelvin. Zur Bestimmung des Beschleunigungsfaktors wird nun der Quotient aus der mittleren Lebensdauer für eine bekannte und der gesuchten Temperatur-Luftfeuchtigkeitskombination gebildet. Dieser Faktor gibt nun die Beschleunigung der Alterung in Bezug auf die Lebensdauer bei der bekannten Temperatur-Luftfeuchtigkeitskombination an. Der Faktor A entfällt aufgrund des Quotienten und es müssen nur noch die Modellparameter n und E_A bestimmt werden. Um die zwei Parameter bestimmen zu können muss der Alterungsversuch für jeden Prüfling bei mindestens drei Temperatur-Luftfeuchtigkeitskombinationen durchgeführt werden.

3.9.2. Bestimmung der Modellparameter

Wie eingangs beschrieben wurden im Projekt die Umgebungsbedingungen 85 °C / 85 % relF., 75 °C / 75 % relF. und 65 °C / 90 % relF. gewählt. Bei Erstellung dieses Berichts liegen vollständige Alterungsdaten für drei Typen von LED-Betriebsgeräten vor. Die Lebensdauern der Betriebsgeräte sind in Tabelle 3.4 angegeben. Für den Betriebsgerätetyp 7 ergeben sich für das oben beschriebene Modell Parameter von $E_A = 0,679$ eV und $n = 2,64$. Diese Werte sind sehr nah an denen die Peck für die Lebensdauer von Kunststoff-IC-Gehäusen angibt. Es wird daher angenommen, dass die berechneten Parameter durch die physikalischen Eigenschaften des lebensdauerbegrenzenden Fehlermechanismus bedingt sind. Mit den Parametern lässt sich nun die Lebensdauer für weitere Umgebungsbedingungen extrapolieren. Bei einer Temperatur von 25 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 50 % ergibt sich so eine Lebensdauer von 176.000 Stunden. Steigt die Luftfeuchtigkeit jedoch auf 80 % sinkt die Lebensdauer auf 51.000 Stunden.

Tabelle 3.4: Übersicht über die getesteten LED-Betriebsgeräte. Lebensdauer je Testbedingung und Modellparameter für drei LED-Betriebsgerätetypen.

Typ	Lebensdauer / Umgebungsbedingung			Modellparameter	
	6590	7575	8585	E_A / eV	n / 1
6	1646 h	514 h	520 h	0,490	3,73
7	1642 h	1360 h	520 h	0,679	-2,64
14	1362 h	1296 h	1084 h	0,132	-0,443

Die Modellparameter für die zwei anderen Betriebsgerätetypen sind ebenfalls in Tabelle 4 aufgeführt. Hier ergeben sich jedoch völlig andere Werte. Im Fall des Betriebsgerätetyps 6 ist der Parameter n sogar positiv. Betrachtet man die Lebensdauer dieses Typs in den verschiedenen Umgebungsbedingungen fällt auf, dass diese bei 75 °C / 75 % relF. kürzer ist als bei 85 °C / 85 % relF. Dies ergibt physikalisch keinen Sinn, da sämtliche Alterungsprozesse mit steigender Temperatur schneller verlaufen. Das Ergebnis muss daher verworfen werden.

Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich für Typ 14. Hier ist die Differenz zwischen den Bedingungen 75 °C / 75 % relF. und 85 °C / 85 % relF. geringer als zu erwarten wäre. Die Ergebnisse können auch in diesem Fall nicht zur Extrapolation herangezogen werden.

Zwei Ursachen können zu den unbrauchbaren Ergebnissen bei den LED-Betriebsgeräte-Typen 6 und 14 geführt haben:

1. Die Ausfälle wurden nicht alle durch den gleichen Fehlermechanismus verursacht.
2. Die Lebensdauer im Test unterliegt einer statistischen Verteilung und die beobachteten Werte weichen stark vom tatsächlichen Mittelwert ab.

Dem ersten Effekt kann nur durch eine post mortem Analyse begegnet werden. Werden bei diesen unterschiedlichen Fehlermechanismen identifiziert, müssen diese bei der Modellierung berücksichtigt werden. Alternativ können auch die Umgebungsbedingungen im Test so angepasst werden, dass möglichst nur ein Mechanismus provoziert wird. Am Beispiel des Betriebsgerätetyps 7 kann dieser Ansatz überprüft werden. Bei diesem Typ zeigte sich bei jeder der drei Umgebungsbedingungen der gleiche Fehlermechanismus, wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Es kam stets auf der Primärseite (Netzseite) zu einem Überschlag zwischen zwei Komponenten. An dieser Stelle wurde die für 230 V Betriebsspannung notwendige Kriechstrecke unterschritten. Durch den hohen Strom, der bei einem Überschlag fließt, wurde die primärseitige Schmelzsicherung ausgelöst und der Prüfling war damit ausgefallen. Die Trennung der Potentiale erfolgte hier über das Leiterplattenmaterial und die Luft zwischen den Komponenten. Bei dem Leiterplattenmaterial handelt es sich um einen Verbundwerkstoff auf Epoxidharzbasis. Das erklärt, warum die in diesem Fall berechneten Modellparameter mit denen übereinstimmen, die Peck für IC-Gehäuse aus Epoxidharz beschrieben hat.

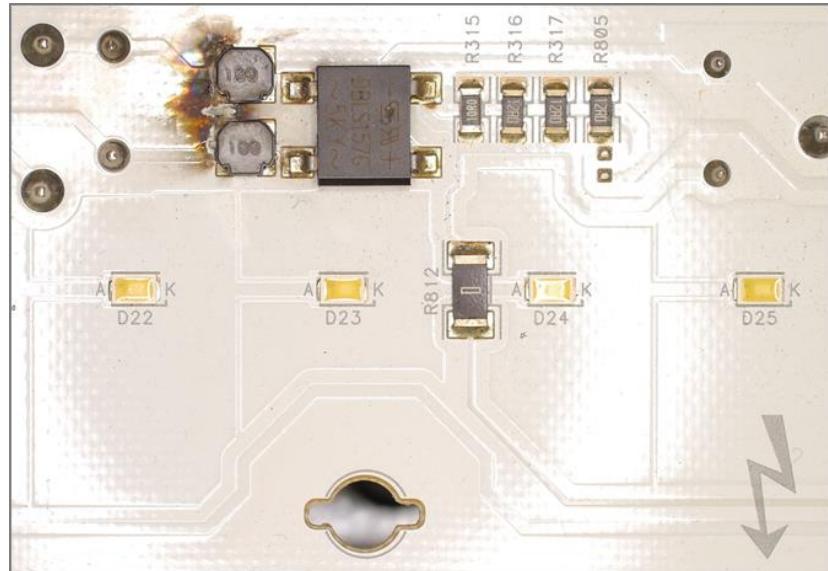


Abbildung 3.8: Ausfallmechanismus für den Betriebsgerätetyp 7. Der Überschlag erfolgte zwischen den zwei quadratischen Spulen links oben.

Diese Maßnahmen setzen jedoch genauso wie die Behebung der zweiten Ursache größere Stichproben je Gerätetyp und Umgebungsbedingung voraus. Hier ist weitere Forschung notwendig um einen zuverlässigen Ansatz für die experimentelle Bestimmung des Alterungsmodells beschreiben zu können.

3.10. Zusammenfassung

Im Verlauf des Projekts wurden insgesamt 75 LED-Betriebsgeräte in fünf Versuchsdurchgängen beschleunigt gealtert. Die Auswertung dieser Versuche ergab wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf das Alterungsverhalten von modernen LED-Betriebsgeräten.

In den Versuchen bei trockener Hitze haben sich keine signifikanten Alterungseffekte gezeigt, obwohl die Versuchsdauer mit über 14.000 Stunden die in der Industrie üblichen Testzeiten um ein Vielfaches übertrifft. In diesem Versuch konnte keine signifikante Degradation der Elektrolytkondensatoren beobachtet werden, obwohl diese besonders hitzeempfindlich sind. Es lässt sich schlussfolgern, dass der Elektrolytkondensator bei modernen LED-Betriebsgeräten nicht mehr die Schwachstelle darstellt.

Um zu prüfen, ob preiswerte Betriebsgeräte den hochwertigen Geräten qualitativ in Bezug auf die Lebensdauer nachstehen, wurde eine eigene Studie durchgeführt. Dazu wurde je eine Stichprobe von den zwei Geräteklassen bei feuchter Hitze beschleunigt bis zum Ausfall gealtert. Die Lebensdauerdaten wurden anschließend mit einem statistischen Verfahren verglichen. Es konnte hierbei keine signifikant längere Lebensdauer der hochwertigen Betriebsgeräte beobachtet werden.

Bei den Versuchen mit feuchter Hitze konnten zeitnah Ausfälle von Prüflingen beobachtet werden. Es traten insbesondere Schäden an Filmkondensatoren und Varistoren sowie Korrosion auf. Diese Erkenntnisse sollten beim Entwurf neuer Baugruppen berücksichtigt werden.

Schließlich kann die Lebensdauer von LED-Betriebsgeräten bei verschiedenen Umgebungsbedingungen mit Hilfe eines Modells extrapoliert werden. Die Modellparameter wurden nach Bestimmung der Lebensdauer bei drei Umgebungsbedingungen berechnet. Bei kleinen Stichproben kann es hier jedoch zu Problemen mit der Aussagekraft der Ergebnisse kommen. Nichtsdestotrotz konnte für einen Betriebsgerätetyp ein Modell gefunden werden. Die Parameter stimmen in diesem Fall mit den Angaben in der Literatur überein und können als korrekt angesehen werden.

Literatur des 3. Kapitels

1. N. G. L. I. Alliance, "LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting," Solid-State Lighting Product Quality Initiative, June 2011.
2. N. G. L. I. Alliance, "LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting," Solid-State Lighting Product Quality Initiative, September 2014.
3. W. Nelson, Accelerated testing statistical models, test plans, and data analyses.
4. B. Sun, X. Fan, C. A. Yuan, Q. Cheng, and G. Zhang, "A degradation model of aluminum electrolytic capacitors for LED drivers," 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuRoSimE 2015, (2015), pp. 4-7.

5. Temperature, Bias, and Operating Life, JESD22-A108F, J. S. S. T. Association, July 2017.
6. H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters - An overview," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, (2014), pp. 3569-3578.
7. J. M. Chambers, Graphical methods for data analysis, Chapman and Hall/CRC Belmont, Calif., (1983).
8. R. Gallay, "Metallized Film Capacitor Lifetime Evaluation and Failure Mode Analysis," CAS - CERN Accelerator School: Power Converters, Vol. 003, (2016), pp. 7-14.
9. Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices, JEP122H, J. S. S. T. Association, September 2016.
10. M. S. Jellesen, V. Verdingovas, H. Conseil, K. Piotrowska, and R. Ambat, "Corrosion in electronics: Overview of failures and countermeasures," in European Corrosion Congress, 2014.
11. V. Verdingovas, M. S. Jellesen, and R. Ambat, "Solder flux residues and humidity-related failures in electronics: relative effects of weak organic acids used in no-clean flux systems," Journal of Electronic Materials, Vol. 44, no. 4 (2015), pp. 1116-1127.
12. R. Ambat, "Perspectives on climatic reliability of electronic devices and components," in IMAPS Nordic Annual Conference Proceedings 2012, 2012.
13. S. Zhan, M. H. Azarian, and M. Pecht, "Reliability of Printed Circuit Boards Processed Using No-Clean Flux Technology in Temperature–Humidity–Bias Conditions," IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 8, no. 2 (2008), pp. 426-434.

4. Alterung von Leuchten

Für die Alterung der Leuchten wurden Alterungsstrecken errichtet, die über einen großen Zeitraum stabile Messindizes liefern. Dieser Aufbau wurde durch ein Messsystem überwacht, das eine kontinuierliche Aufzeichnung der zu erfassenden Messgrößen ermöglicht. Im Laufe der 2,3 Jahre wurden die Leuchten und der gesamte Aufbau ständig auf Funktion und Stabilität hin überwacht. Die Alterung erfolgte gemäß der Norm IEC/PAS62722-2-1.

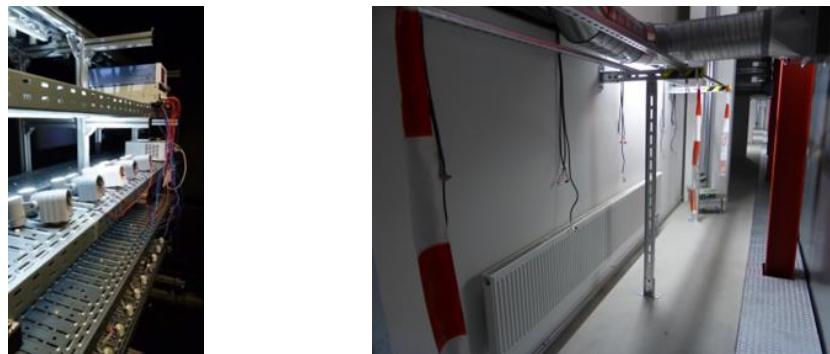


Abbildung 4.1: Alterungsstrecken des VDE Lichtlabors für LED-Innenraumbeleuchtung (links) und LED-Außenbeleuchtung (rechts)

Es wurden 15 Leuchten mit je zwei identischen Mustern photometrisch und spektral untersucht. In der Stichprobe befanden sich 10 Innenraum- und 5 Außenleuchten. Die Initialmessung wurde an allen Leuchten, also jeweils an beiden Mustern eines Typs, durchgeführt. Danach wurde jeweils eines der beiden Muster dem bestimmungsgemäßen Gebrauch entsprechend montiert und betrieben. Das andere wurde direkt daneben montiert, aber nicht eingeschaltet. An den Mustern, die sich im Dauerbetrieb befanden, wurden weitere Messungen nach jeweils 3.000, 6.000, 12.000 Betriebsstunden durchgeführt. Am Ende der Alterungszeit von 20.000 Betriebsstunden fanden dann an allen 30 Mustern lichttechnische und thermische Abschlussmessungen statt.

Die Ermittlung der photometrischen und spektralen Messwerte erfolgte gemäß EN 13032-4 und CIE 15.3. Die Messungen wurden mit dem Drehspiegelgoniophotometer GO-DS2000 und dem Colorimeter C1210 der Firma LMT durchgeführt. Vor jeder Messreihe wurde das Messsystem mit einer Lichtstärkenormallampe (Typ Osram Wi41-G) kalibriert. Die thermischen Messwerte am Ende der Alterung wurden mit einer Messanlage der Firma Schleich aufgenommen, die folgende drei Einzelmessgeräte beinhaltet: Temperatur-Datenrekorder Yokogawa DC100-221, Leistungsmesser Yokogawa WT210, Widerstandsmessgerät SCHUETZ MR1012L. Die Anlage befand sich zum Zeitpunkt der Messungen in kalibriertem Zustand.

Für die Durchführung der oben beschriebenen Aufgaben gab es folgende Aufwände: Zu Beginn des Projektes wurde die Planung der Arbeitspunkte vorgenommen und daraus eine Roadmap erstellt. Darauf folgte eine Literatur-Recherche, aus der Ideen für die Konzeptentwicklung der

Alterungsstrecken entstanden. Die Alterungsstrecken wurden geplant und eingerichtet. Nach der photometrischen und spektralen Initialmessung an allen 30 Leuchten wurden die Leuchten montiert und die Alterungsstrecken in Betrieb genommen. In vordefinierten Zeitabständen folgten an den 15 dauer-betriebenen Mustern Wiederholungen der zu Beginn bereits vorgenommenen photometrischen und spektralen Messungen. Mit den daraus gewonnenen Messdaten wurde eine Auswertung durchgeführt, deren Ergebnisse und Erkenntnisse im Folgenden beschrieben werden.

4.2. Innenraumbeleuchtung

Für die Untersuchung der Auslegung langzeitstabiler LED-Leuchten wurden 10 unterschiedliche Leuchten aus dem Bereich Innenraumbeleuchtung vermessen. Es gab also 10 dauerbetriebene Muster, die initial, nach 3.000, 6.000, 12.000 und final nach 20.000 Stunden in stabilem Zustand vermessen wurden, sowie 10 nicht betriebene Muster, die initial in stabilem Zustand und nach 20.000 Stunden dreimal vermessen wurden: Direkt nach dem Einschalten, nach Stabilisierung und nach 6 Betriebsstunden. Es wurden folgende lichttechnische Parameter für die Auswertung in Betracht gezogen:

- Lichtstrom in lm
- Farbwiedergabeindex (Abk. CRI)
- Farbtemperatur in K (Abk. CCT)
- Farborte CIE 1931 x, y
- Farborte CIE 1976 u'v'
- Spannung in V
- Strom in mA
- Leistungsaufnahme in W

In Abbildung 4.2 sind die relativen Messwerte des Lichtstroms aller Innenraumleuchten im Laufe des Alterungsprozesses dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Leuchten Nummer 3, 8, 11 und 14 nach 20.000 Betriebsstunden eine Lichtstromdegradation aufweisen. Der Lichtstrom fällt bei diesen Leuchten über die Zeit linear ab.

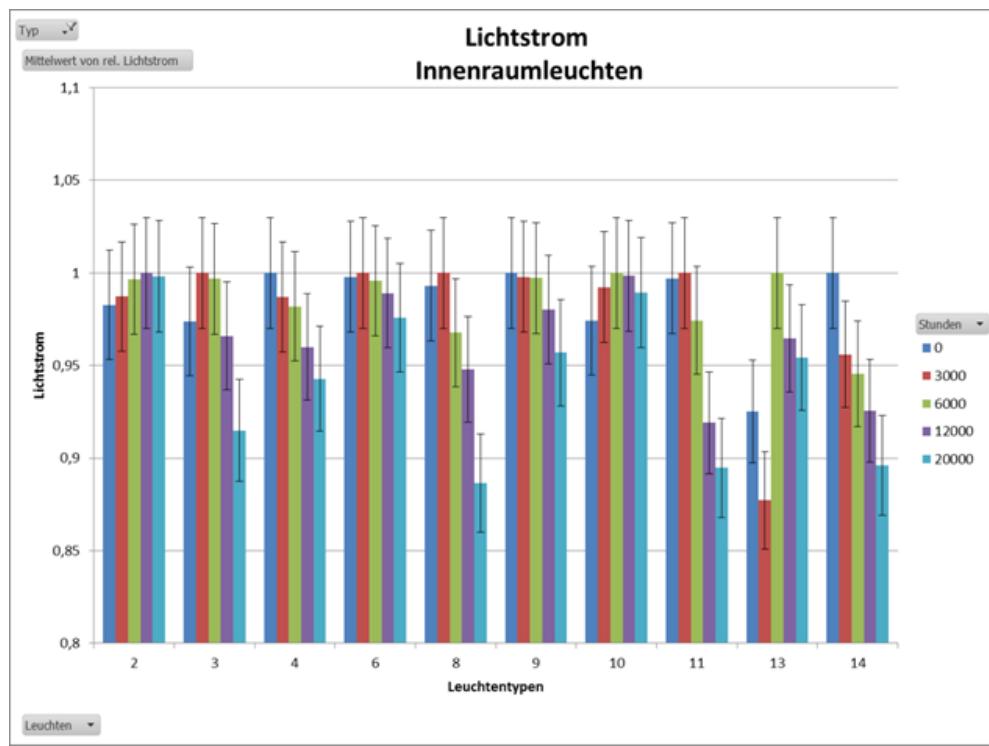


Abbildung 4.2: Degradation des relativen Lichtstroms im Laufe der 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 3 % dargestellt.

Abbildung 4.3 zeigt den Farbwiedergabeindex im Laufe der Zeit. Während der 20.000 Betriebsstunden konnten keine signifikanten Veränderungen gegenüber dem Anfangswert festgestellt werden. Der Übersicht halber wurde der Grenzwert $CRI \geq 80$ für Innenraumleuchten markiert und man erkennt, dass die Leuchten, die für dieses Projekt zur Verfügung gestellt wurden, alle nah an diesem Mindestwert liegen. Die Farbwiedergabewerte der Leuchte 3 liegen von Anfang an unterhalb $CRI=80$.

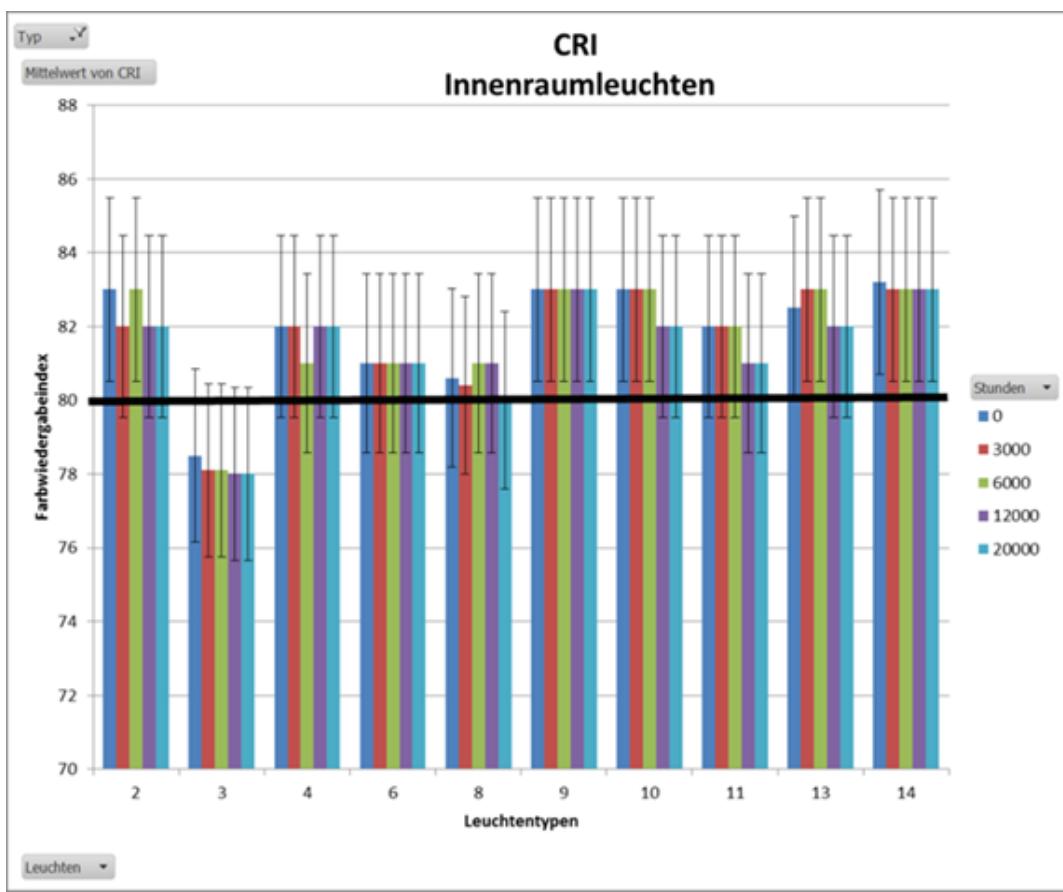


Abbildung 4.3: Farbwiedergabeindex im Verlauf der 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 3 units dargestellt.

Abbildung 4.4 zeigt auf der x-Achse die Farborte u' und auf y-Achse die Farborte v' des CIE 1976 $u'v'$ -Farbraumes. Es geht hervor, dass die Leuchten 10 und 14 nach 20.000 Betriebsstunden eine Farbortverschiebung erfahren haben.

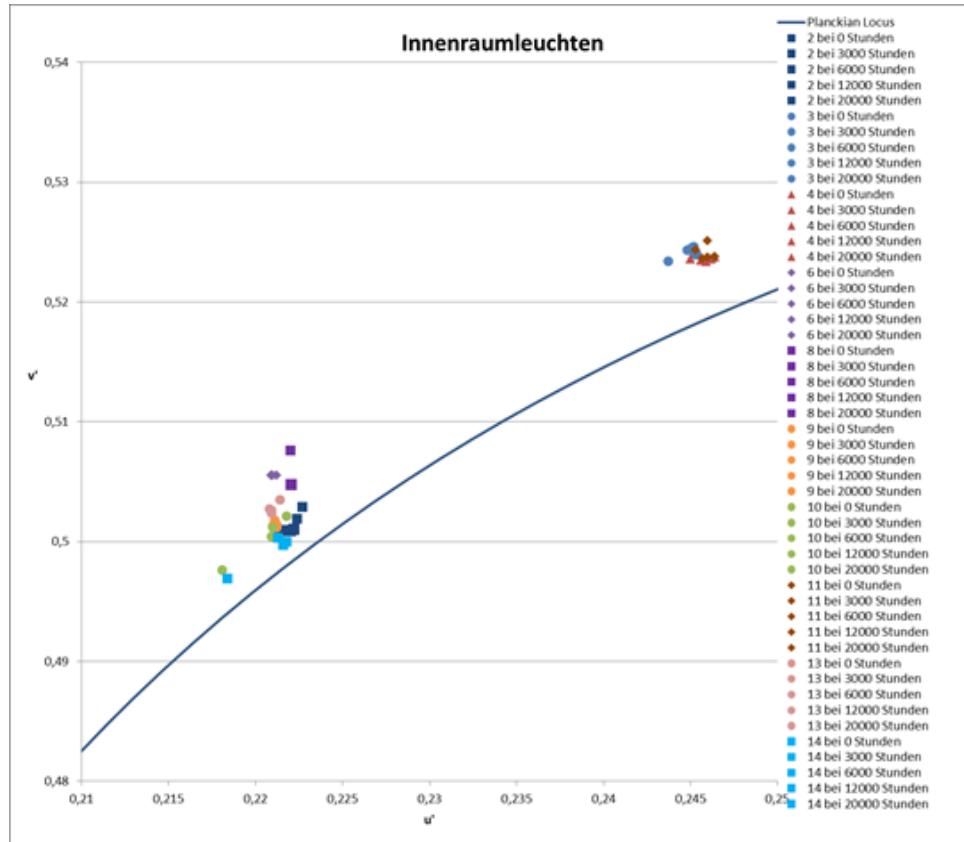


Abbildung 4.4: Farbortverschiebung nach 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 4 % dargestellt.

Abbildung 4.5 zeigt, dass über den Zeitraum von 20.000 Betriebsstunden keine erkennbare Veränderung der Farbtemperatur erfolgte. Die spektrale Messung wurde unter 0° vorgenommen. Die gemessenen Leuchten können gemäß der Abb. 4.5 in zwei Gruppen eingegliedert werden: Gruppe mit Farbtemperatur um 3200 K und Gruppe mit Farbtemperatur um ca. 4200 K. Die HCL-leuchten mit variabler Farbtemperatur und Leuchten mit tageslichtweißer Strahlung mit CCT > 5000 K standen nicht im Testprogramm.

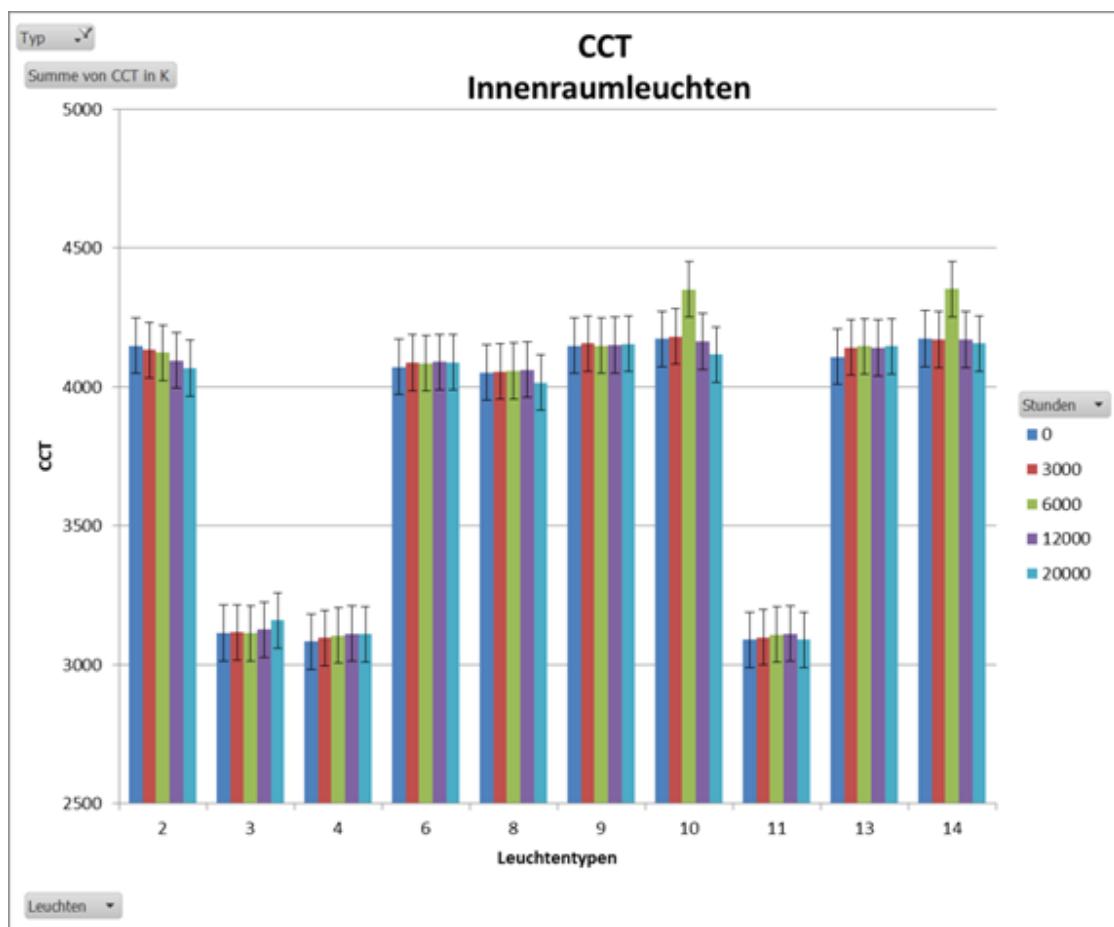


Abbildung 4.5: Farbtemperaturveränderung nach 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 125 K für neutralweiße Temperatur dargestellt.

Die Aufzeichnung der elektrischen Kenndaten zeigte nach 20.000 Betriebsstunden in Bezug auf Spannung, Strom und Leistung bei keiner Leuchte einen signifikanten Unterschied zu den Initialmessungen.

An den Leuchten, die während der Alterung nicht in Betrieb waren, wurden die Initialmessung sowie drei Abschlussmessungen nach 20.000 Alterungsstunden durchgeführt. Dabei wurde jedes Muster direkt nach dem Einschalten, nach dem Erreichen eines stabilen Zustandes und nach 6 Betriebsstunden vermessen. Für diese Auswertung wurden dieselben Parameter betrachtet wie für die dauerbetriebenen Leuchten. Exemplarisch wird der gemessene Lichtstrom dargestellt.

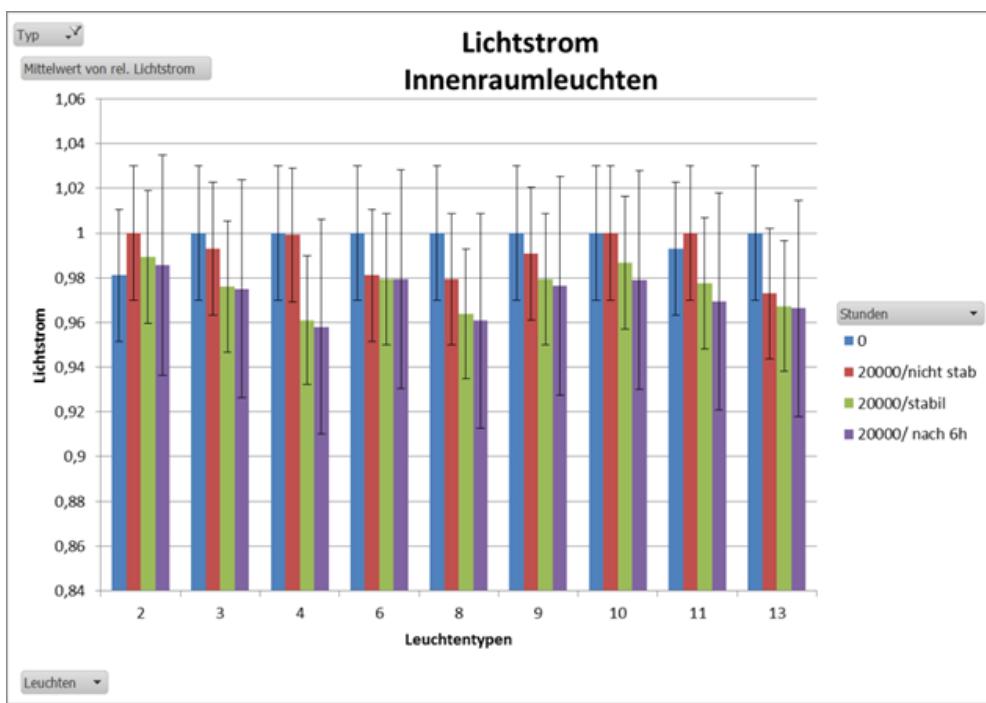


Abbildung 4.6: Degradation des rel. Lichtstroms im Laufe der 20.000 Alterungsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 3 % dargestellt.

In Abbildung 4.6 sind die relativen Lichtstommesswerte für jeden Leuchtentyp dargestellt. Es sind keine signifikanten Lichtstromunterschiede und somit keine Lichtstromdegradation aufgetreten. Auch für die weiteren photometrischen, spektralen sowie elektrischen Parameter, die vermesssen und bewertet wurden, konnten im Rahmen der Auswertung keine auffälligen Unterschiede festgestellt werden.

Analyse der Leuchten-Alterungsdaten

Die durchgeführte Auswertung der photometrischen, spektralen und elektrischen Parameter zeigte im Verlauf der 20.000 Betriebsstunden eine Degradation des Lichtstroms. Ebenso ist im Farbraum CIE 1976 $u'v'$ bei zwei Leuchtentypen eine Farbortverschiebung aufgetreten. Bei den weiteren spektralen und elektrischen Parametern nach 20.000 Betriebsstunden unter Berücksichtigung der Messunsicherheit keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

4.3. Straßenbeleuchtung

Untersuchung der Außenbeleuchtung

Für die Untersuchung der Auslegung langzeitstabiler LED-Leuchten wurden auf die gleiche Weise wie zuvor 5 Typen aus dem Bereich Außenbeleuchtung vermessen. Die dauerbetriebenen Muster wurden initial, nach 3.000, 6.000, 12.000 und final nach 20.000 Stunden in stabilem Zustand vermessen. Die nicht betriebenen Muster wurden initial in stabilem Zustand und nach 20.000

Stunden dreimal vermessen: Direkt nach dem Einschalten, nach Stabilisierung und nach 6 Betriebsstunden. Es wurden die in Abschnitt 4.2 genannten Parameter für die Auswertung betrachtet.

In Abbildung 4.7 sind die relativen Messwerte des Lichtstroms aller Außenleuchten im Laufe der Alterungszeit von 20.000 Stunden dargestellt. Hier werden die relativen Lichtstromwerte aller Messungen miteinander verglichen und untersucht, ob nach der Alterung eine Lichtstromdegradation aufgetreten ist. Aus der Abbildung geht hervor, dass Leuchte Nummer 5 nach der Alterung einen Lichtstromverlust erlitten hat.

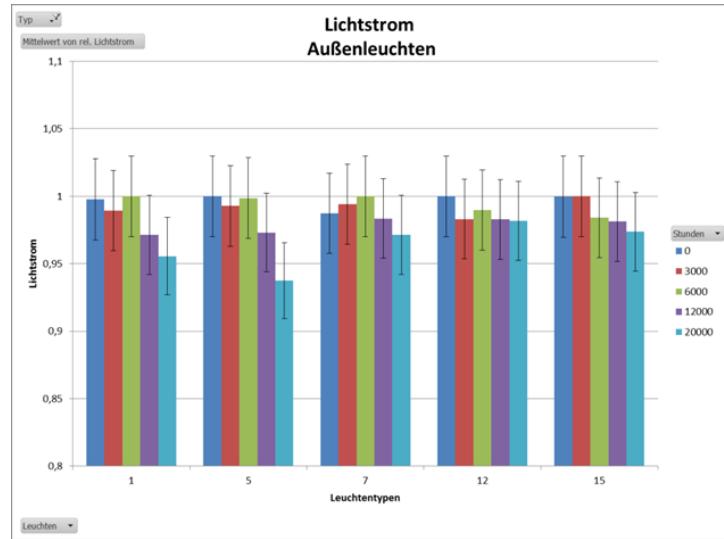


Abbildung 4.7: Degradation des relativen Lichtstroms im Laufe der 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 3 % dargestellt.

Der Farbwiedergabeindex für die Außenleuchten wird in Abbildung 4.8 graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Laufe der 20.000 Betriebsstunden keine signifikanten Unterschiede der CRI-Werte aufgetreten sind. Das bedeutet, dass sich die Farbqualität der Außenbeleuchtung nicht verschlechtert hat.

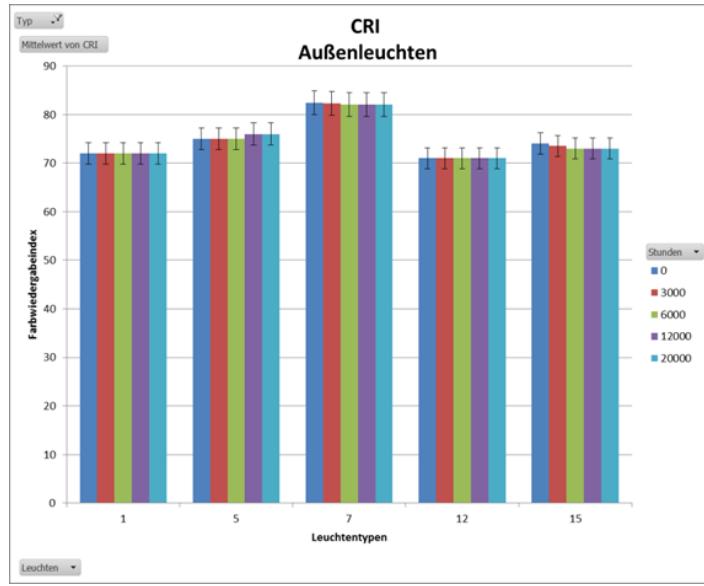


Abbildung 4.8: Farbwiedergabeindex über 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 3 units dargestellt.

Abbildung 4.9 stellt die Farbortverschiebung dar. Die graphische Darstellung erfolgt wie für die Bewertung der Innenraumbeleuchtung im Farbraum CIE 1976. Es ist erkennbar, dass Leuchte Nummer 5 nach der Alterung von 20.000 Stunden eine Farbortverschiebung aufweist. Dieses Muster war auch von einer Lichtstromdegradation betroffen und es könnte ein möglicher Zusammenhang dieser Parameter untersucht werden.

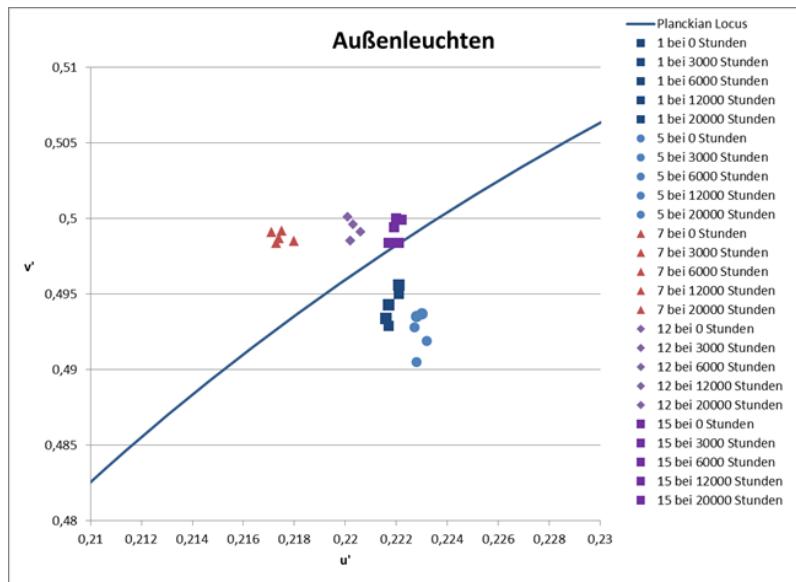


Abbildung 4.9: Farbortverschiebung nach 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 4 % dargestellt.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt, dass im Verlauf der 20.000 Betriebsstunden keine signifikante Veränderung der Farbtemperatur stattgefunden hat. Die spektrale Messung wurde unter 0° vorgenommen.

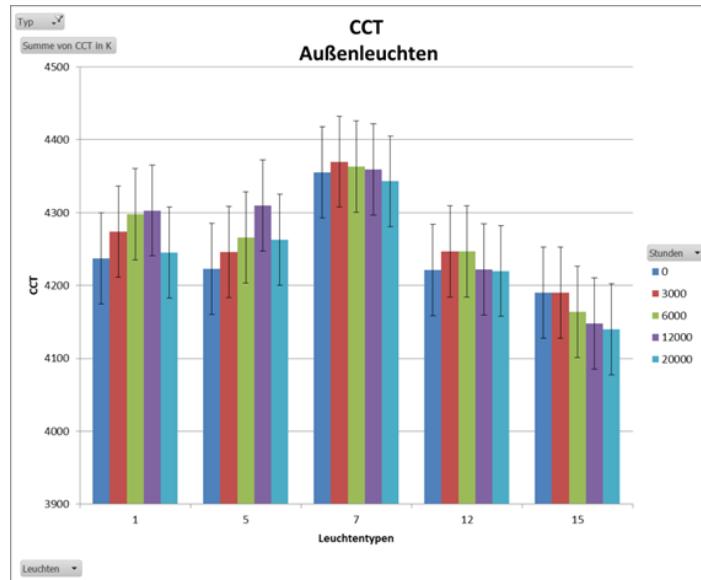


Abbildung 4.10: Farbtemperaturveränderung nach 20.000 Betriebsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 125 K für neutralweiße Temperatur dargestellt.

Die Aufzeichnung der elektrischen Kenndaten zeigte auch im Falle der Außenbeleuchtung nach 20.000 Betriebsstunden keinen erkennbaren Unterschied zu den Initialmessungen.

An den Außenleuchten, die während der Alterung ausgeschaltet in bestimmungsgemäßer Gebrauchsliste auf der Alterungsstrecke montiert waren, wurden die Initialmessung sowie drei Abschlussmessungen nach 20.000 Alterungsstunden durchgeführt. Dabei wurde jedes Muster direkt nach dem Einschalten, nach dem Erreichen eines stabilen Zustandes und nach 6 Betriebsstunden vermessen. Für die Auswertung wurden wieder dieselben Parameter wie zuvor betrachtet. Erneut traten bei keinem der untersuchten Parameter signifikante Unterschiede zur Initialmessung auf. Für die Außenbeleuchtung wird erneut der Lichtstrom exemplarisch dargestellt.

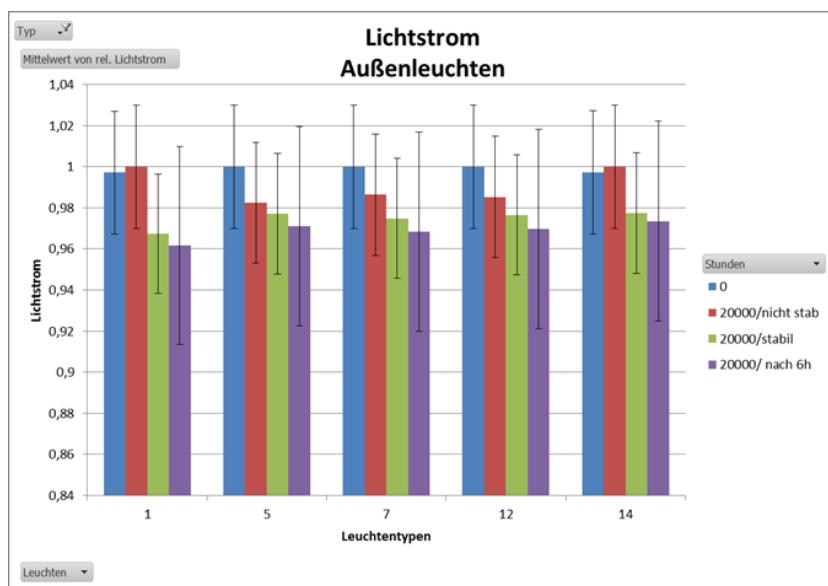


Abbildung 4.11: Degradation des relativen Lichtstroms im Laufe der 20.000 Alterungsstunden. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 3 % dargestellt.

In Abbildung 4.11 sind die relativen Lichtstrommesswerte für jeden Leuchtentyp in Form eines Balkendiagrammes dargestellt. Es sind ebenfalls keine deutlichen Lichtstromunterschiede und somit keine normierte Lichtstromdegradation aufgetreten.

4.3.1. Analyse der Leuchten-Alterungsdaten

Die durchgeführte Auswertung der photometrischen, spektralen und elektrischen Messwerte zeigte im Verlauf der 20.000 Betriebsstunden eine Degradation des Lichtstroms. Ebenso konnte bei einem Muster im Farbraum CIE 1976 u' eine Farbortverschiebung festgestellt werden. Bei den weiteren spektralen und elektrischen Parametern konnten nach 20.000 Betriebsstunden unter Berücksichtigung der Messunsicherheit keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

4.3.2. Analyse der Leuchten-Erwärmungsdaten

Im Rahmen der Abschlussmessungen wurde an allen Mustern eine Erwärmungsmessung an den tc -Punkten der Betriebsgeräte sowie der LED-Module gemäß IEC 60598 durchgeführt. Ziel war ein Vergleich zwischen den dauerbetriebenen und nicht betriebenen Leuchten, um eventuelle Unterschiede zwischen den eingebauten Komponenten festzustellen. Die Leuchten waren bei den Messungen in ihrer jeweiligen Gebrauchslage montiert.

Die erste überprüfte Komponente war das Betriebsgerät. In Abbildung 4.12 ist das Temperaturverhältnis der Betriebsgeräte aller dauerbetriebener Leuchten zu den nicht betriebenen Leuchten dargestellt. Es kann kein erkennbarer Unterschied zwischen den jeweiligen Prüfmustern festgestellt werden.

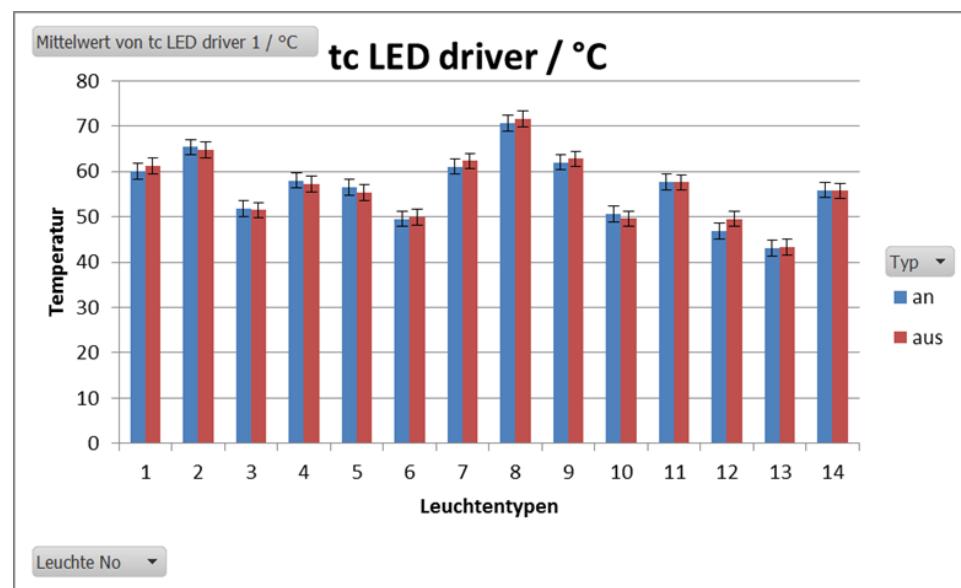


Abbildung 4.12: Temperaturverhältnisse der tc-Punkte der Betriebsgeräte zwischen den dauerbetriebenen und nicht betriebenen Leuchten. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 1,7 °C dargestellt.

Die Erwärmungsmessung wurde ebenso an allen eingebauten LED-Modulen durchgeführt. Die ermittelten Temperaturen sind in Abbildung 4.13 graphisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass auch an den tc-Punkten der LED-Module keine signifikanten Unterschiede zwischen den dauerbetriebenen und nicht betriebenen Mustern aufgetreten sind.

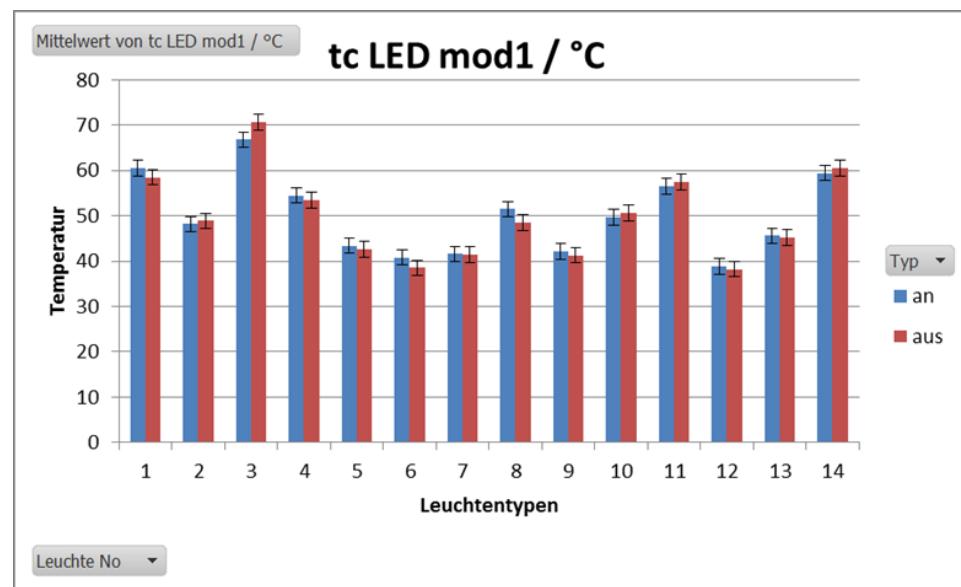


Abbildung 4.13: Temperaturverhältnisse der tc-Punkte der LED-Module zwischen den dauerbetriebenen und nicht betriebenen Leuchten. Die Messwerte sind mit einer Messunsicherheit von 1,7 °C dargestellt.

4.3.3.Zusammenfassung

Die durchgeführte Untersuchung im Rahmen der Überprüfung der qualitativen Anforderungen mit dem Fokus auf Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Farbqualität und Performance bei LED-Leuchten zeigte, dass die heutigen LED-Leuchten im Rahmen des Alterungsprozesses kaum Lichtstromverluste aufweisen, sondern eher eine Farbortverschiebung.

Aus der Untersuchung konnte abgeleitet werden, dass unter den gealterten Leuchten, davon 10 für Innenraum- und 5 für Außenbeleuchtung, bei vier Leuchten aus der Gruppe Innenraumbeleuchtung und einer Leuchte aus der Gruppe Außenbeleuchtung nach 20.000 Betriebsstunden eine erkennbare Lichtstromdegradation aufgetreten ist. Weiterhin ergab die Auswertung, dass die Leuchten mit Lichtstromverlust auch eine Farbortänderung aufweisen. Es war eine Farbortverschiebung in Richtung Blau zu erkennen.

Alle weiteren Parameter für die Beschreibung der Farbqualität sowie der Performance zeigen nach 20.000 Betriebsstunden keine erheblichen Unterschiede.

Die Auswertung der gemessenen Temperaturen aller Leuchten hat gezeigt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen dauerbetriebenen und nicht betriebenen Leuchten festzustellen war.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Einige wichtige Ergebnisse aus den Untersuchungen während der 3-jährigen Projektlaufzeit aus technischer Sicht lassen sich wie folgt zusammenfassen:

5.2. Leuchtenmessung

Die durchgeführte Untersuchung im Rahmen der Überprüfung der qualitativen Anforderungen mit dem Fokus auf Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Farbqualität und Performance bei LED-Leuchten zeigte, dass die heutigen LED-Leuchten im Rahmen des Alterungsprozesses kaum Lichtstromverluste aufweisen, sondern eher eine Farbortverschiebung. Aus der Untersuchung konnte abgeleitet werden, dass unter den gealterten Leuchten, davon 10 für Innenraum- und 5 für Außenbeleuchtung, bei vier Leuchten aus der Gruppe Innenraumbeleuchtung und einer Leuchte aus der Gruppe Außenbeleuchtung nach 20.000 Betriebsstunden eine erkennbare Lichtstromdegradation aufgetreten ist. Weiterhin ergab die Auswertung, dass die Leuchten mit Lichtstromverlust auch eine Farbortänderung aufweisen. Es war eine Farbortverschiebung in Richtung Blau zu erkennen. Alle weiteren Parameter für die Beschreibung der Farbqualität sowie der Performance zeigen nach 20.000 Betriebsstunden keine erheblichen Unterschiede. Die Auswertung der gemessenen Temperaturen aller Leuchten hat gezeigt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen dauerbetriebenen und nicht betriebenen Leuchten festzustellen war.

5.3. Treiber-Elektronik-Tests

Im Verlauf des Projekts wurden insgesamt 75 LED-Betriebsgeräte in fünf Versuchsdurchgängen beschleunigt gealtert. Die Auswertung dieser Versuche ergab wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf das Alterungsverhalten von modernen LED-Betriebsgeräten. In den Versuchen bei trockener Hitze haben sich keine signifikanten Alterungseffekte gezeigt, obwohl die Versuchsdauer mit über 14.000 Stunden die in der Industrie üblichen Testzeiten um ein Vielfaches übertrifft. In diesem Versuch konnte keine signifikante Degradation der Elektrolytkondensatoren beobachtet werden, obwohl diese besonders hitzeempfindlich sind. Es lässt sich schlussfolgern, dass der Elektrolytkondensator bei modernen LED-Betriebsgeräten nicht mehr die Schwachstelle darstellt. Um zu prüfen ob preiswerte Betriebsgeräte den hochwertigen Geräten qualitativ in Bezug auf die Lebensdauer nachstehen, wurde eine eigene Studie durchgeführt. Dazu wurde je eine Stichprobe von den zwei Gerätelassen bei feuchter Hitze beschleunigt bis zum Ausfall gealtert. Die Lebensdauerdaten wurden anschließend mit einem statistischen Verfahren verglichen. Es konnte hierbei keine signifikant längere Lebensdauer der hochwertigen Betriebsgeräte beobachtet werden. Bei den Versuchen mit feuchter Hitze konnten zeitnah Ausfälle von Prüflingen beobachtet werden. Es traten insbesondere Schäden an Filmkondensatoren und Varistoren sowie Korrosion auf. Diese Erkenntnisse sollten beim Entwurf neuer Baugruppen berücksichtigt werden. Schließlich kann die Lebensdauer von LED-Betriebsgeräten bei verschiedenen Umgebungsbedingungen mit Hilfe eines Modells extrapoliert werden. Die Modellparameter wurden nach Bestimmung der Lebensdauer bei drei Umgebungsbedingungen berechnet. Bei kleinen Stichproben kann es hier jedoch zu Problemen mit der

Aussagekraft der Ergebnisse kommen. Nichtsdestotrotz konnte für einen Betriebsgerätetyp ein Modell gefunden werden. Die Parameter stimmen in diesem Fall mit den Angaben in der Literatur überein und können als korrekt angesehen werden.

5.4. LED-Tests

Ein Fokus der Leuchtenentwicklung in den nächsten Jahren liegt in der HCL-Beleuchtung von Innenräumen mit einer Kombination von RGB-LEDs und weißen LEDs. Die Tests bisher an farbigen LEDs zeigen eine sehr starke Änderung der optischen Leistung von grünen LEDs und teilweise von roten LEDs, so dass solche Multikanal- HCL-Leuchten im Laufe der Zeit eine starke Farbverschiebung haben werden. Eine Kompensationsstrategie ist daher notwendig.

Die Degradationskurven von weißen LEDs weisen einige unterschiedliche Abschnitte mit unterschiedlichen Kurvenformen und deuten auf verschiedene Degradationsmechanismen an. Die Daten von 0 h-6000 h und bis 10.000 Stunden sind eher nicht geeignet, um durch eine Extrapolation die Lebensdauer vorherzusagen. Die Methoden der häufig verwendeten amerikanischen Norm wie TM21 sowie der passenden IEC-Norm mit einer exponentiellen Form der Extrapolation sind physikalisch nicht begründet.

Die neueren weißen LEDs ab Baujahr 2015 weisen einen stabileren Lichtstromrückgang. Die Farbverschiebung bleibt ein großes Thema, so dass Kompensationssoftwares für die Leuchten mit optischen Sensoren oder/und mit Temperatursensoren notwendig sind, wenn eine sehr gute Innenraumbeleuchtung erreicht werden soll.

5.5. Ausblick

In der Zukunft sind Zuverlässigkeit von Leuchtelektroniken (Treiberelektronik, Sensorik) wichtig, zumal die Leuchten digitalisiert werden sollen. Die Digitalelektronik sollte daher untersucht werden.

Bisherige LED-Untersuchungen nach LM80 und die Vorhersagen der Lebensdauer nach der Methode von TM21 fanden bisher immer mit konstanten LED-Temperaturen und Strömen. In den realen LED-Leuchtenoperationen sind weder die Temperatur, noch die elektrischen thermischen Leuchtdaten (Spannung, Strom, thermischer Widerstand) zeitlich konstant. Hinzu kommt noch die Feuchtigkeit, die in der globalen Erderwärmung eine große Rolle spielt.

Die cloud-basierte Leuchtenüberwachung mit Sensoren und cloud-fähigen Leuchtelektroniken, Datenabspeicherung, Datenanalyse mit KI-Methoden sowie neue Regelungskonzepte sollen entwickelt und untersucht werden, um die Änderung der Eigenschaften von Leuchten zeitnah zu kompensieren und um die Wartungsfaktoren und Lebensdauer realistisch ermitteln zu können. Dabei sollte die ganze Leuchte oder Verbund von „connected“-Leuchten als Ganzes betrachtet werden. Das ist weltweit neu und im Kontext von Smart Lighting wichtig. Das sollte der Gegenstand eines Nachfolgeprojekts sein.

6. Nutzen und die wirtschaftliche Bedeutung für KMU

Das primäre Ziel des Projekts PQL2, im Vergleich zu dem früheren Projekt PQL1, ist eine Untersuchung der Änderung der lichttechnischen, elektrischen und farbmetrischen Eigenschaften der wichtigsten Baugruppen vertikal entlang der Leuchtenstruktur von LED-Treiber-Elektroniken, LED-Baugruppen bis zu den kompletten fertigen Leuchten in einem Anfangszustand, wie diese im normalen Fall den Anwendern auf dem Markt angeboten sind.

Die Leuchtenindustrie ist im Allgemeinen sehr mittelständisch geprägt. Daher fehlt einer Vielzahl an Firmen technisch und finanziell aufwendiges Equipment für spezielle lichttechnische und elektrische Messungen. Außerdem stellen die Durchführung und Analyse von Messreihen über lange Zeiträume einen besonders hohen personellen Aufwand dar. Im Projekt wird dies von den Forschungseinrichtungen geleistet, woraus kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) sowohl einen wissenschaftlich-technischen, als auch einen wirtschaftlichen Nutzen ziehen können.

Das interessanteste Ergebnis von diesem Projekt PQL 2 ist die Alterung bzw. Degradation der LED-Treiberelektronik durch die TU Darmstadt, Fachgebiet IES. Nicht die Temperatur allein, sondern die Kombination Feuchtigkeit und Temperatur ist die Hauptursache für die Degradation. Das ist ganz wichtig für Länder in Europa, in denen die globale Erwärmung, verbunden mit hoher Temperatur und ungewöhnlich langen Regentagen, bereits Einzug gehalten hat. Technisch sehr nützlich ist die Kenntnis, dass nicht nur die bisher bekannten Elektrolyt-Kondensatoren, sondern die Filmkondensatoren und Varistoren diejenigen elektrischen Bauelemente darstellen, welche ausfallen und dabei die Welligkeit der Spannungsversorgung für LEDs verursachen. Das ist eine neue Erkenntnis und von hohem wissenschaftlichem und technischem Nutzen.

Das erreichte Ziel des Projekts besteht darin, Erkenntnisse über LEDs und deren Wechselwirkungen mit den elektrischen, thermischen und optischen Bauelementen in einer LED-Leuchte zu untersuchen und an die Leuchtenindustrie zu transferieren. Über diesen besonders innovativen Ansatz wurde die Basis geschaffen, sachgerechte, langzeitstabile, wirtschaftlich darstellbare und dauerhaft durch Anwender akzeptierte LED-Produkte zu entwickeln, um auf dem derzeitigen globalen Leuchtenmarkt bestehen zu können. Die Akzeptanz der Anwender kann nur gewonnen, verbessert und nachhaltig stabilisiert werden, wenn die Lebensdauer, die Zuverlässigkeit der Produkte, die Wartungsfreiheit verbunden mit einer langen Garantiezeit durch eine zielstrebige, umfassende und fachlich auf einem hohen Niveau durchgeführte Entwicklungsarbeit gewährleistet werden. Darüber hinaus muss die Qualität der Beleuchtung durch die neuen LED-Produkte, ausgedrückt in Lichtfarbe und Farbwiedergabe durch ein hohes Wissen an farb- und lichttechnischen Eigenschaften der LED-Systeme bewusst verwendet und hervorgehoben werden. Alle Erkenntnisse über die lichttechnischen, optischen, thermischen, fertigungstechnischen und elektrischen Eigenschaften von LED-Leuchten als System und nicht nur als Komponente wurden auf direktem Weg über Workshops, Vorträge und über Besuche bei und von den Firmen transferiert und erläutert. Die Summe an Erkenntnissen und auch wichtigen praktischen Erfahrungen, gepaart mit Marktbeobachtungen und der Analyse der internationalen Normen können nun in Vorschlägen für Richtlinien und Normen (Branchen-Normen, internationalen und kontinentalen Normen) einen nachhaltigen und aussagekräftigen Niederschlag finden.

Ein wichtiger Teil der Projektarbeit war die Alterung von farbigen LEDs, neuen entwickelten LEDs auf der Basis von Chip-Scale-Package Technologie, Chip-on-Board, weißen Hochleistungs- und Mittelleistungs-LEDs. Die Ergebnisse sind für KMU von hoher Bedeutung, da genau die LEDs untersucht werden, die von den mittelständischen Firmen eingesetzt werden. Ohne die unabhängigen Forschungsergebnisse muss bei der Produktentwicklung allein auf Alterungsberichte zurückgegriffen werden, die nur teilweise die für den Betrieb gewünschten Betriebsbedingungen beinhalten. Die anhand der Degradationskurven von Lichtströmen, Farborten und Spektren nach mehr als 10.000 Stunden wurden die Mechanismen, die Ursachen, die Unzulänglichkeiten im LED-Aufbau sichtbar gemacht und erläutert. Das ist von großem Nutzen für die Leuchtenhersteller, die damit unabhängige LED-Alterungsdaten und Lebensdauerwerte analysiert und vermittelt bekommen, um die LED-Auswahl und die Betriebsbedingungen zu optimieren. Es wurde deutlich, welche Parameter bei der Alterung wichtig sind und warum die Alterungsrate in manchen Fällen höher war, als durch die LED-Hersteller erwartet wurde. Diese Erkenntnisse wurden in vielen turnusmäßigen Treffen mit der Industrie, aber auch in einem im Antrag nicht vorgesehenen Sonderworkshop über Chip-on-Board ausführlich präsentiert und erklärt.

Im Zeitraum 2014 bis 2019 und sicherlich später bis zu den Jahren 2028-2030 werden die HCL-Leuchten mit variablen Farbtemperaturen, Lichtströmen und Spektren in großem Umfang weltweit entwickelt, um die richtigen Lichtbedingungen auf die menschlichen Bedürfnisse in Abhängigkeit von Jahreszeit (Winter, Sommer) und Uhrzeit (z.B. Vor- und Nachmittag, Frühschicht und Spätschicht) anpassend einzustellen. Solche Leuchten werden vermehrt farbige LEDs in Kombination mit weißen LEDs einsetzen. Daher ist die Kenntnis der TU Darmstadt aus dem Projekt PQL 2, warum und wie die grünen Halbleiter-LEDs so stark degradieren, wichtig, um für die HCL-Leuchten die richtigen Kompensationsmechanismen zu programmieren. Diese im Projekt erworbenen Kenntnisse sind von kleinen mittelständischen Unternehmen aufgrund von knappen Ressourcen nur sehr schwierig selbst zu erarbeiten. Außerdem dienen sie der Vorbereitung neuer industrieller Anwendungsmöglichkeiten.

Ein zweiter wichtiger Teil des Projektes war die Leuchtenanalyse. Durch die enge Zusammenarbeit von VDE und TU Darmstadt konnten in klarer Absprache mit den Leuchtenfirmen Leuchten goniophotometrisch, farbmatisch und elektrisch vermessen werden. Diese Messergebnisse wurden bilateral zwischen der TU Darmstadt und dem VDE auf der einen Seite beim Vergleich der Testergebnisse der Leuchten (VDE) mit denen der LED-Module (TU Darmstadt) und in persönlichen Treffen mit den technischen Leitern oder Laborleitern der Firmen in vertrauensvoller Atmosphäre erörtert. Daraus konnten Schwächen, Unzulänglichkeiten und Verbesserungspotentiale in den Firmen herausgearbeitet und direkt angesprochen werden. Nur wenn die Leuchtenfirmen ihre Leuchtdaten korrekt messen und angeben, können die Anwender und Lichtplaner ihre Beleuchtungsobjekte (Gebäuden, Straßen) korrekt und normgerecht dimensionieren und planen.

Die gemessenen Leuchten wurden in Laborräumen von VDE bis zum Ende der Projektarbeit kontrolliert bis zu 18.000-20.000 Stunden gemäß den Normen LM80 und TM 21 gealtert. Die Alterungsrate, die Farbverschiebungen und Änderungen der Farbwiedergabewerte, deren Ursachen und die Änderungen der farbmatischen und spektralen Parameter wurden in mehreren Treffen in Vorträgen erläutert. Die wiederholten lichttechnischen Messungen von Leuchten sind nicht bei allen KMU möglich und daher mit erheblichem finanziellem Aufwand verbunden. Somit schafft das Projekt den Firmen einen wirtschaftlichen Nutzen durch Kosten und Aufwandseinsparung.

7. Erläuterung zur Verwendung der Zuwendung

Im Folgenden werden die geleisteten Personenmonate (Einzelansatz A.1, für wiss.-techn. Personal) für die jeweilige Forschungseinrichtung aufgeführt.

Jahr	FE 1 (HPA-A)	FE 2 (HPA-A)	FE 3 (HPA-A)	FE 3 (HPA-B)
2016	1,0 PM	1,0 PM	0,2 PM	0,1 PM
2017	12,0 PM	12,0 PM	4,8 PM	7,8 PM
2018	16,0 PM	12,0 PM	7,5 PM	3,2 PM
2019	7,0 PM	6,5 PM	3,7 PM	2,4 PM
Gesamt	36,0 PM	31,5 PM	16,2 PM	13,5 PM

Die Ausgaben für Gerätebeschaffung waren nur für die Forschungseinrichtung 2 angesetzt. Hier wurde ein Klimaprüfschrank zur Alterung von Treiberelektronik angeschafft, dessen Ausgaben sich auf 23.443 € belaufen. Leistungen Dritter (Einzelansatz C) wurden nicht geltend gemacht.

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war damit notwendig und angemessen.

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet.

8. Ergebnistransfer in die Wirtschaft – Überblick

In folgender Tabelle sind die bisher durchgeführten Transfermaßnahmen in einzelnen Kategorien aufgeführt.

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
A	Ergebnisse aus Messungen, Analysen; Feedback	A1: Ganztägige Schulung (bei den Forschungsstellen)	halbjährlich ab Projektstart 2016-2019
	Drei Projekttreffen mit PA bei den drei Forschungsstellen in folgender Reihenfolge: TU Darmstadt (FGLT), TU Darmstadt (IES), Offenbach (VDE) (alle FE)		1.12.2016, 21.3.+24.10.2017
	Drei Projekttreffen mit PA bei den drei Forschungsstellen in folgender Reihenfolge: Kamp-Lintfort (Vossloh-Schwabe), TU Darmstadt (FGLT), TU Darmstadt (IES) (alle FE)		16.01.+17.04.+24.10. 2018
	Zwei Projekttreffen mit PA bei den drei Forschungsstellen in folgender Reihenfolge: Offenbach (VDE), TU Darmstadt (FGLT) (alle FE)		01.04.+28.08.2019
B	Austausch mit Wissenschaft und Anwendern	B1: VDI Konferenz ¹⁾	2016/2017/2018-/2019
	Wagner, Max; Herzog, Alexander; Khanh, Tran Quoc International diskutierte alternative Methoden zu Lebensdauervorhersagen im Vergleich zu TM-21, VDI Tagung: Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung (FE 1)		5./6.07. 2017
		B4: ETP Kongress ⁴⁾	2017
	Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: Die LED-Leuchte als optimale Lösung? Eine kritische Auseinandersetzung, ETP-Kongress "Straßenbeleuchtung 2019", Hamburg (FE 1)		19.-21.02.2019
	Keil, Ferdinand: LED-Betriebsgeräte Neues aus der Forschung, ETP-Kongress "Straßenbeleuchtung 2019", Hamburg (FE 2)		
		B6: Lux junior	2017
	Herzog, Alexander; Khanh, Tran Quoc: Die elektrische, thermische und optische Charakterisierung der Degradationsmechanismen von Leuchtdioden im UV-A Bereich. In: Lux junior 2017, Ilmenau. Tagungsband Lux junior 2017 (FE 1)		8.-10.09.2017
		B7: LitG-Tagung ⁶⁾	2017
	Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: LED degradation - recent data and internationally discussed methods for LED lifetime calculation. In: Swiss Photonics: From Daylight to Lighting 4.0, Dübendorf, Zürich. (FE 1)		6.11.2017
	TÜV Rheinland: „12. Infotag Leuchten“: LEBENSDAUER, Alterung und Zuverlässigkeit von LED: Änderungen elektrischer, spektraler und farbmétrischer Eigenschaften weißer LEDs, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, M.Sc. A. Herzog, Dipl.-Phys. Max Wagner, Dr. Trinh Quang Vinh, Dipl.-Ing. H. Ganey, Fachgebiet Lichttechnik TU Darmstadt (FE 1)		17.10.2017
	Wagner, Max; Herzog, Alexander; Khanh, Tran Quoc: Heat Fluxes and Temperatures in Chip-on-Board LEDs for Different Package Structures and Phosphor Technologies. In: LED professional Symposium + Expo 2018, Proceedings of the 8th LED professional Symposium + Expo Luger Research e.U., Bregenz (FE 1)		25.-27.09.2018
		B8: VDE/ZVEI Workshop ⁷⁾	
	VDE-Infotag Licht und Beleuchtung in Offenbach (FE 3)		29.10.2019
C	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende	C1: Vorlesungen	2016-2019; durchgehend
	Vorlesung Halbleiterlichttechnik: Lebensdauer und Fehlermechanismen (FE 1)		Ende 2019
		C2: Seminare	
	Projektseminar Praktische Entwicklungsmethodik II: Entwicklung eines automatisierten Messsystems für spektrale Messungen von LED-Modulen (FE 1)		12.06.2018
		C3: Praktikumsversuche	
	Praktikum Halbleiterlichttechnik (Charakterisierung von Leuchtdioden) (FE 1)		2018+2019
	Praktikum LT II (Leuchtdioden im sichtbaren und ultravioletten Strahlbereich) (FE 1)		
		C4: Dissertation	
	Wagner, Max: Einfluss von Temperatur und Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen, TU Darmstadt, https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8208 (FE 1)		23.05.2018
D	Vermittlung für Normung und Anwendung	D2: Fachausschüsse	2016-2019
	Wagner, Max; Herzog, Alexander: Expert panel on LED lumen maintenance projection, International telephone call, PRESCO PT IEC 63013 (FE 1)		November 2016

Ergebnisse der Maßnahmen

Maßnahme E	Bekanntmachung Vorhaben und Ziele	E1: Webpräsenz, -news	2016-2019
	Wagner, Max: Beschleunigtes Altern von LEDs wissenschaftlich untersucht. In: Elektronik Praxis, Vogel Business Media https://www.elektronikpraxis.vogel.de/beschleunigtes-altern-von-leds-wissen-schaftlich-untersucht-a-534634/ (FE 1)		Mai 2016
	Wagner, Max: In: Planerbrief 21 https://www.dgwz.de/strassenbeleuchtung_(FE_1)		Juli - August 2019
		E2: Publikumswirks. Veröffentlichungen (Licht, LEDs Magazine)	ab Projektstart
	Hui, Z.; Wagner, M; Khanh, T. Q.: Comparing New Dielectric Materials for Chip-on-Board LED Packages. LED professional Review (LpR) (58) pp. 50-53, ISSN 1993-890X (FE 1)		Nov/Dez. 2016
	Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: Vermessung von LED-Leuchten - Einfluss von Einbrennverlauf und Brennlageverhalten, In: Licht, Pflaum, (3/17), ISSN 0024-2861 (FE 1)		Mai 2017
	Wagner, Max; Herzog, Alexander G.; Ganev, Hristo; Khanh, Tran Quoc: Lifetime Calculation of White HP-LEDs from 16,000 Hours Aging Data. In: LED professional Review (LpR) (59) pp. 34-38, ISSN 1993-890X (FE 1)		April 2017
	Herzog, A., Wagner, M., Khanh, T. Q.: Degradation of green high-power LEDs - Influence on color stability of multi-channel luminaires. In: LED professional Review (LpR) (FE 1)		Anfang 2020
	Herzog, A., Wagner, M., Khanh, T. Q.: Efficiency droop in green InGaN/GaN light emitting diodes: Degradation mechanisms and initial characteristics. In: Microelectronics Reliability (FE 1)		Anfang 2020
Maßnahme F	Erfahrungsaustausch: Anwender Hilfe bei Problemlösung	F1: Bilaterale Treffen mit Herstellern / Energieversorgern	unregelmäßig ab Projektstart
	Bilaterales Treffen mit Vossloh-Schwabe zum Thema Beschleunigtes Testen (FE 2)		Februar 2017
	Workshop zu LED-Treiber Zuverlässigkeit für Mitarbeiter der Adolf Schuch GmbH (FE 2)		17.05.2019
	Erstellung eines individuellen Ergebnisberichts für BÄRO und PRACHT (FE 2)		Mai 2019
	Häufige Gespräche mit Firmen wie Osram OS, Fa. Schuch, Fa. WE-EF, Fa. Bäro, Fa. Pracht (FE 1)		Projektstart bis Ende 2019

- 1) Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung
- 2) Test- und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, GI/GMM/ITG
- 3) CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conference
- 4) Straßenbeleuchtung
- 5, 6) Stadt- und Außenbeleuchtung
- 7) LED/OLED-Anwendungen in der allgemeinen Beleuchtung
- 8) Lichttechnische Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz

Folgende Maßnahmen wurden noch nicht durchgeführt.

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme B	Austausch mit Wissenschaft und Anwendern	B2: Workshop TuZ ²⁾	Frühjahr 2017/2018/2019
		B3: CIE Conference ³⁾	2017
		B5: Fachtagung Dresden ⁵⁾	2017
		B7: LitG-Tagung ⁶⁾	2017
		B9: LICHT	2016 und 2018
Maßnahme D	Vermittlung für Normung und Anwendung Gremienarbeit	D1: Normung (VDE)	2016-2019

- 2) Test- und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, GI/GMM/ITG

- 3) CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conference

- 5, 6) Stadt- und Außenbeleuchtung

- 8) Lichttechnische Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz

Die einzelnen Konferenzen und Tagungen wurden aufgrund weiterer Konferenzteilnahmen (siehe Tabelle oben) während der Projektlaufzeit nicht besucht. Da es meist jährlich stattfindende Veranstaltungen sind, kann dies in Zukunft noch nachgeholt werden. In der Normung konnte sich bei der Forschungseinrichtung VDE bisher noch nicht geeinigt werden.

Folgende Maßnahmen sind nach der Projektlaufzeit bereits durchgeführt oder in Planung.

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum	
Maßnahme G Transfer in die Wirtschaft	Nutzbarmachung der wesentlichen Ergebnisse	G1: Beiträge in Fachzeitschriften Aus den Projektergebnissen sind bereits weitere Beiträge in renommierten Fachzeitschriften (LRT, Microelectronics Reliability, Leukos) eingereicht. (FE 1)	nach Projektabschluss	
		Wagner, M; Khanh, T.Q., Beitrag zum Thema LED-Alterung, Zeitschrift LICHT	März 2020	
		G2: Konferenzen/Workshops		
		SSLCHINA2019, F. Keil, K. Hofmann, A Comparative Study of the Lifetimes of High-End and Low-Cost Off-Line LED Drivers Under Accelerated Test "Conditions (FE 2)	26.11.2019	
		TÜV Rheinland Straßenbeleuchtungs-Forum III, Köln, Vortrag „Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf moderne LED-Betriebsgeräte“ (FE 2)	04.02.2020	
		18. EUROFORUM Kongress „Straßenbeleuchtung 2019“, Hamburg, Vortrag „Lebensdauer von LED-Vorschaltgeräten: Neues aus der Forschung“ (FE 2)	20.02.2019	
		19. EUROFORUM Kongress „Straßenbeleuchtung 2020“, Stuttgart, Vortrag „Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung in der städtischen Straßenbeleuchtung aus Fahrersicht“ (FE 1)	04.02.2020	
		Konferenz LICHT, Bamberg: Vortrag „Zuverlässigkeit von LED-Modulen bei variablen Feuchtigkeiten und Temperaturen“ Simon Benkner (FE 1)		
		G3: Individuelle Beratung Industrie/öffentl. Einrichtungen		
		G4: Vorträge/Infoveranstaltungen bei Normungsgremien		
Maßnahme H Folgeprojekte	Aufbau/Weiterführung der Forschungsaktivitäten	H1: Zuverlässigkeit von integrierten Hochvolt-Systemen	ab Sommer 2018	
		H2: Kooperationsprojekte mit Industrie		
Es sind weitere Kooperationsprojekte mit der Industrie in Planung. (FE 1+2)			Planung seit 2019	
KMU-Initiative mit Fa. Schuch und Mainova Frankfurt zur Untersuchung von realen Leuchten in einem Viertel in Frankfurt über 2 Jahre auf Lebensdauer und Zuverlässigkeit mit KI-Methoden			Einreichung 2020	
ZIM-Projekt mit der Fa. DH Licht zur Untersuchung der Zuverlässigkeit von LED-Leuchten in Gewächshäusern mit hoher Feuchtigkeit und hoher Temperatur			Einreichung April 2020	
Maßnahme I Lehre an der TUDa und Weiterbildung beim VDE	Kompetenzvermittlung für wiss. Nachwuchs	I1: Vorlesungen/Seminare	nach Projektende	
Vorlesungen, Praktika und ein Masterseminar sind im Aufbau und finden in den nächsten Semestern statt. (FE 1+2)				
		I2: Hausinterne Weiterbildungen (VDE)		
Weitere Weiterbildungen (z.B. LED-Infotag) werden angeboten. (FE 3)				
		I3: Vorbereitung Promotionen		
Zurzeit laufen zwei Promotionen, die einen direkten Bezug zum Projekt aufweisen. (FE 1+2)			Im Projekt und nach Projektende	

9. Literatur

- [1] CIE, CIE 154:2003, Report: The maintenance of outdoor lighting systems, CIE Central Bureau, Vienna, 2003.
- [2] CIE, CIE 97:2005, Report: Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems, 2. Aufl., CIE Central Bureau, Vienna, Austria, 2005.
- [3] DOMINGUEZ-GARCIA, A. D.: Reliability modeling of cyber-physical electric power systems: A system-theoretic framework.
In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting - New Energy Horizons - Opportunities and Challenges, S. 1–5, 2012.
- [4] GANEV, H.; KHANH, T. Q.: Änderungen elektrischer, spektraler und farbmetrischer Eigenschaftenweißer LEDs nach 9000 Brennstunden.
In: VDI, Hrsg., VDI-Konferenz - Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 2014.
- [5] HÄRTER, S.; REINHARDT, A.; FRANKE, J.; DOHLE, R.; GOßLER, J.: Reliability Study of Lead-Free Flip-Chips with Solder Bumps Down to $30\text{ }\mu\text{m}$ Diameter.
In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the 62nd IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), S. 583–589, 2012.
- [6] HARTMANN, P.: Herausforderungen der Farbkonversion für Lichtqualität und Lebensdauer von Phosphor-konversions-LEDs.
In: VDI, Hrsg., VDI-Konferenz - Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 2014.
- [7] HESS AG: Design LED-Strassenbeleuchtung, Villingen-Schwenningen, 96 S., Quelle: http://www.hess.eu/dldfile/Hess_LED-Strassenleuchten_2011.pdf, HESS AG, HRSG., 2011, abgerufen am 05.03.2015.
- [8] IES, LM-80-08, Approved Method: Measuring lumen maintenance of LED light sources, IESNA, New York, N.Y., 08/2008.
- [9] IES, TM-21-11: Projecting long term lumen maintenance of LED light sources, ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, New York, NY, 07/2011.
- [10] JACOB, P.: Fehlermechanismen bei LED-Ausfällen.
In: VDI, Hrsg., VDI-Konferenz - Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 2014.
- [11] JORDAN, R.: LED Aufbau- und Verbindungstechnik in Mid-Power und Chip-on-Board Systemen.
In: VDI, Hrsg., VDI-Konferenz - Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 2014.
- [12] JUNG, M.-S.; LEE, S.-B.; LEE, H.-Y.; RYU, C.-S., ET AL.: Improvement of Electrochemical Migration Resistance by Cu/Sn Intermetallic Compound Barrier on Cu in Printed Circuit Board.
In: IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 14, 1, 2014, S. 382–389.
- [13] KHANH, T. Q.; BODROGI, P.: Ganzheitliche Optimierung – Human Centric Lighting und Farbwahrnehmung.
In: Licht, Vol. 67, 4, 2015, S. 88–94.
- [14] KHANH, T. Q., BODROGI, P., TRINH, Q. V., WINKLER, H., Hrsg.: LED Lighting – Technology and Perception, Hoboken, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 517 S., 2014, ISBN 978-3-527-41212-9.
- [15] KHANH, T. Q.; GANEV, H.: Wartungsfaktor von LED-Leuchten bezüglich Lichtstromdegradation und Farbortverschiebung.

In: VDI, Hrsg., VDI-Konferenz - Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, 2014.

- [16] KHANH, T. Q.; SCHWENZFEIER-HELLKAMP, E.; HOMEYER; KAI, ET AL.: Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL) – Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben, Quelle: http://www.lichttechnik.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_lichttechnik/das_fachgebiet/Abschlussbericht-PQL.pdf, 2014.
- [17] KHANH, T. Q.; SCHWENZFEIER-HELLKAMP, E.; HOMEYER; KAI, ET AL.: Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL) – Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben, Quelle: http://www.lichttechnik.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_lichttechnik/das_fachgebiet/Abschlussbericht-PQL.pdf, 2014.
- [18] KHAZAKA, R.; MENDIZABAL, L.; HENRY, D.; HANNA, R.: Survey of High-Temperature Reliability of Power Electronics Packaging Components. In: IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, 5, 2015, S. 2456–2464.
- [19] KWON, D.; AZARIAN, M. H.; PECHT, M.: Detection of solder joint failure precursors on tin-lead and lead-free assemblies using RF impedance analysis. In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, S. 663–667, 2009.
- [20] LALL, P.; LOWE, R.; GOEBEL, K.: Resistance spectroscopy-based condition monitoring for prognostication of high reliability electronics under shock-impact. In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, S. 1245–1255, 2009.
- [21] LENAHAN, P.: Atomic scale defects involved in MOS reliability problems. In: Microelectronic Engineering, Vol. 69, 2-4, 2003, S. 173–181.
- [22] LI, J.; DONG, H.; VUORINEN, V.; KARPPINEN, J., ET AL.: Improved methods for development of high reliability electronics. In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, S. 1–13, 2014.
- [23] MA, K.; YANG, Y.; BLAABJERG, F.: Transient modelling of loss and thermal dynamics in power semiconductor devices. In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, S. 5495–5501, 2014.
- [24] MIHAN, K. K.; STACEY, B. J.; MONTOR, T.: Interdisciplinary Design Optimization for High-speed Packages and Interconnects. In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE, Piscataway, S. 389–395, 1995.
- [25] MIYOSHI, T.; TOMINARI, T.; HAYASHI, Y.; OSHIMA, T., ET AL.: Reliability improvement in field-MOS FETs with thick gate oxide for 300-V applications. In: IEEE, Hrsg., Proceedings of The 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, S. 393–396, 2013.
- [26] PEPLER, W., SCHILLER, C., KHANH, T. Q., Hrsg.: Kommunen in neuem Licht – Praxiserfahrungen zur LED in der kommunalen Beleuchtung, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projektes »EvalKomm« (Förderkennzeichen 13N11100), Düsseldorf, Siebel Druck und Grafik, 44 S., 2013.
- [27] POMPL, T.; SCHLÜNDER, C.; HOMMEL, M.; NIELEN, H.; SCHNEIDER, J.: Practical aspects of reliability analysis for IC designs. In: ACM, Hrsg., Proceedings of the 43rd annual Design Automation Conference, New York, S. 193–198, 2006.
- [28] PREUSSGER, A.: Strategy of Future Reliability Qualification. In: IEEE, Hrsg., International Integrated Reliability Workshop Final Report, S. 216–217, 2006, ISBN 1-4244-0296-4.

- [29] PREUSSGER, A.; KANERT, W.; GERLING, W.: Reliability qualification of a smart power technology for high temperature application based on physics-of-failure and risk & opportunity assessment.
In: IEEE, Hrsg., 41st IEEE International Annual Reliability Physics Symposium Proceedings, S. 378–384, 2003, ISBN 0-7803-7649-8.
- [30] SCHILLER, C.; KUHN, T.; KUTSCHENKO, W.; BRÜCKNER, S.; KHANH, T. Q.: Lichttechnische und technologische Aspekte der LED-Straßenbeleuchtung.
In: Licht, Vol. 62, 7-8, 2010, S. 536–542.
- [31] SHUANG YANG; JI WU; PECHT, M. G.: Reliability Assessment of Land Grid Array Sockets Subjected to Mixed Flowing Gas Environment.
In: IEEE Transactions on Reliability, Vol. 58, 4, 2009, S. 634–640.
- [32] TUTTLE, R. C.: Method for Projecting Color Shift of High Power LED Packages.
In: LUGER RESEARCH E.U., Hrsg., LpS 2014 - 4th International LED professional Symposium +Expo, 2014.
- [33] WAGNER, M.: Methods of extrapolation of the LED life time and their comparison based on some LED degradation curves.
In: CSA, Hrsg., Proceedings of the 11th China International Forum on Solid State Lighting, 2014.
- [34] WANG, H.; LISERRE, M.; BLAABJERG, F.: Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities.
In: IEEE Ind. Electron. Mag. (IEEE Industrial Electronics Magazine), Vol. 7, 2, 2013, S. 17–26.
- [35] WOLFGANG, E.: Examples for failures in power electronics systems.
In: ECPE, Hrsg., ECPE Tuorial - Reliability of Power Electronic Systems, 2007.
- [36] YANG, Y.-H.; SU, Y.-F.; CHIANG, K.-N.: Acceleration factor analysis of aging test on gallium nitride (GaN)-based high power light-emitting diode (LED).
In: IEEE, Hrsg., Proceedings of the Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, S. 178–181, 2014.
- [37] YAZDAN MEHR, M.; VAN DRIEL, W. D.; JANSEN, K.; DEEBEN, P.; ZHANG, G. Q.: Lifetime assessment of Bisphenol-A Polycarbonate (BPA-PC) plastic lens, used in LED-based products.
In: Microelectronics Reliability, Vol. 54, 1, 2014, S. 138–142.
- [38] ZHAGA: Overview of Zhaga Books,
Quelle: <http://www.zhagastandard.org/books/overview/>, 2015, abgerufen am 02.05.2015.

Anhang

A Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Veranstaltungen	105
A1 Reguläre Informationsveranstaltungen des PA (halbjährlich)	105
A1.1 1. Sitzung (Kick-off Veranstaltung) am 01.12.2016, Darmstadt	105
A1.2 2. Sitzung am 21.03.2017, 9.00 Uhr – 16.00 Uhr, Darmstadt	105
A1.3 3. Sitzung am 24.10.2017, 11.00 Uhr – 16.00 Uhr, Offenbach.....	105
A1.4 4. Sitzung (Sondersitzung zum Thema COB) am 16.01.2018, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Kamp-Lintfort	105
A1.5 5. Sitzung am 17.04.2018, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Darmstadt (LT)	106
A1.6 6. Sitzung am 24.10.2018, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Darmstadt (IES)	106
A1.7 7. Sitzung am 01.04.2019, 11.00 Uhr – 16.00 Uhr, Offenbach (VDE)	106
A1.8 8. Sitzung am 28.08.2019, 10.00 Uhr – 16.00 Uhr, Darmstadt (LT)	107
A2 Sonderveranstaltungen für den PA (und weitere Interessierte)	107
A2.1 Workshop des VDE: LED-Infotag Oktober 2019 in Offenbach:	107
B Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Publikationen	108
B1 Publikationen der TU Darmstadt, LT	108
B2 Publikationen der TU Darmstadt, IES.....	108
B3 Publikationen des VDE.....	108

A Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Veranstaltungen

A1 Reguläre Informationsveranstaltungen des PA (halbjährlich)

A1.1 1. Sitzung (Kick-off Veranstaltung) am 01.12.2016, Darmstadt

Gegenseitige Vorstellung der beteiligten Industrie- und Forschungspartner sowie organisatorische Absprachen.

A1.2 2. Sitzung am 21.03.2017, 9.00 Uhr – 16.00 Uhr, Darmstadt

Sitzung der Industriepartner (Projektbegleitender Ausschuss) von 9.00-10.00 Uhr

Projekttreffen ab 10.00 Uhr

- Begrüßung
- Stand der Dinge
- Berichte Lieferung der Leuchten
- Diskussion
- Besichtigung des Labors bei IES

A1.3 3. Sitzung am 24.10.2017, 11.00 Uhr – 16.00 Uhr, Offenbach

- Begrüßung
- LED-Betriebsgeräte, *F. Keil und Prof. Hofmann*
- Ergebnisse nach 3000 Betriebsstunden, *VDE*
- Bisherige Arbeiten und Ergebnisse der letzten sechs Monate, *Prof. Khanh*
- Chip on Board- Alterungsergebnisse nach 4000 Stunden, Methoden, Aufbau, *Wagner*
- Auswertung von Alterungsergebnissen von PQL1-LEDs nach 20.000 Stunden- elektrische, optische und farbmetrische Änderungen, *M. Wagner*
- Diskussion und nächste Schritte
- Besichtigung des Lichtlabors am VDE

A1.4 4. Sitzung (Sondersitzung zum Thema COB) am 16.01.2018, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Kamp-Lintfort

- Begrüßung, *V.Neu*
- COB-Themen
- Besichtigung der Fertigung bei Vossloh-Schwabe

A1.5 5. Sitzung am 17.04.2018, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Darmstadt (LT)

- Begrüßung
- Alterung und erste Ergebnisse der Charakterisierung von farbigen HP-LEDs- photometrische, radiometrische und elektrische Daten, *A. Herzog*
- Hängt die Alterung von Strompulsformen ab- Alterung von LEDs bei verschiedenen Stromarten und erste Ergebnisse, *D. Josefus*
- Alterungsergebnisse von COB-Modulen – Modellentwicklung, *M. Wagner*
- LED-Vorschaltgeräte, Ergebnisse nach 5300 Stunden, *F. Keil*
- Auswertung von Alterungsergebnissen von PQL1-LEDs nach 20.000 Stunden – elektrische, optische und farbmétrische Änderungen, *M. Wagner*
- Ergebnisse nach 6000 Betriebsstunden, *D. Zdravkovic-Stojanovic*
- Diskussion und nächste Schritte
- Besichtigung des Alterungsraums am Fachgebiet Lichttechnik

A1.6 6. Sitzung am 24.10.2018, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Darmstadt (IES)

- Begrüßung
- Ergebnisse der EVG-Alterung mit und ohne Feuchtigkeit, *F. Keil*
- Midpower und Chip-Scale, *S. Klir*
- Alterungsergebnisse High CRI, *S. Benkner*
- Messergebnisse nach 12000 Betriebsstunden, *D. Zdravkovic-Stojanovic*
- Dynamische LED-Alterungsmodelle, *A. Herzog*
- CCLQ, Calculation in Cloud and Lighting Quality, *Prof. Khanh*
- Diskussion und nächste Schritte
- Besichtigung des Labors am Fachgebiet Integrierte Elektronische Systeme

A1.7 7. Sitzung am 01.04.2019, 11.00 Uhr – 16.00 Uhr, Offenbach (VDE)

- Begrüßung
- LED-Betriebsgeräte: Low Cost bei 85/85: Ergebnisse nach 2.500, *F. Keil*
- Statistische Methoden für Zuverlässigkeit und Lebensdauerbestimmung, *F. Keil*
- Weiße HP LEDs: Neue Ergebnisse und Langzeitdaten über 24000 h, *Dr. M. Wagner*
- Alterungsergebnisse der farbigen LEDs, *A. Herzog*
- Modul-Alterung: Messaufbau und erste Ergebnisse, *Dr. M. Wagner*
- Vortrag CCLC + Diskussion, *Prof. Khanh*
- Diskussion und nächste Schritte

A1.8 8. Sitzung am 28.08.2019, 10.00 Uhr – 16.00 Uhr, Darmstadt (LT)

- Begrüßung
- LED-Betriebsgeräte – Projektabschluss, *Prof. Hofmann*
- Midpower – 4000 h, *S. Klir*
- Messergebnisse der Leuchten nach 20.000 Betriebsstunden, *D. Zdravkovic-Stojanovic*
- Modul- und Leuchtenalterung: Verknüpfung der Ergebnisse, *Dr. M. Wagner*
- Weiße High Power LEDs: Neue Alterungsergebnisse, *Dr. M. Wagner*
- Chip Scale Package – 4000 h, *S. Benkner*
- Constant Lumen Output (CLO), *Prof. Khanh*
- Fazit des Projekts PQL II, *Prof. Khanh*

A2 Sonderveranstaltungen für den PA (und weitere Interessierte)

A2.1 Workshop des VDE: LED-Infotag Oktober 2019 in Offenbach:

Im Workshop von VDE (VDE-Infotag LED und Beleuchtung, Oktober 2019) wurden insgesamt drei Vorträge von Frau M.Sc. Dragana Stojanovic und Frau M.Sc. Diana Carella (beide VDE) und von Herrn M.Sc. Jens Balasus (Doktorand, TU Darmstadt, FG Lichttechnik) angeboten. In den beiden Vorträgen von VDE wurden alle Testergebnisse aller Partner im PQL2-Projekt zusammengefasst und systematisch dargestellt.

Im Vortrag vom Herrn Balasus ging es um die Wirkung von LED-Lichtspektren auf das Wachstum von Pflanzen und die Hinweise, dass die hohe Temperatur und hohe Feuchtigkeit im Gewächshaus, gerade im Sommer, bei der Anwendung von LED-Leuchten zu berücksichtigen sind.

B Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Publikationen

Dieses Kapitel zeigt einen Überblick (Auszug) über die während der Projektlaufzeit gehaltenen Vorträge, die Konferenzbeiträge und die Publikationen in Zeitschriften und Büchern aller beteiligten Forschungspartner.

B1 Publikationen der TU Darmstadt, LT (Forschungseinrichtung 1)

- Wagner, Max: Beschleunigtes Altern von LEDs wissenschaftlich untersucht. In: Elektronik Praxis, Vogel Business Media, (Mai 2016)
- Hui, Z., Wagner, M., Khanh, T. Q.: Comparing New Dielectric Materials for Chip-on-Board LED Packages. LED professional Review (LpR) (58) pp. 50-53, ISSN 1993-890X
- Wagner, M; Herzog, A.; Ganev, H; Khanh, T. Q.: Lifetime Calculation of White HP-LEDs from 16,000 Hours Aging Data. In: LED professional Review (LpR) (59) pp. 34-38
- Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: Vermessung von LED-Leuchten - Einfluss von Einbrenn-verlauf und Brennlageverhalten, In: Licht, Pflaum, (3/17), ISSN 0024-2861
- Wagner, Max; Herzog, Alexander; Khanh, Tran Quoc: Heat Fluxes and Temperatures in Chip-on-Board LEDs for Different Package Structures and Phosphor Technologies. In: Proceedings of the 8th LED professional Symposium (2018), Bregenz
- Wagner, Max: Einfluss von Temperatur und Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen, Dissertation TU Darmstadt, Mai 2018
<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8208>
- Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: Die LED-Leuchte als optimale Lösung? Eine kritische Auseinandersetzung, ETP-Kongress "Straßenbeleuchtung 2019", Hamburg
- Herzog, A., Wagner, M., Khanh, T. Q. Degradation of green high-power LEDs - Influence on color stability of multi-channel luminaires. LED professional symposium 2019

B2 Publikationen der TU Darmstadt, IES (Forschungseinrichtung 2)

- Keil, F.: „LED-Betriebsgeräte Neues aus der Forschung“, 18. EUROFORUM Kongress „Straßenbeleuchtung 2019“, 20.02.2019, Hamburg
- Keil, F.; Hofmann, K.: „A Comparative Study of the Lifetimes of High-End and Low-Cost Off-Line LED Drivers Under Accelerated Test Conditions“, Proceedings of the 16th China International Forum on Solid State Lighting, SSLCHINA 2019
- Keil F.: „Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf moderne LED-Betriebsgeräte“, Kölner Straßenbeleuchtungsforen, 04.02.2020, Köln

B3 Publikationen des VDE (Forschungseinrichtung 3)

- Zdravkovic-Stojanovic, D.: Forschungsprojekt PQL 2: „Abschließende Messergebnisse, PQL 2“, VDE Infotag LED und Beleuchtung, 29.10.2019