

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL)

der Forschungsstelle(n)

Fachhochschule Bielefeld
Technische Universität Darmstadt
Hochschule Hannover
Technische Universität Ilmenau
VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH

Das IGF-Vorhaben 14 LBG der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

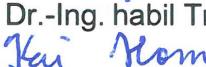
Bielefeld, 25.09.2014


Prof. Dr.-Ing. Eva Schwenzfeier-Hellkamp

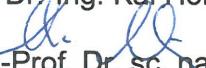
Darmstadt, 16.10.2014


Prof. Dr.-Ing. habil Tran Quoc Khanh

Hannover, 30.09.2014


Prof. Dr.-Ing. Kai Homeyer

Ilmenau, 6.10.2014


Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

Offenbach, 10.10.2014


Dietmar Gläser

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Zusammenfassung	1
1. Einleitung.....	2
1.1 Technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	2
1.1.1 Ausgangslage	2
1.1.2 Außenbeleuchtung	2
1.1.3 Innenraumbeleuchtung.....	3
1.2 Aktuelle Entwicklung.....	4
1.3 Ziel des Projektes.....	5
1.4 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
1.4.1 Methodischer Ansatz	6
1.4.2 Arbeitsteilung zwischen den Forschungseinrichtungen	7
2 LED als Bauelement.....	9
2.1 Alterung der LEDs	9
2.1.1 Beschreibung von LM 80 und TM21	9
2.1.2 LED-Alterung an der Hochschule Hannover (HSH) – Aufbau.....	10
2.1.3 Alterungsergebnisse zu den Typen LED1 und LED2 (HSH).....	14
2.1.4 LED-Alterung der Typen LED3/LED4 an der TU Darmstadt (TUDa).....	31
2.2 Electrostatic Discharge (ESD).....	43
2.2.1 ESD-Prüfung.....	44
2.2.2 ESD-Beobachtungen	47
2.2.3 ESD-Ergebnisse.....	49
2.3 Chip- und Packagequalität von LEDs.....	49
2.3.1 Problemstellung, Ziel des Vorhabens	49
2.3.2 Struktur des Messsystems.....	51
2.3.3 Grundlagen	52
2.3.4 Messung der thermischen Daten.....	53
2.3.5 Aspekte der thermischen Messungen.....	54
2.4 Verbesserung der LED-Datenblattangaben.....	57
2.4.1 Einführung.....	57
2.4.2 Temperatur-und Stromverhalten	58
2.5 Änderung der Binning-Strategie	63
2.6 Auswahlkriterien für weiße LEDs	65
2.6.1 Elektrische Aspekte.....	65
2.6.2 Thermische Aspekte	65
2.6.3 Lichttechnische Aspekte	66
2.6.4 Steuerungstechnische Aspekte.....	67

3 LED-Leuchten als System	68
3.1 Systematik und Prozess der LED-Leuchtenentwicklung	68
3.1.1 Geschichtliche Entwicklung.....	68
3.1.2 Systematik des Entwicklungsprozesses einer LED-Leuchte.....	71
3.2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).....	77
3.3 Leuchtenalterung an der TU Darmstadt	80
3.3.1 Übersicht.....	80
3.3.2 Alterungsaufbau	81
3.3.3 Messergebnisse.....	84
3.3.4 Untersuchung der thermischen und elektrischen Eigenschaften.....	88
3.3.5 Fehleranalyse.....	90
3.3.6 Zusammenfassung.....	92
4 Wahrnehmung von Licht	93
4.1 Binning.....	93
4.1.1 Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden.....	93
4.1.2 Farbunterschiede bei Körperfarben	101
4.2 Untersuchungen zum empfundenen Weißgrad.....	103
4.2.1 Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden.....	103
4.3 Akzeptanzbezogenen Skalierung der Farbwiedergabe	108
4.4 Mesopische Forschung - Ergebnisse.....	110
4.4.1 Motivation und Fragestellungen.....	110
4.4.2 Mesopische Helligkeitswahrnehmung unterschiedlicher Lampenspektren.....	112
4.4.3 Mesopische Objektdetektion.....	115
4.4.4 Mesopische Objekterkennung, Sehschärfe [26]	119
4.4.5 Zusammenfassung.....	121
4.5 Stroboskopartige Effekte von PWM-gesteuerten LED-Leuchten	121
4.5.1 Motivation	121
4.5.2 Versuchsaufbau- und -organisation	122
4.5.3 Ergebnisse der Bewertung.....	124
5 Risikomanagementsystem	125
5.1 Charakteristika der Fehler- und Schadensdatenbank.....	126
5.2 Anpassung des Risikomanagementprozesses im PQL-Projekt.....	126
5.2.1 Risikomanagementprozess.....	126
5.2.2 Strukturanalyse	127
5.2.3 Risikoidentifizierung	128
5.2.4 Risikoanalyse und -bewertung	135
5.2.5 „Top-14“-Fehlerliste der Risikoanalyse.....	139
5.2.6 „Top-14“-Fehlerbeseitigungsmaßnahmen.....	141
5.3 Kosten-Nutzen-Analyse.....	142
5.4 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen für Unternehmen.....	143
6 Performance Quality Label (PQL)	144
6.1 Untersuchung der Öko-und Qualitätslabel weltweit	144
6.2 Ausbau der Lichtmesstechnik im VDE-Institut	145
6.2.1 Laborausstattung	146

6.2.2	Kalibrierung der Messgeräte	147
6.2.3	Durchführen der Messungen.....	149
6.2.4	Ermittlung der Messunsicherheit der einzelnen Messsystem	151
6.3	Akzeptanztests / Round-Robin-Tests	154
6.4	Vorbereitungen einer Normung.....	157
6.5	Marktüberwachung	158
7	Zusammenfassung.....	160
8	Literatur	163
Anhang	166
A	Nutzen und die wirtschaftliche Bedeutung für KMU	167
B	Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Veranstaltungen	169
C	Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Publikationen	176
D	Ergebnistransfer in die Wirtschaft – Übersicht	180

Abkürzungsverzeichnis

A

AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

B

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

C

COB Chip on Board
CPO Cosmopolis-Lampe

D

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

E

EBPG Energiebetriebene-Produkte-Gesetz
EMV Elektromagnetische Verträglichkeit
ESD Electrostatic Discharge
EU Europäische Union
EVG Elektronisches Vorschaltgerät

F

FIB Focused Ion Beam
FMEA Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse

H

HID High Intensity Discharge-Lampe (ugs. "Xenonlampe" im Kfz)
HQL Quecksilberdampfhochdrucklampe

K

KMU Kleine und mittlere Unternehmen

L

LED Licht emittierende Diode
LVK Lichtstärkeverteilungskörper/-kurve

M

MH Halogen-Metalldampflampe

N

NAV Natriumdampfhochdrucklampe

O

OBIRCH Optical Beam Induced Resistance Change

P

PA Projektbegleitender Ausschuss der Industrieveterreter
PQL Performance Quality Label für LED-Leuchten, Performance Quality Label
PWM Pulsweitenmodulation

R

R_a Allgemeiner Farbwiedergabeindex (engl. auch CRI)
RPZ Risikoprioritätszahl

S

SSL Solid State Lighting

V

VDE VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut

X

XE Xenonlampe (s. auch HID)

Z

ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Zusammenwirken der für das Projekt entscheidenden Interessengruppen	6
Abbildung 1.2: Problemfelder bei der Entwicklung einer LED-Leuchte.....	7
Abbildung 1.3: Forschungseinrichtungen und Forschungsblöcke im Projekt	8
Abbildung 2.1: Schema der Ursachen für die LED-Alterung	9
Abbildung 2.2: Aufbau einer High-Power-LED.....	10
Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau einer Temperierplatte mit 60 Prüflingen	11
Abbildung 2.4: Platine mit 10 LED Prüflingen.....	11
Abbildung 2.5: Platinen mit je 10 LEDs, montiert auf einer Temperierplatte.....	12
Abbildung 2.6: Zwei Temperierplatten im Verbund an einem Temperiergerät.....	12
Abbildung 2.7: Geschlossenes Case umfasst 2 Platten mit insgesamt 12 Platinen, 120 Prüflingen...	13
Abbildung 2.8: Primäre und sekundäre Stromversorgung und Temperaturlogger	13
Abbildung 2.9: Veränderungen nach ca. 9000 h Betrieb bei 95 °C Umgebungstemperatur	15
Abbildung 2.10: Beschädigung der Linse/Konverter und resultierende Farbortverschiebung.....	15
Abbildung 2.11: Lichtstromverlauf über der Zeit von 10 Test-LEDs von Typ LED2 (ww)	16
Abbildung 2.12: LED2 (ww) - Lichtstromdegradation bei 95 °C (a) und 85 °C (b)	16
Abbildung 2.13: LED2 (ww) - Lichtstromdegradation bei 55 °C.....	17
Abbildung 2.14: LED1 (ww) - Lichtstromdegradation bei 55 °C (a) und 85 °C (b)	17
Abbildung 2.15: LED2 (ww) - Farbortverschiebung $\Delta u'v'$ bei 95 °C und 1000 mA	18
Abbildung 2.16: LED2 (ww) - 95 °C, 1000 mA: Zeitlicher Verlauf der Farbortverschiebung.....	18
Abbildung 2.17: LED2 kaltweiß (a) und warmweiß (b) - Vergleich Farbabstand über die Zeit.....	19
Abbildung 2.18: LED2 (kw) - Einfluss der Alterungstemperatur auf die Farbortverschiebung.....	19
Abbildung 2.19: LED2 - Lichtstromverlauf bei 85°C (Parameter Strom)	20
Abbildung 2.20: LED2 (ww) - Alterung bei 1000 mA	22
Abbildung 2.21: LED2 (kw) - Alterung bei 1000 mA.....	22
Abbildung 2.22: LED1 kaltweiss (a) und warmweiss (b) - Alterung mit 1000 mA	23
Abbildung 2.23: LED2 - Stützstellen 1000 h – 6000 h, Alterung mit 350 mA.....	24
Abbildung 2.24: LED2 - Stützstellen 2000 h – 7000 h, Alterung mit 700 mA	24
Abbildung 2.25: LED2 - Stützstellen 3000 h -8000 h, Alterung mit 700 mA	25
Abbildung 2.26: LED2 - Stützstellen 4000 h – 9000 h, Alterung mit 700 mA.....	25
Abbildung 2.27: LED2 - Stützstellen 5000 h -10000 h, Alterung mit 700 mA.....	26
Abbildung 2.28: LED2 - Werte ab 1000h, Alterung mit 700 mA.....	26
Abbildung 2.29: LED1 (kw) - Arrhenius Violation, Alterung mit 350 mA.....	27

Abbildung 2.30: Ermittelte Junction Temperaturen im thermisch eingeschwungenen Zustand	28
Abbildung 2.31: LED2 (ww), Alterung bei 95°C und 1000 mA 0 h (links) und 7000 h (rechts).....	29
Abbildung 2.32: LED1 (kw), Alterung bei 85 °C und 1000 mA 0 h (li.) und 7000 h (re.).....	29
Abbildung 2.33: Lebensdauer L_{70} über Junction-Temperatur	30
Abbildung 2.34: Alterungsaufbau an der TU Darmstadt	32
Abbildung 2.35: Messaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt	33
Abbildung 2.36: Aufbau der Mess- und Alterungsplatine für die LEDs.....	33
Abbildung 2.37: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED3 bei $T_C = 55^\circ\text{C}$	34
Abbildung 2.38: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED3 bei $T_C = 85^\circ\text{C}$	35
Abbildung 2.39: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED3 bei $T_C = 95^\circ\text{C}$	35
Abbildung 2.40: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED4 bei $T_C = 55^\circ\text{C}$	36
Abbildung 2.41: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED4 bei $T_C = 85^\circ\text{C}$	36
Abbildung 2.42: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED4 bei $T_C = 95^\circ\text{C}$	37
Abbildung 2.43: Farbortverschiebung $\Delta u'v'$ für die gealterten LEDs	37
Abbildung 2.44: Farbortverschiebung im CIE 1931-Diagramm für LED3	38
Abbildung 2.45: Farbortverschiebung im CIE 1931-Diagramm für LED4	39
Abbildung 2.46: 3D-Diagramm der spektralen Verteilung einer neuen und einer gealterten LED ...	40
Abbildung 2.47: Risse in der Leuchtstoffschicht einer gealterten LED	41
Abbildung 2.48: Strahlengang des blauen Lichts in der LED	41
Abbildung 2.49: OBIRCH-Inspektion einer geschädigten LED-Chip.....	42
Abbildung 2.50: Lokalisation und Aufbau einer Fehlstelle im Chip (FIB Milling Verfahren).....	43
Abbildung 2.51: Prinzipskizze einer elektrostatischen Entladung.....	44
Abbildung 2.52: ESD Prüfplatz nach DIN EN 61000-4-2	45
Abbildung 2.53: Prüfablauf ESD.....	45
Abbildung 2.54: Messplatz zur opt./elektr. Datenerfassung nach der ESD-Beaufschlagung.....	46
Abbildung 2.55: LED-Kennlinien nach ESD-Test mit 3 und 150 Entladungen	46
Abbildung 2.56: LED2 nach provoziertem ESD- Schaden - Linse und Konversionsschicht entfernt.	47
Abbildung 2.57: LED2 - 3 Pulse beider Polaritäten bei 30 kV	48
Abbildung 2.58: LED1 - 3 Pulse beider Polaritäten bei 30 kV	48
Abbildung 2.59: Package-Systeme für HL-LEDs mit unterschiedlicher Anzahl an Systemschichten	50
Abbildung 2.60: Schematischer Aufbau des LED-Messplatzes	51
Abbildung 2.61: Wärmeleitung durch einen planparallelen Körper	52
Abbildung 2.62: I-U-Kennlinie einer HP-LED bei $T_J = 25^\circ\text{C}$	53
Abbildung 2.63: Zusammenhang von T_J und T_S für ww und kw LEDs.....	54
Abbildung 2.64: Thermische Widerstände der LEDs als Funktion der Temperatur	55

Abbildung 2.65: Thermische Unterschiede zwischen ww und kw LEDs des gleichen blauen Chips.	56
Abbildung 2.66: Änderung des thermischen Widerstands für LEDs vom gleichen Typ	57
Abbildung 2.67: Lichtstrom als Funktion der Temperatur (Strom als Parameter)	59
Abbildung 2.68: Lichtstrom als Funktion der Stromstärke (Temperatur als Parameter)	60
Abbildung 2.69: Lichtstromänderung als Funktion der Stromstärke UND der Temperatur	60
Abbildung 2.70: Überprüfung der Gültigkeit der ermittelten Temperatur-Strom-Beziehung.....	61
Abbildung 2.71: Änderung des optischen Strahlungsflusses.....	61
Abbildung 2.72: Änderung der Vorwärtsspannung	62
Abbildung 2.73: Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur	62
Abbildung 2.74: Farbkoordinaten u' und v' als Funktion von Temperatur und Strom dargestellt....	63
Abbildung 2.75: Farbabstand $\Delta u'v'$ als Funktion von Temperatur und Strom	64
Abbildung 2.76: Farbabstand $\Delta u'v'$ als Funktion von Temperatur und Strom	64
Abbildung 2.77: Temperaturabhängige Lichtstromänderung einiger weißer LEDs	66
Abbildung 2.78: Winkelabhängigkeit der Farbtemperatur weißer LEDs	66
Abbildung 2.79: Stromabhängigkeit des Lichtstroms (in lm) und Strahlungseffizienz (in W/W)	67
Abbildung 3.1: Entwicklung der Lichtausbeute von Lichtquellen der Straßenbeleuchtung.....	68
Abbildung 3.2: Die Entwicklung der Lichtausbeute von LEDs bei 350 mA und 60 °C.....	70
Abbildung 3.3: Systemlichtausbeute von 38 gemessenen LED-Straßenleuchten bis zum Jahr 2013	70
Abbildung 3.4: Entwicklungsprozess am Beispiel einer LED-Straßenleuchte	72
Abbildung 3.5: Vergleich der pn-Temperaturen T_j bei unterschiedlicher Boardtemperatur T_s	73
Abbildung 3.6: Verlauf der Gehäusetemperatur einer LED-Straßenleuchte im Sommer.....	74
Abbildung 3.7: Aspekte der LED-Auswahl.....	75
Abbildung 3.8: Prozesse der thermischen und elektrischen Auslegung.....	76
Abbildung 3.9: Kopplungsarten der EMV	78
Abbildung 3.10: Testobjekt für die EMV-Untersuchungen [43]	78
Abbildung 3.11: Fixierung des Leuchtenkopfs zur EMV-Messung.....	79
Abbildung 3.12: Störungen im Bereich 100 Hz - 5 Mhz.....	79
Abbildung 3.13: Störung bei unterschiedlichen Belastungen	80
Abbildung 3.14: Ansicht des Alterungsraums an der TU Darmstadt	81
Abbildung 3.15: Leuchten auf dem Mast (li.) und deren Position im Stadtplan (re.)	82
Abbildung 3.16: 3-Kanal Temperatur-Datenlogger montiert in einer der Leuchten	82
Abbildung 3.17: Temperaturverlauf 8/2013 bis 3/2014 innerhalb der Musterleuchte	83
Abbildung 3.18: Verlauf der drei beobachteten Temperaturen für einen Sommertag.....	83
Abbildung 3.19: Verlauf des rel. Lichtstroms nach 6000 h für ausgewählte Leuchten.....	85
Abbildung 3.20: Lichtstromrückgang bei Leuchten des gleichen Typs.....	85

Abbildung 3.21: Änderung der Farbtemperatur der Leuchten nach 6000 Brennstunden	86
Abbildung 3.22: Beispiele für eine starke Änderung der Farbtemperatur von getesteten Leuchten	87
Abbildung 3.23: Grafische Darstellung des Spektrums der Leuchte F_2_1.....	87
Abbildung 3.24: Darstellung des Strom-Rippels für ausgewählte Leuchten.....	88
Abbildung 3.25: Grafische Darstellung der Boardtemperaturen für 3 getestete Leuchten.....	89
Abbildung 3.26: Temperaturen am T_C -Punkt des EVG für 3 ausgewählte Leuchten.....	90
Abbildung 3.27: Beschädigung der stromführende Leitung eines COB-Moduls	91
Abbildung 3.28: Vergilbung der Platinen-Oberflächenfarbe durch hohe Wärmeentwicklung.....	91
Abbildung 3.29: Risse in der Leuchtstoffschicht einer LED der geschädigten Leuchte.....	92
Abbildung 4.1: Versuchsaufbau	94
Abbildung 4.2: Lichtfarbensimulator.....	94
Abbildung 4.3: Untersuchte Testzeichen (li. nach re.): Farbübergang „hart“, „Abstand“, „weich“.....	95
Abbildung 4.4: Spektraler Verlauf bei $T_n = 4000$ K und Testzeichen 1.....	95
Abbildung 4.5: Farbdiskriminationsellipse und Antwortverhalten einer Versuchsperson	96
Abbildung 4.6: Ellipsenhalbachse a in Abhängigkeit des untersuchten Weißpunktes.....	97
Abbildung 4.7: Ellipsenorientierung φ in Abhängigkeit des untersuchten Weißpunktes	97
Abbildung 4.8: Ellipsenhalbachse a in Abhängigkeit des untersuchten Farbverlaufs	98
Abbildung 4.9: Ellipsenorientierung φ in Abhängigkeit des untersuchten Farbverlaufs.....	98
Abbildung 4.10: Ergebnisse im Vergleich zu MACADAM	99
Abbildung 4.11: Transformierte Ellipsen im Vergleich zu MACADAM.....	99
Abbildung 4.12: Ergebnisse: Wahrnehmung kleiner und großer Farbunterschiede	100
Abbildung 4.13: Probandenversuch zur semantischen Deutung der Farbunterschiede	102
Abbildung 4.14: Semantische Deutung der Farbunterschiede für Körperfarben	102
Abbildung 4.15: Linien mit konstantem Farbton [19].....	103
Abbildung 4.16: Gemessene Farbörter individueller Einstellung „reinstes Weiß“ [22]	104
Abbildung 4.17: Testaufbau zur Untersuchung des Farbunterschiedes.....	105
Abbildung 4.18: Spektren unterschiedlicher Lichtquellen aber gleicher Farbörter.....	106
Abbildung 4.19: Spektren unterschiedlicher Lichtquellen aber gleicher Farbörter.....	106
Abbildung 4.20: Ergebnisse in Form von Kovarianzellipsen.....	107
Abbildung 4.21: Ellipsen für einen visuellen Abgleich bei 2700 K.....	108
Abbildung 4.22: Probandenversuches zur akzeptanzbezogenen Skalierung der Farbwiedergabe ..	109
Abbildung 4.23: Akzeptanzbezogene (semantische) Deutung des CIE-Farbwiedergabeindex	110
Abbildung 4.24: Mesopische Sehaufgaben Detektion (links) und Helligkeitsbewertung (rechts)...	112
Abbildung 4.25: Experimenteller Aufbau für den mesopischen Helligkeitsabgleich	113
Abbildung 4.26: Photopische Leuchtdichteverhältnisse bei visuell gleicher Helligkeit.....	114

Abbildung 4.27: Mesopische spektrale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen.....	116
Abbildung 4.28: Relative spektrale Strahldichteveerteilungen von Kfz-Scheinwerferlampen.....	116
Abbildung 4.29: Relative Strahldichtefaktoren der untersuchten Fahrbahnmarkierungen	117
Abbildung 4.30: Leuchtdichteaufnahme der verwendeten Pelli-Robson-Tafel.....	120
Abbildung 4.31: Einfluss der Lichtquelle auf die Sehschärfe.....	120
Abbildung 4.32: Versuchsraum.....	122
Abbildung 4.33: Ausführen unterschiedlicher Tätigkeiten	123
Abbildung 4.34: Ergebnisse der Auffälligkeit.....	124
Abbildung 5.1: Fehlerkosten 10er-Regel [9]	125
Abbildung 5.2: Risikomanagementprozess gemäß DIN 31010 [5].....	127
Abbildung 5.3: FMEA-Kausalkette der PQL Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]	127
Abbildung 5.4: Systemstruktur der PQL Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]	128
Abbildung 5.5: Mindmap der FMEA-Fehlerstruktur [eigene Darstellung]	128
Abbildung 5.6: Risikomanagementprozess im PQL-Projekt [eigene Darstellung]	129
Abbildung 5.7: Anzahl der Fehler der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank (Stand: 30.06.2014).130	
Abbildung 5.8: LED-Alterungsversuch der Hochschule Hannover	130
Abbildung 5.9: Gealterte LED an der Hochschule Hannover	131
Abbildung 5.10: Ergebnisse der LED-Alterungsversuche der TU Darmstadt [TU Darmstadt]	132
Abbildung 5.11: Wartungsfreundlichkeit ausgewählter LED-Leuchten [7], [2].....	132
Abbildung 5.12: Beispiele Fehler der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung].....	133
Abbildung 5.13: Fehlererfassung der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung].133	
Abbildung 5.14: Dropdownmenü der Fehlererfassung [eigene Darstellung]	134
Abbildung 5.15: Dropdownmenü geöffnet [eigene Darstellung]	134
Abbildung 5.16: RPZ-Bewertung der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung].135	
Abbildung 5.17: Produktvergleich mit dem Durchschnitt [eigene Darstellung]	137
Abbildung 5.18: RPZ-Produktvergleich zweier Unternehmen [eigene Darstellung]	137
Abbildung 5.19: Häufigkeitsverteilung der RPZ aller Unternehmen [eigene Darstellung].....	138
Abbildung 5.20: Beispielhafter Risikograph [eigene Darstellung]	139
Abbildung 5.21: Veränderte Risikoakzeptanzschwelle des Risikographen	139
Abbildung 5.22: „Top-14“-Fehlerliste, $RPZ = A \cdot B \cdot E > 200$ [eigene Darstellung]	140
Abbildung 5.23: „Top-14“- Fehlerliste, Kriterium $A \cdot B > 40$ [eigene Darstellung]	140
Abbildung 5.24: Qualitätsbezogene Kosten [6]	142
Abbildung 6.1: Übersicht: untersuchte Label mit zu messenden Parametern und Grenzwerten....	145
Abbildung 6.2: Grundriss des neuen VDE Testzentrum für Photo- und Spektrometrie (TZPS)	145
Abbildung 6.3: Spektrale Strahlungsleistungsnormallampe, Osram 64602,12V,50W	147

Abbildung 6.4: Spektrum der spektralen Strahlungsflussnormallampe	148
Abbildung 6.5: Lichtstärkenormallampe Wi41-G.....	148
Abbildung 6.6: Koordinatenursprung: Schnittpunkt der beiden Drehachsen des Goniometers.....	151
Abbildung 6.7: Übersicht der im Round-Robin-Test gemessenen Leuchten	155
Abbildung 6.8: Messergebnisse und Abweichungen der Farbtemperatur im Round-Robin-Test....	156
Abbildung 6.9: Messergebnisse/Abweichungen des Farbwiedergabeindex (Round-Robin-Test)...	156
Abbildung 6.10: Titelseite der VDE Anwendungsregel.....	158
Abbildung 6.11: Deckblatt des von ECS verabschiedeten Dokumentes CIG 021	159

Zusammenfassung

Projektname: Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL) für LED-Leuchten

Projektzeitraum: 1.7.2011 bis 30.06.2014

Forschungsstellen: FH Bielefeld, Hs Hannover, TU Ilmenau, 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 geforderten Werte zur Verfügung gestellt werden.

Ergebnis: Es wurde die Alterung von Hoch- und Mittelleistungs-LEDs bei verschiedenen Strömen und Boardtemperaturen hinsichtlich Lichtstrom, Farbort, Spektren und Änderung des thermischen Widerstands untersucht, um die Lebensdauer der LEDs durch eine Extrapolation herstellerunabhängig ermitteln und den Leuchtenherstellern verfügbar zu machen. Durch umfangreiche Untersuchungen zu ESD und EMV-Eigenschaften sowie zum Temperatur- und Stromverhalten der LEDs, war eine thermische und elektrische Modellierung möglich. Ziel: ein korrektes Datenblatt für die LEDs seitens der LED-Hersteller zu erarbeiten sowie ein relevantes Binning-Schema mit Beurteilungskriterien für die verschiedenen Binning-Klassen zu erstellen. 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 mehr als 70 LED-Leuchten konnten Schwachstellen und Unzulänglichkeiten in der qualitätssichernden Kette ermittelt und mit den Firmen besprochen werden. Die Auswertung der an der TU Darmstadt gealterten LED-Leuchten konnte der Leuchtenindustrie konkrete Hinweise über Alterungsmechanismen, thermisches Management bei verschiedenen Betriebstemperaturen und die Restwelligkeit der LED-Ströme geben. Zudem wurden Faktoren erarbeitet, wie die LED-Leuchte durch Materialauswahl (Wärmeleitpasten, Dichtungsring), durch konstruktive Kabelführungen 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 Grundlage für die Akzeptanz der LED-Beleuchtung durch die professionellen und privaten Anwender kann nur geschaffen werden, wenn die Licht- und Farbqualität untersucht und deren Mindestwerte für hochqualitative LED-Produkte definiert werden können. An Hand der Untersuchung der Farbwiedergabeskalierung konnte gezeigt werden, dass LED-Systeme mit guter Farbwiedergabe einen Ra-Wert von 86 und R9 für gesättigte rote Farben von mehr als 45 aufweisen sollten. Um die Detektierbarkeit der stroboskopischen Erscheinungen von PWM-betriebenen LEDs zu minimieren, sollte die Pulsfrequenz nicht weniger als 350 Hz-400 Hz betragen.

Alle gewonnenen optischen, lichttechnischen, thermischen und elektrischen Erkenntnisse und Erfahrungen wurden während der Projektarbeit systematisch zusammengestellt und mit Zielwerten bzw. Grenzwerten versehen, so dass sie über die Qualitätsmerkmale (Performance Quality Label) in drei Vorträgen der Leuchtenindustrie präsentiert werden konnten. Die Ziele des Projekts konnten im vollen Umfang erfüllt werden. Die Erkenntnisse vom Projekt konnten durch 6 reguläre Treffen, 2 Sonderworkshops, 3 VDE/ZVEI Workshops und zahlreiche Publikationen, Buchbeiträge und Konferenzbeiträge an die Lichtindustrie, Lichtplaner und weitere Interessierte transferiert werden.

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

1.1.1 Ausgangslage

Mit der Entwicklung der weißen Licht emittierenden Diode (LED) auf Basis einer blauen LED-Chips mit gelbem Leuchtstoff wurde nach der Jahrtausendwende erstmals die kostengünstige Erzeugung von weißem Licht mit einem Halbleiter möglich. Durch die LED als Lichtquelle für Beleuchtungszwecke steht die deutsche Licht- und Leuchtenindustrie seit 2007 vor völlig neuen Herausforderungen. Die LED als Lichtquelle erfordert bei der Entwicklung und Konstruktion von Leuchten im Gegensatz zu den bisher verbreiteten Lichtquellen eine vollständig neue Herangehensweise. Dabei ist es kaum möglich bisherige Kenntnisse und Festlegungen einfach auf die neuen LED-Lichtquellen zu übertragen. Neben neuen Erkenntnissen bei der Entwicklung von LED-Leuchten müssen insbesondere bei der Messung und der Bewertung neue Grundlagen geschaffen werden. In der Praxis kann zwischen den Anwendungsfeldern der Außen- und der Innenraumbeleuchtung unterschieden werden.

1.1.2 Außenbeleuchtung

Im Bereich der Außen- und Straßenbeleuchtung hat die LED früher als in der Innenraumbeleuchtung Einzug gehalten. In Deutschland wurde im Jahr 2007 erstmals eine Versuchsstraße mit LED-Leuchten ausgestattet, um deren Eigenschaften in der Praxis zu erproben. Weitere vergleichbare Projekte folgten in den Jahren darauf. Die erste wissenschaftlich begleitete Teststrecke mit LED-Straßenleuchten wurde im Jahr 2008 eröffnet. Seitdem dominiert das Thema LED in der Straßenbeleuchtung inhaltlich die Diskussionen auf Tagungen und in der öffentlichen Presse. Doch die noch junge LED-Technologie zeigte bei den ersten Bewährungsproben in der Praxis häufig noch deutliche Schwächen. Fehlende Erfahrungen mit der neuen Lichtquelle LED führten zu Frühhausfällen der Leuchten. Technische Schwierigkeiten wie beispielsweise das aufwändige thermische Management der wärmeempfindlichen LEDs, die rapide Weiterentwicklung der LEDs, die höheren Anschaffungskosten sowie die unbekannte Lebensdauer der LED-Straßenleuchten führen bis heute zu einer starken Zurückhaltung der Anwender. Dabei ist das Potential der LED durchaus groß, um die Außenbeleuchtung in den nächsten Jahren zu revolutionieren.

In der Straßenbeleuchtung wurden bis zum Jahr 2010 hauptsächlich Hochdruckentladungslampen eingesetzt. Mit einem Anteil von ca. 45 % sind dies Quecksilberdampfhochdrucklampen und Natriumdampfhochdrucklampen (ca. 34 %). Im März 2008 trat die von der Europäischen Union (EU) verabschiedete Rahmenrichtlinie zur umweltgerechten Gestaltung energiebetriebener Produkte (EuP- oder Ökodesignrichtlinie) in Kraft. Das Energiebetriebene-Produkte-Gesetz (EBPG) fordert ab 2015 für Hochdruckentladungslampen mit einer Farbwiedergabe $R_a > 60$ und einer Leistung zwischen 55

und 75 W eine Lichtausbeute von mindestens 75 lm/W. Die Quecksilberdampfhochdrucklampen besitzen eine Lichtausbeute unter 60 lm/W bei einer Leistung zwischen 55 und 75 W. Sie erfüllen die Anforderungen des EBPG nicht und erhalten in der EU folglich ab 2015 keine Zulassung mehr. Das bedeutet, dass nach einem typischen Wartungsintervall von etwa drei Jahren spätestens im Jahr 2018 45% der jetzigen Lampen bzw. Leuchten in der Außenbeleuchtung durch andere Technologien ersetzt werden müssen. Neben dem Wechsel zu effizienteren Natriumdampfhochdrucklampen sind LEDs eine möglich Alternative.

Bezogen auf das Jahr 2010 führen fehlende Erfahrungswerte bezüglich der Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität der neuen Technologie sowie die höheren Investitionskosten zu einer Verunsicherung. Bis heute sind diese Faktoren Hauptgründe für die zu beobachtende Zurückhaltung der Entscheidungsträger in Bezug auf die LED-Technologie in Deutschland und Europa. Der frühe Ausfall von LED-Leuchten in deutschen Pilotanlagen sowie die zum Teil unglaublich hohen Angaben zur Lebensdauer von LED-Leuchten seitens einiger Leuchtenhersteller verstärken diese Tendenz.

Weitere Unsicherheitsfaktoren sind:

- fehlende reale Daten zur Lebensdauer der elektronischen Vorschaltgeräte und Komponenten in Beleuchtungsanlagen speziell in der Außenbeleuchtung
- mangelnde Erfahrung mit LED-Leuchten in großen Stückzahlen
- sehr kurze Produktzyklen der LEDs von wenigen Monaten
- fehlende Kommunikation der Halbleiterfirmen über die Weiterentwicklung bestimmter LED-Bauformen in den nächsten Jahren (Ersatzteilfrage)
- geringe Planungssicherheit über die Kosten bei der späteren Wartung
- Diskussionen über eine erhöhte Blendung durch LED-Leuchten
- Wahrnehmung von Flimmern durch den Pulsbetrieb von LEDs.

1.1.3 Innenraumbeleuchtung

In der Innenraumbeleuchtung war die LED zu Projektbeginn in der Entwicklung noch nicht so weit etabliert, wie in der Außenbeleuchtung. Der Hauptgrund für diese Feststellung ist darin zu finden, dass die Anforderungen LED-Leuchten für den Innenraum deutlich höher sind, als das im Fall der Außenbeleuchtung der Fall ist. Während die durchschnittliche Umgebungstemperatur in der Außenbeleuchtung bei etwa 12 °C liegt, sind in der Innenraumbeleuchtung Temperaturen von über 22 °C üblich. Dies erschwert die Kühlung der LEDs erheblich und eine höhere Betriebstemperatur steht in direktem Zusammenhang mit einer Reduzierung der Lebensdauer und der Effizienz der LEDs. Hinzu kommt, dass die Lichtqualität, z.B. die Farbwiedergabe, durch die höhere Verweildauer unter der Beleuchtung im Innenraum deutlich höher als in der Außenbeleuchtung sein muss. In privaten Haushalten dominieren bis 2012 Glühlampen den Markt der Innenraumbeleuchtung. Durch den hohen Wärmeanteil in der emittierten Strahlung besitzen Glühlampen eine äußerst schlechte Lichtausbeute zwischen 10 lm/W und 13 lm/W. Aus diesem Grund wurden die ersten Glühlampentypen im September 2009 im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EG verboten.

In der industriellen Innenraumbeleuchtung sind Leuchtstofflampen vorherrschend. Im Vergleich zu Glühlampen besitzen sie eine Lichtausbeute von typischerweise 80 bis 100 lm/W und sparen damit Energie. Ein wesentlicher Nachteil der Leuchtstofflampen besteht jedoch darin, dass sie Quecksilber

enthalten und aufwändig entsorgt werden müssen. Das Potential der LED als entscheidende Lichtquelle in der Innenraumbeleuchtung ist sowohl aufgrund ihrer mittlerweile hervorragenden Lichtausbeute (über 140 lm/W bei realen Betriebsbedingungen) als auch durch ihre hohe Flexibilität bezüglich der verfügbaren Farbausführungen (Farbspektren, Farbmischung) und ihrer stufenlosen Dimmbarkeit gegeben.

Die hohen Anforderungen an die Lichtqualität, die fehlenden Erfahrungen, der höhere Anschaffungspreis und die Unsicherheit bei den privaten und industriellen Nutzern stellen jedoch große Herausforderungen für die LED in der Innenraumbeleuchtung dar. In der Innenraumbeleuchtung kommt bei LEDs erschwerend hinzu, dass Unterschiede zwischen einzelnen LEDs bezüglich Farbe und Helligkeit eher als in der Außenbeleuchtung auffallen. Das richtige Vorsortieren und Auswählen (Binning) von LEDs ist deshalb von entscheidender Bedeutung. Dies erhöht den Aufwand und verteuert die Leuchten. Die enorm schnelle Weiterentwicklung der LED-Technologie stellt die bislang auf eher lange Entwicklungszyklen ausgerichteten Leuchtenhersteller vor zusätzliche Schwierigkeiten. Bislang ist unklar, welche Mindestwerte für einzelne Parameter eingehalten werden sollten.

1.2 Aktuelle Entwicklung

Zum Zeitpunkt 2010/2011 wird die Markteinführung von LED-Produkten durch Begriffe wie Lichtausbeute/Effizienz, Farbwiedergabe, Lebensdauer, Preis, Chipgröße und Binning bestimmt. Es werden weder Standards, die auf normativen Grundlagen basieren, noch Zielvorgaben durch die Hersteller und Verarbeiter von LEDs bezüglich

- technischer Daten von LEDs und deren Darstellung
- LED-Gehäuse, Baugruppen, Baueinheitenanordnung
- LED-Betriebsweise, Steuerungstechnik, Steueralgorithmen, Sensorik
- LED-Anschlusstechnik (elektrisch und thermisch)
- praxisrelevanter Binnings gemacht.

Gleichzeitig ist eine extrem schnell wachsende Produktionskapazität von SSL (Solid State Lighting = Licht aus Festkörpern) im Bereich der Tigerstaaten und Chinas zu verzeichnen. Aber auch die stringenten Reglementierungen von SSL und die extrem extensiven staatlichen Förderprogramme in den USA zur breiten Unterstützung der Markteinführung von SSL sind bezeichnend für die Entwicklung dieser Technologie auf dem Weltmarkt. Die spezifische Marktsituation Deutschlands in Bezug auf die Produktion von Leuchten ist traditionell und solide im Bereich des Mittelstandes (KMU) verankert. Die europäischen und internationalen Vorschriften zu SSL sind in großem Umfang in der Bearbeitung und werden zugleich dynamisch aktualisiert. Hier sind die mittelständischen Leuchtenhersteller nur marginal vertreten. Im internationalen Vergleich existieren nur gering bis kaum koordinierte Förderprogramme für den Mittelstand zur beschleunigten Einführung von SSL im kommunalen Bereich. Durch die Marktüberschwemmung mit Low-Cost-Importprodukten kann im Markt ein großer Kostendruck entstehen. Dies ist auch dadurch gekennzeichnet, dass neue globale Player wie Samsung, LG, Panasonic und Toshiba auf diesen jungen Leuchtenmarkt mit LED-Produkten drängen. Die Neukonzeption von Lichtlaboren und Prüffeldern wegen der gegenüber der klassischen Lampen- und Leuchtentchnik neuartigen LED-Technik und ihrer Betriebsweise spiegelt nur einen Teil der Marktproblematik wieder, die der Mittelstand bewältigen muss. Aus diesen Marktbeobachtungen sind folgende Ereignisse abzulesen:

- Außereuropäische Länder sind auf dem Wege zur Marktdominanz im Bereich SSL, sowohl im Bereich der Produktentwicklung, als auch der Normung
- Die Kennzeichnung von LEDs und ihren Eigenschaften sind unzureichend
- Der Markt wird überschwemmt mit qualitativ mangelhaften SSL-Produkten
- die langfristige Verfügbarkeit von LED-Typen liegt durch die schnelle Weiterentwicklung auch durch asiatische Player zum Teil bei unter 0,5 Jahren
- Reparaturfähigkeit von Leuchten durch Endanwender unmöglich
- Reparaturfähigkeit von Leuchten durch Hersteller unwirtschaftlich
- Leuchtenwirkungsgrade von SSL zum Teil unbefriedigend.

Aus diesem Grunde wurde das Projekt „Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL) für LED-Leuchten“ durch das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) und die AiF genehmigt. Im Folgenden wurden die Ziele und Methoden der Projektarbeit kurz erläutert.

1.3 Ziel des Projektes

Das Ziel des beantragten vorliegenden Projekts besteht darin, normative Grundlagen für die Kriterien eines Performance Quality Labels (PQL) für LED-Leuchten zu erarbeiten. 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 in jeglicher Hinsicht gute Produktqualität erforderlichen Faktoren, soll ein Katalog von Mindestanforderungen für LED-Leuchten entwickelt werden. Auf Basis dieses Kataloges erhalten LED-Produkte je nach Erfüllen der Anforderungen ein Gütesiegel, das auf der einen Seite den privaten und industriellen Anwendern die Kaufentscheidung durch eine erhöhte und standardisierte Transparenz erleichtern soll. Auf der anderen Seite erhöht dies die Lichtqualität, steigert die Energieeffizienz und sichert die Kompetenz und Zukunftsfähigkeit der mittelständisch geprägten Leuchtenindustrie im internationalen Wettbewerb. Durch eine Internet- und Literaturrecherche sollen die momentan in der Bearbeitung befindlichen Zertifikate, Labels und normativen Grundlagen ebenso wie die aktuellen Energieeinsparverordnungen und der Energy Star geprüft werden. Durch Zusammenarbeit mit der Leuchtenindustrie muss der derzeitige Entwicklungsstand eruiert werden. Durch Diskussionen, Analysen und den Erfahrungsaustausch der beteiligten Leuchtenhersteller lassen sich mögliche Kennwerte im Vorfeld sondieren.

Aus den Erkenntnissen der Arbeitspakete der beteiligten Forschungseinrichtungen sollen normative Grundlagen sowie Qualitätskriterien für die entscheidenden technologischen und lichttechnischen Parameter der einzelnen Komponenten einer LED-Leuchte abgeleitet und verifiziert werden. Dabei gilt es auf Basis zuverlässiger Modelle Kriterien für ein Qualitätslabel zu finden oder zu unterstützen. Wenn verlässliche Qualitätsmodelle gefunden sind, sollen für die breite Einführung der LED-Technologie auch unter Betrachtung der TCO (Total Cost of Ownership) für Großanwendungen sowie für private Anwender Mindestwerte definiert werden. Aus den abgeleiteten Erkenntnissen soll durch die Vorgabe von Mindestwerten für wichtige Parameter einer LED-Leuchte einerseits das für Anwender angestrebte Prüfsiegel erarbeitet werden. Auf der anderen Seite sollen der Leuchtenindustrie konkrete Hinweise für die Entwicklung und Optimierung von LED-Leuchten bezüglich der im Prüfsiegel (PQL) geforderten Werte zur Verfügung gestellt werden. Um eine hohe Akzeptanz des Prüfsie-

gels unter den Anwendern zu erreichen, soll nach Abschluss des Projektes durch verschiedene zugelassene Prüfinstitute eine ständige und konsequente Marktüberwachung zur Einhaltung der geforderten Mindestwerte durchgeführt werden.

1.4 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Im Folgenden werden der methodische Ansatz zum Erreichen des Forschungsziels sowie die Arbeitsaufteilung zwischen den Forschungseinrichtungen dargestellt.

1.4.1 Methodischer Ansatz



Abbildung 1.1: Zusammenwirken der für das Projekt entscheidenden Interessengruppen

Das Ziel, ein einheitlich beschaffenes und von Industrie sowie Privatanwendern akzeptiertes Gütesiegel für LED-Leuchten (PQL) zu entwickeln, ist ein sehr umfassendes und für Deutschland bis 2011 nahezu einzigartiges Vorhaben. Sowohl vom Gesamtvolumen her, als auch aus fachlicher Sicht den erforderlichen Forschungsbedarf abdecken zu können, ist für eine einzelne Forschungseinrichtung nicht möglich. In dem vorliegenden Projekt sind deshalb insgesamt fünf verschiedene Forschungseinrichtungen beteiligt. Dies ist aufgrund der erforderlichen fachlichen Spezialisierung und zur Steigerung der Akzeptanz der angestrebten Ergebnisse bei den Anwendern erforderlich und erwünscht.

Abbildung 1.1 zeigt in einer Übersicht den methodischen Ansatz, wie die beteiligten Interessengruppen zur Erarbeitung und der nachhaltigen Akzeptanz eines PQL beitragen. Die bei den Forschungseinrichtungen identifizierten und charakterisierten Parameter für eine zuverlässige LED-Leuchte bilden die Basis für die weitere Gestaltung des PQL. Die gewonnenen Erkenntnisse werden den verschiedenen Interessengruppen aus der Leuchtenindustrie zur Verfügung gestellt, damit die LED-Leuchten dahingehend angepasst und optimiert werden können. Darüber hinaus fließen die Informationen in Zusammenarbeit mit Prüflaboren aber auch direkt an die Anwender, damit diese über den Hintergrund und die Eigenschaften des Prüfsiegels frühzeitig informiert werden.

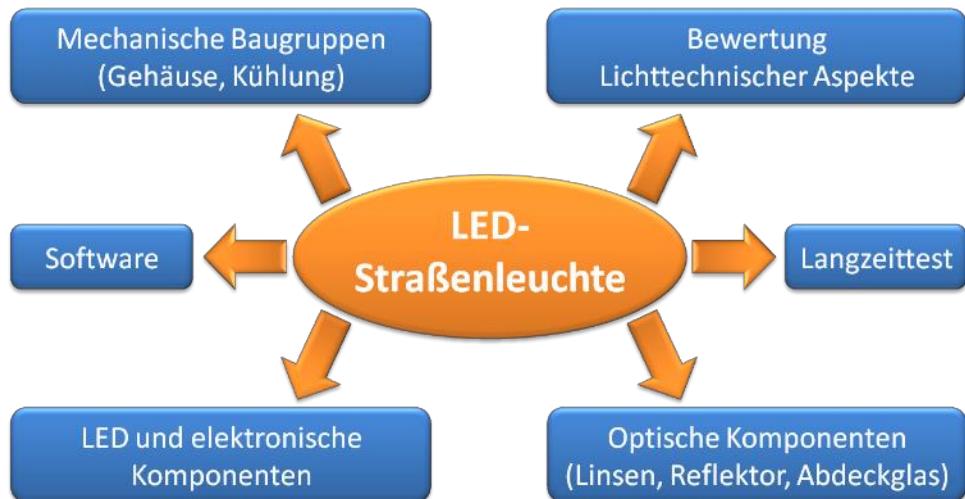


Abbildung 1.2: Problemfelder bei der Entwicklung einer LED-Leuchte

Im vorliegenden Projektantrag sind durch die vielfältige Beteiligung verschiedener Interessengruppen fünf Forschungseinrichtungen, darunter ein Prüflabor sowie zahlreiche Leuchtenhersteller bzw. Zulieferer beteiligt. In Bezug auf Abbildung 1.1 sind im Projekt einschließlich der Endanwender alle relevanten Interessengruppen vertreten, die für das Erarbeiten relevanter Parameter und das technische Umsetzen der Parameter in Leuchten die erfolgreiche Entwicklung des PQL und dessen Etablieren am Markt sicherstellen. Nach einer ersten Analyse der derzeitigen Situation am Markt und einem Abgleich mit dem angestrebten Ziel des vorliegenden Projektantrags ergeben sich für die Entwicklung und erfolgreiche Vermarktung einer LED-Leuchte die in Abbildung 1.2 dargestellten Problemfelder, die bei der Entwicklung des PQL von Bedeutung sind.

1.4.2 Arbeitsteilung zwischen den Forschungseinrichtungen

Die fachliche Zusammensetzung der am Projektantrag beteiligten Forschungseinrichtungen ist aus Abbildung 1.1 abgeleitet worden. Nach einer fachlichen Abstimmung der Forschungspartner unter der Koordination der Technischen Universität Darmstadt wurde eine inhaltliche Festlegung für einzelne Forschungsblöcke 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 (s. Abbildung 1.2) und allen darüber hinaus gehenden Faktoren bis hin zum PQL. In Abbildung 1.3 sind die am Projekt beteiligten Forschungsblöcke und Forschungseinrichtungen aufgeführt.

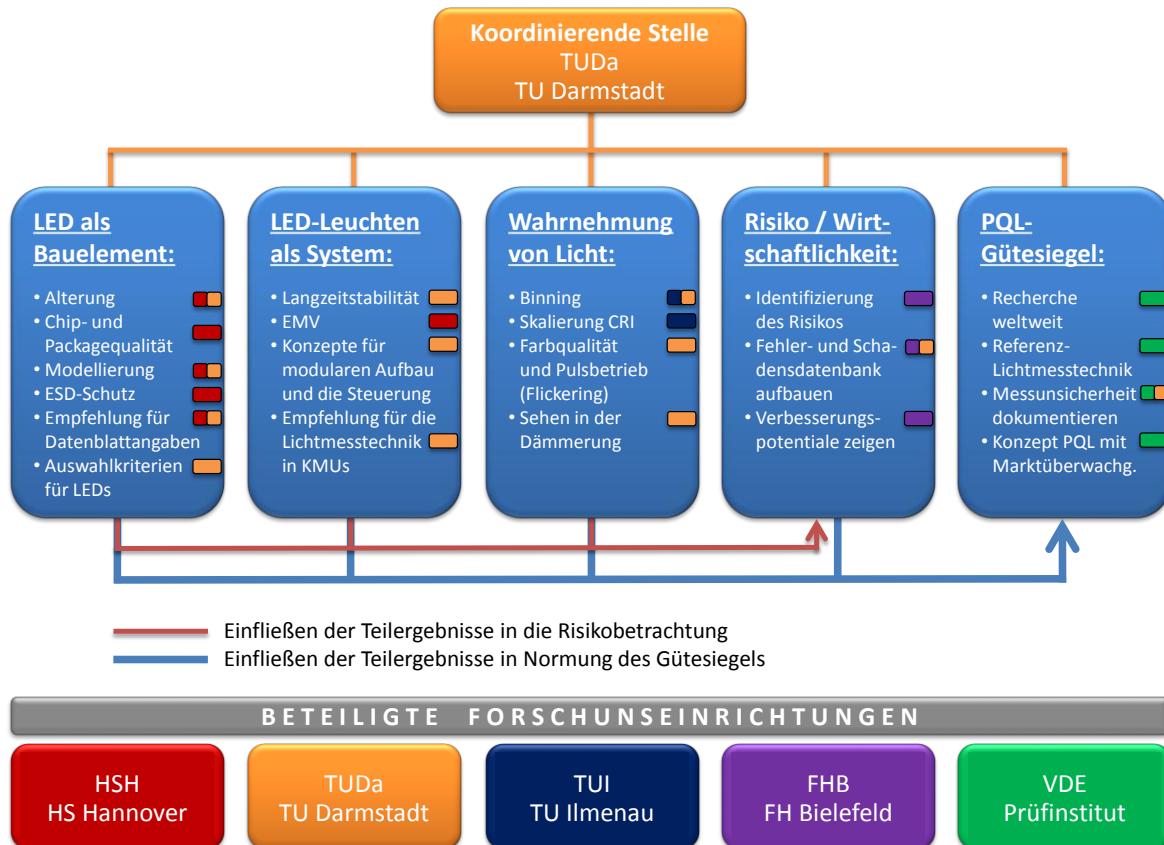


Abbildung 1.3: Forschungseinrichtungen und Forschungsblöcke im Projekt

Dementsprechend ist der vorliegende Abschlussbericht in fünf Hauptkapitel gegliedert:

- Kapitel 2: LED als Bauelement
- Kapitel 3: LED-Leuchten als System
- Kapitel 4: Wahrnehmung von LED-Licht
- Kapitel 5: Risikomanagement
- Kapitel 6: PQL-Gütesiegel und Messtechnik

Kapitel 7 bildet die Zusammenfassung des Berichtes. 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 LED als Bauelement

2.1 Alterung der LEDs

2.1.1 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) ([27], [28]).



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 [29]. 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 [30], zum anderen die Berechnungsmethode nach TM-21 [31].

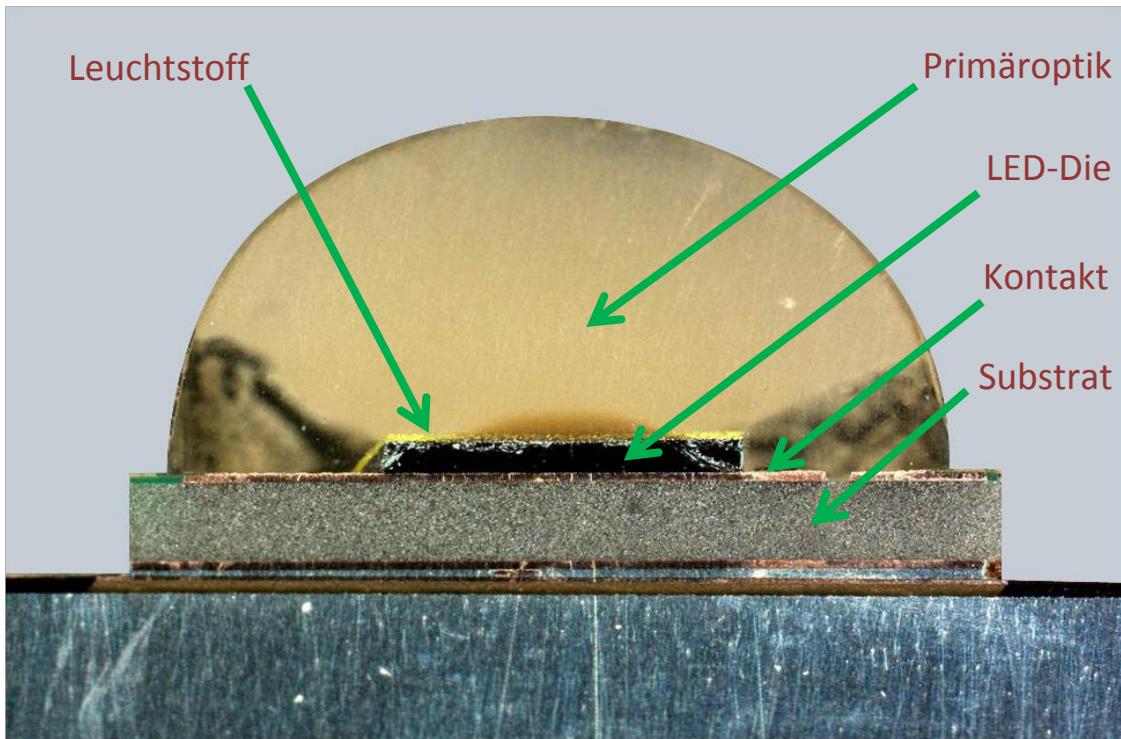


Abbildung 2.2: Aufbau einer High-Power-LED

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.

2.1.2 LED-Alterung an der Hochschule Hannover (HSH) – Aufbau

Die zu prüfenden LEDs werden bei 55°C , 85°C und 95°C in einer abgeschlossenen Umgebung mit konstantem Gleichstrom von 350 mA, 700 mA und 1000 mA betrieben und die Alterung in definierten Intervallen vermessen. Dazu werden die Prüflinge in 10er Gruppen auf Platinen verlötet, die ihrerseits zu 6er Gruppen auf einer selbst entwickelten mit temperierter Flüssigkeit durchströmten Aluminiumplatte montiert werden. Um die Anzahl der Prüflinge für eine statistische Auswertung zu

erhöhen, sind jeweils zwei identisch aufgebaute und bestückte Temperierplatten mit jeweils 60 Prüflingen bei konstanten Prüfbedingungen verbaut.

In Summe werden insgesamt 12 Temperierplatten mit jeweils 60 Prüflingen, also insgesamt 720 LEDs, getestet. Jeweils 2 Temperierplatten werden über ein Temperiergerät bei gleicher Temperatur betrieben und in einem abgeschlossenen Gehäuse aus Doppelstegplatten vor Luftzirkulation im Laborraum geschützt. Die Temperaturen der Platten werden überwacht und über die Regeleinrichtung der Temperiergeräte konstant gehalten. Eine maximale Abweichung von $+/- 5^{\circ}\text{C}$ der Lufttemperatur wird über 2 Klimaanlagen im Laborraum gewährleistet, die auch bei hohen Außentemperaturen die auftretenden Verlustleistungen sicher abführen. Die Bedingungen nach LM 80 werden somit eingehalten.

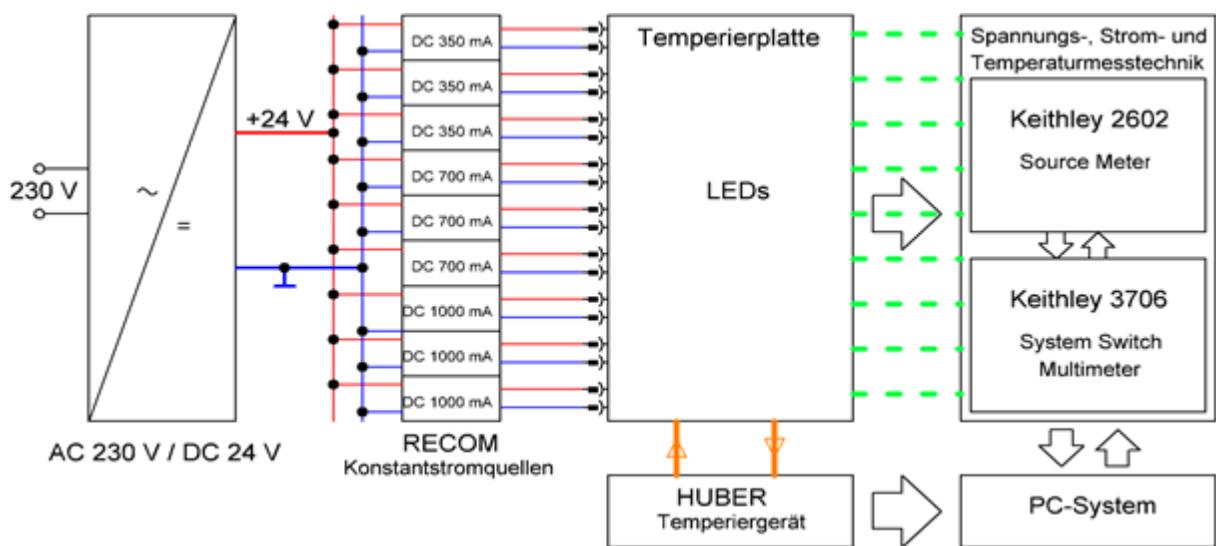


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau einer Temperierplatte mit 60 Prüflingen

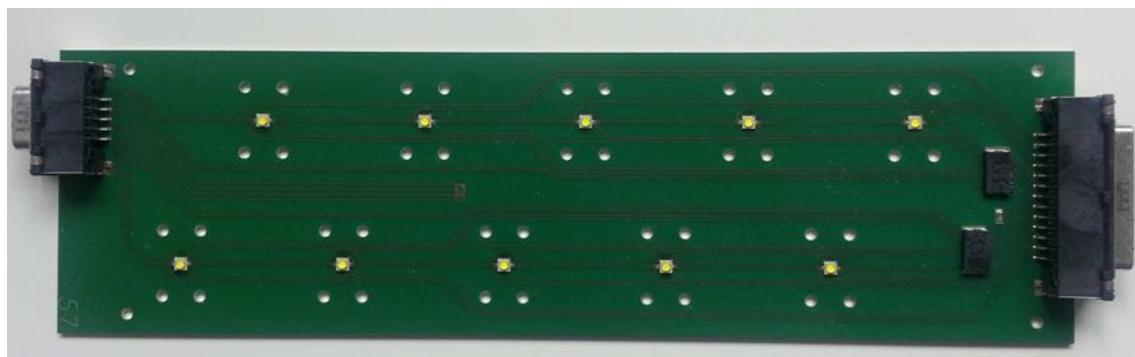


Abbildung 2.4: Platine mit 10 LED Prüflingen

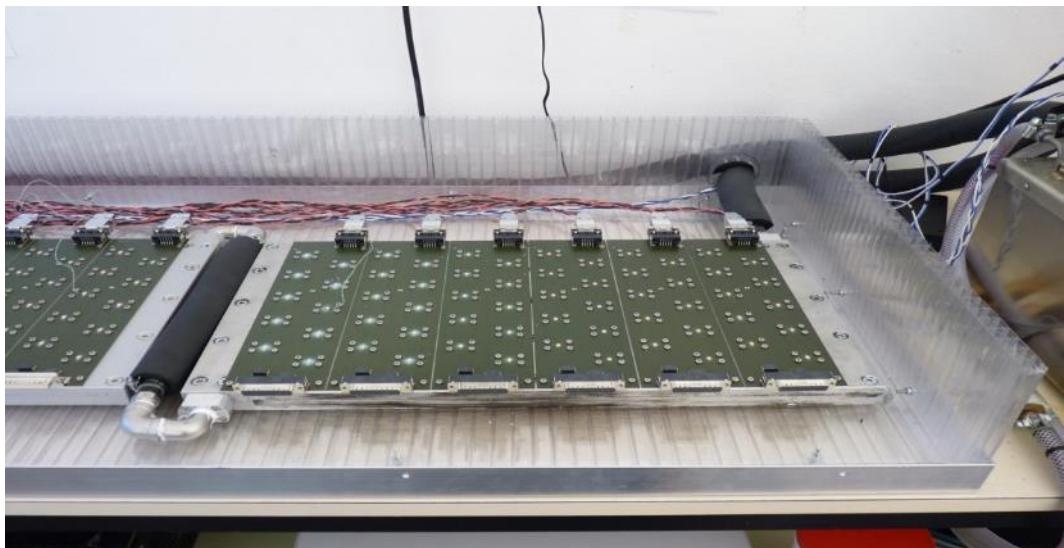


Abbildung 2.5: Platinen mit je 10 LEDs, montiert auf einer Temperierplatte
im Verbund mit einer zweiten Platte

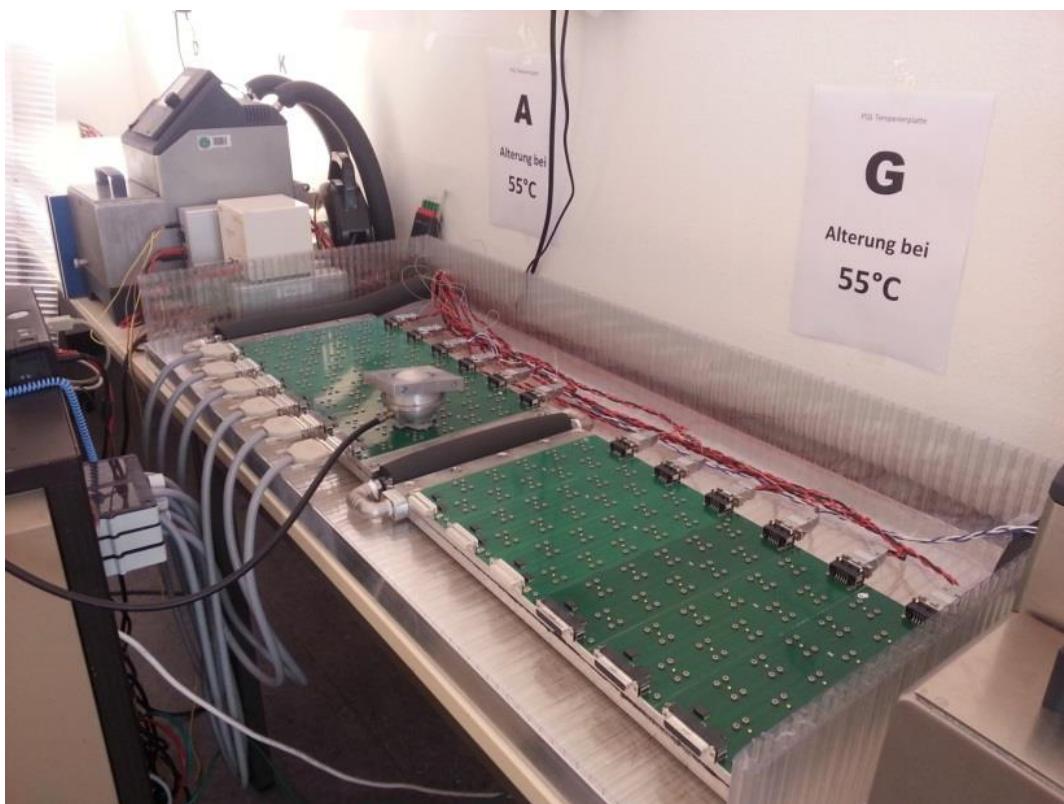


Abbildung 2.6: Zwei Temperierplatten im Verbund an einem Temperiergerät

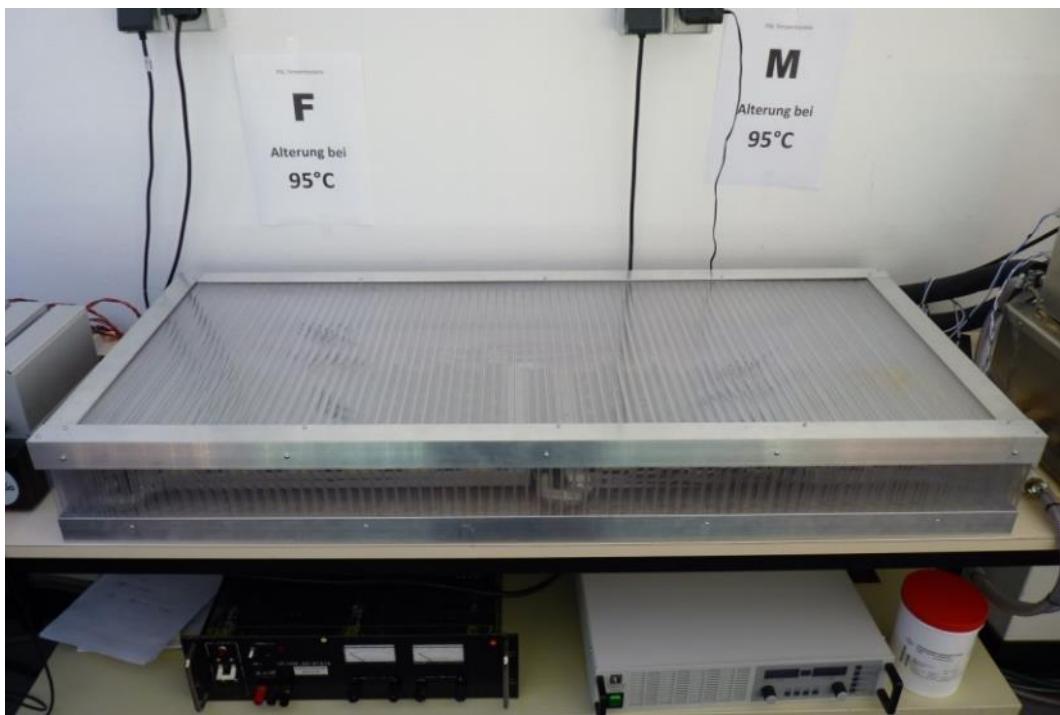


Abbildung 2.7: Geschlossenes Case umfasst 2 Platten mit insgesamt 12 Platinen, 120 Prüflingen

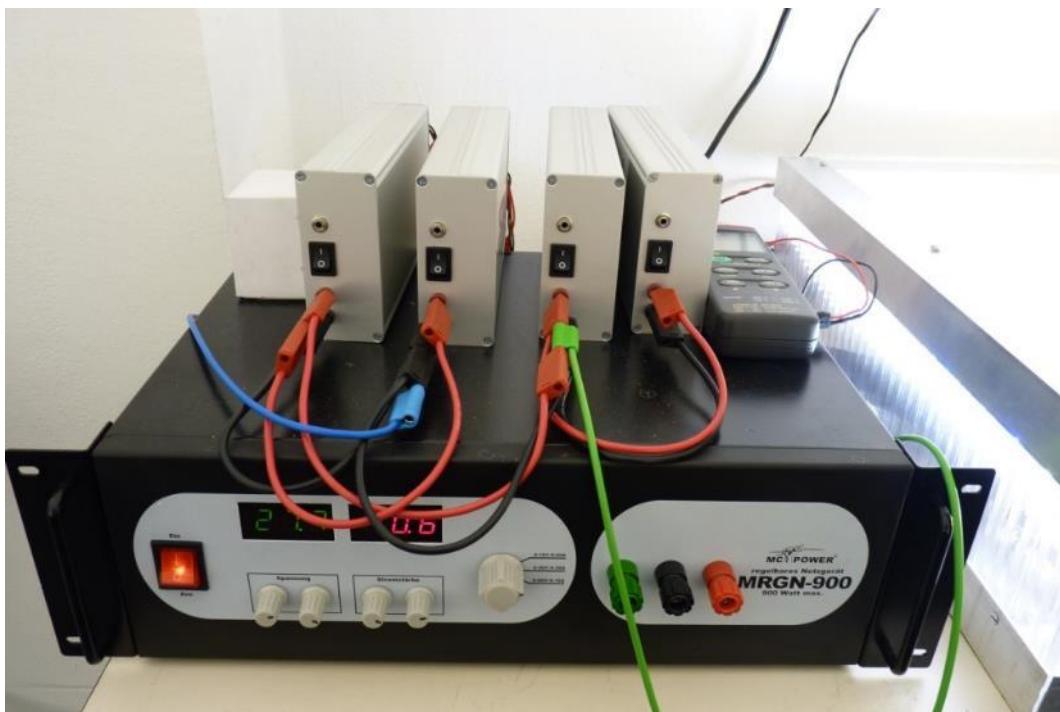


Abbildung 2.8: Primäre und sekundäre Stromversorgung und Temperaturlogger

2.1.3 Alterungsergebnisse zu den Typen LED1 und LED2 (HSH)

Laufzeiten der verschiedenen Test-LEDs

Tabelle 2.1 zeigt in einer Übersicht die Laufzeiten der verschiedenen kaltweißen (kw) und warmweißen (ww) Test-LEDs.

Tabelle 2.1: Laufzeiten der verschiedenen kaltweißen/warmweißen Test-LEDs

Platte	LED-Typ	T / °C	Zeit / h
A	LED1 (kw + ww)	55	10870
B	LED1 (kw + ww)	85	11670
C	LED1 (kw + ww)	85	11670
D	LED2 (kw + ww)	55	13030
E	LED2 (kw + ww)	85	11500
F	LED2 (kw + ww)	95	11500
G	LED1 (kw + ww)	55	10870
H	LED1 (kw)	95	8390
I	LED1 (ww)	95	8390
K	LED2 (kw + ww)	55	11310
L	LED2 (kw + ww)	85	8070
M	LED2 (kw + ww)	95	13030

Lichtstromdegradation

Die Lebensdauer und die Lichtgüte einer High Power LED hängen stark von den Umgebungsbedingungen ab, in denen das Bauteil eingesetzt wird. Eine erhöhte Betriebstemperatur kann das Alterungsverhalten der LEDs erheblich beeinflussen und ist Gegenstand dieses Forschungsprojekts.

Abbildung 2.9 zeigt 6 Platinen mit jeweils 10 LEDs, die drei linken mit kaltweißen, die drei rechten mit warmweißen LEDs desselben Typs bestückt. Von links nach rechts werden die Prüflinge mit 1000 mA, 700 mA, 350 mA, 350 mA, 700 mA, 1000 mA jeweils über Konstantstromquellen versorgt. Die stärksten Veränderungen sind an den LEDs auf den beiden äußersten Platinen zu beobachten, die jeweils mit 1000 mA versorgt wurden. Links, bei den kaltweiß strahlenden Prüflingen, zeigt die Lichtemission eine etwas gelbere Farbe als bei den beiden anderen Prüfgruppen. Zudem strahlen drei LEDs nach Beschädigung ihrer Konverter blau. Die Silikonlinsen werden durch Verkieselung spröde und hart, platzen teilweise ab und lösen dabei auch Teile der Konverterschicht vom LED-Die ab. Ein ähnliches Verhalten zeigen die warmweißen LEDs. Hier ist durch eine teilweise Ablösung des Konverters eine rosa wirkende Abstrahlung zu beobachten. Die schon mit dem bloßen Auge beobachtbaren Abweichungen wurden durch eine spektrale Messung mittels des im Projekt für die lichttechnischen Analysen beschafften Spektrometers quantitativ vermessen und in den Auswertungen dargestellt.



Abbildung 2.9: Veränderungen nach ca. 9000 h Betrieb bei 95 °C Umgebungstemperatur

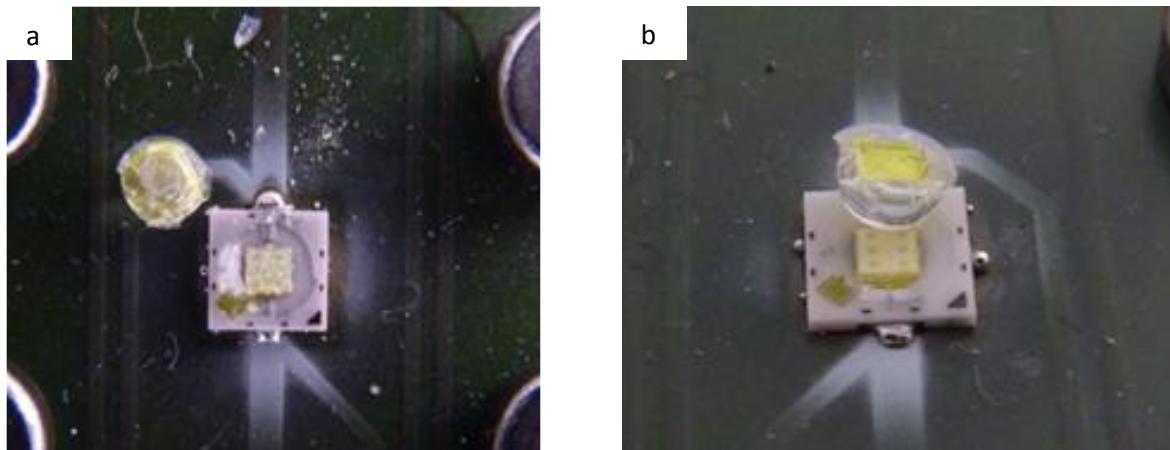


Abbildung 2.10: Beschädigung der Linse/Konverter und resultierende Farbortverschiebung

Abbildung 2.11 zeigt exemplarisch die Lichtstromverläufe von 10 LEDs, die bei 95 °C und 1000 mA gealtert wurden. Mit zunehmender Alterung bemerkt man einen verminderten Lichtstrom und einen totalen Ausfall zweier Prüflinge (blaue und gelbe Kurven) nach ca. 6500 h Betriebsdauer.

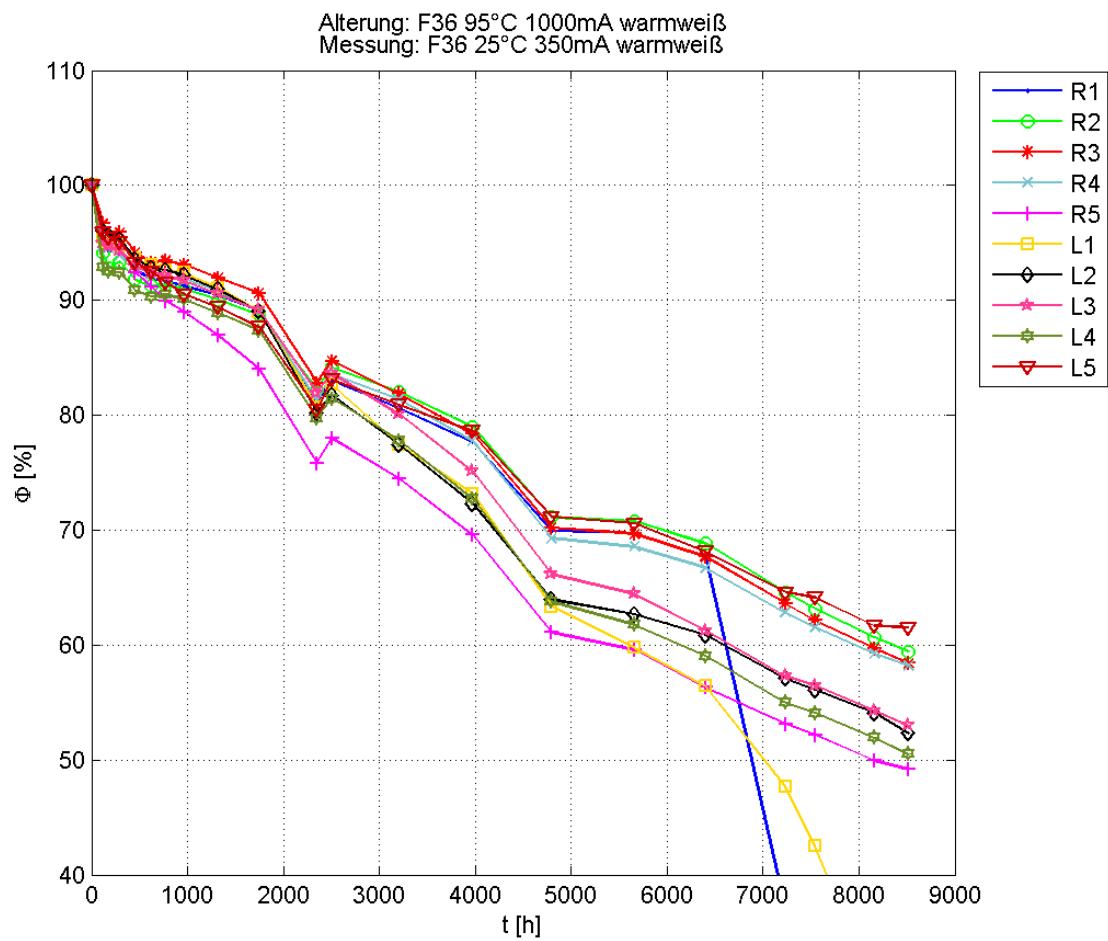


Abbildung 2.11: Lichtstromverlauf über der Zeit von 10 Test-LEDs von Typ LED2 (ww)

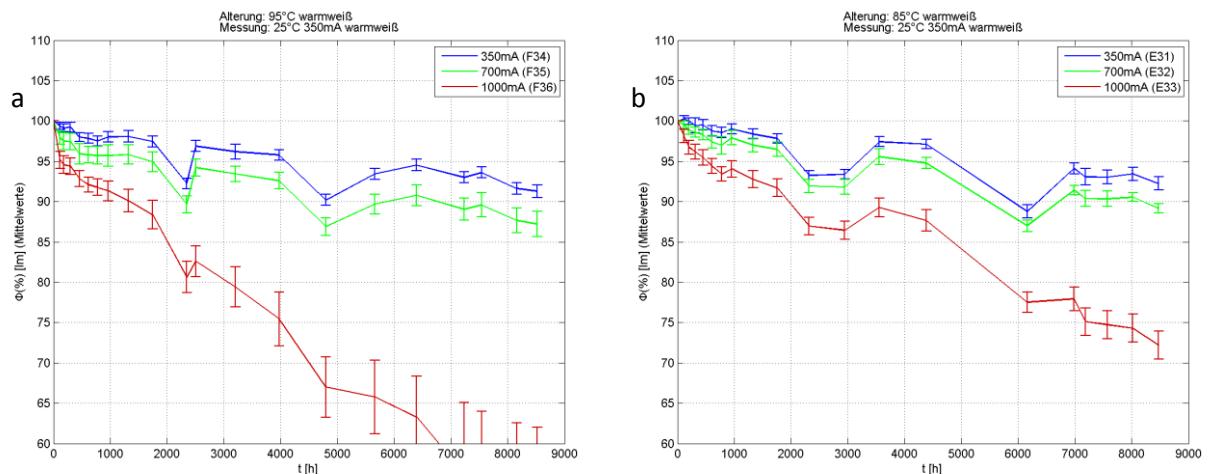


Abbildung 2.12: LED2 (ww) - Lichtstromdegradation bei 95 °C (a) und 85 °C (b)

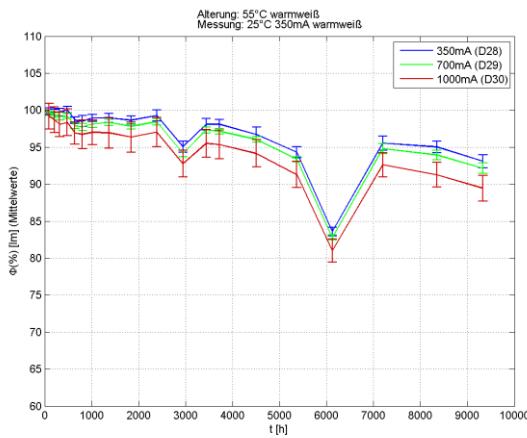


Abbildung 2.13: LED2 (ww) - Lichtstromdegradation bei 55 °C

Der Vergleich der Lichtstromverläufe über den Alterungsverlauf bei den drei Alterungstemperaturen zeigt deutlich eine verminderte Degradation des Lichtstroms bei der niedrigsten Temperatur.

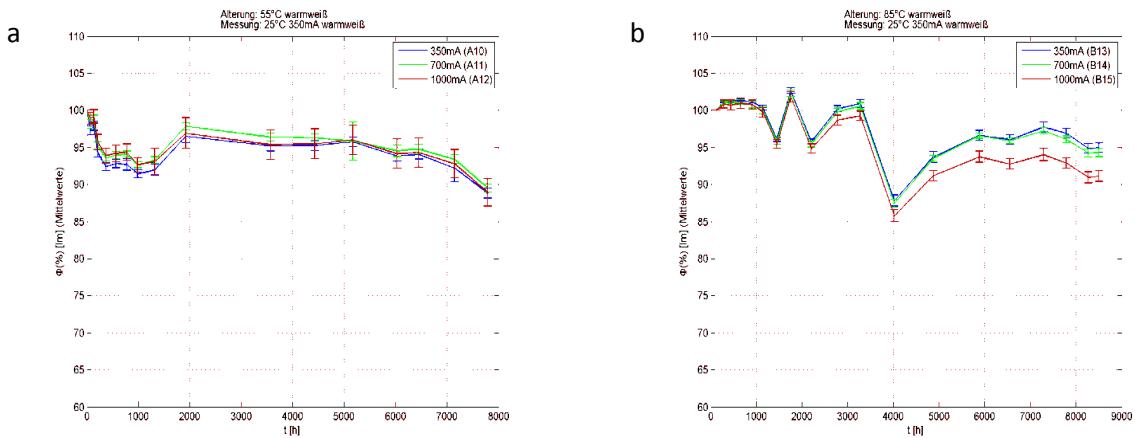


Abbildung 2.14: LED1 (ww) - Lichtstromdegradation bei 55 °C (a) und 85 °C (b)

Die LEDs des zweiten Herstellers zeigen ebenfalls Degradation des Lichtstroms über den Alterungszeitraum, aber in einem geringeren Maß.

Farbortverschiebung $\Delta u'v'$

Die Farbortverschiebung, dargestellt als Vektor zwischen Farbort zu Beginn und am Ende der Alterungsuntersuchung, zeigt eine deutliche Tendenz in den gelb-orangen Farbraum, während die LEDs mit defekten Linsen stark in den blauen Bereich tendieren.

Dies zeigt auch die Darstellung der Farbortverschiebung als Farbabstand $\Delta u'v'$ über die Zeitverlauf. Auch hier fallen wieder die zwei defekten Prüflinge aus dem zunächst nahezu linearen Degradationsverlauf heraus.

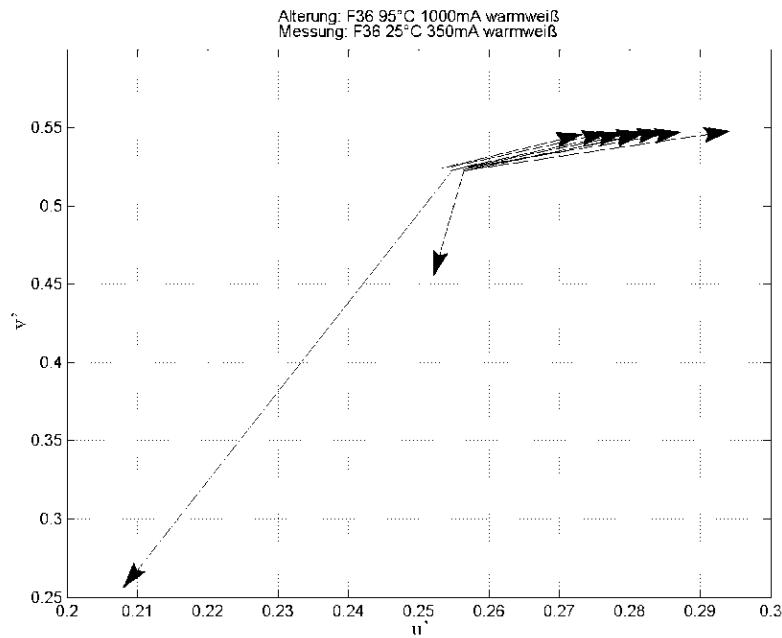


Abbildung 2.15: LED2 (ww) - Farbortverschiebung $\Delta u'v'$ bei 95 °C und 1000 mA
2 LEDs mit defekten Linsen

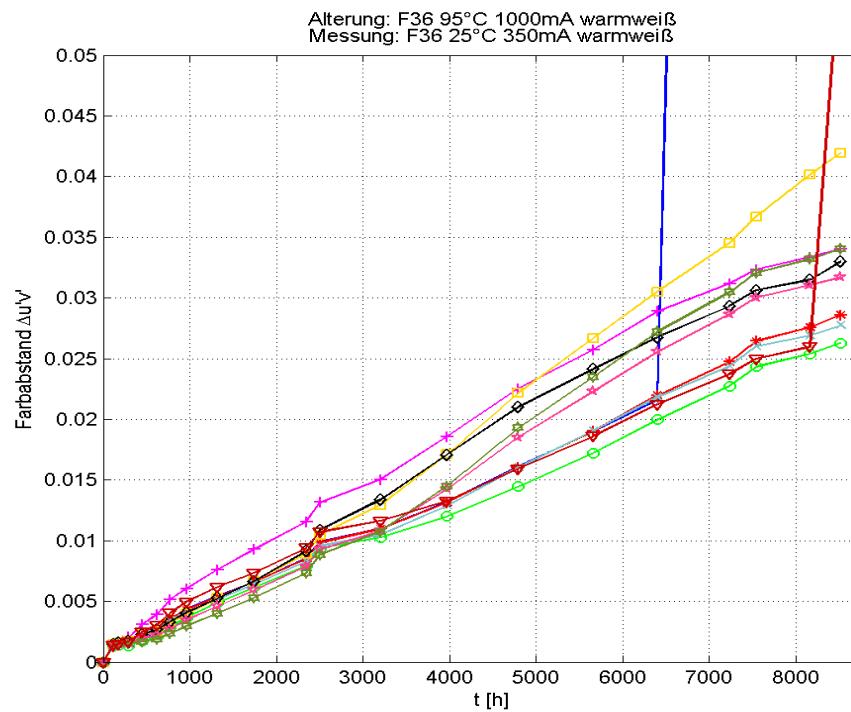


Abbildung 2.16: LED2 (ww) - 95 °C, 1000 mA: Zeitlicher Verlauf der Farbortverschiebung
2 LEDs mit defekten Linsen

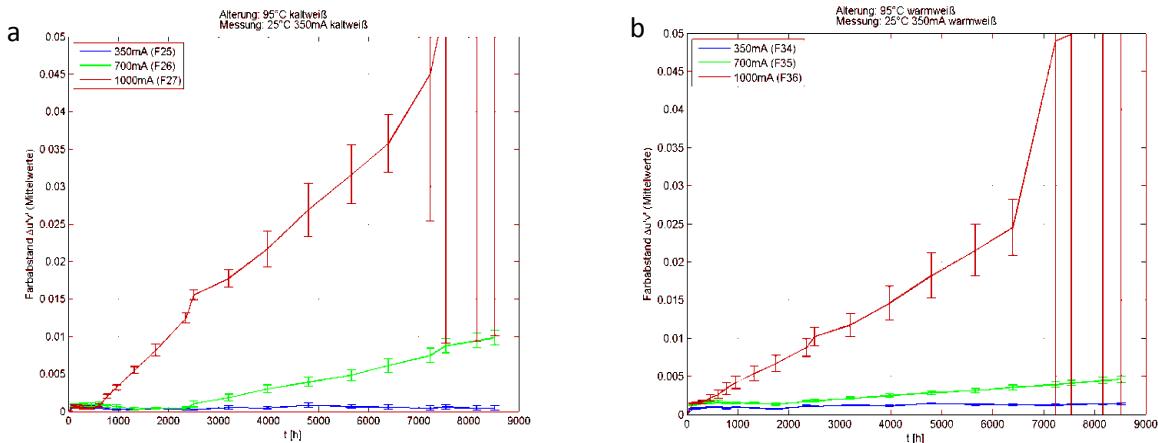


Abbildung 2.17: LED2 kaltweiß (a) und warmweiß (b) - Vergleich Farbabweichung über die Zeit

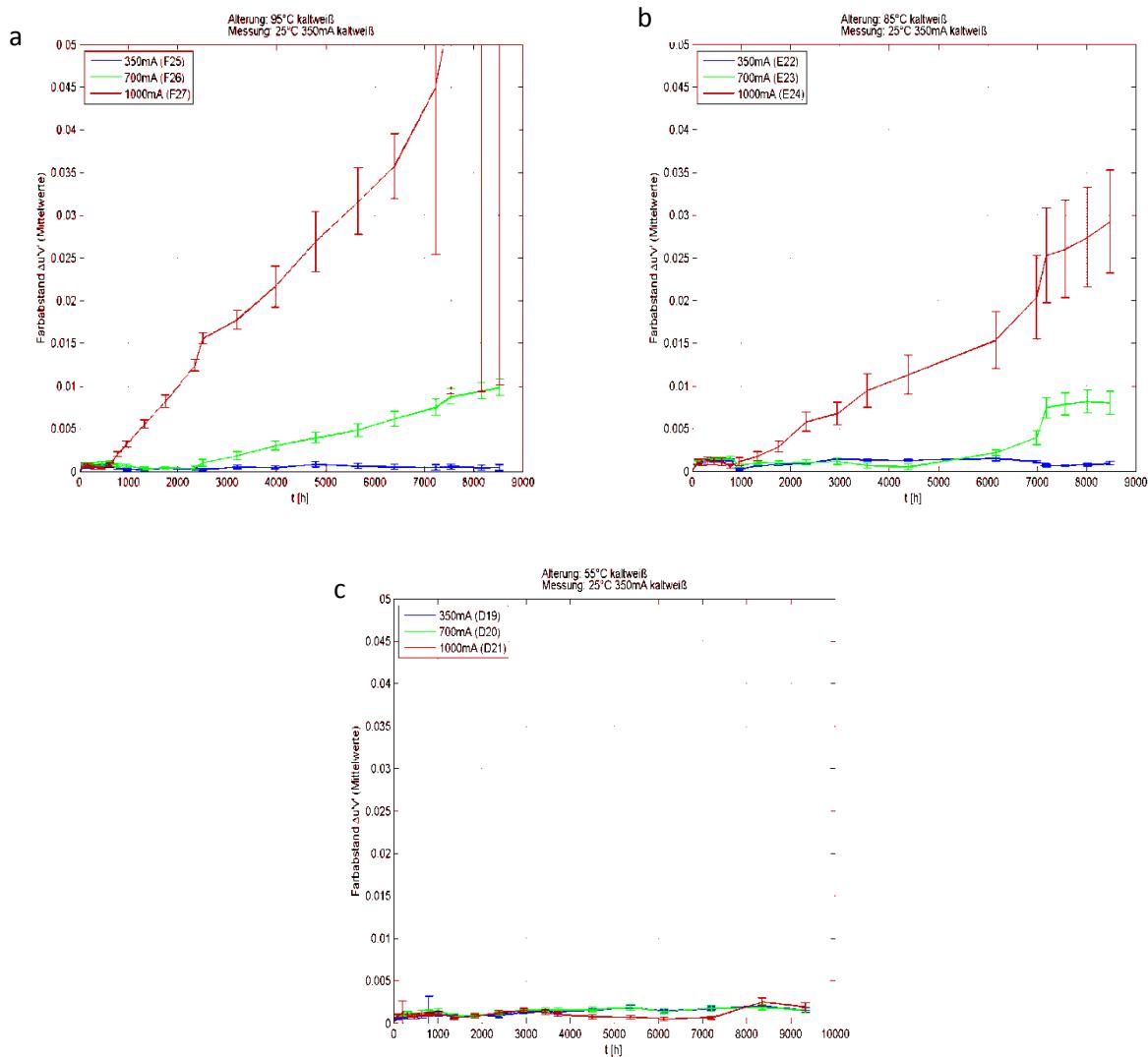


Abbildung 2.18: LED2 (kw) - Einfluss der Alterungstemperatur auf die Farbortverschiebung
a) 95 °C, b) 85 °C, c) 55 °C

Neben der Alterungstemperatur zeigen die unterschiedlichen untersuchten Dioden-Typen stark unterschiedliche Veränderungen des Farbortes über den Alterungszeitraum. Die kaltweißen LEDs eines Herstellers zeigen eine andere Farbortverschiebung über den Prüfzeitraum als die warmweißen der Vergleichsgruppe. Dies ist Hersteller- bzw. LED-Typ-abhängig. LED1 zeigt über den Testzeitraum eine geringere Farbortverschiebung als LED2. Auch hier spielt die Höhe des Versorgungstroms und die über die Verlustleistung resultierende Junction-Temperatur eine Rolle. Ein hoher Betriebsstrom führt zu einer höheren Junction-Temperatur und zu einer größeren Farbortverschiebung. Dies belegt die nachfolgende Abbildung 2.18. Die beschriebenen Beobachtungen sind bei allen Typen und untersuchten Herstellern ähnlich und in den Vergleichsmessungen reproduzierbar.

Lichtstromdegradation und Interpolation nach TM21

Nach einer Laufzeit von über 10000 Stunden ist bei allen Prüflingen eine Degradation des Lichtstroms zu beobachten, der von der Strombelastung und der Betriebs/Umbgebungstemperatur abhängt. Stärkere Degradation bei größerer Strombelastung ist bei gleicher Alterungstemperatur in allen Versuchsgruppen beobachtbar ebenso eine stärkere Degradation bei erhöhter Temperatur bei gleicher Strombelastung. Eine gute Thermomanagement, also eine gute Ableitung der Verlustwärme mit der Folge einer geringeren Junction-Temperatur sowie ein Betrieb deutlich unterhalb des maximal zulässigen Betriebsstroms (mit entsprechend geringeren Stromdichten im Chip und damit ebenfalls geringerer thermischer Beanspruchung) verlangsamen nach den hier durchgeführten systematischen Untersuchungen die Degradation des von der LED emittierten Lichtstroms.

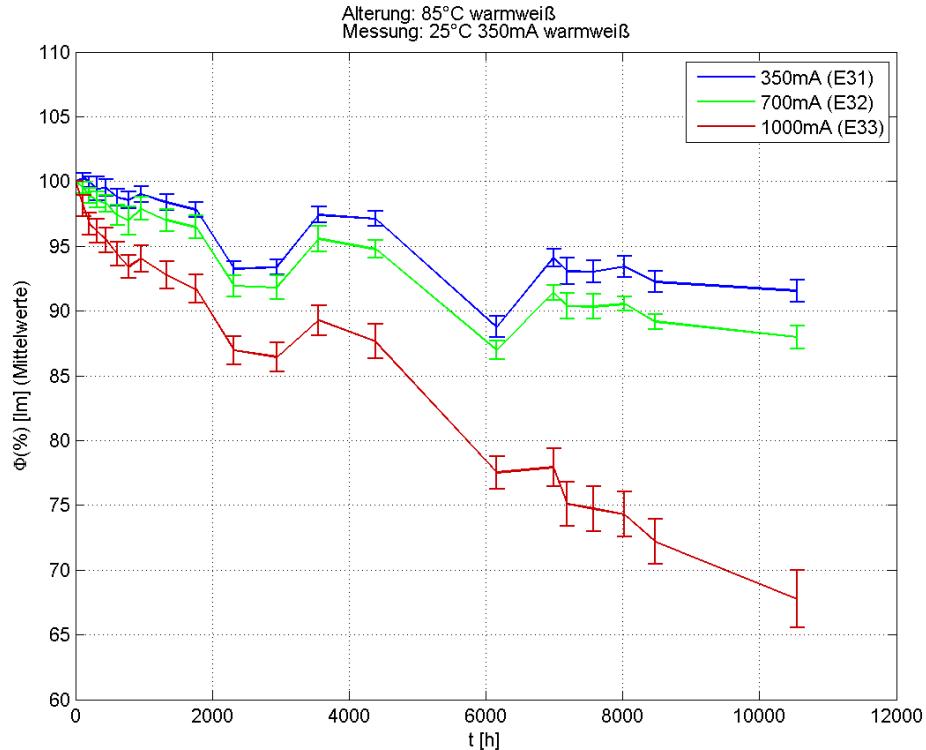


Abbildung 2.19: LED2 - Lichtstromverlauf bei 85°C (Parameter Strom)

Die Alterungskurve bei 1000 mA Strombelastung (rote Kurve in Abbildung 2.19) zeigt einen starken Abfall des Lichtstroms über den Testzeitraum, während der Verlauf bei 350 mA (blau) und 700 mA (grün) deutlich flacher ausfällt.

Interpolation nach TM21

Die im Versuch über 10 000 Stunden gewonnenen Ergebnisse werden nach der Interpolationsmethode nach TM21 ausgewertet. Die Zuverlässigkeit der Methode soll anhand der Interpolation von Teildaten einer Messreihe und Vergleich mit den weiteren realen Messwerten überprüft werden. Ist eine Übereinstimmung zwischen interpolierten und gemessenen Werten feststellbar, kann die Methode als zielführend für eine Interpolation in die Zukunft eingestuft werden.

Die Berechnung erfolgt unter folgenden Rahmenbedingungen:

- Lichtstrom normiert auf Startwert bei $t = 0$ h

- Ansatz für Lichtstrom-Degradation (exponentielle Näherung, minimale Fehlerquadrate)

$$\phi(t) = B \cdot e^{-at} \quad 2.1$$

- Berechneter Lebensdauerwert:

$$L_{70} = \frac{\ln\left(\frac{B}{0,7}\right)}{\alpha} \quad 2.2$$

- Die Berechnung erfolgt jeweils für 10 LEDs in einer Testgruppe. Dabei sind LED-Typ, Temperatur und Strom gleich. Es ergibt sich dann daraus ein berechneter L70-Wert.
- Eine Beschränkung wegen der Testdauer wird nicht betrachtet (kein „reported L₇₀“ nach TM21, vgl. [31]).

Die Abbildung 2.20 zeigt den Verlauf der Alterung von LED2 (ww) bei unterschiedlichen Temperaturen und gleichen Versorgungsstrom (hier 1000 mA). Die LED-Gruppe mit der längsten zu erwartenden Lebensdauer wurde bei einer Temperatur von 55 °C am wenigsten gestresst. Die Lebensdauer der 95 °C Prüflinge im Test liegt mit ca. 5000 Stunden (bis 70 % vom Startlichtstrom) am niedrigsten.

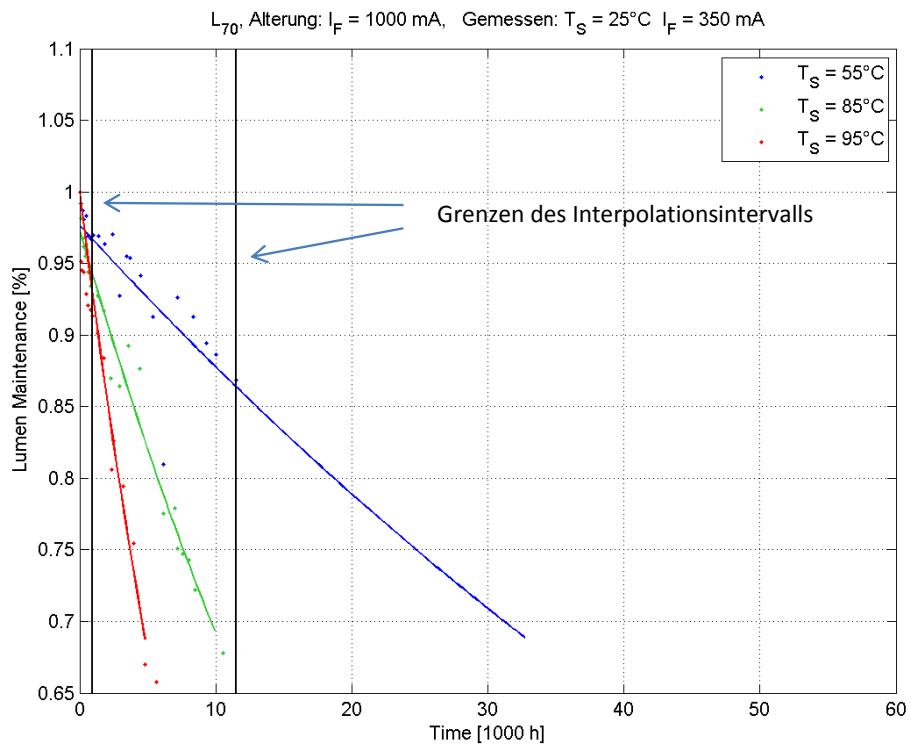


Abbildung 2.20: LED2 (ww) - Alterung bei 1000 mA

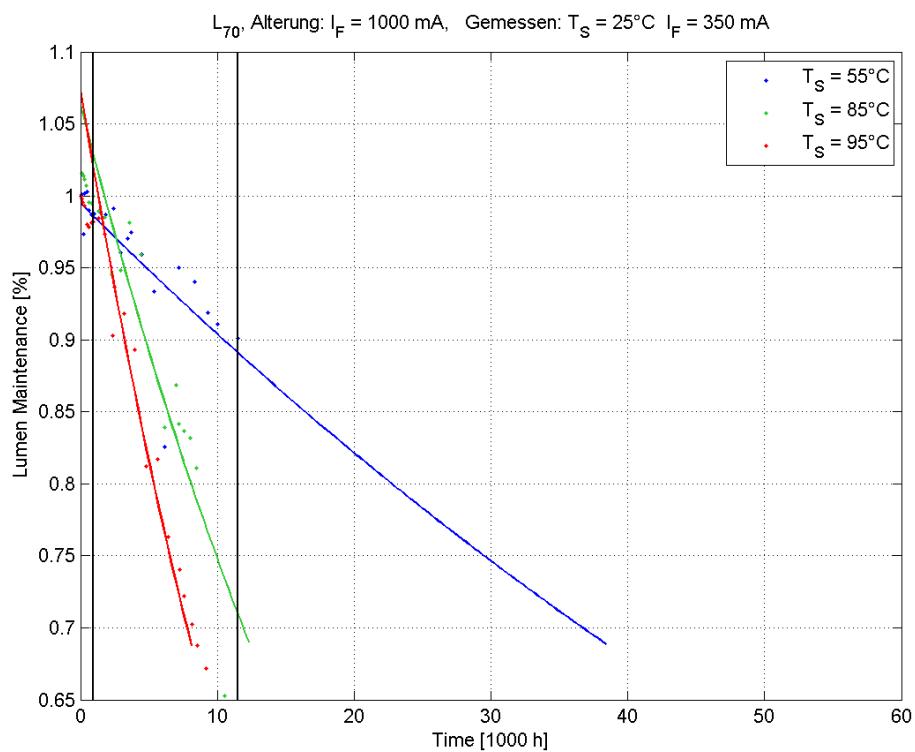


Abbildung 2.21: LED2 (kw) - Alterung bei 1000 mA

Die errechnete Alterungskurve der kaltweißen LED1 zeigt einen ähnlichen Verlauf, aber ein geringeres Gefälle. Diese LEDs altern also langsamer und erreichen eine längere Lebensdauer bis sie die 70 % Marke der Lichtstromdegradation erreichen.

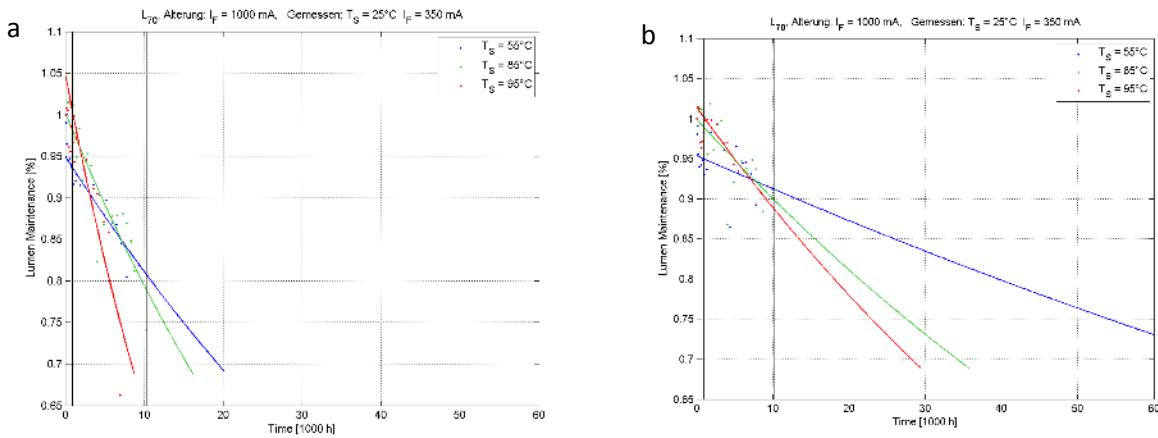


Abbildung 2.22: LED1 kaltweiss (a) und warmweiss (b) - Alterung mit 1000 mA

Der andere LED-Typ zeigt bei gleichen Randbedingungen gleiches Verhalten. Allerdings zieht in dieser Darstellung ein stark abweichender Messwert die 95 °C Kurve der kaltweißen LED stark nach unten.

Variation der Stützstellen für die L₇₀-Interpolation

Die Zuverlässigkeit der Methode soll anhand der Interpolation von Teildaten einer Messreihe und Vergleich mit den weiteren realen Messwerten überprüft werden. Die Grenzen des Interpolationsintervalls und die damit resultierende Lage der Stützstellen können das Interpolationsergebnis der Degradationskurven stark beeinflussen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die variierten Grenzen des Interpolationsintervalls und die daraus resultierenden L₇₀-Werte. Ist eine Übereinstimmung zwischen interpolierten und gemessenen Werten feststellbar, kann die Methode als zielführend für eine Interpolation in die Zukunft eingestuft werden.

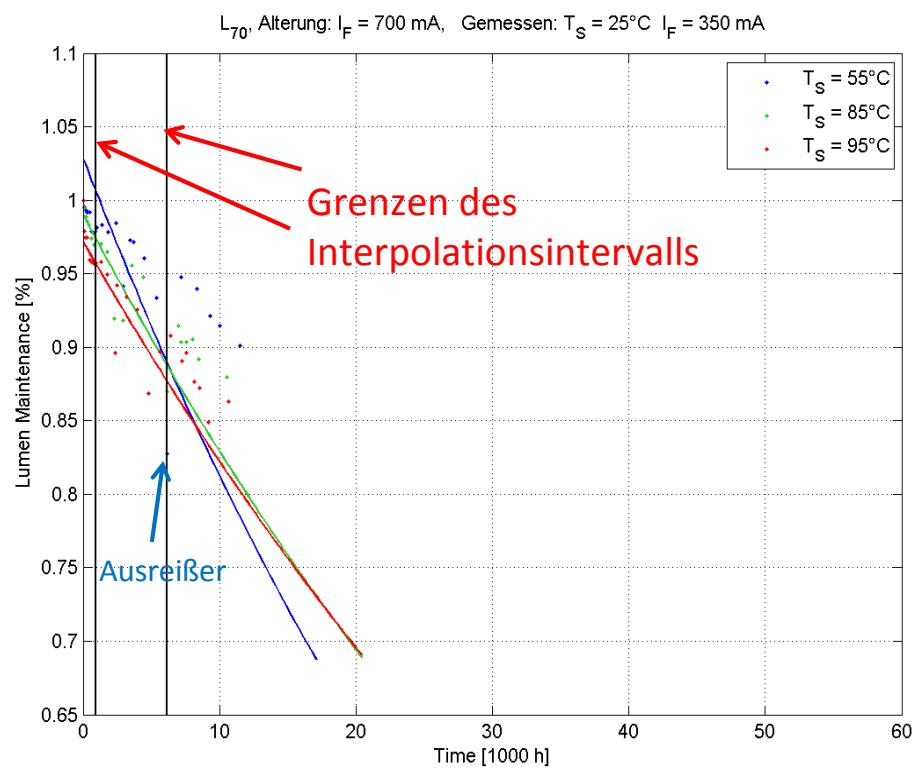


Abbildung 2.23: LED2 - Stützstellen 1000 h – 6000 h, Alterung mit 350 mA

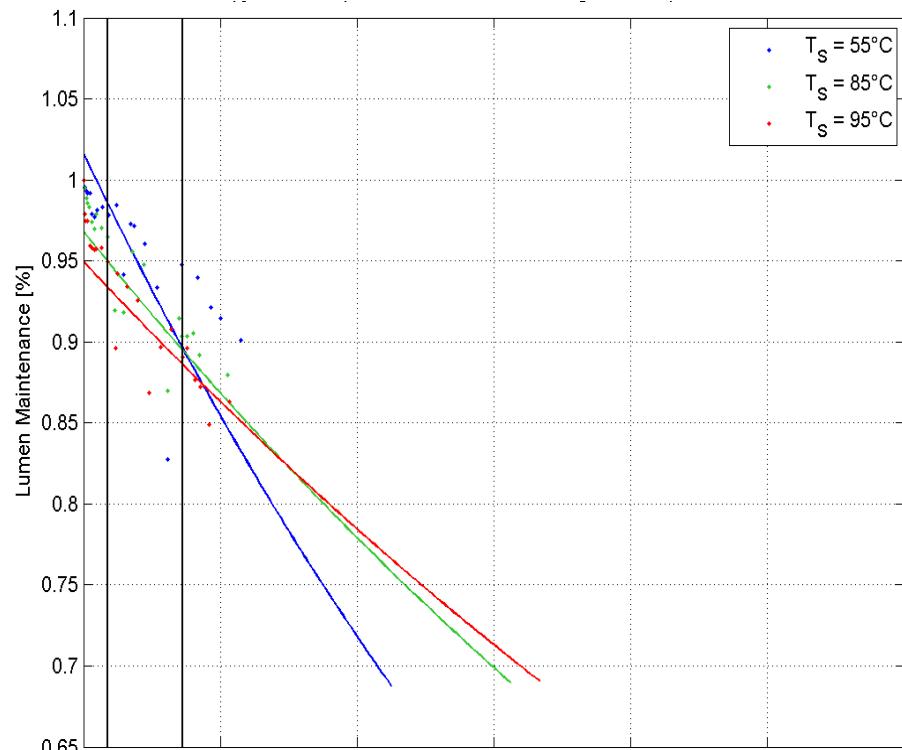


Abbildung 2.24: LED2 - Stützstellen 2000 h – 7000 h, Alterung mit 700 mA

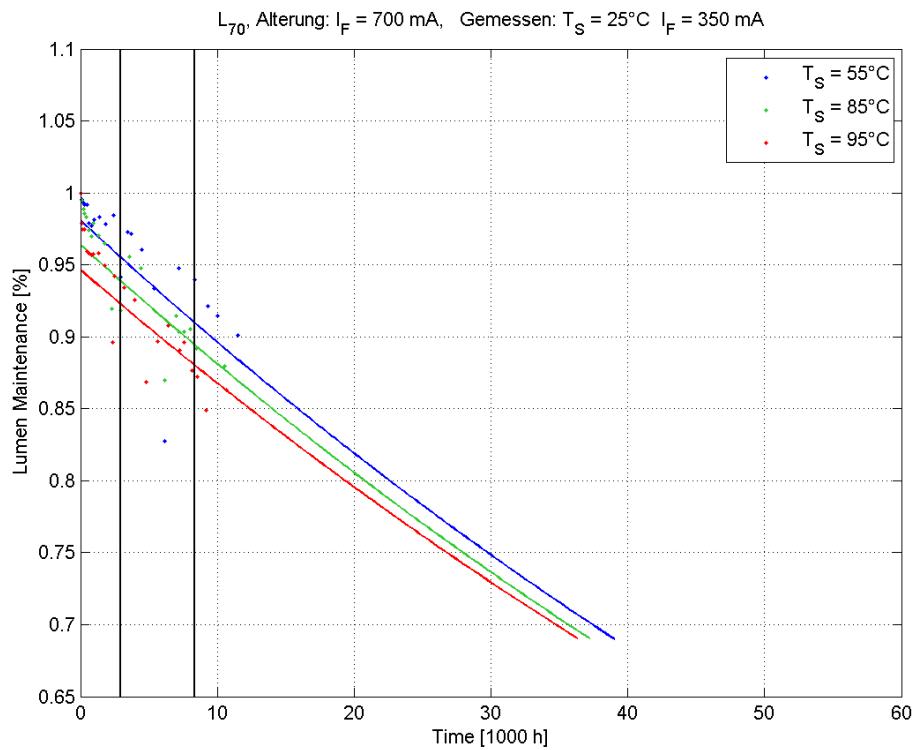


Abbildung 2.25: LED2 - Stützstellen 3000 h -8000 h, Alterung mit 700 mA

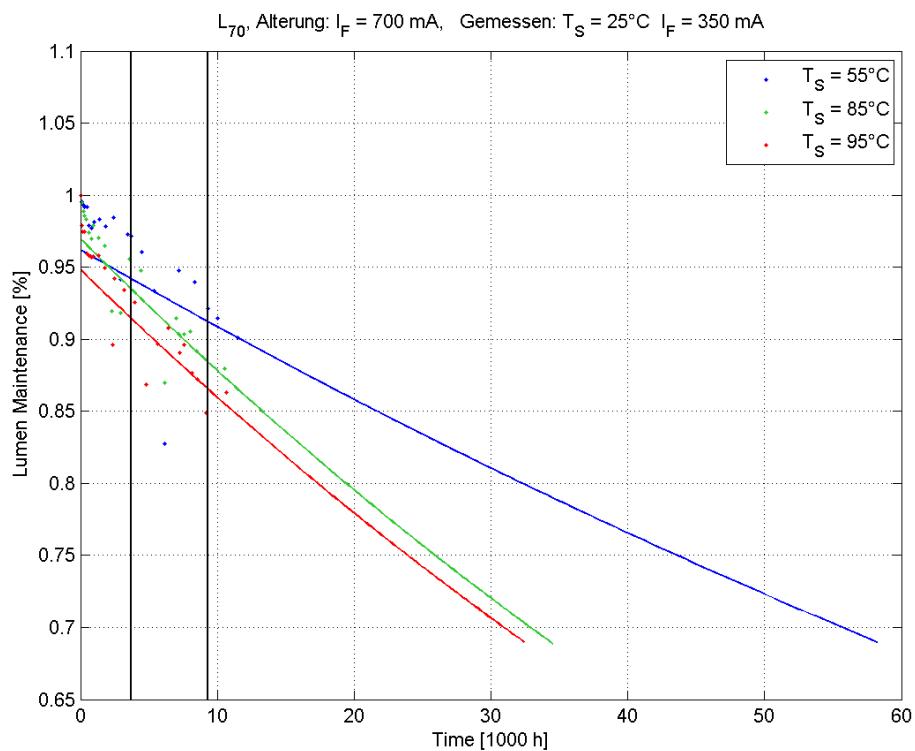


Abbildung 2.26: LED2 - Stützstellen 4000 h – 9000 h, Alterung mit 700 mA

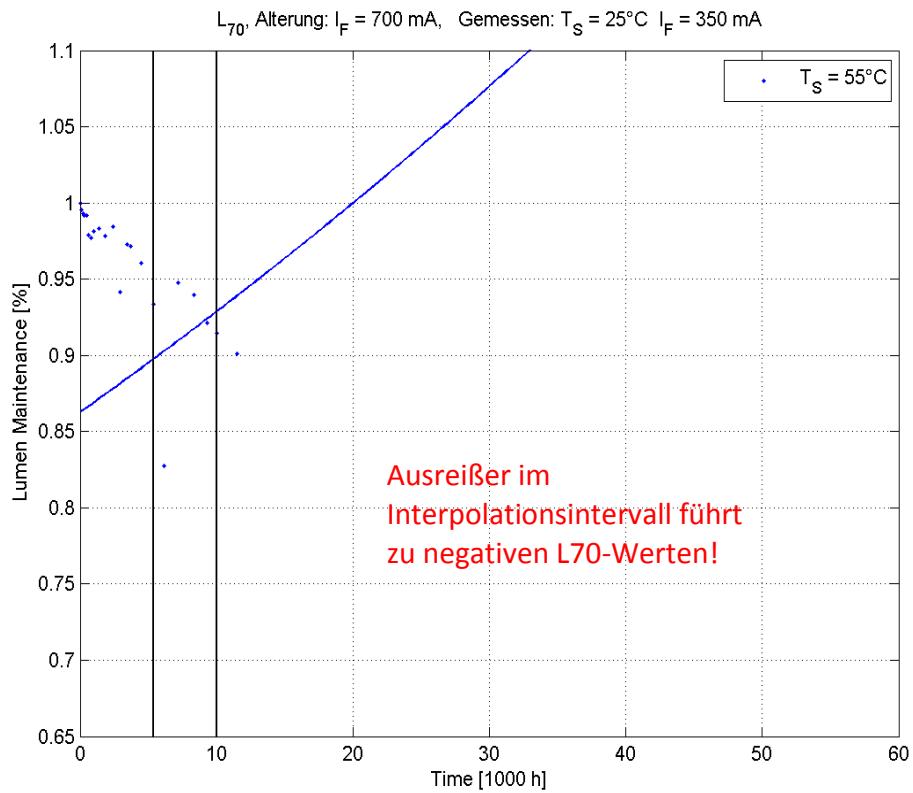


Abbildung 2.27: LED2 - Stützstellen 5000 h -10000 h, Alterung mit 700 mA

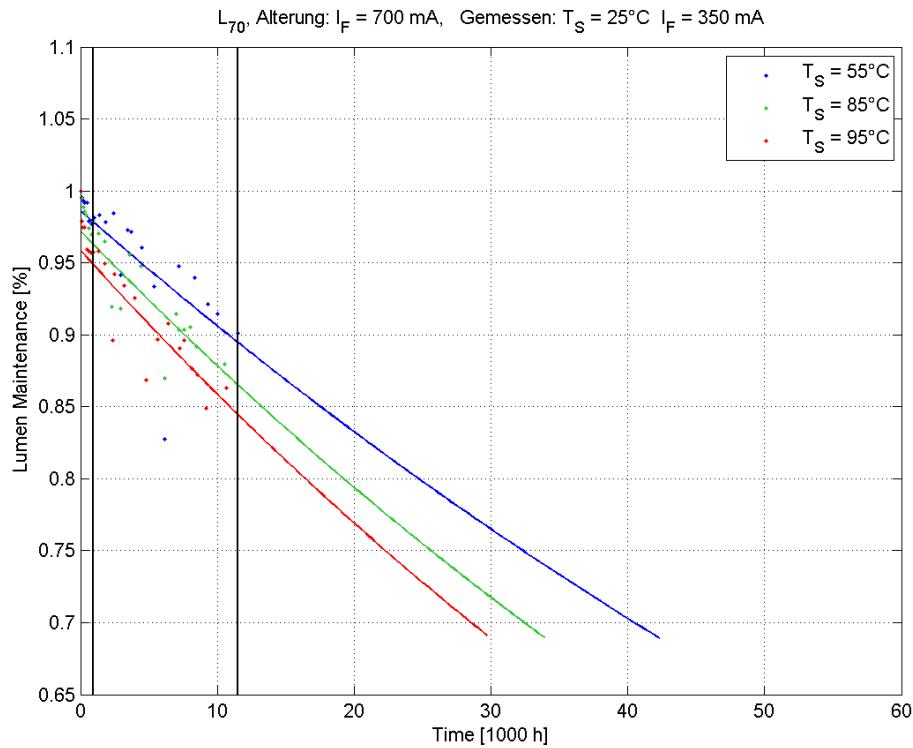


Abbildung 2.28: LED2 - Werte ab 1000h, Alterung mit 700 mA

Wie man an den gezeigten Darstellungen sieht, kann die Auswahl der Interpolationsgrenzen das Ergebnis der Interpolation sehr stark beeinflussen. Sogar „negative“ Rechenergebnisse für die Lebensdauer sind möglich, werden aber nach TM21 von vornherein als ungültig ausgeschlossen.

Arrhenius Violation – Auffälligkeiten bei den Ergebnissen

Entgegen der bislang erzielten Ergebnisse, dass die Prüflinge bei höheren Temperaturen schneller degradieren, kann man bei den Interpolationen auch vereinzelt das gegenteilige Verhalten beobachten. Abbildung 1.29 zeigt, dass die LEDs mit der niedrigsten Temperatur schneller degradieren dies steht im Widerspruch zu den bisher gemachten Beobachtungen und dem erwarteten Ergebnis.

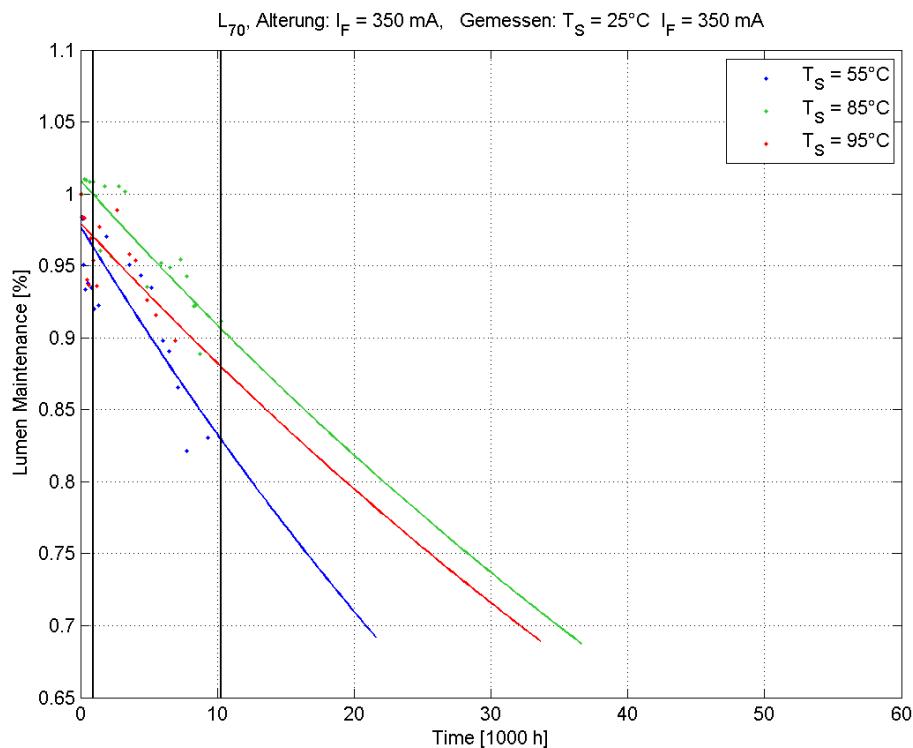


Abbildung 2.29: LED1 (kw) - Arrhenius Violation, Alterung mit 350 mA

Berechnung der Junction-Temperatur im thermisch stabilen Dauerversuch

Die Junction-Temperatur als die maximale Temperatur im Halbleiterbauelement kann auch für die unterschiedlichen Verläufe der Degradationskurven mit herangezogen werden.

Um die Junction-Temperatur zu messen wird wie folgt vorgegangen:

- Unter Annahme einer linearen Regression wird für jeden Messstrom (350 mA, 700 mA, 1000 mA) und jede Diode der Temperaturkoeffizient T_k berechnet.
- Die U-I-Kennlinien jeder Diode bei Alterungstemperatur und allen „kälteren“ Temperaturen wird gemessen (thermisch eingeschwungen).

- Aus dem Messwert der Durchlassspannung der Diode im Dauerbetrieb wird mit Hilfe des ermittelten T_k -Wertes die Junction-Temperatur T_j für jede LED sowie die jeweilige Temperaturüberhöhung ΔT berechnet.
- Die Mittelwerte der 72 Versuchsgruppen zu je 10 LEDs auf jeweils einer Platine werden berechnet.

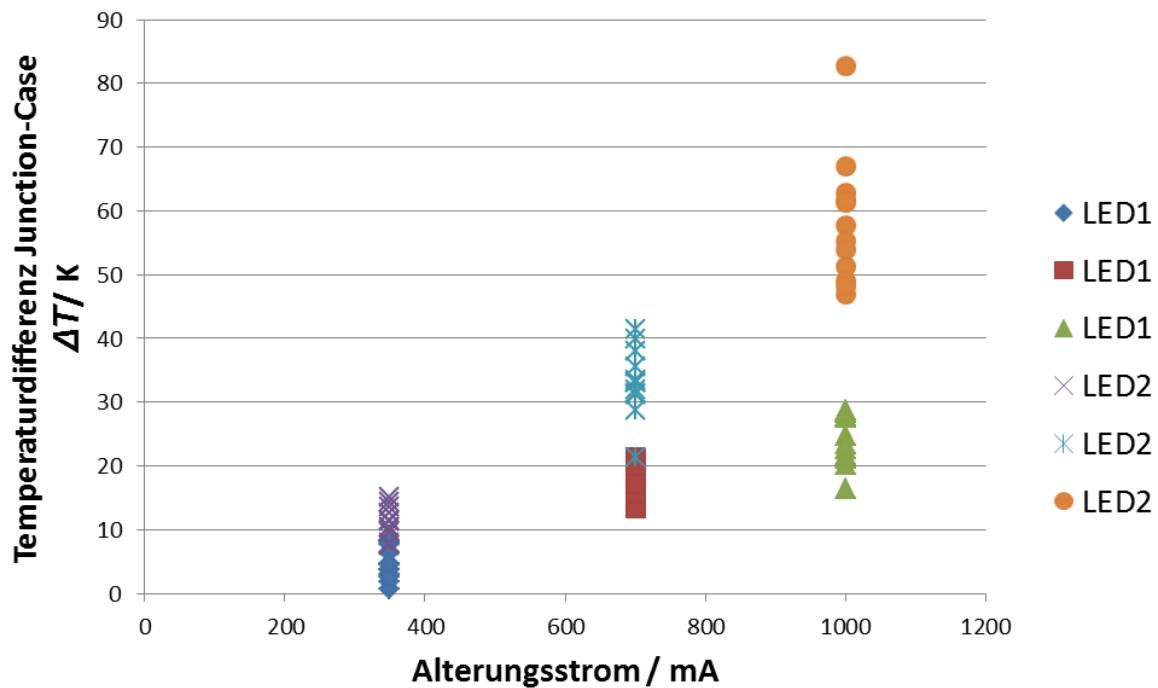


Abbildung 2.30: Ermittelte Junction Temperaturen im thermisch eingeschwungenen Zustand

Die Junction-Temperaturen variieren je nach Belastungsstrom, sind aber auch stark vom jeweiligen LED-Typ abhängig. So liegen alle Temperaturen von LED2 im jeweiligen Betriebspunkt deutlich höher als die von LED1.

Bei den mit 95 °C und 1000 mA sehr stark (aber noch innerhalb der Bedingungen der Spezifikation) belasteten LEDs wurden in den Silikonlinsen offenbar unterschiedliche Alterungsprozesse ausgelöst.

Abbildung 2.31 zeigt eine Leuchtdiode vom Typ LED2 im Neuzustand und nach 7000 h, Abbildung 2.32 die LED1 unter gleichen Randbedingungen im direkten Vergleich.

Während sich das Silikon von LED2 stark verändert hat sind bei LED1 keine Veränderungen offensichtlich. Dieses Verhalten war in den zeitversetzt laufenden Vergleichsgruppen mit gleichen LEDs nach gleicher Erprobungszeit reproduzierbar.

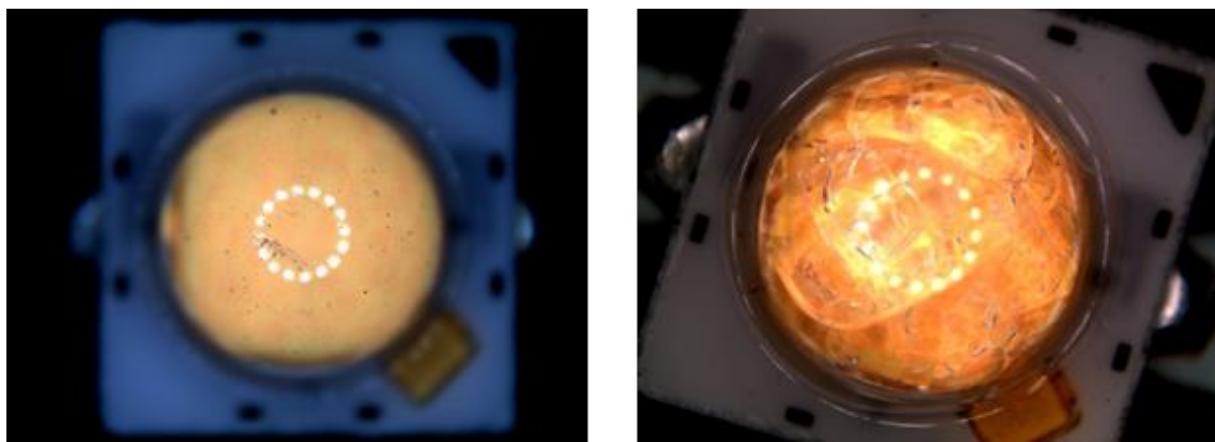


Abbildung 2.31: LED2 (ww), Alterung bei 95°C und 1000 mA 0 h (links) und 7000 h (rechts)

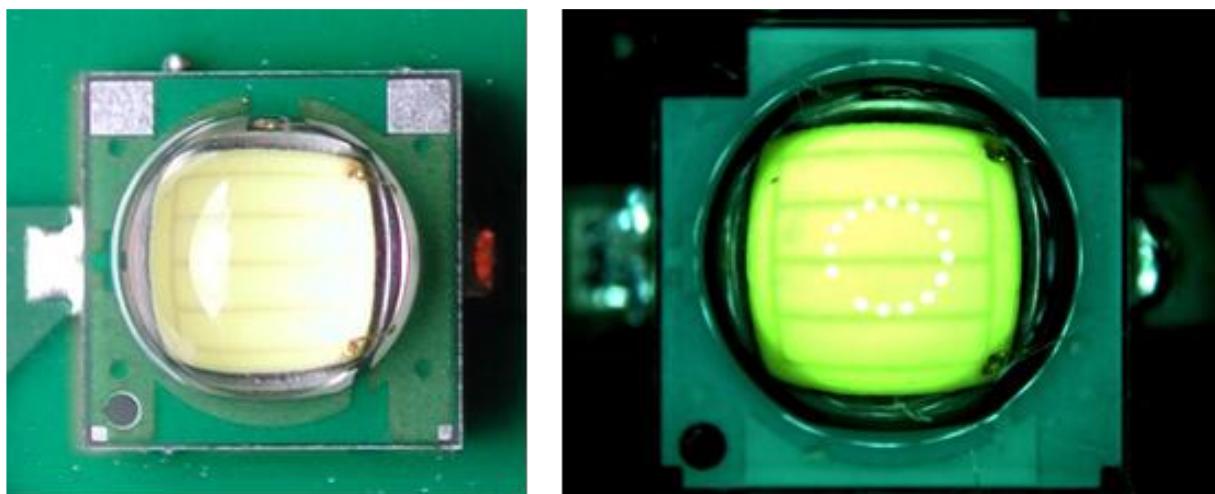


Abbildung 2.32: LED1 (kw), Alterung bei 85 °C und 1000 mA 0 h (li.) und 7000 h (re.)

Stellt man den berechneten L_{70} -Wert in Abhängigkeit von der Junction-Temperatur dar, erhält man die Diagramme in Abbildung 2.33. Auch hier ist ein schwacher Trend erkennbar, dass ein optimales Wärmemanagement mit der Folge geringerer Junction-Temperaturen die berechneten Lebensdauerwerte der LED erhöht. Die Beobachtungen bei den Alterungsuntersuchungen in der Zusammenfassung:

- Die berechneten L_{70} -Werte schwanken abhängig vom Interpolationsintervall stark.
- Negative L_{70} -Werte sind rechnerisch möglich, werden nach TM21 aber verworfen, da sie physikalisch nicht sinnvoll sind.
- Bei kleinen Strömen (350 mA) verlaufen die Lichtstrom-Degradations-Kurven auch bei verschiedenen Alterungstemperaturen ähnlicher.
- Bei größeren Strömen verläuft die Degradation i.d.R. schneller.
- Die Lichtstromdegradation verläuft bei großen Strömen und hohen Junction-Temperaturen mit Abstand am schnellsten.

Für den praktischen Anwender lässt sich daraus folgern, dass auf eine sehr gute thermische Anbindung und Kühlung der LED geachtet werden und diese in ihrem elektrischen Betriebspunkt möglichst weit von den spezifizierten Strom-Grenzwerten entfernt betrieben werden sollte, wenn das Alterungsverhalten optimal, d.h. möglichst langsam verlaufen soll.

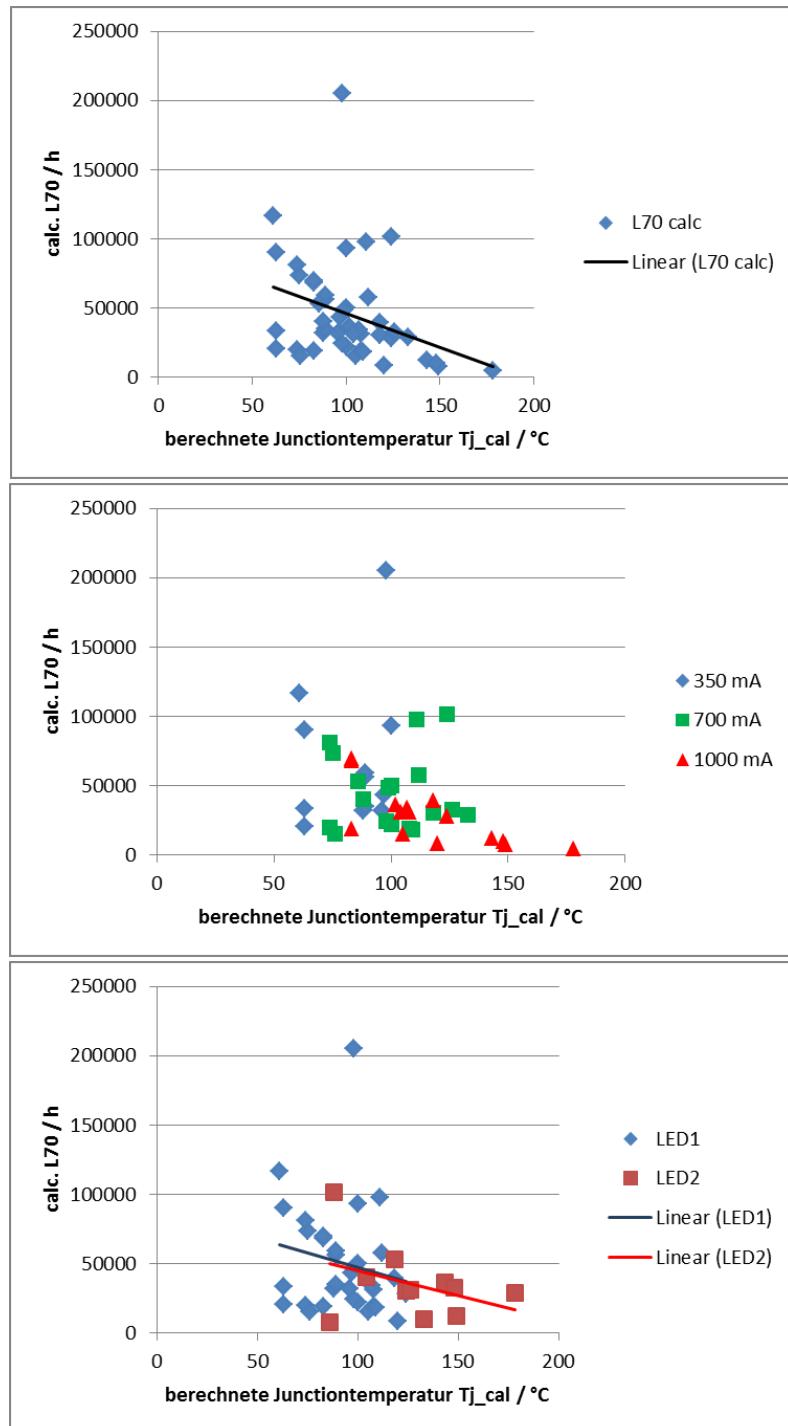


Abbildung 2.33: Lebensdauer L_{70} über Junction-Temperatur

2.1.4 LED-Alterung der Typen LED3/LED4 an der TU Darmstadt (TUDa)

Die LED-Alterung und die damit verbundene Analyse der Degradationsmechanismen von Hochleistungs-LEDs bilden einen der Haupteile des Forschungsvorhabens. Die Wichtigkeit der Untersuchung der LED-Lebensdauer wurde während der Projektlaufzeit von den Mitgliedsfirmen des PA mehrfach betont und mit wertvollen fachlichen Beiträgen und Hinweisen unterstützt. Die geplante Arbeit konnte im Rahmen des Projekts vollständig umgesetzt werden.

Alterungsaufbau und LED-Auswahl

Der Alterungsaufbau an der TU Darmstadt setzt die Anforderungen der IESNA LM-80-08 um. Diese Norm hat sich international als die sinnvollste etabliert und wird von allen LED-Herstellern weltweit angewendet. Die in der Norm festgelegten Alterungsbedingungen geben die meisten in der Praxis anzutreffenden Fälle wieder.

Für die LED-Alterung wurden zwei LED-Typen ausgewählt, die zu Beginn des Projekts 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 LM-80-08 übernommen. Diese definiert als Pflichttemperaturen 55 °C und 85°C. Die dritte, frei wählbare, Temperatur, wurde an der TU Darmstadt mit 95°C festgelegt. In Tabelle 1.2 sind die Alterungsbedingungen an der TU Darmstadt dargestellt.

Tabelle 2.2: Bedingungen für die Alterung der HP-LEDs an der TU Darmstadt

	350 mA	700 mA	1000 mA
55 °C	LED3 4000 K LED4 4000 K	LED3 4000 K LED4 4000 K	LED3 4000 K LED4 4000 K
		LED3 4000K LED4 4000 K	LED3 4000 K LED4 4000 K
85 °C	LED3 4000 K LED4 4000 K	LED4 blau LED3 blau	LED3 4000 K LED4 4000 K
95 °C	LED3 4000 K LED4 4000 K	LED3 4000 K LED4 4000 K	LED3 4000 K LED4 4000 K

Der Alterungsaufbau ist in Abbildung 2.34 dargestellt. Für die Regelung der Temperatur und die Aufnahme der elektrischen Werte wurden eigene Soft- und Hardwarelösungen entwickelt.



Abbildung 2.34: 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 Steuertoolsoftware 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 2.35 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.

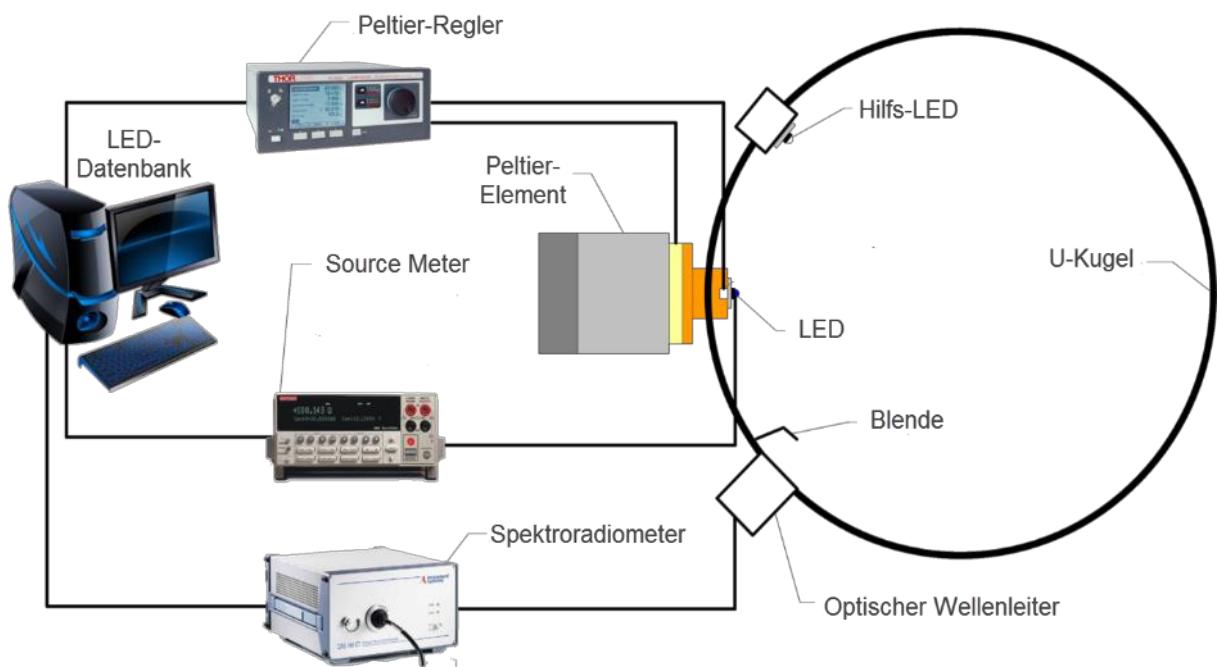
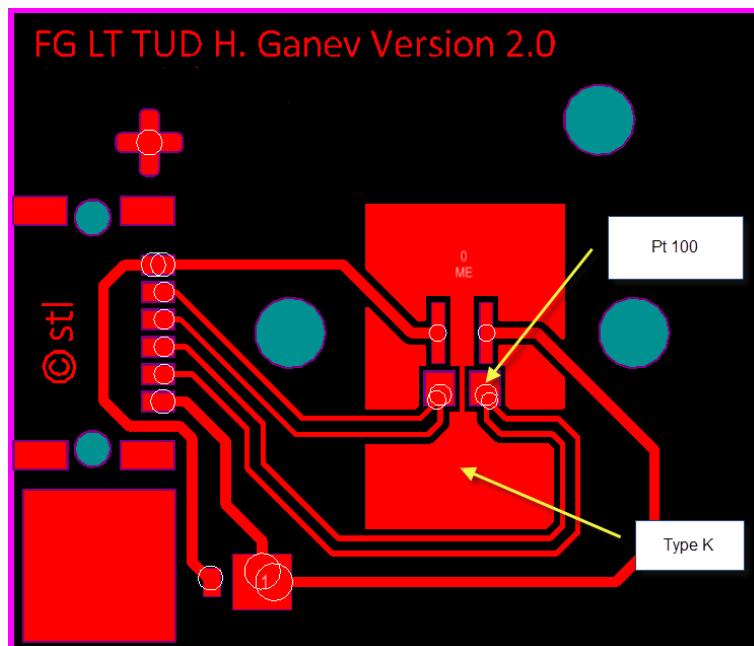


Abbildung 2.35: Messaufbau am FG Lichttechnik der TU Darmstadt



Neben den lichttechnischen Messungen, wurden auch die elektrischen Größen aufgenommen. Damit auch hier eine hohe Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte entsteht, wurden eigens entwickelte Messboards eingesetzt. Der Aufbau einer solchen Platine ist in Abbildung 2.36 dargestellt.

Auf der Platine sind zwei Temperatursensoren (Pt 100 und Thermopaar Typ K) 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 25 °C Gehäuse-Temperatur 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 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.

Datenauswertung und Ergebnisse

Für die Datenauswertung wurde eine eigene Software entwickelt, mit deren Hilfe die Messdaten systematisiert und bearbeitet wurden. Nach der Initialmessung wurden die LEDs in die ersten 1000 Brennstunden alle 250 Stunden gemessen. Danach erhöhte sich der Messschritt auf 1000 Stunden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Alterung der weißen LEDs vorgestellt. Die Abbildung 2.37 bis Abbildung 2.39 zeigen für die drei Temperaturstufen den relativen Lichtstromrückgang in Prozent (Y-Achse) in Relation zur Brennzeit der LEDs (X-Achse). In jeder der Abbildungen sind drei Kurven dargestellt, die den Mittelwert des Lichtstroms der 20 Messmuster je Stromniveau repräsentieren. Als Fehlerbalken wird die Standardabweichung für jeden Messwert aufgetragen.

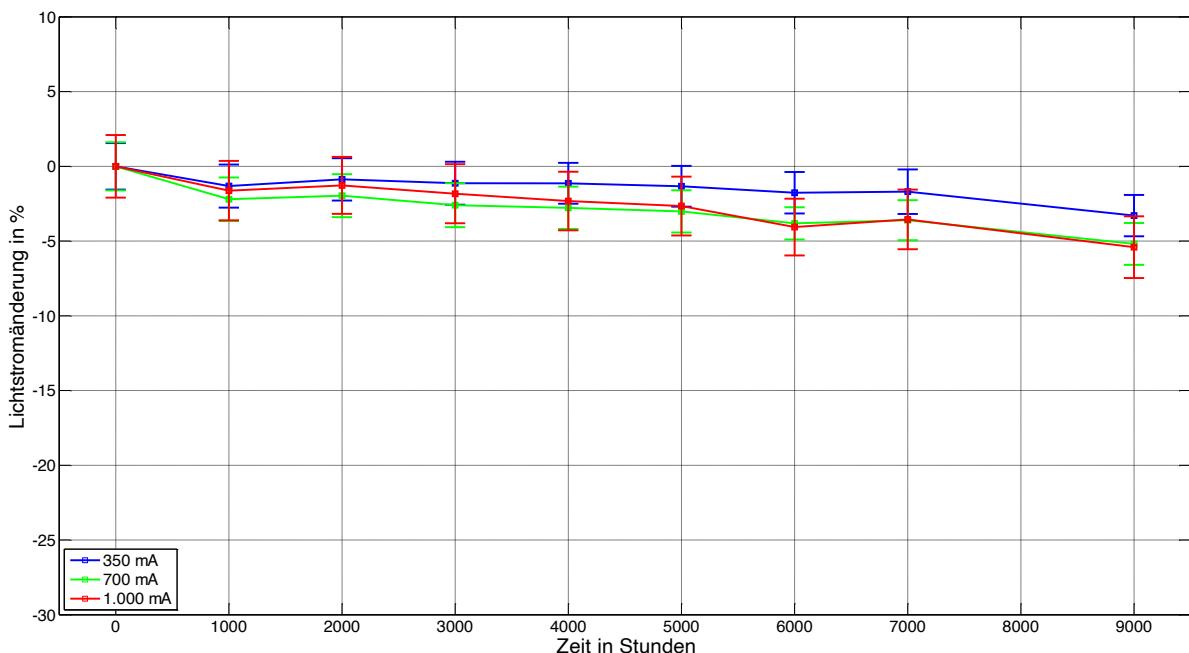


Abbildung 2.37: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED3 bei $T_C = 55$ °C

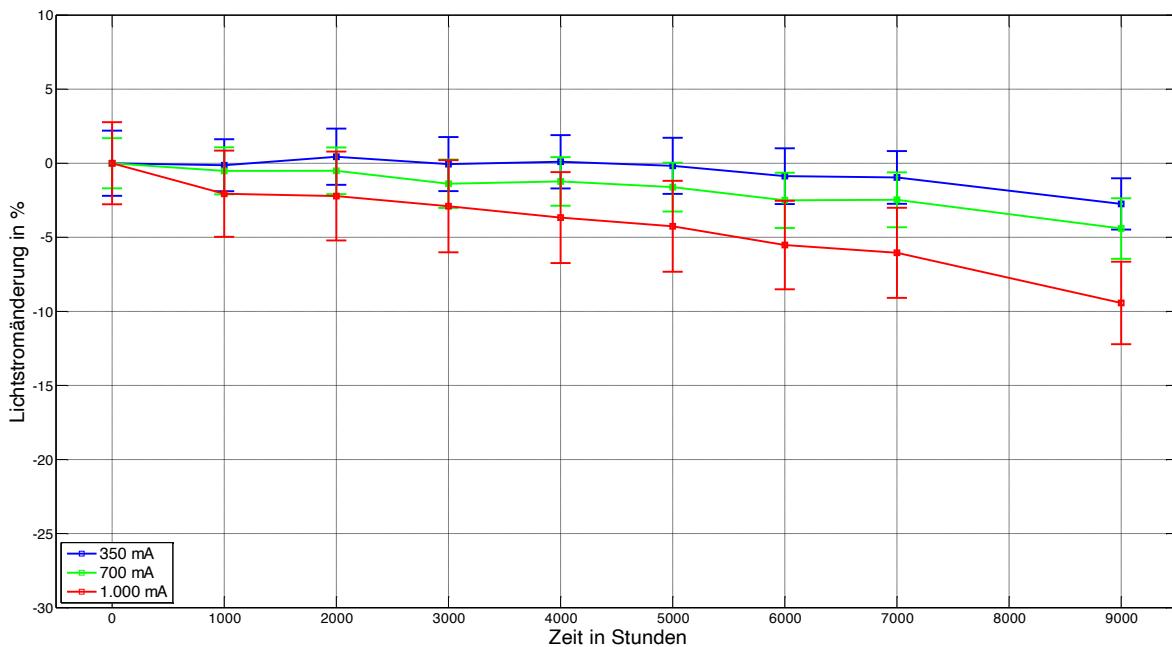


Abbildung 2.38: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED3 bei $T_c = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$

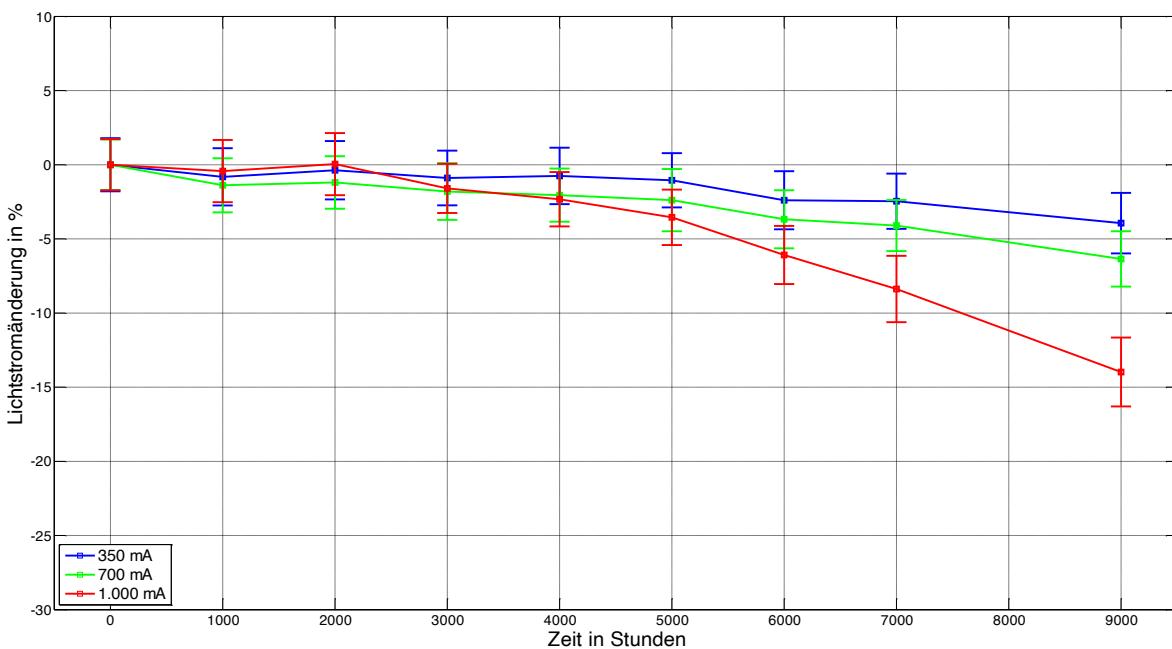


Abbildung 2.39: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED3 bei $T_c = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$

In den Abbildungen ist zu erkennen, dass sowohl die Gehäuse-Temperatur einer LED als auch der Betriebsstrom einen Einfluss auf den Lichtstromrückgang haben. Das durch den Stromfluss bedingte Aufheizen der LED – die so genannte intrinsische Wärmeverlastung - scheint den Effekt der Lichtstromdegradation zu beschleunigen. Bei den härteren Alterungsbedingungen ($T_c = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$ und $95 \text{ } ^\circ\text{C}$)

und 1000 mA Betriebsstrom kommt es zu Veränderungen im LED-Package. Wie diese genau aussehen und welche möglichen Ursachen dafür in Frage kommen, wird in Abbildung 2.47 bis Abbildung 2.50 deutlich. Um die Qualität der beiden Produkte vergleichen zu können, werden nachfolgend Ergebnisse der LED 4 dargestellt.

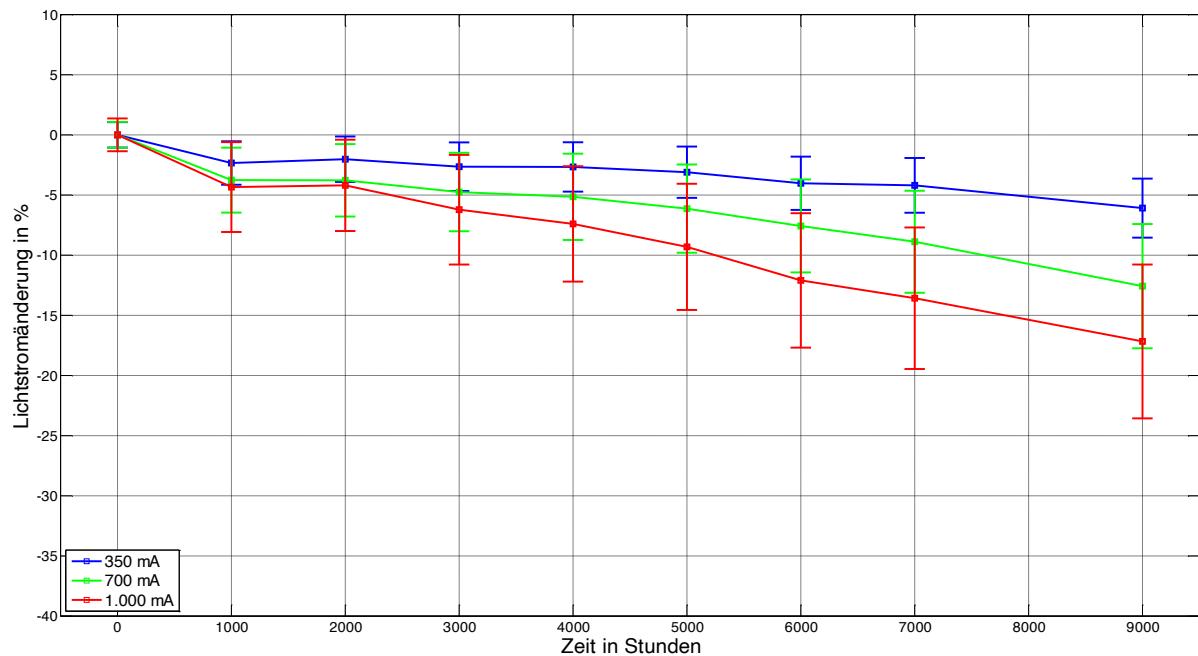


Abbildung 2.40: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED4 bei $T_c = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

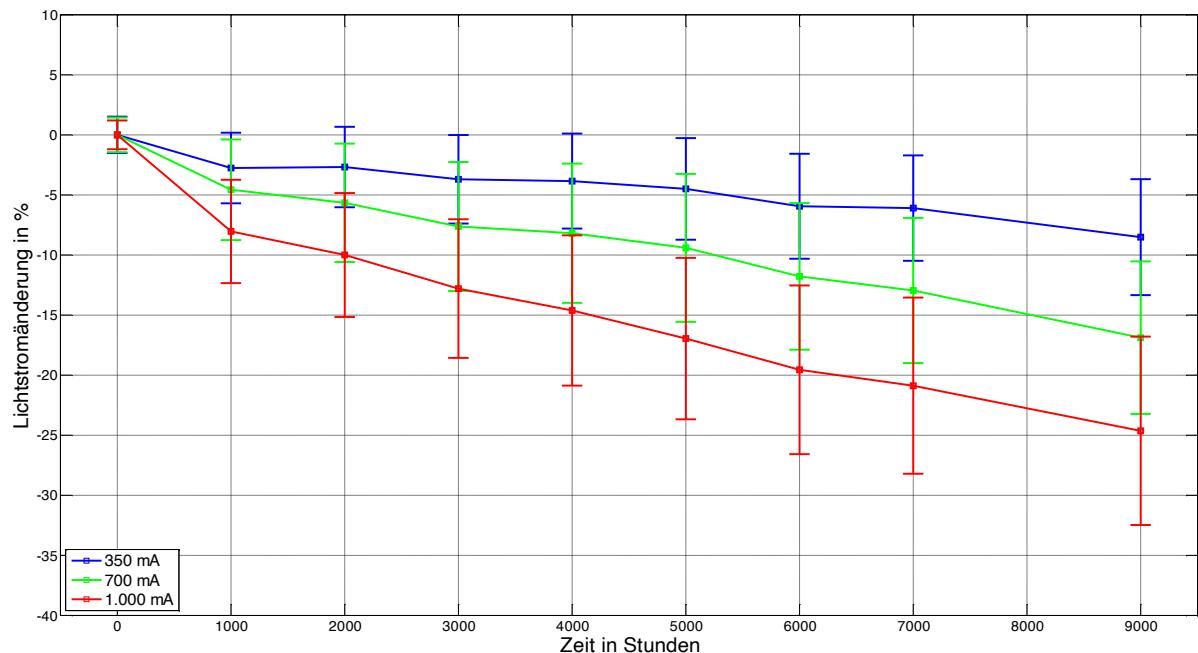


Abbildung 2.41: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED4 bei $T_c = 85 \text{ }^\circ\text{C}$

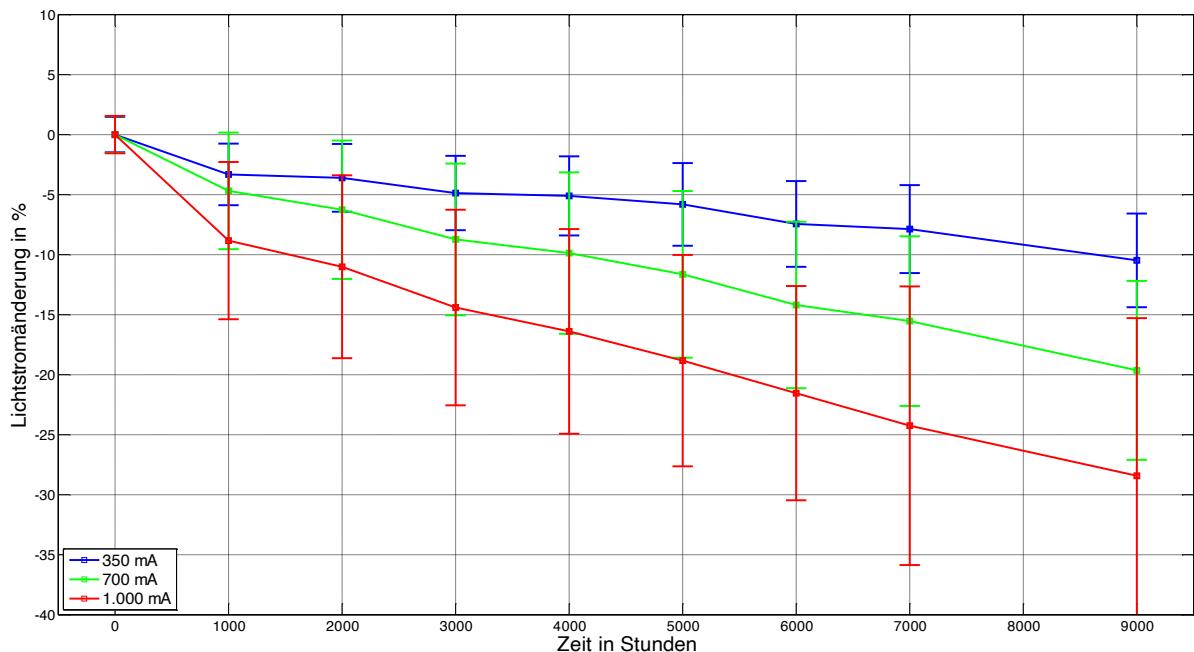


Abbildung 2.42: Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der Brennzeit – LED4 bei $T_c = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$

Die Abbildung 2.40 bis Abbildung 2.42 zeigen für LED4 eine deutliche Lichtstromdegradation, die im Falle dieses LED-Typs durch den Betriebsstrom stärker beeinflusst wird, als durch die Gehäuse-Temperatur. Dies ist ein Nachweis für das Vorhandensein von Schwachstellen im LED-Package. Das Lokalisieren der Fehlstellen und die Ursachenforschung über deren Entstehung liefern Rahmen des Projekts einen bedeutenden wissenschaftlichen Beitrag.

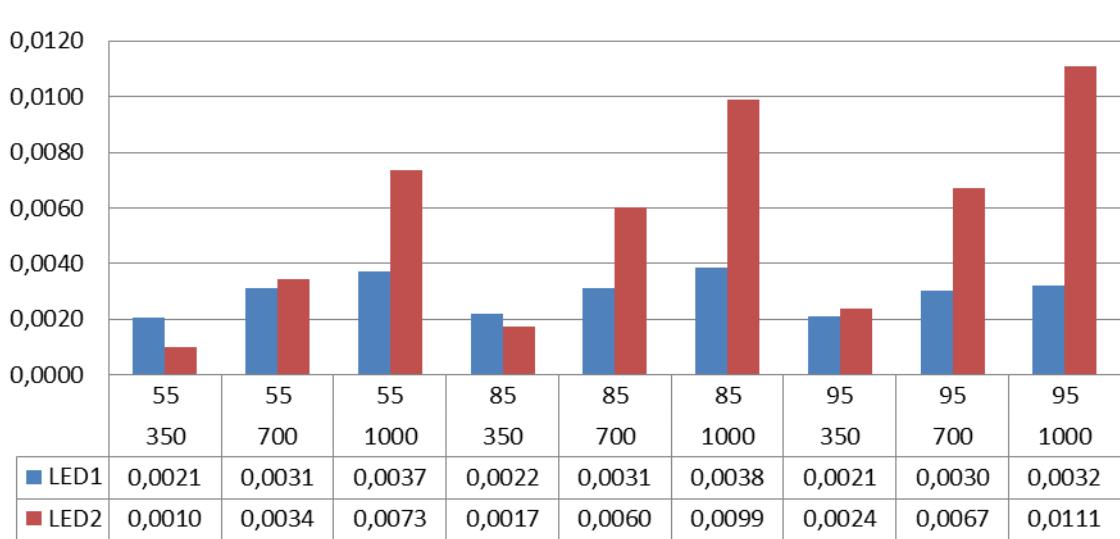


Abbildung 2.43: Farbortverschiebung $\Delta u'v'$ für die gealterten LEDs

Der Lichtstrom einer LED bzw. seine Stabilität ist in vielen Fällen das entscheidende Kriterium bei der Auswahl von LEDs für den Einsatz in Leuchten. Dabei darf jedoch die Farbstabilität nicht außer Acht gelassen werden. In der Innenraumbeleuchtung ist das oft sogar ausschlaggebender als die Lichtstromdegradation. Der Farbortstabilität ist fester Bestandteil bei der Vergabe von Qualitäts- und Gütesiegeln. Die in den USA und in weiten Teilen der Welt verbreiteten Gütesiegel geben vor, dass der Farbort einer LED nicht mehr als $\Delta u'v' = 0,007$ von seinem ursprünglichen Wert abweichen darf. Werden diese Werte überschritten, gilt die LED als ausgefallen, obwohl ihr Lichtstrom noch im Akzeptanzbereich befindet. Abbildung 2.43 zeigt die Farbortverschiebung $\Delta u'v'$ für die verschiedenen Alterungsbedingungen. LED 4 weist eine sehr schlechte Farbstabilität auf. Wenn die oben beschriebenen Kriterien angewendet werden, darf diese LED bei Temperaturen höher als 55 °C und Betriebsströmen von mehr als 700 mA nicht betrieben werden. Für den Anwender kann dies bereits ein Ausschlusskriterium bei der Auswahl von LEDs sein.

Da in den meisten Leuchten und Leuchtmitteln nur selten eine einzige LED verbaut wird, ist die Betrachtung der Farbortverschiebung für die einzelnen LEDs von Interesse. Die Wichtigkeit der Farbstabilität wird durch die Anforderung an das Erscheinungsbild der Leuchten für die Innenraumbeleuchtung bestimmt. Wenn eine Leuchte aus mehreren LEDs besteht, ist es besonders wichtig, dass sich der Farbort der einzelnen LEDs im Laufe der gesamten Lebensdauer des Produkts entweder nicht verändert oder aber die Änderung in gleicher Weise für alle LEDs geschieht. Die Farbortverschiebung ist für die LED3 in Abbildung 2.44 und für die LED4 in Abbildung 2.45 dargestellt. Zu sehen sind die Vektoren der Farbortverschiebung. Der Anfang des Vektors ist der Farbort bei Stunde null und die Spitze ist der Wert nach 9000 Brennstunden. Zum Vergleich wurden immer die Werte für die moderatesten ($I_F = 350 \text{ mA}$ und $T_C = 55 \text{ °C}$) und die schwierigsten ($I_F = 1000 \text{ mA}$ und $T_C = 95 \text{ °C}$) Alterungsbedingungen ausgewählt.

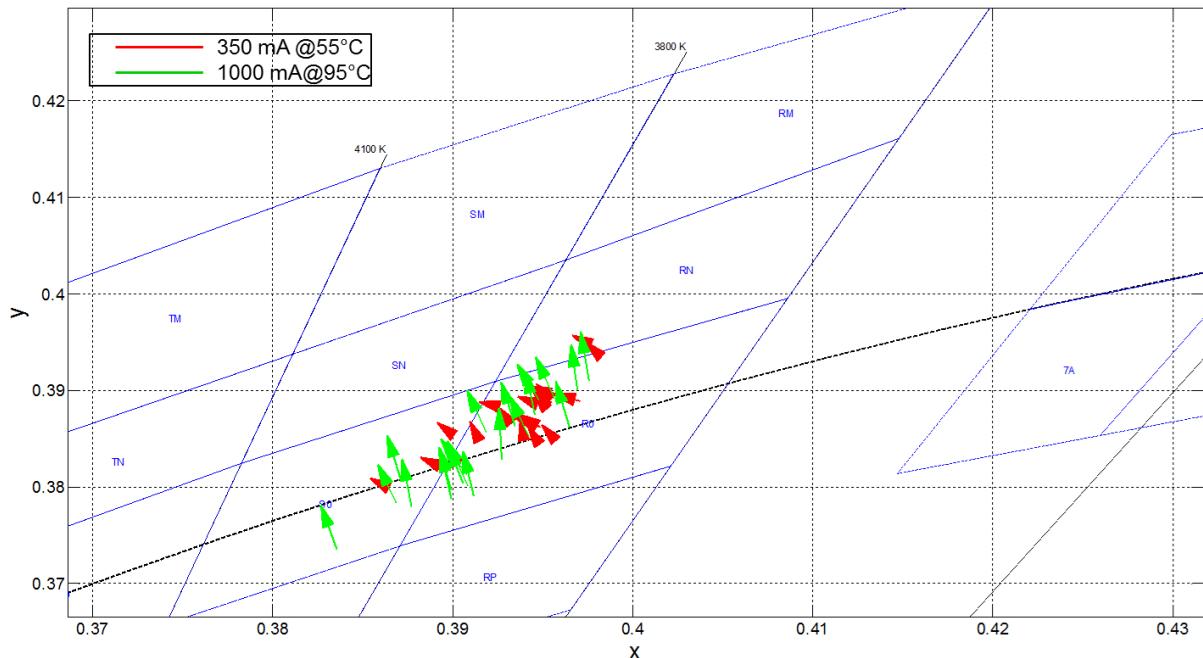


Abbildung 2.44: Farbortverschiebung im CIE 1931-Diagramm für LED3

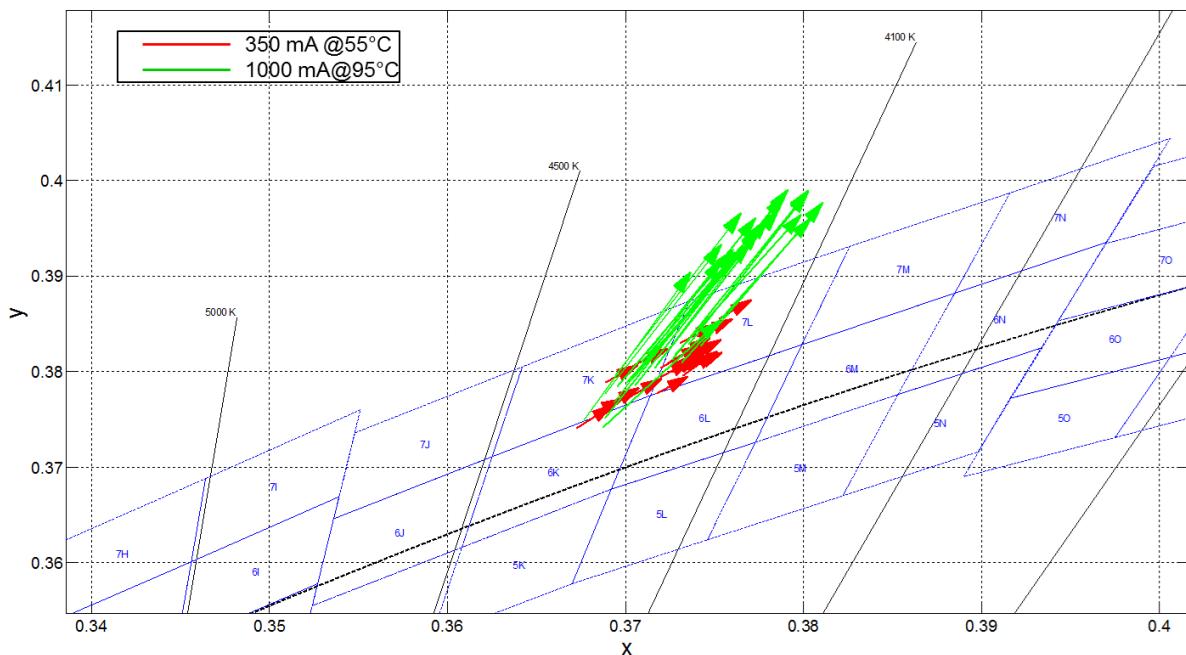


Abbildung 2.45: Farbortverschiebung im CIE 1931-Diagramm für LED4

LED3 zeigt eine sehr hohe Farbstabilität. Die Farbörter der einzelnen LEDs driften wenig – der Betrag des Vektors ist relativ klein und alle Vektoren zeigen in die gleiche Richtung. Dies ist das gewünschte Verhalten für LEDs, die in der Innenraumbeleuchtung eingesetzt werden sollen. Anders gestaltet sich die Situation mit den getesteten Mustern der LED4. Ein Gruppenverhalten der Farbortverschiebung ist auch vorhanden, allerdings ist der Betrag der Vektoren so groß. Die Farbörter der einzelnen LEDs verlassen nach einigen tausend Stunden den vom Hersteller angegebenen Farbraum (die blauen Rechtecke in Abbildung 2.45).

Die Messergebnisse zeigen eine Tendenz, die ein Leuchtenhersteller beachten sollte. Die Lichtstromdegradation und die Farbortverschiebung werden durch höhere Betriebsströme und Temperaturen begünstigt. Außerdem sollten die Leuchtenhersteller die Alterungsdaten, die sie von den LED-Zulieferern erhalten kritisch hinterfragen. Es ist bei vielen LED-Herstellern üblich, dass aus Wettbewerbsgründen technologisch nicht ganz ausgereifte und ausreichend geprüfte LEDs angeboten werden. Es wird empfohlen, dass die Qualitätskontrolle nicht nur am fertigen Produkt stattfindet, sondern die einzelnen Komponenten – LEDs, LED-Module und fertige Leuchten kontinuierlich getestet werden. Da der Aufwand dafür sehr hoch ist, bieten sich Kooperationen mit spezialisierten Dienstleister als eine gute Alternative zum In-House-Testing an.

Fehlermechanismen und Analyse

Nach der Auswertung der Messergebnisse stellt sich die Frage, welche Mechanismen für die starke Lichtstromdegradation und die starke Farbortänderung verantwortlich sind. Die Suche nach den Antworten auf diese Frage liefert neue Erkenntnisse über die Alterungsprozesse, die in einer HP-LED stattfinden. Es ist erforderlich, die großen Datenmengen, die während der Messungen entstanden,

schnell zu verarbeiten. Markante Änderungen in den lichttechnischen und/oder elektrischen Parametern können so auf Korrelation mit den Änderungen z. B. des Lichtstroms überprüft werden. Für diesen Zweck wurden mehrere Softwarelösungen entwickelt, die die Suche und die grafische Darstellung der einzelnen Parameter automatisieren. Es wurden verschiedene Verfahren angewendet, um Änderungen im LED-Package festzustellen. Abbildung 2.46 zeigt in einer 3D-Darstellung die spektrale Verteilung der gleichen LED in verschiedenen Stadien der Alterung (neu und 9000 Stunden gealtert). Es ist deutlich zu sehen, dass eine Verschiebung zu wärmeren Farbtemperaturen stattfindet (siehe auch Abbildung 2.45). Dies ist besonders stark im Zentrum der LED ausgeprägt. Diese Region befindet sich direkt über dem LED-Chip, wo die höchste Wärmeentwicklung innerhalb des LED-Packages vorhanden ist. Für eine detailliertere Analyse der LEDs ist das passende Spezial-Equipment erforderlich. Zu diesem Zweck wurden die vertieften Untersuchen der Fehler und deren Analyse in Kooperation mit der schweizerischen Materialprüf Anstalt (EMPA) durchgeführt.

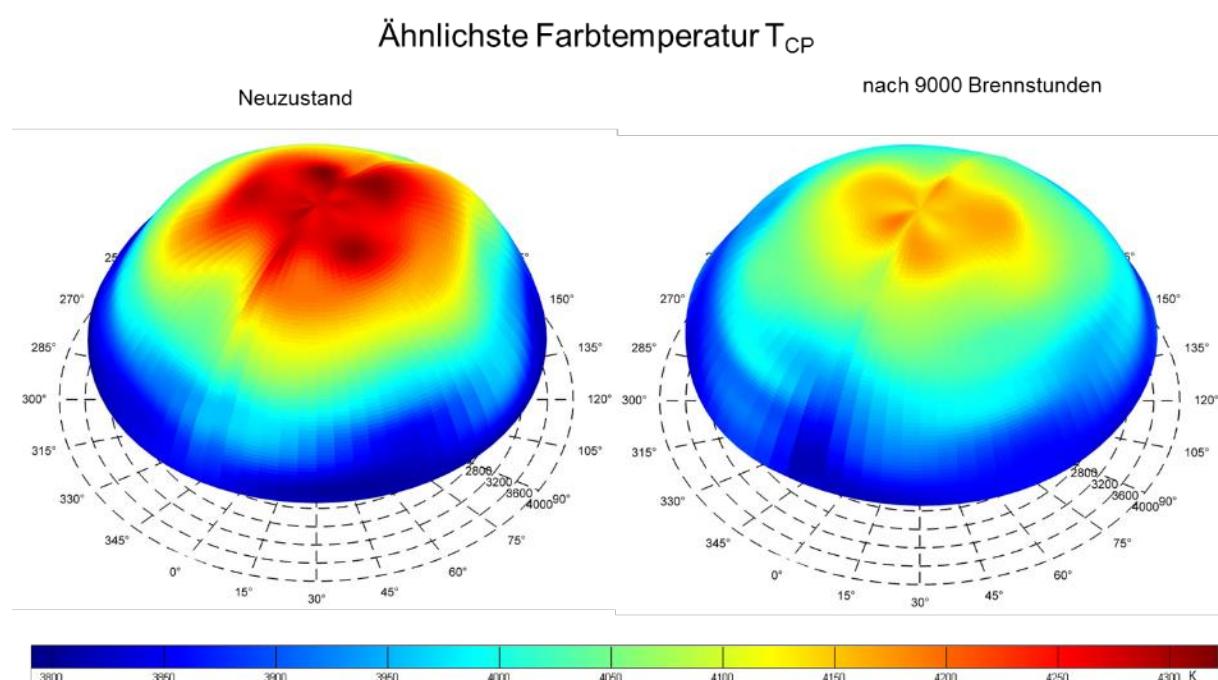


Abbildung 2.46: 3D-Diagramm der spektralen Verteilung einer neuen und einer gealterten LED

Dort wurden verschiedenste Verfahren angewendet, mit deren Hilfe die Fehlermechanismen in der LED untersucht und analysiert wurden. Neben der optischen Inspektion, die mittels hochauflösender Mikroskope bis zu einer gewissen Tiefe zerstörungsfrei ist, kamen auch Techniken zum Einsatz, bei denen die LED zerstört wurde. Hierzu zählen beispielsweise OBIRCH (Optical Beam Induced Resistance Change) und FIB (Focused Ion Beam). Die Letzteren sind bei den Untersuchungen am LED-Chip sehr hilfreich gewesen. Abbildung 2.47 zeigt die mit einem hochauflösenden Mikroskop aufgenommene Leuchtstoffschicht. In der Leuchtstoffschicht haben sich mehrere tiefe Risse gebildet. Diese Risse trennen die Verbindung zwischen dem LED-Chip und der Leuchtstoffschicht. Die blaue Strahlung erfährt durch mehrfache Reflexionen einen längeren Weg (Abbildung 2.48). Dies führt dazu, dass sowohl der Lichtstrom stark sinkt, als auch das LED-Spektrum zu längeren Wellenlängen hin verschoben wird.

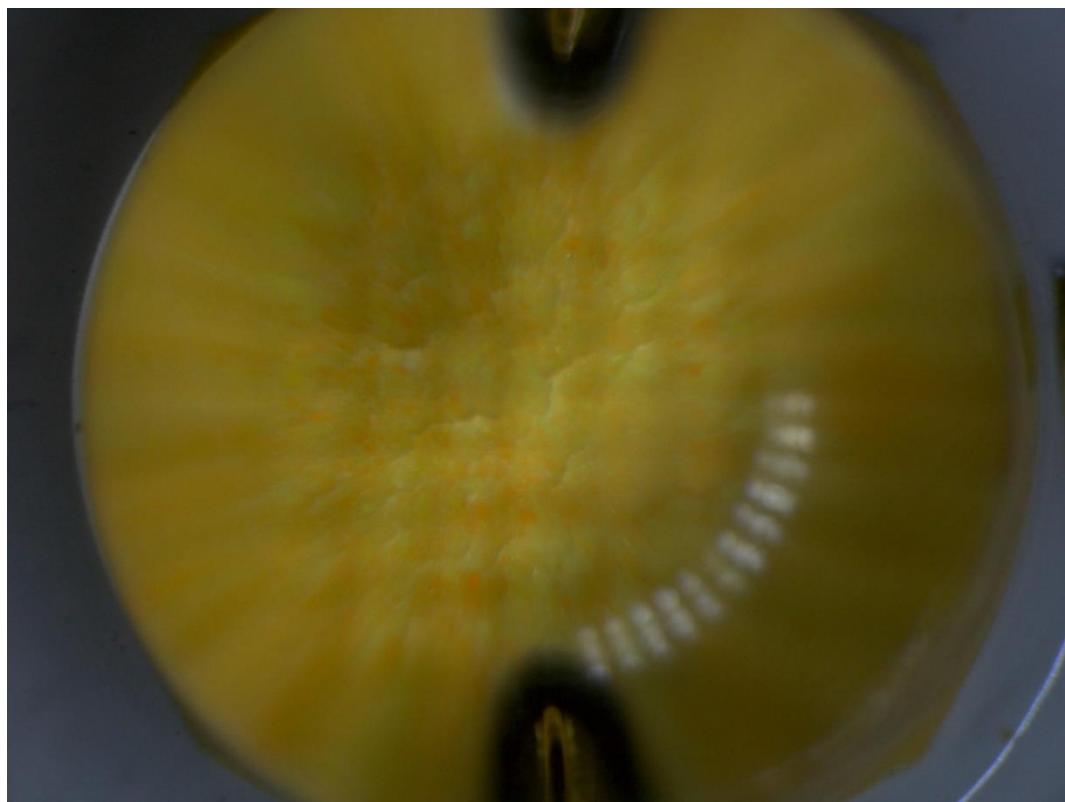


Abbildung 2.47: Risse in der Leuchtstoffschicht einer gealterten LED
Bild aufgenommen mittels High Resolution Microscopy

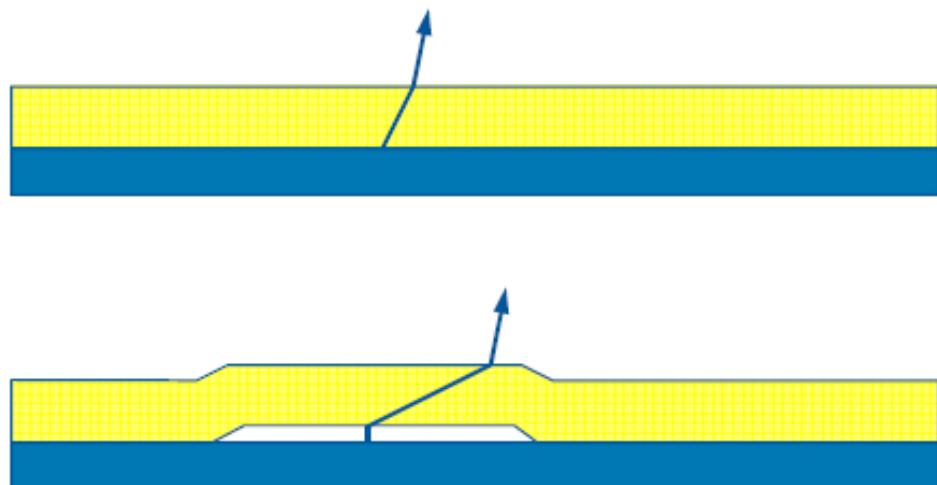


Abbildung 2.48: Strahlengang des blauen Lichts in der LED
Oben: normale LED
Unten: delaminierte Leuchtstoffschicht

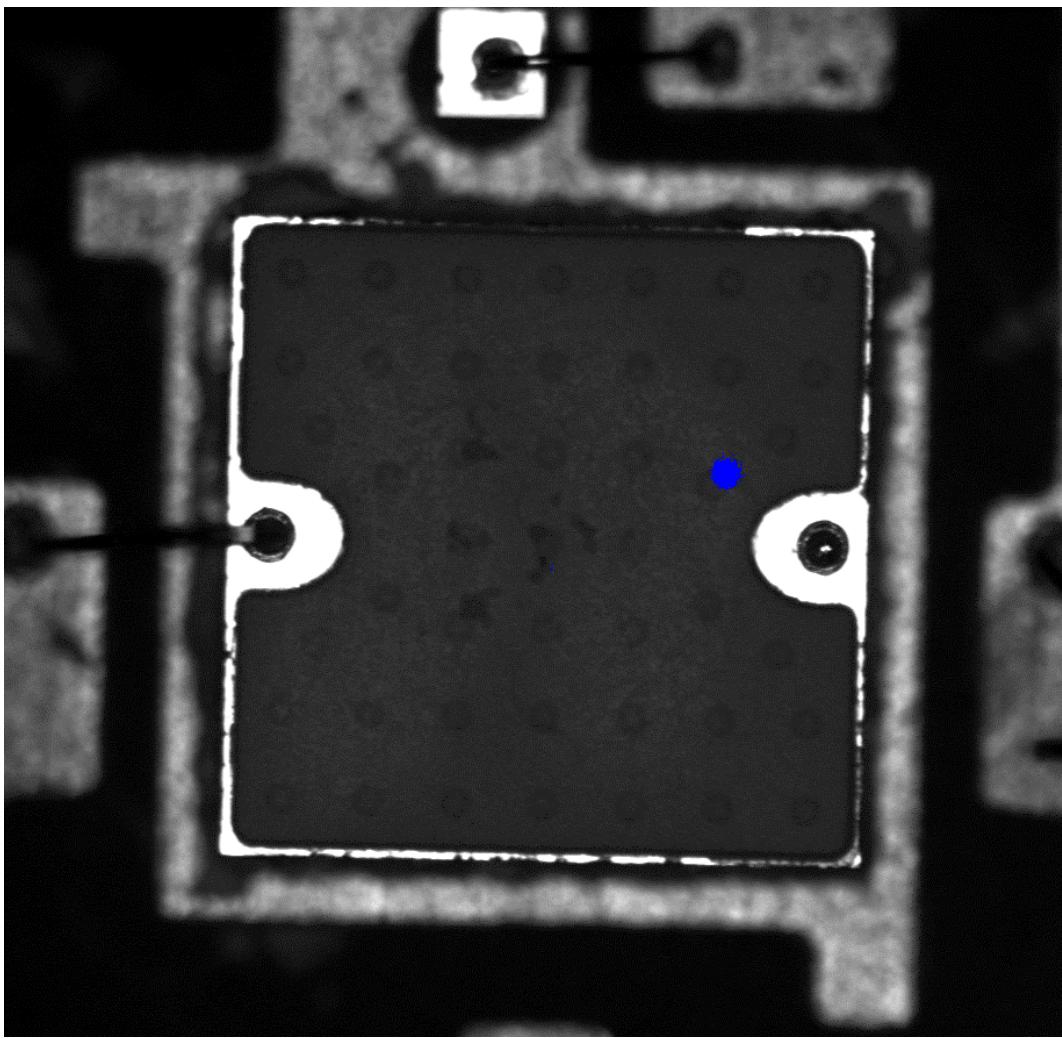


Abbildung 2.49: OBIRCH-Inspektion eines geschädigten LED-Chips

Abbildung 2.49 zeigt eine Fehlstelle (niederohmiger Kontakt) innerhalb des LED-Chips. Bei kleineren Betriebsströmen (<5 mA) bildet sich eine Art Kurzschlussbrücke, durch die der elektrische Strom abfließt, ohne die LED zum Leuchten zu bringen.

Der Aufbau der Fehlstelle ist in Abbildung 2.50 dargestellt. Die schwarze stufenförmige Schicht in der Mitte des Bildes besteht aus Metall. Dieses ist so weit nach oben durchgedrungen, dass ein Kurzschluss zwischen den Layern entsteht.

Durch den konsequenten und systematisierten Einsatz aller zur Verfügung stehenden Techniken bei verschiedenen Mustern mit unterschiedlich starker Lichtstromdegradation und Farbortänderung konnte festgestellt werden, dass die Ursache für die verkürzte Lebensdauer mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit in der Leuchtstoffschicht zu suchen ist. Das Bindematerial, das für die Herstellung der Leuchtstoffemulsion verwendet wird, verliert seine Eigenschaften bei hohen Temperaturen und beginnt Risse zu bilden. Das begünstigt die Delamination der Leuchtstoffschicht vom LED-Chip. Es wird empfohlen weiterführende Untersuchungen zu unternehmen, bei denen dieses Verhalten genauer und detaillierter untersucht wird.

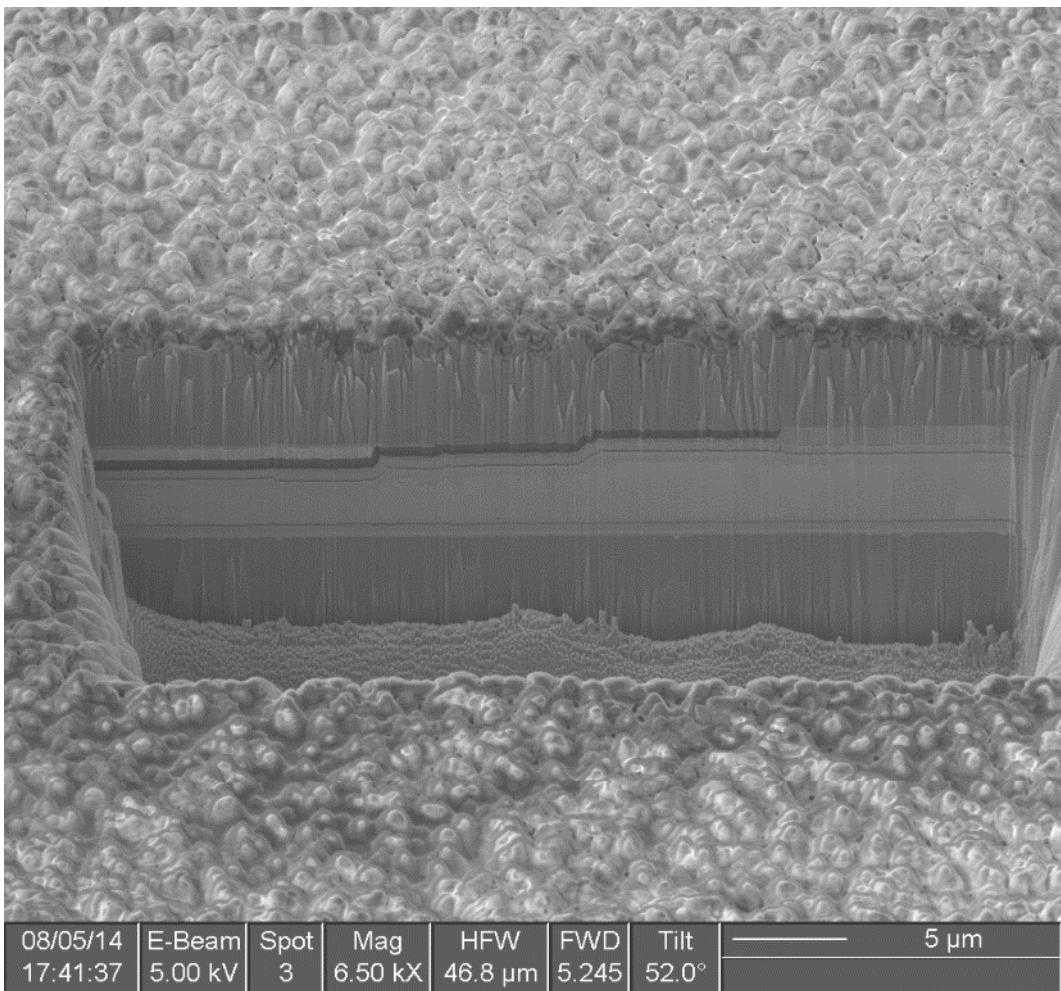


Abbildung 2.50: Lokalisation und Aufbau einer Fehlstelle im Chip (FIB Milling Verfahren)

2.2 Electrostatic Discharge (ESD)

Moderne Halbleiterbauelemente sind wegen der üblichen Auslegung für kleine Spannungen und Ströme besonders anfällig für dauerhafte Schäden durch transiente Überspannungen oder -ströme (ESD). Dieser Sachverhalt muss bei der Konstruktion der Bauelemente berücksichtigt werden, da eine Gefährdung bei Lieferung, Montage und Betrieb der Bauteile nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Somit sind zwingend geeignete Schutzbeschaltungen vorzusehen, die das Bauelement innerhalb festgelegter Parameter schützen. ESD wird in der Literatur wie folgt definiert [32]:

Electrostatic discharge (ESD): „Übergang von Ladung zwischen Körpern mit verschiedenen elektrostatischen Potentialen, verursacht durch direkten Kontakt oder influenziert durch ein elektrostatisches Feld.“

Electrostatic sensitive device (auch ESDS - Elektrostatisch gefährdetes Bauelement): „[...] ist ein Halbleiterbauelement oder ein integrierter Schaltkreis, der durch ein elektrostatisches Potential permanent geschädigt werden kann.“

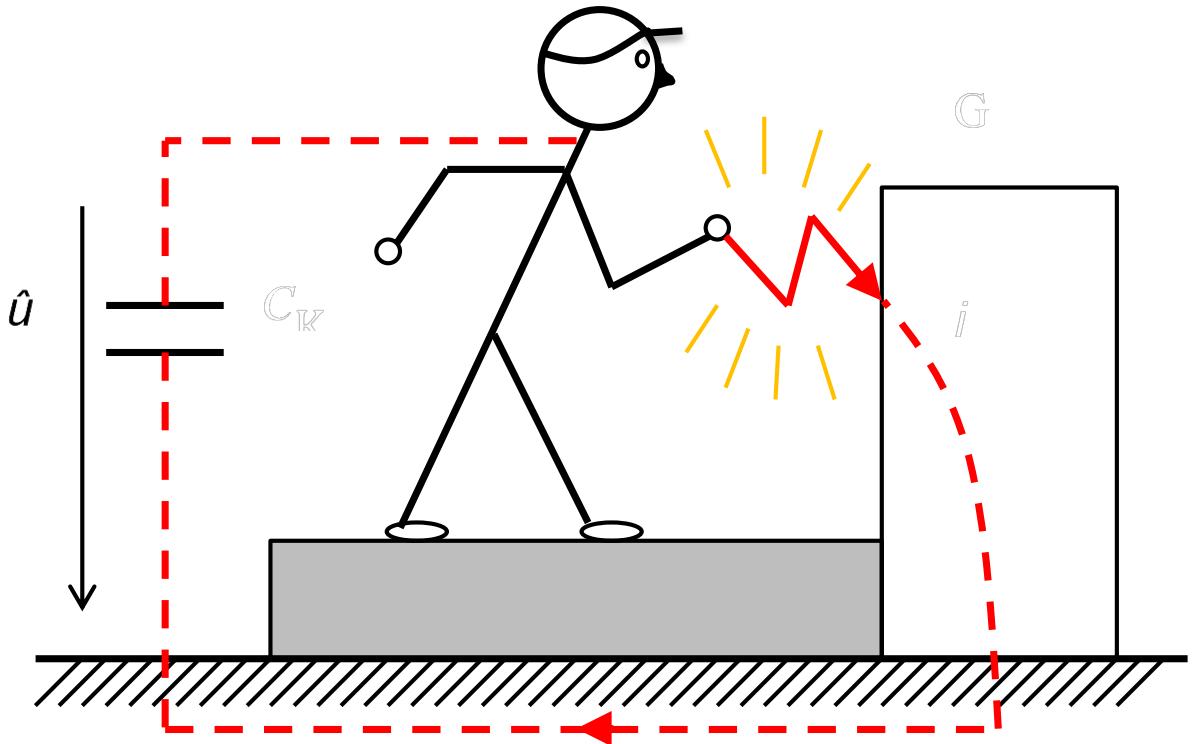


Abbildung 2.51: Prinzipskizze einer elektrostatischen Entladung

Moderne High Power LEDs sind daher als Baugruppe zu betrachten, da ESD-Schutzbeschaltungen „On chip“ oder nahe am Chip auf dem Keramikträger ausgeführt sind und somit eine Prüfung oder Messung des Bauelementes Leuchtdiode nicht ohne die Zerstörung der Baugruppe möglich ist! Somit erfolgt bei Prüfungen auf ESD-Festigkeit üblicherweise eine Messung der gesamten Baugruppe.

2.2.1 ESD-Prüfung

Die ESD-Prüfung eines Bauelementes oder einer Baugruppe erfolgt nach festgelegten Bedingungen mittels Human-Body-Model nach [33] auf einem Testplatz nach DIN EN 61000-4-2 [34], dessen Umweltbedingungen durch Klimatisierung konstant gehalten werden. Die elektrostatischen Pulse werden durch einen kalibrierten Prüfgenerator erzeugt.

Die Prüfung der High-Power Leuchtdioden erfolgt im Bereich 1 bis 30 KV in 17 Stufen. Dabei werden feste Spannungsniveaus zu jeweils einer Prüfgruppe definiert. Jede Prüfgruppe besteht aus zwei bis drei Prüflingen, um das Verhalten an zumindest einer Kontrollmessung zu verifizieren. Insgesamt sind 70 LEDs im Test. Der elektrostatische Impuls wird vom Prüfgenerator per Kontaktentladung direkt auf die Anode der LED geführt. Der Messplatz und der Prüfablauf sind in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

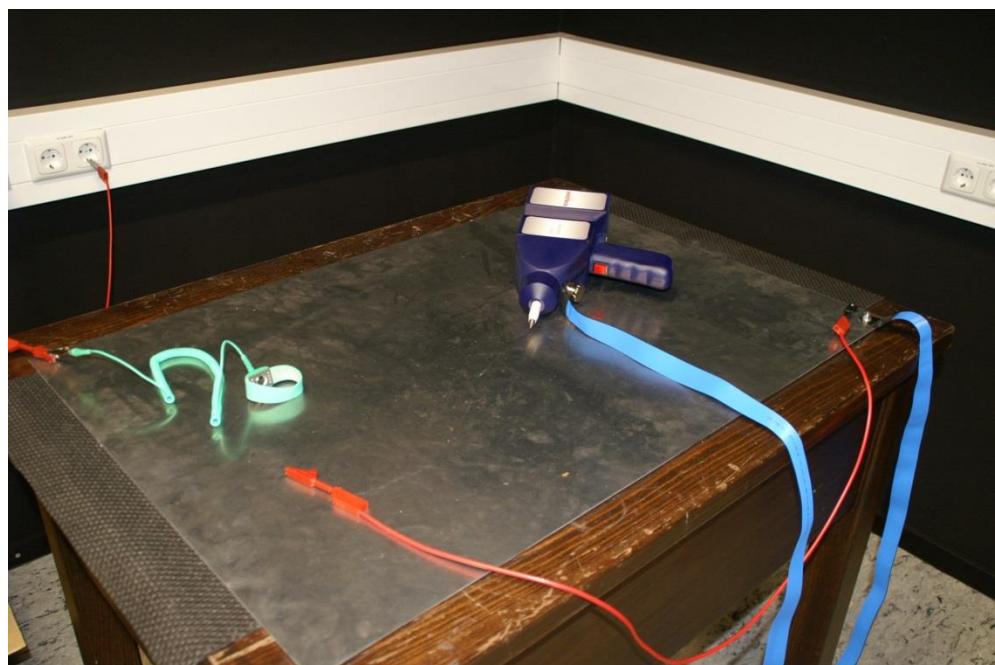


Abbildung 2.52: ESD Prüfplatz nach DIN EN 61000-4-2

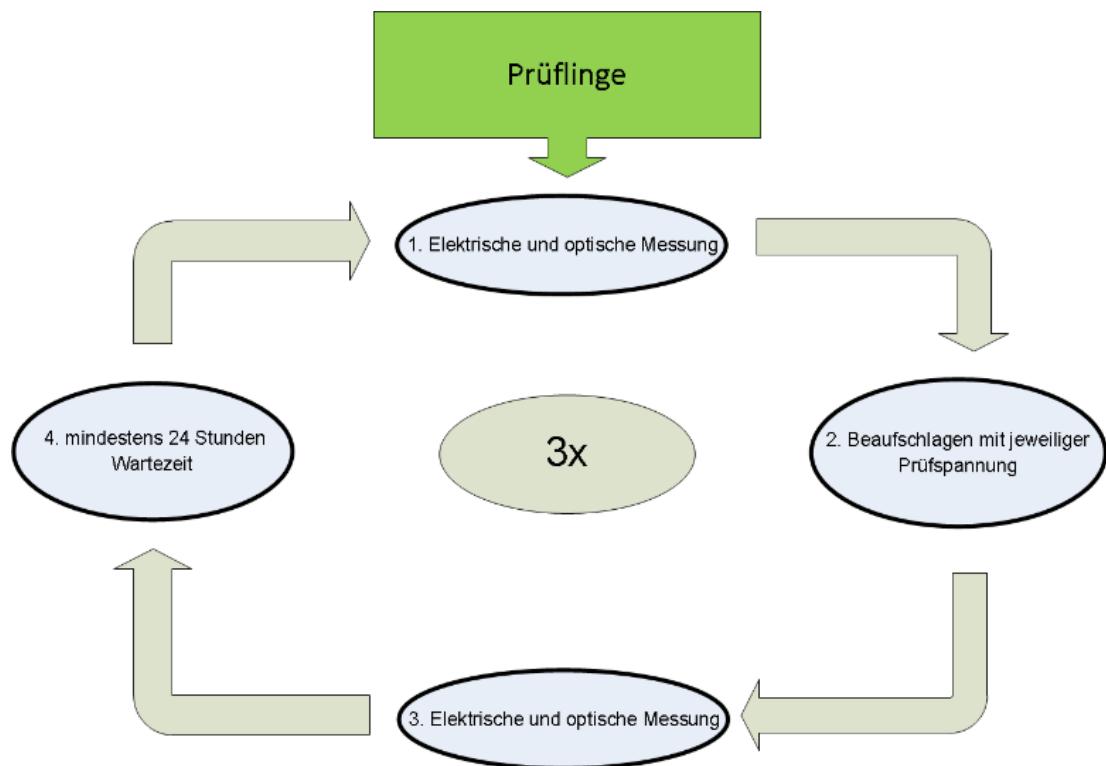


Abbildung 2.53: Prüfablauf ESD

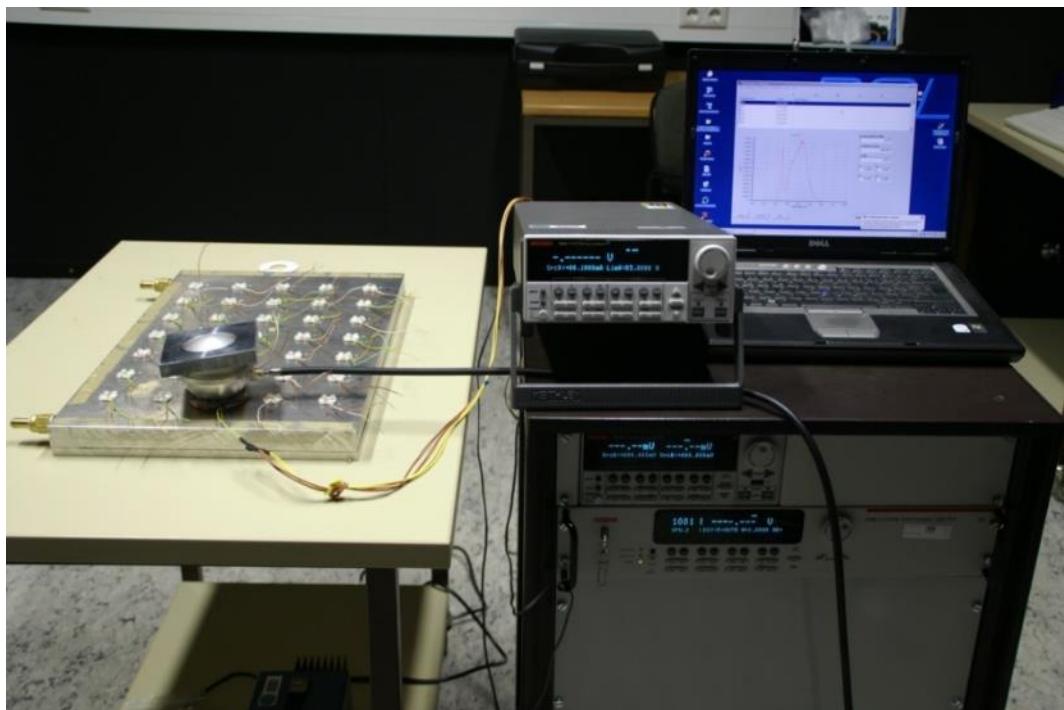
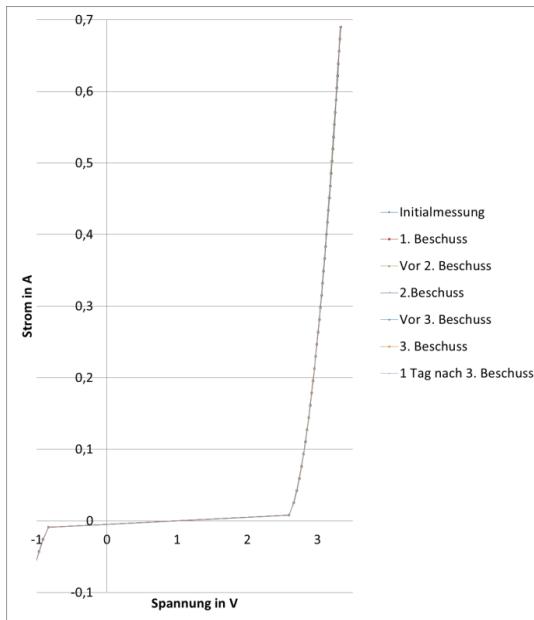


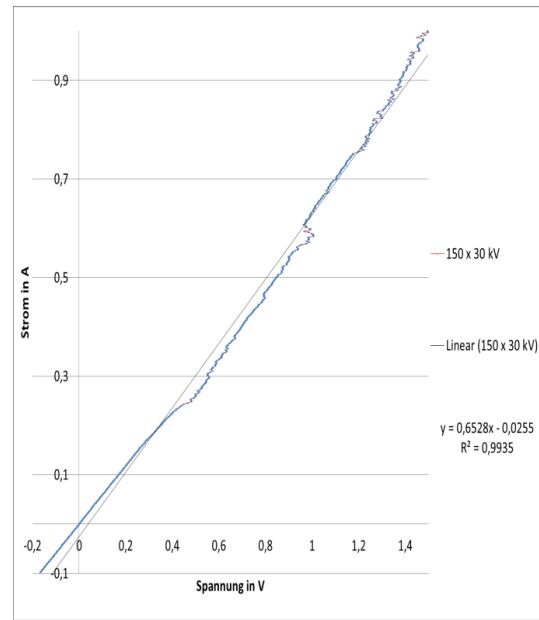
Abbildung 2.54: Messplatz zur opt./elektr. Datenerfassung nach der ESD-Beaufschlagung

LED Typ 2 bei Belastung an Schutzengrenze



3 Pulse beider Polaritäten bei 2 kV

Durch ESD zerstörte LED Typ 2



150 Pulse beider Polaritäten bei 30 kV

Abbildung 2.55: LED-Kennlinien nach ESD-Test mit 3 und 150 Entladungen

2.2.2 ESD-Beobachtungen

Abbildung 2.55 zeigt die Diodenkennlinien nach einer Beaufschlagung von 3 Entladungen mit 2 kV und 150 Entladungen mit 30 kV. Nach drei Entladungen bei 2 kV zeigt die LED keine Abweichungen in der Kennlinie bezüglich der Initialmessung und somit hat die Schutzbeschaltung die Überspannungen wirksam abgeführt. Nach 150 Entladungen mit 30 kV hat die Diodenkennlinie einen näherungsweise linearen Verlauf und zeigt kein typisches Diodenverhalten mehr.

Diese Gegenüberstellung soll ein eindeutiges Schadbild an LEDs aufzeigen, weswegen bewusst eine unrealistische Belastung der Leuchtdiode durchgeführt wurde. Leuchtdioden bei geringerer Belastung zeigen ein weniger ausgeprägtes Schadbild, das auf den folgenden Seiten näher betrachtet wird.

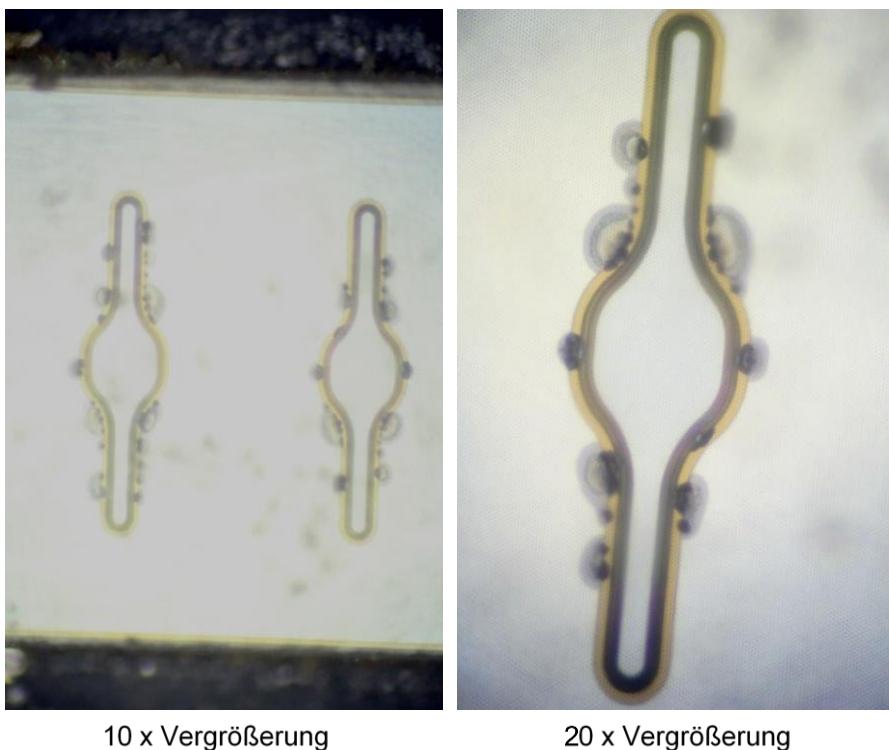


Abbildung 2.56: LED2 nach provoziertem ESD- Schaden - Linse und Konversionsschicht entfernt

Abbildung 2.56 zeigt das Schadbild einer ESD-zerstörten Leuchtdiode mit Durchschlägen an der Grenzschicht des PN-Übergangs. Die Kennlinie dieser Leuchtdiode wird in Abbildung 2.55 rechts dargestellt.

Abbildung 2.57 zeigt die Veränderungen der Diodenkennlinie nach jeweils einer Belastung mit 30 kV und direkt anschließender Messung. Nach 24 Stunden Ruhezeit zeigt die Kennlinie nicht mehr denselben Verlauf wie direkt nach der Beaufschlagung. Es ist eine leichte Verbesserung des Verlaufs beobachtbar, was auf eine Regeneration der Baugruppe schließen lässt. Dennoch weist die Leuchtdiode eine dauerhafte Änderung ihres Betriebsverhaltens auf und ist somit geschädigt - jedoch kann dieser Schaden nur messtechnisch nachgewiesen werden. Dieses Verhalten kann auch bei anderen LED-Typen beobachtet werden. Abbildung 2.58 zeigt das Verhalten von LEDs vom Typ 1.

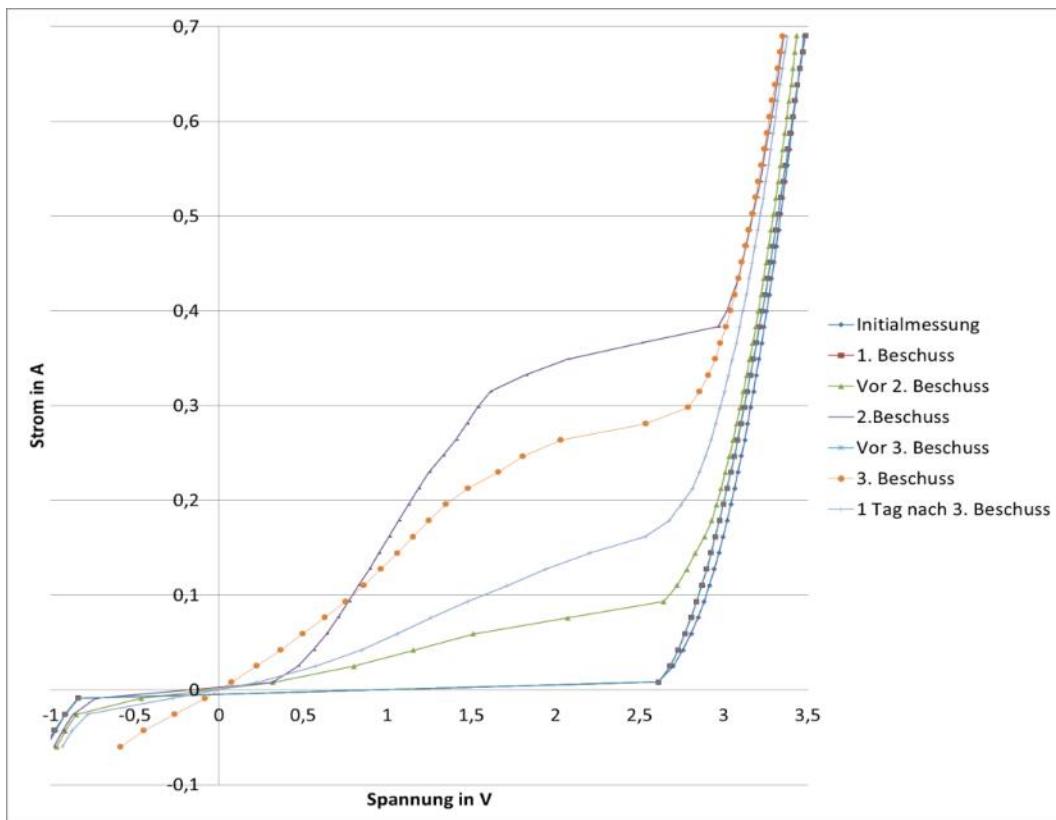
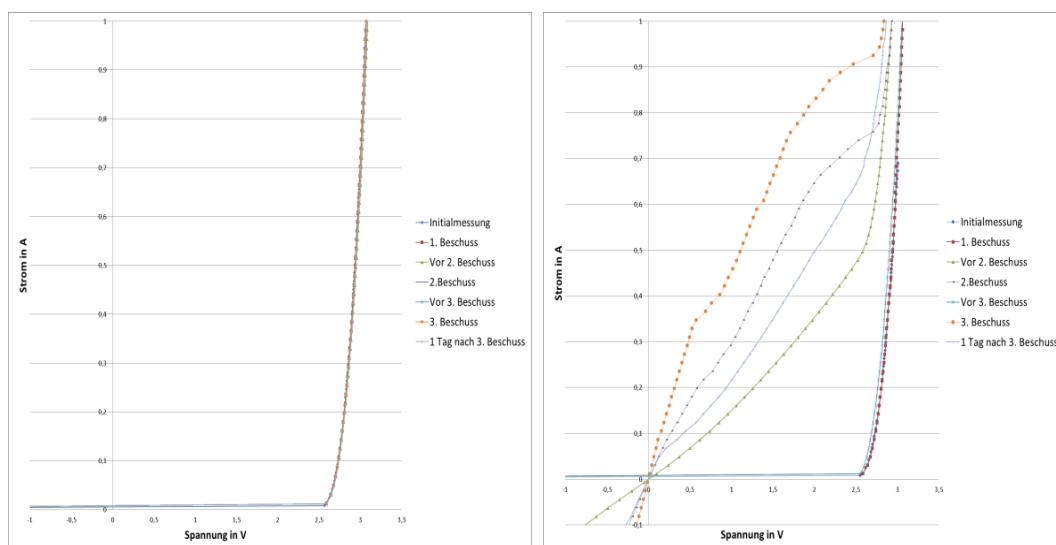


Abbildung 2.57: LED2 - 3 Pulse beider Polaritäten bei 30 kV



3 Pulse beider Polaritäten bei 8 kV

3 Pulse beider Polaritäten bei 30 kV

Abbildung 2.58: LED1 - 3 Pulse beider Polaritäten bei 30 kV

2.2.3 ESD-Ergebnisse

ESD-Ereignisse können zu unterschiedlichen Schadbildern an der Baugruppe führen, die teilweise nur schwer oder nicht nachweisbar sind und erst im Verlauf der Lebensdauer einer Leuchtdiode zum Tragen kommen können. Häufige direkte Schadbilder sind jedoch eine Herabsetzung des Lichtstromes ohne Änderung der elektrischen Daten oder eine Änderung von Teilbereichen der elektrischen Kennlinie bei verminderter Lichtausbeute. Im zweiten Fall gelingt ein Betrieb der Leuchtdiode nur im intakten Bereich ihrer Kennlinie. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser Effekt auf eine defekte Schutzbeschaltung zurückzuführen ist. Eine Untersuchung ist jedoch konstruktionsbedingt nicht zerstörungsfrei möglich. Somit können keine weiteren Messungen nach Freilegen der Schutzbeschaltung zum Nachweis durchgeführt werden.

Ein weiterer Effekt ist der Heilungsprozess des geschädigten Halbleiters nach einem ESD-Ereignis. Eine Leuchtdiode mit nachweislich veränderter Kennlinie direkt nach einer Beaufschlagung kann nach einer gewissen Zeit wieder normale elektrische Betriebsparameter aufweisen. Der Lichtstrom ist in den meisten Fällen trotz des Heilungseffektes etwas verringert. Die LED ist vorgeschädigt aber weiterhin funktional, sodass sie bei einer visuellen Ausgangsprüfung nach der Fertigung einer Leuchte nicht als beschädigt auffallen würde. Die Lebensdauer wird aber möglicherweise durch die Vorschädigung verändert. Eine Untersuchung von ESD-vorgeschädigten LEDs im Dauertest bezüglich der Lichtstromdegradation war im Rahmen des Forschungsprojekts nicht möglich und nicht geplant, würde aber sicherlich interessante Erkenntnisse liefern.

Eine sichere Methode, messtechnisch auf direkte Schäden durch ESD-Events oder Electrical-Overstress zu schließen, ist die Spannungsmessung bei sehr kleinen Strömen ($\sim 1 \text{ mA}$). Geschädigte Leuchtdioden weisen in diesem Fall immer eine geringe Durchlassspannung auf ($< 2 \text{ V}$).

Die praktischen ESD-Versuche ergaben, dass die Stichproben der untersuchten LEDs bezüglich ihrer ESD-Festigkeit die Herstellerangaben deutlich überschreiten. Bei den untersuchten LEDs des Typs 1 mit Auslegung nach MIL-STD-883 [35] sind Schäden durch ESD-Events in dem spezifizierten Spannungsbereich sogar höchst unwahrscheinlich, da der Test diese Grenzen weit überschritt, jedoch nicht völlig auszuschließen.

2.3 Chip- und Packagequalität von LEDs

Der nachfolgende Abschnitt geht auf thermische und elektrische Daten verschiedener Hochleistungs-LED-Typen mit verschiedenen Leiterplatten- und Kühlungssystemen näher ein.

2.3.1 Problemstellung, Ziel des Vorhabens

Die Entwicklung der LED-Bauelemente erreicht mittlerweile eine Lichtausbeute von 140-150 lm/W unter der realen Bedingung von 60°C und 350 mA . Um auf dieser Basis eine zuverlässige, energieeffiziente und langzeitstabile LED-Leuchte zu entwickeln, muss man die gesamten optischen, elektrischen und thermischen Aspekte berücksichtigen und die gesamte Leuchte als System betrachten. Selbst bei einer weißen LED mit 140 lm/W beträgt der optische Wirkungsgrad nur ca. 40%, so dass etwa 60 % der elektrischen Eingangsleistung in thermische Leistung umgesetzt wird, welche von der

LED und ihrer unmittelbaren Umgebung schnell und zuverlässig abgeführt werden muss. Insgesamt ist die thermische Belastung der Hochleistung-LED sehr hoch und etwa zehn Mal so groß wie die thermische Belastung einer Herdplatte. Daher sind ist Auswahl der LEDs, des Leuchtstoffsystems, der Leiterplattenmaterialien (FR4, Keramik, Metallkernleiterplatten), der Leiterplatten-Konfiguration, der Lüftungssysteme, der Kühlkörper, der Wärmeleitpaste, der Lötpaste und ganz besonders die gesamte Architektur des Systems wichtig (siehe Abbildung 2.59).

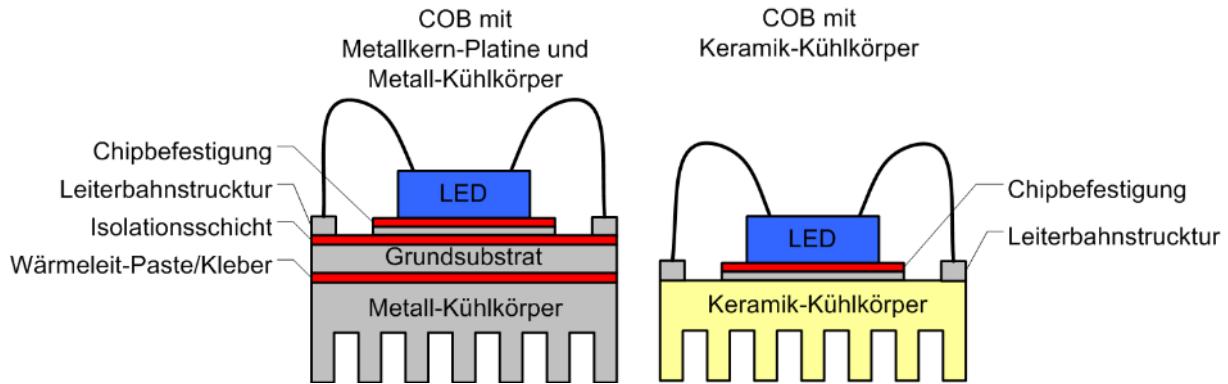


Abbildung 2.59: Package-Systeme für HL-LEDs mit unterschiedlicher Anzahl an Systemschichten

Die Kenngrößen zur Beschreibung der thermischen Eigenschaften eines LED-Systems sind die thermische Kapazität, die thermische Leistung und der thermische Widerstand sowie vor allem die Temperatur des pn-Übergangs des LED-Halbleiters. Die Kenngrößen zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften sind die I-U-Kennlinie und die elektrische Leistung. Das Ziel der Forschung an der TU Darmstadt ist es, folgende Aspekte zu analysieren:

- Wie groß ist die Differenz zwischen realen thermischen und elektrischen Eigenschaften der LEDs und den Standardwerten im Datenblatt der LED-Hersteller?
- Wie schnell verändern sich die thermischen Eigenschaften bei verschiedenen Montagearten (Kleben, Löten, dünne Paste, dicke Paste, keine Paste) und Kühlkörpern (Leiterplatten, Aluminiumblock-Formen)?
- Wie groß ist die Streubreite der thermischen und elektrischen Eigenschaften der LEDs verschiedener LED-Hersteller und LED-Module? Diese Kenntnisse sind wichtig, um dem Anwender eine sachliche Basis an Auswahlkriterien und -möglichkeiten zu bieten. Es gibt zurzeit eine breite Diskussion über die Zhaga-Module und die Austauschbarkeit dieser Module zwischen verschiedenen Modulherstellern. Die Module sollen ähnliche photometrische, elektrische und thermische Leistungsparameter aufweisen, was durch die Messung u.a. des thermischen Widerstands und der elektrischen Kennlinien nachzuweisen ist.
- In einigen Testinstituten und Universitäten in Europa, Asien und Amerika werden zurzeit LEDs und LED-Module gealtert und die Alterungsrate als Funktion der Betriebsbedingungen (Strom, DC oder PWM, Temperatur, Packaging) analysiert. Es ist dabei sinnvoll, den thermischen Widerstand der LEDs und LED-Module über die Alterungsdauer aufzunehmen und auf diese Weise die Ursachen für die Alterung zielführend zu analysieren.

2.3.2 Struktur des Messsystems

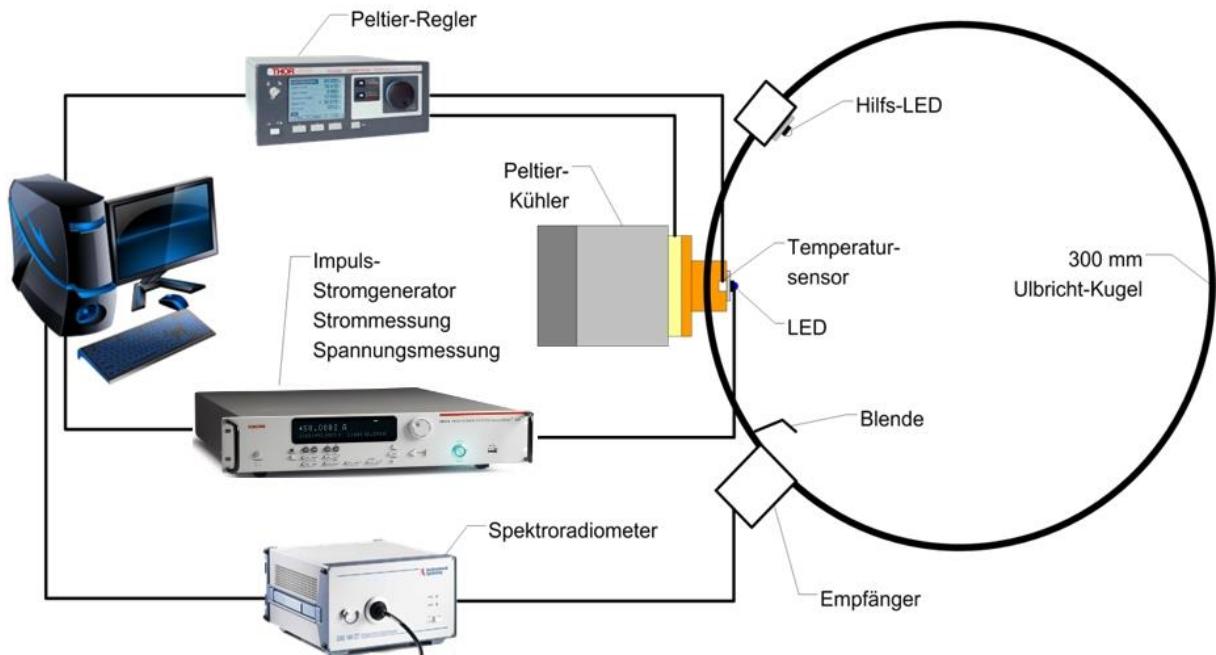


Abbildung 2.60: Schematischer Aufbau des LED-Messplatzes

An der TU Darmstadt wurde ein Messplatz aufgebaut, der wie in Abbildung 2.60 strukturiert ist.

Die spektroradiometrische Messeinheit besteht aus einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 300 mm, einer Hilfs-LED mit Schatter und Öffnungen zur Einkopplung der zu messenden LED-Einheit sowie Auskopplung in eine Eingangsoptik für das angeschlossene Spektroradiometer. Das Messsystem wird auf den absoluten spektralen Strahlungsfluss (W/nm) im sichtbaren Bereich von 380 nm bis 780 nm kalibriert. Aus den Daten des spektralen Strahlungsflusses können der Lichtstrom (in lm), die Farbtemperatur, der Farbort, die optische Leistung P_{opt} (in W) und bei bekannter elektrischer Leistung P_{el} der LED auch die thermische Leistung P_{th} (in W) nach Gleichung 2.3 berechnet werden.

$$P_{\text{th}} = P_{\text{el}} - P_{\text{opt}} \quad 2.3$$

Die zu messende LED wird mit einer Leiterplatte auf einen Kupferkörper aufgebracht, der mit Hilfe einer Peltier-Einheit bei einer Temperatur zwischen 10 °C und 90 °C mit einer Regelgenauigkeit von 0,01 °C konstant gehalten wird. Der Temperatursensor für die Einheit befindet sich direkt unter der Leiterplatte der LED. Versorgungseinheit, Stromquelle und Digitalmultimeter mit einer Stromauflösung von 1 pA und mit einer Abtastzeit von 1 µs ist das Keithley 2651A. Ein Host-Rechner steuert die o.g. Einheiten an und berechnet die Endergebnisse.

2.3.3 Grundlagen

Es gibt drei Arten der Wärmeübertragung: die Strahlung, die Konvektion und die Wärmeleitung, welche bei den LED-Systemen die dominierende Form der Wärmeübertragung bedeutet. Als Wärmeleitung ist der Wärmefluss in Folge eines Temperaturunterschieds in einem Festkörper oder in einem ruhenden Fluid definiert. Entsprechend dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme von der Stelle der höheren zu der Stelle der niedrigeren Temperatur, wobei basierend auf dem Energieerhaltungssatz keine Wärme verloren geht. Nach dem Wärmeleitungsgesetz von Fourier ergibt sich gemäß Abbildung 2.61:

$$P_{\text{th}} = \frac{\lambda \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{d} \quad 2.4$$

mit:

- P_{th} Wärmeleistung in Watt (W)
- A Fläche, durch welche die Wärme fließt
- d Dicke des durchflossenen Körpers
- λ Wärmeleitfähigkeit des Stoffes
- T_1 Temperatur der warmen Stelle
- T_2 Temperatur der kälteren Stelle

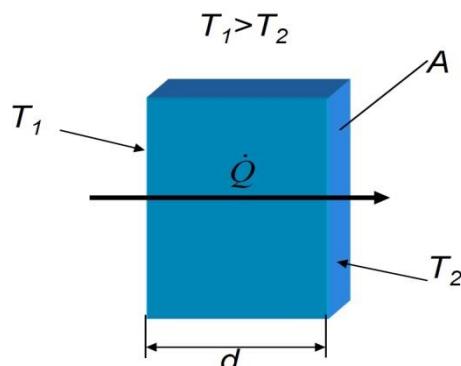


Abbildung 2.61: Wärmeleitung durch einen planparallelen Körper

Der thermische Widerstand R_{th} wird dabei wie folgt definiert:

$$R_{\text{th}} = \frac{d}{\lambda \cdot A} = \frac{(T_1 - T_2)}{P_{\text{th}}} \quad 2.5$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ des betrachteten Stoffes (z.B. Kupfer, Keramik, Aluminium...) ist eine temperaturabhängige Kenngröße. Eine LED-Einheit besteht in der Regel nicht nur aus einem homogenen Stoff, sondern aus dem mehrschichtigen Chip, dessen Unterlage, der primären Wärmesenke, der Wärmeleitpaste, der Leiterplatte und dem Kühlkörper. Der thermische Widerstand der LED-Einheit besteht somit aus der Kombination der einzelnen thermischen Widerstände der o.g. Komponenten.

In der heutigen LED-Praxis benutzt man zur Charakterisierung des Temperaturverhaltens der LED-Einheit häufig die Temperatur des LED-Halbleiter-Übergangs (T_J - junction Temperature) sowie die Temperatur eines Temperatursensors an einer definierten Stelle der LED-Einheit (z.B. direkt unterhalb der LED, auf der Leiterplatte, im Kühlkörper, T_S - solder point Temperature). Somit kann man den thermischen Widerstand der ganzen LED-Einheit bestimmen, wenn man die Temperatur des Halbleiter-Übergangs T_J (= T_1 in Gleichung 2.4), die Temperatur des Temperatursensors T_S (= T_2 in Gleichung 2.4) kennt und die Wärmeleistung P_{th} bestimmen kann.

2.3.4 Messung der thermischen Daten

Zur Messung der thermischen Daten einer LED wird diese mit dem Betriebsstrom (z.B. 350 mA, 700 mA, usw.) beaufschlagt. Nachdem sich die LED vollständig erwärmt hat und somit ein thermisches Gleichgewicht hergestellt ist (stabile Vorwärtsspannung), wird der Strom innerhalb einer Millisekunde auf einen Messstrom von 1 mA reduziert. Wie in Abbildung 2.62 zu erkennen ist, fließt bei einer Spannung von 2,6 V ein Strom von 1 mA, so dass eine elektrische Leistung von 2,6 mW umgesetzt wird. Als Worst-Case-Abschätzung kann die emittierte optische Leistung vernachlässigt werden. In diesem Fall ergibt sich für eine LED mit einem thermischen Widerstand von 10 K/W eine Temperaturdifferenz von $2,6 \text{ mW} * 10 \text{ K/W} = 0,026 \text{ K}$ zwischen dem pn-Übergang und dem Lötpunkt (Solder point). Diese Erhöhung ist ausreichend gering, um einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messung der thermischen Daten zu haben.

Eine genauere Beschreibung des Messverfahrens und die Theorie zur Messung der pn-Übergangstemperatur und des thermischen Widerstands wird in [39] und [40] gegeben.

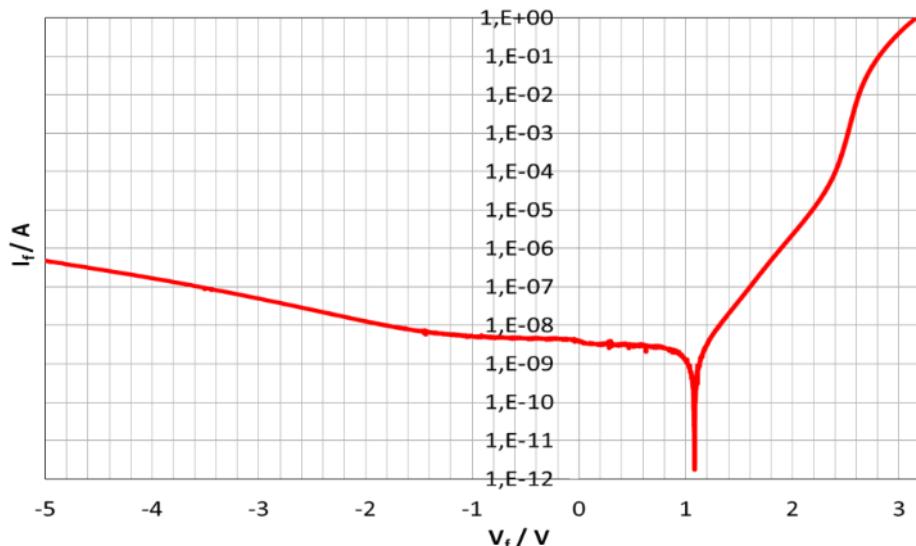


Abbildung 2.62: I-U-Kennlinie einer HP-LED bei $T_J = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.3.5 Aspekte der thermischen Messungen

Im Rahmen der Verifikation für das Messsystem wurden jeweils vier LEDs mit der Farbtemperatur 2700 K (warmweiß) und 5000 K (kaltweiß) messtechnisch analysiert. Dabei wurden die T_J - und T_S -Werte, P_{el} und P_{opt} bei unterschiedlichen Strömen von 10 mA bis 1000 mA bestimmt. Die mittleren Ergebnisse der vier LEDs werden in der Abbildung 2.63 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen:

- Je größer die Stromstärken, desto höher ist die pn-Übergangstemperatur bei gleichen Sensorsortemperaturen T_S .
- Bei der gleichen Sensorsortemperatur T_S und gleichem Strom sind die T_J -Werte der kaltweißen LEDs kleiner als die der warmweißen LEDs.

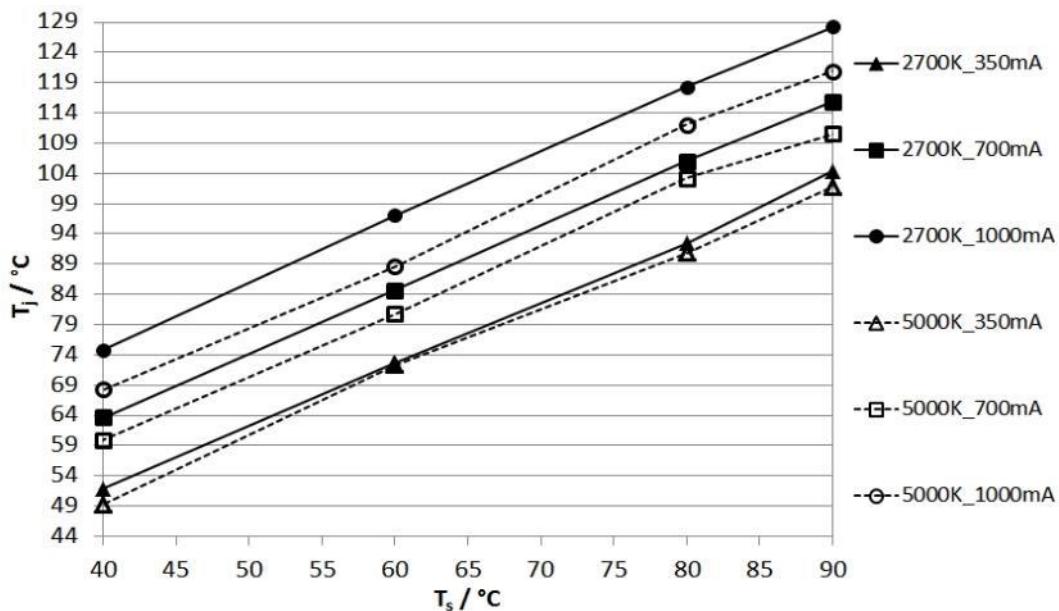


Abbildung 2.63: Zusammenhang von T_J und T_S für ww und kw LEDs bei unterschiedlichen Stromstärken

Aus Abbildung 2.63, kann die Differenz $\Delta T = T_J - T_S$ gebildet und für jeden Messpunkt die thermische Leistung P_{th} in Watt nach 2.3 berechnet werden. Somit kann man den thermischen Widerstand R_{th} nach 2.3 ermitteln. Abbildung 2.64 zeigt diese Werte als Funktion der Temperatur. Betrachtet man den Verlauf des Diagramms, stellt man fest, dass der thermische Widerstand von der Temperatur abhängt. Mit steigender LED-Temperatur erhöht sich der thermische Widerstand. Eine Erhöhung des thermischen Widerstands bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine höhere Temperatur die Wärmeleitung erschwert. Es entsteht ein Wärmestau, welcher thermisch sowohl den Chip als auch die Kontaktstellen (Lötstellen, Wärmeleitklebstellen, Schnittstellen zwischen Leuchtstoff und dem LED-Chip) belastet. Diese thermische Belastung beschleunigt auch die chemischen Vorgänge im Leuchtstoff, im Silikon als Bindemittel für den Leuchtstoff sowie die Oxidationsvorgänge z.B. an den Bonddrähten. Dies sind Mechanismen, die zu einer beschleunigten Alterung der LED-Einheit führen können.

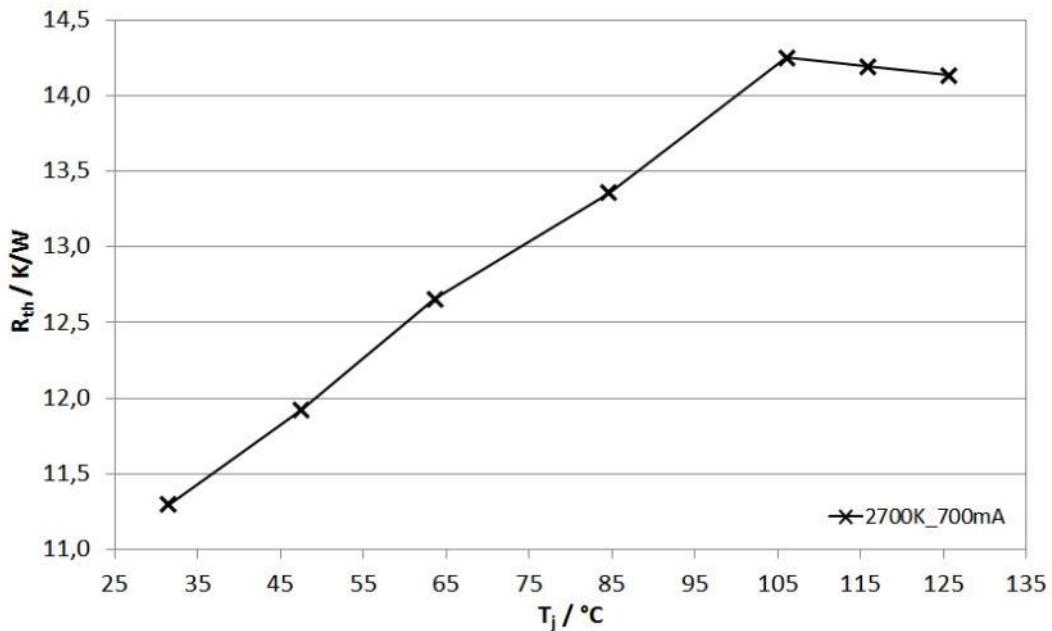


Abbildung 2.64: Thermische Widerstände der LEDs als Funktion der Temperatur

Bisher gibt es bei den LED-Herstellern Binning-Prozesse von LEDs bezüglich Farbort, Vorwärtsspannung und Lichtstrom. Das geschieht bei einer untypischen Messbedingung wie 350 mA, 25 °C und 20 ms Strompuls. Die ermittelten Werte gelten dabei für die LED im Neuzustand. Wie sich diese Daten im Laufe der Zeit verhalten, wird derzeit noch untersucht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zeigt sich, wenn man mehrere auf einer Leiterplatte befestigte LEDs thermisch betrachtet. In einer Untersuchung des Lichtlabors der TU Darmstadt wurde für vier weiße LEDs der thermische Widerstand gemessen. Die Messung erfolgte bei 60 °C und jeweils bei 350 mA und 700 mA (s. Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4). Die Δ -Werte des thermischen Widerstandes R_{th} und der Sperrsichttemperatur T_j sind jeweils auf die LED #2 als Referenz bezogen.

Tabelle 2.3: Thermischer Widerstand und Temperaturdifferenz der vier untersuchten LEDs bei 350 mA und 60 °C

LED_2700K	LED #1	LED #2	LED #3	LED #4
R_{th} in K/W	14,23	13,89	16,78	16,30
ΔR_{th} in K/W	0,34	0,00	2,89	2,41
P_{th} in W	0,86	0,84	0,85	0,83
ΔT_j in K	0,29	0,00	2,44	1,99

Tabelle 2.4: Thermischer Widerstand und Temperaturdifferenz der vier untersuchten LEDs bei 700 mA und 60 °C

LED_2700K	LED #1	LED #2	LED #3	LED #4
R_{th} in K/W	12,93	12,81	14,67	13,03
ΔR_{th} in K/W	0,12	0,00	1,86	0,22
P_{th} in W	1,92	1,88	1,89	1,84
ΔT_j in K	0,23	0,00	3,52	0,41

Die Werte der Tabellen zeigen, dass die vier weißen LEDs, z.B. in Reihenschaltung auf einer gemeinsamen LED-Leiterplatte mit annähernd gleicher Leiterplattentemperatur T_s , bei 350 mA bzw. 700 mA untereinander eine Temperaturdifferenz bis 3,52 K aufweisen. Diese Unterschiede verursachen möglicherweise auch eine unterschiedliche Lebensdauer bzw. Geschwindigkeit der Alterung der LEDs innerhalb der gleichen Schaltung und sollten genauer untersucht werden. Bei der thermischen Messung von weißen LEDs mit den gleichen blauen Chips, einmal mit warmweiß und einmal kaltweiß licht-konvertierenden Leuchtstoffen, ergibt sich Abbildung 2.65. Es wird deutlich, dass sich bei den gemessenen warmweißen LEDs im stationären Zustand nach 100 s im Vergleich zu den kaltweißen LEDs eine Temperatur von etwa 20 K mehr einstellt.

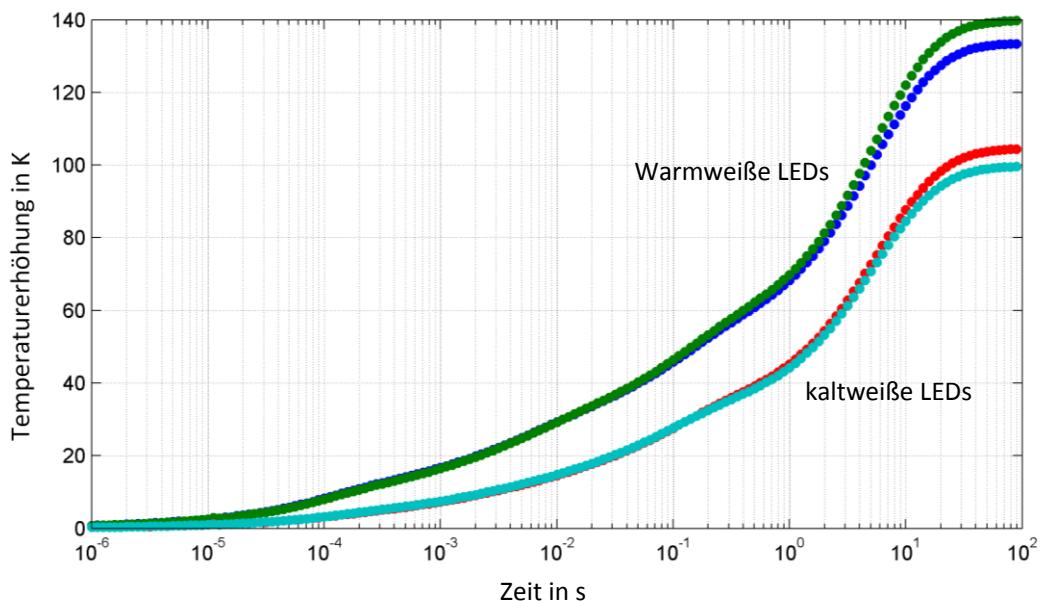


Abbildung 2.65: Thermische Unterschiede zwischen ww und kw LEDs des gleichen blauen Chips

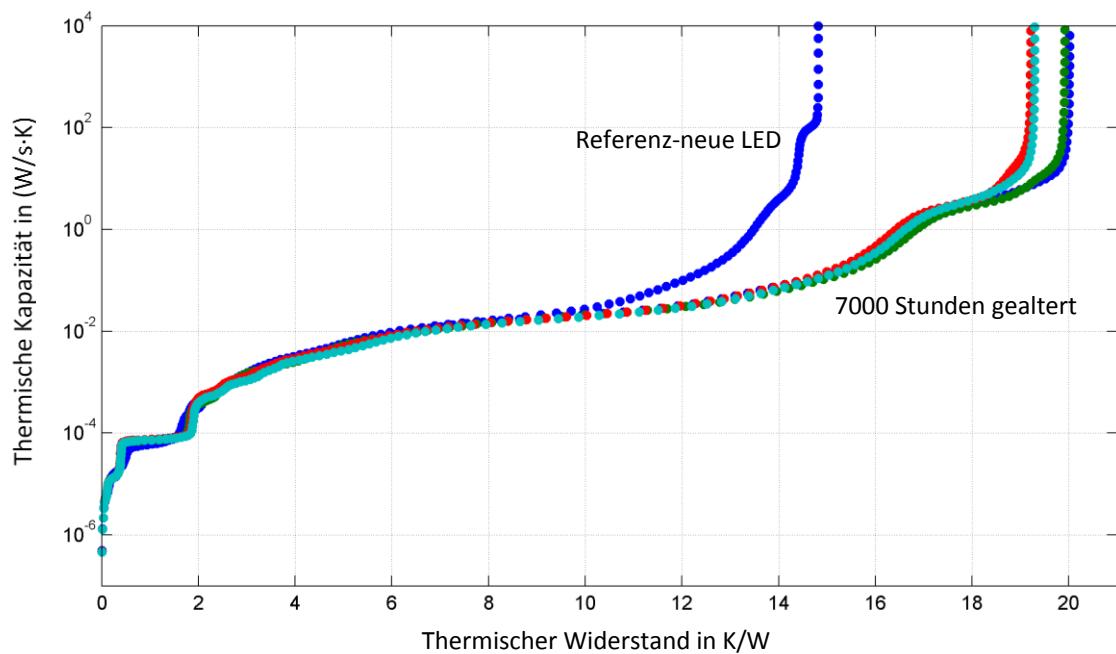


Abbildung 2.66: Änderung des thermischen Widerstands für LEDs vom gleichen Typ

Analysiert man die Kurven in Abbildung 2.66, stellt man fest, dass die Abschnitte bis 10 K/W von den neuen und 7000 Stunden alten LEDs absolut identisch sind. Der LED-Chip ändert sich somit nicht. Die Änderungen danach geschehen durch die Änderung der Packaging-Materialien (wie Klebstoffe, Leiterplattenmaterialien, Dielektrika).

2.4 Verbesserung der LED-Datenblattangaben

2.4.1 Einführung

Während des Entwicklungsprozesses einer LED-Leuchte stehen u.a. folgende Entscheidungen an:

- Auswahl von Typ und Anzahl der weißen und/oder farbigen LEDs,
- Auslegung der Optik, die passend zu der geometrischen Form der LEDs eine bestimmte Lichtstärkeverteilung liefert,
- Anordnung der LEDs auf der Leiterplatte zur Ableitung der thermischen Leistung der LEDs,
- Anordnung der elektronischen Bauelemente,
- Auslegung der Kühlkörper, der mechanischen Systeme wie Gehäuse, Dichtung, Montageplattform usw.

Als Ergebnis sollten im technischen Datenblatt einer Leuchte die folgenden wichtigen Kenngrößen stehen:

- Lichtstrom und Lichtstärkeverteilungskurven,

- Lichtausbeute und Leistungsfaktor,
- Farbort, Farbtemperatur, Farbort als Funktion der Lichtemissionswinkel, Farbwiedergabe,
- Lebensdauer in Abhängigkeit von den Betriebs- und Umweltbedingungen,
- Dimmkurven,
- Schutzart, Spannungsfestigkeit.

Um die Streuung der Leuchtendaten zu verringern, wird empfohlen die LEDs aus einer Binning-Gruppe auszuwählen und die Fertigungsprozesse im Betrieb innerhalb bestimmter vordefinierter Grenzwerte ablaufen zu lassen. Die Binning-Prozesse für die eingekauften LEDs finden bei den LED-Herstellern meistens unter der Bedingung von $I = 350 \text{ mA}$, $T = 25^\circ\text{C}$ und $t = 25 \text{ ms}$ statt. Die fertigen Leuchten werden nach der Inbetriebnahme täglich über längere Zeit betrieben. Bei einer Straßenleuchte wird in den Dunkelstunden im Winter eine Zeit zwischen 16 Uhr und 6 Uhr, bei einer Büroleuchte in der Regel zwischen 7 Uhr und 18 Uhr erreicht. Die Temperatur, kann je nach dem Aufstellungsplatz, Tageszeit, Jahreszeit und Dimmsituation zwischen 40°C und 120°C liegen. Für Leuchten in gut klimatisierten Räumen und im Wohnraumbereich können die pn-Übergangstemperaturen der LEDs zwischen 70°C und 110°C liegen. Die Betriebstemperaturen der LEDs unter der Einsatzbedingung weichen in der Regel erheblich von der Temperatur während des Binnings ab. Der Lichtstrom fällt in der Praxis demnach geringer aus. Um einen hohen Leuchtenlichtstrom zu erzielen und die Anzahl der LEDs aus wirtschaftlichen Gründen zu minimieren, liegt der Betriebsstrom der LEDs nicht selten zwischen 400 mA und 1000 mA . Dadurch weichen die farbmetrischen Kenngrößen und die Lebensdauer der LED in der Praxis von den Angaben der LED-Hersteller ab.

Um diese Abweichung zu reduzieren und um mit realitätsnahen Daten arbeiten zu können, müssen die Parameter der LEDs bei verschiedenen Temperaturen und Strömen der LEDs bekannt sein. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben methodisch, wie die realistische Kennzeichnung der lichttechnischen und farbmetrischen Parameter von LEDs bei verschiedenen Temperaturen und Strömen gestaltet werden kann.

2.4.2 Temperatur- und Stromverhalten

Eine Reihe von folgenden Fragestellungen sollte durch Messungen, Modellierung und Interpretationen beantwortet werden:

- Für weiße LEDs:
- Wie ändern sich der Lichtstrom, die optische Leistung, die Lichtausbeute (in lm/W) und die optische Effizienz mit der Temperatur und dem Strom? Kann man diese Veränderungen modellieren und mathematisch formulieren?
- Wie ändern sich der Farbort, die Farbtemperatur mit der Temperatur und dem Strom? Ab wann kann die Farbortänderung noch akzeptabel, tolerierbar, als gut, als sehr gut oder als nicht sichtbar bezeichnet werden?
- Wie verändern sich die Vorwärtsspannung und der thermische Widerstand mit der Temperatur?
- Zusätzlich für die farbigen LEDs:
- Wie verändern sich die Peak-Wellenlängen, die Dominant-Wellenlängen oder die Halbwertsbreite mit der Temperatur und mit dem Strom?

Erfassung der Änderung der photometrischen und elektrischen Kenngrößen

Um diese obigen Fragen zu beantworten, wurden 15 LEDs einer Binning-Gruppe auf den spektralen Strahlungsfluss mit dem Spektralradiometer im Abschnitt 2.3 absolut in W/nm gemessen. Die mathematische Modellierung wurde danach mit diesen Ergebnissen formuliert und mit den Messergebnissen weiterer 5 LEDs des gleichen Typs verglichen. In Abbildung 2.67 wird der Lichtstrom als Funktion der Temperatur der LEDs mit verschiedenen Strömen von 10 mA bis zu 1000 mA dargestellt. Die Messpunkte sind Mittelwerte der 15 gemessenen LEDs und die Kurven (Kurvenzüge) werden mathematisch über diese Messpunkte gelegt. Man sieht die allgemeine Tendenz, dass der Lichtstrom mit der Temperaturerhöhung sinkt.

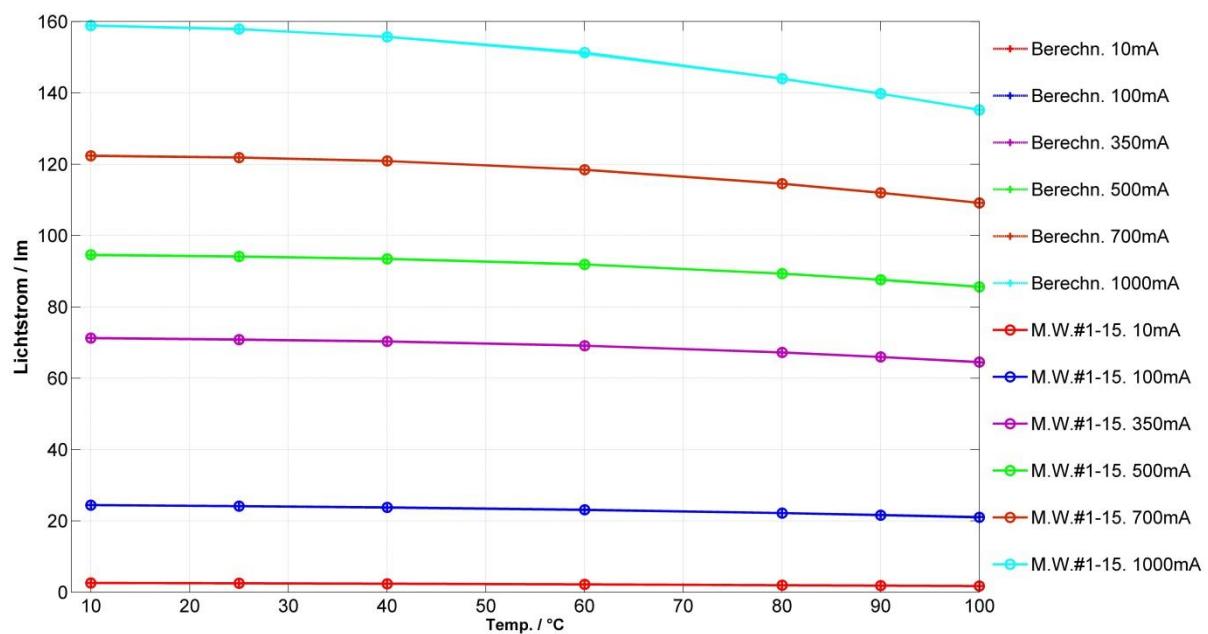


Abbildung 2.67: Lichtstrom als Funktion der Temperatur (Strom als Parameter)

In Abbildung 2.68 wird der Lichtstrom als Funktion der Stromstärken mit der Temperatur als Parameter dargestellt. Mit einer Erhöhung der Stromstärke steigt der Lichtstrom an. Dieser Anstieg nimmt aber ab einer Temperatur von 60 °C wesentlich ab.

Aus den Daten von Abbildung 2.67 und Abbildung 2.68 kann man eine dreidimensionale Darstellung der Lichtstromänderung beschreiben, die in Abbildung 2.69 dargestellt ist. Durch die mathematische Interpolation über Strom und Temperatur bekommt man eine Hüllfläche, wodurch man in der Lage ist, den Lichtstrom bei jeder Stromstärke und bei jeder Temperatur zu ermitteln und zu modellieren. Bisher kennt man von den LED-Herstellern nur den Lichtstrom bei einer normalen Binning-Bedingung (350 mA, 25 °C) oder bei einer „Hot-Binning“-Bedingung (350 mA, 85 °C). Mit der hier vorgeschlagenen Methode kann der Leuchtenentwickler den richtigen Lichtstrom bei einer für ihn in Frage kommenden Temperatur und bei einem durch ihn eingestellten Strom bestimmen.

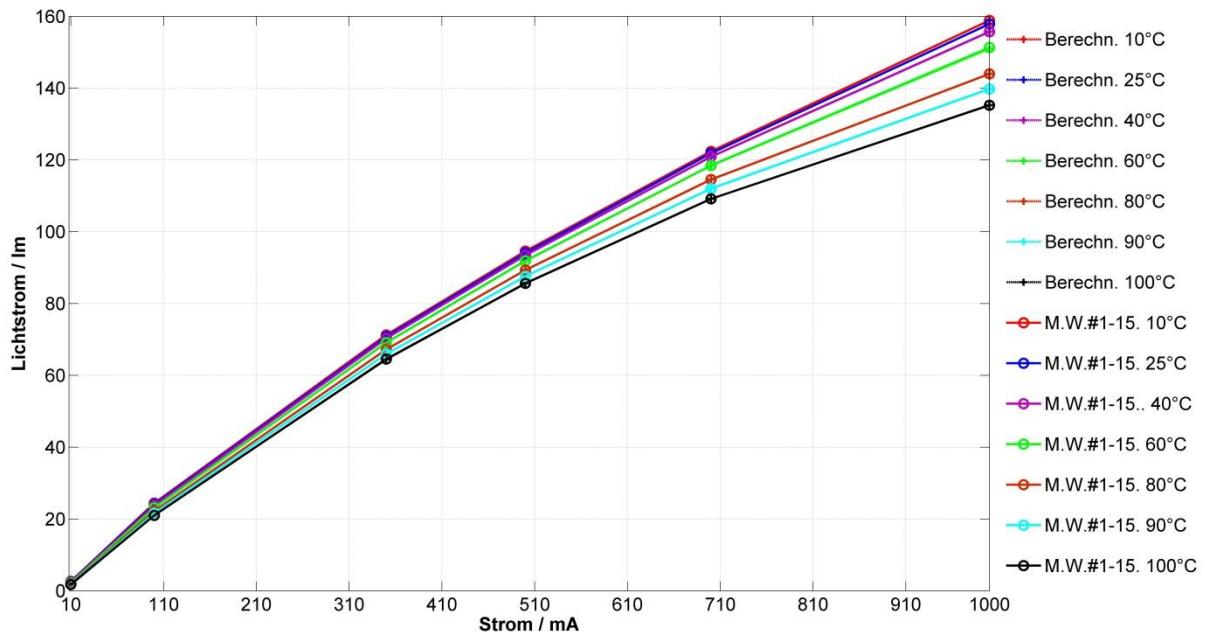


Abbildung 2.68: Lichtstrom als Funktion der Stromstärke (Temperatur als Parameter)

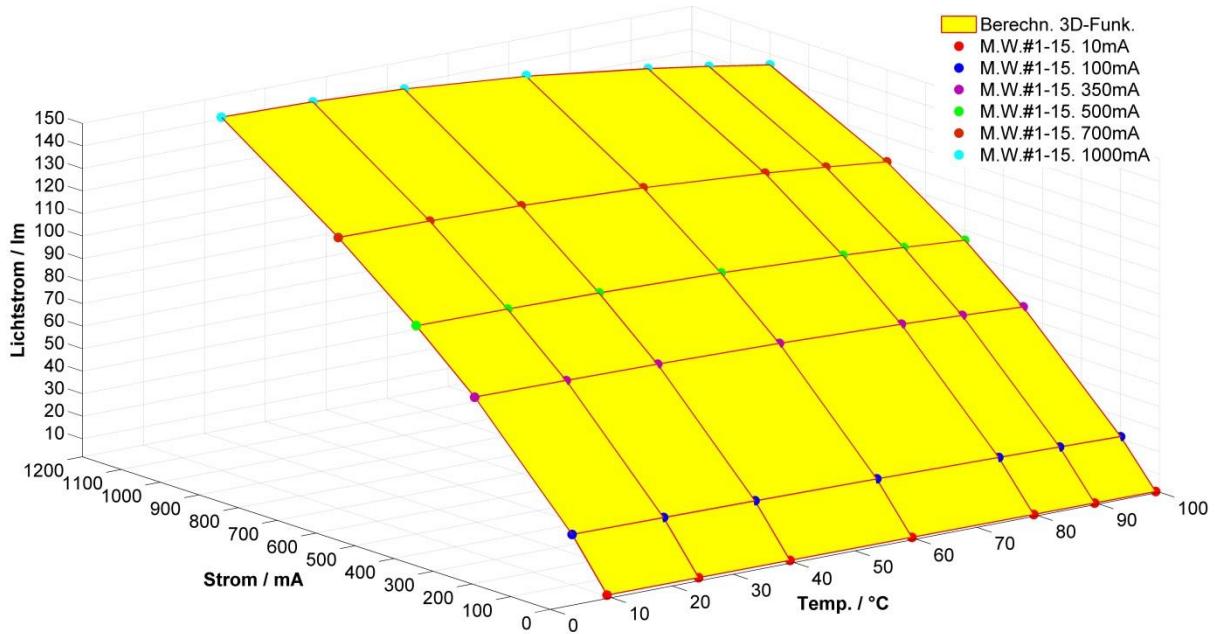


Abbildung 2.69: Lichtstromänderung als Funktion der Stromstärke UND der Temperatur

Um nachzuweisen, dass die mathematischen Beziehungen für Strom und Temperatur nicht nur für die 15 gemessenen LEDs zutrifft, sondern auch für andere LEDs des gleichen Typs, wurden weitere 5 LEDs (Nummer 16 bis 20) gemessen. In Abbildung 2.70 sind folgende Aspekte dargestellt:

- Auf der Abszisse werden die Temperaturen dargestellt. Der Mittelwert der Lichtströme der 15 LEDs als Funktion der Temperatur mit Strom als Parameter wird durch Kurven veranschaulicht.

- Die Balken (gefüllt oder leer) zeigen den minimalen und maximalen Lichtstrom bei der jeweiligen Temperatur und dem Strom.
- Die kleinen Dreiecke sind die Messwerte der LEDs der Nummer 16 bis 20 bei der jeweiligen Temperatur und dem Strom.

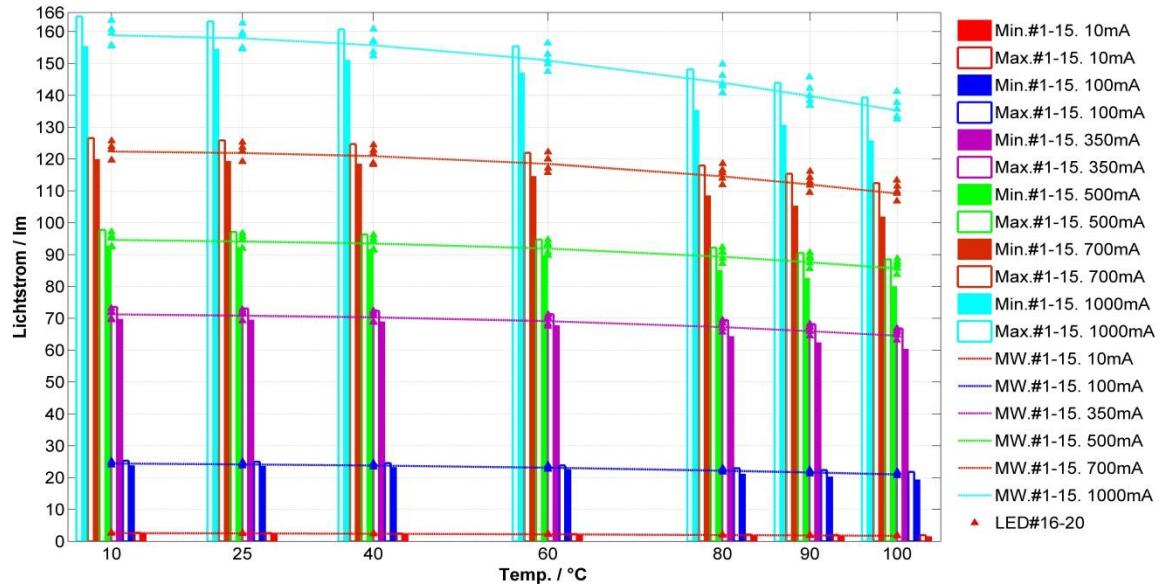


Abbildung 2.70: Überprüfung der Gültigkeit der ermittelten Temperatur-Strom-Beziehung

Die Messwerte der LEDs Nummer 16 bis 20 liegen innerhalb des Bereichs zwischen dem minimalen und maximalen Wert der LED-Lichtströme der Nummer 1 bis 15. Mit den Messwerten der 15 LEDs kann man somit mit einem hohen Vertrauensniveau den Lichtstrom der LEDs gleichen Typs vorhersagen.

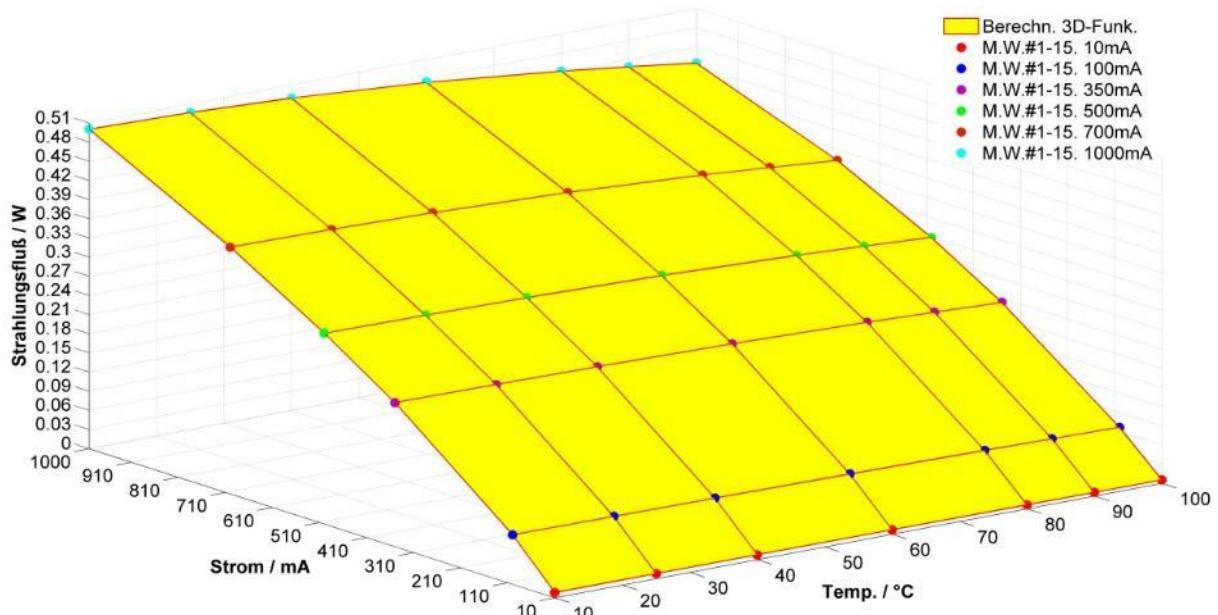


Abbildung 2.71: Änderung des optischen Strahlungsflusses als Funktion der Stromstärke UND der Temperatur

Die Vorgehensweise, dass man eine bestimmte photometrische und farbmetrische Kenngröße als eine dreidimensionale Hülfunktion von Temperatur und Strom darstellt, kann man nicht nur für den Lichtstrom, sondern auch für den Strahlungsfluss, für die Vorwärtsspannung oder für die ähnlichste Farbtemperatur realisieren (s. Abbildung 2.71 bis Abbildung 2.73).

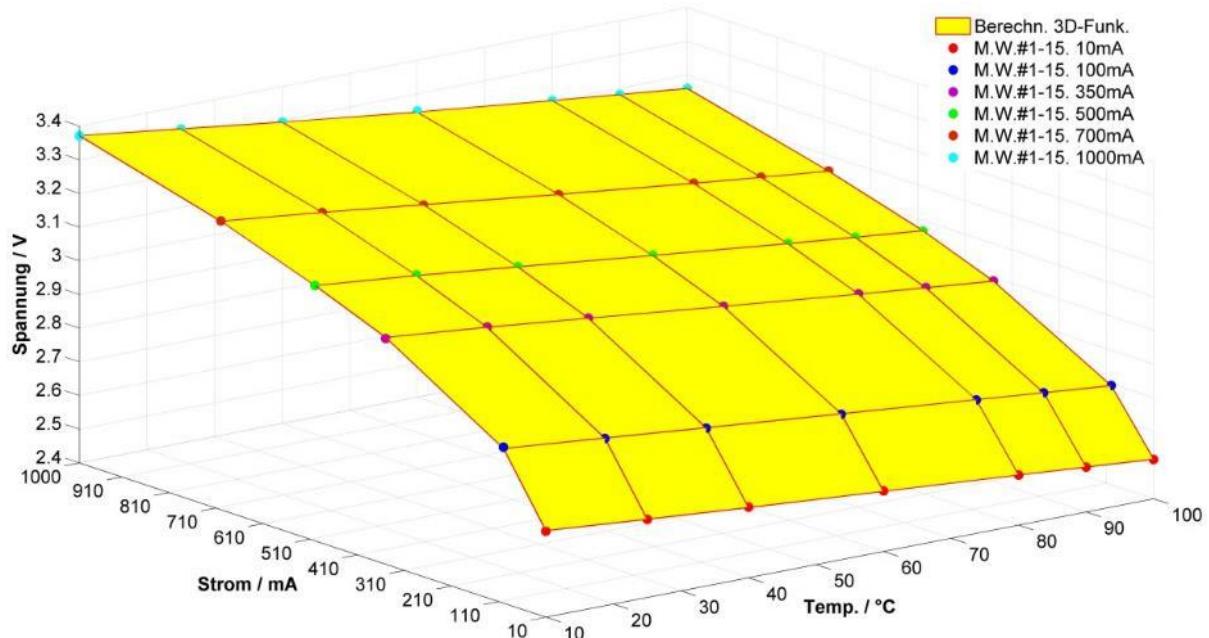


Abbildung 2.72: Änderung der Vorwärtsspannung
als Funktion der Stromstärke UND der Temperatur

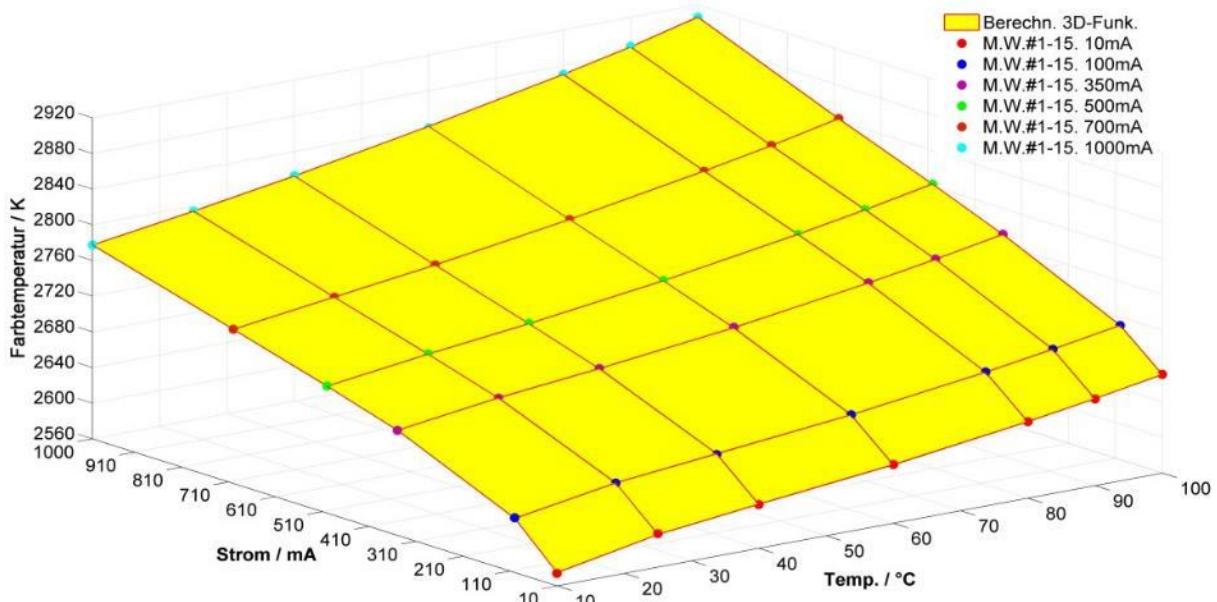


Abbildung 2.73: Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur
als Funktion der Stromstärke UND der Temperatur

2.5 Änderung der Binning-Strategie

Aus den Messung des absoluten spektralen Strahlungsflusses in W/nm wurden die Normfarbwertanteile x, y , die Farbtemperatur T_c sowie die Farbkoordinaten u' und v' berechnet. In Abbildung 2.74 werden die Farbkoordinaten u' und v' als Funktion von Temperatur und Strom dargestellt. Jede Kurve ist für eine Stromstärke, wobei sich die Temperatur von 10 °C bis 100 °C verändert. Die Farbkoordinaten u' und v' verändern sich sichtbar, wenn bei einem konstanten Strom unterschiedliche Temperaturen betrachtet werden.

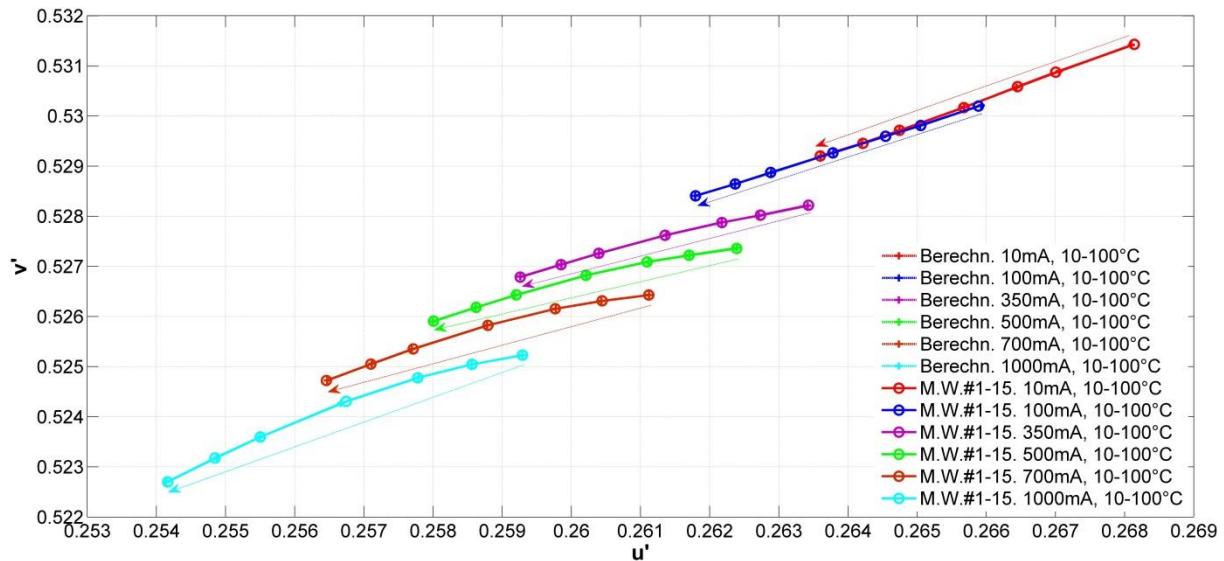


Abbildung 2.74: Farbkoordinaten u' und v' als Funktion von Temperatur und Strom dargestellt

Der Selektionsprozess für die LEDs (Binning) erfolgt bekanntlich bei 350 mA und 25 °C (Referenzbedingung). Für den Leuchtenentwickler und Abnehmer der LEDs ist es hilfreich zu wissen, wie sich der Farbabstand zu dem Farbort der Referenzbedingung ändert, wenn sich der Strom und die Temperatur verändern.

Abbildung 2.75 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Der Farbabstand $\Delta u'v'$ bei der Referenzbedingung 350 mA und 25 °C ist naturgemäß Null. Bei jeder anderen Bedingung ist der Farbabstand größer, insbesondere, wenn der Strom sehr hoch ist. Dies wird deutlich für 500 mA, 700 mA oder 1000 mA und einer Temperatur von mehr als 80 °C. Wenn man die allgemeine Faustregel anwendet, dass der Farbabstand $\Delta u'v'$ von größer als 0,006 bereits störend wirkt, kann man bei 700 mA keine größere Temperatur als 85 °C zulassen. Eine Temperatur von 85 °C bei 700 mA ist aber sehr üblich bei LED-Innenraumleuchten. Daher muss man die Selektionsstrategie bei den LED-Herstellern verändern, um den Farbabstand zu der Referenzbedingung nicht zu groß werden zu lassen.

Aus diesem Grund haben sich einige große internationale LED-Hersteller entschieden, die LEDs auch bei einer realistischeren Bedingung zu selektieren. Die Bedingungen sind meistens 80 °C - 85 °C und 350 mA. In Abbildung 2.76 sind die Farbabstände $\Delta u'v'$ als Funktion von Temperatur und Strom bei der Binning-Bedingung 350 mA und 80 °C dargestellt.

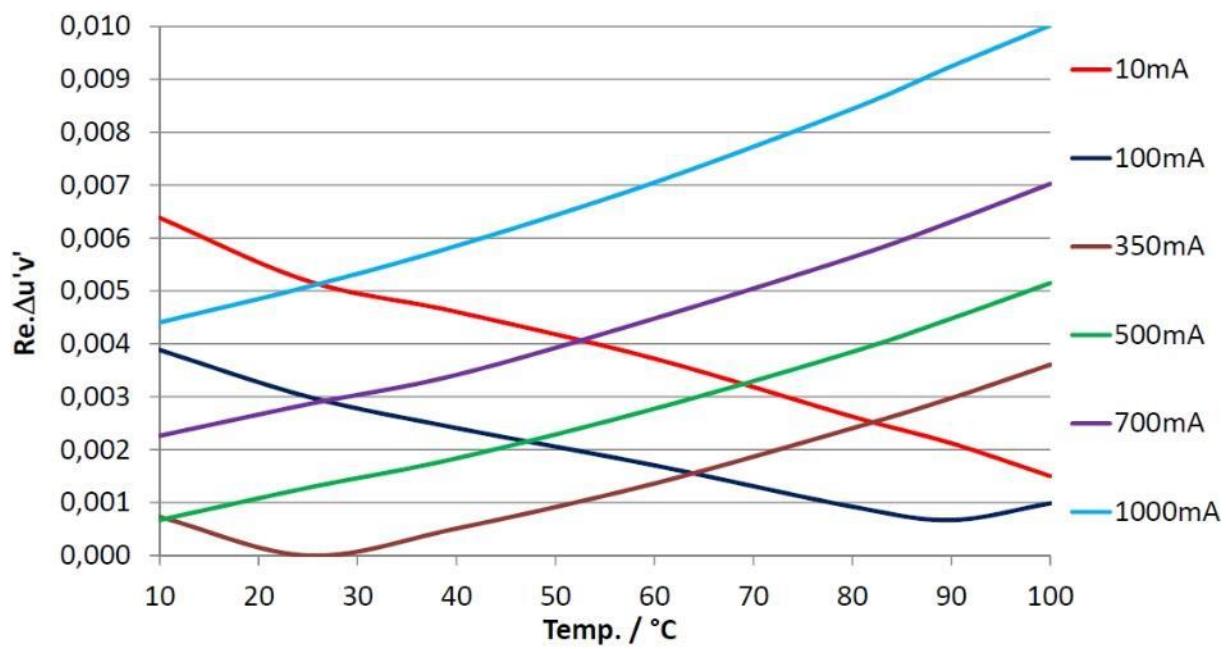


Abbildung 2.75: Farbabstand $\Delta u'v'$ als Funktion von Temperatur und Strom in Bezug zur normalen Binning-Bedingung (350 mA, 25 °C)

Betrachtet man die Abbildung 2.76 genau, stellt man fest, dass der Grenzfarabstand $\Delta u'v' = 0,006$ bei 350 mA, 500 mA und 700 mA für alle Temperaturen und für 1000 mA bis etwa 78 °C nicht überschritten wird bzw. die Abweichung nicht als störend empfunden wird. Das zeigt die Notwendigkeit auf, die LEDs bei einer realen Temperatur wie 80 °C oder 85 °C zu binnieren.

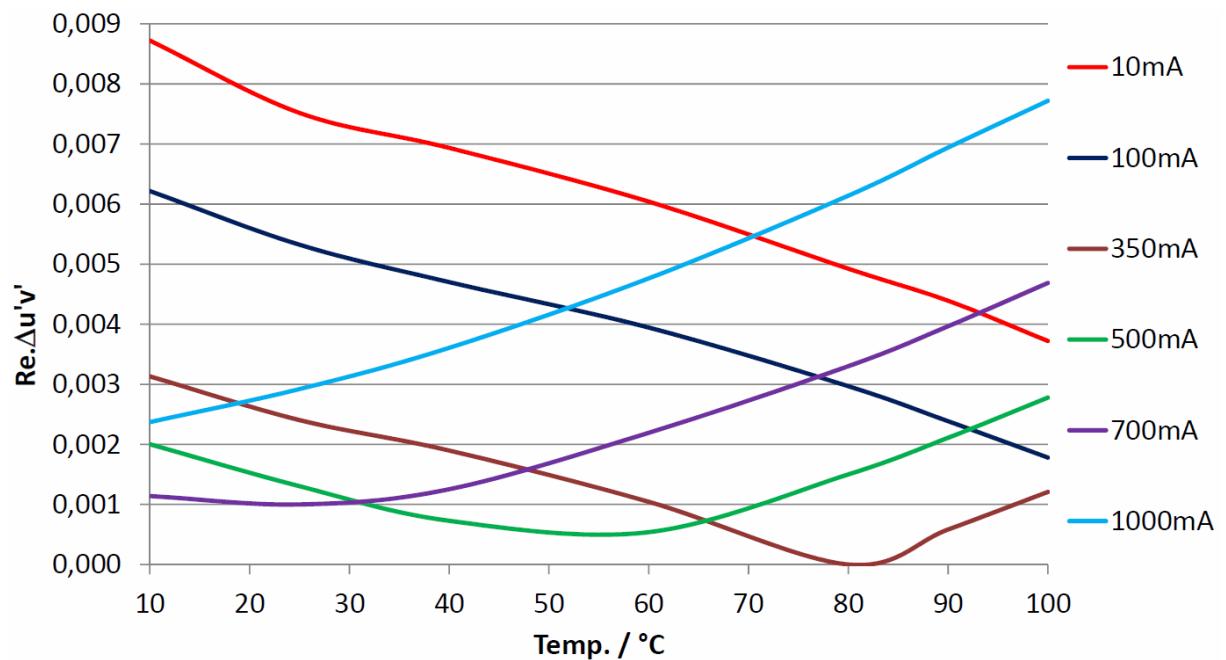


Abbildung 2.76: Farbabstand $\Delta u'v'$ als Funktion von Temperatur und Strom in Bezug zur „hot-binning“-Bedingung (350 mA, 80 °C)

Man kann diese Ergebnisse dieser Studie in drei wichtigen Punkten zusammenfassen:

- Die aktuell üblichen Angaben der LED-Hersteller für eine LED sind die photometrischen und farbmetrischen Werte bei der Standard-Binning-Bedingung ($I = 350 \text{ mA}$, $T = 25^\circ\text{C}$, $t = 25 \text{ ms}$ Pulsdauer) oder bei $T = 80^\circ\text{C}$ oder 85°C . Das vorgeschlagene umfassende Darstellungsmodell in 3D-Form hingegen kann bei jeder Stromstärke und jeder Temperatur die gewünschten Werte bis auf wenige Prozente genau liefern.
- Der Vorteil von dieser Vorgehensweise ist, dass der Leuchtenentwickler sofort die photometrischen Werte und die Farbwerte bei einem von ihm gewünschten bzw. abgeschätzten Strom und einer entsprechenden Temperatur ermitteln kann.
- Die Daten der entwickelten und gebauten Leuchten weichen somit nicht mehr erheblich von den errechneten Daten ab. Zudem kann der Leuchtenentwickler anhand der realistischeren LED-Angaben den Strom für die gewünschten Lichtströme in einem realen „heißen“ Betriebszustand bestimmen.

Diese Ergebnisse wurden von der TU Darmstadt in einem speziellen Workshop mit der technischen Gruppe für LED-Binning des ZVEI vorgestellt und diskutiert. Zu dieser Gruppe gehören u.a. Vertreter der LED-Hersteller Osram, Lumileds und Leuchtenhersteller wie die Fa. Schuch.

2.6 Auswahlkriterien für weiße LEDs

Generell gibt es mehrere Aspekte, um die LEDs aus technischer Sicht optimal auszuwählen.

2.6.1 Elektrische Aspekte

Für den konstanten Strom müssen LEDs eine niedrige Vorwärtsspannung aufweisen, um einen niedrigen ohmschen Widerstand zu haben. Bei hohem Strom ist somit eine niedrige Spannung für die gesamte Schaltung erstrebenswert.

2.6.2 Thermische Aspekte

Weiße LEDs benötigen einen geringmöglichsten thermischen Widerstand, um letztendlich eine möglichst niedrige pn-Übergangstemperatur zu erhalten. Die LED sollte auch einen niedrigen Temperaturkoeffizienten des Lichtstroms haben. In Abbildung 2.77 ist die LED mit der Bezeichnung LWG 15 die in der Hinsicht optimale LED, da sie den geringsten Lichtstromabfall bei steigender Temperatur zeigt.

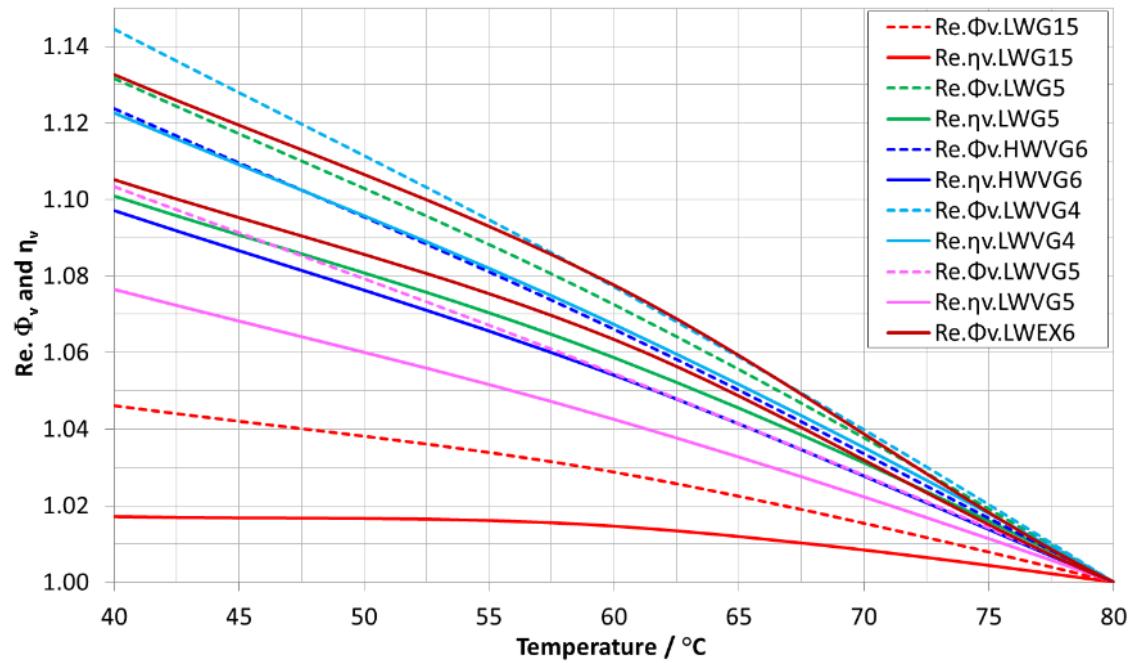


Abbildung 2.77: Temperaturabhängige Lichtstromänderung einiger weißer LEDs

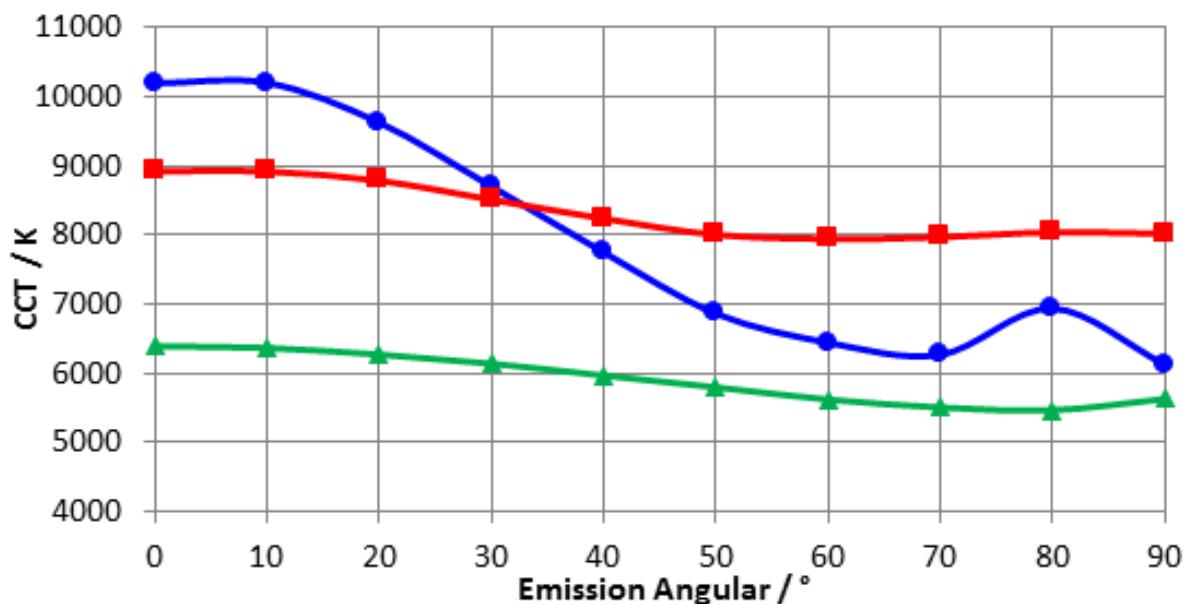


Abbildung 2.78: Winkelabhängigkeit der Farbtemperatur weißer LEDs

2.6.3 Lichttechnische Aspekte

Abbildung 2.78 zeigt die Winkelabhängigkeit der Farbtemperaturen. Die weiße LED mit der grünen Kurve ist hier am besten geeignet, damit die LED-Beleuchtung, z. B. auf einer weißen Wand, nicht zu einer merklichen Farbinhomogenität führt.

2.6.4 Steuerungstechnische Aspekte

Eine spezielle Eigenschaft von LEDs besteht darin, dass der Lichtstrom (Strahlungsleistung) mit dem Strom ansteigt. Aber die Lichtausbeute nimmt mit dem Strom ab. Das heißt, dass ein Strom gefunden werden muss, um einen guten Kompromiss zwischen den beiden Aspekten Lichtstrom und Lichtausbeute zu finden. Ein Beispiel kann der Abbildung 2.79 entnommen werden. Der optimale Bereich liegt zwischen 400 mA und 550 mA als Schnittpunkt der beiden Kurven derselben LED.

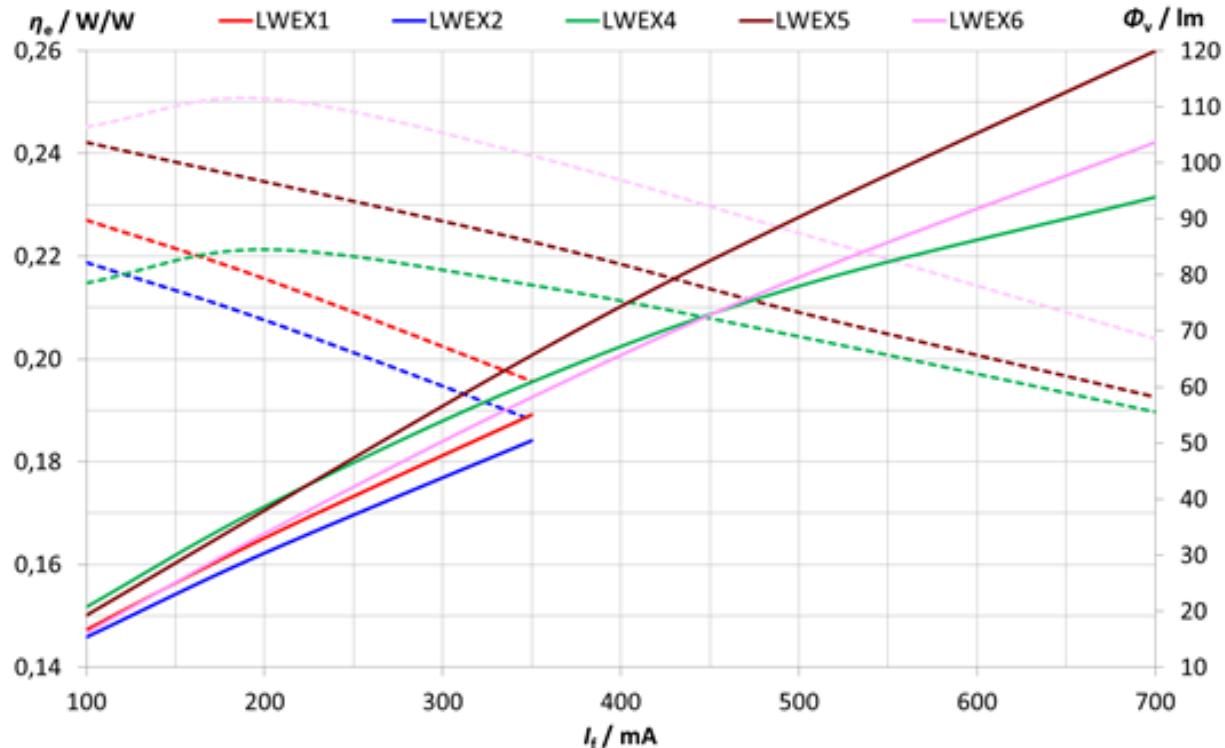


Abbildung 2.79: Stromabhängigkeit des Lichtstroms (in lm) und Strahlungseffizienz (in W/W)

3 LED-Leuchten als System

In diesem Kapitel werden die Methodik und die Vorgehensweise der Leuchtenentwicklung diskutiert. Danach werden spezielle Probleme der Leuchtenentwicklung wie EMV, Wartungsfaktor bei LED-Leuchten und die Leuchtenalterung behandelt.

3.1 Systematik und Prozess der LED-Leuchtenentwicklung

3.1.1 Geschichtliche Entwicklung

Die allgemeine Leuchtentechnik und der dazugehörige ingenieurtechnische Prozess haben sich in den letzten Jahrzehnten sehr dynamisch und mit vielen Innovationen entwickelt. Bis in die 1980er Jahre hinein bestanden Straßenleuchten in der Regel aus:

- aus Leuchtstofflampen, Natriumdampflampen und Quecksilberdampflampen,
- einem Metall-Reflektor mit einem Reflexionsgrad von etwa 0,8 sowie
- aus einem magnetischen Vorschaltgerät.

Ab Mitte der 1980er Jahre wurden Kompaktleuchtstofflampen und auch Halogenmetallldampflampen eingesetzt. Zur Lichtlenkung wurden Freiform-Reflektoren, teilweise mit Silberbeschichtung, und einem Reflexionsgrad um 0,95-0,98 eingesetzt. Auch erste elektronische Vorschaltgeräte kamen zum Einsatz. Die Entwicklung der Leuchten wurde dabei zum großen Teil durch die Entwicklung der Lampentechnik bestimmt. Abbildung 3.1 zeigt die Entwicklung der Lichtausbeute für verschiedene Lichtquellen der Straßenbeleuchtung bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts.

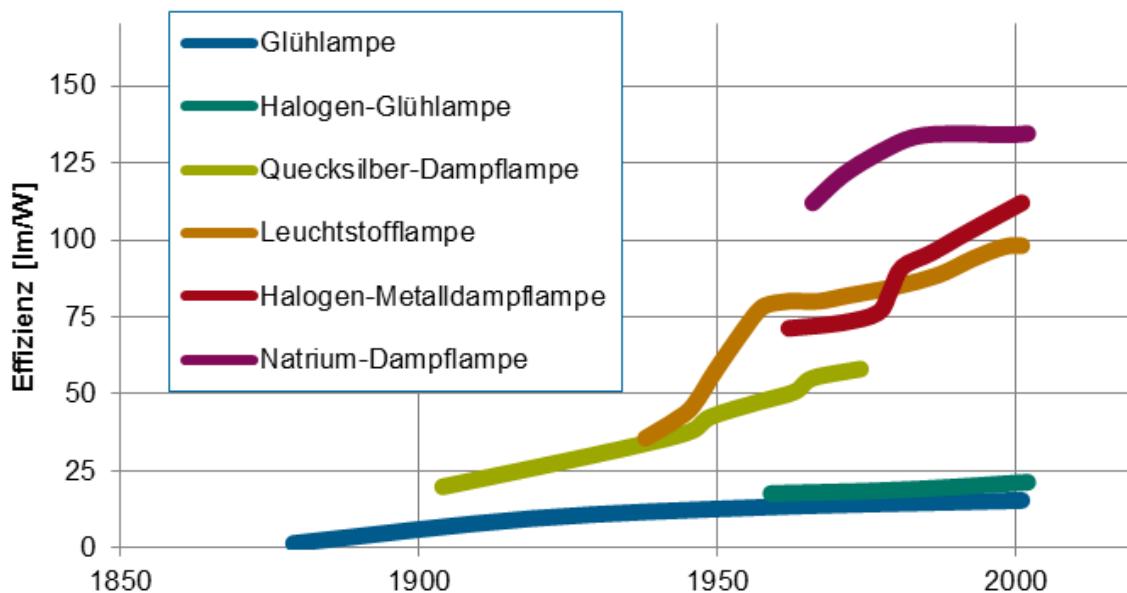


Abbildung 3.1: Entwicklung der Lichtausbeute von Lichtquellen der Straßenbeleuchtung

Seit dem Jahr 2006 gibt es eine sehr dynamische Entwicklung in der Leuchtentechnik, die zu Beginn durch die rasante Entwicklung der LED geprägt wurde. In den letzten Jahren ist dieser Prozess eher durch die Änderung technischer Prozesse und der Entwicklungsstrategie gekennzeichnet. Diese Änderungen äußern sich u.a. in den folgenden Facetten.

Für die Lampen- und LED-Hersteller:

Es gibt eine große Anzahl von LED-Herstellern, die auf dem weltweiten Markt präsent sind. Diese entwickeln vermehrt auch selbst LED-Leuchten, vermarkten sie und strukturieren damit den Leuchtenmarkt neu. Hauptmerkmale der globalen Entwicklung sind dabei u.a.:

- der zunehmende Wettbewerbsdruck,
- die Globalisierung der Produktionen und Logistik,
- die Schnelligkeit der Produkterneuerung und der technologischen Fortschritte,
- die Notwendigkeit, mit den lichttechnischen und kolorimetrischen Anwendungsaspekten umzugehen,
- die schnelle Preisreduktion,
- die zunehmende Vervollständigung der Wettschöpfungskette von Bauelementen über Module bis zu den ganzen Leuchten,
- die zunehmende Anforderungen, die Lichtquelleneigenschaften in den Datenblättern seriös und umfassend anzugeben.

Für die Leuchtenhersteller:

Bis auf wenige Ausnahmen lassen sich die Leuchtenhersteller in den letzten Jahrzehnten, insbesondere in Deutschland, mit einer überschaubaren Wettschöpfungstiefe dem Bereich des Mittelstands zuordnen. Neben dem Bereich der Entwicklung, der im Wesentlichen die Leuchtenmechanik und den Entwurf des Gehäuses beinhaltet, sind die Montage der einzelnen Baugruppen und der Vertrieb die Schwerpunkte der unternehmerischen Tätigkeit. Viele der verbauten Komponenten wie Lampe, Vorschaltgerät und Reflektoren waren Zukaufteile. Mit der Einführung der LED-Technik wurde es erforderlich, sich wesentlich intensiver mit den LED-Eigenschaften und den damit sehr umfangreichen Herausforderungen zu beschäftigen. Die Langzeitstabilität der Produkte, die damit verbundene Garantiezeit und neue Fragen auf der lichttechnischen Anwendungsseite wie Blendung, Lichtfarbe und Homogenität wurden zu einem dominierenden Thema.

Trotz der enormen Herausforderungen zeichnen sich die letzten Jahre durch eine sehr dynamische und innovative Entwicklungsphase aus. Getragen von der schnellen Entwicklung der LED (s. Abbildung 3.2) gibt es zurzeit eine Reihe von technischen und dekorativen Straßenleuchten, die eine gute bis sehr gute Lichtausbeute aufweisen. Abbildung 3.3 zeigt eine Übersicht der Entwicklung der System-Lichtausbeute von 38 LED-Straßenleuchten, die in den vergangenen fünf Jahren im Lichtlabor der TU Darmstadt vermessen wurden. Die Grafik zeigt, dass einige LED-Leuchten in ihrer System-Lichtausbeute mittlerweile sogar die Werte von effizienten konventionellen Straßenleuchten übertreffen, deren Wert bei etwa 70-80 lm/W liegt. Dabei muss jedoch sehr genau zwischen den am Markt befindlichen LED-Leuchten unterschieden werden, da sich die Werte selbst für aktuelle LED-Leuchten sehr deutlich unterscheiden können.

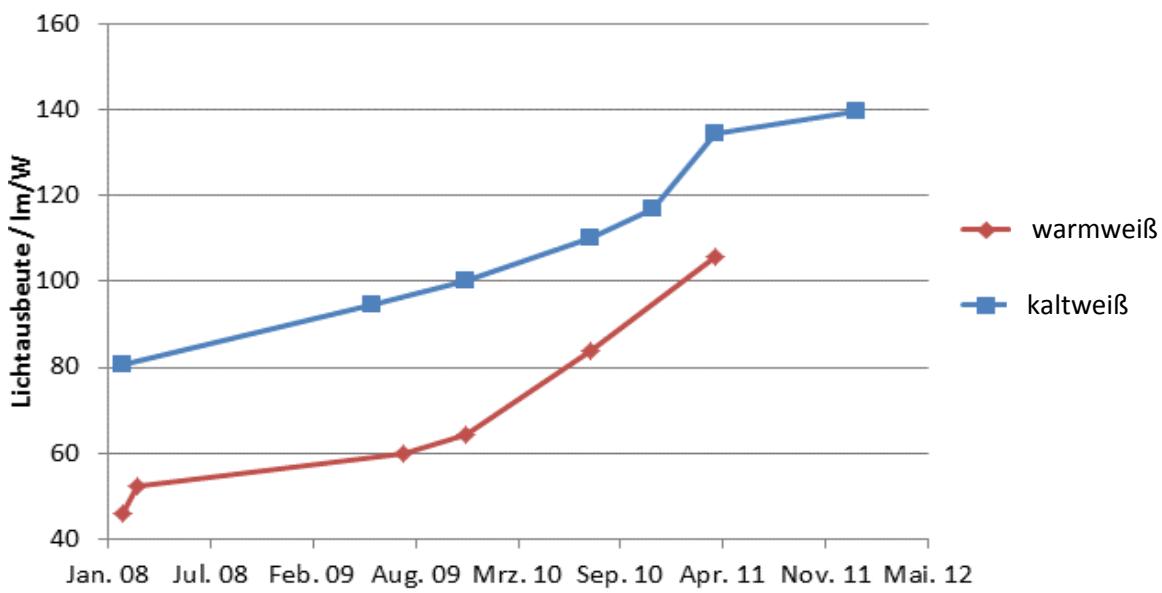


Abbildung 3.2: Die Entwicklung der Lichtausbeute von LEDs bei 350 mA und 60 °C

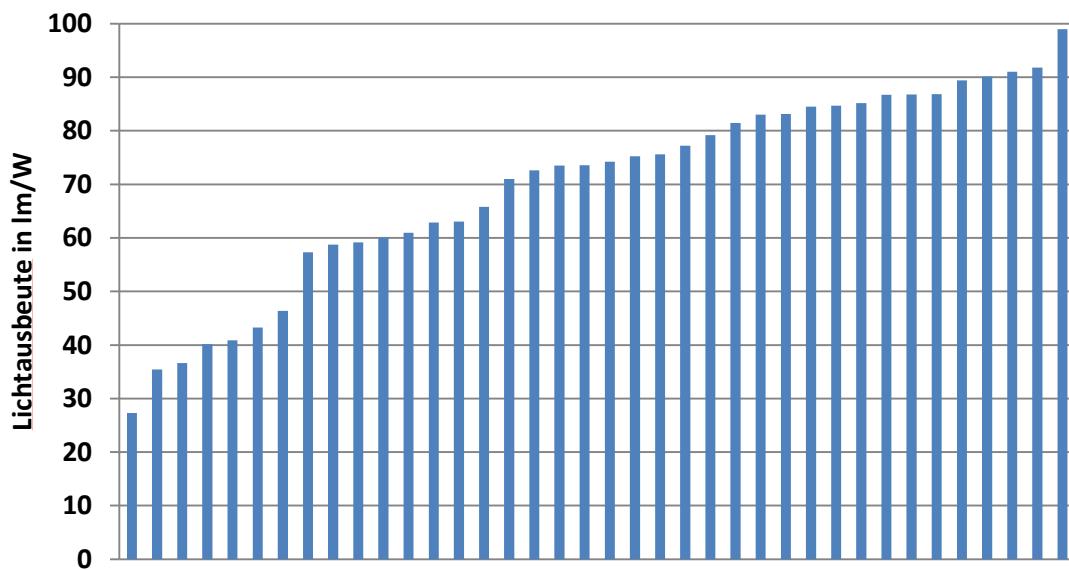


Abbildung 3.3: Systemlichtausbeute von 38 gemessenen LED-Straßenleuchten bis zum Jahr 2013

Die Entwicklung der Lichtausbeute sowie die damit verbundene Debatte um die Energieeffizienz werden auch in den nächsten Jahren vorrangig durch die Weiterentwicklung der LED bestimmt werden. Seit einiger Zeit treten jedoch andere wichtige Fragestellungen in den Vordergrund, die einen

fundierten Entwicklungsprozess für LED-Leuchten erforderlich machen. Daraus ergeben sich u.a. folgende Fragestellungen:

- Wie kann man Informationen über die wesentlichen Eigenschaften der LEDs, der Elektronik und weiterer Baugruppen bestimmen, um die Leuchte sachgemäß zu entwickeln sowie den Wartungsfaktor, die Garantiezeit und die Wirtschaftlichkeit verlässlich bestimmen zu können? Hierzu zählen die photometrischen, kolorimetrischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften von LEDs unter realen Arbeitsbedingungen sowie die Daten über die Lebensdauer der LEDs, der Elektronik und anderer relevanter Baugruppen.
- Welche Maßnahmen, Arbeitsmittel und Entwicklungsmethoden muss man verwenden, um innerhalb einer vertretbaren Zeit eine LED-Straßenleuchte mit gewünschten Eigenschaften zu entwickeln?
- Wie kann man eine wettbewerbsfähige, modular aufgebaute und langzeitstabile Leuchte entwickeln und wie kann man sie lichttechnisch bewerten?
- Wie kann man aus der photometrischen Eigenschaften der LEDs eine gewünschte und lichttechnisch wohl begründete Lichtstärkeverteilung dimensionieren?

Das Ziel des vorliegend Abschnittes besteht darin, die Grundlagen für einen lichttechnisch sinnvollen Entwicklungsprozess zu definieren, der eine energieeffiziente und langzeitstabile LED-Straßenleuchte gewährleistet.

3.1.2 Systematik des Entwicklungsprozesses einer LED-Leuchte

Der Leuchtenentwicklungsprozess besteht aus einzelnen Teilprozessen, die zum Teil nacheinander, zum Teil aber auch parallel durchgeführt ablaufen. Einzelne Teilergebnisse beeinflussen dabei die Abläufe und Resultate der anderen Teilprozesse. Diese Teilprozesse werden im Schema in Abbildung 3.4 veranschaulicht.

Spezifikation - Vorüberlegungen

Die Phase der Spezifikation und Vorüberlegungen beinhaltet die nachfolgenden Teilprozesse.

Zielvorgaben definieren:

Man muss am Anfang der Entwicklung überlegen, für welche Straßengeometrien und Beleuchtungsklassen die Leuchte entwickelt werden soll. Für ME-Straßen wird nach der DIN EN 13201 die Leuchtdichte, für S-Klassen die Beleuchtungsstärke als Messgröße verwendet. Dabei kann für bestimmte ME-Klassen oder S-Klassen die gleiche Leuchte entwickelt werden. Die entsprechende Anpassung für eine Beleuchtungsklasse findet dann durch eine Einstellung des Stroms oder durch Hinzunahme weiterer gleicher LED-Module statt.

Eine Marktstudie im Vorfeld der Entwicklung führt direkt zu einer Vorgabe bezüglich der Preisvorstellung, der Entwicklungsduer und dem Termin der Markteinführung. Die Preisgestaltung kann flexibilisiert werden, wenn eine Leuchte für verschiedene Beleuchtungsklassen aus gleichen Modulen besteht, so dass immer auf die gleichen Komponenten zugegriffen werden kann. Eine Definition

möglicher Einsatzgebiete, z.B. ruhige saubere Anliegerstraßen oder Hauptverkehrsstraßen mit hoher Luftverschmutzung sowie die geografische Lage entscheidet auch bereits direkt oder indirekt über Vorüberlegungen wie Verschmutzungsgrade, Temperaturbereiche aber auch über die Aspekte wie Ersatzteile, Lagerhaltungen und Lieferzeit.

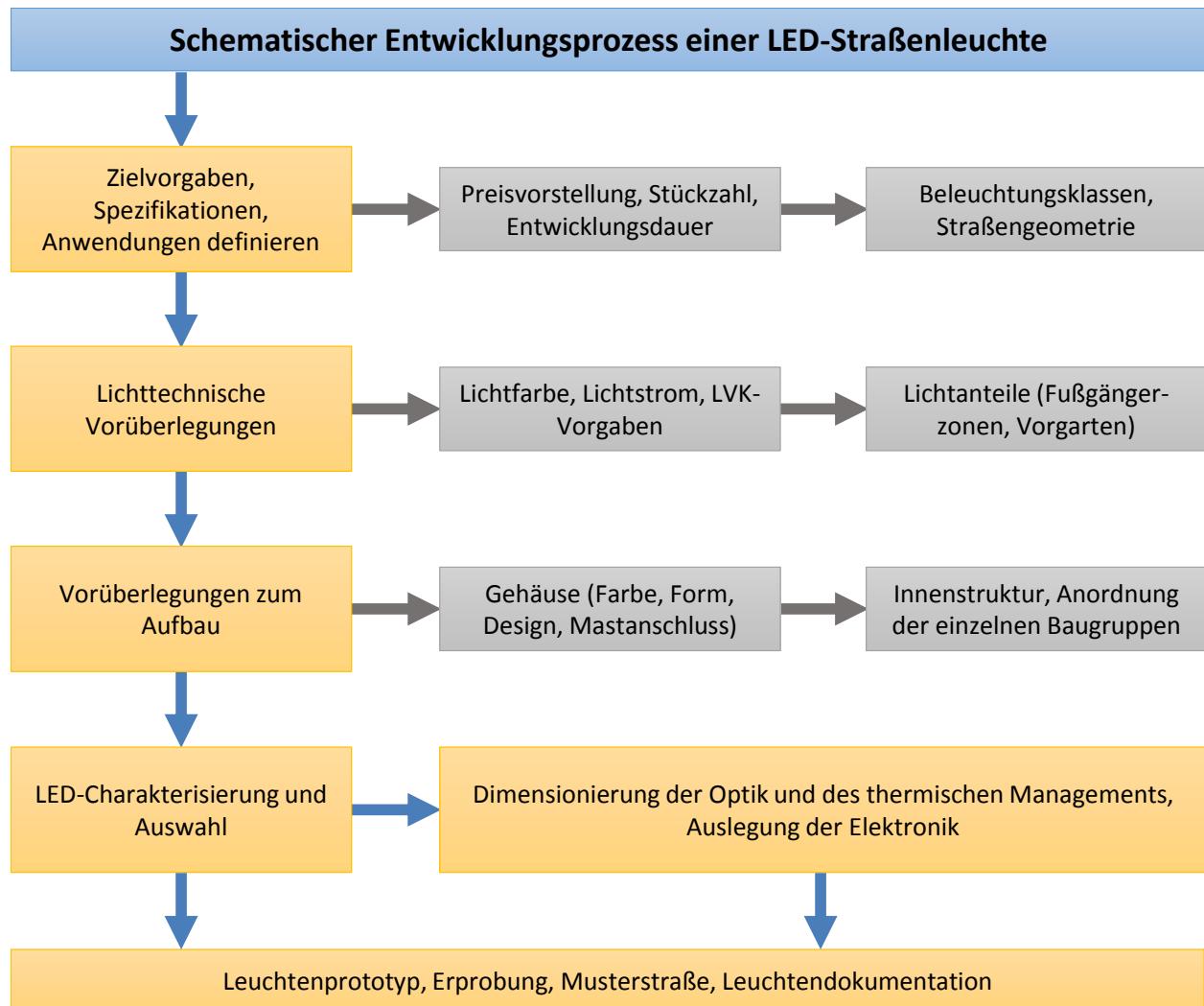


Abbildung 3.4: Entwicklungsprozess am Beispiel einer LED-Straßenleuchte

Lichttechnische Vorüberlegungen:

Die Wahl der Lichtfarbe ist scheinbar vordergründig und eher eine Frage der Kultur und Gewohnheit. In der Praxis hat sie jedoch eine große technische Tragweite. Grundsätzlich wird zwischen warm-weiß (2700 K - 3500 K), neutralweiß (3600 K - 4500 K) und tageslichtweiß/kaltweiß (4600 K - 6500 K) unterschieden. Menschen in unterschiedlichen Regionen haben scheinbar unterschiedliche Präferenzen, wobei eine fundierte Untersuchung darüber bislang nicht vorliegt.

Warmweiße LEDs haben aus der heutigen Sicht etwa 25 - 30 % weniger Lichtausbeute als tageslicht-weiße und neutralweiße LEDs (s. Abbildung 3.5). Bei der gleichen Temperatur der Leiterplatten und

bei dem gleichen Strom weisen sie einen höheren Lichtverlust, eine höhere thermische Leistung, eine höhere Temperatur, eine schnellere Degradation und demzufolge eine geringere Lebensdauer auf.

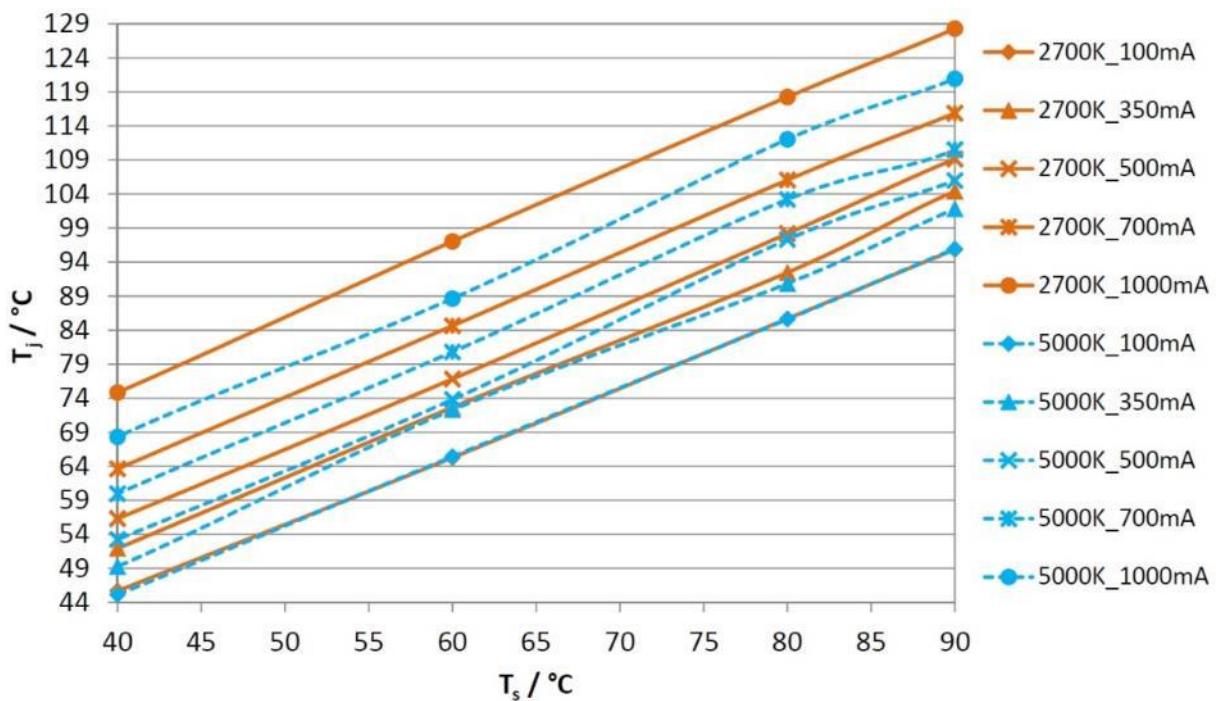


Abbildung 3.5: Vergleich der pn-Temperaturen T_j bei unterschiedlicher Boardtemperatur T_s einer ww LED (2700 K) und einer kw LED (5000 K) bei unterschiedlichen Strömen

Eine Vorüberlegung bezüglich der Lichtstärkeverteilung (LVK) kann auf der Basis bisheriger Straßenleuchten erfolgen oder aus der benötigten Lichtverteilung auf der Fahrbahn zurückgerechnet werden. Dabei ist die Frage bedeutend, wie weit man je Masthöhe, Mastabstand und Neigungswinkel des Gehäuses die Gehweg, den Vorgarten und die Hausfassaden beleuchten will, ohne eine übermäßige Lichtimmission zu verursachen. Als Faustregel gilt in der Praxis in Deutschland ein Mastabstand der 5-fache Wert der Masthöhe. Große Mastabstände liegen eher im Bereich um die 40 m. Es existieren aber auch alte Beleuchtungsbestände mit größeren Abständen. Hier ist zu empfehlen, den Mastabstand durch das Setzen neuer Masten in den Zwischenräumen zu reduzieren.

Vorüberlegungen zum Aufbau:

Diese Phase beginnt mit der Frage, ob eine vollständig neue LED-Leuchte mit ansprechendem Design, Ersatzleuchten in bekanntem Design für bestehende Straßenbeleuchtungsanlagen oder einzelne LED-Ersatzmodule zum Nachrüsten entwickelt werden sollen. Ist diese Wahl getroffen, so kann anhand des durch das Design verfügbaren Platzes die Anordnung der Komponenten in der Leuchte erfolgen. Da in der Praxis die Infrastruktur der Verkabelung von Ort zu Ort sehr unterschiedlich ausfallen kann, sind diese Aspekte für die verwendete Elektronik zu berücksichtigen, um eine vielseitige Einsetzbarkeit der Leuchte zu gewährleisten. Durch den elektrischen Aufbau der Leuchte ist auch

ihre Schutzklasse definiert. Beim Mastanschluss wird zwischen Mastaufsatz- und Mastansatzleuchten unterschieden. Für eine universelle Verwendbarkeit kann ein Kombianschluss vorgesehen werden, der beide Montagearten erlaubt.

In Deutschland erreicht die Bestrahlungsstärke im Hochsommer durch die direkte Sonnenstrahlung und diffuse Strahlungsanteile an vielen Orten bis zu 900 W/m^2 . Bei einer angenommenen Fläche des Leuchtengehäuses von $0,5 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} = 0,15 \text{ m}^2$, kommt auf dem Leuchtengehäuse eine Strahlungsleistung von 135 W an. Ein hellweißes Gehäuse mit einem Reflexionsgrad von 0,7 reflektiert viel sichtbare Strahlung. Ein dunkelgraues Gehäuse mit einem Reflexionsgrad von 0,15 - 0,2 absorbiert stattdessen einen Großteil der Strahlung. Dies führt dann zu einer erhöhten Temperatur des Gehäuses.

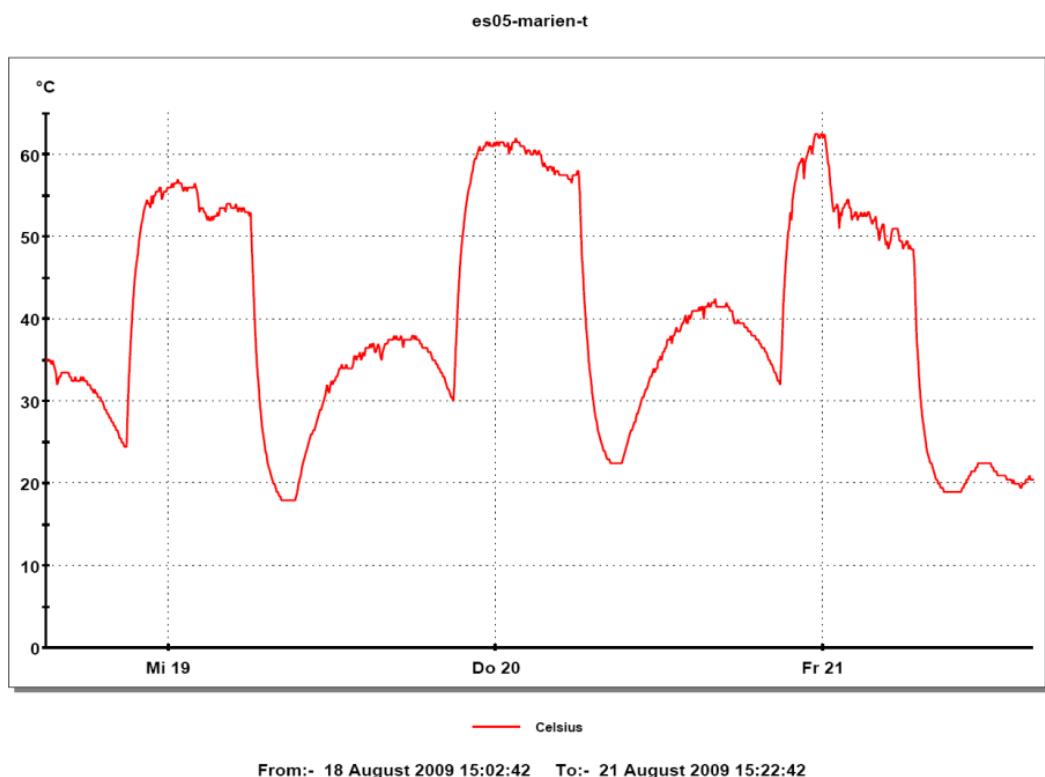


Abbildung 3.6: Verlauf der Gehäusetemperatur einer LED-Straßenleuchte im Sommer
(Quelle: Dr. Petri/Offenbach)

Abbildung 3.6 zeigt einen typischen Temperaturverlauf gemessen am Gehäuse einer LED-Straßenleuchte über einige Sommertage. Für den betrachteten Donnerstag ist die Lufttemperatur gegen 20 Uhr noch sehr hoch. Die Gehäusetemperatur beträgt etwa 30 °C. Durch das Einschalten der Straßenbeleuchtung steigt die Temperatur gegen 22 Uhr schnell auf ca. 62 °C an. Diese hohe Temperatur bleibt bis 4 Uhr am frühen Morgen. Demnach kann man davon ausgehen, dass für die LEDs an vielen Tagen im Sommer eine Umgebungstemperatur von 62 °C über einen Zeitraum von 6 Stunden erreicht werden kann. Berücksichtigt man die klimatechnischen Veränderungen in den kommenden Jahrzehnten, muss der Leuchtenentwickler diese Aspekte berücksichtigen. Hier bieten sich drei mögliche Maßnahmen an:

- Die Farbe des Gehäuses sollte hell sein, um die Sonnenstrahlung möglichst stark zu reflektieren. Die thermische Leitfähigkeit der Gehäusematerialien gerade bei technischen Leuchten sollte hoch sein.
- Die Leuchte sollte so konstruiert werden, dass auch der Mast als Kühlkörper verwendet werden kann. Der Mastanschluss sollte eine sehr gute thermische Leitfähigkeit ermöglichen.
- Es sollte einen Temperatursensor auf der LED-Leiterplatte vorhanden sein, der die Temperatur der LEDs erfasst. Bei hohen Betriebstemperaturen, etwa zwischen 20 Uhr und 24 Uhr im Hochsommer, kann der Betriebsstrom reduziert werden, um die thermische Belastung der LEDs zu verringern.

LED-Charakterisierung und Auswahl

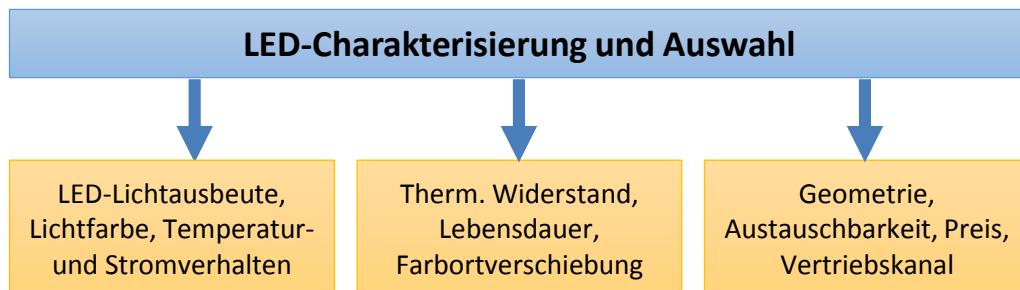


Abbildung 3.7: Aspekte der LED-Auswahl

Für LED-Auswahlprozesse gibt es folgende Kriterien (s. Abbildung 3.7):

- photometrische Eigenschaften in Abhängigkeit von Strom und Temperatur:
Für die Straßenbeleuchtung ist ein Farbwiedergabebereich um $R_a = 65 - 78$ für weiße LEDs ausreichend. Da eine hohe Lichtausbeute zugleich eine geringere thermische Leistung und pn-Übergangstemperatur zur Folge hat, sollten möglichst neutralweiße LEDs eingesetzt werden. Zu empfehlen ist eine ähnliche Farbtemperatur im Bereich 4200 K - 4500 K. in diesem Bereich ist in Mitteleuropa auch eine breite Akzeptanz der Bevölkerung bezüglich der Farbtemperatur zu erwarten. Die Daten über Lichtausbeute und Lichtfarbe sollte man von den LED-Herstellern verbindlich bei einer LED-Messtemperatur um $T_S = 85^\circ\text{C}$ (hot-binning-Bedingung) und bei 350 mA oder 500 mA erfragen.
- thermische Eigenschaften:
Von allen verfügbaren LED-Typen sollten die LEDs mit dem geringsten thermischen Widerstand eingesetzt werden. Bei einer bestimmten Boardtemperatur T_S und der thermischen Leistung P_{th} bestimmt der thermische Widerstand, wie hoch die Halbleiter-Temperatur ist. Je höher ist diese Temperatur, umso niedriger sind der Lichtstrom und die LED-Lebensdauer.

- LED-Geometrie- und Austauschbarkeit:
Die Werkzeugkosten für LED-Optiken sind relativ teuer. Da zudem eine Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit und Preisgestaltung einzelner LED-Typen angestrebt wird, sollten als Ersatz LEDs mit ähnlichen Abmessungen und Emissionseigenschaften gewählt werden. Unter diesen Bedingungen können die Optiken ohne neue Auslegung weiter verwendet werden.

Dimensionierung des thermischen Managements und der Elektronik

Die thermische Dimensionierung einer LED-Leuchte sorgt für das Abführen der LED-Verlustleistung (Wärme). Bei einer maximalen Umgebungstemperatur muss die Halbleiter-Temperatur durch entsprechende Auslegung von Leiterplatten, Kühlkörpern und Gehäuse noch ausreichend weit von der maximal zulässigen Temperatur der LED entfernt sein. Die Auslegung der Elektronik beinhaltet die Stromversorgung, die Sensorik und die Steuerung der LEDs. Das Schema der thermischen und elektrischen Dimensionierung wird in Abbildung 3.8 dargestellt.

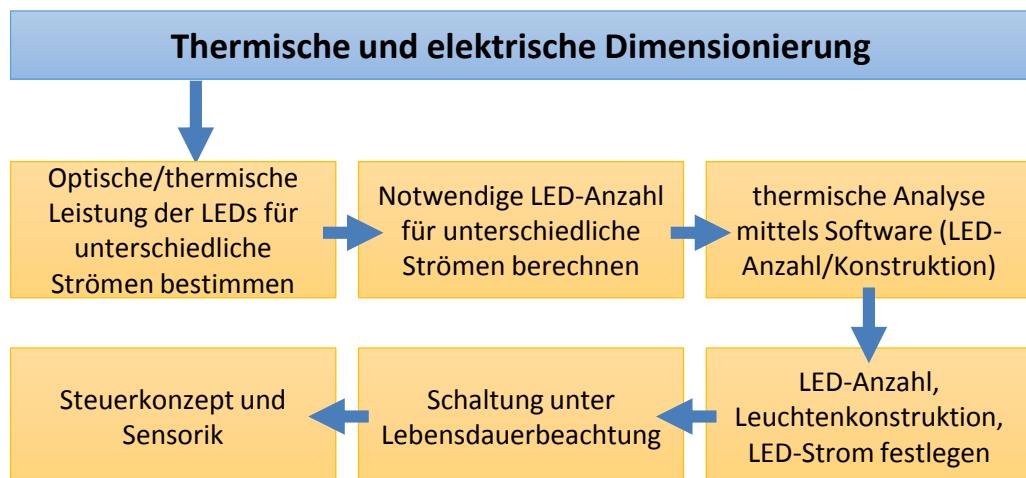


Abbildung 3.8: Prozesse der thermischen und elektrischen Auslegung

Bei einer angenommenen Temperatur des Leuchtengehäuses von 62 °C (s. Abbildung 3.6) und

- einer LED mit einem heute typischen thermischen Widerstand von 12 K/W zwischen LED und der unteren Seite einer sehr guten Metallkernleiterplatte,
- einem thermischen Widerstand des Kühlkörpers von 12 K/W sowie
- einem thermischen Widerstand der Anbindungen zwischen Kühlkörper und Leuchtengehäuse (glatte Kontaktflächen) und zwischen Leiterplatte und Kühlkörper (glatte Kontaktflächen mit dünner gleichmäßig aufgetragener Wärmeleitpaste-Schicht) von 11 K/W

ergibt sich insgesamt ein thermischer Widerstand von 35 K/W. Weiter angenommen wird für eine LED mit der Chipfläche von 1 mm², dass sie bei einer Temperatur von etwa 80 - 85 °C eine Lichtausbeute um 125 lm/W besitzt. Zudem folgt bei einem Strom von 350 mA eine optische Leistung von ca. 0,38 W sowie eine thermische Leistung von 0,62 W. Dann errechnet sich die Temperatur der inneren Halbleiterstruktur der LED zu:

$$T_J = 62^\circ\text{C} + 0,62 \text{ W} \cdot 35 \frac{\text{K}}{\text{W}} = 83,7^\circ\text{C} \quad 3.1$$

mit:

T_J – Sperrsichttemperatur

Häufig werden LEDs aus Preisgründen jedoch nicht bei 350 mA, sondern bei 700 mA und einer thermischen Leistung um ca. 1,6 W betrieben. Unter diesen Bedingungen ergibt sich die Temperatur der LED-Innenstruktur zu:

$$T_J = 62^\circ\text{C} + 1,6 \text{ W} \cdot 35 \frac{\text{K}}{\text{W}} = 118^\circ\text{C} \quad 3.2$$

mit:

T_J – Sperrsichttemperatur

Diese Temperatur von 118 °C liegt somit sehr nah der maximal zulässigen Temperatur von 125 °C einer typischen LED. Daher sollten folgende Maßnahmen in Betracht gezogen werden:

- automatische Stromdimmung bei hohen Temperaturen, um die LEDs nicht zu schädigen,
- Reduzierung des gesamten thermischen Widerstands durch eine geeignete Auswahl der Leiterplattenmaterialien,
- ein technologisch sauberer Lötprozess zwischen LEDs und Leiterplatte,
- ein besserer Kühlkörper,
- thermisch leitfähigere Gehäuse und Gehäuseprofile und
- Vermeidung hoher Ströme zwischen 700 mA bis 1000 mA.

Aus Abbildung 3.5 wird deutlich, dass die LED mit 5000 K Farbtemperatur bei 60 °C Boardtemperatur und bei einem Strom von 500 mA eine Halbleiter temperatur von 74 °C erreicht. Bei 700 mA sind dies ca. 81 °C. Das führt zu einer Temperaturdifferenz von 7 Kelvin und bedeutet theoretisch eine Lebensdauer verkürzung von 7000 Stunden. Die Praxis, einen hohen Strom zu verwenden, um die Anzahl der LEDs und die Komponenten der elektronischen Baugruppe zu reduzieren, geht auf Kosten der Lebensdauer der gesamten LED-Leuchte. Eine Stromstärke um 500 - 550 mA ist ein guter Kompromiss.

3.2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Neben der Betrachtung der LED als einzelnes Bauelement ist das Systemverhalten einer vollständigen Leuchte in Bezug auf ihr EMV-Verhalten für den Anwender besonders interessant. Unter EMV versteht man die Fähigkeit elektrischer Komponenten eines Apparates, einer Anlage oder eines Systems, in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für alle in dieser Umwelt vorhandenen Apparate, Anlagen oder Systeme unannehmbar wären ([41], [42]). EMV-Störungen können über den Raum als Strahlungskopplung oder über Kabel induktiv, galvanisch oder kapazitiv übertragen werden.

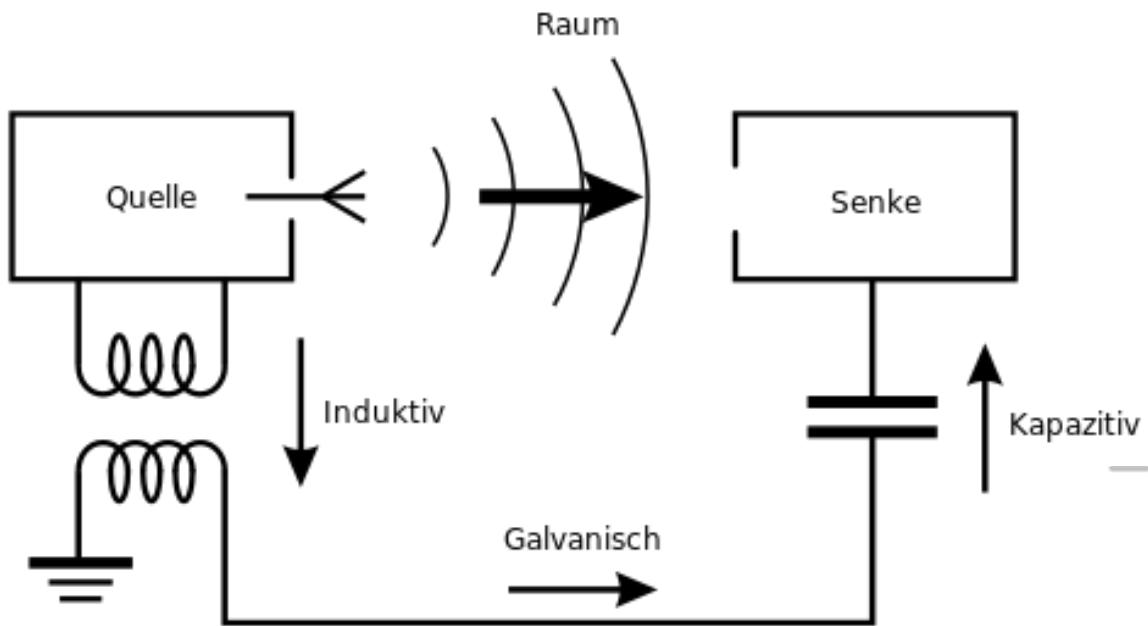


Abbildung 3.9: Kopplungsarten der EMV

Im vorliegenden Fall wird eine handelsübliche Schreibtischleuchte für die Untersuchung verwendet. In Verbindung mit einem Spectrumanalyser der Fa. Wandel und Goltermann wird das Nahfeld der Tischleuchte untersucht. Die Messungen werden mit drei verschiedenen HF-Sondentypen durchgeführt: 3,6 cm Ball, 3 cm Ring und 5 cm Ring. Der Lampenkopf mit der Elektronik und die jeweilige Sonde werden dazu in einer speziell gefertigten Halterung in definierter Lage zueinander montiert (vgl. Abbildung 3.11).



Abbildung 3.10: Testobjekt für die EMV-Untersuchungen [43]

Die Vorrichtung erlaubt es, die Sonde horizontal und vertikal zum Prüfling an beliebiger Stelle zu positionieren. Die Prüfungen werden in den Betriebszuständen „Leuchte aus“, „50 %“ und „100 %“ Ansteuerung durchgeführt. Zum Vergleich werden am Steckernetzteil ebenfalls Messungen in den Betriebsmodi „Leuchte aus“ und „Leuchte 100 %“ aufgenommen.

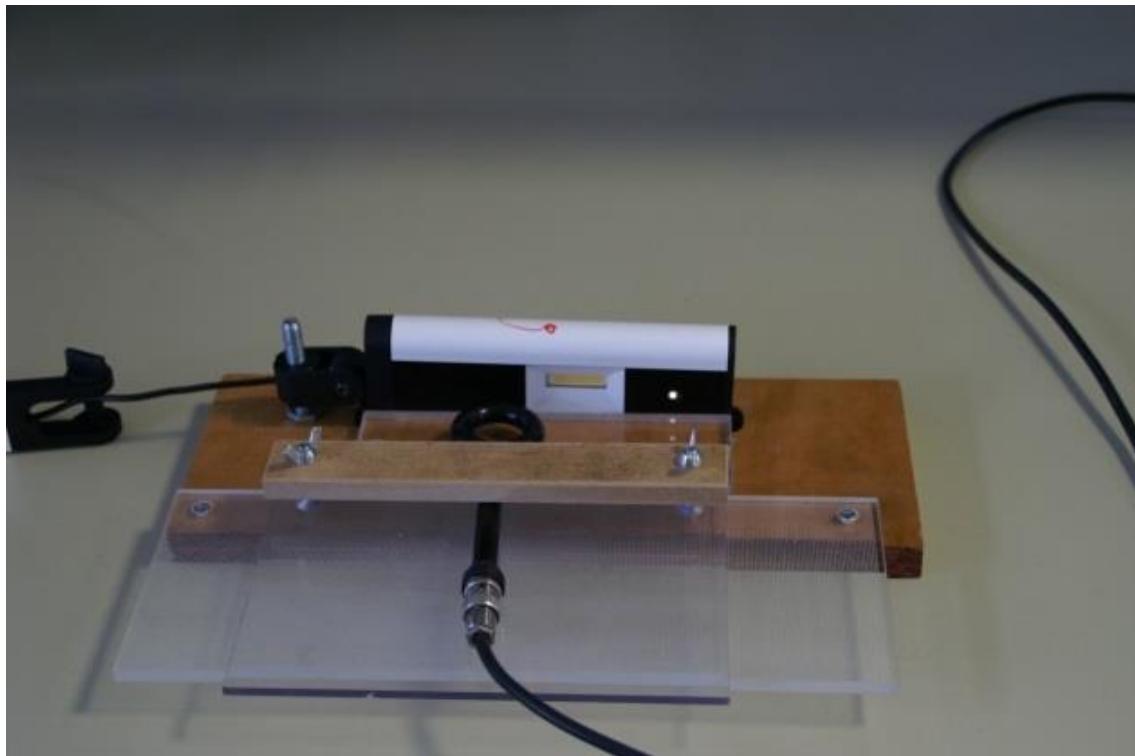


Abbildung 3.11: Fixierung des Leuchtenkopfs zur EMV-Messung

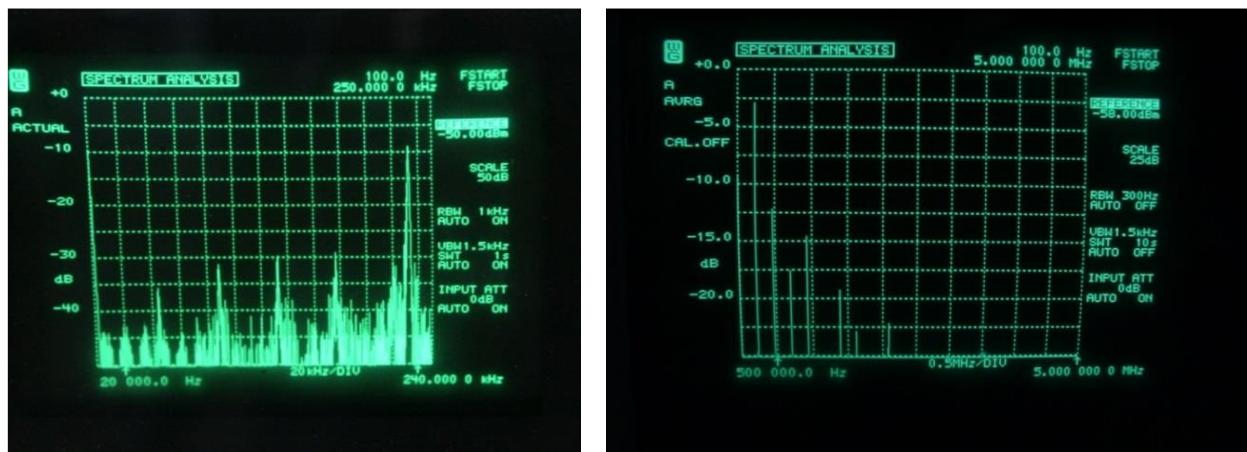


Abbildung 3.12: Störungen im Bereich 100 Hz - 5 MHz

Links: 100 Hz - 250 kHz / 0 - 50 dBm, Leuchte 100 %

Rechts: 100 Hz - 5 MHz / 0 - 30 dBm, Leuchte 100 %

Der maximale Störpuls wird bei 232 kHz gemessen (vgl. Abbildung 3.12, links). Eine separate Messung des Schaltnetzteils zeigt dieselbe Störung, die leitungsgebunden an den Leuchtenkopf übertragen wird. Die maximale Störamplitude verändert sich belastungsabhängig. Mit diesem Versuchsaufbau sind keine weiteren Störungen erkennbar. Das deutet darauf hin, dass die LED als Bauelement keine weiteren EMV-Störungen verursacht.

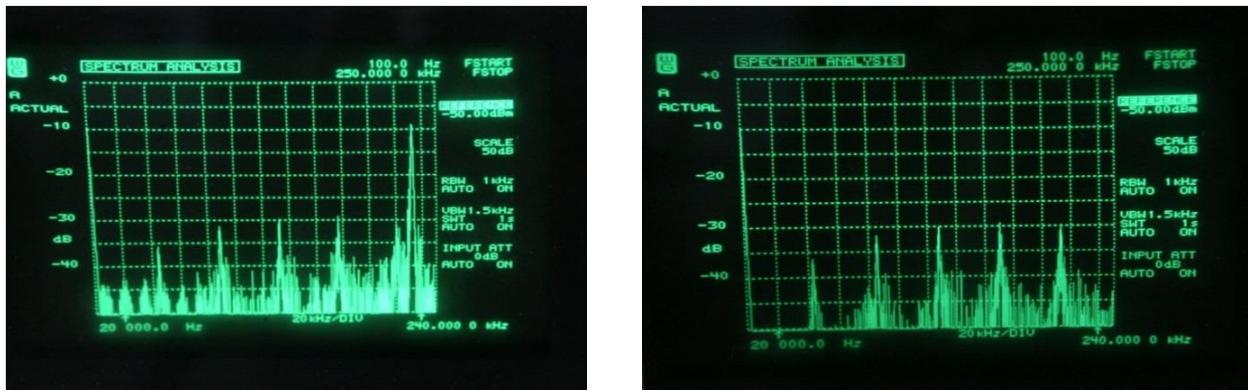


Abbildung 3.13: Störung bei unterschiedlichen Belastungen

Links: 100 Hz - 250 kHz / 0 - 50 dBm, Leuchte 100 %

Rechts: 100 Hz - 250 kHz / 0 - 50 dBm, Leuchte 0 %

3.3 Leuchtenalterung an der TU Darmstadt

3.3.1 Übersicht

Die deutsche Leuchtenindustrie besteht aus sehr vielen kleinen und mittelständigen Betrieben, die in enger Zusammenarbeit mit den großen Lampenherstellern über Jahrzehnte die lichttechnische Entwicklung in Europa dominiert haben. Diese Entwicklung wird durch die Einführung der LED-Technik und die immer stärker werdende Globalisierung der Lichtbranche gefährdet. Die Kompetenzverschiebung von Metallbearbeitung und Elektrotechnik in Richtung Elektronik und Halbleiter-technik stellen die meisten mittelständigen Betriebe vor Schwierigkeiten, die ein neues Denken und Handeln erfordert.

Einige der Probleme, mit der die Leuchtenfirmen zu kämpfen haben, sind die Qualitätssicherung und die Umsetzung der neusten technischen Entwicklungen und Trends in die Produktion, ohne dabei die Kosten außer Acht zu lassen. Ein Teilziel des PQL-Projektes ist es, eine Übersicht über die technische Entwicklung der teilnehmenden Firmen im PA zu erstellen, die Qualität der Produkte zu bewerten und Wege zu zeigen, wie Schwächen auszugleichen sind. Hierfür wurde vereinbart, dass die Firmen jeweils 3 Muster von maximal 3 LED-Leuchtentypen zur Verfügung stellen, damit diese analysiert und gealertert werden können. Die Leuchten sind Serienprodukte und verkörpern den letzten technischen Stand.

3.3.2 Alterungsaufbau

Der Aufbau an der TU Darmstadt sieht vor, die Alterung so zu gestalten, dass die Bedingungen so nah wie möglich an der realen Nutzung der Leuchten orientieren. Zur Verfügung standen 25 Leuchtentypen, insgesamt also 75 Leuchten. Dabei waren etwa die Hälfte Innenraumleuchten, inklusive Leuchten für Spezialanwendungen. Den Rest bildeten Außenleuchten. Alle Exemplare der Innenraumleuchten wurden in einem „Alterungsraum“ installiert und betrieben, die Außenleuchten wurden aufgeteilt. 2 Muster pro Typ wurden im gleichen Raum wie die Innenraumleuchten gealtert, das dritte Muster wurde auf Leuchtenmasten in den umliegenden Straßen montiert. Dies hat zur Folge, dass die Brennzeit der Leuchten auf der Straße und im Alterungsraum unterschiedlich ist. Die Straßenleuchten werden mit den gleichen Schaltzyklen bzw. Brennzeit wie die übliche Straßenbeleuchtung betrieben (ca. 4000 Stunden im Jahr).

Abbildung 3.14 zeigt den Raum, in dem die Innenraumleuchten gealtert wurden. Durch die relativ hohe Wärmeentwicklung schwankte die Umgebungstemperatur zwischen 20 °C und 28 °C in Abhängigkeit der Jahreszeit. Dies hatte für die Alterung keine negative Auswirkungen, sondern kam sogar besser an die realen Bedingungen, bei denen die Leuchten arbeiten.



Abbildung 3.14: Ansicht des Alterungsraums an der TU Darmstadt

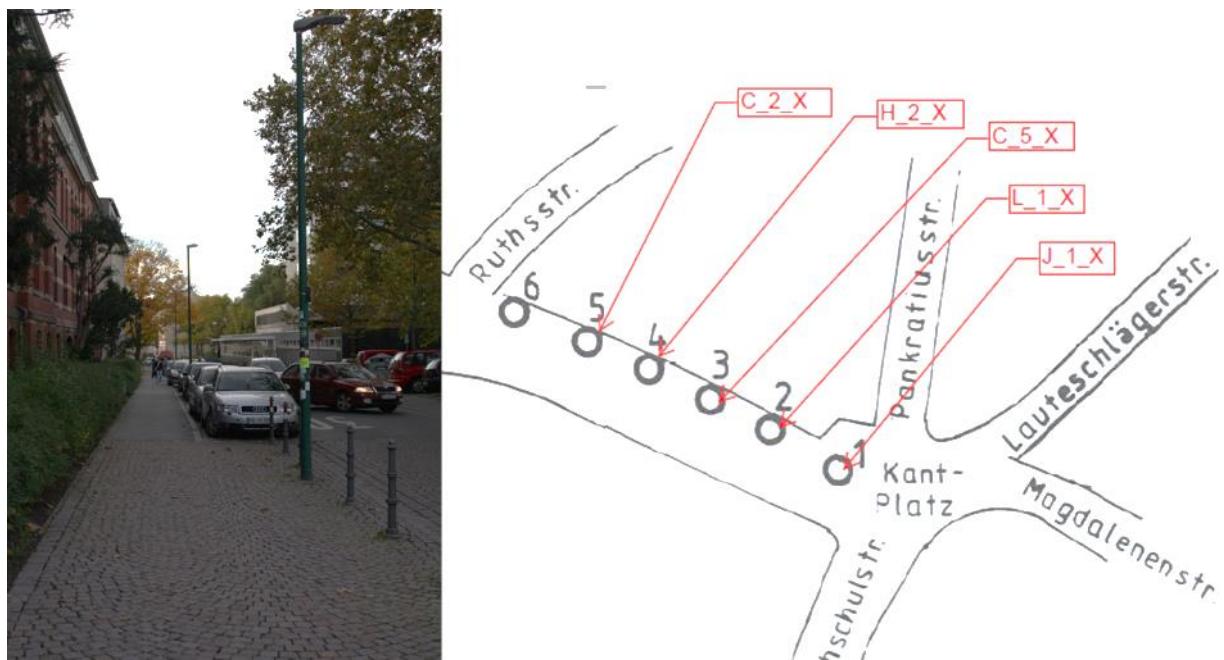


Abbildung 3.15: Leuchten auf dem Mast (li.) und deren Position im Stadtplan (re.)

Abbildung 3.15 zeigt die fertig installierten Leuchten auf den Masten der städtischen Straßenbeleuchtungsbetreiber und deren Position im Stadtplan. Wie oben erläutert, wurden die Leuchten mit dem gleichen Zyklus betrieben, wie alle anderen Leuchten in der Stadt Darmstadt. Sowohl im Alterungsraum, als auch draußen wurde die Temperatur der unmittelbaren Umgebung der Leuchten kontinuierlich überwacht. Hierfür wurde in einer der Straßenleuchten ein 3-Kanal Temperatur-Datenlogger installiert (siehe Abbildung 3.16).

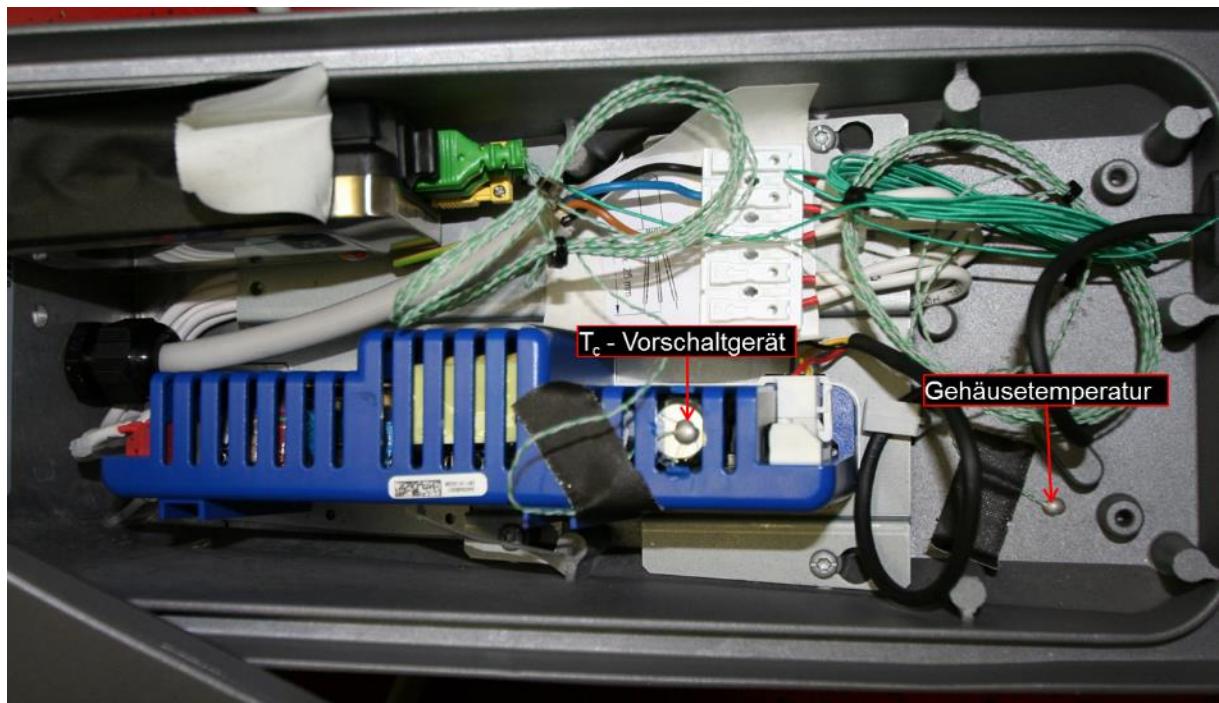


Abbildung 3.16: 3-Kanal Temperatur-Datenlogger montiert in einer der Leuchten

Der Datenlogger erlaubt die Überwachung von drei Temperaturen. Ausgewählt wurde die Messung der Temperatur auf der Led-Platine, am T_c-Punkt auf dem EVG und am Gehäuse. Die letztere Temperaturmessung lieferte interessante Werte in Bezug auf den Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung und ihre Wirkung für den Betrieb der Leuchte. Abbildung 3.17 zeigt die Verläufe der 3 Temperaturen für den Zeitraum August 2013 bis März 2014. Die höchste Temperatur überhaupt wurde am Gehäuse gemessen, nicht auf LED-Board oder dem EVG.

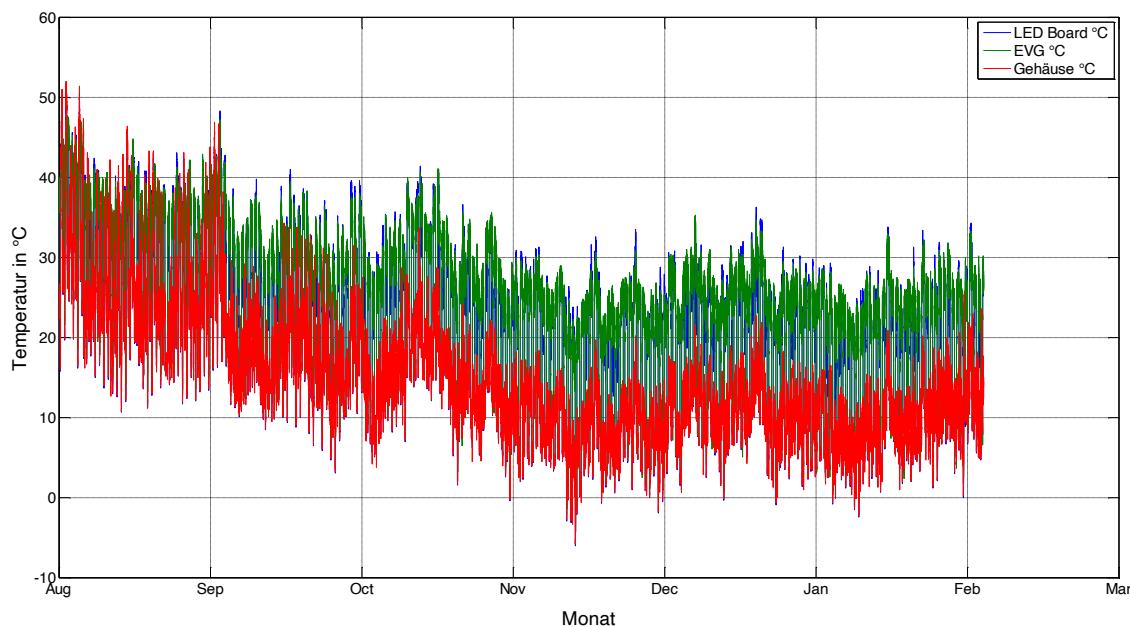


Abbildung 3.17: Temperaturverlauf 8/2013 bis 3/2014 innerhalb der Musterleuchte

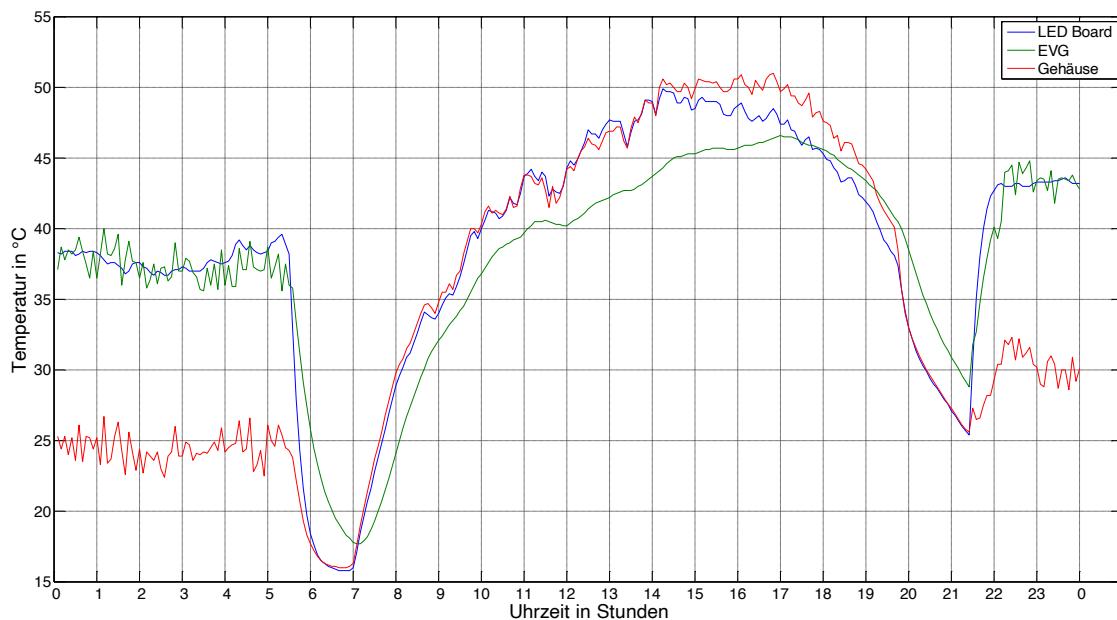


Abbildung 3.18: Verlauf der drei beobachteten Temperaturen für einen Sommertag

Warum das so ist, kann mit Hilfe von Abbildung 3.18 erklärt werden. Man erkennt die verschiedenen Tagesphasen. Von Mitternacht bis kurz vor 6 Uhr (Nacht) ist die Leuchte eingeschaltet, dann folgt das Abschalten der Leuchte bei relativ niedriger Außentemperatur (von 6 bis 8 Uhr). Es folgt eine Phase mit Sonneneinstrahlung während des Tages (von 9 bis 21 Uhr), während der die höchsten Temperaturen erreicht werden, anschließend wieder die Arbeitsphase der Leuchte (Nacht).

3.3.3 Messergebnisse

Bevor die Leuchtenalterung begonnen wurde, wurden alle Leuchten lichttechnisch und elektrisch vermessen. Die lichttechnischen Messungen beinhalteten die Ermittlung des Leuchtenlichtstroms durch Integration der Lichtstärken per Raumwinkel (Fernfeldgoniophotometrie), die Lichtstärkeverteilung (LVK) selbst und die Erfassung der Farbeigenschaften (CCT, R_a , Farbort). Die elektrischen Messungen lieferten die folgenden Parameter: Betriebsstrom und -spannung in Ampere und Volt, Wirkleistung P in Watt, Blindleistung Q in var, Scheinleistung in VA sowie Leistungsfaktor λ . Die Leuchtenlichtausbeute η in lm/W liefert das Verhältnis zwischen dem Leuchtenlichtstrom und der Wirkleistung und wurde berechnet.

Die goniophotometrische Initialmessung fand während der Vergleichsmessungen mit dem VDE statt. Dabei wurden die Erkenntnisse, die der Round-Robin-Test (Vergleich) erbracht hatte, erfolgreich angewendet. Nachdem die 0-Stunden-Messung abgeschlossen war, wurde die Alterung der Leuchte begonnen. Die Straßenleuchten die unter realen Bedingungen in der Straße gealtert werden sollten, wurden mit Verzögerung auf den Masten installiert, da hierfür die Unterstützung der örtlichen Energieversorger notwendig war. Damit die Leuchten trotzdem eine möglichst hohe Brennstundenanzahl erreichen, wurden weitere Leuchten desselben Typs unter Laborbedingungen gealtert.

Aus Zeit- und Kostengründen wurde beschlossen, die goniophotometrische Messung nur bei Stunde null und am Ende der Alterung durchzuführen. Damit aber Änderungen in den Parametern rechtzeitig erkannt werden können, wurden auf den Leuchten Referenzpunkte definiert, an denen ca. alle 1000 Stunden die Beleuchtungsstärke und die Farbtemperatur vermessen wurden. Abbildung 3.19 zeigt die Änderung des Leuchtenlichtstroms von verschiedenen Leuchten nach 6000 Brennstunden. Der Lichtstromrückgang ist sehr klein, was als sehr positiv zu bewerten ist.

Abbildung 3.20 stellt den Lichtstromrückgang von zwei baugleichen Leuchtentypen (C_1_2 und C_1_3) gegenüber. Die Lichtstromdegradation bei Leuchte C_1_2 ist höher, als bei C_1_3. Dies ist ein Zeichen dafür, dass während der Fertigung der Leuchten möglicherweise Probleme bestehen, die derartige Toleranzen erzeugen.

Die Stabilität des Lichtstroms der getesteten Leuchten ist auf Basis der durchgeführten Messungen insgesamt hervorragend. Über 90 % der Leuchten haben nach 6000 Stunden eine Lichtstromdegradation < 5 %. Die Leuchten, die einen stärkeren Rückgang zeigen, entsprachen durch zeitliche Lieferverzögerungen der Hersteller in den meisten Fällen noch nicht dem aktuellsten Serienstand. Diese Leuchten kamen teilweise erst während der Alterungsphase auf den Markt. Weiterhin positiv zu bewerten ist, dass während des gesamten Tests keine Ausfälle von Betriebsgeräten zu verzeichnen waren.

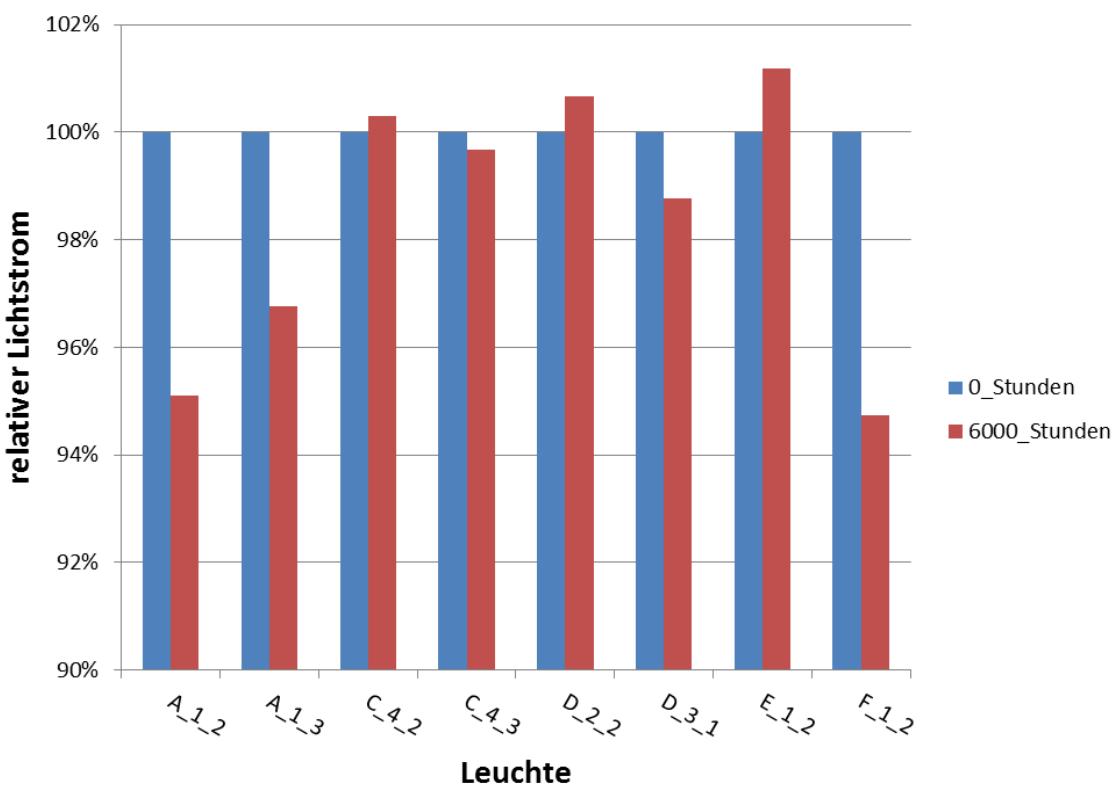


Abbildung 3.19: Verlauf des rel. Lichtstroms nach 6000 h für ausgewählte Leuchten

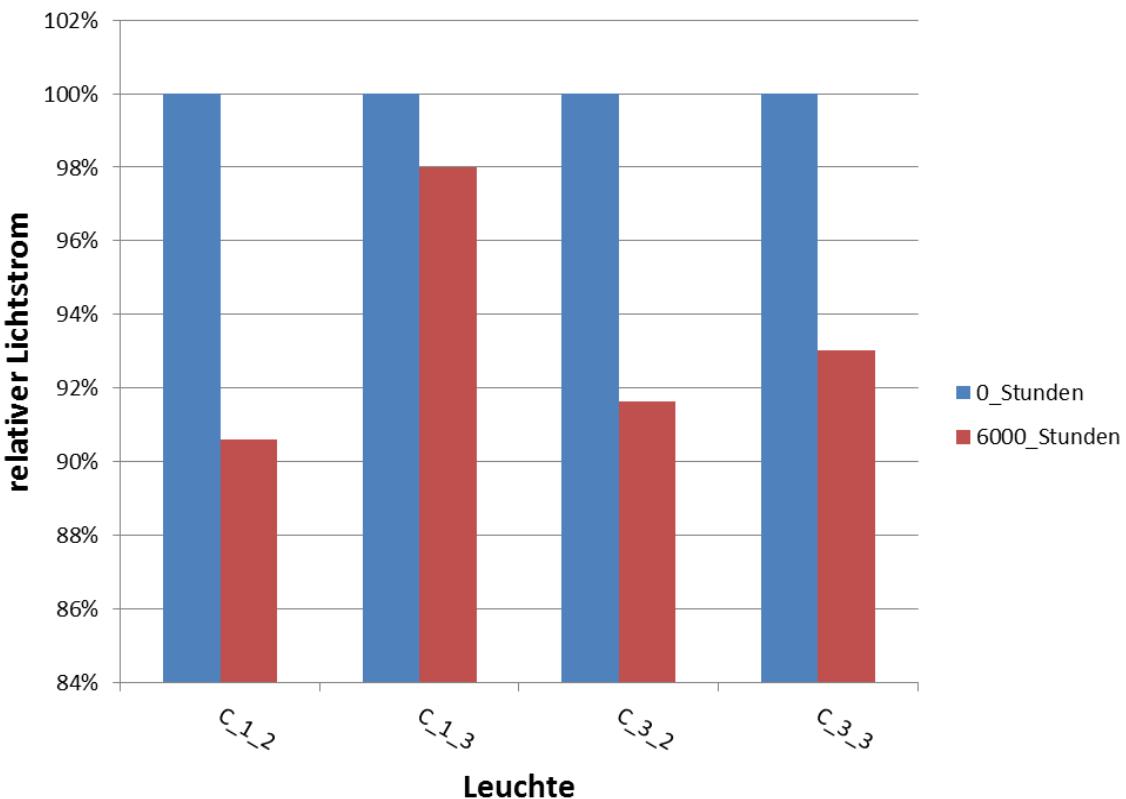


Abbildung 3.20: Lichtstromrückgang bei Leuchten des gleichen Typs

Neben der Lichtstromdegradation wurde auch die Farbortstabilität der einzelnen Leuchten bestimmt. Diese Größe ist von besonderer Bedeutung in der Innenraumbeleuchtung. Bei Beleuchtungsanlagen in Gebäuden des Premiumsegments wird sehr oft die bemerkbare Änderung in der Lichtfarbe als drastischer Baumangel betrachtet. Bei solchen Fällen bieten die meisten Firmen einen kostenlosen Austausch der Leuchten an, um ihren guten Ruf nicht zu schädigen. Das ist aber eine sehr kostspielige Praxis, die auf Dauer keine Lösung darstellt.

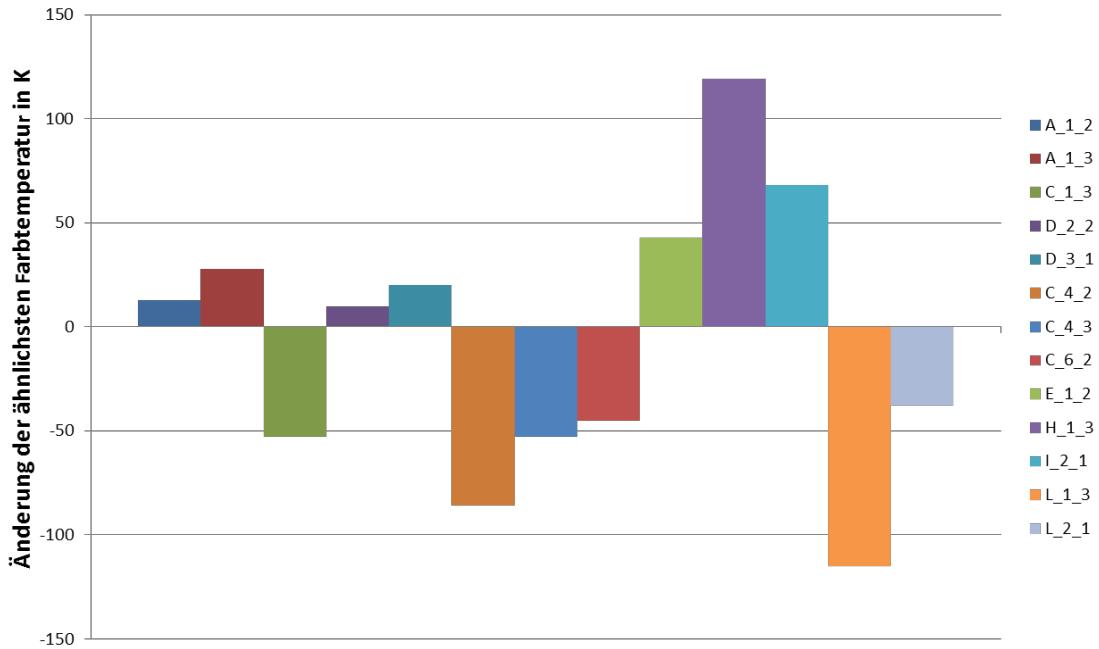


Abbildung 3.21: Änderung der Farbtemperatur der Leuchten nach 6000 Brennstunden

Abbildung 3.21 zeigt die Änderung der ähnlichen Farbtemperatur für ausgewählte Leuchten nach 6000 Brennstunden. Es zeichnet sich ein heterogenes Bild, was die Stabilität der Farbtemperatur betrifft. Die Änderungen bewegen sich in relativ engen Grenzen. Gemäß der Untersuchungen an der TU Ilmenau und der TU Darmstadt können diese Änderungen mit dem Begriff „gerade tolerierbarer Unterschied“ beschrieben werden. Dies bedeutet, dass die Änderung eindeutig gesehen wird, in der Praxis aber zu keinen störenden Wirkungen führt. Diese Tendenz findet man bei ca. 90 % aller getesteten Leuchten. Es gibt aber auch Fälle, bei denen nach der Alterung das Spektrum der Leuchten so stark vom ursprünglichen abweicht, dass eine Fehleranalyse durchgeführt werden musste.

Abbildung 3.22 zeigt einige Leuchten, bei denen die Farbtemperaturänderung sehr stark ausfällt. Bei Werten im Bereich von 1000 K Unterschied zum ursprünglichen Spektrum werden sogar Straßenleuchten als nicht mehr geeignet eingestuft.

Abbildung 3.23 gibt die Spektren der Leuchte F_2_1 im Neuzustand und nach 6000 Brennstunden wieder. Es ist eine deutliche Reduzierung der aus dem LED-Chip erzeugten blauen Strahlung zu verzeichnen. Der Effekt der Farbtemperaturverschiebung geht auch mit einem starken Lichtstromrückgang (ca. - 25 %) einher. All dies war ausschlaggebend dafür, die Leuchte einer Fehleranalyse zu unterziehen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Abschnitt 3.3.4 zu finden.

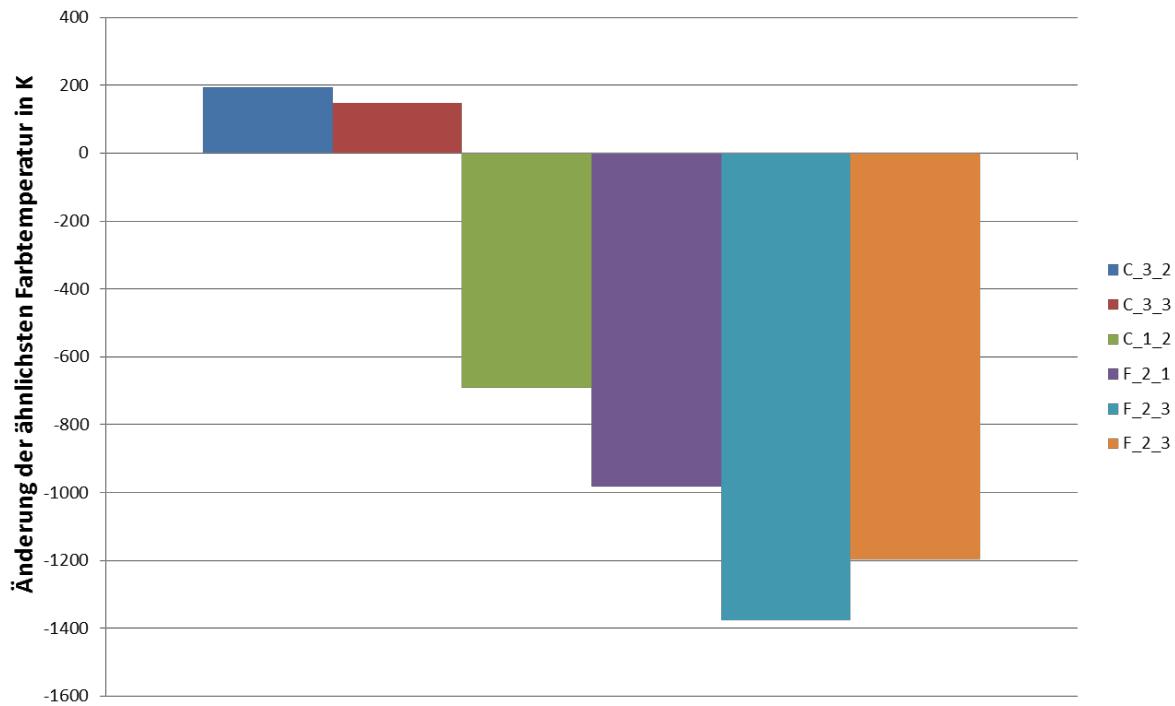


Abbildung 3.22: Beispiele für eine starke Änderung der Farbtemperatur von getesteten Leuchten

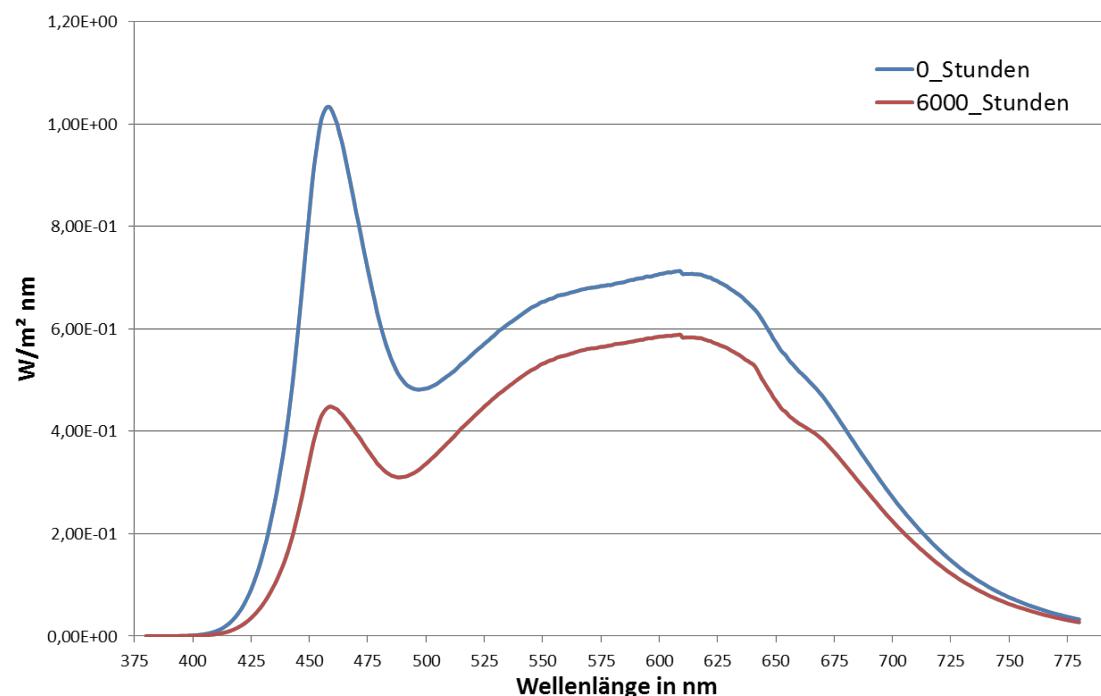


Abbildung 3.23: Grafische Darstellung des Spektrums der Leuchte F_2_1

3.3.4 Untersuchung der thermischen und elektrischen Eigenschaften

Ein wichtiger Punkt bei der Bewertung der untersuchten LED-Leuchten sind die elektrischen und thermischen Eigenschaften. Wie in Kapitel 2 deutlich wurde, sind der Betriebsstrom der LED und die Temperatur entscheidend für die Bestimmung der Lebensdauer. Auf Grundlage der dort erzielten Ergebnisse wurde je ein Muster pro Leuchtentyp analysiert.

Die elektrischen Messungen beinhalteten primärseitig die Erfassung von Strom, Spannung, Leistung (Wirk-, Blind- und Scheinleistung) und Leistungsfaktor. Sekundärseitig wurden der Strom, die Spannung und die Wirkleistung bestimmt. Daraus ließ sich die Effizienz des Vorschaltgeräts berechnen. Es wurde auch der Oberwellenanteil, der Einschaltstrom und andere mit der elektromagnetischen Verträglichkeit verbundenen Größen erfasst. Dadurch kann die Güte der Vorschaltgeräte evaluiert werden.

Auf ausdrücklichen Wunsch der im Projektausschuss vertretenen Leuchtenhersteller wurden Messungen an Ripple und Noise der in den Leuchten verbauten EVGs durchgeführt. Ein kleiner Ripple ist aus zwei Gründen wichtig. Erstens verursacht ein starker Ripple eine unerwünschte Änderung der Lichtintensität. Wenn das auch noch in Kombination mit einer Frequenz unter 300 Hz auftritt, führt das zu einem Flimmern der Leuchte. Dieser Effekt ist sowohl in der Innenraum- als auch in der Außenbeleuchtung unerwünscht.

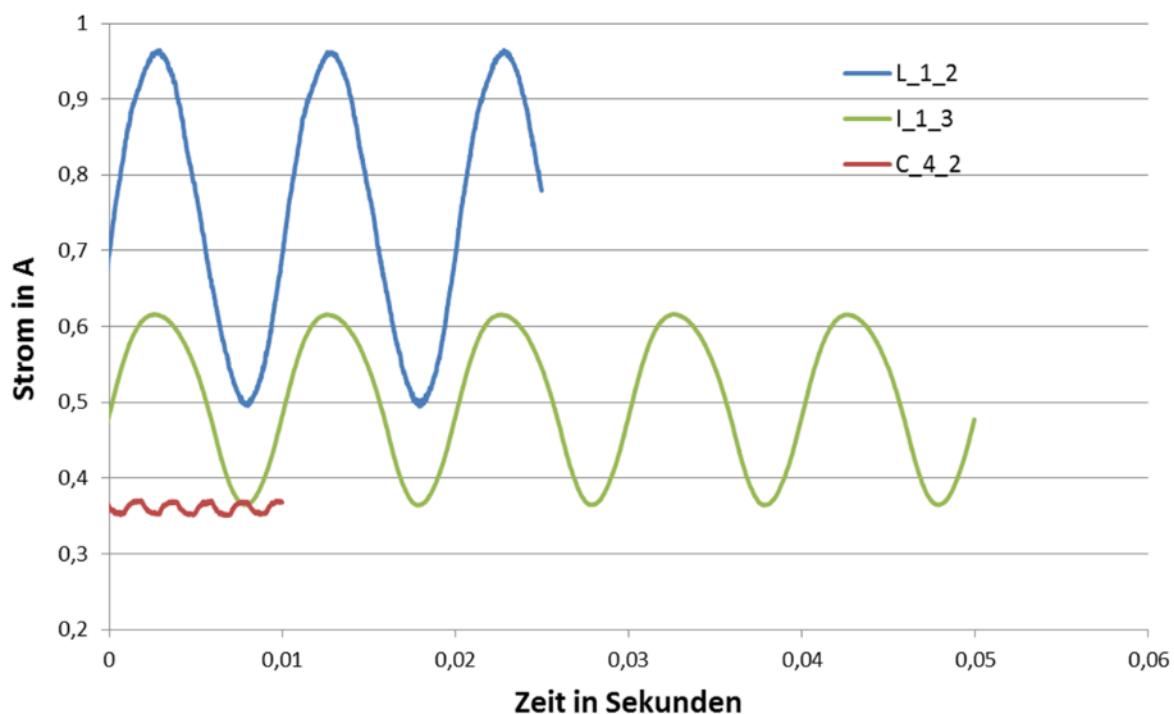


Abbildung 3.24: Darstellung des Strom-Ripples für ausgewählte Leuchten

Abbildung 3.24 zeigt den Strom-Ripple für drei ausgesuchte Leuchten. Es sind deutliche Unterschiede, sowohl in der Höhe, als auch in der Frequenz zu beobachten. Die Leuchte C_4_2 hat einen Ripple von wenigen Milliampere (< 10 mA) und eine Frequenz von 500 Hz. Diese Werte zeichnen ein hochqualitatives Produkt aus. Bei der I_1_3 Leuchte ist das Verhältnis zwischen dem Effektivwert des

Stroms (true RMS) und dem Ripple >20 %. Das ist kein gutes Ergebnis, liegt aber noch im Rahmen des Tolerierbaren. Die Frequenz beträgt hier 100 Hz. Das ist für eine flimmerfreie Beleuchtung nicht ausreichend. Die Leuchte L_1_2 ist ein besonders auffälliger Fall. Der Stromripple beträgt hier über 50 % vom Effektivwert (450 mA peak-to-peak bei 700 mA true RMS). Hinzu kommt eine Übertragung der Netzfrequenz der Primärseite auf den Ausgang (Sekundärseite). Dies spricht für ein EVG ohne ausreichende Signalfilterung, verursacht durch kostengünstige Komponenten und eine unpassende Topologie für den Einsatz in der Beleuchtung. Neben dem starken Flimmern ist auch die Überbelastung der LEDs durch zu hohen Strom eine mögliche Ursache, die zu Frühausfällen von LEDs in der Leuchte führen kann.

Die Messung der thermischen Eigenschaften der Leuchten wurde mittels der Ermittlung der Boardtemperatur und der T_c -Punktes des EVG (die Temperatur der kritischsten Stelle laut Hersteller) realisiert. Es wurden mehrere Sensoren in der Leuchte angebracht und die Temperatur wurde kontinuierlich mit Hilfe eines Datenloggers erfasst. Der Beginn der Werteaufzeichnung begann mit dem Einschalten der Leuchte und dauerte so lange, bis das thermische Gleichgewicht erreicht wurde.

Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26 zeigen die grafische Darstellung der Boardtemperatur und der Temperatur am T_c -Punkt des EVG. Die Temperatur am EVG steht in direkter Relation zu der Boardtemperatur. Dies ist nicht überraschend, da die Komponenten sich den gleichen Kühlkörper teilen. Der Vergleich der Leuchten J_1_2 und L_1_2 ist interessant. Hier handelt sich um Leuchten mit identischem Lichtstrom und elektrischer Leistung. Der Unterschied in den Temperaturen beträgt aber fast 20 Kelvin. Die Folgen für die Lebensdauer der Leuchte kann mit der Arrhenius-Gleichung abgeschätzt werden. Sie beschreibt die Geschwindigkeit, mit der chemische Prozesse in Abhängigkeit von der Temperatur verlaufen. 10 K mehr verdoppeln die Reaktionsgeschwindigkeit. Dies bedeutet für die LEDs, dass 10 K mehr die Lebensdauer halbieren kann.

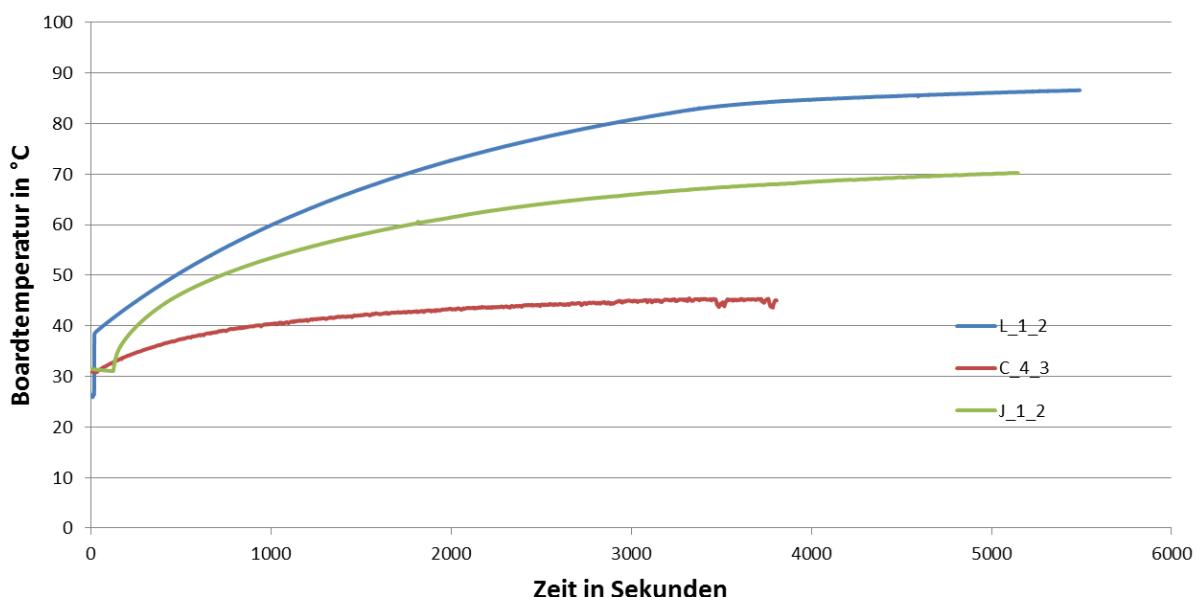


Abbildung 3.25: Grafische Darstellung der Boardtemperaturen für 3 getestete Leuchten

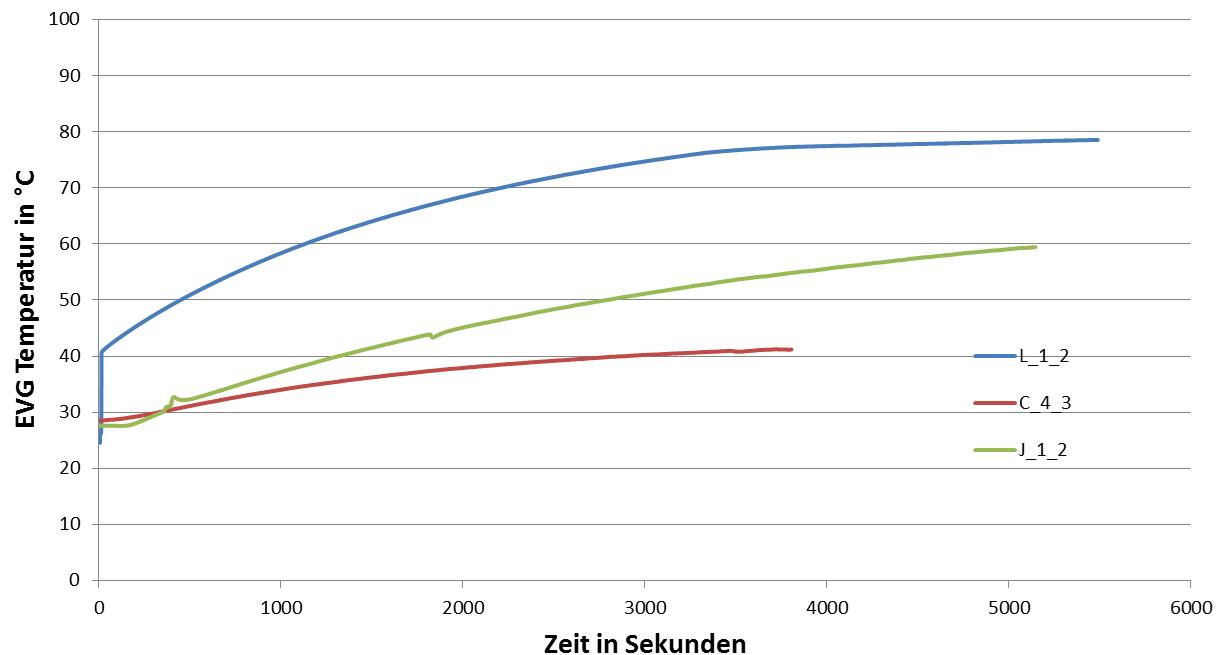


Abbildung 3.26: Temperaturen am T_C -Punkt des EVG für 3 ausgewählte Leuchten

3.3.5 Fehleranalyse

Während der Leuchtenalterung und der Leuchtenanalyse wurden einige Fehler deutlich. Es handelt sich hier sowohl um Änderungen der Materialeigenschaften, als auch um Konstruktionsfehler. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.27 dargestellt. Durch die sehr starke Strahlung in Kombination mit einer hohen Wärmeverbelastung ist hier eine Beschädigung der Leitung des COB-Moduls verursacht worden. Die PVC-Isolation der Leitung ist durch den Verlust der Weichmachers brüchig geworden, was die Gefahr von einem Kurzschluss erhöht.

Abbildung 3.28 zeigt die Vergilbung der Regionen einer LED-Platine, verursacht von der starken Wärmeentwicklung. Dieser Fehler ist bei Leuchten für die Innenraumbeleuchtung kritisch, da dies das Erscheinungsbild der Leuchte im ausgeschalteten Zustand verändert. Die Nutzung von thermisch stabileren Lacken oder das Verwenden von Passepartouts kann das Problem mit relativ geringem Aufwand lösen.

Wie in Abschnitt 3.3.3 erwähnt, hatten einige der Leuchten eine sehr starke Lichtstromdegradation und spektrale Veränderungen gezeigt. Die Ursachen hierfür wurden genauer untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Fehler auf die Entstehung von Rissen in der Leuchtstoffschicht zurückzuführen ist. Abbildung 3.29 zeigt wie die Risse aussehen. An diese Stelle wird auf den Abschnitt 2.1 dieses Berichtes verwiesen. Dort werden die Vorgänge beschrieben, die zu derartigen Fehlern führen.

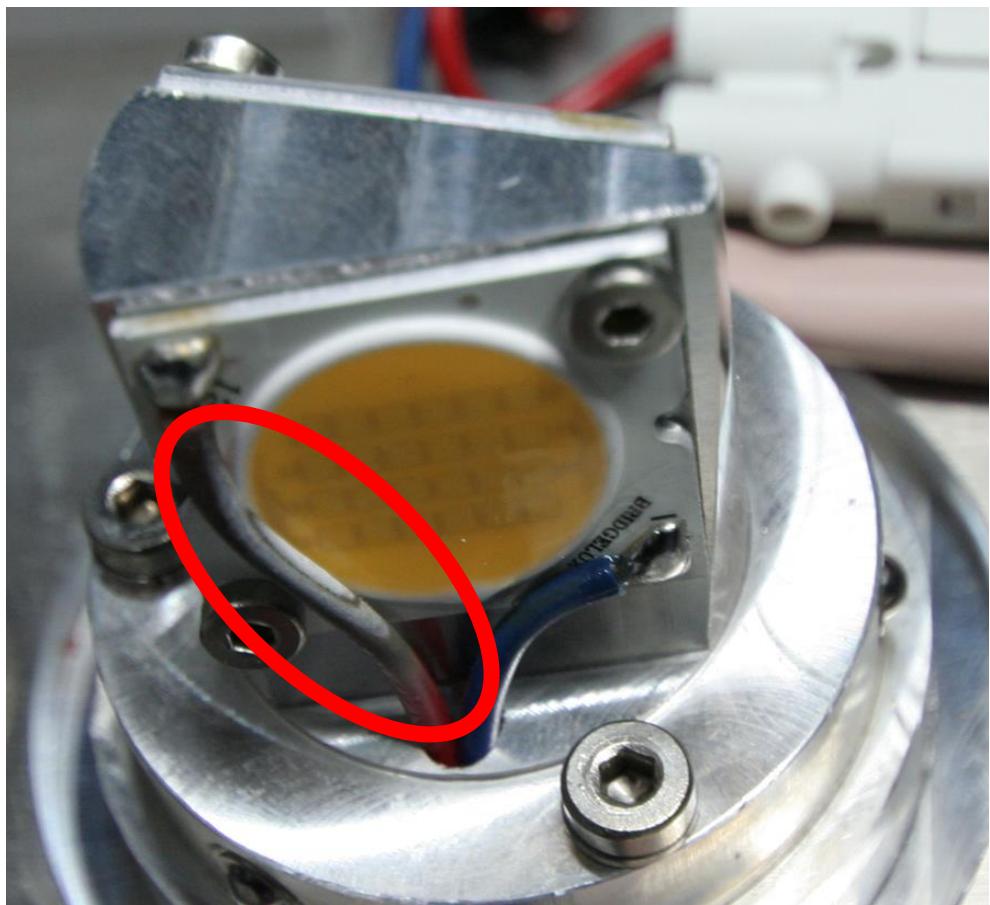


Abbildung 3.27: Beschädigung der stromführende Leitung eines COB-Moduls

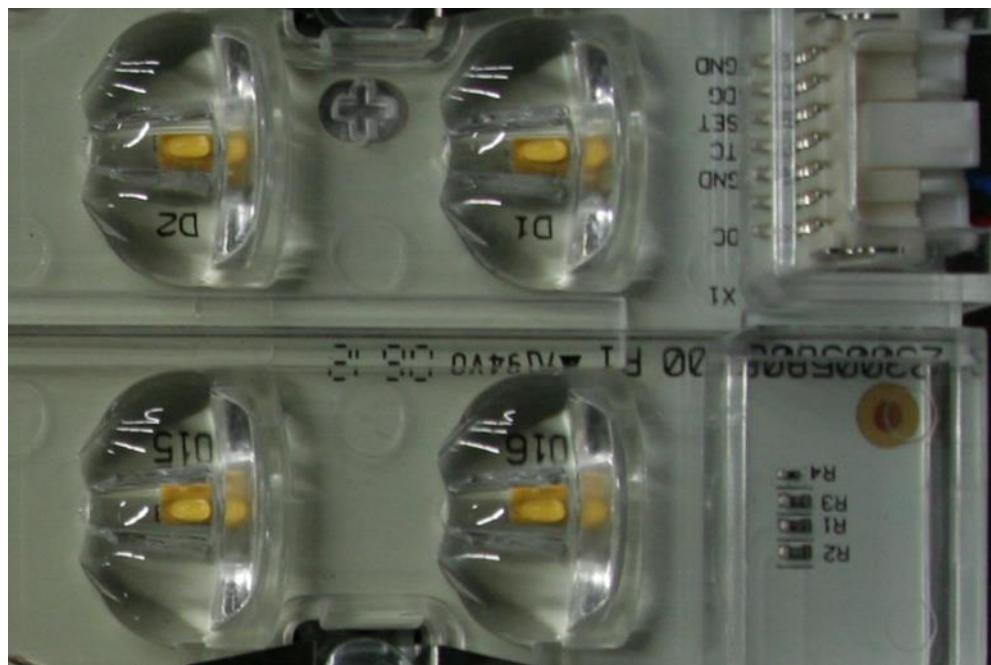


Abbildung 3.28: Vergilbung der Platinen-Oberflächenfarbe durch hohe Wärmeentwicklung

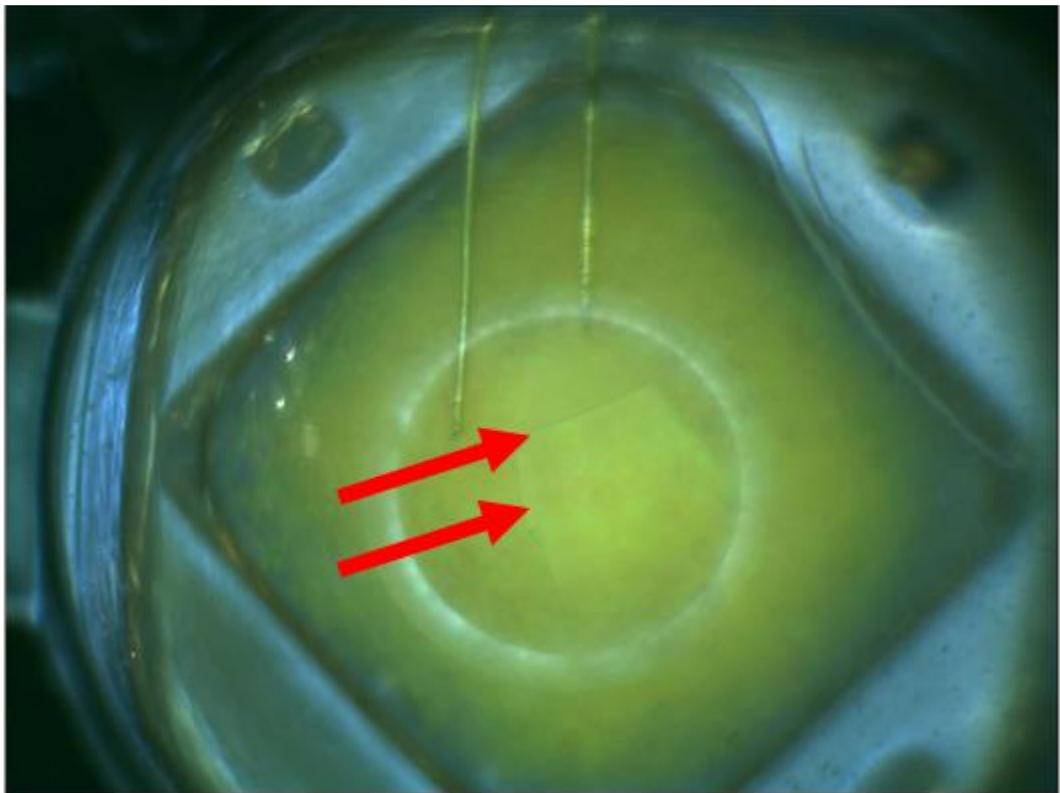


Abbildung 3.29: Risse in der Leuchtstoffschicht einer LED der geschädigten Leuchte

3.3.6 Zusammenfassung

Die Leuchtenalterung zeigte, dass die Qualität der untersuchten Leuchten insgesamt als gut zu bewerten ist. Der Lichtstromrückgang des größten Teils der getesteten Muster ($> 90\%$) betrug weniger als 10 % nach 6000 Betriebsstunden. Die Farbstabilität ist mit Ausnahme weniger Sonderfälle auch sehr gut. Während der Projektlaufzeit zeichnete sich die Tendenz ab, fertige LED-Module einzusetzen und bei der Fertigung der Leuchten ein Baukastenprinzip zu verwenden. Dies hilft das Bestellvolumen von gleichen Bauteilen zu erhöhen, was zu einer Senkung des Einkaufspreises führt. Es wurden sogar Kooperationen seitens mehrerer Hersteller eingegangen, die die gleichen Module in sich konkurrierende Produkte einsetzen. Trotz dieser recht optimistischen Lage, sollte nicht vergessen werden, dass Mitbewerber speziell aus dem asiatischen Raum Leuchten mit sehr niedrigen Preisen anbieten. Eine sinnvolle Strategie besteht in Innovation und Qualität. Diese muss auch von den Kunden sofort erkennbar sein. Damit man das volle Potenzial der LED-Technik ausschöpfen kann, müssen auch die Regelwerke für die öffentlichen Ausschreibungen geändert werden. Es ist nicht mehr zeitgemäß, Leuchten für eine Lebensdauer von 30 und mehr Jahren zu verlangen. Die meisten Hersteller garantieren bereits 50 000 Betriebssunden (ca. 12 Jahre). In dieser Zeit hat sich die Leuchte durch den geminderten Wartungsaufwand und die höhere Effizienz mehrfach amortisiert. Eine andere Alternative ist neuartige Abrechnungskonzepte einzusetzen z. B. Light-on-Demand oder die Finanzierung der Beleuchtungssanierung durch private Investoren, die dann ihr Geld durch die gestiegene Effizienz zurück erhalten.

4 Wahrnehmung von Licht

In diesem Kapitel werden die humanphysiologischen und kognitiven Aspekte bei der Lichtanwendung mit LEDs als neue Lichtquellen behandelt. Folgende Aspekte standen im Vordergrund:

- LED-Farbbinning (Kriterien für die Sortierung der weißen LEDs nach Farbgruppen)
- Untersuchungen zum empfundenen Weißgrad von Lichtarten mit unterschiedlichen Spektren
- Evaluation und semantische Interpretation (Skalierung) der Farbwiedergabequalität
- Helligkeit, Detektion (Kontrastwahrnehmung) und Sehschärfe bei der Lichtanwendung im Dämmerungsbereich mit LED-Licht
- Flimmern und stroboskopische Erscheinung bei der Pulsmodulation weißer LEDs

4.1 Binning

4.1.1 Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden

Ziel

Halbleiter und Leuchtstoff von LEDs unterliegen technologischen Einflüssen, die sichtbare Farbunterschiede zwischen den produzierten LEDs hervorrufen können. Ohne Maßnahmen würde somit die Möglichkeit bestehen, dass verschiedenfarbige LEDs in ein Beleuchtungssystem bzw. ein Beleuchtungssteilsystem gelangen könnten. Eine mögliche negative Bewertung daraus resultierender sichtbarer Farbunterschiede ist bereits durch Studien nachgewiesen worden (z. B. [13], S. 109 ff.). Um die Auswirkungen dieser technologiebezogenen Farbortstreuung zu minimieren, werden LEDs farbmetrisch vermessen und anschließend in Gruppen (Bins) sortiert. Die Toleranzgrenzen der Bins beruhen dabei bis heute auf den Studien MACADAMs aus den 1940er Jahren [17]. MACADAM ließ damals ein in etwa 50 cd/m^2 helles Testzeichen durch einen einzelnen Beobachter hinsichtlich der Farbdiskrimination bewerten. Basis dabei war ein 2° -Gesichtsfeld. Das Umfeld wurde stets mit Normlichtart C beleuchtet. Das Testzeichen simulierte einen harten, abrupten Farbübergang.

Die Anwendung MACADAMs Ergebnisse auf moderne LED-Applikationen ist aus folgenden Gründen kritisch zu hinterfragen:

- LED-Applikationen haben in der Regel höhere Leuchtdichten als die damals untersuchten
- Das realisierte 2° -Gesichtsfeld hat nur begrenzte praktische Relevanz ([21], S. 107 ff.)
- MACADAMs Studien liefern ausschließlich Ergebnisse in einem Umfeld mit Normlichtart C und besitzen folglich auch nur für diese Bedingung ihre Gültigkeit
- Zusätzlich zu dem untersuchten harten Farbübergang sind in heutigen LED-Anwendungen auch abweichende Farbverläufe von Interesse
- Die Tests wurden lediglich mit einem einzelnen Beobachter durchgeführt.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden unter Berücksichtigung o. g. Kritikpunkte. Für dieses Vorhaben ist ein entsprechender Versuchsaufbau

konzipiert und realisiert, eine geeignete Methode für die Ermittlung von Farbdiskriminationsschwellen anhand von Probandenversuchen entwickelt, Tests mit Versuchspersonen durchgeführt und die Ergebnisse in geeigneter Weise ausgewertet worden.

Versuchsaufbau

Abbildung 4.1 zeigt schematisch den umgesetzten Versuchsaufbau. Der Beobachter sitzt im Mittelpunkt einer auf der Innenseite diffus weiß lackierten Halbkugel und betrachtet ein Testzeichen. Der Abstand beträgt 750 mm. Die Beobachtung erfolgt binokular mit einer Winkelgröße des Testzeichens von 10° . Eine Beleuchtungseinheit liefert in Verbindung mit der Halbkugel ein der Referenzvalenz farbig angepasstes Umfeld.

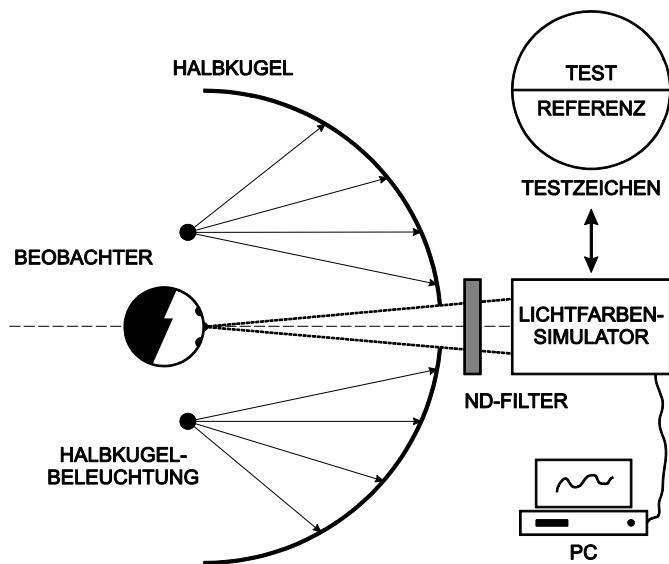


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau

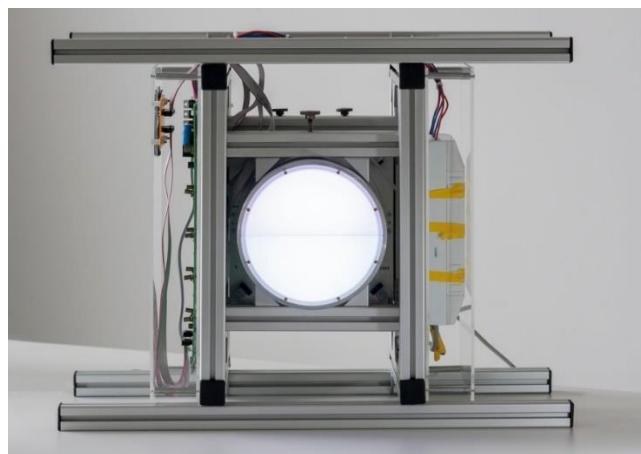


Abbildung 4.2: Lichtfarbensimulator

Die Realisierung des Testzeichens erfolgte mit einem durch LEDs hinterleuchteten Lichtfarbensimulator, der in Abbildung 3.2 dargestellt ist.

Es wurden drei Testzeichen (Abbildung 4.3) untersucht, wobei sich die damit realisierten Farbübergänge an gängigen Applikationen orientieren. Innerhalb der jeweiligen Testzeichenhälften wurde der Farbverlauf homogen gestaltet.



Abbildung 4.3: Untersuchte Testzeichen (li. nach re.): Farbübergang „hart“, „Abstand“, „weich“

Die untersuchten Farbörter lagen auf ausgewählten Weißpunkten des ANSI-Binning-Standards ($T_n = 2700\text{ K}$, $T_n = 4000\text{ K}$ und $T_n = 6500\text{ K}$ gemäß [12]). Die Testvalenzen wurden in einem quadratischen Raster gleichmäßig um die jeweilige Referenzvalenzvalenz verteilt. Dadurch entfällt ein möglicher Einfluss der Methodik auf das erzielte Ergebnis, insbesondere auf die Orientierung der Schwellwertkurve im entsprechenden Farbsystem/-raum. Die Testzeichenleuchtdichte wurde auf 800 cd/m^2 gesetzt, die Umfeldleuchtdichte auf 200 cd/m^2 .

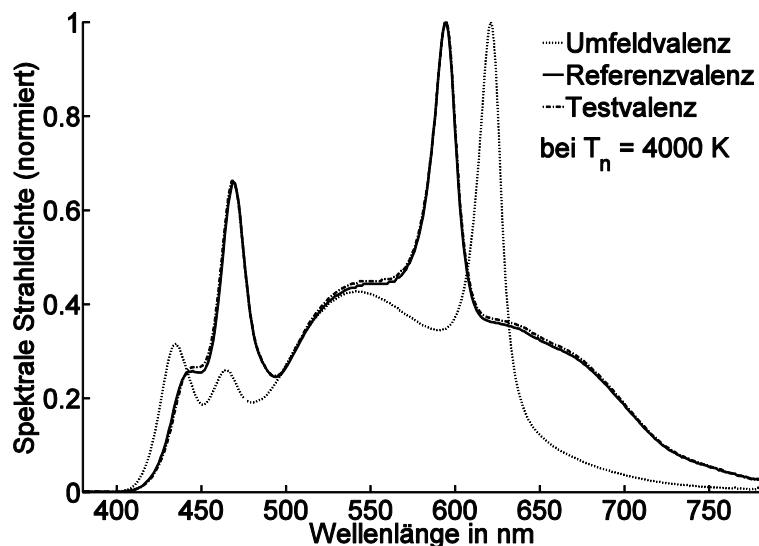


Abbildung 4.4: Spektraler Verlauf bei $T_n = 4000\text{ K}$ und Testzeichen 1

Der Leuchtdichteunterschied zwischen den beiden Testzeichenhälften betrug bei der Variation des Farbabstandes stets weniger als 3 %. Das Testzeichen wurde mit einem breitbandigen Spektrum hinterleuchtet, wobei Referenz- und Testvalenz nahezu identische spektrale Verteilungen aufwiesen (Abbildung 4.4). Das Dimming der Farbvalenzen erfolgte mit einer Frequenz von $247 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$.

Methode

Zunächst wurde die Form der Schwellwertkurve definiert: Es wurde analog zu 163; 163 eine Ellipse gewählt, in deren Mittelpunkte sich die Referenzvalenz befindet. Für die einzelnen Untersuchungen wurde jeweils ein Probandenkollektiv von mindestens 20 Teilnehmern herangezogen. Um eine mögliche Verfälschung der Ergebnisse durch Farbfehlsichtigkeiten der Testpersonen ausschließen zu können, wurde vorab die Eignung der Probanden mittels einschlägiger Tests überprüft.

Nach einer chromatischen Adaptation von 60 s wurden die Probanden aufgefordert, randomisiert dargebotene Farbdifferenzen gemäß der Fragestellung "Sind Referenz- und Testvalenz in Farbe gleich?" mit den Antwortmöglichkeiten „gleich“ bzw. „ungleich“ zu beantworten (Abbildung 4.5). Die Probanden teilten ihre Beurteilung dem Versuchsleiter mündlich mit.

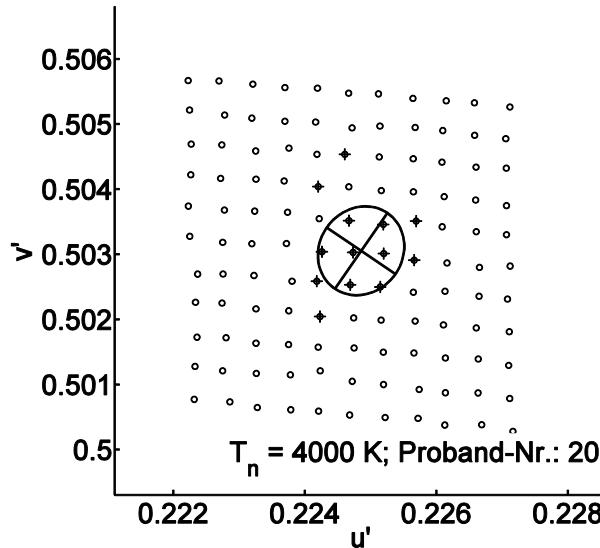


Abbildung 4.5: Farbdiskriminationsellipse und Antwortverhalten einer Versuchsperson

An den Positionen der nicht gefüllten Kreise ist die Antwort „ungleich“, an denen der mit „+“ gefüllten Kreise „gleich“. Die Referenzvalenz befindet sich im Schnittpunkt der beiden Ellipsenachsen.

Die Bestimmung der Schwellwertellipsen erfolgte analog [20] durch Maximierung des skalaren Funktionswerts einer Log-Likelihoodfunktion $\ln L$.

Die empirische Untersuchung wurde in zwei Blöcke aufgeteilt. Im ersten Block wurde die Abhängigkeit der Farbdiskrimination vom dargebotenen Weißpunkt untersucht. Dabei wurden bei drei Farbtemperaturen von 22 Probanden, 7986 Farbabstände abgefragt. Das Alter der Probanden lag zwischen 22 und 48 Jahren (Mittelwert: 28,4 Jahre, Standardabweichung: 7,2 Jahre). 14 Probanden waren männlich und acht weiblich. Im zweiten Block wurde der Einfluss des Farbverlaufs auf die

Farbdiskrimination untersucht. Die Versuchsdurchführung erfolgte dabei im Rahmen einer Masterarbeit [16]. Von 23 Probanden wurden somit 8349 Farbunterschiede bei einer ähnlichen Farbtemperatur von 4000 K bewertet. Das Alter der Probanden lag zwischen 22 und 54 Jahren (Mittelwert: 31,0 Jahre, Standardabweichung: 9,4 Jahre). Zwölf Probanden waren männlich und elf weiblich.

Auswertung der Versuche zu den Wahrnehmungsschwellen

Die Abbildung 4.6 bis Abbildung 4.9 zeigen ausgewählte Ergebnisse der beiden Untersuchungsböcke. Sämtliche Ellipsenparameter beziehen sich dabei auf die CIE (u' , v') Farbtafel 1976.

Weißpunktvariation: Die Ellipsenhalbachse a zeigt keine signifikante Änderung in Abhängigkeit des untersuchten Weißpunktes. Die Ellipsenorientierung φ ändert sich hingegen signifikant.

Farbverlaufsvariation: Die Ellipsenhalbachse a weist einen signifikanten Sprung zwischen Testzeichen 1 und 2 bzw. 1 und 3 auf. Die Ellipsenorientierung ändert sich nicht.

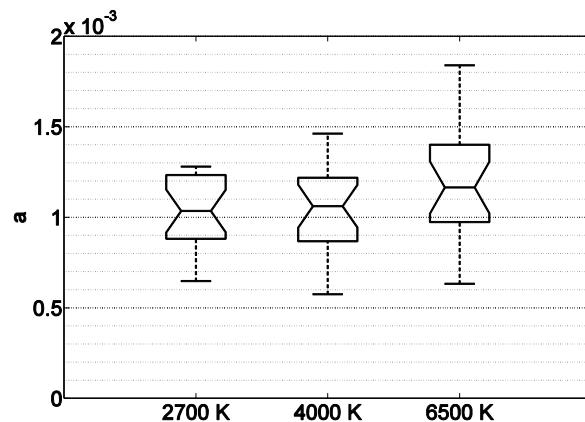


Abbildung 4.6: Ellipsenhalbachse a in Abhängigkeit des untersuchten Weißpunktes

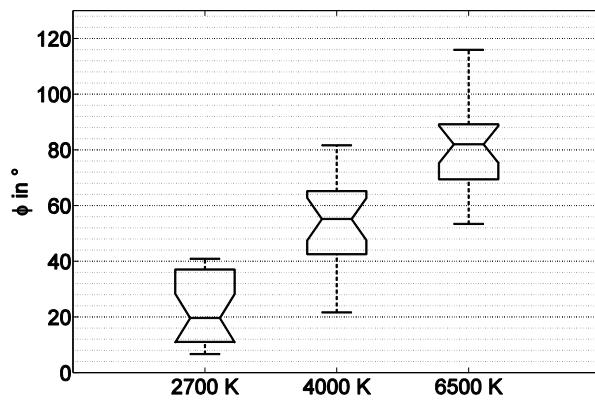


Abbildung 4.7: Ellipsenorientierung φ in Abhängigkeit des untersuchten Weißpunktes

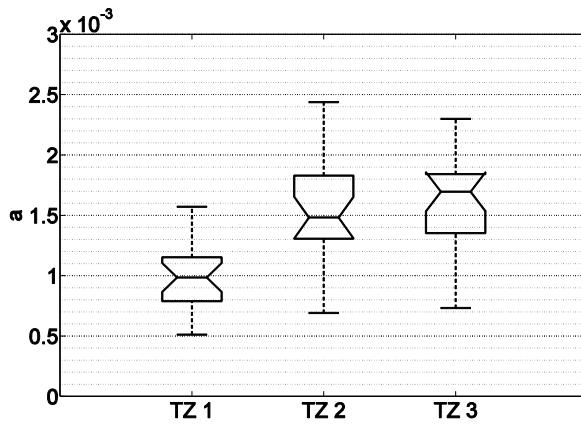


Abbildung 4.8: Ellipsenhalbachse a in Abhängigkeit des untersuchten Farbverlaufs

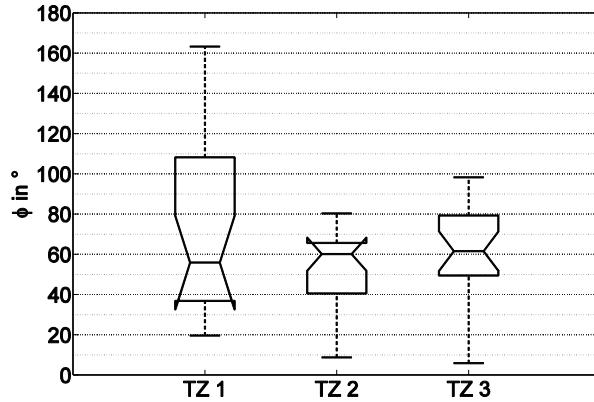


Abbildung 4.9: Ellipsenorientierung ϕ in Abhängigkeit des untersuchten Farbverlaufs

Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse dieser Arbeit (Untersuchungsblock 1) verglichen mit denen von MACADAM. Zur besseren Erkennbarkeit sind sämtlich Ellipsen um den Faktor 7 vergrößert dargestellt.

Bei $T_n = 6500$ K zeigt sich eine gute Übereinstimmung der einzelnen Ergebnisse. Die Ellipsen gleichen sich in guter Näherung hinsichtlich Größe und Orientierung. Bei den beiden weiteren Weißpunkten stehen die Ellipsen dieser Arbeit nahezu senkrecht zu denen von MACADAM.

Um die Ursache hierfür zu ermitteln, wurde eine echte VON KRIES Transformation durchgeführt. Die Ellipsen dieser Arbeit wurden dabei zu den Adaptationsbedingungen bei MACADAM (Normlichtart C bei etwa 6800 K; $L = 23,87 \text{ cd/m}^2$ nach [17]) transformiert. Als Ergebnis erhält man eine Ellipsenschaar, die sich in ihrer Orientierung gleichen (Abbildung 4.11). Die Unterschiede in den Ergebnissen beider Arbeiten können daher mit den unterschiedlichen Adaptationsbedingungen begründet werden und sind wohl nicht in den Leuchtdichteunterschieden begründet.

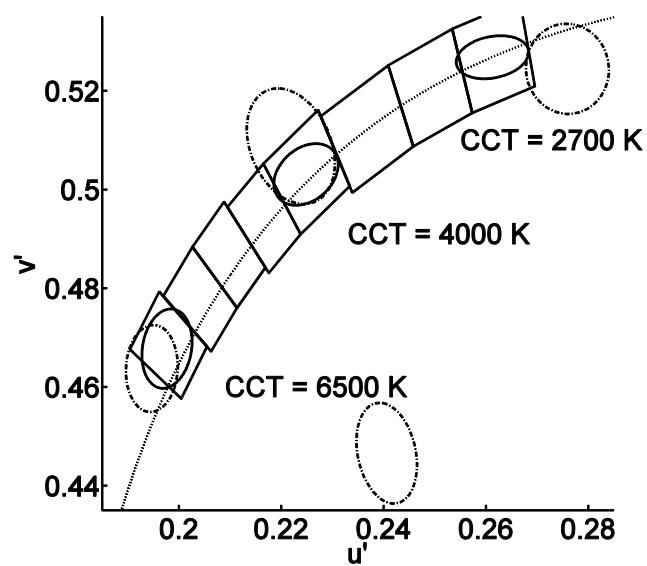


Abbildung 4.10: Ergebnisse im Vergleich zu MACADAM

MACADAM-Ellipsen (gestrichelt) und die Ellipsen dieser Arbeit (durchgezogen) im Vergleich. Zur besseren Erkennbarkeit sind sämtliche Ellipsen siebenfach vergrößert dargestellt

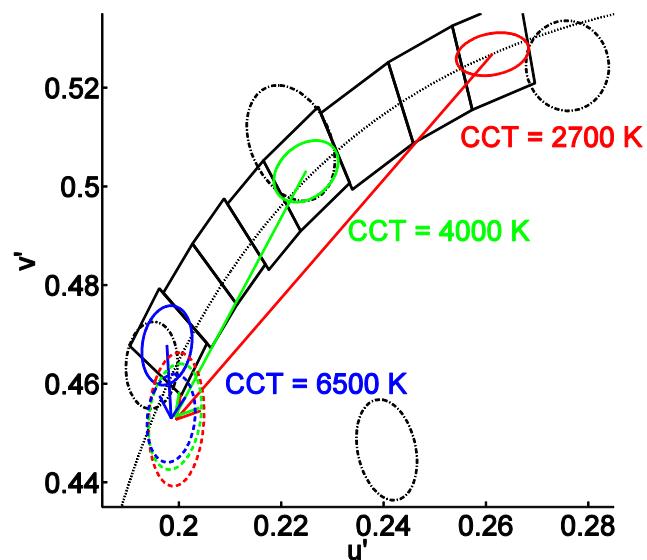


Abbildung 4.11: Transformierte Ellipsen im Vergleich zu MACADAM

MACADAM-Ellipsen und transformierte Ellipsen dieser Arbeit im Vergleich. Zur besseren Erkennbarkeit sind sämtliche Ellipsen siebenfach vergrößert dargestellt

Auswertungen der Versuche zu den psychologischen Bewertungen

Neben den Untersuchungen zur Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden wurden im weiteren Verlauf größere Farbdifferenzen psychologisch bewertet. Abbildung 4.12 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wahrnehmung kleiner und großer Farbunterschiede. Dargestellt ist eine normierte numerische Bewertung der dargebotenen Farbunterschiede in Form von Isohypsen. Kleine Zahlenwerte stehen dabei für klein, große Zahlenwerte für groß empfundene Farbdifferenzen. Die Isohypsen lassen auf die wahrnehmungsgemäße Empfindung von Farbabständen im entsprechenden Farbsystem schließen. Auffallend ist dabei, dass sich die Orientierung der Stufen im Vergleich von kleinen zu großen Farbunterschieden nicht ändern. Dies rechtfertigt zum Erhalt von Bewertungsgrenzen großer Farbunterschiede, die Beaufschlagung kleiner Farbunterschiede mittels Faktoren.

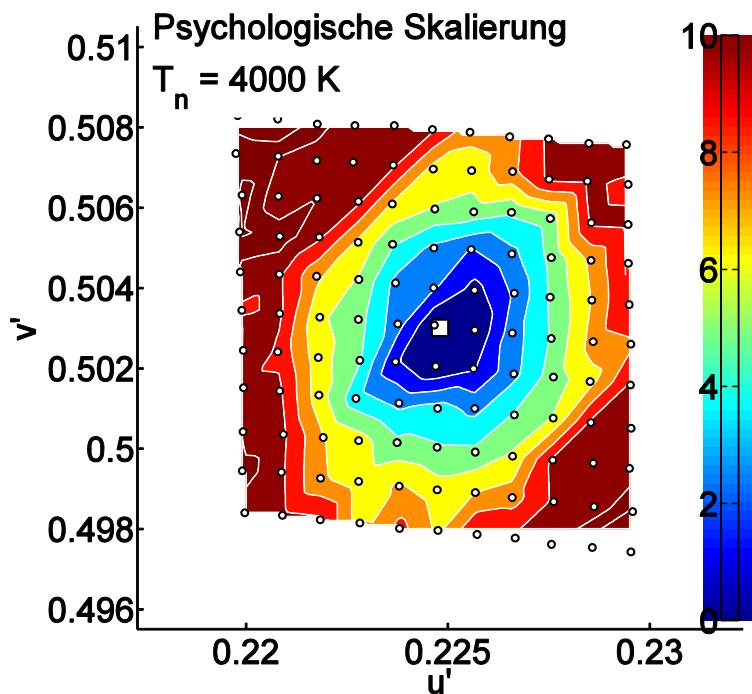


Abbildung 4.12: Ergebnisse: Wahrnehmung kleiner und großer Farbunterschiede

Zusammenfassungen

Die Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden ist bei drei für Beleuchtungsanwendungen entscheidende Farbtemperaturen (2700 K, 4000 K und 6500 K) und drei gängigen Farbverläufen („hart“, „Abstand“, „weich“), anhand von Untersuchungen mit Testpersonen, bestimmt worden. Zwischen den einzelnen Weißpunkten kann keine signifikante Änderung in den Parametern der jeweiligen Schwellwertellipse festgestellt werden. Allerdings zeigen sich signifikante Änderungen bei der Variation des Farbverlaufs. Bei einem harten Farbübergang liegt die Schwelle, unabhängig vom Referenzweißpunkt, in etwa bei $\Delta u'v' = 0,001$. Bei den weiteren untersuchten Farbverläufen ist diese Schwelle mit dem Faktor 1,5 zu beaufschlagen. Die Ergebnisse dieser Arbeit gleichen bei Berücksichtigung der chromatischen Adaptation denen von MACADAM. Dies hat zur Folge, dass für das LED-Binning nicht

die Daten von MACADAM verwendet werden können, da hier die chromatische Adaptation nicht berücksichtigt ist. Die neu gewonnenen Daten berücksichtigen diese und können mathematisch an jeden weiteren Weißpunkt transformiert werden. Die Untersuchungen zur psychologischen Wahrnehmung von Farbunterschieden zeigen weiterhin, dass keine Drehung der Schwellwertellipsen zwischen physiologischer und psychologischer Schwelle erfolgt.

4.1.2 Farbunterschiede bei Körperfarben

Ziel

Die Emissionsspektren der hergestellten weißen LED-Lichtquellen des gleichen Typs ändern sich wegen Unsicherheiten im Herstellungsverfahren. Dementsprechend werden die fertigen weißen LEDs in sog. Binning-Gruppen eingesortiert. Diese Sortierung geschieht in der heutigen industriellen Praxis nur nach dem empfundenen Weißheitsgrad des LED-Emissionsspektrums. Dabei werden ausschließlich die weißen Farbdifferenzen unter den einzelnen LEDs betrachtet. Für die Benutzerakzeptanz einer LED-Lichtquelle sind hingegen nicht nur die weißen Farbunterschiede des empfundenen Weißheitsgrades relevant, die im Wesentlichen vom Emissionsspektrum der LED-Lichtquelle selbst abhängen, sondern auch die Farbunterschiede der beleuchteten farbigen Objekte, die durch die oben erwähnten Unsicherheiten der LED-Emissionsspektren entstehen und auch von den spektralen Reflexionsgradfunktionen der beleuchteten farbigen Objekte abhängen. Für die industrielle Binning-Praxis ist es wichtig, die Relevanz dieser Farbunterschiede der Körperfarben hinsichtlich Benutzerakzeptanz zu ermitteln. Ergebnisse können als Grundlage einer neuen Binning-Strategie nach Änderung der Farberscheinung von durch weiße LED-Lichtquellen beleuchteten Körperfarben dienen. Zu diesem Zweck wurden die Farbunterschiede von Körperfarben in einem visuellen Probandenversuch mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 verwendeten kategorischen Skala semantisch gedeutet.

Methode

Abbildung 4.13 veranschaulicht die Methode des Probandenversuches. Die Versuchsperson bewertete die Farbunterschiede derselben Objekte (3 verschiedene Versionen von Körperfarben) zwischen den Kammern. Jede Kammer wurde mit unterschiedlichen Lichtquellen (inkl. weiße LED-Lichtquellen) beleuchtet. Die Bewertung der Farbunterschiede der Körperfarben geschah auf der gleichen semantischen Skala, wie in Abschnitt 4.3, d. h. „sehr gut“, „gut“, „mäßig“, „gering“, „schlecht“ oder „sehr schlecht“. Farbunterschiede der einzelnen Objekte zwischen den Kammern wurden ebenfalls instrumentell gemessen. Durch die Anwendung von 3 parallelen Kammern wurde das Bewertungsverfahren im Vergleich zur Methode Abschnitt 4.3 für die Versuchsperson erleichtert. Für jedes Testobjekt wurde einerseits ein $U^*V^*W^*$ -Farbunterschied (ΔE), andererseits eine semantische Deutung über die Übereinstimmung der Farberscheinung unter 2 Lichtquellen ermittelt. Nach der Anpassung eines mathematischen Modells entstand eine binning-relevante semantische Deutung der Farbunterschiede für Körperfarben, die für beliebige spektrale Reflexionsgradfunktionen verwendet werden kann. Abbildung 4.14 zeigt die binning-relevante semantische Deutung der Farbunterschiede am Beispiel einer roten Tomate, deren spektrale Reflexionsgradfunktion instrumentell vermessen wurde.

Aus Abbildung 4.14 geht hervor, dass jeder Wert des $U^*V^*W^*$ -Farbunterschiedes (Abszisse) semantisch (binning-relevant) interpretiert werden kann (Ordinate). Die schwarze Kurve stellt eine angepasste mittlere Tendenz dar. So entsprechen z. B. $\Delta E = 0$: sehr gut; $\Delta E = 2,5$: gut; $\Delta E = 5,4$: mäßig,

$\Delta E = 9,0$: gering und $\Delta E = 14,4$: schlecht. Mit Hilfe der erarbeiteten Methode kann für jede Körperfarbe eine ähnliche semantische Deutungsfunktion der Farbunterschiede ermittelt werden, vorausgesetzt, dass der spektrale Reflexionsgrad des Objektes bekannt ist.



Abbildung 4.13: Probandenversuch zur semantischen Deutung der Farbunterschiede
Durch weiße LED-Lichtquellen beleuchtete Körperfarben. Die Probanden interpretierten die Farbunterschiede zwischen den unterschiedlich beluchteten Kammern

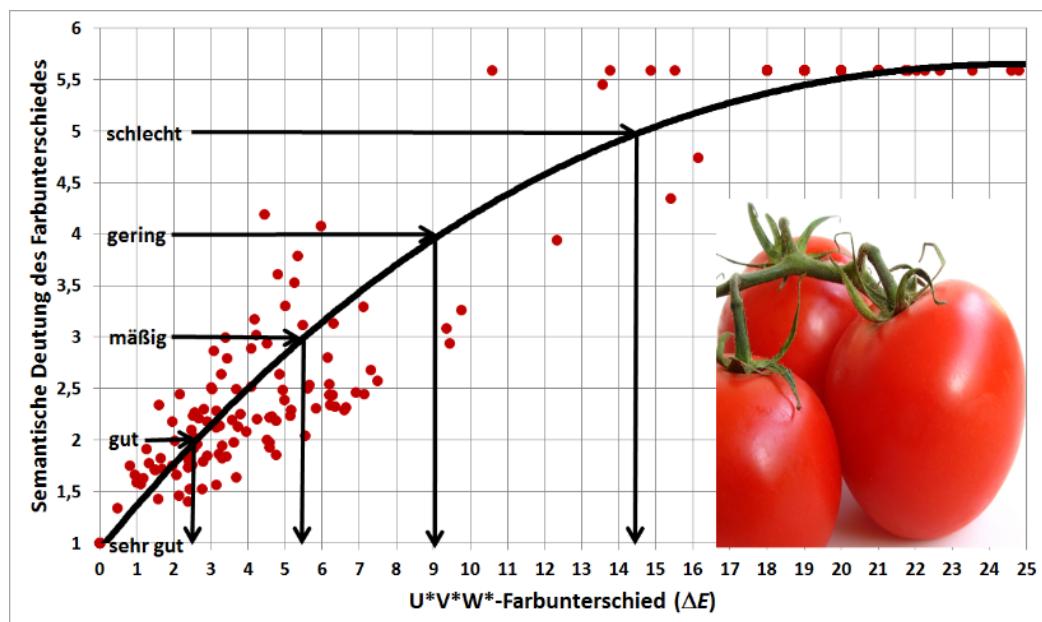


Abbildung 4.14: Semantische Deutung der Farbunterschiede für Körperfarben
Binning-relevante Untersuchung am Beispiel: rote Tomate

Ergebnisse

Für jedes Testobjekt wurde einerseits ein $U^*V^*W^*$ -Farbunterschied (ΔE), andererseits eine semantische Deutung über die Übereinstimmung der Farberscheinung unter 2 Lichtquellen ermittelt. Nach der Anpassung eines mathematischen Modells entstand eine binning-relevante semantische Deutung der Farbunterschiede für Körperfarben, die für beliebige spektrale Reflexionsgradfunktionen verwendet werden kann. Abbildung 4.14 zeigt die binning-relevante semantische Deutung der Farbunterschiede am Beispiel einer roten Tomate, deren spektrale Reflexionsgradfunktion instrumentell vermessen wurde.

Zusammenfassung

Für eine Reihe an Testobjekten wurde einerseits ein $U^*V^*W^*$ -Farbunterschied (ΔE), andererseits eine semantische Deutung über die Übereinstimmung der Farberscheinung unter 2 Lichtquellen ermittelt. Nach der Anpassung eines mathematischen Modells entstand eine binning-relevante semantische Deutung der Farbunterschiede für Körperfarben, die für beliebige spektrale Reflexionsgradfunktionen verwendet werden kann.

4.2 Untersuchungen zum empfundenen Weißgrad

4.2.1 Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden

Bisherige Untersuchungen

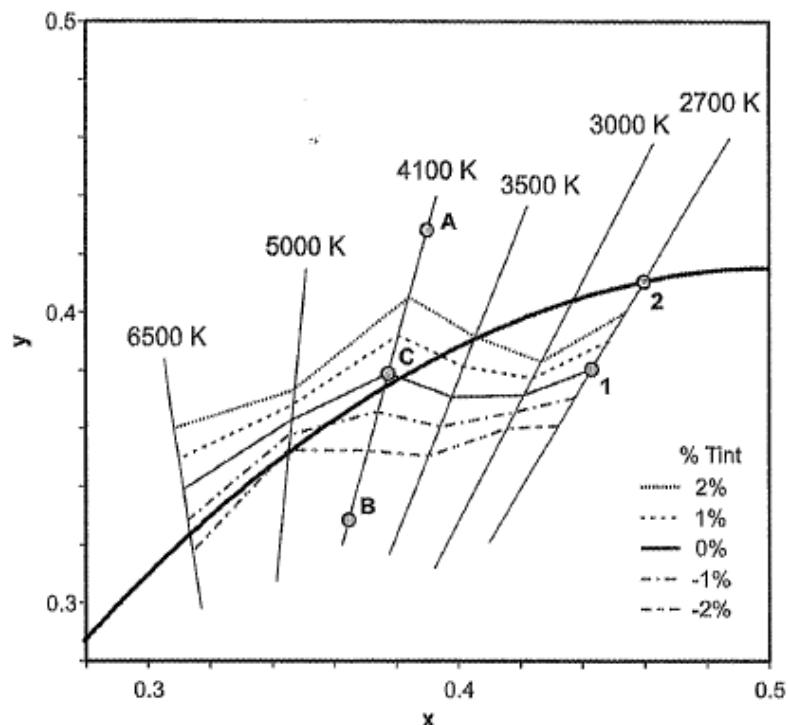


Abbildung 4.15: Linien mit konstantem Farbton [19]

Rea et al. [19] haben bereits festgestellt, dass Lichtquellen mit der gleichen Farbtemperatur, aber unterschiedlicher Farbigkeit, anders wahrgenommen werden. In Abbildung 4.15 haben die Lichtquellen A, B und C eine Farbtemperatur von 4100 K, während die Lichtquellen 1 und 2 eine Farbtemperatur von 2700 K haben. Untersuchungen haben ergeben, dass sich z. B. die Lichtquellen 1 und C stärker ähneln als 1 und 2.

Es konnte für entsprechende Lichtquellen eine „Weißlinie“ bzw. Linien mit einem konstanten Farbton definiert werden. Entlang dieser Linien werden verschiedene Lichtquellen als annähernd gleich wahrgenommen. Die Linien verlaufen eher entlang des Planckschen Kurvenzuges und quer zu den Judd'schen Geraden. Abweichungen von dieser Linie führen zu einem verstärkten Farbeindruck. Whitehead et al. [22] haben Untersuchungen zum empfundenen Weißgrad durchgeführt. In einer Versuchsreihe mussten Testpersonen mit Hilfe von monochromatischen blauen und gelben Lichtreizen ein „reinstes Weiß“ mischen. Bei den Tests lag keine Vergleichsreferenz vor. Die Ergebnisse sind stark gestreut wie in Abbildung 4.16 zu sehen ist.

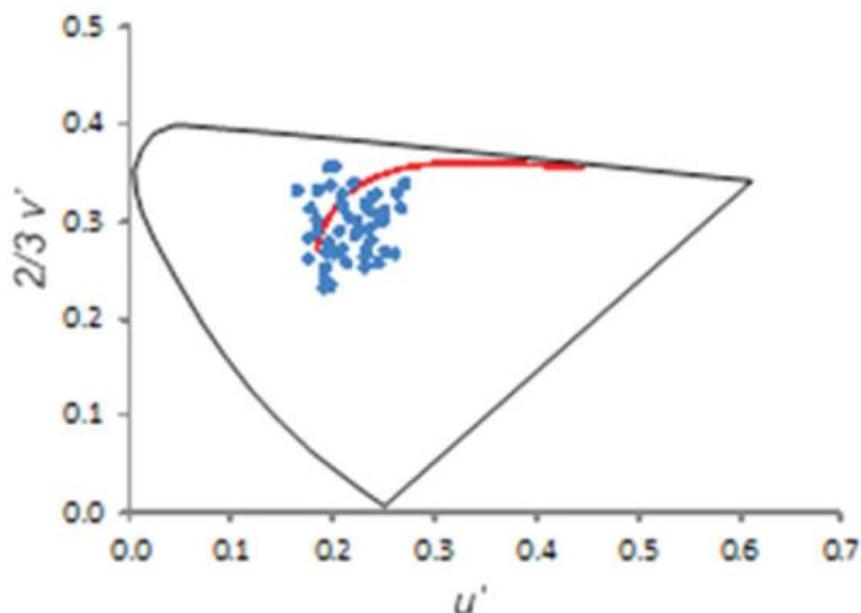


Abbildung 4.16: Gemessene Farbörter individueller Einstellung „reinstes Weiß“ [22]

Die Problematik bei der Bestimmung des Weißgrades ist zum einen das individuelle Verständnis von dem Begriff „reinstes Weiß“, als auch die individuelle physiologische Wahrnehmung. Des Weiteren haben Voruntersuchungen ergeben, dass die Streuung bei der Beurteilung eines dargebotenen Farbreizes auch von der Art des Spektrums abhängt. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse wird in den Untersuchungen nicht auf eine mögliche Skalierung des Weißgrades eingegangen. Es ist wichtiger zuerst die Streuung in Abhängigkeit vom verwendeten Spektrum zu untersuchen.

Konzeption und Vorversuche

Um den Einfluss des Lichtspektrums auf die Beurteilung eines Farbunterschiedes untersuchen zu können, wurde ein visuelles Experiment aufgebaut. Der Test beruht auf dem Prinzip des Paarverglei-

ches. Der Aufbau besteht aus zwei sich nebeneinander befindenden Kammern, jeweils mit einer Testlichtquelle bestehend aus 5200 K-, 2700 K- und RGB-LEDs und zwei Referenzen, einer Leuchtstofflampe mit 5200 K und einer Halogenlampe mit 2700 K. Die Innenwände der Kammern sind diffus reflektierend, mit einem mittleren Reflexionsgrad von ca. 0,8. Abbildung 4.17 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

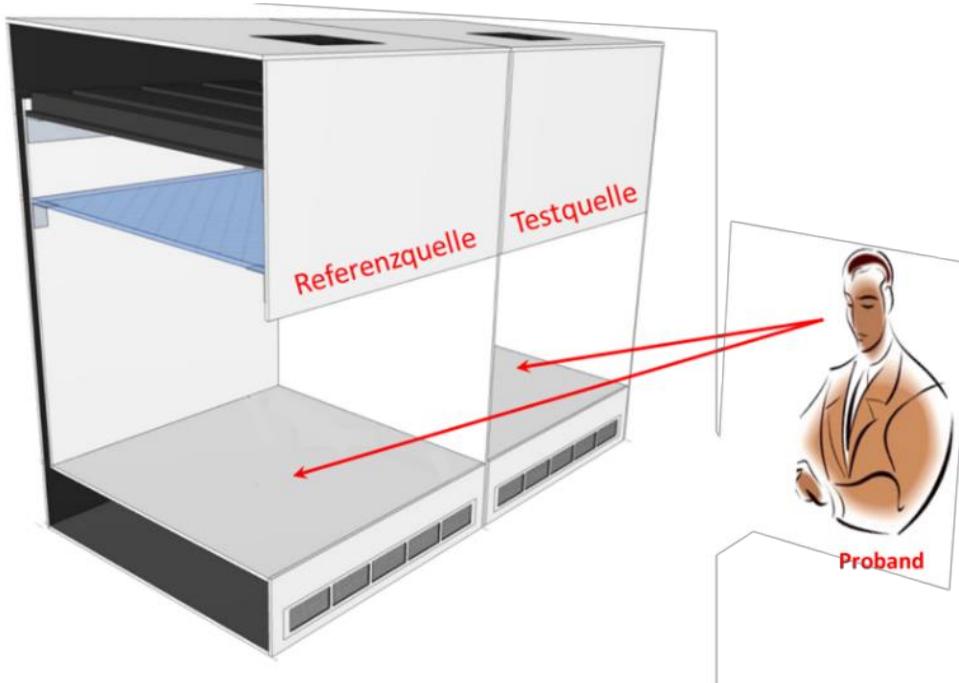


Abbildung 4.17: Testaufbau zur Untersuchung des Farbunterschiedes

Beide Kammern sind so ausgeleuchtet, dass auf dem Boden beider Kammern feste Beleuchtungsstärke von 950 lx zu messen ist. Somit ist eine photopische Adaptation für das Tagessehen gewährleistet. Ein Proband sitzt mittig vor dem Testaufbau und schaut in einem Winkel von 45° auf den Boden der Kammern. Der Test sieht vor, dass die Probanden das Spektrum der Testlichtquelle ändern, bis der Boden in beiden Kammer gleich erscheint.

Für diesen Versuch wurden die Testspektren für die Farbtemperaturen 2700 K und 5200 K mit Hilfe von 5200 K, 2700 K und RGB LEDs erstellt. Ein Testspektrum wurde nur mit RGB-LEDs generiert, während für das zweite zusätzliche weiße LEDs verwendet wurden. Die Spektren sind für 5200 K in Abbildung 4.18 zu sehen. Die Kompakteuchtstofflampe (CFL) hat im Wellenlängenbereich von 430 nm bis 640 nm ein aufgefülltes Spektrum. Allerdings besitzt es die für Leuchtstofflampen typischen Spitzen bei den Wellenlängen 435,8 nm, 546,1 nm und 610 nm. Das RGB Spektrum hat Spitzen an den Wellenlängen 440 nm, 500 nm und 640 nm mit Lücken zwischen den Spitzen. Das RGBW Spektrum hat Spitzen an den Wellenlängen 460 nm und 640 nm. Im Vergleich zum RGB Spektrum ist das RGBW Spektrum aufgefüllter.

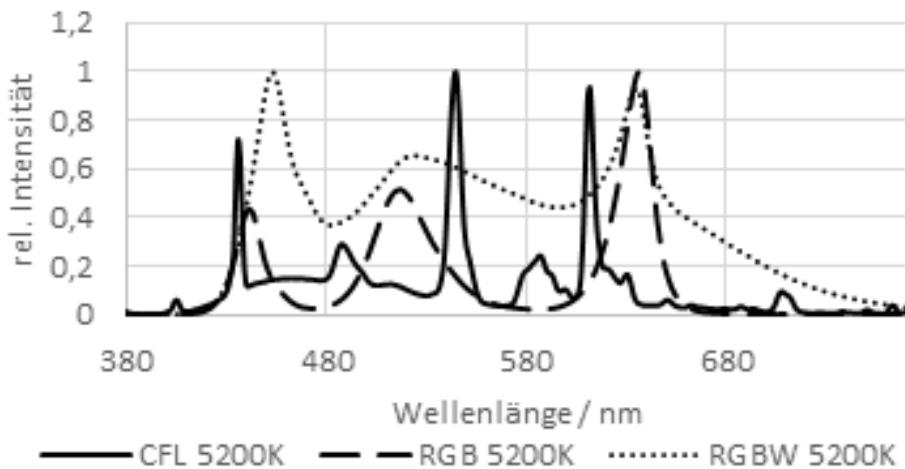


Abbildung 4.18: Spektren unterschiedlicher Lichtquellen aber gleicher Farbörter
Lichtquellen: RGB und RGBW LEDs sowie eine
Kompaktleuchtstofflampe

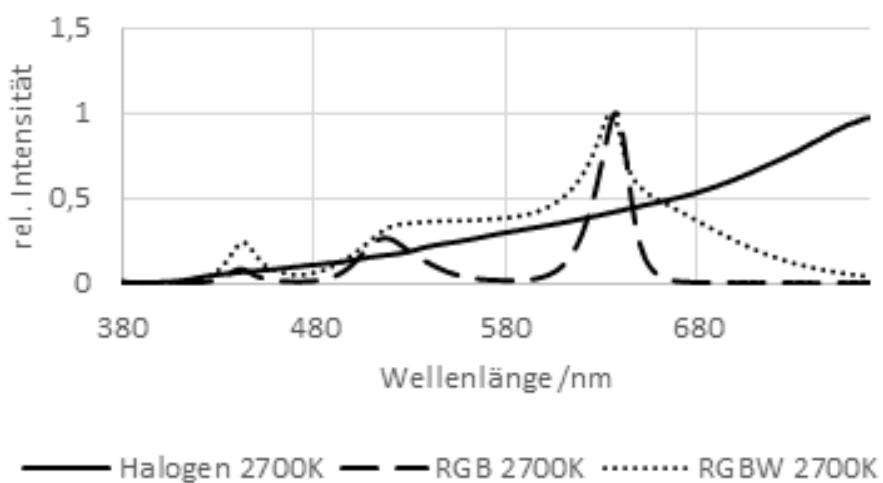


Abbildung 4.19: Spektren unterschiedlicher Lichtquellen aber gleicher Farbörter
Lichtquellen: RGB und RGBW LEDs sowie eine Halogenlampe

Die Spektren sind für 2700 K in Abbildung 3.19 zu sehen. Das Halogenspektrum hat einen kontinuierlichen Verlauf ohne Spitzen. Das RGB-Spektrum hat Spitzen bei den Wellenlängen 440 nm, 500 nm und 640 nm. Das RGBW-Spektrum hat Spitzen an den Wellenlängen 460 nm, 520 nm und 640 nm. Die Mischspektren haben den gleichen Farbort wie ihre entsprechende Referenz.

Durchführung der visuellen Versuche

Die Untersuchungen wurden für die Farbörter mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 5200 K und 2700 K durchgeführt. Getestet wurden zwölf Probanden. Jeder Proband wurde im Schnitt viermal getestet. Die Testpersonen änderten die Testlichtquelle, bis der Boden beider Kammern visuell gleich erschien. Die individuellen Einstellungen wurden spektral vermessen.

Auswertung der Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse in Form von Kovarianz-Ellipsen dargestellt. Der Ellipseninhalt kann als der Bereich im Farbraum verstanden werden, in dem die Menge der Probanden die jeweiligen Testspektren im Vergleich zu einer Referenz als gleich wahrgenommen haben. Die Ellipsen sind im $u'v'$ -Farbraum dargestellt.

Die bisherigen Ergebnisse weisen für einen Farbabgleich auf eine starke Abhängigkeit vom Lichtspektrum hin. Abbildung 4.20 zeigt die Ellipsen für einen visuellen Abgleich bei 5200 K.

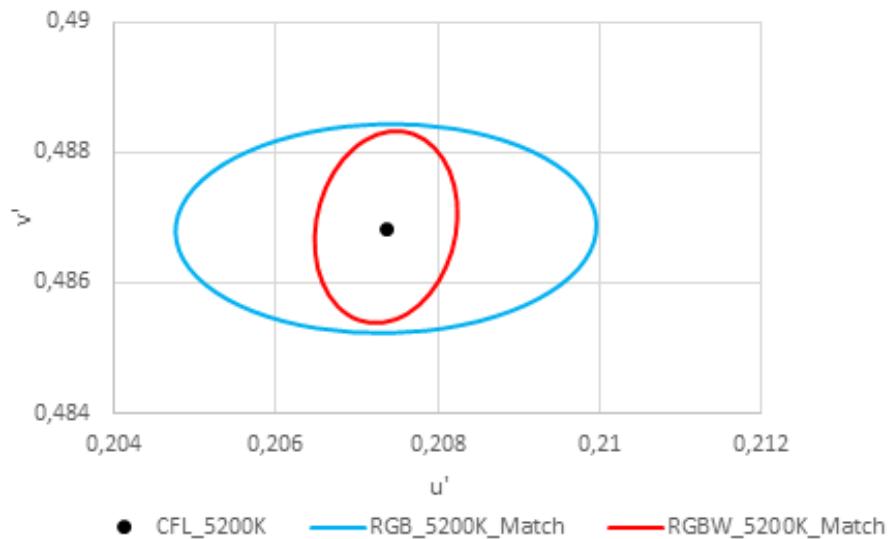


Abbildung 4.20: Ergebnisse in Form von Kovarianzellipsen

Man kann erkennen, dass die Ergebnisse für das RGB-Spektrum stärker gestreut sind als für das RGBW-Spektrum. Die RGBW-Ellipse weist auf eine starke Streuung entlang der v' -Achse. Die RGB-Ellipse weist auf eine stärkere Streuung entlang der u' -Achse.

Abbildung 4.21 zeigt die Ellipsen für einen visuellen Abgleich bei 2700K. Auch für eine Farbtemperatur von 2700K sind die Ergebnisse für das RGB-Spektrum stärker gestreut als für das RGBW-Spektrum. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für 5200K sind die Ellipsen für 2700K fast gleich entlang der u' -Achse ausgerichtet. Unabhängig von der Farbtemperatur sind die Ergebnisse für das RGB-Spektrum stärker gestreut als für das RGBW-Spektrum.

Ein Grund für die stärkere Streuung bei den RGB-Spektren ist möglicherweise der spektrale Verlauf. Es wird versucht einen Farbeindruck, der durch ein volles Spektrum erzeugt wurde, mit nur drei Farbreizen nachzumischen. Da die verschiedenen Probanden Farbreize leicht unterschiedlich wahrnehmen, kommt es zu einer größeren Streuung. Im Gegensatz dazu ist das RGBW-Spektrum lückenloser, was zu einer kleineren Streuung führt. Konsequenterweise kann man daraus schließen, dass die Wahl des Spektrums, nicht nur hinsichtlich des Farbtöns sondern auch in Bezug auf die spektrale Verteilung, die Beurteilung des Weißgrades beeinflusst.

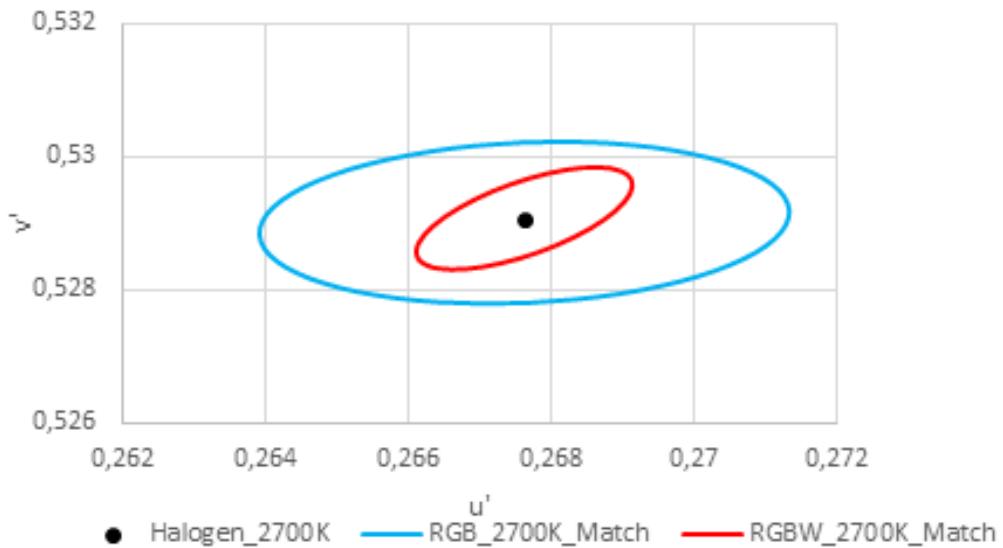


Abbildung 4.21: Ellipsen für einen visuellen Abgleich bei 2700 K

Zusammenfassung

Voruntersuchungen haben ergeben, dass die Streuung bei der Beurteilung eines Weißgrades in Form eines dargebotenen Farbreizes erheblich von der Art des Spektrums abhängt. Darum wurde die Streuung in Abhängigkeit vom verwendeten Spektrum untersucht. Man kann erkennen, dass die Ergebnisse für ein eher diskontinuierliches RGB Spektrum stärker gestreut sind als für ein aufgefülltes Spektrum bestehend aus RGBW-LEDs. Dies hat eine entscheidende Bedeutung für die zu empfehlende spektrale Zusammensetzung von LED-Applikationen.

4.3 Akzeptanzbezogenen Skalierung der Farbwiedergabe

Ziel

Für die akzeptanzbezogene Skalierung der Farbwiedergabe von LED-Spektren sind kategorische (sog. ordinale) Urteile der Testpersonen über die Übereinstimmung der Farberscheinung der farbigen Objekte unter der zu testenden LED-Lichtquelle und deren Referenzlichtquelle notwendig. Diese sog. semantische Deutung der Farbwiedergabe-Eigenschaft der Lichtquellen ist für die akzeptanzbezogene Kommunikation zwischen LED-Hersteller und LED-Leuchtenhersteller sowie deren Kunden wichtig. So kann die Akzeptanz der Farbwiedergabe einer LED-Lichtquelle semantisch als eine der Kategorien „sehr gut“, „gut“, „mäßig“, „gering“, „schlecht“ oder „sehr schlecht“ vorausgesagt werden. Zu diesem Zweck wurde in einem visuellen Probandenversuch die Farbwiedergabe-eigenschaft verschiedener LED-Lichtquellen von mehreren Probanden semantisch gedeutet. Als Ergebnis wurde jeder Farbwiedergabeindex-Wert (R_a) in die obigen Kategorien der Farbwiedergabe-akzeptanz der LED-Lichtquelle rechnerisch transformiert.

Methode

Abbildung 4.22 veranschaulicht die Methode des Probandenversuches. Die Versuchsperson schaltete mit dem in ihrer Hand gehaltenen Schalter entweder die Referenzlichtquelle (Glühlampe) oder eine LED-Testlichtquelle nacheinander ein, die eine Anordnung farbiger Objekte von oben diffus beleuchteten. Dabei wurde die Übereinstimmung der Farberscheinung der Objekte zwischen Test- und Referenzlichtquelle semantisch d. h. mit Hilfe der obigen Kategorien bewertet. Es wurden LED-Testlichtquellen mit sehr unterschiedlicher Farbwiedergabeeigenschaft im Bereich $R_a = 18-93$ untersucht.

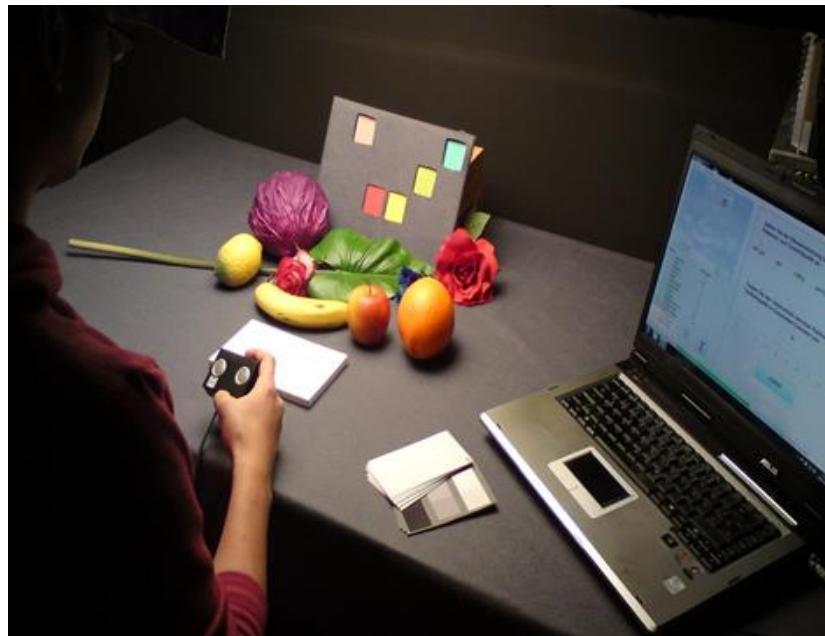


Abbildung 4.22: Probandenversuches zur akzeptanzbezogenen Skalierung der Farbwiedergabe

Für jede LED-Testlichtquelle wurde einerseits ein CIE-Farbwiedergabeindex (R_a), andererseits semantische Deutungen über die Übereinstimmung der Farberscheinung mit der Referenzlichtquelle ermittelt. Somit entstand eine akzeptanzbezogene (semantische) Deutung des CIE-Farbwiedergabeindex für verschiedene LED-Lichtquellen, die in Abbildung 4.23 dargestellt wird.

Aus Abbildung 4.23 geht hervor, dass jeder Wert des CIE-Farbwiedergabeindex (Abszisse) semantisch (akzeptanzbezogen) interpretiert werden kann (Ordinate). Die roten Punkte stellen die angepasste mittlere Tendenz dar. So entsprechen z. B. $R_a = 100$: sehr gut, $R_a = 94$: gut-sehr gut, $R_a = 87$: gut, $R_a = 82$: mäßig-gut, $R_a = 74$: mäßig, $R_a = 58$: gering und $R_a = 33$: schlecht.

Ergebnisse

Es entstand eine semantische Deutung des CIE-Farbwiedergabeindex für verschiedene LED-Emissionspektren. Diese semantische Deutung sagt die Benutzerakzeptanz des jeweiligen LED-Emissionspektrums nach Farbwiedergabe voraus. Die semantischen Farbwiedergabe-Kategorien auf der Ordinate der Abbildung 4.23 erleichtern die Kommunikation der Farbwiedergabeeigenschaft der LED-

Lichtquellen zwischen den Herstellern der LED-Lichtquellen und -Leuchten, sowie deren Kunden. In der Zukunft kann eine ähnliche Akzeptanzbezogene Skalierung nicht nur für die LED-Emissionsspektren selbst, sondern auch für die einzelnen farbigen Objekte, die durch diese LEDs beleuchtet werden, ermittelt werden.

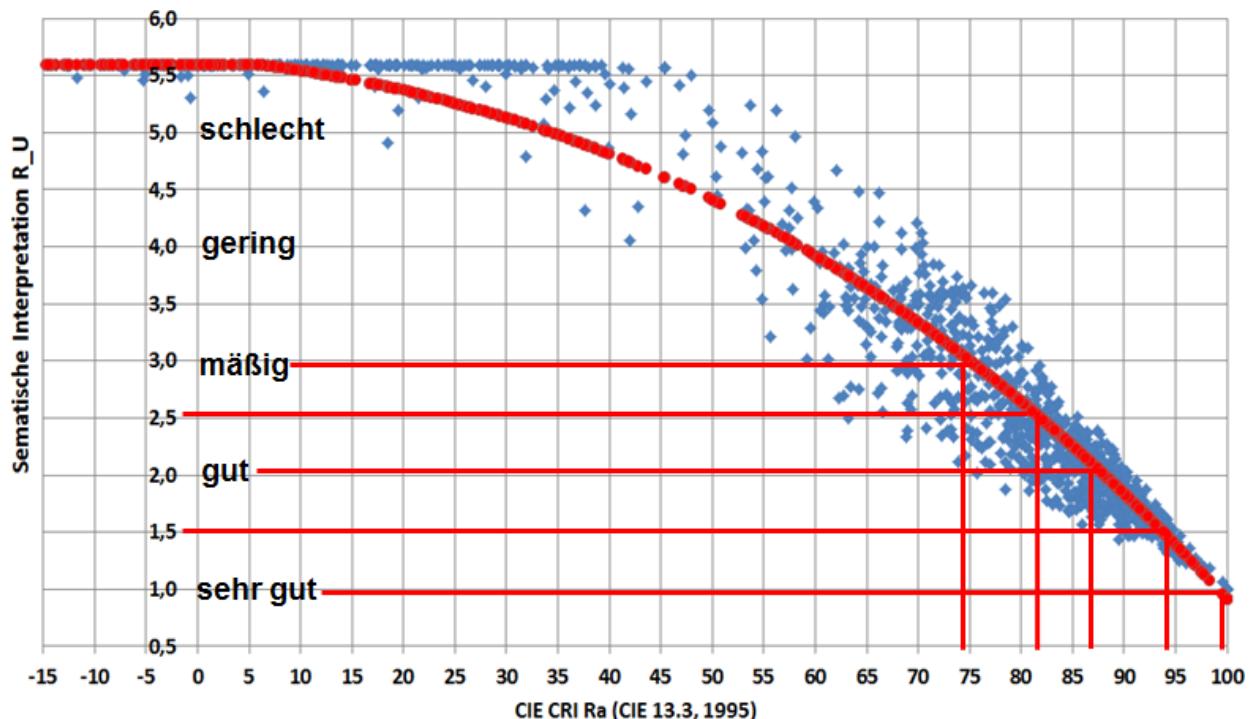


Abbildung 4.23: Akzeptanzbezogene (semantische) Deutung des CIE-Farbweitergabeindex für verschiedene LED-Lichtquellen. Blaue Zeichen: alle Ergebnisse. Rote Punkte: angepasste mittlere Tendenz

Zusammenfassung

Es entstand eine semantische Deutung des CIE-Farbweitergabeindex für verschiedene LED-Emissionsspektren. Diese semantische Deutung sagt die Benutzerakzeptanz des jeweiligen LED-Emissionspektrums nach Farbwiedergabe voraus und erleichtert die Kommunikation der Farbwiedergabeesigenschaft der LED-Lichtquellen zwischen den Herstellern der LEDs und LED-Leuchten sowie deren Kunden.

4.4 Mesopische Forschung - Ergebnisse

4.4.1 Motivation und Fragestellungen

Das mesopische Sehen oder das Dämmerungssehen findet nach der bisherigen Definition in einem Leuchtdichtebereich zwischen $0,001 \text{ cd/m}^2$ und etwa 5 cd/m^2 statt. Technologisch und beleuchtungstechnisch gibt es viele Anwendungsbereiche, die Kenntnisse des mesopischen Sehens erfordern

und weiteren Forschungsbedarf hervorrufen. Ein wichtiger Anwendungsbereich ist die Straßenbeleuchtung.

Straßenbeleuchtung:

Die Straßen nach Leuchtdichtekriterien (ME-Klassen) werden nach der DIN EN 13201 zwischen $0,3 \text{ cd/m}^2$ und 2 cd/m^2 mit verschiedenen Lichtquellentypen beleuchtet. Hierzu zählen Natrium-dampflampen (NAV), Quecksilberdampflampen (HQL), Halogen-Metalldampflampen (MH), Cosmopolis-Lampen (CPO) und weiße LEDs mit Bereichen der ähnlichsten Farbtemperatur zwischen 2800 K und 6500 K. Die spektrale Verteilung dieser Lampentypen ist sehr unterschiedlich und enthält unterschiedliche Anteile in den blauen oder roten Wellenlängenbereichen. In diesem Kontext und gerade in einer Zeit des Übergangs von NAV- und HQL-Lampen zu weißen LEDs entstehen folgende Fragestellungen:

- Empfindet der Verkehrsteilnehmer die Beleuchtung der Straße mit unterschiedlichen Lampenspektren und bei gleicher mittlerer Leuchtdichte unterschiedlich hell?
- Welche Spektren sind für die Objektdetektion und für die Objektidentifikation (z.B. Gesichtserkennung) gut geeignet und welche spektrale Änderung muss man vornehmen, um die Sehbedingung in der Straßenbeleuchtung bei einer hohen Energieeffizienz zu verbessern?
- Welche Lampentypen und mit welchen Spektren sind für die Stadtbeleuchtung angenehm und akzeptabel für die Anwohner?

Das Ziel dieses Teilprojekts konzentriert sich auf die Grundlagen des mesopischen Sehens, auf neue experimentelle Ergebnisse der Helligkeit und Detektion, um daraus einige grundlegende Schlussfolgerungen für die Verkehrslichttechnik ziehen zu können. Die wichtigsten Sehaufgaben in der Verkehrslichttechnik beinhalten:

- die visuelle Bewertung der Helligkeitsempfindung,
- den visuellen Suchvorgang, die Detektion der (oft gefährlichen) Sehobjekte,
- und das Erkennen dieser Sehobjekte.

Dabei erweist sich die Sehaufgabe der Objektdetektion (ohne das Erkennen) - die Grundlage für eine schnelle Reaktion – als besonders verkehrsrelevant.

Abbildung 4.24 zeigt in der Praxis den Vergleich zwischen den mesopischen Sehaufgaben Detektion und Helligkeitsbewertung. Die gefüllte rote Kreisfläche stellt das zentrale Sehfeld am Fixationspunkt des Beobachters mit einem Durchmesser von 2° dar. Der rote Kreis ist das Sehfeld mit einem Durchmesser von 10° . Die Abbildung links zeigt die Detektion eines mesopischen Sehobjektes, hier, ein künstliches graues Sehobjekt in einem Feldversuch bei 5° in der Peripherie (roter Pfeil). Die Abbildung rechts zeigt ein Beispiel für die mesopische Helligkeitsempfindung. Es erfolgt in der Regel ein langes Betrachten der gesamten Straßenszene. Der rote Pfeil zeigt den möglichen Erscheinungsort eines zu detektierenden Sehobjektes (z.B. Fußgänger) zwischen den beiden parkenden Autos.

Im Beispiel der Abbildung 4.24 (links) erscheint das künstliche graue Sehobjekt 5° peripher mit einem bestimmten Strahldichteunterschied (Kontrast) im Vergleich zum Hintergrund. Das abgebildete mesopische Sehobjekt befindet sich an der sog. Detektionsschwelle. Die Detektionsschwelle kann wie folgt definiert werden: der Kontrast, mit dem das Sehobjekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 %

detektiert wird. Die typische Sehaufgabe der mesopischen Detektion stellt daher eine sog. Schwellenbeobachtung in der Peripherie zwischen 5° und 30° dar. Hier tragen die räumlichen Signalunterschiede der Rezeptoren mit niedrigen Ortsfrequenzen zwischen Sehobjekt und dessen Hintergrund zur Detektion bei.



Abbildung 4.24: Mesopische Sehaufgaben Detektion (links) und Helligkeitsbewertung (rechts)

Im Beispiel der Abbildung 4.24 (rechts) betrachtet und bewertet der Beobachter die Helligkeit der gesamten Szene. In der Abbildung sind das zentrale Sehfeld am Fixationspunkt (2°) sowie ein Teil des Sehfeldes mit einem Durchmesser von 10° gekennzeichnet. Ein typischer Erscheinungsort (5°) eines zu detektierenden Sehobjektes (z.B. Fußgänger) zwischen den beiden parkenden Autos ist ebenfalls markiert. Im Gegensatz zur Detektion arbeitet das Sehsystem bei der Bewertung der Helligkeit mit den überschwelligen Rezeptorsignalen der räumlich ausgedehnten Sehfeldbereiche. Dementsprechend sind die retinalen und postretinalen Verarbeitungsmechanismen des Sehsystems für die Detektion bzw. die Helligkeitswahrnehmung unterschiedlich.

Für das Erkennen eines Sehobjektes (z.B. Buchstaben) wandert das zentrale 2°-Sehfeld mit der höchsten Sehschärfe (rote Kreisflächen in Abbildung 4.24) durch Augenbewegungen zum Sehobjekt. Dort werden die Sehdetails der Buchstaben Schritt für Schritt abgetastet.

4.4.2 Mesopische Helligkeitswahrnehmung unterschiedlicher Lampenspektren

In einem Experiment wurden von Versuchspersonen die wahrgenommenen Helligkeiten anhand von zwei direkt aneinander grenzenden Sehfeldern visuell abgeglichen. Die Testpersonen saßen in einem Beobachtungsabstand von 1 m vor einem Doppelkammer-Lichtkasten in einem dunklen Raum. Die einzige Lichtquelle stellt das zweiteilige Sehfeld des Lichtkastens dar (s. Abbildung 4.25).

Die Referenzlichtquelle wurde in der rechten Kammer installiert. Die photopischen Leuchtdichte-werte dieser Referenz bildeten die drei mesopischen Adaptationsniveaus $0,1/0,5/1,5 \text{ cd/m}^2$. Die Testlichtquellen befanden sich in der linken Kammer. Nach einer mesopischen Adaptationszeit von mehr als 20 Minuten mussten die Versuchspersonen die Leuchtdichte des Testfeldes (links, s.

Abbildung 4.25) auf die gleiche wahrgenommene Helligkeit einstellen, wie die Helligkeit des immer gleich bleibenden Referenzfeldes. Jede Testperson führte für jedes Adaptationsniveau und jede Testlichtquelle drei Wiederholungen des Helligkeitsabgleichs durch. Tabelle 2.1 beschreibt die Referenz- und Testlichtquellen. Alle farbmetrischen Daten wurden direkt am kreisförmigen zweiteiligen Sehfeld gemessen.

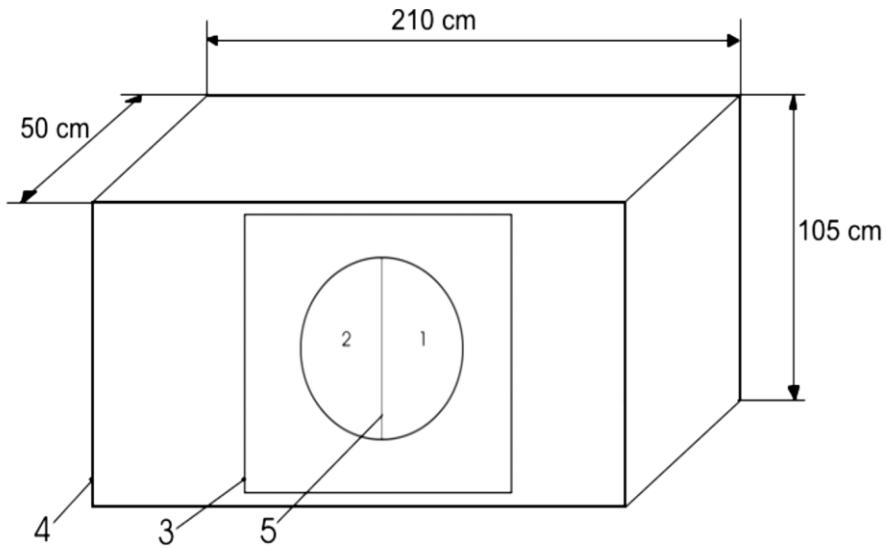


Abbildung 4.25: Experimenteller Aufbau für den mesopischen Helligkeitsabgleich
 1: Referenzfeld (fix); 2: Testfeld (Helligkeit einstellbar)
 3: Platte mit dem kreisförmigen zweiteiligen Sehfeld (Durchmesser = 55 cm, entspricht einem Sehwinkel von 30,8°)
 4: Lichtkasten; 5: Trennplatte

Tabelle 4.1: Referenz- (R)/Testlichtquellen (T); Farbtemperatur T_c in K; LQ: Lichtquelle

LQ	Beschreibung	R/T	Typ	x	y	T_c	R_a
HQL	Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	R	HQL-MBF-U	0,390	0,380	3560	54
CPO	Cosmopolis-Lampe	T	CPO-T	0,483	0,412	2440	60
MH	Halogen-Metalldampflampe	T	CDO-TT	0,426	0,446	3510	67
NAV	Natriumdampf-Hochdrucklampe	T	SON-T	0,553	0,421	1860	-6
H7	Halogenglühlampe	R	H7	0,430	0,408	3160	98
XE	Xenonlampe	T	D1	0,386	0,392	3960	70
LED	Weiße LED	T	LED	0,303	0,284	7860	82

Tabelle 2.1 zeigt, dass die HQL-Lampe als Referenzlichtquelle für die untersuchten Straßenlichtquellen (Testlichtquellen, CPO, MH und NAV) verwendet wurde. Die Helligkeitsabgleiche wurden mit 19 Testpersonen und jeweils 3 Wiederholungen durchgeführt. Als Referenzlichtquelle bei der Untersuchung der Kfz-Testlichtquellen XE und LED wurde die H7-Lampe verwendet. Hier wurden Helligkeitsabgleiche mit 18 Testpersonen und jeweils 3 Wiederholungen durchgeführt.

Der resultierende experimentelle Datensatz bestand aus den photopischen Leuchtdichteverhältnissen $R = (L_{\text{test}}/L_{\text{ref}})$ bei visuell gleicher Helligkeit für die verschiedenen Test-/Referenzlichtquellen, Referenz-Leuchtdichteniveaus ($L_{\text{ref}} = 0,1; 0,5$ oder $1,5 \text{ cd/m}^2$), Versuchspersonen und Wiederholungen. Diese R-Werte wurden über alle Versuchspersonen und Wiederholungen gemittelt. Abbildung 4.26 veranschaulicht die durchschnittlichen photopischen Leuchtdichteverhältnisse bei der gleichen wahrgenommenen Helligkeit.

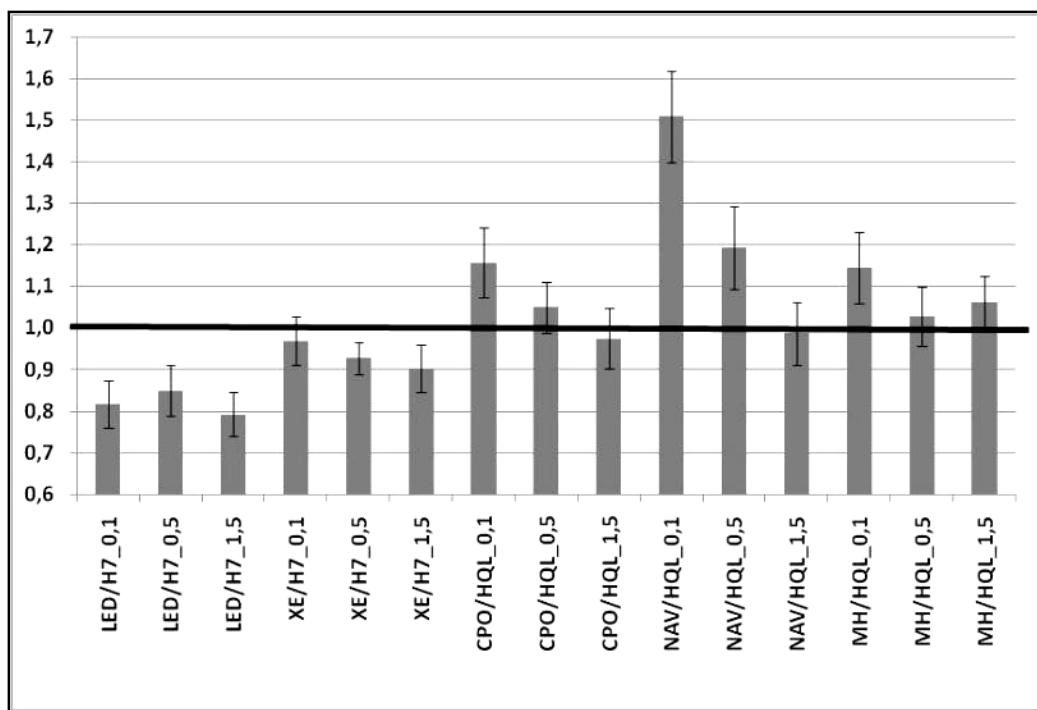


Abbildung 4.26: Photopische Leuchtdichteverhältnisse bei visuell gleicher Helligkeit
 Berechnung (Mittelwerte): $R = (L_{\text{test}}/L_{\text{ref}})$ für die verschiedenen Test-/Referenzlichtquellen und Referenz-Leuchtdichteniveaus (L_{ref}) mit 95%-Konfidenzintervallen. Die schwarze horizontale Linie zeigt die Gleichheit der Test- und Referenz-Leuchtdichten ($R = 1,00$)

Aus Abbildung 4.26 geht Folgendes hervor:

- Um im Vergleich zu der H7-Referenzlampe mit $T_c = 3160 \text{ K}$ die für die Testpersonen gleiche wahrgenommene Helligkeit mit weißem LED-Licht zu erzeugen, benötigt man je nach Adaptationsniveau im Durchschnitt nur etwa 80 - 85 % der photopischen Leuchtdichte.
- Beim Helligkeitsabgleich für die Straßenlichtquellen mit der weißen HQL-Lampe als Referenz brauchen die Versuchspersonen zwischen 5 - 50 % mehr photopische Leuchtdichte von

den Testlichtquellen CPO, NAV und MH, um einen identischen Helligkeitseindruck zu erhalten. Dieser Effekt ist auf dem $0,1 \text{ cd/m}^2$ -Niveau, d.h. im unteren mesopischen Adaptationsbereich, und bei der sehr gelblich wirkenden NAV-Lampe besonders ausgeprägt.

Als Schlussfolgerung aus diesem visuellen Helligkeitsversuch kann festgehalten werden, dass der Aufbau eines neuen mesopischen Helligkeitsmodells, zumindest für Straßenlampenspektren und typische Kfz-Lichtspektren erforderlich ist. Der Einsatz von Lichtquellen mit einer höheren empfundenen Helligkeitswirkung bietet grundsätzlich das Potential, Sichtbarkeit und Sehkomfort während der nächtlichen Verkehrsteilnahme zu erhöhen.

4.4.3 Mesopische Objektdetektion

Detektion bei verschiedenen Lampenspektren

Seit 2004 gibt es einige fundamentale Untersuchungen zur Ermittlung der spektralen Kontrastempfindlichkeitsfunktionen für die Netzhautpositionen 5° , 10° und 20° . Die Objekte, die detektiert werden sollen, erscheinen auf der Netzhaut peripher, d.h. außerhalb der Fovea. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein Autofahrer während der Fahrt auf die Fahrbahnmitte 70 m – 80 m vor ihm blickt. Objekte wie Fahrbahnmarkierungen, ein Reh oder ein geparkter Wagen am Straßenrand erscheinen dann unter den angegebenen Winkeln seitlich zu dieser Sichtachse und müssen rechtzeitig wahrgenommen werden.

Die ermittelten Funktionen werden in Abbildung 4.27 gemeinsam mit der $V(\lambda)$ -Funktion graphisch dargestellt. Diese Kurven wurden bei verschiedenen Adaptationsniveaus von 0,5 und $0,32 \text{ cd/m}^2$ ermittelt und weisen erheblich mehr spektrale Empfindlichkeitsanteile im Bereich von etwa 420 nm bis 530 nm gegenüber der $V(\lambda)$ -Funktion auf. Das bedeutet aber auch, dass Strahlungsquellen mit mehr Blauanteil förderlicher für die mesopische Detektion sind, als es deren photopische Leuchtdichte theoretisch voraussagt. Die Berücksichtigung dieser mesopisch aktiven Spektralanteile bei der gleichen photopischen Leuchtdichte wird durch den Begriff S/P-Verhältnis beschrieben. Dabei wird die skotopische Leuchtdichte, ermittelt aus der $V'(\lambda)$ -Funktion durch die photopische Leuchtdichte, ermittelt aus der $V(\lambda)$ -Funktion dividiert. Der S/P-Verhältnis findet bei der CIE-Publikation [25] Verwendung, um die für die Objektdetektion tatsächlich relevanten mesopischen äquivalenten Leuchtdichten zu berechnen.

Wird diese Berechnung für verschiedene Lichtquellen der Straßenbeleuchtung (HQL, NAV, MH, CPO) und der Kfz-Scheinwerfer (H7, Xe, LED, s. Abb. 3.28) bei verschiedenen Wartungswerten der Leuchtdichte der ME-Straßen angewandt, dann resultieren daraus die Werte in Tabelle 4.2.

Es wird deutlich, dass die Lichtquellen mit einem höheren S/P-Verhältnis eine höhere Sehleistung ermöglichen, wenn für das Einhalten des photopischen ME-Wartungswertes das mesopische Berechnungsverfahren eingesetzt wird. So ermöglichen Lichtquellen mit einem erhöhten Blauanteil in der spektralen Strahldichteverteilung ein besseres Detektionsvermögen. Der höchste Sehleistungsgewinn erreicht im Vergleich zur photopischen Leuchtdichte einen Wert von 24 % für die weiße LED in der ME6-Klasse. Wird stattdessen eine gelbliche Natriumdampf-Hochdrucklampe (NAV) mit niedrigem S/P-Verhältnis eingesetzt, entsteht ein Verlust von 13,38 %. Unter dieser Beleuchtung können kritische Verkehrssituationen entstehen, weil wichtige Sehobjekte nicht ausreichend detektiert werden können.

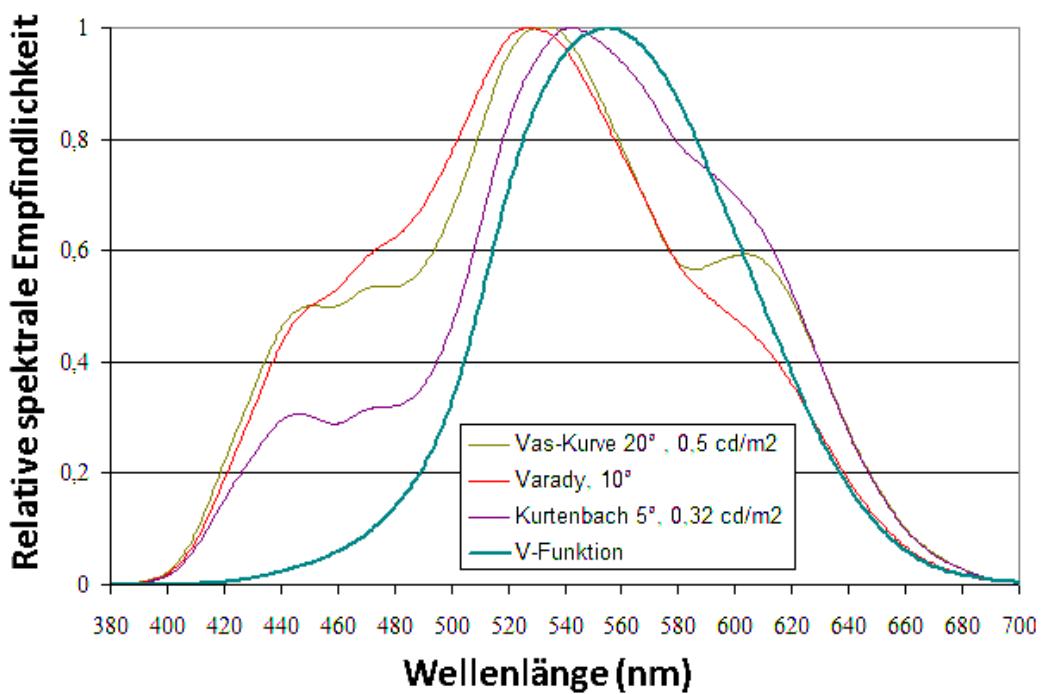


Abbildung 4.27: Mesopische spektrale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen für die Netzhautpositionen: 5 °, 10 ° und 20 °

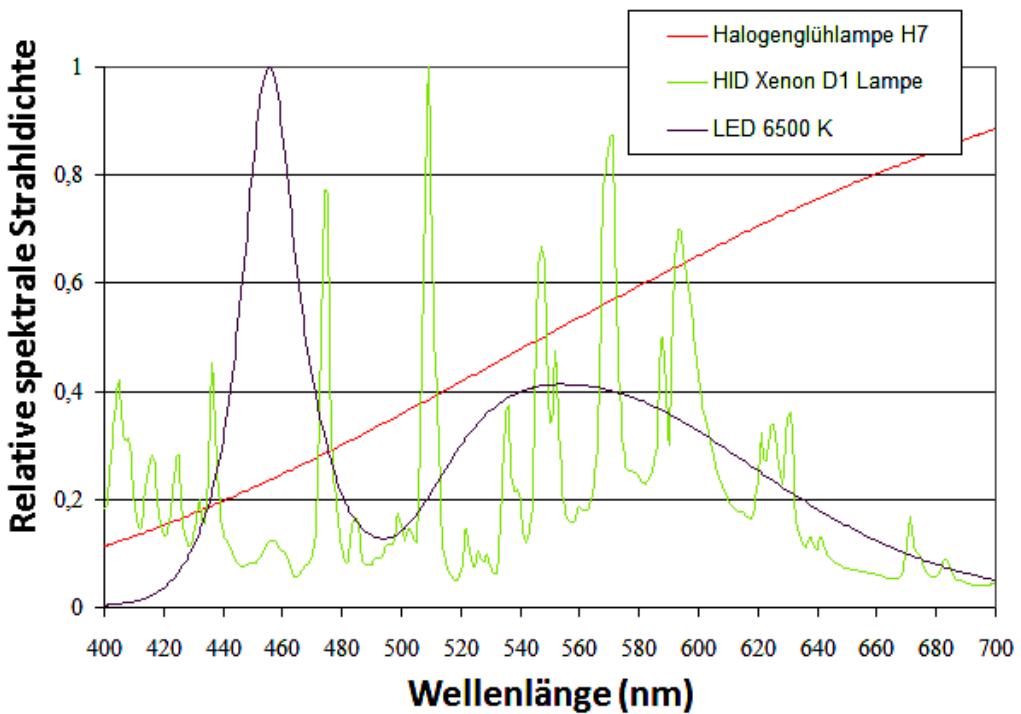


Abbildung 4.28: Relative spektrale Strahldichteverteilungen von Kfz-Scheinwerferlampen

Tabelle 4.2: Sehleistungsgewinn (positive Zahlen) oder Sehleistungsverlust (negative Zahlen) in Prozent, wenn die photopischen Leuchtdichten (Wartungswerte) laut DIN EN 13201 beibehalten werden

ME-Klasse	Wartungswert (cd/m ²)	HQL	CPO	MH	NAV	H7	Xe	LED
1	2,00	0,58	0,04	1,47	-3,49	2,94	3,57	6,64
2	1,50	0,78	0,06	1,99	-4,73	3,97	4,82	8,93
3	1,00	1,09	0,08	2,76	-6,61	5,51	6,68	12,37
4	0,75	1,32	0,10	3,35	-8,05	6,67	8,09	14,96
5	0,50	1,67	0,13	4,23	-10,26	8,43	10,21	18,84
6	0,30	2,16	0,17	5,46	-13,38	10,85	13,14	24,17
	S/P	1,10	1,01	1,26	0,42	1,53	1,64	2,24

Auffälligkeit von Fahrbahnmarkierungen

Seit dem Jahr 2007, mit der Einführung der LED in der Kfz- und Straßenbeleuchtung, stellte das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt fest, dass Fahrbahnmarkierungen bei der Nutzung von LED-Lichtsystemen häufig am auffälligsten und brillantesten erscheinen. Aus diesem Grund wurden die folgenden ausgewählten Fahrbahnmarkierungen spektral vermessen:

- 3M A 340, 3M A 380 SD, 3M A 540
- Berlack MF 30, Berlack MF 30 mit Glaskugeln
- Premark 662180

Diese Fahrbahnmarkierungen werden in der heutigen Verkehrstechnik als Markierungen Typ II in der Farbe Weiß häufig eingesetzt. In Abbildung 4.29 werden die relativen spektralen Strahldichtefaktoren von einigen der untersuchten Fahrbahnmarkierungen dargestellt.

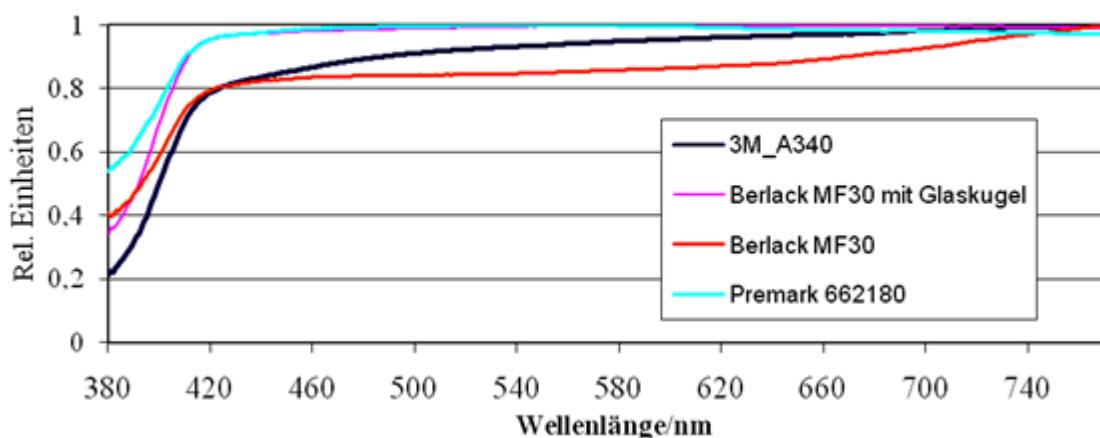


Abbildung 4.29: Relative Strahldichtefaktoren der untersuchten Fahrbahnmarkierungen

Wenn das Licht von einem Autoscheinwerfer oder einer Straßenleuchte unter unterschiedlichen Einfallswinkeln auf die Fahrbahnmarkierung und den Fahrbahnbelag auftrifft, so wird ein Teil reflektiert. Im visuellen System der Verkehrsteilnehmer löst dies eine Kontrastwahrnehmung aus. Die kontrasteffektive Strahldichte wird wie folgt berechnet:

$$L_{e,K} = \int S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot V_{KE}(\lambda, \theta) \cdot d\lambda \quad \text{Kontrasteffektive Strahldichte} \quad 4.1$$

mit:

$S(\lambda)$ spektrale Verteilung eines Lampentyps (s. Abbildung 4.28)

$\beta(\lambda)$ Strahldichtefaktor einer Fahrbahnmarkierung (s. Abbildung 4.29)

$V_{KE}(\lambda, \theta)$ spektrale Kontrastempfindlichkeit unter dem Winkel θ (s. Abbildung 4.27)

Gleichzeitig berechnet sich die photopische Leuchtdichte der Fahrbahnmarkierung wie folgt:

$$L_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot \int S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{Photopische Leuchtdichte} \quad 4.2$$

mit:

$V(\lambda)$ photopische Hellempfindlichkeitsfunktion (s. Abbildung 4.27)

Die sog. leuchtdichtebezogene kontrasteffektive Strahldichte KL wird gemäß der Gleichung 4.3 für jede Lichtquelle i und die Netzhautposition beim Winkel θ definiert.

$$K_{\text{eff}} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot \frac{L_{e,k}}{L_v} \quad \text{leuchtdichtebezogener effektiver mesopischer Kontrastfaktor} \quad 4.3$$

Die K_{eff} -Werte geben das Vermögen der jeweiligen Lichtquelle bezüglich der mesopischen Kontrastwahrnehmung der Fahrbahnmarkierung bei der gleichen photopischen Leuchtdichte L_v an. In Tabelle 3.3 werden diese K_{eff} -Werte für die Lichtquellen der Straßenbeleuchtung für die Fahrbahnmarkierung Premark 662180 gezeigt. Die Tendenz der Werte ist für alle anderen untersuchten Fahrbahnmarkierungen ähnlich.

Tabelle 4.3: Leuchtdichtebezogene kontrasteffektive Strahldichte K_{eff}
für die Lichtquellen der Straßenbeleuchtung und für die Fahrbahnmarkierung Premark 662180; Zweite Zahl: relativer Wert im Vergleich zur Natriumdampflampe (1,0)

Lampentyp	K_{eff}		
	$\theta = 5^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$
Natriumdampf-Hochdrucklampe NAV-70W-Super	1,05/1,00	0,80/1,00	0,89/1,00
Leuchtstofflampen 58W/840	1,19/1,13	1,10/1,38	1,19/1,33
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe HQL-80W-Deluxe	1,15/1,09	0,99/1,24	1,08/1,21
Halogen-Metallampen HQI-TS-70W-D	1,21/1,15	1,20/1,5	1,24/1,39
Halogen-Metallampen HQI-E-70W-WDL	1,16/1,10	1,05/1,31	1,12/1,26
LED 6500 K	1,26/1,2	1,30/1,63	1,33/1,49

Aus Tabelle 4.3 geht hervor, dass die Leuchtstofflampen und die Halogenmetallampen für die Winkel $10^\circ/20^\circ$ zwischen 26 % - 50 % mehr Kontrast erzeugen, als die Natriumdampflampen. Das höchste Kontrastvermögen hat die kaltweiße LED, die bei der Netzhautposition von 10° etwa 63 % mehr Kontrastvermögen als die Natriumdampflampe hat.

4.4.4 Mesopische Objekterkennung, Sehschärfe [26]

Die Sehschärfe ist das Ergebnis eines physiologischen Vorganges und dient zur Objektidentifikation oder Objekterkennung, wobei ein hohes Auflösungsvermögen des abtastenden Mediums (Netzhautrezeptor-Struktur) erfordert wird. In der Realität ist dieser Vorgang zur Gesichtserkennung der Verkehrsteilnehmer oder zur Verkehrszeichenidentifikation wichtig. Bei diesem Vorgang ist nur der Fovea-Bereich mit einem Gesichtsfeld von 2° oder weniger beteiligt.

Zur Untersuchung der Sehschärfe in einem sog. Kontrast-Erkennungstest für Buchstaben im mesopischen Bereich bei verschiedenen Lampenspektren wurde am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt eine Pelli-Robson-Testzeichentafel verwendet (s. Abbildung 4.30), die aus in Dreier-Gruppen zusammengesetzten Buchstaben mit verminderter Gruppenkontrast besteht. Die Buchstaben wurden aus 3 m Abstand jeweils von einer Testperson angeschaut und besaßen eine Zeichengröße von 48,5 mm, so dass ein Zeichensehwinkel α von weniger als 1° beobachtet wurde. Diese Zeichentafel wurde homogen und ohne Glanz mit jeweils einer der fünf getesteten Lampentypen (s. Tabelle 4.4) beleuchtet. Die Leuchtdichte der Tafel wurde zwischen etwa 0,08 bis 2 cd/m² bei jedem Lampentyp eingestellt.

Tabelle 4.4: Verwendete Lichtquellen im mesopischen Sehschärfeexperiment
Normfarbwertanteile, Farbtemperatur und S/P-Verhältnisse der Glühlampe, der drei Entladungslampen und der verwendeten weißen LED

	Glühlampe	HID 4300 K	HID 5000 K	HID 6000 K	LED
x	0,4447	0,3888	0,3663	0,3578	0,3544
y	0,4071	0,3968	0,3751	0,3506	0,3603
T_c	2894 K	3928 K	4392 K	4523 K	4693 K
S/P	1,437	1,585	1,803	2,044	1,753

Bei jeder Leuchtdichtheeinstellung und bei jedem Lampentyp musste jede der 15 Testpersonen (12 Studenten und 3 Testpersonen im Alter von 60-69 Jahren) die letztmögliche Zeichengruppe erkennen und dem Testleiter diese Buchstaben benennen. Die Buchstabengruppe galt als erkannt, wenn zwei der drei Buchstaben der Gruppen identifiziert wurden. Die Tafel wurde mit einer Leuchtdichtheekamera vermessen (s. Abbildung 4.30), woraus der Weber-Kontrast der einzelnen Buchstabengruppen berechnet wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchung werden in der Abbildung 4.31 dargestellt. Auf der Ordinate ist die Zahl der zuletzt identifizierten Zeichengruppe und auf der Abszisse die mit der $V(\lambda)$ -Funktion gewichtete mit der Leuchtdichtheekamera gemessene Leuchtdichte der Tafel dargestellt. Jede der fünf

Kurven auf dem Diagramm entspricht der Ergebniskurve für einen Lampentyp. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Änderung der Lampentypen mit ihren unterschiedlichen Spektren und Farbtemperaturen bei der gleichen photopischen Leuchtdichte und der Testzeichengröße von 1° keinen signifikanten Einfluss auf die Kontrasterkennung hat ($p = 0,41$).



Abbildung 4.30: Leuchtdichteaufnahme der verwendeten Pelli-Robson-Tafel

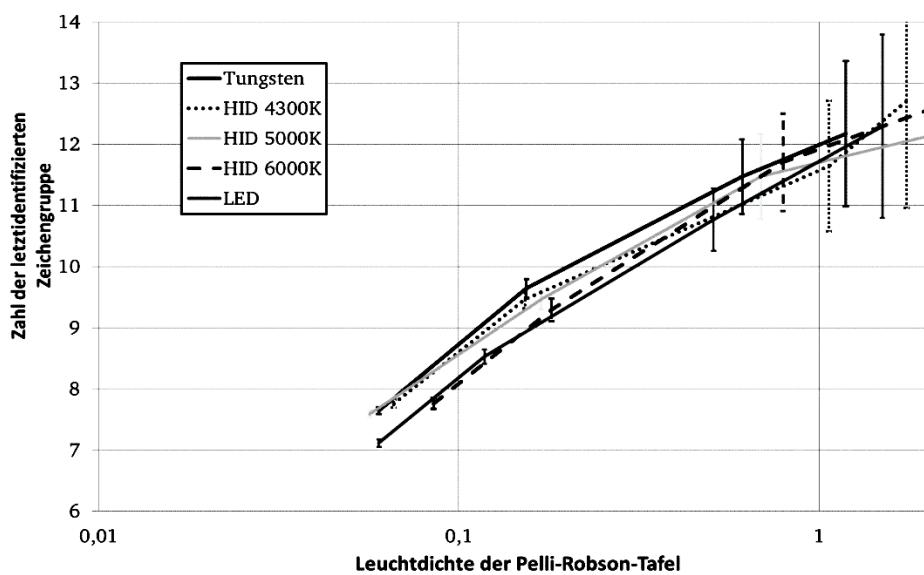


Abbildung 4.31: Einfluss der Lichtquelle auf die Sehschärfe
Mittlere Kontrasterkennung (Ordinate) und deren Standardabweichung bei verschiedenen Lampenspektren und Leuchtdichten (Abszisse) im mesopischen Kontrasterkennungstest

4.4.5 Zusammenfassung

Für die Helligkeitswahrnehmung eines großen Feldes (einer gesamten Straße) und für die Objektdetektion der Objekte bei einem Beobachtungswinkel von $\theta = 5^\circ, 10^\circ$ oder 20° auf der Netzhaut abseits der Fovea spielt die spektrale Verteilung der Lichtquellen eine große Rolle, z.B. bei der Detektion von Objekten oder Auffälligkeit von Fahrbahnmarkierungen. Dort ist die photopische Leuchtdichte kein relevantes Maß, um die Wahrnehmbarkeit zu beurteilen. Für die Objektidentifikation (mesopische Sehschärfe) hingegen ist die Sehleistung unabhängig von den Lampenspektren, so dass die photopische Leuchtdichte weiterhin benutzt werden kann.

Die entscheidende Frage für Lichtplaner, Leuchtenentwickler, Straßenbeleuchtungsabteilungen der Kommunen und Energieversorger der heutigen Zeit ist: „Kann man das Niveau der Straßenbeleuchtung unter die Normvorgabe senken, wenn ein Lampentyp mit einem hohen Blaulichtanteil oder mit einer höheren Farbwiedergabe anstatt einer konventionellen Lampe wie z.B. der NAV-Lampe verwendet?“

Die Antwort darauf ist ein eindeutiges „Nein“. Wenn man nur die Helligkeit oder Objektdetektion allein betrachtet, könnte man diese Niveausenkung vertreten. Da aber in der Verkehrslichttechnik alle drei Sehauflagen Helligkeit, Detektion und Objektidentifikation erforderlich sind, bleiben die durch die Normen vorgegebenen photopischen Leuchtdichten aus der heutigen Sicht gültig.

4.5 Stroboskopartige Effekte von PWM-gesteuerten LED-Leuchten

4.5.1 Motivation

Zur Dimmung von LED-Leuchten werden zwei Verfahren verwendet: Die Konstantstromregelung und die Pulsweitenmodulation (PWM). Die Stromänderung führt zu einer visuell wahrnehmbaren Veränderung des emittierten Spektrums. Bei LED-Anwendungen wie der Film- und TV-Beleuchtung, der Shop-Beleuchtung sowie der Museums- und Hotelbeleuchtung ist das oft nicht akzeptabel. Für viele preissenstitive Anwendungen wie Kfz-Beleuchtung und Bürobeleuchtung ist die notwendige Schaltung zur Stromänderung zudem zu teuer. Deshalb wird meistens die PWM zur Dimmung vorgezogen. Dabei wird der Strom durch die LED mit einer festgelegten Frequenz an- und ausgeschaltet. Aufgrund der Trägheit der lichtempfindlichen Rezeptoren im Auge wird eine mittlere Helligkeit der LED nach dem Talbot-Gesetz wahrgenommen. Diese kann über das Verhältnis von An- zu Auszeit stufenlos eingestellt werden.

Um das Flimmern zu vermeiden muss die PWM-Frequenz über der Flimmerverschmelzungsfrequenz, also weit über 100 Hz liegen. Das hochfrequente An- und Ausschalten hoher Ströme führt allerdings zu Bildung starker elektromagnetischer Felder und damit zur potentiellen Störung von Elektrogeräten in der Nähe der Leuchte, da die Leuchtenhersteller zum guten Teil aus Kostengründen die Leitungsabschirmung sparen. Aus diesem Grund wählen viele Leuchtenhersteller eine möglichst geringe PWM-Frequenz.

Bei schnellen Augenbewegungen oder bei der schnellen Bewegung von Gegenständen, wie beispielsweise bei Ventilatoren, schnellen Handbewegungen beim Schreiben und Malen, kommt es jedoch zu stroboskopartigen Effekten. Diese sind umso auffälliger, je geringer die PWM-Frequenz ist. Aus diesem Grund ist es wichtig, eine bestimmte Frequenz und ein bestimmtes Puls-Pausen-Verhältnis experimentell zu bestimmen, bei der visuelle Erscheinungen wie Flimmern und stroboskopische Erscheinungen nur noch leicht wahrnehmbar sind.

4.5.2 Versuchsaufbau- und -organisation

Für den Versuch wurde ein neues Arbeitszimmer mit folgenden Merkmalen eingerichtet.

- Büro mit weißen Wänden (s. Abbildung 4.32), abgedeckten Fenstern (kein Licht von außen),
- Arbeitsplatz: weißer Tisch, Notebook,
- Deckenleuchte mit 8 PWM-gesteuerten LEDs, 11 PWM-Einstellungen, diffuse Beleuchtung,
- $E = 250 \text{ lx}$ auf Tischoberfläche bei jeder Einstellung.



Abbildung 4.32: Versuchsräum

Der Versuchsaufbau hatte folgende Eigenschaften:

- LEDs (weiß, 8 x Citizen CL-L233-MC13W1-C, $T = 4000 \text{ K}$, $R_a = 85$)
- Treiberelektronik: PWM-Steuerung mit einstellbarem Strom
- 11 Testsignale (5 PWM-Frequenzen: 100, 200, 300, 400, 1000 Hz, 2 Tastverhältnisse: 20 %, 50 % und Konstantstrom)

- Randomisierte Reihenfolge, gleiche Reihenfolge für alle Probanden
- insgesamt 37 Probanden (23 Männer, 14 Frauen) mit folgender Altersstruktur:
 - Alter: 22 bis 61 Jahre
 - 21 Probanden bis 30 Jahre
 - 11 Probanden 30 bis 40 Jahre
 - 5 Probanden über 40 Jahre

Die Probandenbewertung erfolgte bei jeder Einstellung beim Ausführen unterschiedlicher Tätigkeiten (s. Abbildung 2.18a-d):

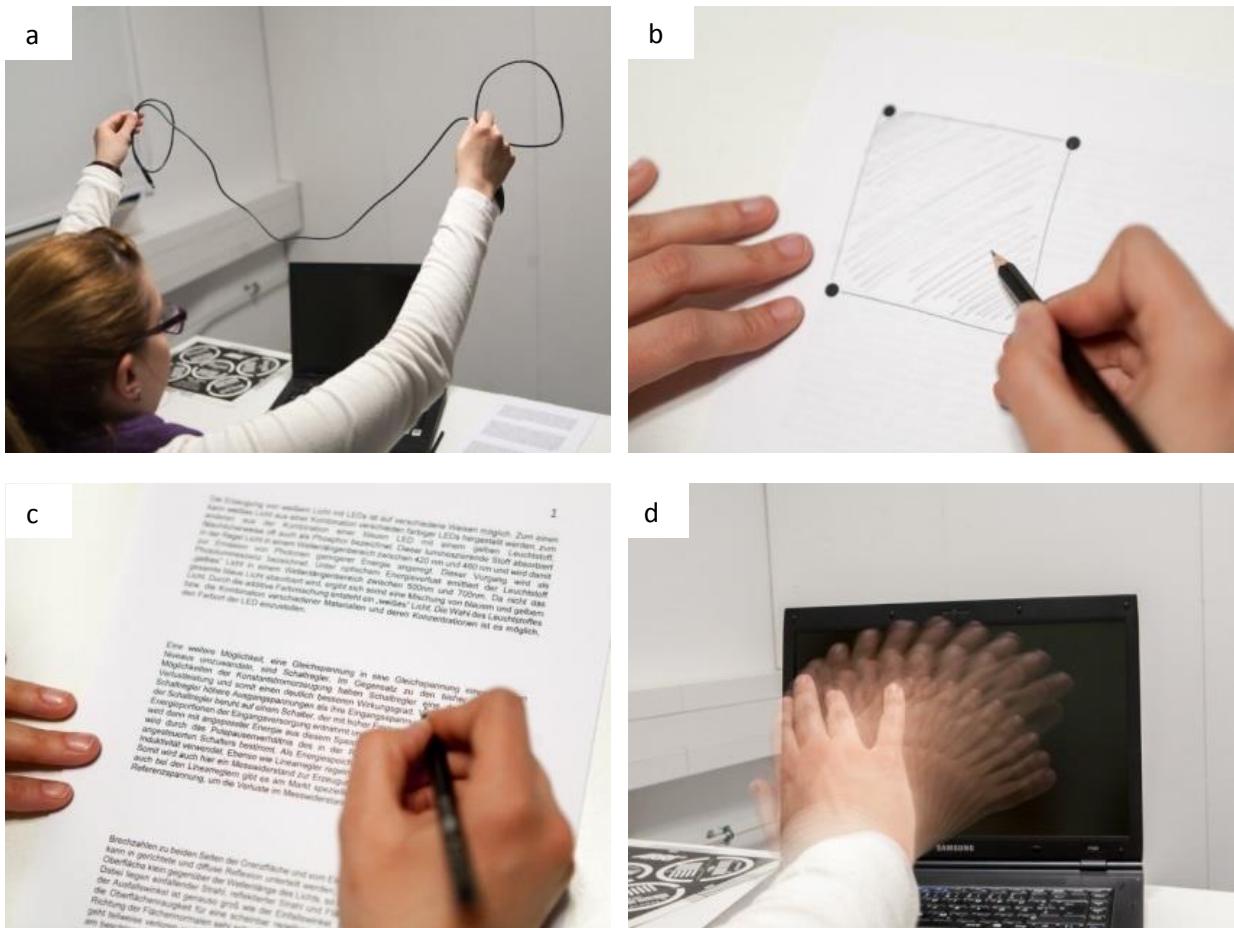


Abbildung 4.33: Ausführen unterschiedlicher Tätigkeiten

- Maus anschließen
- Schraffierung
- Wörter zählen und unterstreichen
- Handbewegung

Die Bewertung der Auffälligkeit von Flimmern oder Stroboskopeffekten erfolgte auf einer Skala von -2 bis 2 mit

- - 2: nicht wahrnehmbar
- + 2: sehr deutlich wahrnehmbar.

4.5.3 Ergebnisse der Bewertung

Abbildung 4.34 zeigt das Ergebnis bei einem Tastverhältnis von 20 % bei 5 Frequenzen (100, 200, 300, 400, 1000 Hz). Die Skalierung -1 (leicht wahrnehmbar) wird bei schnellen, aber typischen Handlungen wie Schraffierungen (Malen), Handbewegen und „Maus anschließen“ bei einer Frequenz zwischen 300 Hz und 400 Hz erreicht. Diese Frequenz sollte deshalb als Zielwert für derartige Tätigkeiten verwendet werden.

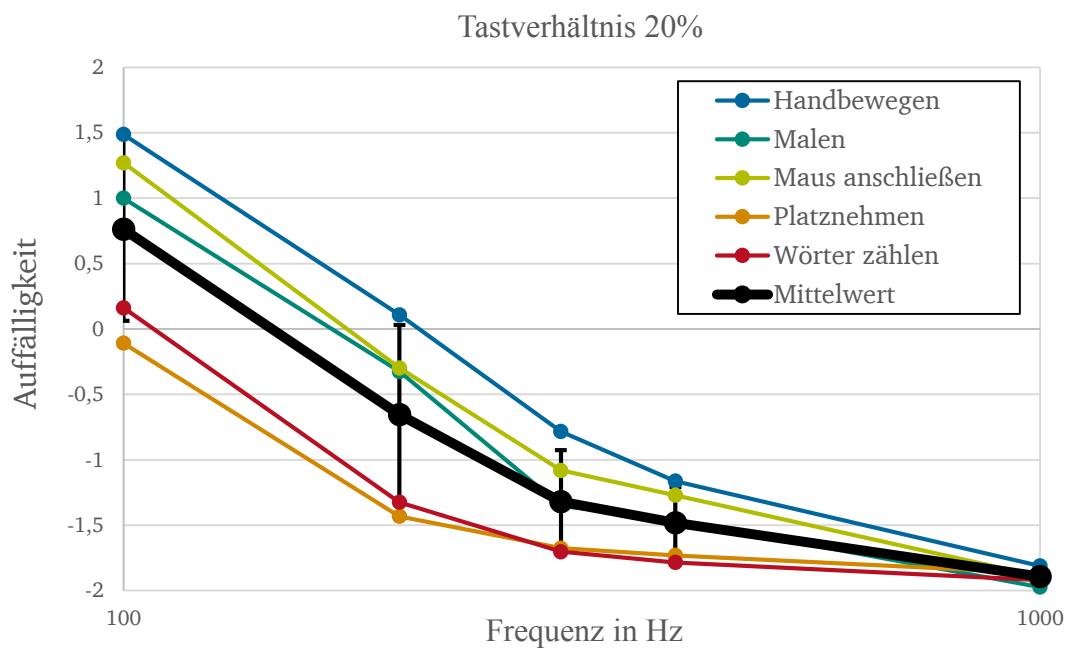


Abbildung 4.34: Ergebnisse der Auffälligkeit

5 Risikomanagementsystem

Das folgende Kapitel beschreibt den Nutzen und die Ziele der Einführung eines technischen Risikomanagementsystems im Rahmen des PQL-Projektes.

Unternehmen sind einer Fülle von Risiken bei der Entwicklung und Herstellung von LED-Leuchten ausgesetzt, welche das Erreichen der Zielsetzung, eine qualitativ hochwertige LED-Leuchte zu entwickeln und herzustellen, gefährden können. Dies ist insbesondere aufgrund der langen prognostizierten Lebensdauer der LED-Leuchten ein Problem, da langfristig auftretende potentielle Fehler analysiert und bedacht werden müssen. Zur Beherrschung dieser Risiken empfiehlt sich die Einführung eines Risikomanagementsystems, welches vorrausschauend Fehler identifiziert und analysiert und hilft, diese zu beseitigen. Hierbei gilt, je früher ein Fehler entdeckt wird, desto geringer sind die durch ihn verursachten Kosten (Abbildung 5.1).

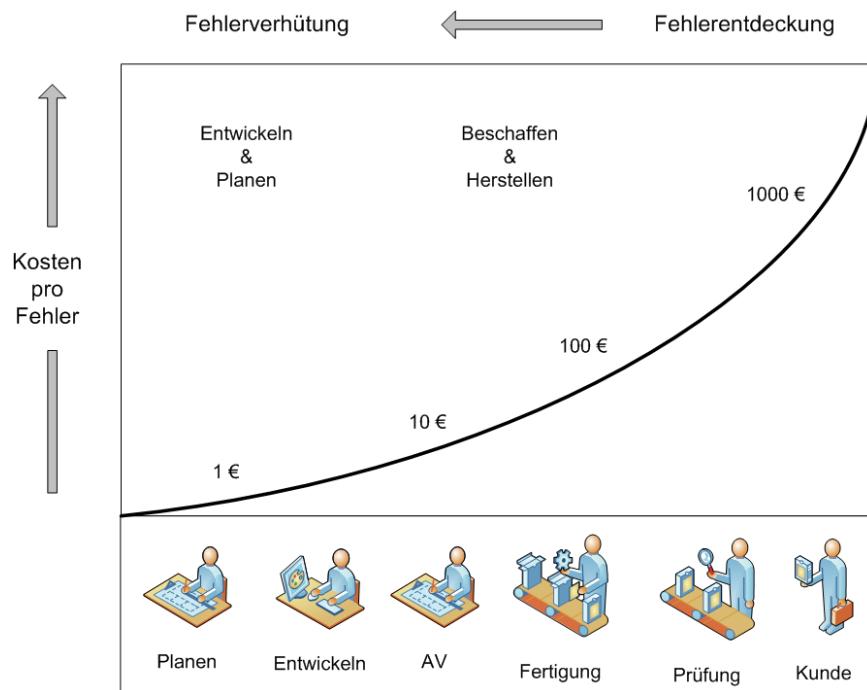


Abbildung 5.1: Fehlerkosten 10er-Regel [9]

Abbildung 5.1 veranschaulicht, dass der Risikomanagementprozess über den gesamten Produktlebenszyklus der LED-Leuchte betrachtet werden und idealerweise in der Planungsphase beginnen sollte. Da in der deutschen Leuchtenindustrie vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) am Markt agieren, soll der Fokus des Forschungsprojekts insbesondere auf diesen Unternehmen liegen. Grundsätzlich entstehen bei der Einführung von Risikomanagementsystemen branchenübergreifend Probleme und Herausforderungen, welche mithilfe der vorliegenden Forschungsergebnisse überwunden werden sollen [11]. Aus diesem Grund wurden die größten Herausforderungen für die LED-Technologie analysiert und darauf aufbauend Lösungen hierfür entwickelt.

Ziel des an der FH Bielefeld angesiedelten PQL-Projektteils war es, die beteiligten Unternehmen des PAs (Projektbegleitender Ausschuss) für diese Problematik zu sensibilisieren. Ihnen sollte ein Tool in Form einer Fehler- und Schadensdatenbank an die Hand geben werden, um so die größten Risiken sowie deren Vermeidungsmaßnahmen zu detektieren und eine Informationsplattform aufzubauen, in der die beteiligten Unternehmen und Hochschulen anonym Wissen austauschen und auf diese Weise voneinander lernen können. Aktuelle Forschungsergebnisse sollen so zeitnah an die Firmen weitergegeben werden, um dadurch einen Wettbewerbsvorteil gegenüber nichteuropäischen Leuchtenherstellern zu erzielen.

5.1 Charakteristika der Fehler- und Schadensdatenbank

Aufgrund der Wünsche des PAs wurde die Veröffentlichung der Fehler- und Schadensdatenbank im Projekt vorgezogen. Statt diese, wie ursprünglich geplant, gegen Ende des Projektes den beteiligten Unternehmen zugänglich zu machen, war ihre Nutzung bereits seit dem 01.01.2013 möglich. Im Vorfeld wurden geeignete Entwicklungsumgebungen analysiert. Die Entscheidung fiel zugunsten einer SQL-Datenbank aus, welche auf einem virtuellen Server der Universität Bielefeld läuft. Sie ist über eine URL der FH-Bielefeld (pqlser-ver.fh-bielefeld.de) zu erreichen. Der Nutzerzugang ist über einen Internetbrowser ohne Installation weiterer Software möglich.

Des Weiteren wurde ein mehrstufiges Sicherheits- und Nutzerkonzept für die Datenbank entwickelt, um die Anonymität der sensiblen Daten sicherzustellen.

Um Kritik und Hinweise der Nutzer direkt verarbeiten zu können, wurden zwei Feedback-systeme in die Datenbank integriert. Zum einen gibt es ein allgemeines Feedback, welches Anregungen für die generelle Handhabung ermöglichen sollte und zum anderen gibt es ein fehlerspezifisches Feedback-system, über das jeder Nutzer Vorschläge für Änderungen bzw. Ergänzungen bei einzelnen Fehlern einspeisen kann. Diese Hinweise wurden anschließend von der FH Bielefeld geprüft und im Anschluss daran übernommen oder in nicht nachvollziehbaren Fällen verworfen.

5.2 Anpassung des Risikomanagementprozesses im PQL-Projekt

Im folgenden Abschnitt sollen die Unterschiede zwischen dem klassischen Vorgehen im Risikomanagement und der Gestaltung im Rahmen des PQL-Projekts verdeutlicht werden.

5.2.1 Risikomanagementprozess

Der Risikomanagementprozess ist ein zyklisches System, in dem durch die Anwendung logischer und systematischer Verfahren Risiken ermittelt, analysiert, bewertet und ggfs. behandelt werden. Der Prozess wird kontinuierlich überwacht und dokumentiert. Aufgrund einer durchgeföhrten Analyse von Risikomanagementmethoden kristallisierte sich die FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) als die geeignetste Methode für den Aufbau der Datenbank heraus. Diese Methodik bietet folgende Vorteile: Sie ist allgemein anerkannt, entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik [4] und ist die am weitesten verbreitetste Methode in produzierenden Unternehmen, wie eine Studie des Fraunhofer Instituts bestätigt [11].

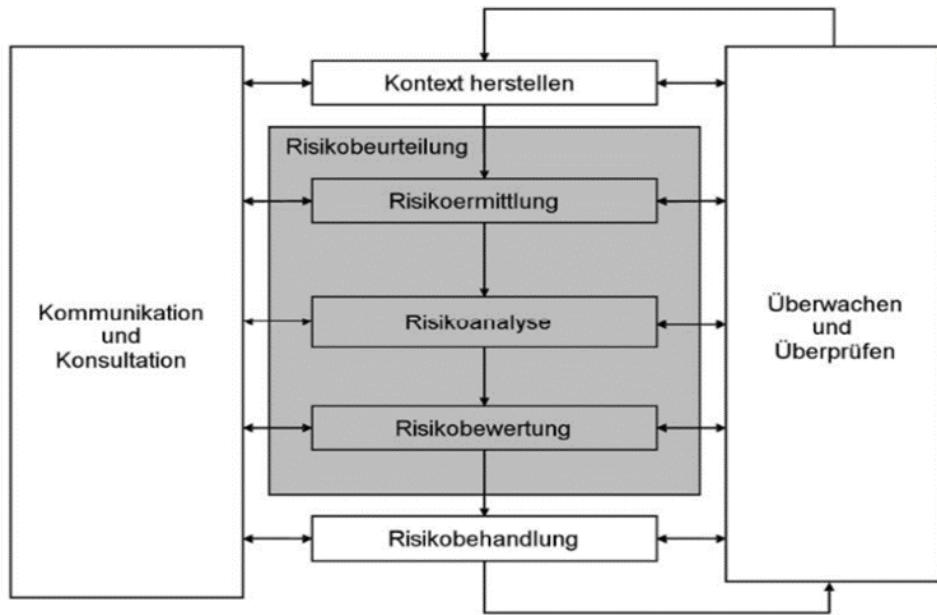


Abbildung 5.2: Risikomanagementprozess gemäß DIN 31010 [5]

Bei der FMEA wird jedem potentiellen Fehler eine Fehlerfolge und eine Fehlerursache zugeordnet, um so Kausalzusammenhänge beschreiben zu können (Abbildung 5.3).

FE Fehlerort / Fehlermerkmal	PFE Potentielle Fehler	FEF Fehlerfolge	FEU Fehlerursache
Verarbeitung / ESD	Kurzzeitiger Fluss größerer Ströme	Schmelzen der Leiterbahnen, Totalausfall des Bauteils	Elektrostatische Aufladung von Personen (Spannungen von einigen tausend Volt) und deren Entladung zwischen leitenden Gegenständen

Abbildung 5.3: FMEA-Kausalkette der PQL Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]

Aus den oben skizzierten Erwägungen soll der Risikomanagementprozess idealerweise mit der ersten Produktidee beginnen. Da im PQL-Projekt jedoch bereits marktreife LED-Leuchten vermessen und untersucht wurden, sollten diese auch der beispielhaften Durchführung des Risikomanagementprozesses dienen. Zudem sollte eine Wissenssammlung auf herstellerübergreifender Ebene geschaffen werden, wodurch die beteiligten Unternehmen voneinander lernen können. Hierdurch waren einige Anpassungen vorzunehmen, welche im Folgenden beschrieben werden.

5.2.2 Strukturanalyse

Die klassische FMEA wird produktspezifisch zu Beginn des Produktlebenszyklus gestartet. Das jeweilige Unternehmen nimmt die Strukturanalyse anhand von Stücklisten vor und es werden FMEAs für jedes Element der Liste angefertigt. Aufgrund der Struktur des PQL-Forschungsprojekts musste

jedoch ein anderes Vorgehen entwickelt werden, da hier eine Datenbank für verschiedenste bereits existierende LED-Leuchten erarbeitet werden sollte.

Aus diesem Grund wurde zur besseren Strukturierung der Fehler eine typische LED-Leuchte in ihre Baugruppen aufgeteilt (Abbildung 5.4). In den jeweiligen Untergruppen gibt es zusätzlich die Möglichkeit im Feld „Fehlerort/Fehlermerkmal“ den Ort des Fehlerauftretens genauer zu spezifizieren (Abbildung 5.5).



Abbildung 5.4: Systemstruktur der PQL Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]

Die genauere Aufschlüsselung des Fehlerortes/Fehlermerkmals ist exemplarisch in Abbildung 5.5 für den Unterpunkt LED dargestellt. Die Aufteilung wurde mit kooperierenden Unternehmen abgestimmt und hat sich bei der Fehlerermittlung bewährt.

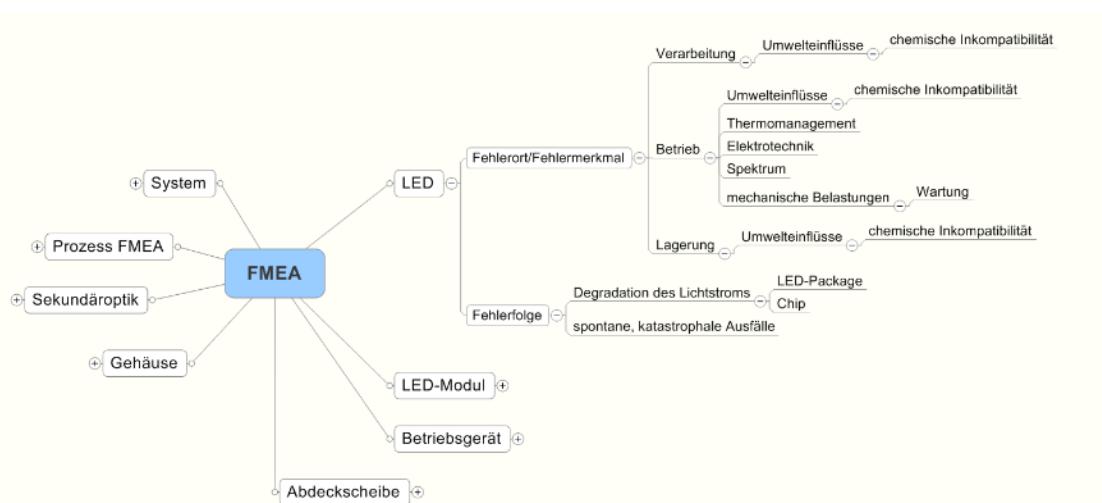


Abbildung 5.5: Mindmap der FMEA-Fehlerstruktur [eigene Darstellung]

5.2.3 Risikoidentifizierung

Die Risikoidentifizierung oder Risikoermittlung beinhaltet den Prozess des Suchens, Erkennens und Aufzeigens von Risiken. Es sollen alle Einflussfaktoren identifiziert werden, welche die Zielsetzung des Systems bzw. Produktes, z.B. der LED-Leuchte, gefährden könnten. Die Informationen hierfür können z.B. aus Betriebsanweisungen der Komponentenhersteller, aus der Fachliteratur oder aus Expertenwissen generiert werden. Neben technischen sind auch menschliche und organisatorische Risikofaktoren zu benennen [5].

Zum Aufbau der Motivation und zur Erleichterung des zeitlichen Aufwands der Nutzer wurde ein Basisdatensatz aufgebaut. Die Informationsquellen hierfür sollten praxisnah und vielfältig sein, um einen unmittelbaren Informationsgewinn für die Nutzer zu generieren. Somit wurde dem eigentlichen Risikomanagementprozess (Abbildung 5.6, Phase 2), welcher mit der Risikoidentifizierung beginnt, eine weitere Phase vorgeschaltet (Abbildung 5.6, Phase 1). In dieser Phase 1 analysiert und bewertet der Nutzer den Basisdatensatz.

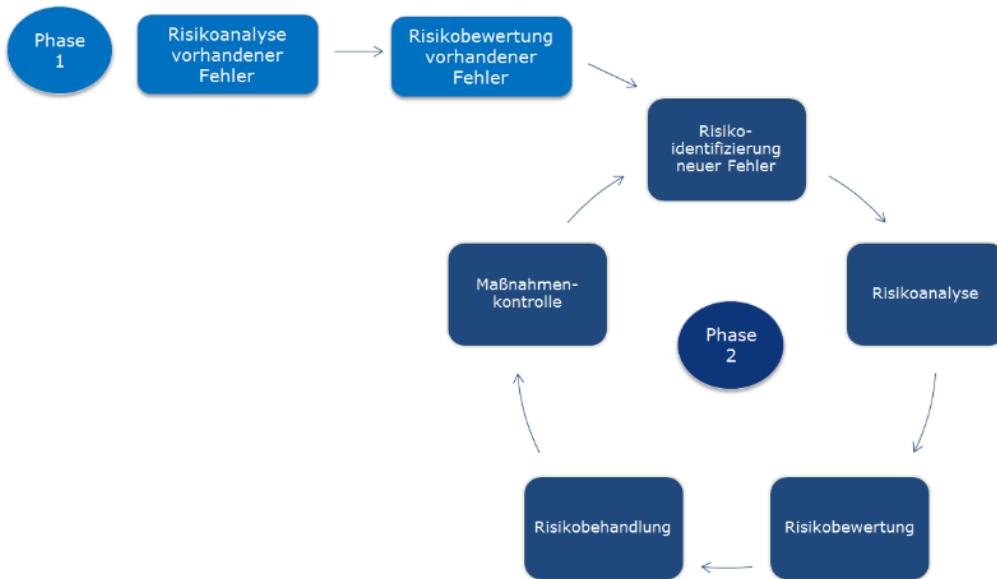


Abbildung 5.6: Risikomanagementprozess im PQL-Projekt [eigene Darstellung]

Die Hauptquellen für den Basisdatensatz waren zunächst Informationen aus Fachliteratur und Fachtagungen, welche von den Projektverantwortlichen der FH Bielefeld auf relevante Fehlerursachen und -folgen durchsucht worden sind. Hierzu wurden LED-Fachtagungen wie „Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung“, „LiTG-Tagung Stadt- und Außenbeleuchtung“ und ähnliche im Zeitraum von 2012 bis zum Projektende im Juni 2014 besucht und relevante Informationen in die Datenbank eingespeist. Des Weiteren wurde simultan ein Partnernetzwerk aus Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses, Kommunen und Energieversorgern aufgebaut, welches potentielle Fehlerfälle aufgrund der bereits existierenden Erfahrungswerte in den Datenpool einspeiste (Tabelle 5.1). In diesem Zusammenhang ist positiv hervorzuheben, dass die vor Projektbeginn angestrebte Stichprobe von drei LED-Leuchtenherstellern weit übertroffen werden konnte.

Tabelle 5.1: Herkunft und Anzahl der Kooperationspartner

Kooperative Projektpartner	Anzahl
LED-Leuchtenhersteller	8
Kommunen/Energieversorger	8
Facility Management Unternehmen	2
Forschungspartner	3

Hierzu wurden die Unternehmen sukzessive für das Risikomanagement sensibilisiert. Da es sich um streng vertrauliche Unternehmensdaten handelt, wurde mit Vertraulichkeitsvereinbarungen zwischen den mitarbeitenden Unternehmen und der FH Bielefeld gearbeitet. Dazu wurden kontinuierliche Vor-Ort-Besuche bei den Unternehmen durchgeführt, um eine Vertrauensbasis zu schaffen. Eine besondere Herausforderung war stets die gemeinsame Terminfindung, da KMUs weniger personelle Kapazitäten zur Verfügung haben als Großunternehmen und meist mehrere Personen aus mehreren Abteilungen in die Treffen involviert waren. Die Anzahl der derzeitig ermittelten Fehler beträgt 142 (Stand: 30.06.2014) und teilt sich in folgende Bereiche auf (Abbildung 5.7).

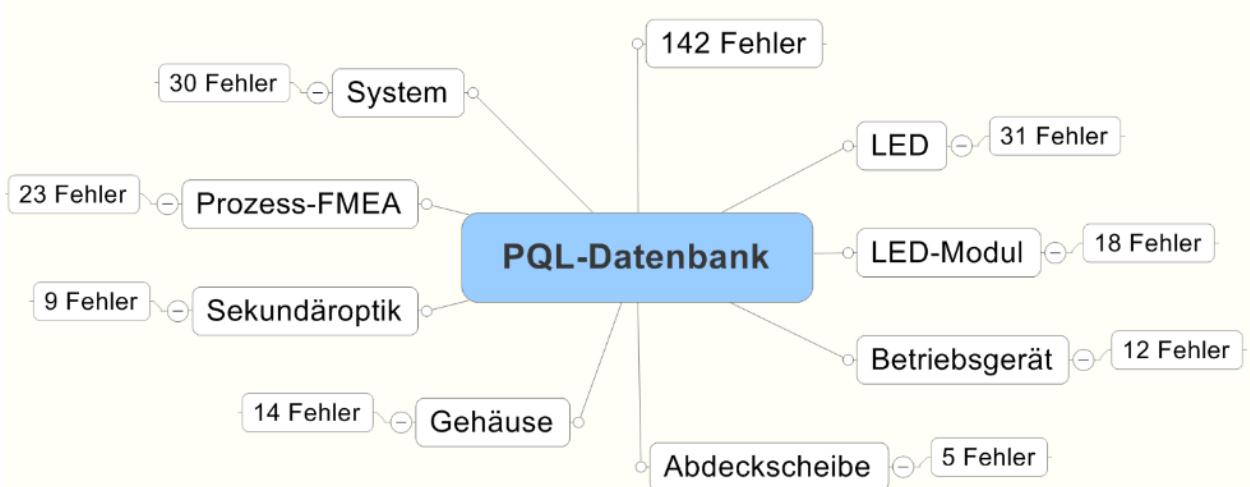


Abbildung 5.7: Anzahl der Fehler der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank (Stand: 30.06.2014)

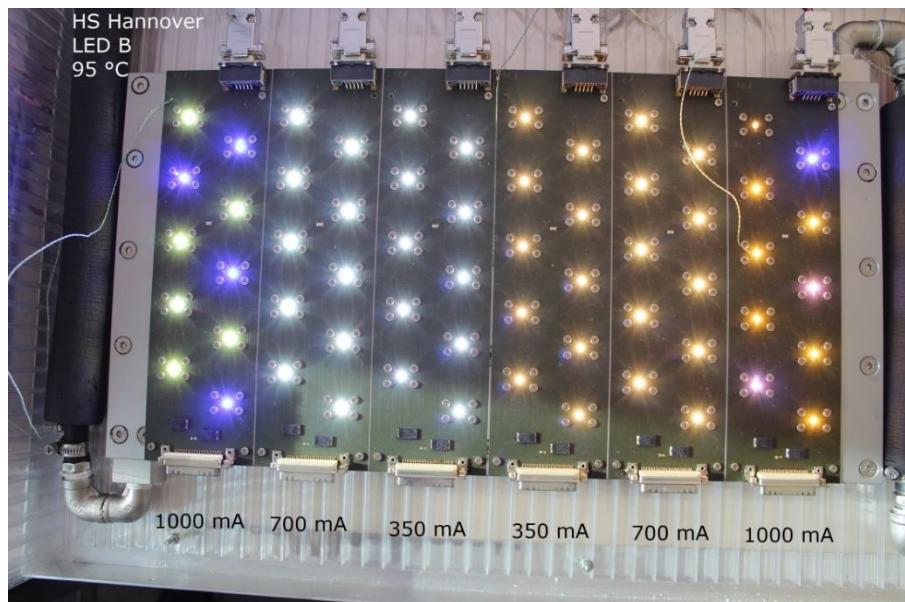


Abbildung 5.8: LED-Alterungsversuch der Hochschule Hannover

Der Hauptfokus wurde zunächst auf die LED-Straßenbeleuchtung gelegt, da in diesem Bereich die meisten Projekte realisiert wurden. Im Laufe des Projekts wurde der Zielbereich auf die Bereiche Industrie-, Office- und Shopbeleuchtung ausgeweitet. Seitens der Forschungspartner wurden insbesondere die Forschungsergebnisse aus den anderen Projektbereichen wie „Alterung“, „ESD-Schutz“ und „Wahrnehmung von Licht“ in die Datenbank eingespeist.

Hierdurch konnte anschauliches Bildmaterial generiert und den Unternehmen zur Verfügung gestellt werden. So werden beispielsweise in Abbildung 5.8 die Auswirkungen einer erhöhten Sperrsichttemperatur und erhöhter Bestromung der LEDs deutlich. So gab es deutliche Farbortverschiebungen und Degradationen bei den mit 1000 mA bestromten LEDs, bei denen mehrere Linsen Rissbildung aufzeigten und sich schließlich inklusive der Konverterschicht ablösten (Abbildung 5.9).

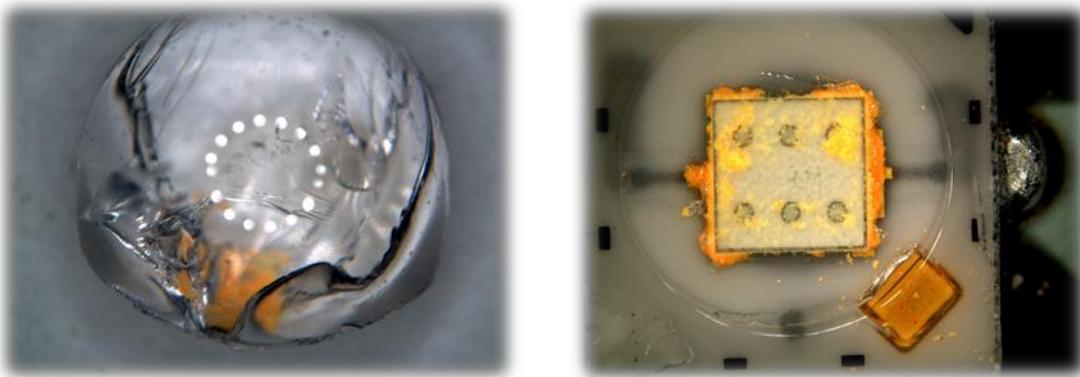


Abbildung 5.9: Gealterte LED an der Hochschule Hannover

Diese Ergebnisse korrelierten mit den Ergebnissen der Alterungsversuche der TU Darmstadt, so dass mithilfe der Fehler- und Schadensdatenbank beide Informationsquellen für den Benutzer verknüpft werden und diese dadurch einen direkten Nutzen aus den aktuellen Forschungsbefunden der genannten Hochschulen erlangen konnten. Teilweise ergaben sich jedoch große Diskrepanzen zwischen der Hersteller-, der Forschungs- und der Anwenderseite bezüglich der Ermittlung von Risiken.

Während aus universitärer Sicht die Lebensdauerprognose der LED und des Leuchtensystems von zentraler Bedeutung war, wurden die größten Risiken der Kommunen und Energieversorger in der oftmals suboptimalen Wartungsfreundlichkeit der LED-Leuchten sowie der ungesicherten Ersatzteillieferung gesehen.

Aus diesem Grund wurden acht am Markt erhältliche LED-Leuchten im Rahmen einer Bachelorarbeit „Analyse der Wartungsfreundlichkeit ausgewählter LED-Straßenleuchten des LED Projektes II in Hannover und Bewertung in betriebswirtschaftlicher Hinsicht“ hinsichtlich der genannten Aspekte untersucht. Das Ergebnis zeigte zwei Gruppen von LED-Leuchten bei der Analyse des Nutzwertes. Bei der Nutzwertanalyse wurden jedem Produkt in Hinblick auf verschiedene Produktanforderungen (z.B. Wechselbarkeit des LED-Moduls) Punktewerte in Abhängigkeit zu ihrem Erfüllungsgrad zugewiesen (Abbildung 5.11).

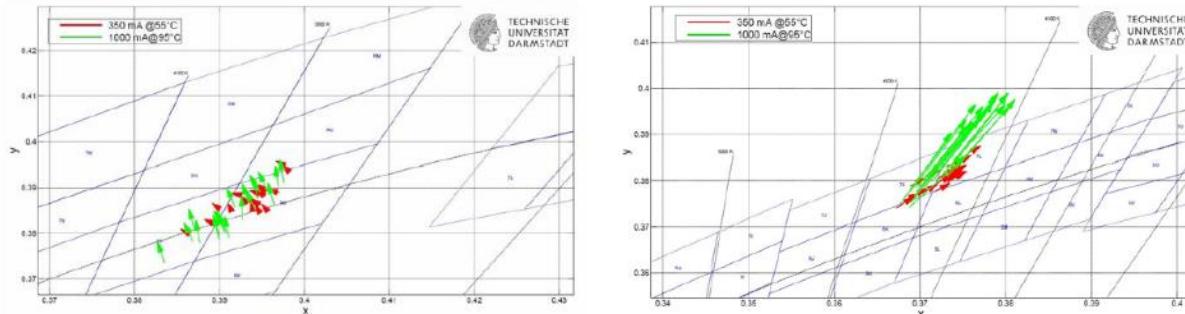
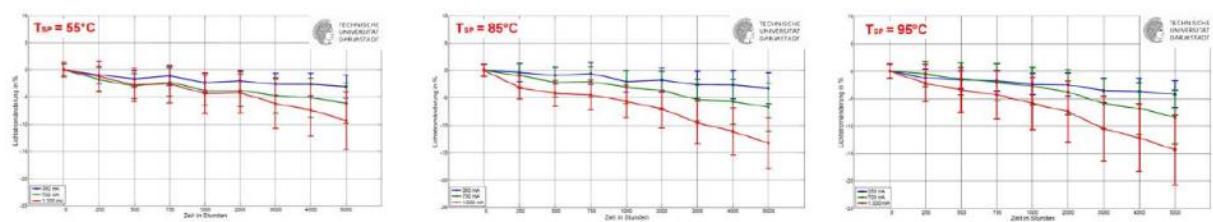


Abbildung 5.10: Ergebnisse der LED-Alterungsversuche der TU Darmstadt [TU Darmstadt]

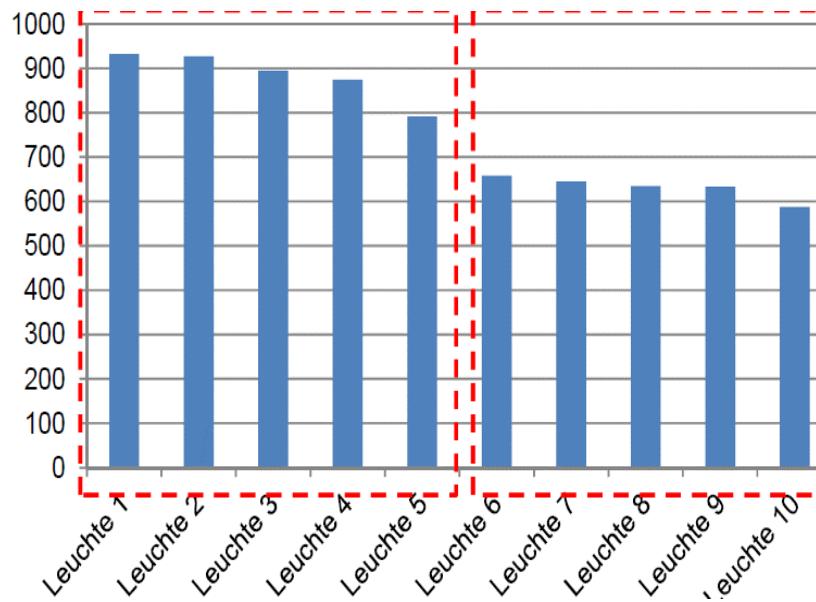


Abbildung 5.11: Wartungsfreundlichkeit ausgewählter LED-Leuchten [7], [2]

Die Hälfte der LED-Leuchten (Gruppe 1) konnte mit relativ geringem Aufwand gewartet werden, d.h. sie waren modular aufgebaut und das Vorschaltgerät sowie das LED-Modul konnten daher ohne Werkzeugwechsel gewechselt werden. Das Gehäuse selbst konnte werkzeuglos geöffnet werden. Die zweite Hälfte der LED-Leuchten (Gruppe 2) hingegen war nur mit größerem Aufwand zu warten. Den LED-Leuchten fehlte teilweise der modulare Aufbau und es mussten mehrere Werkzeugwechsel

durchgeführt werden, um Teilkomponenten wechseln zu können. Dies ist in der praktischen Anwendung in der Straßenbeleuchtung ein Ausschlusskriterium, da die Wartungsmaßnahmen in der Regel oben am Mast auf 5 m – 10 m Höhe stattfinden und von einer einzelnen Person durchgeführt werden müssen. Die Ergebnisse der Arbeit wurden im Rahmen eines Kongresses der Thüga (deutschlandweit das größte Netzwerk kommunaler Energieversorger) in Würzburg am 13.11.2012 vorgestellt [9], woraufhin die FH Bielefeld im Anschluss zwei Kommunen/Energieversorger in der Aufstellung der Kriterienanforderungen für LED-Straßenleuchten unterstützte.

Seitens der LED-Leuchtenhersteller kristallisierten sich andere Risikoarten heraus. Wie bei den Energieversorgern gab es hier wenige Reklamationen in Hinblick auf die Degradation des Lichtstroms. Farbortverschiebungen, Inkompatibilitäten und Programmierfehler (Abbildung 5.12) bei der Lichtsteuerung sowie mangelnde Lebensdauern von Vorschaltgeräten wurden hier häufig als Reklamationsgründe benannt. Gerade die Lebensdauer der günstigen Elektrolytkondensatoren verminderte die Lebensdauer des LED-Leuchtensystems.

Zusammenfassung	
Nummer	412
Kategorie	Betriebsgerät
Fehlerort / Fehlermerkmal	Betrieb/Programmierung
Potentielle Fehler	Dimmung auf z.B. 1% statt 10%
Fehlerfolge	Unerwünschte Absenkung des Lichtstroms
Fehlerursache	Programmierfehler; Tippfehler bei Programmierung der Dimmparameter

Abbildung 5.12: Beispiele Fehler der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]

Abbildung 5.13: Fehlererfassung der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]

Durch die Nutzung der Fehler- und Schadensdatenbank hatten alle PA-Unternehmen die Möglichkeit, sämtliche Sichtweisen und potentielle Risiken in einer Datenbank zusammengefasst vorzufinden, wodurch die Hersteller einen Einblick in die Bedürfnisse ihrer Kunden bekamen. Leider fehlte den Kunden teilweise das Wissen, um Fehlerursachen detailliert benennen zu können. Zudem war der

Großteil der LED-Leuchten noch nicht lange genug installiert, um große Ausfallmengen statistisch erfassen zu können. Dies wird sich jedoch im Laufe der Jahre ändern. Hinzu kommt, dass auch die Anzahl der LED-Projekte stark zugenommen hat und sich dieser Trend vermutlich fortsetzen wird.

Neben den Einträgen, die unmittelbar von der FH Bielefeld vorgenommen wurden, hatte jeder Nutzer die Möglichkeit, selbstständig weitere Fehlerfälle in anonymisierter Form einzutragen (Abbildung 5.13). Das Vorgehen hierzu wird nachfolgend beschrieben.

Nach Auswahl des Menüpunkts „Fehler erfassen“ wird der Nutzer Schritt für Schritt durch Optionen der Fehlererfassung geführt. So wird zunächst die Kategorie der Systemstruktur abgefragt, danach der Fehlerort, die Fehlerkette, ggf. Bilder und Quellen eingefügt sowie entschieden, ob der Fehler öffentlich oder privat zugänglich sein soll. Nach Abschicken des Fehlers wird dieser nach inhaltlicher und formaler Prüfung durch die FH Bielefeld freigegeben. Zur Minimierung des Arbeitsaufwandes hat der Nutzer die Option, Vorschläge aus der jeweiligen Kategorie aus einem Drop-Down-Menü auszuwählen. Diese können auch angepasst werden (Abbildung 5.15). Ein weiteres Ziel, das hierdurch erreicht werden konnte, ist die Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten, wodurch Such- und Filtereinstellungen vereinfacht werden.

Abbildung 5.14: Dropdownmenü der Fehlererfassung [eigene Darstellung]

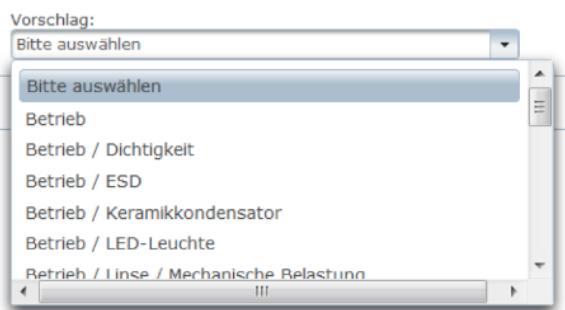


Abbildung 5.15: Dropdownmenü geöffnet [eigene Darstellung]

Das Drop-Down-Menü ist an die jeweilige Komponentengruppe angepasst und entwickelt sich dynamisch in Abhängigkeit von den Eintragungen. Das heißt, dass Begriffe, die mehrmals in der jeweiligen Kategorie auftauchen, automatisiert in die Begriffsauswahl aufgenommen werden. Nach Möglichkeit

sollten die Nutzer Bildmaterial hinzufügen, welches so aufbereitet wurde, dass kein Rückschluss auf einzelne Hersteller möglich ist.

5.2.4 Risikoanalyse und -bewertung

Ziel der Risikoanalyse ist die Entwicklung eines Risikoverständnisses. Dieses soll durch die Bestimmung der Folgen und Wahrscheinlichkeiten der identifizierten Risiken, auch unter Berücksichtigung bereits vorhandener Maßnahmen, erfolgen. Die Kombination der Folgen und Wahrscheinlichkeiten bilden das Risikoniveau. Hierbei handelt es sich um Schätzwerte, welche möglichst von mehreren Personen des Unternehmens ermittelt werden sollten. In der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank ist die Risikoanalyse in Form der Einschätzung (qualitativer Ansatz) der Risikoprioritätszahl (RPZ) vorzunehmen. Bei der Risikobewertung werden die geschätzten Risikoniveaus mit den unternehmensinternen Maßstäben verglichen, um eine Entscheidung bezüglich der Notwendigkeit der Maßnahmen zur Fehlerreduktion bzw. -beseitigung zu treffen.

Grundsätzlich wird zur ersten Risikoanalyse die RPZ individuell von jedem Hersteller für jedes Produkt bestimmt. Erfahrungen zeigen, dass heterogene Bewertungsteams aus bis zu sieben Personen von Vorteil sind, da so unterschiedliche Sichtweisen erörtert werden und die geeignete Einschätzung gefunden werden kann. Hierdurch wird insbesondere der Informationsaustausch zwischen einzelnen Abteilungen im Unternehmen gefördert. Die RPZ selbst wird durch das Produkt der Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit sowie Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache und der Bedeutung der Fehlerfolge ermittelt. Für jeden einzelnen Faktor wird ein Zahlenwert von 1 bis 10 in Abhängigkeit eines vorgegebenen Katalogs ausgewählt (Tabelle 5.2 - Tabelle 5.4).

$$RPZ = A \cdot B \cdot E \text{ mit } A, B, E \in \{1, 2, \dots, 10\}$$

A: Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

B: Bedeutung der Fehlerfolge

E: Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

Fehlerursache	Vorschau	A	B	E	RPZ
Elektrostatische Aufladung von Personen (Spannungen von einigen tausend Volt) und deren Entladung zwischen leitenden Gegenständen		5	6	5	0

Abbildung 5.16: RPZ-Bewertung der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank [eigene Darstellung]

Tabelle 5.2: Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) [eigene Darstellung]

Beschreibung	Ranking
Sehr häufiges Auftreten der Fehlerursache	10-9
Fehlerursache tritt wiederholt und regelmäßig auf	8-7
Gelegentliches Auftreten der Fehlerursache	6-5
Sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeit	4-3
Äußerst geringe Auftretenswahrscheinlichkeit. Tritt so gut wie nie auf.	2-1

Tabelle 5.3: Bedeutung der Fehlerfolge (B) [eigene Darstellung]

Beschreibung	Ranking
Physische Personenschäden – Gefahr für Leib und Leben	10-9
Sehr starke Beeinträchtigung der Leuchte (z.B. durch <ul style="list-style-type: none"> vorzeitige Degradation des Lichtstroms um mehr als 50 % nach 10 % der Lebensdauer, sehr stark verkürzte Lebensdauer einzelner Komponenten um mehr als 50 % nach 10 % der Lebensdauer oder sehr starke Änderung der Farbtemperatur um mehr als 500 K nach 10 % der Lebensdauer))	8-7
Starke Beeinträchtigung der Leuchte (z.B. durch <ul style="list-style-type: none"> vorzeitige Degradation des Lichtstroms um mehr als 30 % nach 10 % der Lebensdauer, stark verkürzte Lebensdauer einzelner Komponenten um mehr als 30 % nach 10 % der Lebensdauer oder starke Änderung der Farbtemperatur um mehr als 400 K nach 10 % der Lebensdauer))	6-5
Beeinträchtigung der Leuchte (z.B. durch <ul style="list-style-type: none"> vorzeitige Degradation des Lichtstroms um mehr als 10 % nach 10 % der Lebensdauer, verkürzte Lebensdauer einzelner Komponenten um mehr als 10 % nach 10 % der Lebensdauer oder Änderung der Farbtemperatur um mehr als 300 K nach 10 % der Lebensdauer))	4-3
Geringe oder keine Beeinträchtigung der Leuchte (z.B. durch <ul style="list-style-type: none"> vorzeitige Degradation des Lichtstroms um weniger als 5 % nach 10 % der Lebensdauer, leicht verkürzte Lebensdauer einzelner Komponenten um weniger als 5 % nach 10 % der Lebensdauer oder sehr geringe Änderung der Farbtemperatur um weniger als 300 K nach 10 % der Lebensdauer))	2-1

Tabelle 5.4: Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (E) [eigene Darstellung]

Beschreibung	Ranking
Entdeckung der Fehler ausgeschlossen. Keine Stichprobenprüfung. Fehler erreicht mit Sicherheit den Kunden.	10
Entdecken der Fehler sehr unwahrscheinlich. Sehr sporadische Stichprobenprüfung	9
Entdecken der Fehler eher unwahrscheinlich. Sporadische Stichprobenprüfung	8
Fehler wird kaum entdeckt. Unregelmäßige und geringe Stichproben.	7
Fehler wird mit mittlerer Wahrscheinlichkeit entdeckt. Zu seltener oder zu geringer Stichprobenumfang.	6
Fehler wird überwiegend vor der Auslieferung zum Kunden entdeckt. Gelegentliche und geringe Stichproben tragen hierzu bei.	5
Fehler wird häufig vor der Auslieferung zum Kunden entdeckt. Häufige und große Stichproben tragen hierzu bei.	4
Fehler mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vor der Auslieferung zum Kunden entdeckt. Ein einziges Nachweisverfahren trägt hierzu bei.	3
Fehler mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vor der Auslieferung zum Kunden entdeckt. Mehrere unabhängige Nachweisverfahren tragen hierzu bei.	2
Fehler wird mit Sicherheit vor der Auslieferung zum Kunden entdeckt.	1

Um die Unternehmen bei der Einstufung der RPZ zu unterstützen, unterbreitete die FH Bielefeld dem PA das Angebot einer begleitenden FMEA-Moderation bei den Unternehmen vor Ort. Insgesamt wurde dies von drei Unternehmen wahrgenommen. Zwei weitere Unternehmen führten die Risikoanalyse selbstständig durch, da diese bereits Erfahrungen mit FMEAs gesammelt hatten (Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Durchgeführte Risikobewertungen in den PA-Unternehmen

RPZ-Bewertung durchgeführt	Moderierter Prozess	Selbstständige Durchführung
5 Unternehmen	3 Unternehmen	2 Unternehmen

Die Besuche verdeutlichten die unterschiedlichen Risikosichtweisen der FMEA-Teammitglieder in den Unternehmen. So zeigte sich beispielsweise, dass die Veränderung der Farbe des Leuchtengehäuses aus technischer Sicht kein Problem darstellt, führte jedoch bei Mitarbeitern aus der Kundenbetreuung zu Reklamationen.

Nachdem die einzelnen LED-Leuchtenhersteller die Risikoanalyse und -bewertung durchgeführt hatten, konnte diese graphisch dargestellt werden (Abbildung 5.17). Da sich die Bewertung der Leuchten immer auf den derzeitigen Entwicklungsstand bezieht, konnten aktuelle Problemfelder der LED-Leuchtenhersteller detektiert werden.

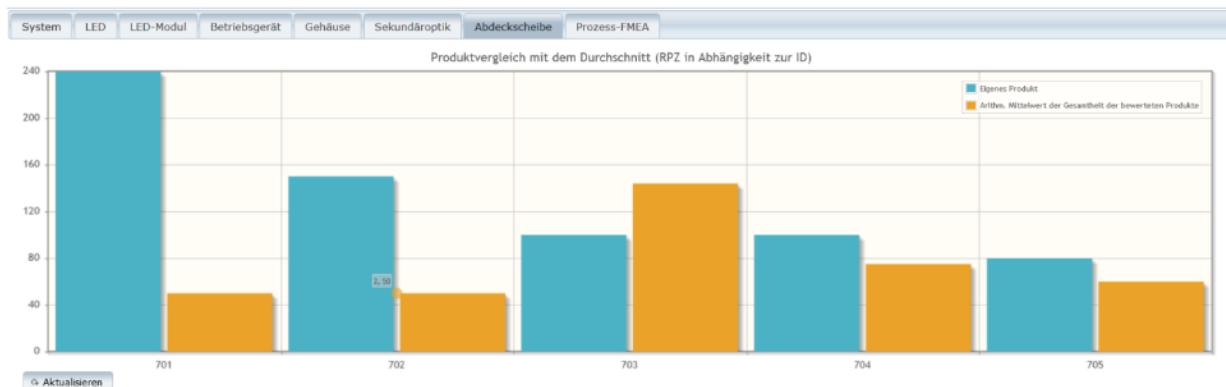


Abbildung 5.17: Produktvergleich mit dem Durchschnitt [eigene Darstellung]



Abbildung 5.18: RPZ-Produktvergleich zweier Unternehmen [eigene Darstellung]

Mithilfe dieser Darstellungen kann jeder Hersteller seine derzeitigen Problemfelder im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert der anderen Hersteller sehen, um so derzeitige Trends der Mitbewerber erfassen zu können. Der Vergleich der RPZ-Werte einzelner Hersteller zu den einzelnen der anderen Hersteller bleibt jedoch verborgen, um so Anonymität zu gewährleisten. Zudem werden nur Mittelwerte von selbsteingeschätzten Fehlern angezeigt. In Abbildung 5.18 ist die unterschiedliche Darstellung für die Kategorie „System“ aus Sichtweise zweier Unternehmen exemplarisch dargestellt.

Der Nutzer kann sich zusätzlich die Anzahl der Bewertungen in RPZ-Intervallen aller Nutzer darstellen lassen (Abbildung 5.19). Es zeigte sich, dass alle Nutzer die meisten Fehler tendenziell in niedrigen PRZ-Bereichen hatten und es relativ wenige kritische RPZ-Werte gibt. Trotz der vergleichenden Darstellungen sollte jeder Nutzer stets realistische Einschätzungen seines Produktes treffen. Er sollte selbstreflektiert die eigenen Stärken und Schwächen des Produkts analysieren und die vergleichenden Darstellungen lediglich als Anhaltspunkt zur Marktbeobachtung sehen.

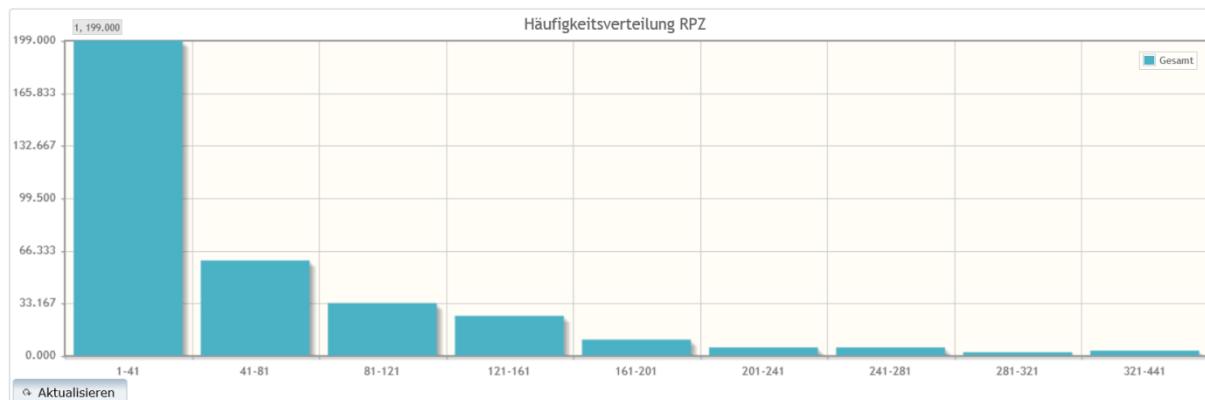


Abbildung 5.19: Häufigkeitsverteilung der RPZ aller Unternehmen [eigene Darstellung]

Zur Bewertung der Fehler mit dem unternehmensinternen kalkulierten Restrisiko kann sich jedes Unternehmen individuelle Risikographen anzeigen lassen (Abbildung 5.20). Hierbei wird die Kombination aus A und B in einer Matrix dargestellt, deren akzeptabler Bereich grün und deren nichtakzeptabler Bereich rot markiert wird. Diese Einstellung lässt sich unternehmens- und produktspezifisch unterhalb der Graphik verändern (Abbildung 5.20).

Mithilfe dieser Methode lässt sich das unternehmensinterne Restrisiko, das jedes technische Produkt in sich birgt, angemessen darstellen.

Der Vergleich der unterschiedlichen Risikoakzeptanzschwellen der Unternehmen konnte aufgrund hohen Diskussionsbedarfs innerhalb der Unternehmen nicht mehr bis Projektende erfolgen und sollte in einem Nachfolgeprojekt fortgeführt werden.

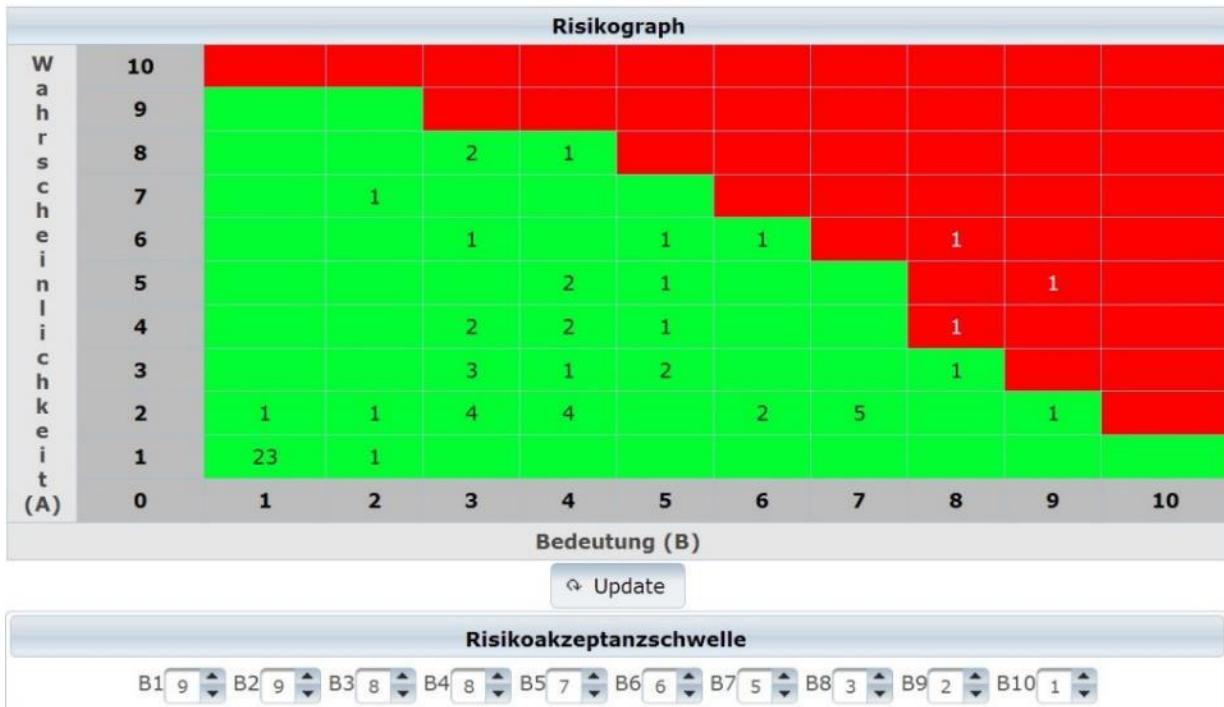


Abbildung 5.20: Beispielhafter Risikograph [eigene Darstellung]



Abbildung 5.21: Veränderte Risikoakzeptanzschwelle des Risikographen

5.2.5 „Top-14“-Fehlerliste der Risikoanalyse

Durch die Auswertung der Unternehmensbewertungen wurde auf Wunsch einiger Projektpartner eine „Top-14“-Fehlerliste angefertigt, um einen schnellen Einstieg in die Risikomanagementproblematik zu ermöglichen und die Hauptfehlerquellen aufzuzeigen. Hierbei handelt es sich um eine Liste aller von den Unternehmen bewerteten Fehler mit einer RPZ > 200 (Abbildung 5.22) bzw. mit dem Produkt aus A und B > 40 (Abbildung 5.23), da diese als besonders risikobehaftet eingeschätzt wurden. Diese Grenzwerte ergaben sich aufgrund des Wunschs des PAs, eine relativ kurze Einstiegsliste

zu generieren. Trotz dieser Clusterung sollten Unternehmen alle potentiellen Risiken der Datenbank und eventuelle Ergänzungen betrachten. Die „Top-14“- Fehlerliste dient lediglich einer ersten Priorisierung. Sie verdeutlicht jedoch anschaulich die Streuung der Einschätzung der einzelnen Unternehmen, weshalb sowohl Minima, Maxima als auch arithmetische Mittelwerte sowie der Median angegeben werden.

Position	Fehler-nummer	Kategorie	Fehlerort	Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	RPZ(max)	RPZ(min)	Arithm. Mittelwert RPZ	Median RPZ	A(max)	A(min)	B(max)	B(min)	C(max)	C(min)
1	101	System	Verarbeitung/ESD	Kurzzeitiger Fluss größerer Ströme	Schmelzen der Leiterbahnen, Totalausfall des Bauteils	Elektrostatische Aufladung von Personen (Spannungen von einigen tausend Volt) und deren Entladung zwischen leitenden Gegenständen	400	15	142	76	5	3	8	5	10	1
2	201	LED	Verarbeitung / Umwelteinflüsse / Chemische Inkompatibilität	Änderung der Phosphorschicht	Degradation des Lichtstroms	Chemische Inkompatibilität	400	120	259	256	8	2	8	4	10	8
3	202	LED	Verarbeitung / Umwelteinflüsse / Chemische Inkompatibilität	Trübung silberner Bestandteile	Degradation des Lichtstroms	Einfluss aggressiver Substanzen in der Umgebung (z.B. Schwefel, Chlor) oder anderer Halogene	400	120	229	168	8	2	8	3	10	7
4	408	Betriebsgerät	Betrieb / Dimmung / PWM	Flackern	Kopfschmerzen	Frequenz < 500 Hz	300		300		3		10		10	
5	402	Betriebsgerät	Betrieb / Überspannungen	Kurzschluss	Totalausfall des Betriebsgerätes	Überspannungen aus dem öffentlichen Netz	240	80	181	224	4	1	8	8	10	7
6	512	Gehäuse	Betrieb / Mechanische Belastungen	Mechanische Beschädigung der LED-Leuchte	Totalausfall der LED-Leuchte durch mechanische Beschädigung	Vandalismus	240	96	168	168	3	3	8	8	10	4
7	701	Abdeckscheibe	Betrieb / Mechanische Belastung	Zerstörung der Abdeckscheibe	Totalausfall der LED-Leuchte durch mechanische Beschädigung	Vandalismus	240	48	144	144	3	2	8	4	10	6
8	514	Gehäuse	Transport / Mechanische Beschädigung	Mechanische Beschädigung des LED-Gehäuses	Totalausfall der LED-Leuchte durch mechanische Beschädigung des Gehäuses	Erschütterung während des Transports	240	8	93	32	4	3	8	2	10	1
9	211	LED	Betrieb / Umwelteinflüsse / Chemische Inkompatibilität	Einlagerung von Fremdstoffen in Silikonlinse	Degradation des Lichtstroms (LED_Package) (meist nur temporär, LED-Chip wird nicht beschädigt)	Chemische Inkompatibilität (Silikonlinse der LED gasdurchlässig)	216	60	138	138	6	2	6	3	10	6
10	501	Gehäuse	Verarbeitung / Chemische Inkompatibilität	Korrosion Silber-Leadframe	Spontane, katastrophale Ausfälle (LED)	Chemische Inkompatibilität der Dichtung (EPDM)	210	80	145	145	6	1	8	5	10	7
11	126	Prozess-FMEA	Herstellung: Kühlkörper	Suboptimales Thermomanagement	Totalausfall der LED-Leuchte	Nicht geeignete Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche Kühlkörper - Thermopad: Planheit,	210	24	90,5	64	3	2	8	7	10	2

Abbildung 5.22: „Top-14“-Fehlerliste, RPZ=A·B·E > 200 [eigene Darstellung]

Position	Fehler-nummer	Kategorie	Fehlerort	Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	A*B(max)	A*B(min)	RPZ(max)	Arithm. Mittelwert A*B	Median A(max)	A(min)	B(max)	B(min)	
1	104	System	Betrieb / Photobiologische Sicherheit	Photochemische Schädigung der Netzhaut	Personenschäden	Längerer (mehr als 10 s) Blick in Weiß- oder Blaulicht emittierende LEDs bei geringem Abstand	50	9	144	26	18	5	2	10	9
2	220	LED	Betrieb / Spektrum	Vergilbung der Kunststoff-Primäroptik	Degradation des Lichtstroms (LED-Package)	LED-Blauanteil	48	6	192	27	27	8	2	6	3
3	221	LED	Betrieb / Spektrum	Vergilbung des Kunststoffgehäuses des LED Package	Degradation des Lichtstroms (LED-Package)	LED-Blauanteil	48	6	192	27	27	8	2	6	3

Abbildung 5.23: „Top-14“- Fehlerliste, Kriterium A·B> 40 [eigene Darstellung]

5.2.6 „Top-14“-Fehlerbeseitigungsmaßnahmen

Da technische Systeme nie risikofrei sein können bzw. immer ein Restrisiko beinhalten, sollte unbedingt eine Priorisierung der Maßnahmen aufgrund der Ergebnisse der Risikoanalyse und -bewertung durchgeführt werden. Hierbei sind stets auch die wirtschaftlichen Aspekte zu beachten, um die Wettbewerbsfähigkeit des Produkts nicht zu gefährden.

In der „Top-14“- Fehlerliste wurde diese Priorisierung vorgenommen und aufgrund dessen wurden zwei kooperierende PA-Unternehmen für diese potentiellen Fehler auf ihre derzeitigen Maßnahmen befragt. Hierbei zeigten sich sowohl Übereinstimmungen als teilweise auch erhebliche Unterschiede bezüglich des Aufwands der angedachten Maßnahmen, welche im Folgenden anhand ausgewählter Beispiele verdeutlicht werden sollen.

Beispiel 1: Chemische Inkompatibilität:

Der Umgang mit dem Einfluss von chemischen Reaktionen der LED mit ihrer Umwelt wird von Unternehmen A und B relativ ähnlich behandelt. Beide prüfen im Vorfeld in Frage kommende chemische Substanzen auf ihre Verträglichkeit, um so Fehler zu vermeiden. Durch diese Tests können Inkompatibilitäten idealerweise vor der Auslieferung zum Kunden detektiert werden. Sollte es doch zum Reklamationsfall kommen, werden weitere Tests in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen durchgeführt. Die Kosten für die Tests wurden mit 1.000 € von Unternehmen A bzw. 2.000 € von Unternehmen B angegeben.

Beispiel 2: Photobiologische Sicherheit:

Auch im zweiten Beispiel handeln die Unternehmen relativ ähnlich, um potentielle Fehler zu entdecken bzw. zu verhindern. Um die photobiologische Sicherheit zu gewährleisten, werden standardisierte Test nach EN 62471 unternehmensintern oder durch Auftragsarbeit durchgeführt, da die photochemische Schädigung der Netzhaut als Fehlerfolge von allen Unternehmen mit einer sehr hohen Bedeutung klassifiziert worden ist. Sollte der Fehlerfall eintreten, können hierdurch laut Unternehmen B Schmerzensgeldzahlungen oder lebenslange Rentenansprüche im sechs- bis siebenstelligen Eurobetrag entstehen. Dem gegenüber stehen Testkosten von ca. 800 € pro Test, wie beide Unternehmen bestätigten.

Beispiel 3: ESD-Schäden

Im Umgang mit ESD-Schäden werden hingegen große Unterschiede zwischen den beiden Unternehmen deutlich. Unternehmen A legt besonderen Wert auf einen vollständigen ESD-Schutz in der kompletten Zuliefererkette, der Produktion und der nachgelagerten Logistik. Für diese Maßnahmen müsste man laut Angaben des Unternehmens A initial ca. 200.000 € pro Werk plus jährlich ca. 40.000 € laufende Kosten veranschlagen. Unternehmen B verweist hingegen lediglich auf ESD gerechte Arbeitsplätze, welche ca. 3000 € Kosten verursachen würden. Als Fehlervermeidungsmaßnahmen werden optische Prüfungen angegeben, welche jedoch nur einen kleinen Teil der ESD-Fehler detektieren werden.

Der unterschiedliche Aufwand zur Vermeidung von ESD-Schäden erklärt sich vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Erfahrungen in den jeweiligen Reklamationsabteilungen.

5.3 Kosten-Nutzen-Analyse

Zur Abwägung der Sinnhaftigkeit potentieller Maßnahmen und zur Steigerung der Akzeptanz des Risikomanagements im Unternehmen bieten sich Kosten-Nutzen-Analysen an. Exemplarisch soll der potentielle Fehlerfall der mechanischen Beschädigung der LED-Leuchte während des Transports betrachtet werden. Die von der FH Bielefeld befragten Kommunen und Energieversorger bemängeln mehrfach, dass bereits beschädigte LED-Leuchten bei ihnen vor der Installation eintrafen. Ursache war eine ungeeignete Verpackung, welche keinen ausreichenden Schutz vor Beschädigungen bot. Während Unternehmen B lediglich eine „geeignete Verpackung verwenden“ als Fehlervermeidungsmaßnahme angibt, führt Unternehmen A im Vorfeld spezielle Tests durch. Diese beinhalten Falltests nach UPS-Standard (DIN ISO 2248) sowie zwölfstündige Rütteltests auf Paletten mit vor-eingestellter Frequenz und Amplitude. Zudem ordnet Unternehmen A „Rundreisetests“ in unregelmäßigen Abständen an, bei denen Leuchten testweise verschickt werden, um den ordnungsgemäßen Zustand am Zielort zu kontrollieren. Dementsprechend sind die unterschiedlichen Testkosten angesetzt. Unternehmen B kalkuliert 5 € pro Leuchte und Unternehmen A ca. 500 € pro UPS-Test zuzüglich ca. 1.500 € pro Rütteltest. Zudem unterhält Unternehmen A eine eigene Logistik-Tochter, welche auf den Transport von Leuchten spezialisiert ist. Trotz dieser Maßnahmen wurden im Zeitraum vom 01.04.2014 bis 30.04.2014 vier Reklamationen mit acht beschädigten Leuchten verzeichnet. Hierdurch sind interne Kosten von ca. 2.000 € entstanden.

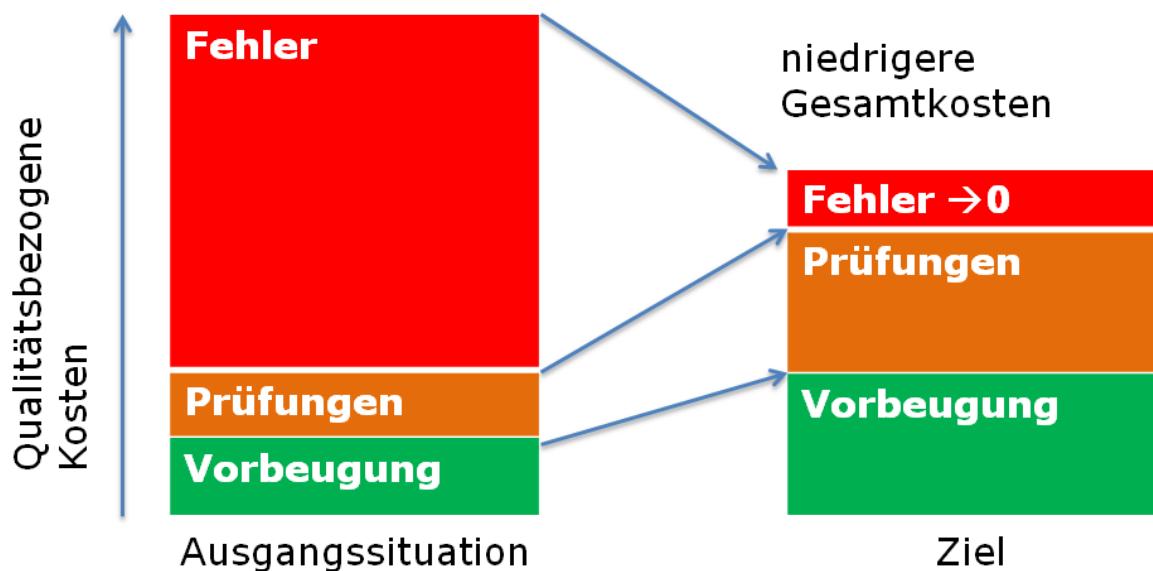


Abbildung 5.24: Qualitätsbezogene Kosten [6]

Die Reklamationen zeigen, dass durch einen suboptimalen Transport innerhalb kürzester Zeit große Reklamationssummen zustande kommen können, welche ohne Maßnahmen wahrscheinlich deutlich höher ausfallen würden.

Die gewonnenen Forschungsergebnisse korrelieren mit denen anderer Branchen, wonach in der Regel zusätzliche Prüfungen zunächst höhere qualitätsbezogene Kosten verursachen. Diese können jedoch mittelfristig durch einen geringeren Fehleranteil eingespart werden (Abbildung 5.24).

5.4 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen für Unternehmen

Wie oben dargestellt, gibt es viele Argumente zur Einführung eines Risikomanagementsystems mit Hilfe der PQL-FMEA-Datenbank, welche im Rahmen des PQL-Forschungsprojekts entwickelt und programmtechnisch speziell auf die Anforderungen umgesetzt wurde. Eine Sensibilisierung der LED-Leuchtenhersteller wurde initiiert und sollte nun weiter fortgeführt werden, um das System in den Unternehmen zu etablieren. Bei konsequenter Anwendung ist davon auszugehen, dass die Kundenzufriedenheit aufgrund einer besseren Produktqualität steigen wird. Diese wird durch einen strukturierten Entwicklungsprozess verwirklicht, in den aktuelle Forschungsergebnisse einfließen. Ebenfalls werden sich mittelfristig wirtschaftliche Vorteile einstellen und die PQL-Datenbank unterstützt die LED-Leuchtenhersteller, den Entwicklungsprozess zu dokumentieren. Dies kann sich im Schadensfall aus Gründen der Produkthaftung als vorteilhaft erweisen.

Trotz des aufgezeigten Nutzens nimmt die Einführung und Etablierung eines technischen Risikomanagementsystems einen gewissen Zeit- und Ressourcenaufwand in Anspruch (erfahrungsgemäß bis zu drei Jahren). Dieser kann jedoch durch den Basisdatensatz der Datenbank erheblich verringert werden. Da dieser keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat, muss jeder LED-Leuchtenhersteller für jedes Produkt individuelle Ergänzungen vornehmen.

Eine dauerhafte Fortführung und Weiterentwicklung der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank ist äußerst lohnenswert, um den teilnehmenden Unternehmen auch künftig eine kontinuierliche Verfügbarkeit der Datenbank zu gewährleisten, so dass die Unternehmen diese in die Unternehmensprozesse integrieren können. Dies würde zu einer stetigen Ressourcensparnis insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen führen. Zudem gibt es ein noch nicht gänzlich erschöpftes Potenzial bei der Weiterentwicklung der Programmfunctionen, sowie in der langfristigen Verfolgung (zeitliche Aspekte) der RPZ-Einschätzungen.

Insbesondere der Ausblick auf die neue ISO 9001:20015 wird das Thema Risikomanagement für die Unternehmen an Bedeutung gewinnen, da dies voraussichtlich explizit in der Norm gefordert werden wird [3]. Die Notwendigkeit hierfür bestätigt eine webbasierte Anwenderbefragung in der 65 % der Befragten die Themen „Wissensmanagement“, „Integration von Risikomanagement“, „systematische Problemlösung und Lernen“ sowie „Instrumente zur Selbstbewertung“ als besonders wichtige Themenfelder angeben [3], welche durch die Fortführung und den Ausbau der PQL-Datenbank maßgeblich unterstützt werden könnten. Ein besonderes Interesse an der Fortführung der PQL-Fehler- und Schadensdatenbank zeigte die Resonanz auf die Ergebnisse des Forschungsprojekts, welche in dem Beitrag „Technisches Risikomanagement als Grundlage der kontinuierlichen Produktverbesserung“ auf der VDI-Konferenz „Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung“ am 26.06.2014 vorgestellt worden sind [8]. Eine Vielzahl von Unternehmen, welche bisher nicht Mitglieder des PAs waren, wäre demnach sehr an der Mitarbeit im Bereich Risikomanagement eines möglichen Folgeprojekts interessiert.

Des Weiteren sollten die Anwender der LED-Beleuchtung wie beispielsweise Energieversorger und Facility Manager noch stärker in die Erstellung von Ausfallstatistiken einbezogen werden. Diese könnten wertvollen Input für die Leuchtenhersteller leisten, da heutzutage bereits langfristig existierende LED-Projekte inklusive Leuchtenausfälle vorhanden sind.

6 Performance Quality Label (PQL)

Die Aufgaben des VDE Prüf- und Zertifizierungsinstituts (VDE) im Rahmen des Forschungsprojekts waren

- die Untersuchung der weltweit vorhandenen Öko- und Qualitätslabel,
- der Ausbau der Lichtmesstechnik im VDE,
- die Gestaltung und Durchführung eines Round Robin Tests mit den Forschungspartnern und der Industrie sowie
- die Vorbereitung der Normung für die Vergabe des PQL und
- die Marktüberwachung dieses Labels.

Die angestrebten Forschungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Dokumentation zum Stand von Prüfsiegeln weltweit,
- Aufbau einer Referenz-Lichtmesstechnik,
- Dokumentation der Messunsicherheit zwischen verschiedenen Einrichtungen (Forschung, Prüfinstitute, Industrie),
- Vergleichsmessung von LED-Leuchten mit den beteiligten Forschungseinrichtungen und Partnern aus der Industrie, um vorhandene Messfehler aufzudecken und Verbesserungsmaßnahmen vorzuschlagen,
- Bereitstellen eines Konzeptes für das PQL,
- Laufende Marküberwachung.

Im Folgenden werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der einzelnen Forschungspunkte dargestellt.

6.1 Untersuchung der Öko- und Qualitätslabel weltweit

Zur Dokumentation zum Stand der Performance-Prüfsiegel weltweit geschah eine umfassende Recherche im Internet.

Um eine erste Übersicht der zu testenden Parameter und deren Grenzwerte zu erhalten, wurde eine Exceltabelle angefertigt und die Anforderungen mit den normativen Anforderungen aus „IEC/PAS 62722-2-1: Anforderungen an die Arbeitsweise von Leuchten, besondere Anforderungen für LED-Leuchten“ und „IEC/PAS 62717: Anforderungen an die Arbeitsweise von LED-Modulen“ verglichen. Es stellte sich heraus, dass lediglich die Teilaspekte Farbwiedergabeindex, Farbtemperatur und Lebensdauer L_{70} durch alle untersuchten Label abgedeckt wurden. Keines der untersuchten Label beinhaltet umfassende normative Anforderungen.

Dadurch wird die Notwendigkeit für das vorgesehene PQL für den nationalen und internationalen Markt untermauert.

Es wurde eine Präsentation der oben dargestellten Sachverhalte während eines PQL-Treffens mit den Forschungspartnern vorgestellt.

Abbildung 6.1 zeigt schematisch die erstellte, umfangreiche Exceltabelle bei der die Anforderungen der einzelnen Öko- und Qualitätslabel miteinander verglichen wurden. Dabei waren Minergie, Energy Star, Blauer Engel, EU LED Quality Charter, Energy Saving Trust LED Luminaire Performance, U.S DoE, Dekra und ZVEI Leitmarktinitiative.



Abbildung 6.1: Übersicht: untersuchte Label mit zu messenden Parametern und Grenzwerten

6.2 Ausbau der Lichtmesstechnik im VDE-Institut



Abbildung 6.2: Grundriss des neuen VDE Testzentrum für Photo- und Spektrometrie (TZPS)

Das von August bis Oktober 2011 gebaute lichttechnische Labor des VDE umfasst eine Fläche von 300 m². Für dieses Labor wurde ein zusätzliches Zwischengeschoss in die bestehende EMV-Halle integriert. In diesem zusätzlichen Stockwerk, befinden sich zwei Büroräume, ein kleines internes Lager, eine Werkstatt zur Präparation der Prüfmuster, ein Alterungsraum, der circa 500 Lampen fassen

kann und letztendlich die drei Messlabore, welche das Herzstück bilden. Die Integration der Messlabore geschah, im sogenannten Raum-in-Raum-Prinzip. Durch die schon vorhandene Klimatisierung des Gebäudes wurde eine weitere Klimatisierung der Messlabore installiert, so dass die Erfüllung der Temperaturanforderungen gewährleistet ist. Ein Grundriss des Lichttechnischen Komplexes ist in Abbildung 6.2 zu sehen.

6.2.1 Laborausstattung

Ein lichttechnisches Messmittel in den Laboren ist die elliptische „Ulbrichtkugel“ von LMT mit den Halbachsenlängen von 2250 mm und 1650 mm, gekoppelt mit einem CAS140 CT Arrayspektrometer von Instrument Systems, für die Messung des Lichtstroms und den spektralen Eigenschaften (Spektrum, Farbwiedergabeindex, ähnliche Farbtemperatur, Normspektralwertanteile, usw.) einer Lichtquelle.

Für die Messung und Bewertung der photobiologischen Sicherheit existiert eine optische Bank mit einem Doppelmonochromator IDR300 von Bentham als Detektor. Der Doppelmonochromator erlaubt einen zu messenden Wellenlängenbereich von 200 nm - 1500 nm, also von UVC bis zum mittleren IR.

Zur Durchführung der Messungen im Rahmen des PQL-Projekts wurde das Drehspiegelgoniophotometer GO-DS2000 von LMT als Messanlage installiert. Eine der Herausforderungen beim Bau der Anlage war die Einhaltung der in den Normen geforderten Umgebungstemperatur des Prüflings sicherzustellen. Durch vier spezialangefertigte Lufтаuslässe wird die temperierte Luft in den Raum gedrückt. Diese steht dann als Säule im gesamten Raum und wird an der Decke über Auslässe herausgeführt. Damit werden die normativen Anforderungen eingehalten. Zur Überwachung der Temperatur und Luftfeuchte wurden an einer Wand vertikal im Abstand von ca. 2 m drei Messfühler „Hygroclip“ (Fa. rotronic) installiert. Die Daten werden über das System „Hygroloc“ ausgewertet und gespeichert. Zusätzlich steht der Drehspiegel auf einem eigenen Fundament, entkoppelt vom Rest des Komplexes. Dies gewährleistet eine schwingungsfreie Messung mit dem Goniophotometer und erlaubt zum einen die absolute Messung des Gesamtlichtstroms, der Teillichtströme von Lampen und Leuchten und zum anderen die Messung der Lichtstärkeverteilungskurve von Lichtquellen. Durch die zusätzliche Verwendung eines Colorimeters C1210 von LMT, welches in den Strahlengang mittig positioniert werden kann, ist es möglich auch die ortsaufgelöste Verteilung spektraler Parameter zu messen. Der Spiegel selbst ist ein Oval mit den Abmessungen von 1,5 m x 2,2 m und die Entfernung zum thermostatisierten Photometerkopf beträgt 21,43 m, was eine Messung von Lichtquellen mit gebündeltem Licht und Leuchten mit einem maximalen Durchmesser von 2,1 m mit geringerer Messunsicherheit ermöglicht. Der Photometerkopf wird kontinuierlich bei 35 °C gehalten um die Langzeitstabilität des Messsystems zu erhöhen. Die kleinste einstellbare Winkelauflösung der Messeinrichtung ist 0,1° in γ und θ . Die gesamte Messeinrichtung wiegt 3,5 Tonnen und wurde im Oktober 2011 in Betrieb genommen. Das Labor ist von der DAkkS begutachtet und akkreditiert.

6.2.2 Kalibrierung der Messgeräte

Die grundlegende und erste Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist eine rückführbare Kalibrierung der Messsysteme. Im Folgenden werden die Kalibrierverfahren der einzelnen Messsysteme erläutert.

Kalibrierung des Ulbrichtkugel-Spektroradiometer-Systems

Die Kalibrierung des Gesamtsystems geschieht in zwei Arbeitsschritten. Zuerst strahlt man mit einer Quecksilber-Argon-Linienlampe in die Einkoppeloptik des Arrayspektroradiometers und ordnet den Rohdatenpeaks die passende Wellenlänge der Linienlampe zu. Da mit diesem Verfahren nicht der gesamte Spektralbereich des Spektroradiometers abgedeckt wird, werden die Wellenlängen der restlichen Pixel (= Kanäle) mit einem Polynomfit berechnet. Je nach Genauigkeit des Spektroradiometers werden Polynome von vierter oder höherer Ordnung verwendet. Dieser Polynomfit wird von der mitgelieferten Software des Herstellers im Hintergrund durchgeführt. Durch dieses Verfahren wurde die x-Achse (Wellenlängen) auf Nanometer kalibriert und umgerechnet.

Im zweiten Schritt wird die y-Achse auf die Einheit W/nm kalibriert. Hierzu verwendet man eine spektrale Strahlungsleistungsnormallampe (Abbildung 6.3), Typ Osram 64602 (12V, 50W) mit bekanntem Spektrum, welches in Abbildung 6.4 dargestellt ist. Das Normal wird mit denen im Kalibrierzertifikat angegebenen elektrischen Parametern in der Ulbrichtkugel betrieben und nach Erreichen des thermischen Gleichgewichtes eine Messung durchgeführt. Durch den Vergleich der aufgenommenen Messdaten mit den Referenzdaten wird für jede Wellenlänge ein Korrekturfaktor des y-Wertes generiert, so dass bei erneuter Messung die Daten des Referenzspektrums wiedergegeben werden. Hierdurch ist eine vollständige Kalibrierung des Ulbrichtkugel-Spektroradiometer-Systems vollzogen.



Abbildung 6.3: Spektrale Strahlungsleistungsnormallampe, Osram 64602, 12V, 50W mit passendem Messadapter für die Montage in der Ulbrichtkugel

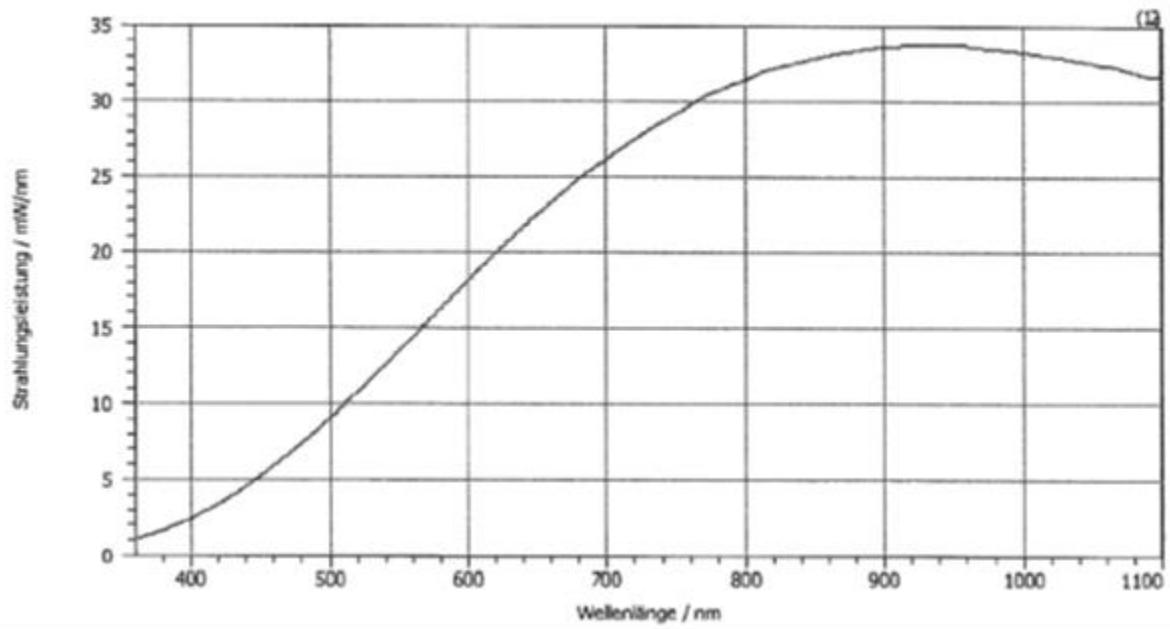


Abbildung 6.4: Spektrum der spektralen Strahlungsflussnormallampe

Kalibrierung des Drehspiegelgoniophotometers



Abbildung 6.5: Lichtstärkenormallampe Wi41-G
zur Kalibrierung des Drehspiegelgoniophotometers

Bei der Erstinstallation wurde der Photometerkopf der Messanlage über eine Lichtstärkenormallampe von LMT kalibriert. Da das Licht über den Spiegel auf den Photometerkopf reflektiert wird, ist die spektrale Reflexionseigenschaft des Spiegels in die Kalibrierung miteinbezogen. Der VDE kalibrierte danach die Messanlage über Lichtstromnormallampen. Seit 2013 existiert eine VDE eigene Lichtstärkenormallampe, die zur Kalibrierung genutzt wird. Der Vorteil eines Lichtstärkenormals gegenüber eines Lichtstromnormals ist die Reduzierung der Messunsicherheit des Messsystems.

Die VDE-eigene Lampe, Typ Osram Wi41-G ist in Abbildung 6.5 zu sehen. Die Wi41-G hat unter definierten elektrischen Bedingungen, welche im Kalibrierzertifikat gegeben sind, eine bestimmte Lichtstärke und eine Farbtemperatur, die der Normlichtart A (2658 K) entspricht. Das Normal wird nach seiner Stabilisierungszeit so positioniert, dass die emittierte Strahlung senkrecht auf den Spiegel trifft und durch diesen auf den Photometerkopf umgeleitet wird. Dies geschieht am besten unter dem Evaluationswinkel von $\gamma = 90^\circ$. Durch Regelung der Empfindlichkeit des Photometers wird das Messsystems so auf die Lichtstärke der Normallampe kalibriert. Auch die Einflüsse des Spiegels werden dadurch berücksichtigt. Nach abgeschlossener Kalibrierung wird das System mit Hilfe von Lichtstromnormallampen überprüft und verifiziert.

6.2.3 Durchführen der Messungen

Die zweite Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist eine korrekte Bedienung der Messanlagen durch den Benutzer. In diesem Abschnitt werden die Durchführungen der Messungen mit den einzelnen Messsystemen beschrieben.

Messungen mit der Ulbrichtkugel

Nach erfolgreich abgeschlossener Kalibrierung ist das Ulbrichtkugel-Spektroradiometer-System für den Messbetrieb eingerichtet. Die Grundformel zur Berechnung des Lichtstroms von Prüflampen lautet:

$$\Phi_X = \frac{\Phi_R}{S_R} * S_X * \frac{S_{HLR}}{S_{HLX}} \quad \text{Berechnung des Lichtstroms} \quad 6.1$$

mit:

Φ_X effektiver Lichtstrom der Prüflampe

Φ_R Lichtstrom der Lichtstromnormallampe aus dem Kalibrierzertifikat

S_R Messwert Lichtstrom der Lichtstromnormallampe

S_{HLR} Messwert des Hilfslampenlichtstroms bei ausgeschalteter Normallampe

S_{HLX} Messwert des Hilfslampenlichtstroms bei ausgeschalteter Prüflampe

S_X Messwert des Lichtstroms der Prüflampe

Zur Bestimmung des effektiven Lichtstroms der Prüflampe mit Hilfe der Ulbricht'schen Kugel, wird im ersten Schritt das Gesamtsystem über eine Lichtstromnormallampe Φ_R kalibriert. Hierzu wird diese mit den im Kalibrierzertifikat genannten elektrischen Bedingungen betrieben und die Kugelantwort S_R protokolliert. Durch diesen Prozess generiert man den Kalibrier-Korrekturfaktor $c_\Phi = \Phi_R/S_R$, der mit dem Messwert des Lichtstroms der Prüflampe multipliziert wird. Zusätzlich erzeugt man einen Korrekturfaktor für die Selbstabsorption $c_{HL} = S_{HLR}/S_{HLX}$, der den Unterschied des geometrischen Einflusses der verschiedenen Lampen korrigiert. Es ist notwendig bei jeder Messung

auf thermische Stabilität der einzelnen Lampen zu warten. Normativ gilt eine Lampe als stabil, wenn innerhalb von 15 Minuten der Lichtstrom nicht mehr als $\pm 0,5\%$ schwankt. Es ist wichtig, dass keine direkte Strahlung der Lampen auf den Detektor trifft. Dies wird zum einen durch den Shutter und zum anderen durch die mittige Positionierung der Lampen (Normal und Prüflampe) innerhalb der Kugel gewährleistet.

Messungen mit dem Drehspiegelgoniophotometer

Die mathematische Beschreibung zur Bestimmung des Lichtstroms aus der aufgenommenen LVK lautet:

$$\Phi_{LVK} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} I(\Omega) d\Omega \quad \text{Berechnung des Lichtstroms aus der LVK} \quad 6.2$$

mit:

Φ_{LVK} Gesamtlichtstrom der Lampe
 I Lichtstärke je Winkel

Unter Verwendung von Kugelkoordinaten und diskreten Winkelschritten erhält man:

$$\Phi_{LVK} \approx 2\pi * \sum_{i=0}^{\pi} \overline{I(\gamma_i)} \sin\gamma_i \Delta\gamma \quad 6.3$$

Man erhält also den Lichtstrom aus der Integration der mittleren Lichtstärke über den Raumwinkel in jeder C-Ebene, gewichtet mit dem Sinus des Evaluationswinkels γ .

Im tatsächlichen Messbetrieb ist es notwendig, die Koordinatensysteme von Leuchte und Messanlage auf einen gemeinsamen Ursprung zu legen, damit die aufgenommene LVK „richtig“ im Raum liegt. Der Nullpunkt der Leuchte wird durch den Lichtschwerpunkt festgelegt und ist in dem Standard DIN EN 13032-1:2004 für verschiedene Leuchtentypen definiert. Die genaue Positionierung der Leuchte erfolgt anhand eines Laserstrahls, welcher zentral mit der Drehachse des Winkels γ überlagert ist. Der Schnittpunkt der beiden Drehachsen von γ und C ist der Ursprung des Koordinatensystems des Goniphometers. Genau dort wird der Lichtschwerpunkt der zu messenden Leuchte justiert. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 6.6 dieser Sachverhalt dargestellt.

Nach der Justierung der Leuchte erfolgt – wie bei allen lichttechnischen Messungen – die Stabilisierungsphase. Hierzu wird die angeschaltete Leuchte in die $(0^\circ/0^\circ)$ -Position gebracht und die Änderung der Lichtstärke unter diesem Winkel beobachtet. Bleibt die Schwankung der Lichtstärke innerhalb 15 Minuten zwischen $\pm 0,5\%$ des Anfangswertes beginnt die Messroutine. Andernfalls wird gewartet bis die Schwankungen innerhalb eines Intervalls von 15 Minuten in dem definierten Bereich sind. Typische Stabilisierungszeiten für LED Leuchten sind zwischen 40 und 120 Minuten, je nach Bauart und Leuchtentyp.

In der Regel erfolgt die Messung bei einer Winkelauflösung von $\Delta\gamma = 2,5^\circ$ und $\Delta\varphi = 2,5^\circ$ für Leuchten mit keinen starken Gradienten in ihren Lichtstärkeverteilung. Für engstrahlende Leuchten und Strahler wird eine kleinere Auflösung von $\Delta\gamma = 1^\circ$ und $\Delta\varphi = 1^\circ$ empfohlen, um die Messunsicherheit

so gering wie möglich zu halten. Charakteristische Messdauern einer Leuchte ohne starke Gradienten sind 45 Minuten und zwei Stunden für Leuchten mit starken Gradienten in ihrer Lichtverteilung.

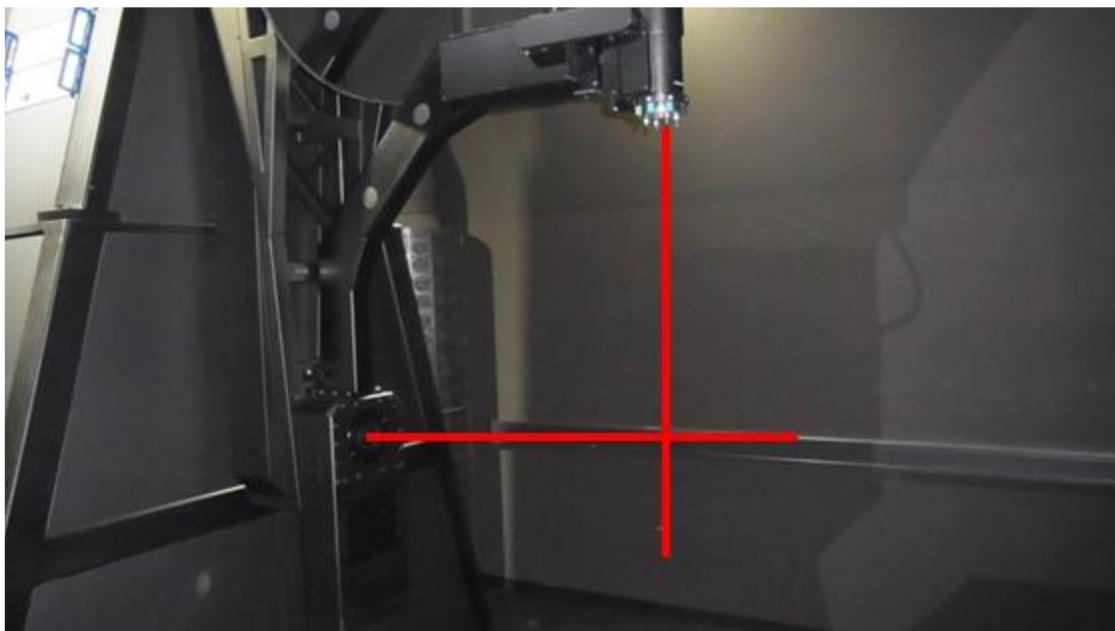


Abbildung 6.6: Koordinatenursprung: Schnittpunkt der beiden Drehachsen des Goniometers

Messungen mit dem Colorimeter

Das Colorimeter wird vor einer Messung in die Mitte des Lichtkanals gefahren und befindet sich dann exakt in der Achse des Spiegelmittelpunktes. Der Abstand zwischen Spiegel und Colorimeter beträgt vier Meter. Durch die Verwendung eines Colorimeters als Messsensor eines Drehspiegelgoniometers ist es möglich das Spektrum und die sich darüber errechneten spektralen Parameter ortsaufgelöst darzustellen. Diese Methode wird benutzt um die Farbhomogenität, im Speziellen von LED-Produkten, messtechnisch zu ermitteln. Zu beachten ist hierbei, dass ein direkter Vergleich der spektralen Parameter mit einer Ulbricht-Kugel-Messung nur dann möglich ist, wenn aus mehreren Positionen das Spektrum gemessen und mit der Lichtstärke gewichtet wird.

6.2.4 Ermittlung der Messunsicherheit der einzelnen Messsysteme

Aus physikalischer Sicht ist ein Messergebnis immer mit seiner Einheit und mit der dazugehörigen Messunsicherheit anzugeben. Durch die Angabe der Messunsicherheit wird ein Wertebereich eingeschlossen, innerhalb dessen der wahre Wert der Messgröße mit einer anzugebenden Wahrscheinlichkeit – in der Photometrie immer 95 % – liegt. Dieser Ansatz spiegelt den Gedanken einer nicht „perfekten“ Messung wieder.

Um die Messunsicherheit der Messsysteme zu bestimmen gibt es zwei anerkannte Methoden. Die erste ist das Verfahren nach GUM (Guide for evaluating and expressing the uncertainty of measurements). Eine weitere Methode ist die „Monte-Carlo-Methode“. Beide Verfahren sind mathematisch recht anspruchsvoll. Um die Mathematik größten Teils zu umgehen wurde im Rahmen der PQL-Sit-

zungen die „Brute-Force-Methode“ vorgestellt. Hierzu schreibt man alle Parameter, die zur Messunsicherheit beitragen, auf und bewertet diese vernünftigerweise mit Unsicherheiten, wie es in Tabelle 6.1 am Beispiel der Lichtstrombestimmung einer weißen LED in der Ulbrichtkugel dargestellt ist. Anschließend quadriert man alle Standardunsicherheiten, addiert die Quadrate und zieht zum Schluss die Wurzel. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies:

$$u(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{rel,i}(y)^2} \quad 6.4$$

Tabelle 6.1: Unsicherheitsbeiträge für die Bestimmung des Lichtstroms einer weißen LED mit einem Ulbrichtkugel-Photometer-System

Name der Größe X_i	Relativer Beitrag zur Ausgangs-Standard-Unsicherheit $u_{rel,i}(y)$
Kalibrierunsicherheit des auf SI-Einheiten rückführbaren Sekundärnormals des Lichtstroms	1,0 %
Alterung der Lichtstrom-Normallampe (gasgefüllt)	0,6 %
Gleichstrom-Unsicherheit für Normallampe	0,4 %
Umgebungstemperatur (und Unsicherheit des Thermometers)	0,3 %
Versorgungsspannung der LED (und Unsicherheit des Voltmeters)	0,2 %
Spektrale Fehlanpassung des Kugelphotometer-Systems	1,7 % (3,5 %) ^a
Linearität	0,3 %
Selbstabsorptionskorrektur (Restunsicherheit)	0,3 %
Räumliche Ungleichförmigkeit der Kugel (Unterschied der Lichtstärkeverteilung im Vergleich zur Normallampe)	0,9 %
Wiederholpräzision des Kugelsystems	0,3 %
Stabilität des Kugelsystems (zwischen Kalibriervorgängen)	0,3 %
Nahfeldabsorption	0,3 %
Reproduzierbarkeit der Prüflampe (inklusive Stabilisierungsbedingung)	0,6 %
Stabilität von Normallampen	0,2 %
Relative kombinierte Standard-Unsicherheit	2,5 % (3,9%) ^a
Gesamte erweiterte Unsicherheit	5,0 % (7,8 %) ^a

^a-Werte für weiße LEDs, die auf RGB-Technologie basieren, sind in runden Klammern angegeben

Die erweiterte Messunsicherheit ergibt sich dann durch Multiplikation der kombinierten Standardunsicherheit mit dem Faktor 2.

Die erweiterten Messunsicherheiten des VDE-Labors, welche über eine Monte-Carlo-Simulation ermittelt wurden, sind für die Messung des Lichtstroms von LED Produkten mit der Ulbrichtkugel in Verbindung mit dem Arrayspektroradiometer 4 % und 5 % für die Lichtstrombestimmung mit dem Drehspiegelgoniophotometer. Ein Beispiel der Unsicherheitsfaktoren für die Lichtstrombestimmung mit einem Goniometer ist in Tabelle 6.2 aufgezeigt.

Tabelle 6.2: Unsicherheitsbeiträge für die Bestimmung des Lichtstroms einer weißen LED mit einem Goniophotometer

Name der Größe X_i	Relativer Beitrag zur Ausgangs-Standard-UNSicherheit $u_{rel,i}(y)$
Kalibrierunsicherheit des auf SI-Einheiten rückführbaren Sekundärnormals des Lichtstroms	1,0 %
Alterung der Lichtstrom-Normallampe (gasgefüllt)	0,6 %
Gleichstrom-UNSicherheit für Normallampe	0,4 %
Umgebungstemperatur (und Unsicherheit des Thermometers)	0,3 %
Versorgungsspannung der LED (und Unsicherheit des Voltmeters)	0,2 %
Spektrale Fehlanpassung des Photometer-Systems	1,7 % (3,5 %) ^a
Streulicht im Raum	0,6 %
Linearität	0,3 %
Polarisation	0,1 %
Stabilität der Prüflampe (während der Messung)	0,3 %
Reproduzierbarkeit der Prüflampe (inklusive Stabilisierungsbedingung)	0,6 %
Stabilität von Normallampen	0,2 %
Relative kombinierte Standard-UNSicherheit	2,4 % (3,7%) ^a
Gesamte erweiterte Unsicherheit	4,7 % (7,6 %) ^a

^a-Werte für weiße LEDs, die auf RGB-Technologie basieren, sind in runden Klammern angegeben

Zum Zeitpunkt der Durchführung des Round-Robin-Tests betrug die erweiterte Messunsicherheit der Lichtstrombestimmung mit dem Drehspiegelgoniophotometer 7 %. Durch eine genauere Beschreibung der Messprozesse wurde dieser Wert im Laufe der Zeit zunehmend geringer.

6.3 Akzeptanztests / Round-Robin-Tests

Es wurde im Rahmen des PQL Projektes ein Round-Robin-Test mit den Laboren der Hersteller, dem Labor der TU Darmstadt und dem VDE Labor, welches auf Grund der Akkreditierung als Referenzlabor diente, durchgeführt. Dieser Ringversuch lief über einen Zeitraum von zwei Jahren. Die Leuchtenhersteller schickten drei Leuchten eines Typs, maximal drei verschiedene Leuchtentypen, zum VDE. Eine anonymisierte Übersicht der verschiedenen Hersteller und Leuchtentypen ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Dort wurden die Leuchten lichttechnisch und spektral vermessen. Die spektralen Messungen wurden mit dem Goniometer unter (0°/0°) durchgeführt. Nach Abschluss der Messungen wurden die Leuchten per Kurier zur TU Darmstadt gebracht, wo diese ebenfalls auf ihre lichttechnischen und spektralen Eigenschaften überprüft wurden. Der Unterschied bei der Durchführung der spektralen Messungen war, dass die TU Darmstadt, anders als der VDE, ein Doppel-Monochromator mit höherer Messgenauigkeit benutzt.

Tabelle 6.3: Übersicht der im Round-Robin-Test gemessenen Leuchten

Leuchtentyp	Anzahl	Hersteller (codiert)
Anbauleuchte	3	A,G,I
Einbauleuchte	2	F,I
Einbaudownlight	2	G,J
Strahler	2	B,H
Straßenleuchte/Mastansatz	8	C,D,E,F,J,K,L
Pollerleuchte	1	C
AP-Leuchte / Tischleuchte	2	H
Stehleuchte	2	H,I

Insgesamt wurden 69 Leuchten lichttechnisch und spektral vom VDE und der TU Darmstadt vermessen und die Messergebnisse ausgewertet. Hierzu wurde der Mittelwert der drei Einzelmessungen eines Leuchtentyps ermittelt und verglichen. Es ergab sich, dass 14 von 25 Mittelwerten des aus der LVK berechneten Lichtstroms eine Abweichung von weniger als 1 % hatten, was eine sehr gute Übereinstimmung war. 16 von 25 Mittelwerten waren innerhalb der erweiterten Messunsicherheit des VDE Referenzlabors. Lediglich zwei Mittelwerte hatten eine Abweichung, die größer war als die Messunsicherheit des VDE-Messlabors. Da das Photometrielabor der TU Darmstadt einen Leuchtenwender als Goniometer besitzt, zeigten die Ergebnisse, dass bei korrekter Bedienung der Messanlagen vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können.

Die größte Abweichung im Lichtstrom wurde bei einem langen Leuchtentyp ermittelt, bei dem die einzelnen Lichtpunkte weit voneinander entfernt waren. Bei dieser Art von Leuchten ist es enorm wichtig, eine lange Messstrecke zu haben, um sich außerhalb der photometrischen Grenzentfernung zu befinden. Vergleicht man die gemessenen Daten der TU Darmstadt und des VDE mit den Herstel-

lerangaben beziehungsweise den Messungen der Hersteller, so stellt man fest, dass die Abweichungen von den Herstellern zu einem der anderen beiden Labore in der Regel größer ist als die Abweichungen zwischen der TU Darmstadt und dem VDE. Ein Großteil der Hersteller konnte keine Angaben bezüglich der Messunsicherheiten Ihrer Labore machen. Die TU Darmstadt ermittelte eine Messunsicherheit für die Lichtstrombestimmung mit dem Leuchtenwender von 9 %. Die Messergebnisse und die Abweichungen im Lichtstrom werden in der Abbildung 6.7 präsentiert.

Leuchtennummer	Mittelwert Ergebnisse VDE	Mittelwert Ergebnisse TUD	Abweichung VDE/TUD	Herstellerangaben	Abweichung VDE/Hersteller	Abweichung TUD/Hersteller
1	2657	2652	0,2%			
2	1620	1868	-15,3%	1774	-9,5%	5,0%
3	1799	2040	-13,4%	1962	-9,1%	3,8%
4	4019	3980	1,0%	3859	4,0%	3,0%
5	1599	1591	0,5%	1655	-3,5%	-4,0%
6	693	698	-0,8%	687	0,8%	1,6%
7	611	580	5,1%			
8	341	354	-3,7%			
9	741	734	0,9%	813	-9,8%	-10,7%
10	914	860	5,9%	900	1,5%	-4,7%
11	5769	5647	2,1%	6050	-4,9%	-7,1%
12	1693	1696	-0,2%			
13	3089	3103	-0,5%			
14	2458	2436	0,9%			
15	2681	2674	0,3%			
16	7028	6834	2,8%			
17	2427	2439	-0,5%			
18	5532	5516	0,3%			
19	2056	2062	-0,3%			
20	2592	2589	0,1%	2582	0,4%	0,3%
21	5153	5080	1,4%	5700	-10,6%	-12,2%
22	3541	3640	-2,8%	3458	2,4%	5,0%
23	9049	9033	0,2%			
24	1522	1505	1,1%			
25	7827	7891	-0,8%	7924	-1,2%	-0,4%
MAX			5,9%		4,0%	5,0%
MIN			-15,3%		-10,6%	-12,2%

Abbildung 6.7: Übersicht der im Round-Robin-Test gemessenen Leuchten

Ebenso wurden die spektralen Parameter Farbtemperatur und Farbwiedergabeindex miteinander verglichen. Es stellte sich heraus, dass alle Farbtemperaturen – bis auf zwei – und die Farbwiedergabeindex innerhalb der erweiterten Messunsicherheiten des VDE Labors liegen. Die Messunsicherheit des VDE-Labors für Farbtemperaturen bis 3000 K liegt bei 75 K. Für Farbtemperaturen oberhalb 3000 K und Unterhalb 6000 K liegt sie bei 150 K und ab einer Farbtemperatur größer 6000 K wurde die Messunsicherheit auf 250 K bestimmt. Betrachtet man den Farbwiedergabeindex, so ermittelte der VDE eine Messunsicherheit von 3 Einheiten. Die Messergebnisse und die dazugehörigen Abweichungen sind in Abbildung 6.8 und Abbildung 6.9 zu finden.

Sind die Messunsicherheiten und Messergebnisse der einzelnen Labore innerhalb eines Ringversuches bekannt, so lässt sich mit Hilfe von Gleichung 6.5 eine Validierung von Messverfahren feststellen. Benutzt man diese Formel um die Messergebnisse von der TU Darmstadt und dem VDE zu vergleichen so zeigt sich, dass alle ermittelten Ergebnisse ihre Gültigkeit besitzen. Eine Validierung der Messergebnisse der Hersteller ist hier nicht möglich, da keine Messunsicherheiten vorliegen. Des Weiteren war es den Herstellern nicht möglich, zu all ihren eingeschickten Leuchten, Messergebnisse zu liefern.

Leuchtennummer	Mittelwert Ergebnisse VDE	Mittelwert Ergebnisse TUD	Abweichung VDE/TUD	Herstellerangaben	Abweichung VDE/Hersteller	Abweichung TUD/Hersteller
1	4343	4328	14			
2	3060	3083	-23	3057	3	26
3	3834	3874	-40	3808	26	66
4	4034	4096	-63	4000	34	96
5	4297	4323	-26	4249	48	74
6	3769	3755	14	3748	21	7
7	4260	4276	-16			
8	4218	4216	2			
9	3019	3054	-35	3000	19	54
10	3033	3066	-33	3000	33	66
11	3089	3113	-24	3000	89	113
12	3086	3404	-318			
13	4099	4098	1			
14	5796	5788	8			
15	4614	4656	-42			
16	3904	3890	14			
17	4266	4305	-39			
18	4573	4613	-40			
19	4539	4505	33			
20	4224	4223	2			
21	3985	4264	-279			
22	4539	4545	-6			
23	4115	4182	-66			
24	4096	4078	18			
25	4424	4214	210			
MAX			210		89	113
MIN			-318		3	7

Abbildung 6.8: Messergebnisse und Abweichungen der Farbtemperatur im Round-Robin-Test

Leuchtennummer	Mittelwert Ergebnisse VDE	Mittelwert Ergebnisse TUD	Abweichung VDE/TUD	Herstellerangaben	Abweichung VDE/Hersteller	Abweichung TUD/Hersteller
1	89	88	1			
2	85	84	1	85	0	-1
3	83	82	1	83	0	-1
4	84	83	1	80	4	3
5	87	86	2	87	0	-1
6	86	86	0	85	1	1
7	91	90	1			
8	83	83	1			
9	79	79	0			
10	81	80	1	80	1	0
11	82	84	-2	80	2	4
12	91	89	2			
13	86	85	1			
14	72	72	0			
15	68	67	1			
16	64	64	0			
17	82	81	1			
18	68	68	0			
19	75	73	2			
20	78	77	1			
21	83	85	-2			
22	69	68	1			
23	76	76	0			
24	75	73	2			
25	70	67	3			
MAX			3		4	4
MIN			-2		0	-1

Abbildung 6.9: Messergebnisse/Abweichungen des Farbwiedergabeindex (Round-Robin-Test)

$$E_n = \frac{|x - x_R|}{2\sqrt{u(x)^2 + u(x_R)^2}} \leq 1 \quad 6.5$$

mit:

x eigener Messwert

x_R Messwert des Referenzlabors

$u(x)$ eigene Standardunsicherheit

$u(x_R)$ Standardunsicherheit des Referenzlabors

Die Präsentation der Messergebnisse des Round-Robin-Tests fand während einer PQL Sitzung statt. Auf der Fachtagung „LICHT 2012“ in Berlin wurde ein Vortrag mit dem Titel „Analyse der goniophotometrischen LED-Leuchtenlichtmesstechnik: Verfahren, Vergleichsmessungen, Messunsicherheitsbestimmung“ gehalten.

6.4 Vorbereitungen einer Normung

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus drei Jahren Forschungs- und Zusammenarbeit während des PQL-Projektes wurden gesammelt und ein Anforderungskatalog in enger Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt erstellt. Diese Anforderungen stellte der VDE im Rahmen einer PQL-Sitzung in einem Vortrag vor. Die gesammelten Erfahrungen und die daraus resultierenden Anforderungen sollen in einem ersten Schritt in eine sogenannte VDE-Anwendungsregel transferiert werden. VDE-Anwendungsregeln sind hausinterne Standards deren Ziel es ist, in eine international gültige Norm übernommen zu werden. Die Vorlage für einen Entwurf der VDE-Anwendungsregel wurde bereits erarbeitet, welche im Oktober 2014 dem UK 521.4 zur Kenntnis und weiteren Bearbeitung gegeben wird. Das UK 521.4 ist ein Unterkomitee für Leuchten, welches in der DKE angesiedelt ist.

Diese vorgeschlagene VDE-Anwendungsregel wird Anforderungen an LED-Leuchten und entsprechende Prüfungen beinhalten, die es ermöglichen, zwischen qualitativ guten und qualitativ schlechten Leuchten zu differenzieren. Die Titelseite der Anwendungsregel ist in Abbildung 5.4.1 zu sehen. Im Folgenden ist ein Auszug aus dem Originaltext des Vorschlags zur VDE Anwendungsregel dargestellt:

1 Anwendungsbereich

„Diese VDE-Anwendungsregel beinhaltet Anforderungen an die Arbeitsweise (Performance) von LED-Leuchten und entsprechende Prüfungen zur Beurteilung zum Erlangen des „Performance-Quality-Label (PQL) für LED-Leuchten. Die Anforderungen an eine LED-Leuchte, die nach dieser VDE-Anwendungsregel geprüft wird, umfassen messbare lichttechnische und elektrische Parameter. Wenn für eine notwendige Prüfung kein normativer Verweis im Text der VDE-Anwendungsregel angegeben ist, werden reproduzierbare Verfahren bei der Prüfung angewandt, die dem Stand der Technik entsprechen.“

Die Vergabe des Quality-Performance-Labels (PQL) setzt voraus, dass die Nachweise erbracht wurden, dass alle relevanten sicherheitstechnischen Richtlinien, Normen und EMV-Anforderungen durch die Leuchte erfüllt werden.“

	VDE-AR-E XXXX	VDE
	Dies ist eine VDE-Anwendungsregel im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach der Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	DKE
Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet.		
ICS		
<p style="text-align: center;">Performance-Quality-Label (PQL) für LED-Leuchten</p> <p style="text-align: center;">Performance-Quality-Label (PQL) for LED-Luminaire</p>		

Abbildung 6.10: Titelseite der VDE Anwendungsregel

6.5 Marktüberwachung

Die Marktüberwachung des PQ-Labels soll in Anlehnung an die von der „European Certification System (ECS)“ existierenden Dokumente CIG 021, CIG 022, CIG 023 und CIG 024 geschehen. Die Grundlagen des Marktüberwachungsverfahrens sind in CIG 021 beschrieben (siehe Abbildung 6.11). Dieses Dokument befasst sich mit dem Werksinspektions-Verfahren und Prüfungen, die vom Hersteller beizustellen und durchzuführen sind, um sicherzustellen, dass alle zertifizierten Produkte, innerhalb der akzeptierten Fertigungstoleranzen, mit dem Muster identisch sind, für das die Produktzertifizierung erteilt wurde. Dieses Dokument beinhaltet die Mindestanforderungen. Die Erfüllung dieser Anforderungen wird während der Werksinspektion überprüft.

Routine-Inspektionen werden normalerweise nicht angekündigt. Jedoch kann es in bestimmten Fällen notwendig sein, die richtige Kontaktperson anzutreffen. Unter solchen Umständen kann es notwendig sein eine Inspektion vorher anzukündigen. Auf der anderen Seite kann es notwendig sein, aufgrund einer besonderen Situation mit einem Hersteller, eine Inspektion unbedingt unangekündigt durchführen zu müssen. Die Entscheidung darüber trifft die Zertifizierungsstelle.

Zum Nachweis, dass die Bedingungen für eine Herstellung von zertifizierten Produkten gegeben sind, das eine einheitliche Produktion erwartet werden kann, muss die Inspektion in jedem Fall durchgeführt werden. Ein vollständiger Inspektionsbericht (PD CIG 023) muss erstellt werden, auch wenn zur Zeit der Inspektion keine Produktion der zertifizierten Produkte stattfindet. Alle Einzelheiten über die Prüfung, die Prüfgeräte und die Kalibrierung sind gleichermaßen wichtig, selbst wenn keine Produktion stattfindet oder zurzeit andere Produkte hergestellt werden.

Zum Nachweis, dass die Bedingungen für eine Herstellung von zertifizierten Produkten in dem Maße gegeben sind, dass eine einheitliche Produktion erwartet werden kann, werden Inspektionen auch in den Fällen durchgeführt, wenn derzeit keine zertifizierten Produkte hergestellt werden. Zusätzlich wird die QM-Dokumentation über die gelabelten Produkte der Hersteller überprüft. In Abhängigkeit dieser wird die Überwachungsfrequenz festgelegt. Wenn in der QM-Dokumentation die Überwachung der lichttechnischen und spektralen Parameter der Leuchten beschrieben ist, soll die Überwachung der Produkte im jährlichen Rhythmus erfolgen. Andernfalls behält sich der VDE vor, die Frequenz auf zweimal jährlich festzulegen.

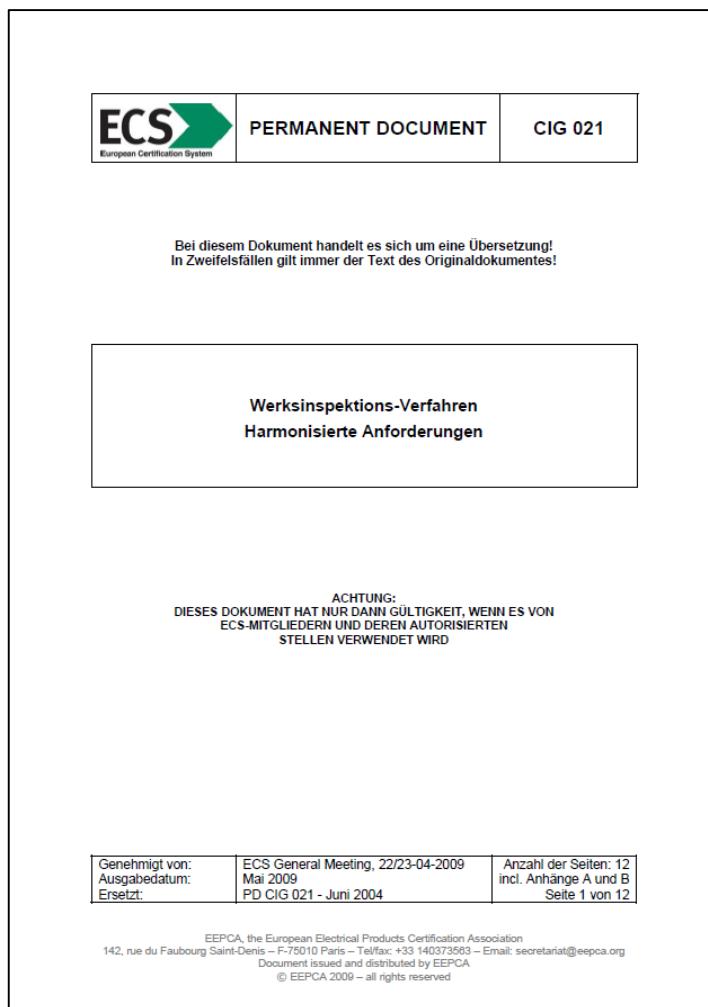


Abbildung 6.11: Deckblatt des von ECS verabschiedeten Dokumentes CIG 021

7 Zusammenfassung

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

- Im Rahmen des Projektes wurden mehr als 70 LED-Leuchten an der TU Darmstadt, beim VDE und in der Industrie lichttechnisch und elektrisch vermessen. Den Untersuchungen folgten Diskussionen im PA und zwischen den beteiligten Einrichtungen. Das führte dazu, dass die Messabweichungen bezüglich des Leuchtenlichtstroms zwischen VDE/TU Darmstadt auf der einen Seite und den teilnehmenden Firmen des PA auf der anderen Seite weitgehend unterhalb $\pm 10\%$ liegen. Man kann somit ausgehen dass in den Datenblättern dieser Hersteller in diesen Grenzen zuverlässig sind.
- Die umfangreichen Daten aus der LED-Alterung an der Hochschule Hannover und an der TU Darmstadt zeigen nach mehr als 10.000 Stunden Alterungszeit, dass die Lebensdauer der LEDs sehr stark von der Temperatur und vom Strom abhängt. Die gewonnenen Messdaten für die Lebensdauer stimmen öfter nicht mit den Angaben der LED-Hersteller überein. Hohe LED-Belastungen wie 1000 mA und hohe Temperaturen um ca. 95 °C am LED-Board sollten vermieden werden.
- Für die Package-Analyse wurden u.a. Messungen der LED-Spektren, der I-U-Kennlinien sowie die Erfassung der thermischen Widerstände durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Lichtstromdegradation und die Farbortverschiebung sehr stark mit der Qualität des Phosphorvergusses, mit der Stabilität der Leiterplattenmaterialien und der Qualität der Kontaktierung zusammenhängen. Die Silikonmasse muss thermisch und optisch möglichst leitfähig und gegenüber der Strahlung des blauen Chips und chemischen Substanzen stabil sein.
- Die Abhängigkeit der LED-Eigenschaften wie Spektrum, Farbort, Lichtstrom, Vorwärtsspannung und Farbwiedergabe von der Temperatur und LED-Strom wurde eingehend untersucht und modelliert. Diese Modellierung ist die einzige Möglichkeit, um den Farbort einer LED-Leuchte mit RGB-LEDs und weißen LEDs gemeinsam konstant zu halten. Die Konsequenz für die Farbortabhängigkeit ist, ein „Hot“-Binning bei realen Temperaturen wie 80° C oder 85 °C. Diese Methode erhöht die Zuverlässigkeit und Relevanz der LED-Datenblattangaben und die Akzeptanz der LED-Leuchtenhersteller und Endanwender.
- Aus den gewonnenen technischen Kenntnissen wurde eine Methodik zur LED-Straßenleuchtenentwicklung beschrieben, die wichtige Parameter im Laufe eines Entwicklungsprozesses berücksichtigt. Die konsequente Einhaltung dieser Entwicklungsmethodik sichert eine optimale Entwicklung von Leuchten mit hoher lichttechnischer Qualität, Akzeptanz

und Langlebigkeit. Zudem wurden EMV- und ESD-Messungen durchgeführt. Durch Überspannung werden viele LEDs und LED-Leuchten geschädigt. Abhilfe bietet eine entsprechende Handhabung der LEDs bis zum Einbau in die Leuchte sowie passende Schutzschaltungen.

- Bei der Alterung und Analyse LED-Leuchten gibt es zwei Gruppen von Leuchten. Die eine Gruppe weist eine geringe Degradation auf, die andere zeigt nach 7000 Stunden bereits eine Reduzierung des Lichtstromes um mehr als 10 %. Die Gründe dafür sind die hohe Temperatur der LED-Bauelemente (nicht optimales Thermomanagement), verbunden mit einer Schädigung der Leuchtstoffschicht-Silikon-Mischung.
- Im PQL-Projekt wurde Untersuchung für das Farbbinning bei dem Kriterium „gerade wahrnehmbar“ für Selbstleuchter durchgeführt. Die bisher geltenden Ergebnisse nach MacAdam können maximal für das Tageslicht ab 6000 K angewendet werden. Für Farbtemperaturen unter 4000 K weichen die Ergebnisse von den Ellipsen MacAdams, die zurzeit weltweit angewendet werden, sehr stark ab. Die Kriterien für die LED-Selektion für Körperfarben und für die Beurteilung des Weißpunktes der LED-Beleuchtung wurden ebenfalls ermittelt.
- Ein bedeutendes Ergebnis der Untersuchungen ist die Skalierung und semantische Interpretation der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen und LED-Beleuchtung. Die in den internationalen Normen angeforderten Farbwiedergabeindizes von 80 erweisen sich nur als „gut bis befriedigend“. Eine gute Farbwiedergabe erreicht man erst mit einem Wert ab 86. Diese Erkenntnisse fördern die Denkweise der LED-Entwickler und Anwender, bei der Lichtkonzeption an die Farb- und Lichtqualität zu denken und nicht nur an die Lichtmenge und Energieeffizienz.
- Umfangreiche Tests der pulsweiten-modulierten LEDs auf die Wahrnehmung bezüglich des Flimmerns und stroboskopischer Effekte haben ergeben, dass die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit bei einer Modulationsfrequenz von mehr als 400 Hz substanzell unterdrückt werden kann. Diese Erkenntnisse wurden mit der Elektronikindustrie auf verschiedenen Tagungen und VDI-Konferenzen kommuniziert und präsentiert.
- Eine dauerhafte Fortführung und Weiterentwicklung der im Rahmen der PQL-Projektarbeit entwickelten Fehler- und Schadensdatenbank ist äußerst lohnenswert. So kann den teilnehmenden Unternehmen auch künftig eine kontinuierliche Verfügbarkeit der Datenbank gewährleistet werden. Unternehmen können die Erfahrungen in die Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung integrieren. Dies würde zu einer stetigen Ressourcenersparnis insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen führen. Des Weiteren sollten die Anwender der LED-Beleuchtung, wie beispielsweise Energieversorger und Facility Manager, große

und mittlere Kommunen noch stärker in die Erstellung von Ausfallstatistiken einbezogen werden. Diese könnten wertvollen Input für die Leuchtenhersteller leisten, da heutzutage bereits langfristig existierende LED-Projekte inklusive Leuchtenausfällen vorhanden sind.

- Die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus drei Jahren Forschungs- und Zusammenarbeit während des PQL Projektes wurden gesammelt und in einem Anforderungskatalog in enger Zusammenarbeit mit der TU-Darmstadt zusammengefasst. Diese Anforderungen stellte der VDE den Firmen des PA im Rahmen einer Sitzung in einem Vortrag vor. Die gesammelten Erfahrungen und die daraus resultierenden Anforderungen sollen in einem ersten Schritt in eine sogenannte VDE-Anwendungsregel transferiert werden. VDE-Anwendungsregeln sind hausinterne Standards, deren Ziel es ist, in eine international gültige Norm übernommen zu werden. Die Vorlage für einen Entwurf der VDE-Anwendungsregel wurde bereits erarbeitet. Diese wird im Oktober 2014 dem UK 521.4 zur Kenntnis und weiteren Bearbeitung gegeben. Das UK 521.4 ist ein Unterkomitee für Leuchten, welches in der DKE angesiedelt ist. Diese vorgeschlagene VDE-Anwendungsregel wird Anforderungen an LED-Leuchten und entsprechende Prüfungen beinhalten, die es ermöglichen, zwischen qualitativ guten und qualitativ schlechten Leuchten zu differenzieren. Diese VDE-Anwendungsregel beinhaltet Anforderungen an die Arbeitsweise (Performance) von LED-Leuchten und entsprechende Prüfungen zur Beurteilung zum Erlangen des „Performance-Quality-Label (PQL) für LED-Leuchten“. Die Anforderungen an eine LED-Leuchte, die nach dieser VDE-Anwendungsregel geprüft wird, umfassen messbare lichttechnische und elektrische Parameter.

Die Vergabe des Performance-Quality-Labels (PQL) setzt voraus, dass die Nachweise erbracht wurden, dass alle relevanten sicherheitstechnischen Richtlinien, Normen und EMV-Anforderungen durch die Leuchte erfüllt werden.

In dem Projekt PQL mit einer Laufzeit von 3 Jahren gab es sechs eintägige Meetings mit den Leuchten- und LED-Firmen des PA. Wegen der Dringlichkeit der LED-Themen in einem dynamisch globalen Wettbewerb um Kenntnisse und Wissen wurden zwei außerplanmäßige Sonderworkshops über „LED-Farbqualität“ und „LED-Lebensdauer und Zuverlässigkeit“ durch die Forschungsstelle TU Darmstadt organisiert (siehe Anhang B2). Die Erkenntnisse über das Thema „Farbbinning“ wurden speziell in einem separaten Workshop mit der zuständigen Technischen Arbeitsgruppe des ZVEI ausgetauscht.

8 Literatur

- [1] Gläser, D.: „Grundlagen der Normung für ein Performance Quality Label (PQL) für Leuchten“. Fortschritte in der Zertifizierung von LED Produkten. PQL Projekt Forschungsstelle 5. 10.04.2014. Darmstadt.
- [2] Bressem, Jörg: „LED in der Straßenbeleuchtung – Schon heute eine wirtschaftliche Alternative?“, Tagung Stadt- und Außenbeleuchtung, Dresden, 2012
- [3] Büntinger, Frank; Votsmeier, Thomas; Menacher, Ronald; Stühler, Leo: „QM wird Chef-sache!“, QZ – Qualität und Zuverlässigkeit Heft 7/2014, Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.), Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2014
- [4] DGQ-Band 13-11: „FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“, Beuth, Berlin [u.a.], 5. Auflage, 978-3-410-32276-4
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Risikomanagement – Verfahren zur Beurteilung IEC/ISO 31010: 2009), Deutsche Fassung EN 31010:2010, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010
- [6] Melcher, Paul; Fey, Andreas: „Mit vereinten Kräften“, QZ – Qualität und Zuverlässigkeit Heft 11/2013, Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.), Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2013
- [7] Schwenzfeier-Hellkamp, Eva; Schneider, Michael: „Produkt – Risikomanagement im LED-Bereich – Chancen für Hersteller und Anwender“, 1. VDI-Konferenz „Lebensdauer und Qualitätssicherung in der LED-Beleuchtung“, Düsseldorf, 2012
- [8] Schwenzfeier-Hellkamp, Eva; Manz-Schumacher, Hildegard; Schneider, Michael: „Technisches Risikomanagement als Grundlage der kontinuierlichen Produktverbesserung“, VDI-Konferenz „Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung“, Düsseldorf, 2014
- [9] Schneider, Michael; Schwenzfeier-Hellkamp: „Untersuchung der Wartungs- und Instandhaltungsfreundlichkeit ausgewählter LED-Straßenleuchten“, Thüga-Kongress, Würzburg, 2012
- [10] <http://sixsigmablackbelt.de/wp-content/uploads/2013/05/Fehlerkosten-10-er-Regel.png>, letzter Zugriff: 30.06.2014
- [11] Zentis, Thomas; Czech, Anton; Prefi, Thomas; Schmitt, Robert: „Technisches Risikomanagement in produzierenden Unternehmen, Eine Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT und der P3 Ingenieurgesellschaft.“, 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl (Edition Wissenschaft Apprimus), Aachen, 2011
- [12] American National Standard Lighting Group (Ed.): AN-SI_NEMA_ANSLG C78.377-2008. American national standard for electric lamps. Specifications for the chromaticity of solid state lighting products. 2008.
- [13] Biske, K.: Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme. Dissertation an der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik. Osnabrück: Der andere Verlag, 2010.
- [14] Brown, W. R. J.: Statistics of color-matching data. J. Opt. Soc. Am. V42 N4 (1952) p. 252 ff.
- [15] Brown, W. R. J.; HOWE, W. G.; JACKSON, J. E.: Multivariate normality of the color-matching process. J. Opt. Soc. Am. V46 N1 (1956) p. 46 ff.

- [16] Graber, M.: Untersuchung des Einflusses von Farbverläufen auf die physio-/psychologische Wahrnehmung von Farbdifferenzen. Masterarbeit an der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik. Ilmenau: 2014.
- [17] MacAdam, D. L.: Visual sensitivities to color differences in daylight. *J. Opt. Soc. Am.* V32 N5 (1942) p. 247 ff.
- [18] MacAdam, D. L.: Specification of small chromaticity differences. *J. O. S. A.* V33 (1943) p. 18 ff.
- [19] Rea, M. S. *Value Metrics for better Lighting*, SPIE press, Bellingham, Washington USA 2013
- [20] Rich, R. M.; Bllmeyer, F. W.; Howe, W. G.: Method for deriving color-difference-perceptibility for surface-color samples. *J. Opt. Soc. Am.* V65 N8 (1975) p. 956 ff.
- [21] Richter, M.: *Einführung in die Farbmehrheit*. 2. Aufl. Berlin: de Gruyter, 1980.
- [22] Whitehead, L.: Interpretation Concerns Regarding White Light, Department of Physics and Astronomy University of British Columbia, Color Research & Application, Volume 38, Issue 2, pages 93–95, April 2013
- [23] Haferkemper, N.; Frohnapfel, A.; Paramei, G.; Khanh, T. Q.: A mesopic experiment series at automotive visual conditions, Proc. ISAL 2007, 7th International Symposium on Automotive Lighting, Technische Universität Darmstadt, September 25 - 26, 2007.
- [24] Bodrogi, P., Khanh, T.Q.: Mesopische Sehleistung – mesopische Photometrie. Teil III-1.1.1, in: *Handbuch für Beleuchtung* (Lange), 51. Ergänzungslieferung. Ecomed Sicherheit, 2011.
- [25] Commission Internationale de l'Eclairage, Recommended system for mesopic photometry based on visual performance, CIE Publ. 191-2010, 2010.
- [26] N. Haferkemper, T. Q. Khanh, Visual acuity in the mesopic range does not depend on the light spectrum, Proc. ISAL 2013, 10th International Symposium on Automotive Lighting, Technische Universität Darmstadt, Sept. 23-25, 2013.
- [27] Ganev, H., Kopp, H., Über die Alterung von Hochleistungs-LEDs: Verfahren, Aufbau, Alterungsmechanismen, *Licht* 2012, Berlin, 13.09.2012.
- [28] Homeyer, K., Kopp, H., Ganev, H., Alterung von Hochleistungs-LEDs – Alterungsmechanismen und Ergebnisse, 10. VDI-Fachtagung Innovative Beleuchtung mit LED, Düsseldorf, 8./9.11.2012.
- [29] Cree, Cree Xlamp LEDs Chemical Compatibility, Support Document CLD-AP63 REV 5., Juni 2014.
- [30] IES LM-80-08 (Illuminating Engineering Society), IES Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources, August 2008.
- [31] IES TM-21-11 (Illuminating Engineering Society), Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources, Nov. 2011.
- [32] Berndt, H., *Elektrostatik*, VDE Verlag, Offenbach, 2009.
- [33] DIN EN 61340-3-1 (VDE 0300-3-1):2008-03, *Elektrostatik – Teil 3-1: Verfahren zur Simulation elektrostatischer Entladungen Entladungen für das Human Body Model (HBM)*.
- [34] Faber, U., Grapentin, M., Wettingfeld, K., *Prüfung elektrischer Anlagen und Betriebsmittel - Grundlagen und Methoden verständlich*, VDE-Schriftenreihe Normen 124, VDE Verlag, Berlin, 2012.

-
- [35] Department of Defense, Defense Logistics Agency, Test Method Standard Microcircuits, MIL-STD-883, <http://www.landandmaritime.dla.mil/Downloads/MilSpec/Docs/MIL-STD-883/std883.pdf>, Letzter Zugriff: 30. Juni 2014.
- [36] Singer, Carsten; Brückner, Stefan; Khanh, Tran Quoc: Methods and techniques for the absolute and accurate determination of the luminous efficiency of today high power LEDs, Proceedings (Herausgeber: Tran Quoc Khanh) of the International Symposium for Automotive Lighting, Darmstadt 25-26. September 2007, p.642-648
- [37] Groh, Andreas; Brückner, Stefan; Khanh, Tran Quoc: the temperature-dependent changes of the photometrical and colorimetrical parameters of today high power LEDs, Proceedings (Herausgeber: Tran Quoc Khanh) of the International Symposium for Automotive Lighting, Darmstadt 25-26. September 2007, p.634-641
- [38] Singer, Carsten; Brückner, Stefan; Khanh, Tran Quoc: Messung von Lichtstrom und Lichtausbeute an modernen Hochleistungsleuchtdioden, Zeitschrift Licht, Pflaum Verlag (München), Heft 9, 2007, S. 714-718
- [39] Trinh, Quang Vinh, Brückner, Stefan, Khanh, Tran Quoc: Accurate measurement of the p-n-Junction Temperature of HP-LEDs-methods and results, Proceedings (Herausgeber: Khanh Tran Quoc) of the International Symposium for Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt 28-29. September 2011, S.809-827
- [40] Narendran, N.; Gu, Y.; Hosseinzadeh, R.: Estimating junction temperature of high-flux white LEDs, Proceedings of SPIE, 5366: 158-160, 2004
- [41] Schwab, A. J., Kürner, W., Elektromagnetische Verträglichkeit, Springer, Berlin, 2007.
- [42] 2014/30/EU, RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit, (Neufassung) vom 26. Februar 2014.
- [43] Waldmann, Herbert. Datenblatt MINELA - ETL 1 FR 112883000-00013485. 06 2014

Anhang

A Nutzen und die wirtschaftliche Bedeutung für KMU	167
B Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Veranstaltungen	169
B1 Reguläre Informationsveranstaltungen des PA (halbjährlich).....	169
B1.1 Kick-off Veranstaltung am 05.07.2011, Frankfurt	169
B1.2 1. Sitzung am 20.10.2011, 11.00 Uhr – 16.00 Uhr, Darmstadt.....	169
B1.3 2. Sitzung am 03.04.2012, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Offenbach.....	169
B1.4 3. Sitzung am 24.10.2012, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Hannover	170
B1.5 4. Sitzung am 10.04.2013, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Ilmenau.....	171
B1.6 5. Sitzung am 24.10.2013, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Bielefeld.....	172
B1.7 6. Sitzung am 10.04.2014, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Darmstadt.....	173
B2 Sonderveranstaltungen für den PA (und weitere Interessierte).....	174
B2.1 Workshop „Farbqualität“, 15.11.2012, Darmstadt	174
B2.2 Workshop „Lebensdauer weißer LEDs“, 24.01.2014, Darmstadt.....	174
B2.3 Workshop-Reihe des ZVEI/VDE zu LED/OLED-Anwendungen.....	175
C Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Publikationen	176
C1 Publikationen der FH Bielefeld	176
C2 Publikationen der TU Darmstadt	176
C3 Veröffentlichungen der Hochschule Hannover	177
C4 Publikationen der TU Ilmenau	177
C5 Publikationen des VDE	179
D Ergebnistransfer in die Wirtschaft – Übersicht	180

A Nutzen und die wirtschaftliche Bedeutung für KMU

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. Auf diese Weise 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 zielstrebig, 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, Farbwiedergabe, Flickerfreiheit und Farbhomogenität, 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 Hochleistungs- und Mittelleistungs-LEDs. 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. Aber auch die LED-Hersteller selbst konnten die Ergebnisse nutzen, indem sie ihre Alterungsdaten mit den Alterungsdaten von der TU Darmstadt und der Hs Hannover vergleichen konnten. 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 ausführlich präsentiert und erklärt.

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 mehr als 70 Leuchten goniophotometrisch, farbmetrisch und elektrisch vermessen werden. Diese Messergebnisse wurden bilateral zwischen der TU Darmstadt und dem VDE auf der einen Seite 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 Leuchtendaten korrekt messen und angeben, können die Anwender und Lichtplaner ihre Beleuchtungsobjekte (Gebäuden, Straßen) korrekt und normgerecht dimensionieren und planen.

Von den gemessenen Leuchten wurde ein Drittel in Laborräumen bis zum Ende der Projektarbeit kontrolliert bis zu 6000 Stunden gemäß den Normen LM80 und TM 21 gealtert. Ein weiterer Teil der

Leuchten wurde unter praxisnahen Bedingungen installiert und betrieben. Die restlichen Leuchten dienten zur detaillierten Analyse. Die Alterungsrate, die Ursachen und die Änderungen der farbmetrischen und spektralen Parameter wurden in zwei Treffen in Vorträgen erläutert. Die Hauptgründe wurden in der thermischen Dimensionierung, in der Kabelführung sowie in einigen Leuchten in der zu hohen Restwelligkeit der LED-Ströme identifiziert und direkt bilateral mit den betroffenen Firmen erörtert.

Ein der wichtigsten Themen der LED-Technologie ist die Temperatur- und Stromabhängigkeit der photometrischen, spektroradiometrischen und farbmetrischen Eigenschaften von LED-Einheiten. Die Angaben in den LED-Datenblättern sind nur korrekt, wenn sie unter den realistischen Messbedingungen ermittelt wurden. Ein wichtiger Aspekt dabei ist das Thema LED-Binning. Anhand von vielen Untersuchungen der TU Darmstadt und der TU Ilmenau konnten sowohl die Notwendigkeiten der Binning-Bedingungen bei 85 °C herausgearbeitet als auch die Interpretation der Binning-Kategorien (sehr gut, gut, zufriedenstellend, gerade noch tolerierbar, nicht akzeptabel) ermittelt werden. Das letztere Merkmal ist für die Kommunikation zwischen LED-Herstellern und LED-Leuchtenherstellern als LED-Käufer sehr wichtig. Das Thema Binning wurde in einem Sondertreffen an der TU Darmstadt mit der zuständigen Technischen Kommission vom ZVEI ausführlich erläutert.

Die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, dass die Akzeptanz für eine neue Lichttechnologie nur vorhanden ist, wenn die Farb- und Lichtqualität der LED-Produkte nicht nur den Normen sondern auch kontext- und anwendungsbezogen den visuellen Erfahrungen und Erwartungen der Anwender entsprechen. Zu den untersuchten Qualitätsparametern gehören die Farbwiedergabe, die Farbhomonogenisierung (z.B. farbliche Gleichheit auf einer großen weißen Wand), Flickerfreiheit und die mesopische Wahrnehmung. In einem nicht im Antrag vorgesehenen zweiten Sonderworkshop in Darmstadt konnte anhand von Vorträgen und Farbexperimenten mit LED-Lichtquellen die Bedeutung der Farbqualität und das vernünftige Maß an Farbqualität für qualitativ hochwertige Anwendungen anschaulich dargelegt werden. Das gilt beispielsweise für Museums-, Hotel- und Shopbeleuchtung. Die Themen wie Flickering und mesopische Wahrnehmung wurden in den direkten Treffen mit der Industrie sowie auch auf nationalen Lichtkonferenzen präsentiert.

In enger Zusammenarbeit der Hs Hannover, der TU Darmstadt, einiger Leuchtenfirmen und kommunaler Anwender konnte an der FH Bielefeld eine umfangreiche Datenbank über Fehlertypen, Schadensursachen der LED-Ausfälle, Häufigkeit der Fehler sowie die Bedeutung und Kaskadierbarkeit der einzelnen Probleme systematisch aufgebaut und gepflegt werden. Leuchtenfirmen und professionelle Anwender der LED-Produkte können darüber die Fehler vermeiden bzw. minimieren sowie die wirtschaftliche und technologische Folge der gemachten Fehler abschätzen. Alle gewonnenen optischen, lichttechnischen, thermischen und elektrischen Erkenntnisse und Erfahrungen wurden durch den VDE und die TU Darmstadt systematisch zusammengestellt und mit Zielwerten bzw. Grenzwerten versehen, so dass über die Qualitätsmerkmale (PQL) in drei Vorträgen in drei Treffen mit der Leuchtenindustrie diskutiert werden konnte.

Alle Erkenntnisse wurden in den Treffen mit den PQL-Firmen, in Sonderworkshops, in Publikationen und Konferenzbeiträgen auf direktem Weg zu den lichttechnischen Ingenieuren der Firmen transferiert. Zusätzlich fand in den letzten 4 Jahren jährlich ein technisches Symposium des ZVEI/VDE mit den Technischen Leitern oder Geschäftsführern von etwa 100 Lichtfirmen in Offenbach bzw. Darmstadt statt. Die TU Darmstadt hielt als PQL-Forschungsvertreter jeweils einen Vortrag über gewonnte Ergebnisse.

B Ergebnistransfer in die Wirtschaft - Veranstaltungen

B1 Reguläre Informationsveranstaltungen des PA (halbjährlich)

B1.1 Kick-off Veranstaltung am 05.07.2011, Frankfurt

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

B1.2 1. Sitzung am 20.10.2011, 11.00 Uhr – 16.00 Uhr, Darmstadt

Teil 1: Übersicht

- Begrüßung
- Herr Dr. Waldorf, 5 Minuten
- Berichte der 5 Forschungspartner an den PA über die geplanten Arbeiten
 - jeweils 10 Minuten pro Vortrag
 - insgesamt mit Wechselzeiten vom Vortrag zu Vortrag: 60 Minuten
- Diskussion: 25 Minuten

Mittagessen bis 13.15 Uhr

Teil 2: Gewonnene Ergebnisse der Forschung der TU Darmstadt

- Temperatur- und Stromverhalten von HL-LEDs - Konsequenzen für Binning-Prozesse
Herr Brückner (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- 2. Lebensdauer von HL-LEDs
Prof. Khanh (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Dimmung von LEDs - Methoden und Lichttechnische Bilanzen
Herr Brückner (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Farbwiedergabe derzeitiger weißer phosphorbasierter HL-LEDs
Herr Prof. Khanh (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Diskussionsrunde und Vereinbarungen: 45 Minuten.

B1.3 2. Sitzung am 03.04.2012, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Offenbach

Teil 1

- Begrüßung
VDE-Geschäftsführer und Herr Disser (5 Minuten)

- Übersicht über das PQL-Projekt
Herr Prof. Khanh, 5 Minuten
- Labels und Regulationen zur Qualitätssicherung bei LED-Produkten - Ergebnisse der Recherchen, z.B. DIN, IEC, ISO, Energy Star, Blauer Engel....etc.
Herr Schaller (VDE), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Stand der Normung im DIN-Normenausschuss Lichttechnik
Herr Prof. Schierz (TUI), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Mittagessen bis 13 Uhr + anschließende Führung durch das Lichttechnik Testcenter des VDE

Teil 2

- Vorläufige Ergebnisse der Round-Robin-LED-Leuchten-Messung vom 01.01.2012 bis 31.03.2012 mit Drehspiegelgoniophotometer (VDE) und Leuchtenwender (TU Darmstadt)
Herr Schaller (VDE), Herr Ganev (TUDa), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Fortschritte des Aufbaus zur LED-Alterung an HL-LEDs an der TU Darmstadt und der Hochschule Hannover
Herr Prof. Kopp (HSH), Herr Ganev (TUDa), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Das neue 3dimensionale Datenblatt der HLLEDs und „hot binning“
Herr Prof. Khanh, 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Packaging und ESD-Thematiken auf einen Blick
Herr Prof. Homeyer (HSH), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Aktueller Stand und weiteres Vorgehen der Risikoidentifizierung sowie der Fehler- und Schadensdatenbank
Herr Schneider, Herr Schäfer (FHB), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Diskussionsrunde: 30 Minuten

B1.4 3. Sitzung am 24.10.2012, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Hannover

Teil 1

- Begrüßung an der Hochschule Hannover
Herr Prof. Homeyer, 5 Minuten
- Einführung in die Tagesagenda
Prof. Khanh, 5 Minuten
- Messungen der PQL-Leuchten - Ergebnisse
Herr Schaller (VDE), Herr Ganev (TUDa), Dauer 22 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- LED-Alterungsergebnisse
Herr Prof. Homeyer, Herr Prof. Kopp (HSH), Herr Ganev (TUDa), 22 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Mittagessen bis 13.00 Uhr und dann bis 13.40 Uhr Besuch des neuen LED-Alterungslabors der Hochschule Hannover

Teil 2

- Experimente zur Farbdifferenz-Wahrnehmung-Aufbau, Ergebnisse, Binning-Herleitung
Herr Prof. Schierz, Herr Kramer (TUI), 22 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Farbwiedergabe - Semantische Skalierung nach der jetzigen CIE-Farbwiedergabe-Definition
Herr Dr. Bodrogi (TUDa), 22 Minuten Vortrag + 10 Minuten Diskussion

Kaffeepause bis 15.00 Uhr

- LED-Risikomanagement- Stand der Arbeit
FHB, 22 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- ESD-Verhalten von LEDs, Schutzmaßnahmen
Herr Prof. Homeyer, Herr Prof. Kopp (HSH), 22 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- PQL-Label : Vorgedanken über die Leistungsparameter
VDE und Dr. Slabke: 22 Minuten Vortrag + 10 Minuten Diskussion

Diskussionsrunde: u.a. über den Arbeitsplan der einzelnen Forschungspartner, 30 Minuten

B1.5 4. Sitzung am 10.04.2013, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Ilmenau

Teil 1

- Begrüßung an der TU Ilmenau
Herr Kramer, 2 Minuten
- Einführung in die Tagesagenda
Prof. Khanh, 5 Minuten
- Messungen sämtlicher PQL-Leuchten beim VDE und der TU Darmstadt - Vollständige Ergebnisse
Herr Schaller (VDE), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- LED-Alterungsergebnisse der TU Darmstadt nach etwa 4000 Stunden
Herr Ganev (TUDa), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Experimente zur Farbdifferenz-Wahrnehmung, Ergebnisse, Binning-Herleitung
Herr Kramer (TUI), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Mittagessen bis 13.55 Uhr und anschließend bis 14.30 Uhr Besuch des Lichtlabors der TU Ilmenau und des Testaufbaus für Binning-Experimente

Teil 2

- LED-Leuchtenmessung - Einbrennverhalten und Brennlagenabhängigkeit - Konsequenzen für die Goniophotometrie
Herr Wagner (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- LED-Risikomanagement - Stand der Arbeit
Frau Prof. Schwenzfeier-Hellkamp (FHB), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion

- Flickering-Wahrnehmung von gepulsten Lichtquellen - eine Frage der Frequenz, der Impuls-Tast-Verhältnisse und stroboskopische Effekte
Herr Polin (TUDa), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Diskussionsrunde mit weiteren Vereinbarungen: 40 Minuten

B1.6 5. Sitzung am 24.10.2013, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Bielefeld

Teil 1

- Begrüßung an der FH Bielefeld
Frau Prof. Schwenzeier-Hellkamp, Frau Prof. Manz-Schumacher, 5 Minuten
- Einführung in die Tagesagenda
Prof. Khanh, 5 Minuten
- LED-Alterungsergebnisse nach ca. 7000-8000 Stunden; ein Versuch der Lebensdauer-Extrapolation nach dem TM21-Prinzip mit den Testdaten nach 2000, 6000 und 7000-8000 Stunden; Analyse der Aussagekraft der Ergebnisse mit verschiedenen LED-Typen
Prof. Homeyer (HSH), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Ergebnisse der Farbdifferenz-Wahrnehmung- Ausführliche Analysen der Testdaten und Binning-Herleitung
Herr Kramer (TUI), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Mittagessen bis 13.15 Uhr

Teil 2

- LED-Risikomanagement- Stand der Arbeit
Frau Prof. Schwenzeier-Hellkamp (FHB), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- LED-Leuchtenalterung: Aufbau, Teststrategie, Ausblick
Herr Ganev (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Farbdifferenzwahrnehmung von Oberflächenfarben- Weißpunkteinstellung und Konsequenzen für Binning und Beleuchtungsbewertung
Herr Böll (TUDa), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Kaffeepause bis 15:15 Uhr

- Thermische Analyse von Hochleistungs-LEDs verschiedener Packagings unterschiedlicher LED-Hersteller - Messung der thermischen Widerstände und Vergleich mit Herstellerangaben - Vergleich warmweißer und kaltweißer LEDs bezüglich thermischer Belastungen
Herr Wagner, Herr Prof. Khanh (TUDa), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Premium Quality Label (PQL) - Anforderungen an die guten LED-Produkte
Herr Gläser, Herr Schaller (VDE), Herr Ganev, Herr Prof. Khanh (TUDa), 30 Minuten Vortrag + 30 Minuten Diskussion

Diskussionsrunde: 15 Minuten

B1.7 6. Sitzung am 10.04.2014, 11.00 Uhr – 17.00 Uhr, Darmstadt

Teil 1

- Begrüßung an der TU Darmstadt
Herr Prof. Khanh, 2 Minuten
- Einführung in die Tagesagenda
Herr Prof. Khanh, 5 Minuten
- Verhalten von HP-LEDs nach bis zu ca. 10.000 Stunden und mögliche Degradationsmechanismen- Lebensdauerdegradation nach TM 21 nach verschiedenen Datenstützpunkten
Herr Prof. Homeyer (HSH), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Farbpräferenz CQS, Farbwiedergabe CRI 1995 und deren Zusammenhänge
Herr Dr. Bodrogi (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Mittagessen bis 12.55 Uhr

Teil 2

- LED-Risikomanagement - Stand der Arbeit
Frau Prof. Schwenzfeier-Hellkamp (FHB), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Thermische Widerstände und Lichtstromverluste von gealterten weißen LEDs und deren Zusammenhänge
Herr Wagner (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Fortschritte in der internationalen Bemühung, Zertifizierung der LED-Produkte für die Industrie und für die Ausschreibung zu definieren
Herr Gläser (VDE), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Kaffeepause bis 14 Uhr 45

- EMV-Untersuchungen an einer Leuchte und ESD-Tests am Bauelement LED
Herr Kötke, Herr Böttcher (HSH), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Wahrnehmung im mesopischen Bereich - Literaturergebnisse, eigene Forschungsresultate, weiße LED-Strahlungswahrnehmung bei Nacht
Herr Dr. Bodrogi (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Leuchtenalterung an der TU Darmstadt
Herr Ganev (TUDa), 20 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Gedanken über Forschungspotentiale
Herr Dr. Slabke, LED-Institut, 10 Minuten

Diskussionsrunde: 15 Minuten

B2 Sonderveranstaltungen für den PA (und weitere Interessierte)

B2.1 Workshop „Farbqualität“, 15.11.2012, Darmstadt

Teil 1

- Einführung-Farbqualitätsparameter, Reflexionsspektren der Objekte, Spektren weißer LEDs und von Retrofit-LED-Lampen, Farbqualitätsvergleich
Herr Prof. Khanh, 50 Minuten + 10 Minuten Diskussion

Teil 2

- Besichtigung des Labors und Teilnahme an den visuellen Versuchen, Teilnehmer in 3 Gruppen ab 13 Uhr, Jede Gruppe an einem Ort im Labor 20 Minuten
 - **Ort 1:** Demoraum mit LEDs (2700 K und 4000 K), Halogenglühlampen 2700 K, Leuchtstofflampen 4000 K, *Herr Söllner, Herr Prof. Khanh*
 - **Ort 2:** 2er Box mit Referenzlampen 2700 K im Referenzbox, weiße und RGB im Testbox (gleicher Farbort, gleiche Farbtemperatur bei unterschiedlichen CRIs von 70, 80 bis 90), *Herr Dr. Bodrogi, Herr Böll*
 - **Ort 3:** Lichtlabor (2 U-Kugeln, LED-Messplatz, 2 Goniophotometer), *Herr Ganev, Herr Schiller*

Teil 3

- Farbqualität von Leuchtstofflampen und weißen LEDs - ein analytischer Vergleich"
Herr Dr. Bodrogi, 30 Minuten

Diskussionsrunde mit allen Teilnehmern über die Thematik " Farbqualität, Farbwiedergabe, Farbobjekte und ihre Wechselwirkungen": 30 Minuten

B2.2 Workshop „Lebensdauer weißer LEDs“, 24.01.2014, Darmstadt

Teil 1

- Begrüßung, Einführung
Herr Prof. Khanh, 2 Minuten
- Farbortstabilität: eine Frage der Produktqualität als Funktion der Lebensdauer, Temperatur, Strom und von der physiologischen Skalierung
Herr Prof. Khanh (TUDa), 25 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Lichtstromdegradation und Farbortverschiebung ($\Delta u'v'$) von Cree- und Nichia-LEDs - reale Testergebnisse nach ca. 8000-9000 Stunden
Herr Prof. Homeyer (HSH), 35 Minuten + 12 Minuten Diskussion

Teil 2

- Änderung der lichttechnischen und elektrischen Eigenschaften von LEDs nach 7000 Stunden

Ganev (TUDa), 35 Minuten + 12 Minuten Diskussion

- Mathematische Funktionen zur Extrapolation der LED-Lebensdauer von unterschiedlichen LED-Typen
Herr Wagner (TUDa), 30 Minuten + 10 Minuten Diskussion
- Leuchtenalterung im PQL-Rahmen - Aufbau, Methodik, Ergebnisse
Herr Ganev (TUDa), 30 Minuten + 12 Minuten Diskussion

Diskussionsrunde mit allen Teilnehmern: 40 Minuten

B2.3 Workshop-Reihe des ZVEI/VDE zu LED/OLED-Anwendungen

VDE/ZVEI Workshop LED/OLED-Anwendungen in der allgemeinen Beleuchtung

Datum: 22.05.2012

Ort: Veranstaltungshalle EVO Offenbach AG, Goethering 43, 63067 Offenbach am Main

Vortrag: Prof. Khanh, 30 Minuten: „Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL) für LED Leuchten

VDE/ZVEI Workshop LED/OLED-Anwendungen in der allgemeinen Beleuchtung

Datum: 19.06-20.06.2013

Ort: Veranstaltungshalle EVO Offenbach AG, Goethering 43, 63067 Offenbach am Main

Vortrag: Prof. Khanh, 30 Minuten: Fortschritt des AiF Förderprojekts „Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL) für LED Leuchten

VDE/ZVEI Workshop LED/OLED-Anwendungen in der allgemeinen Beleuchtung

Datum: 21. Mai 2014

Ort: Maritim Konferenzhotel Darmstadt

Vortrag: Prof. Khanh, 30 Minuten: Abschluss und Ausblick des AiF Förderprojekts „Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL)“ für LED-Leuchten



C 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.

C1 Publikationen der FH Bielefeld

- Schwenzfeier-Hellkamp, E.; Manz-Schumacher, H.; Schneider, M.: „Qualität und Risikobedeutung – aktueller Stand im Bereich LED“, Die Netzwerkpartner – 2. Informationsveranstaltung „Innovative Straßenbeleuchtung“, 03.02.2012, Kaarst
- Schneider, M.; Schwenzfeier-Hellkamp, E.: „Performance Quality Label – Mehr Transparenz für Kommunen und Gemeinden“, 2. LED Fachtagung der RWE Deutschland AG, 06.03.2012, Müden
- Schwenzfeier-Hellkamp, E.: „Qualität und Risikobedeutung – Grenzen und Möglichkeiten des Performance Quality Labels im Bereich LED“, LED - Lichtqualität, Technologie, Standardisierung, Handwerkskammer Ostwestfalen-Lippe zu Bielefeld, 25.04.2012, Bielefeld
- Schwenzfeier-Hellkamp, E.; Schneider, M.: „Produkt-Risikomanagement im LED Bereich – Chancen für Hersteller und Anwender“, 1. VDI-Konferenz "Lebensdauer und Qualitätssicherung in der LED Beleuchtung", 28.06.2012, Düsseldorf
- Schwenzfeier-Hellkamp, E.; Schneider, M.: „Risikomanagement für LED-Produkte aus Sicht der Kommunen und LED-Leuchtenhersteller - Ergebnisse einer Studie“, 10. VDI-Tagung "Innovative Beleuchtung mit LED 2012", 09.11.2012, Düsseldorf
- Schneider, M.; Schwenzfeier-Hellkamp, E.: „Untersuchung der Wartungs- und Instandhaltungsfreundlichkeit ausgewählter LED-Straßenleuchten“, Thüga-Kongress, Würzburg, 2012
- Schneider, M.; Schwenzfeier-Hellkamp, E.: „Technisches Risikomanagement zur Optimierung von LED-Leuchten im PQL-Forschungsprojekt“, 9. LiTG-Tagung Stadt und Außenbeleuchtung, Weimar, 30.01.2014
- Schwenzfeier-Hellkamp, E.; Manz-Schumacher, H.; Schneider, M.: „Technisches Risikomanagement als Grundlage der kontinuierlichen Produktverbesserung“, VDI-Konferenz „Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung“, Düsseldorf, 26.06.2014

C2 Publikationen der TU Darmstadt

- Khanh, T. Q.; Bodrogi, P.; Vinh, T. Q.; Brückner, S.: „Farbwiedergabe von konventionellen und Halbleiter-Lichtquellen: Theorie, Bewertung, Praxis“, Pflaum Verlag, München, 2013, ISBN 978-3-7905-1032-4
- Khanh, T. Q.; Bodrogi, P.; Vinh, T. Q.; Winkler, H. (Editors): „LED Lighting: Technology and Perception“, Wiley-VCH, Veröffentlichung 12/2014, ISBN 978-3527412129.
- Ganev, H; Khanh, T. Q.: „Änderungen elektrischer, spektraler und farbmetrischer Eigenschaften weißer LEDs nach etwa 10.000 Brennstunden“, VDI-Konferenz „Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung“, 25./26.6.2014, Düsseldorf

- Khanh, T. Q.; Ganev, H.: „Lebensdauerberechnung von Leuchten mit LM 80 Daten der LED-Hersteller“, VDI-Konferenz „Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung“, 25./26.6.2014, Düsseldorf
- Khanh, T. Q.: „Der lange Weg zur Auswahl der geeigneten LED-Leuchten: Schritte und Methodik“, 13. ETP-Kongress, Straßenbeleuchtung, 25./26.2.2014, Bremen
- Polin, D.; Khanh, T. Q.: „Untersuchung stroboskopartiger Effekte von PWM-gesteuerten LED-Leuchten“, Lux junior, 27.9.-29.9.2013, Ilmenau
- Wagner, M.; Khanh, T. Q.: „Einbrennverlauf und Brennlageverhalten von LED-Leuchten und deren Konsequenzen für die Leuchten-Goniophotometrie“, Lux junior, 27.9.-29.9.2013, Ilmenau
- Böll, M.; Bodrogi, P.; Khanh, T. Q.: Evaluation of Visual Colour Differences: Consequences for Binning Classification of White High Power LEDs, Lux Europa, 17.9.-19.9.2013, Krakau
- Khanh, T. Q.: „Fortschritt des AiF Förderprojekts „Grundlagen der Normung für ein Performance-Quality-Label (PQL) für LED Leuchten“, LED-Anwendungen in der allgemeinen Beleuchtung, 22.5.2012, Offenbach
- Brückner, S.; Vinh, T. Q.; Khanh, T. Q.: „Dimmung von Hochleistung-LED“. in: ET Licht, 4, 2012, S. 20-24
- Bodrogi, P.; Khanh, T. Q.: „Introduction to practical application“, CIE Introductory Tutorial & Workshop on Mesopic Photometry, 24./25.01.2012, Wien
- Vinh, T. Q.; Khanh, T. Q.: „Wirkungen von Strom und Temperatur auf die LED-Lebensdauer - Eine analytische Untersuchung basierend auf den Labormessdaten“, in: Licht, 11, 2011
- Brückner, S.; Khanh, T. Q.: „Dimmung von Hochleistungs-LED“, in: Licht, 3, 2011, S. 44-49
- Vinh, T. Q.; Brückner, S.; Khanh, T. Q.: „LED-Verhalten bei Strom- und Temperaturveränderungen“, in: Licht, 6, 2011, S. 70-76

C3 Veröffentlichungen der Hochschule Hannover

- Ganev, H.; Kopp, H.: „Über die Alterung von Hochleistungs-LEDs: Verfahren, Aufbau, Alterungsmechanismen“, Tagung LICHT 2012, Berlin, 13.09.2012
- Homeyer, K.; Kopp, H.; Ganev, H.: „Alterung von Hochleistungs-LEDs – Alterungsmechanismen und Ergebnisse“, 10. VDI-Fachtagung „Innovative Beleuchtung mit LED“, 8./9.11.2012, Düsseldorf
- Homeyer, K.: „Alterungsuntersuchungen an Hochleistungs-LEDs: Verfahren, Beobachtungen, Messergebnisse Tagung LICHT 2014, 21.9.–24.09.2014, Den Haag
- Homeyer, K.: „Lichtstromdegradation und Farbortverschiebung - Verhalten von zwei LED-Typen nach der Testdauer von ca. 6000 h bis 10000 h“, Workshop „PQL-Sonderveranstaltung: Lebensdauer von aktuellen weißen LEDs – Testergebnisse- TM 21- Wartungsfaktor“, 24.01.2014, TU Darmstadt

C4 Publikationen der TU Ilmenau

- Kramer, G.: „Binning, MacAdam Ellipsen (1)“, PQL-Projektmeeting, 20.10.2011 Frankfurt

- Kramer, G.: „Binning, MacAdam Ellipsen (2)“, Fachgebietskolloquium Lichttechnik der TU Ilmenau, 23.11.2011, Ilmenau
- Kramer, G.: „Farbort-Binning von LED-Selbstleuchtern“, Expertenseminar Farbe, 30.03.2012, Ilmenau
- Kramer, G.: „Binning, MacAdam Ellipsen (3)“, PQL-Projektmeetings, 02.04.2012, Offenbach
- Schierz, C.: „Stand der Normung im DIN-Normenausschuss Lichttechnik“, PQL-Projektmeetings, 02.04.2012, Offenbach
- Kramer, G.: „Experimentelle Ermittlung von Schwellenwerten“, Doktorandenseminar am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt, 03.05.2012, Darmstadt
- Kramer, G.: „Experimente zur Farbdifferenzwahrnehmung“, PQL-Projektmeeting, 24.10.2012, Hannover
- Varga, H.: „Entwicklung einer farb- und helligkeitsveränderbaren Halbkugelbeleuchtung auf Basis von LEDs“, Abschlussarbeit im Weiterbildungsstudium Lichtanwendung an der TU Ilmenau, 2012, Ilmenau
- Kramer, G.: „Experimentelle Forschung zur physiologischen und psychologischen Wahrnehmung von Farbabständen“, LED-Workshop am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt, 14.03.2013, Darmstadt
- Kramer, G.: „Experimentelle Forschung zur physiologischen und psychologischen Wahrnehmung von Farbabständen“, PQL-Projektmeeting, 10.04.2013, Ilmenau
- Kramer, G.: „Ergebnisse der Farbdiskriminationsuntersuchungen - Eine ausführliche Analyse der Testdaten inkl. Binning-Herleitung“, PQL-Projektmeeting, 24.10.2013, Bielefeld
- Kramer, G.: „Farbdiskrimination. Sind MACADAMs Ellipsen auf LED-Anwendungen übertragbar?“, Photonik-Seminar der TH Nürnberg, 30.10.2013, Nürnberg
- Kramer, G.: „Farbdifferenz-Ergebnisse bei verschiedenen ähnlichen Farbtemperaturen und Farbverläufen“, 3. Darmstädter farbwissenschaftlichen Expertenseminars und Sitzung der AG Grundlagen der Deutschen farbwissenschaftlichen Gesellschaft, 07.03.2014, Darmstadt
- Kramer, G.: „Entwurf eines Farbortgruppierungsverfahrens für weiße LEDs“, Jahreshauptversammlung des Vereins zur Förderung des Fachgebiets Lichttechnik der TU Ilmenau, 19.10.2012, Ilmenau
- Kramer, G.: „Experimente zur Wahrnehmung von Farbunterschieden (Color-Differences-Experiments)“, Lux junior, 27.9.-29.9.2013, Dörnfeld
- Kramer, G.: „Experimente zur Farbdiskrimination“, DfwG-Jahrestagung 2013, 09.10.2013, Ilmenau.
- Kramer, G.: „Welche Farbunterschiede können wir auf leuchtenden Flächen sehen? Grundlagenuntersuchung für zukünftiges Binning“, 11. Ilmenauer Lichttag, 08.03.2014, Ilmenau
- Kramer, G.; Schierz, C.: „Farbdiskrimination in Abhängigkeit von Weißpunkt und Farbverlauf“, Tagung LICHT, 21.09-24.09.2014, Den Haag
- Kramer, G.; Schierz, C.: „Colour discrimination subject to illuminant and colour gradient“, in: Color Res. Appl., eingereicht am 07.05.2014.
- Gruber, M.: „Untersuchung des Einflusses von Farbverläufen auf die physio-/psychologische Wahrnehmung von Farbdifferenzen“, Masterarbeit an der TU Ilmenau, 2014, Ilmenau
- Kramer, G.: „Farbdiskrimination - Ein empirischer Ansatz für die Gruppierung weißer LEDs“, Dissertation an der TU Ilmenau, eingereicht im März 2014

C5 Publikationen des VDE

- Schaller, S.: „Messunsicherheit in der Photometrie“, 20.11.2011, ZVEI, Frankfurt
- Gläser, D.: Förderprojekt „Grundlagen der Normung für ein Performance Quality Label (PQL) für Leuchten“, Forschungsblock FB5, 20.11.2011, ZVEI, Frankfurt
- Disser, M.: „Konzept für ein Produkt/Performance Quality Label für LED-Leuchten“, 3. PQL-Sitzung, 24.10.2012, Hannover
- Ganev, H. ; Gläser, D. ; Khanh, Schaller S.: „Analyse der goniophotometrischen LED-Leuchtenlichtmesstechnik, Verfahren, Vergleichsmessungen, Messunsicherheitsbestimmung“, 3. PQL-Sitzung, 24.10.2012, Hannover
- Schaller, S.: „Recherche über Qualitätslabel auf dem Markt im Rahmen des PQL Projektes“, 05.06.2012, Darmstadt
- Ganev, H. ; Gläser, D. ; Khanh, Schaller S.: „Darstellung und Analyse der goniophotometrischen und colorimetrischen Messdaten aus dem Round-Robin Test im Rahmen des PQL Projektes“, 4. PQL-Sitzung, 10.04.2013, Ilmenau
- Schaller, S.: „Performance Quality Label (PQL): Inhalte und Anforderungen“, 24.10.2013, Bielefeld
- Gläser, D.: „Grundlagen der Normung für ein Performance Quality Label (PQL) für Leuchten - Fortschritte in der Zertifizierung von LED Produkten“, 10.04.2014, Darmstadt

D Ergebnistransfer in die Wirtschaft – Übersicht

Tabelle 4: Tabellarische Übersicht (Auswahl) geplanter und durchgeföhrter Transfermaßnahmen

	Zeit	Maßnahme	Ziel/Erläuterung	erreicht
Während der Projektlaufzeit	halbjährlich	Information und Beratung des PA	Stand der Arbeit, Diskussion, Rückmeldung für weitere Arbeit, Beschlüsse	✓
	halbjährlich	Austausch mit UNILED Projekt	Synergieeffekte nutzen	✓
	jährlich	Weiterbildungsseminare für Mitarbeiter aus der Leuchtenindustrie	Freiwillige Qualifikationsmaßnahmen	✓
	fortlaufend	Ergebnisse in Vorlesungen, Praktika und Seminare an den Forschungseinrichtungen einbringen	Einbindung in die reguläre Lehrtätigkeit	✓
	jährlich	Information von Mitgliedsfirmen und weiteren Interessierten	LED-Workshop bei ZVEI und VDE	✓
	fortlaufend	Studien-, Diplom-, Bachelor-, Masterarbeiten	Akademische Ausbildung an den Forschungseinrichtungen	✓
	fortlaufend	Publikation auf kommerziellen Tagungen für Straßenbeleuchtung	VWEW, Euroforum, ETP, Haus der Technik und weitere	✓
	jährlich	Publikation auf VDI-Fachtagung	LED-Technologie	✓
	jährlich	Publikation auf CIE-Tagung	Internat. Beleuchtungskommission	✓
	jährlich	Information über Ergebnisse	Regionale Verbände der Lichttechnischen Gesellschaften	✓
	2011	Publikation auf ISAL-Fachtagung	Automobilbeleuchtung mit LEDs	✓
	2012	Publikation auf LICHT Tagung	Lichttechnische Gesellschaften	✓
	2013	Publikation auf ISAL-Fachtagung	Automobilbeleuchtung mit LEDs	✓
	Projektende	Workshop für Leuchtenindustrie	Qualifizierungsmaßnahmen für Mitarbeiter bezüglich des Labels, der Teilergebnisse und zur Messtechnik	✓
	Projektende	Vorbereitung der Normung	Beratung von Normungsgremien DKE, CENELEC, IEC, FNL, DIN, CEN, ISO	✓
	Projektende	Abschlussbericht	Zusammenfassen der Ergebnisse und Empfehlungen	✓
	2014	Weiterbildungsseminare für Mitarbeiter aus der Leuchtenindustrie	Freiwillige Qualifikationsmaßnahmen	✓
Nach der Projektlaufzeit	2014	Präsentieren der Ergebnisse (Abschlussbericht) im Internet	Auf eigener Webseite und/oder den Seiten der Forschungseinrichtungen	✓
	2014	Publikation auf u.a. CIE-/LICHT-Tagung	Internat. Beleuchtungskommission/ Lichttechnische Gesellschaften	✓
	2014	Normung	Beratung der Normungsgremien von DKE, CENELEC, IEC, FNL, DIN, CEN, ISO	✓
	2014	Dissertationen	Akademische Qualifizierung	✓
	2015	Dissertationen	Akademische Qualifizierung	✓

