

Einfluss von Temperatur und Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen

Dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Phys. Max Wagner

geboren am 14. November 1982 in Aachen.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann

Tag der Einreichung: 8. Februar 2018

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Mai 2018

D17

Darmstadt 2017

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-82089](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-82089)

URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8208>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

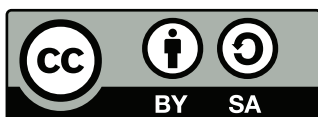
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter einer Creative Commons Lizenz:

Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen



<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh für die geduldige und intensive Betreuung der Arbeit. Seine fachlichen Hinweise und Ratschläge, wie auch seine begeisterte Art haben zur Motivation und Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann für sein Interesse an der Arbeit und der Annahme des Korreferats.

Für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft zahlreicher Kolleginnen und Kollegen, sowie Studierenden und studentischen Hilfskräften möchte ich mich herzlich bedanken.

Speziell möchte ich mich bei Herrn Groh, Herrn Dr. Schiller und Herrn Dr. Trinh für die fachliche Einführung zu Beginn meiner Tätigkeit am Fachgebiet Lichttechnik bedanken.

Desweiteren danke ich Herrn Ganey für die Bereitstellung und Übergabe des Alterungsteststands für LEDs, der die Erzeugung von Langzeitdaten erst möglich gemacht hat. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Herzog, der den Alterungsteststand für COB-Module tatkräftig mit entwickelt hat.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Kobilke und der Firma Excelitas für die Bereitstellung spezieller LED-Packages und Herrn Müllers der Firma Lemtec für die Bereitstellung von LED-Leuchten danken.

Herrn Zhang gebührt ein besonderer Dank, da er während seiner Zeit als studentische Hilfskraft und durch seine Masterarbeit bedeutenden fachlichen Input geliefert hat.

Ein spezieller Dank gilt Herrn Bartelmeß und besonders Herrn Balasus und Herrn von der Au für ihre große Hilfsbereitschaft in der letzten Zeit meiner Promotionsphase. Außerdem möchte ich mich bei meinem Nachbarn Herrn Eisfeldt für die sprachliche Unterstützung beim Verfassen einer englischsprachigen Veröffentlichung bedanken.

Mein tief empfundener Dank gilt meinen Eltern, Geschwistern und Freunden, die mich stets unterstützen und in allen Situationen zur Seite standen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Lebensgefährtin für die große Unterstützung und Geduld in den letzten Jahren bedanken. Ihrer Schwester gebührt ebenfalls ein großer Dank für ihre Hilfsbereitschaft in der letzten Phase meiner Promotion.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XII
Symbolverzeichnis	XV
Kurzfassung	XVIII
1. Einleitung und Motivation	1
2. Grundlagen	5
2.1. Lumineszenzemittierende Diode	5
2.1.1. P-N-Übergang im Bändermodell	5
2.1.2. Elektrisches Verhalten	7
2.1.3. Optisches Verhalten	8
2.2. Packagematerialien	10
2.2.1. Silikone	10
2.3. Spektren von farbigen und weißen LEDs	11
2.3.1. Einfluss der Temperatur	11
2.3.2. Einfluss der Stroms	12
2.4. Strahlungs- und Lichtmesstechnik	13
2.4.1. Strahlungs- und lichttechnische Größen	13
2.4.2. Kolorimetrische Größen	14
2.5. Wärmeübertragung	15
2.5.1. Wärmeleitung	15
2.5.2. Wärmekonvektion	16
2.5.3. Wärmestrahlung	17
2.6. Thermische Widerstände	18
2.6.1. Cauer- und Foster-Netzwerk	18
2.7. Thermische Impedanzmessung	19
2.7.1. Kalibrierung	19
2.7.2. Transiente Messung	20
2.8. Alterungsmechanismen	20
2.9. Physikalische Fehleranalyse	20
2.10. LM-80-08 und TM-21-11	22
2.11. Arrhenius-Methodik	23
2.12. Zuverlässigkeitsmethodik	23
3. Stand der Forschung	27
3.1. Degradationsmechanismen	27
3.2. Fragestellungen und Ziele der Arbeit	32
4. Alterung von Hochleistungs-LEDs	33
4.1. Teststand für LED-Alterung	33

4.2.	Messsystem für LEDs	34
4.2.1.	Optische Messung	34
4.2.2.	Elektrische Messung der LED	35
4.2.3.	Thermische Messung	36
4.3.	Ergebnisse der LED-Alterung	36
4.3.1.	Strahlungsfluss	36
4.3.2.	Elektrische Änderungen	42
4.3.3.	Farbverschiebungen	45
4.3.4.	Thermische Änderungen	47
4.3.5.	Lichtstrom und Strahlungsfluss	50
4.3.6.	Spektrum und Farbort	51
4.3.7.	Strahlungsausbeute	55
4.4.	Fazit des 4. Kapitels	56
5.	Alterung von COB-Modulen	59
5.1.	Teststand für COB-Alterung	59
5.2.	Messsystem für COB-Module	61
5.3.	Ergebnisse der COB-Alterung	62
5.3.1.	Lichtstromdegradation	62
5.3.2.	Elektrisches Verhalten	66
5.3.3.	Oberflächentemperatur des Silikonvergusses	66
5.4.	Umgebungsbedingungen der COB	67
5.4.1.	Einfluss der Umgebungstemperatur	68
5.4.2.	Einfluss der thermischen Anbindung	69
5.5.	Fazit des 5. Kapitels	69
6.	Lebensdauerberechnung	71
6.1.	Unterschiedliche Alterungszeiten	71
6.2.	Funktionen zur Extrapolation	72
6.2.1.	Exponentielle Funktionen	72
6.2.2.	Weitere Funktionen	74
6.3.	Beschleunigungsmethoden	75
6.4.	Lebensdauerfunktionen	75
6.4.1.	Lebensdauerfunktion bezüglich Temperatur	76
6.4.2.	Lebensdauerfunktion bezüglich Strom	76
6.5.	Lebensdauermodell	78
6.5.1.	Mathematische Zusammenhänge	78
6.5.2.	Erzeugung des Modells	79
6.6.	Ausfallstatistik	81
6.6.1.	Methodik	81
6.6.2.	Ergebnisse	82
6.6.3.	Folgerungen	86
6.7.	Fazit des 6. Kapitels	86
7.	LED-Package	87
7.1.	Aufbau der untersuchten LED-Packages	87
7.1.1.	LED-Chip	88
7.2.	Variation der unteren Gehäusebestandteile	90
7.2.1.	Silberleitkleber	90
7.2.2.	Elektrisches Layout	91
7.2.3.	Dielektrikum	92
7.2.4.	Herstellungsprozess	93

7.3. Untersuchung der oberen Packagebestandteile	94
7.3.1. Silikonverguss	94
7.3.2. Parallelwiderstand	96
7.4. Fazit des 7. Kapitels	97
8. Thermische Einflüsse	99
8.1. Thermisches Verhalten von LED-Leuchten	99
8.1.1. Thermischer Pfad einer LED-Leuchte	99
8.1.2. Einbrennverhalten	100
8.1.3. Einbrennverhalten von Straßenleuchten	102
8.1.4. Einfluss der Brennlage	103
8.1.5. Temperatureinfluss bei goniophotometrischen Messungen	104
8.2. Fazit des 8. Kapitels	106
9. Zusammenfassung und Ausblick	109
Literatur	115
Eigene Veröffentlichungen	119
A. Anhang	123

Abbildungsverzeichnis

2.1. Bänderdarstellung des p-n-Übergangs im unbestromten Zustand	6
2.2. Bänderdarstellung des p-n-Übergangs in Durchlassrichtung	6
2.3. Ideale Diodenkennlinie	8
2.4. Theoretisches Spektrum einer lumineszenzemittierende Diode	9
2.5. Schnittbild einer Hochleistungs-LED	10
2.6. Thermischer Einfluss auf das Spektrum einer roten LED	12
2.7. Einfluss des Vorwärtstroms auf das Spektrum einer blauen LED	13
2.8. Normspektralwertfunktionen	14
2.9. CIE-UCS-Farbtafel von 1976	15
2.10. Wärmeleitung durch ein quaderförmiges Objekt	16
2.11. Konvektion über einer planen Oberfläche	16
2.12. Wärmestrahlung zwischen zwei Oberflächen	17
2.13. FOSTER-Netzwerk zur thermischen Analyse	19
2.14. CAUER-Netzwerk zur thermischen Analyse	19
2.15. Ermittlung des Temperaturkoeffizienten	20
2.16. Zeitliche Entwicklung der Ausfallrate	24
3.1. Rückgang der relativen Strahlungseffizienz roter LEDs	27
3.2. Alterung weißer LED-Packages bei verschiedenen Chip-Temperaturen	28
3.3. Alterung weißer LED-Packages bei verschiedenen Vorwärtströmen	29
3.4. Abschnittsweise Modellierung des Lichtstromrückgangs	30
3.5. WEIBULLgraphen von LED-Ausfällen bei verschiedenen Temperaturen	31
4.1. Alterungsaufbau der Hochleistungs-LEDs	33
4.2. Platine für die zu alternden Hochleistungs-LEDs	34
4.3. Messaufbau für optische und thermische Charakterisierung von LED-Packages	35
4.4. Rückgang des Strahlungsflusses bei 350 mA	37
4.5. Rückgang des Strahlungsflusses bei 700 mA	37
4.6. Rückgang des Strahlungsflusses bei 1000 mA	38
4.7. Rückgang des Strahlungsflusses bei 55 °C	39
4.8. Rückgang des Strahlungsflusses 85 °C	40
4.9. Rückgang des Strahlungsflusses bei 95 °C	41
4.10. Rückgang des Strahlungsflusses bei gleicher Chip-Temperatur	42
4.11. Strom-Spannungskennlinien in linearer Darstellung	43
4.12. Strom-Spannungskennlinien in halb-logarithmischer Darstellung	44
4.13. Zeitliche Veränderung der Vorwärtsspannung bei 85 °C	44
4.14. Zeitliche Veränderung der Vorwärtsspannung bei 95 °C	45

4.15. Farbverschiebung bei 85 °C	46
4.16. Farbverschiebung bei 95 °C	46
4.17. Rissbildung in der Verkapselung eines LED-Packages	47
4.18. Thermische Strukturfunktion nach verschiedenen Zeiten	48
4.19. Relative Erhöhung der thermischen Leistungen bei Alterung	49
4.20. Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Silikonverkapselung vom Vorwärtsstrom	50
4.21. Vergleich von Lichtstrom und Strahlungsfluss	51
4.22. Zeitliche Änderung des relativen Spektrums	52
4.23. Zeitlicher Verlauf des spektralen Verhältnisses blau zu gelb	52
4.24. ARRHENIUSgraphen für drei Ströme	53
4.25. Wurzelfunktionen	54
4.26. Strahlungsausbeute nach Alterung (Typ A)	55
4.27. Strahlungsausbeute nach Alterung (Typ B)	56
5.1. Alterungsaufbau für COB-Module	60
5.2. Kühlkörper für COB-Module	60
5.3. Thermische Anbindung der COB-Module	61
5.4. Messaufbau an der Ulbrichtschen Kugel zur COB-Messung	61
5.5. Lichtstromrückgang bei 55 °C und 3300 mA	62
5.6. Lichtstromrückgang bei 120 °C und 3300 mA	63
5.7. Mittlere Lichtstromdegradation bei 3300 mA und vier Temperaturen	63
5.8. ARRHENIUSgraph für COB-Module bei 3300 mA und verschiedenen Temperaturen . . .	64
5.9. Spektrum eines gealterten COB-Moduls	65
5.10. Photographie der Oberfläche eines COB-Moduls	65
5.11. Schnittzeichnung eines COB-Moduls	66
5.12. Emissionsgradbestimmung der Silikonoberfläche	67
5.13. Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Silikonoberfläche vom Vorwärtsstrom . .	67
5.14. Einfluss der Umgebungstemperatur auf COB-Module	68
6.1. Exponentielle Anpassungsfunktionen über verschiedene Zeiträume	71
6.2. Lineare und exponentielle Anpassungsfunktionen	73
6.3. Test von exponentiellen Anpassungsfunktionen	74
6.4. Test von wurzelförmigen Anpassungsfunktionen	74
6.5. Test von exponentiellen Anpassungsfunktionen	75
6.6. Strahlungsflussrückgang von Hochleistungs-LED-Packages	77
6.7. Extrapolation der mittleren Lebensdauer bei drei Alterungsströmen	78
6.8. Ermittlung der Lebensdauern (L_{85}) von COB-Modulen	79
6.9. ARRHENIUSgraph der mittleren Lebensdauern von 85 % bei drei Temperaturen	80
6.10. Lebensdauermodell	80
6.11. Strahlungsflussrückgang von zehn LED-Packages	82
6.12. Kumulative Funktion der Lebensdauer	82
6.13. Wahrscheinlichkeitsgraph zum Test auf Normalverteilung	83
6.14. Anpassung der Lebensdauerverteilung	83
6.15. Kumulierte Lebensdauerverteilung	84

6.16. Wahrscheinlichkeitsgraph zum Test auf Normalverteilung	84
6.17. Wahrscheinlichkeitsgraph zum Test auf Weibullverteilung	85
6.18. Wahrscheinlichkeitsgraphen bei zwei Temperaturen	85
7.1. Schliffbild einer COB-LED	88
7.2. Strukturfunktion einer COB-LED	88
7.3. Strukturfunktion zweier LED-Chips	89
7.4. Schliffbild des Silberleitklebers	90
7.5. Thermische Strukturfunktion im Bereich des Silberleitklebers	91
7.6. Variation der Fläche der Kupferauflage	91
7.7. Strukturfunktionen bei Flächenveränderung des Kupferauflage	92
7.8. Auswirkung verschiedener Dielektrika	92
7.9. Strukturvergleich zweier Leiterplattendielektrika	93
7.10. Auswirkung des Herstellungsverfahrens	93
7.11. Standardlayer	94
7.12. Absolute Temperaturerhöhung von LED-Chips	95
7.13. Normierte Temperaturerhöhung von LED-Chips	95
7.14. Strukturfunktionen mit parallelem thermischen Widerstand	96
8.1. Ersatzschaltbild zur thermischen Betrachtung einer LED-Leuchte	100
8.2. Temperatur- und Beleuchtungsstärkeverlauf	101
8.3. Exponentielles Einbrennverhalten einer LED-Leuchte	101
8.4. Einbrennverhalten einer LED-Leuchte	102
8.5. Einbrennkurven von unterschiedlichen Straßenleuchten	103
8.6. Untersuchung der Brennlage	104
8.7. Zeitliche Winkelabtastung bei Messung mit Goniophotometer	105
8.8. Lichtstärkewerte in verschiedenen C-Ebenen	105
8.9. Unterschiedliche Winkelauflösung beim Goniophotometer	106
9.1. Themenüberblick der Dissertation	109

Tabellenverzeichnis

2.1. Eigenschaften von Silikonen	11
2.2. Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien	16
2.3. Analogien zwischen elektrischen und thermischen Größen	18
2.4. Fehlermechanismen bei elektronischen Bauteilen	21
4.1. Temperaturabschätzung	53
5.1. Vorwärtsspannungen eines COB-Moduls bei unterschiedlicher Wärmeanbindung . . .	69
6.1. Mittlere Lebensdauer bei verschiedenen Strömen	77
7.1. Ermittlung der thermischen Parameter	90
7.2. Leistungen im LED-Package (roher Chip und nach Silikonverguss)	94
7.3. Thermische Widerstände unterschiedlicher Layermaterialien	97

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Langfassung
Ag	Silber
Ag ₂ S	Silbersulfid
AlGaInP	Aluminiumgalliumindiumphosphid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C ₆ H ₅	Phenylrest
Ce	Cerium
CH ₃	Methylrest
Eu	Europium
Ga	Gallium
GaAs	Galliumarsenid
GaInN	Galliumindiumnitrid
GaN	Galliumnitrid
GaP	Galliumphosphid
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
In	Indium
Mg-H	Magnesium-Wasserstoff
O	Sauerstoff
O ₂	Molekularer Sauerstoff (Molekül)
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
TiO _x	Titanoxid
Y	Yttrium
CALiPER	Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting (Standard)
CCD	Charged Coupled Device
COB	Chip-on-Board
IAMS	Insulated Aluminum Materials System
IEC	International Electrotechnical Commission
IES	Illuminating Engineering Society of North America
IHS Markit	Information Handling Services Markit
I-U	Strom-Spannung
LED	Lumineszenzemittierende Diode

LM-80-08	Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources (Standard)
LpS	LED Professional Symposium
MCPCB	Metal Printed Circuit Board
MQW	Mehrfachquantentopf
MTTF	Mean Time To Failure
PAR 38	Parabolic Aluminized Reflector 38 Achtelzoll
PID	Proportional-Integral-Differential
PoF	Physic of Failure
Pt100	Platin-Messwiderstand
PVD	Physical Vapour Deposition
SMU	Source Measurement Unit
TEC	Thermoelectric Cooler
TM-21-11	Projection Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources (Standard)
TU	Technische Universität
U-Kugel	Ulbricht-Kugel
UV	Ultraviolett
VOCs	Volatile Organic Compounds

Symbolverzeichnis

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
griechisch		
α	Winkel	°
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
β	Debeye-Temperatur	K
δ	Winkel	°
$\Delta_{u'v'}$	euklidischer Abstand zweier Farbkoordinaten	–
ε	Emissionskoeffizient	–
Φ	Strahlungsfluss	W
λ	Wellenlänge	m
λ	Zeitkonstante	s
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
μ	Mittelwert	–
η_e	Strahlungsausbeute	W/W
η_v	Lichtausbeute	lm/W
Ω	Raumwinkel	sr
Φ_0	Anfangslichtstrom	lm
Φ_e	Strahlungsfluss	W
Φ_E	Endlichtstrom	lm
Φ_v	Lichtstrom	lm
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ	Reflexionsgrad	–
σ	Elektrische Leitfähigkeit	S/m
τ	Transmissionsgrad	–
τ_p	Lebensdauer eines Ladungsträgers	s
τ_n	Lebensdauer eines Ladungsträgers	s
lateinisch		
A	Fläche	m ²
AF	Beschleunigungsfaktor	–
c_{th}	spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
C_{th}	Wärmekapazität	J/K
d	Abstand	m
D	Diffusionskoeffizient	m ² /s
d	Länge	m

Tabellenverzeichnis

dA	kleines Flächenelement	m^2
ΔE	Energiedifferenz	eV
E	Bestrahlungsstärke	W/m^2
E	Energie	eV
$E_{F,n}$	Ferminiveau an der n-Seite	eV
$E_{F,p}$	Ferminiveau an der p-Seite	eV
E_g	Bandlückenenergie	eV
I	Strom	A
I_0	Strahlstärke in Normalenrichtung	W/sr
I_s	Strahlstärke des schwarzen Körpers	W/sr
I_s	Sperrstrom	A
k	Absorptionszahl	–
k	Temperaturkoeffizient	K/mA
L	Strahldichte	$W/(m^2 sr)$
L_x	Lebensdauer	h
L_{diff}	Diffusionslänge	m
L_λ	spektrale Strahldichte	$W/(m^2 sr nm)$
M	spezifische Ausstrahlung	W/m^2
m	Masse	kg
m^*	reduzierte Masse	kg
m	Steigung des Verhältnisses von Strahlungsanteilen	1/kh
n	Brechungsindex	–
n_i	intrinsische Ladungsträgerkonzentration	$1/cm^3$
N_A	Akzeptorkonzentration	$1/cm^3$
N_D	Donatorkonzentration	$1/cm^3$
n_{ideal}	Idealer Emissionskoeffizient	–
P_{el}	elektrische Leistung	W
P_{th}	thermische Leistung	W
Q	Wärmemenge	J
\dot{Q}	Wärmefluss	W
r	Radius	m
R_p	Parallelwiderstand	Ω
R_s	Serienwiderstand	Ω
R_{th}	thermischer Widerstand	K/W
s_e	spektrale Leistung	W/nm
t	Zeit	s
T	Temperatur	$^{\circ}C$
ΔT	Temperaturunterschied	K
T_0	Anfangstemperatur	$^{\circ}C$
T_a	Umgebungstemperatur	$^{\circ}C$
T_C	Temperatur am Referenzmesspunkt	$^{\circ}C$
T_E	Endtemperatur	$^{\circ}C$
T_j	P-N-Übergangstemperatur	$^{\circ}C$

T_k	Kühlkörpertemperatur	°C
T_S	Oberflächentemperatur des Silikons	°C
$T_{S,0}$	Temperatur ohne Betrieb	°C
T_x	Leuchtstofftemperatur	°C
u'	Farbkoordinate	–
v'	Farbkoordinate	–
U	Spannung	V
U_d	Diffusionsspannung	V

Konstanten

c	Lichtgeschwindigkeit	299 792 458 m/s
e	Elementarladung	$1,602 \times 10^{-19}$ C
e	Euler-Konstante	2,718281828459...
h	plancksches Wirkungsquantum	$6,626 \times 10^{-34}$ J s
k_B	Boltzmann-Konstante	$1,381 \times 10^{-23}$ J/K
π	Kreiskonstante	3,1415926...
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5,670 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Einflüsse von Temperatur und Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen untersucht.

Aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz ersetzen auf lichtemittierenden Dioden basierende Lampen und Leuchten zunehmend klassische Lichtquellen wie Glüh- und Entladungslampen. Der Anteil der sichtbaren Strahlung am gesamten emittierten Spektrum ist bei einer Leuchtdiode höher als bei thermischen Strahlern. Die erzeugte Wärmeleistung reicht jedoch immer noch aus, um die Leuchtdiode bei schlechter Wärmeanbindung so stark aufzuheizen, dass ihre Lebensdauer verringert wird oder sie fast unmittelbar ausfällt. Die Temperatur ist daher einer der Hauptfaktoren bei der Analyse der Defektmechanismen.

Innerhalb einer Literaturrecherche wird die Entwicklung der Lebensdaueranalyse von Beginn der ersten hergestellten Leuchtdioden bis heute aufgezeigt. Am Anfang konnten die Alterungsdaten noch mit relativ einfachen Modellen berechnet werden. Diese wurden mit der Zeit komplexer, heutzutage treten ergänzend aufwendige statistische Methoden dazu. Die Anzahl bekannter Fehlermechanismen in LED-Packages hat sich in den letzten Jahren von zehn auf über fünfzig erhöht. Daher ist die Erforschung der Zuverlässigkeit von LED-Systemen so komplex, dass kaum physikalische Modelle für die Alterung existieren.

Der Testzeitraum für die Lebensdauer von kommerziell erhältlichen LEDs beträgt häufig herstellerseitig lediglich 6000 h, was einer Mindestvorgabe im aktuellen Standard für Lebensdauermessungen entspricht. Daher sind Langzeitdaten über die Alterung von LEDs recht selten und für die Öffentlichkeit oft nicht zugänglich.

Für die Untersuchung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer dienen Versuchsstände, die für die Alterung von LED-Packages entwickelt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verschiedene LED-Typen gealtert. Die Messergebnisse aus der Langzeitalterung von Hochleistungs-LEDs decken einen Zeitraum von 20 000 h ab. Außerdem wurden Chip-on-Board-LEDs während 6000 h gealtert.

Die Kenntnis der Temperaturen innerhalb von LED-Packages wird benötigt, um die an verschiedenen Orten auftretenden Alterungsmechanismen näher zu analysieren. Für die Untersuchung der Wärme-flüsse dienen speziell angefertigte LED-Packages, deren Bestandteile und Materialien gezielt variiert werden. Thermisch transiente Messungen lassen dabei Rückschlüsse auf wärmeableitende Schichten des Packages und der Leiterplatte zu.

Die Ergebnisse der Langzeitalterung zeigen, dass sowohl die Temperatur, als auch der Strom die Degradation eines LED-Packages beeinflussen. In manchen Fällen führt die Beschleunigung mittels Temperatur zu Ergebnissen, die eine Berechnung der Lebensdauer für niedrige Temperatur möglich macht.

Andererseits können die oft angewandten Standardfunktionen die Alterungsdaten von bestimmten LED-Packages nicht zuverlässig extrapolieren.

Daher wird ein neues Lebensdauermodell entwickelt, welches keine Funktionen für die Abbildung der zeitlichen Alterung benötigt. In das Modell fließen sowohl die Temperatur, als auch der Strom ein, so dass für verschiedene Betriebsbedingungen die Lebensdauer von LED-Packages bestimmt werden kann. Außerdem zeigt sich bereits während der Modellbildung, ob die eingehenden Testdaten für eine zuverlässige Berechnung geeignet sind.

Ein thermischer Einfluss auf die gemessenen lichttechnischen Werte ist auch bei LED-Systemen gegeben. Die speziellen Messbedingungen für LED-Systeme sind in einem Standard der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) festgelegt. Dort findet sich eine Korrekturmethode für Messungen, während der sich die Brennlage des untersuchten LED-Systems ändert. Dies führte zu speziellen Erweiterungen in der Lichtmesstechnik. Die vorliegende Arbeit stellt eine Methode vor, die allein mit nachträglichen Umrechnungen der Messwerte bereits eine Korrektur der Brennlage erreicht.

1. Einleitung und Motivation

HENRY JOSEPH ROUND entdeckte im Jahr 1907, dass das Halbleitermaterial Siliziumkarbid bei Anlegung einer elektrischen Spannung Strahlung emittiert. Die indirekte Bandlücke des Halbleiters lässt jedoch nur eine geringe Effizienz der Strahlungsemission zu. Die Entdeckung geriet daraufhin über fünfzig Jahre in Vergessenheit. Im Jahr 1962 entwickelte NICK HOLONYAK die erste rote Leuchtdiode bei der Firma GENERAL ELECTRIC. Die Effizienz war jedoch noch sehr gering und noch nicht produkttauglich. Ein Jahrzehnt später wurden rote LEDs bereits in Massenproduktion hergestellt, die aus dem Halbleitermaterial Galliumarsenid (GaAs) bestanden. Etwa 1970 kamen ebenfalls grüne LEDs auf Basis von Galliumphosphid (GaP) auf den Markt.

Die bis dahin entwickelten LEDs wurden nur für Signale und Anzeigen, aber nicht zur Beleuchtung verwendet, da ihre Effizienz immer noch zu gering war. Andererseits ist für die Allgemeinbeleuchtung weißes Licht essenziell, was aufgrund des fehlenden blauen Anteils mit Leuchtdioden noch nicht erzeugbar war.

Ein echter Durchbruch war in Folge dessen die Entwicklung der blauen Leuchtdiode im Jahr 1992 durch SHUJI NAKAMURA. Als Halbleitermaterial verwendete er Galliumnitrid (GaN), einen direkten Halbleiter. Somit war eine hohe Effizienz zumindest theoretisch gegeben. Die erste kommerzielle blaue LED wurde 1993 vertrieben. Für die Entwicklung der blauen LED erhielten ISAMU AKASAKI, HIROSHI AMANO und SHUJI NAKAMURA 2014 den Nobelpreis für Physik.

Die Mischung aus blauem, grünem und roten Licht erzeugt für den Menschen einen weißen Farbeindruck. Daher besteht die Möglichkeit aus verschiedenfarbigen LEDs ein weißes Licht zu erzeugen. Dem entgegen steht, dass hierbei Lücken im emittierten Spektrum vorhanden sind, welche eine geringe Farbwiedergabe nach sich ziehen. Dieses Problem ist auch bei den ersten Leuchtstofflampen bekannt. Zusätzlich ist die Effizienz der grünen LED in dem Wellenlängenbereich gering, wo die menschliche Hellempfindung maximal ist.

Weißes Licht wird daher in der Regel durch eine Kombination einer blauen LED mit einem spektral breitbandig emittierenden Leuchtstoff erzeugt. Der Halbleiterkristall und der meistens in Silikon eingebettete Leuchtstoff sind dabei zusammen in einem Gehäuse, dem LED-Package untergebracht. Die effiziente blaue LED legt somit den Grundbaustein für eine energieeffiziente, weiße Beleuchtung.

Neben der hohen Effizienz besitzen Leuchtdioden noch eine Reihe weiterer Vorteile. Die kleinen Dimensionen der lichterzeugenden Fläche sind für die Anwendung von Optiken sehr vorteilhaft. Beispielsweise können Linsen, die direkt auf das LED-Package aufgebracht werden, das ausgesandte Licht sehr gut lenken. Somit ist der Einsatz großer Reflektoren nicht mehr notwendig, welche beispielsweise in konventionellen Leuchten eingesetzt werden. Außerdem ist eine Dimmung auf verschiedene Weise realisierbar und schnelle Schaltzeiten sind ebenfalls möglich. Dies führt dazu, dass in einem LED-System beliebige Lichtsteuerkurven hinterlegt werden können. Beide eben genannten Vorteile nutzen

1. Einleitung und Motivation

direkt der Straßenbeleuchtung. Die Möglichkeit einer präzisen Lichtlenkung vermindert die Ausleuchtung unerwünschter Straßenbereiche wie Hausfassaden und kann insbesondere verhindern, dass Licht oberhalb der Horizontalen emittiert wird. Mit zeitlich getakteter Lichtsteuerung können Leuchten je nach Bedarf gedimmt werden.

Beleuchtung nimmt am weltweiten Strombedarf einen Anteil von 15 % in Anspruch. Mit Hilfe der LED-Technologie kann dieser somit gesenkt werden, was durch folgende Betrachtung deutlich wird. Die Leuchtdiode ist im Mittel 40 % effizienter als eine Leuchtstofflampe und 90 % effizienter als eine Glühlampe. Die Energieeinsparung führt bei heutiger Stromerzeugung auch zu einer Reduktion der Kohlenstoffdioxidemission. Eine Studie von IHS MARKIT [1] berechnete anhand der Verkaufszahlen von LED-Produkten die im Jahr 2017 eingesparte Menge an CO₂ durch den Ersatz herkömmlicher Leuchtmittel wie Glühlampen und Leuchtstofflampen. Insgesamt wurde eine Einsparung von 570 Megatonnen CO₂ erreicht, dies entspricht etwa dem Ausstoß von 163 Kohlekraftwerken. Aufgrund der LED-Technologie wurde somit der weltweite CO₂-Ausstoß im Umfang von 1,5 % reduziert [1].

Die heutige Verfügbarkeit und Kostenreduktion von Produkten auf LED-Basis führt jedoch auch zu Effekten, die dem eigentlichen Vorteil der Energieeffizienz entgegenwirken. Eine Studie von KYBA zeigt, dass die künstlich beleuchteten Anteile der Erdoberfläche in letzter Zeit einen Anstieg in Bezug auf deren Strahldichte und Flächengröße verzeichnen [2]. Für diese Untersuchung bestimmte ein Radiometer auf einem Satelliten die Strahldichte der Erdoberfläche mit einer örtlichen Auflösung von 750 m. Der Sensor besitzt das weltweit erste im Wellenlängenbereich von 500 nm bis 900 nm kalibrierte Strahldichte-Messgerät für Nachtmessungen im Orbit. Zuvor hatte diese Messungen ein Satellit im Konzept NIGHTSAT [3] gewährleistet. Der Datenvergleich aus den Jahren 2012 und 2016 zeigt einen jährlichen Anstieg der künstlich beleuchteten Fläche um 2,2 %. Die Strahldichte aller beleuchteten Flächen wuchs dabei um 1,8 % pro Jahr.

Die LED-Technologie hat bereits weltweit einen großen Anwendungsbereich, so dass jede verkürzte Lebensdauer mit erhöhtem Materialeinsatz, wirtschaftlichen Folgen und Umweltproblemen verbunden ist. Dies führte zu der Entwicklung einer Europa-Verordnung für umweltgerechte Gestaltung von Lampen mit gebündeltem Licht, LED-Lampen und dazugehörigen Geräten [4]. Dabei wird ein Energieeffizienzindex definiert, je nach Produkt gelten andere Grenzwerte. Zusätzlich werden ebenfalls Mindestlebensdauern gesetzt, bei denen der relative Lichtstromerhalt beispielsweise für LED-Lampen nicht unter 80 % innerhalb der ersten 6000 h fallen darf.

Besonders für Straßenbeleuchtung ist die Langlebigkeit des LED-Systems von hoher Bedeutung. Die jährliche Betriebsdauer einer Straßenleuchte in Deutschland beträgt etwa 4200 h, wenn von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang beleuchtet wird. Bei einer gewünschten Lebensdauer von 25 Jahren sollte die Leuchte insgesamt eine Betriebsdauer von 105 000 h erreichen. In Deutschland sind etwa 9 Millionen Straßenleuchten im Betrieb, weltweit ist eine Stückzahl von 317 Millionen im Einsatz, die sich bis 2027 noch auf 363 Millionen erhöht [5].

In der sich schnell entwickelnden LED-Industrie kommen neue LED-Packages in kleinen Zeitspannen auf den Markt. Im Gegensatz dazu sollen Leuchten, insbesondere Straßenleuchten, eine Lebensdauer über Jahrzehnte aufweisen. Dies bedeutet, dass die LED-Packages über viele Jahre im Einsatz sind, obwohl während dieser Zeit Neuentwicklungen und somit auch Verbesserungen entstehen. Dies ist ein Grund, weshalb Standards entwickelt wurden, um die Lebensdauer der LED-Packages zu berechnen.

Der bis heute am meisten angewendete Standard für Lebensdauerberechnungen ist die TM-21-11 [6] der Illuminating Engineering Society of North America (IES), in der eine Datenextrapolation mit Hilfe einer exponentiellen Funktion vorgegeben wird. Die internationale Norm IEC 63013 der International Electrotechnical Commission (IEC) beruft sich teilweise auf die TM-21, enthält jedoch weitere Berechnungsmethoden.

Eine Quelle für Alterungsdaten stellt der sogenannte CALiPER Report 20.5 [7] dar, welcher gealterte PAR38 LED-Lampen zeigt. Die Lampen sind im Jahr 2011 und 2012 produziert worden, daher lassen sich die Ergebnisse nicht direkt mit heutigen Lampen vergleichen. Trotzdem zeigt sich eine im Durchschnitt gute Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Nach 14 000 h ist im Mittel ein relativer Lichtstromerhalt von 94 % zu verzeichnen. Im vorherigen Bericht CALiPER Report 20.4 [8] sind ebenfalls die einzelnen Degradationskurven dargestellt.

Die Testzeit für die Lebensdauer von kommerziell erhältlichen LEDs beträgt häufig nur 6000 h, da sich die meisten Hersteller nach dem aktuellen Standard LM-80-08 [9] richten. Daher sind Langzeitdaten über die Alterung von LEDs recht selten und für die Öffentlichkeit oft nicht zugänglich. Außerdem gibt es nur sehr wenige unabhängige Forschungseinrichtungen, die Langzeittests durchführen. Im Rahmen eines Verbundprojekts [10] sind Hochleistungs-LEDs ebenfalls an der Hochschule Hannover über 9000 h gealtert worden, was sich als eine der wenigen direkt vergleichbaren Quellen herausstellt. Die Erzeugung eines Datensatzes über 20 000 h an der TU Darmstadt ist daher von großem Wert für die Analyse der Zuverlässigkeit von Hochleistungs-LEDs.

Eine der Hauptursachen für schnelle Alterung ist die Temperatur. Diese ist jedoch innerhalb eines LED-Packages verschieden, je nachdem welche Bestandteile betrachtet werden. Der p-n-Übergang im Halbleiter, der Leuchtstoff und die Verkapselung sind davon besonders betroffen. Da sich die Alterungsmechanismen dort auch unterscheiden können, ist die Kenntnis der genauen Temperatur besonders wichtig. Der Aufbau eines LED-Packages beeinflusst ebenfalls die Wärmeströme und damit die Temperatur. Thermische Einflüsse auf LED-Systeme haben unterschiedliche Folgen für das emittierte Licht. Einerseits sinkt die Effizienz einer Leuchtdiode mit zunehmender Temperatur, was einen verminderten Lichtstrom nach sich zieht. Andererseits ändert sich die Farbqualität aufgrund von Schwerpunkt- und Bandbreitenänderung und/oder Richtungsänderungen der Emissionsspektren.

Eine Erhöhung des Vorwärtsstroms führt ebenfalls zu einem Temperaturanstieg des LED-Chips und Systems, was somit auf indirektem Weg zu einer stärkeren Alterung führt. Eine höhere Stromdichte im Halbleiterkristall kann aufgrund zahlreicher Effekte eine stärkere Degradation des LED-Chips zur Folge haben. Bei weißen LEDs ergeben sich durch Stromunterschiede verschiedene Strahlungsbelastungen von Packagebestandteilen wie Leuchtstoff, Silikon und internen Reflektoren. Außerdem ist die Strahlungsausbeute eines LED-Chips abhängig von der Stromdichte.

Die Entwicklung von kostengünstigeren Chips führte zu sogenannten Mid-Power-Packages, welche Kunststoff als Packagematerial verwenden. Durch die schlechtere Wärmeleitfähigkeit muss die elektrische Leistung reduziert werden, die Ströme liegen oft unterhalb von 100 mA. Die Kostenreduzierung ist besonders bei LED-Lampen für die Verwendung im Haushalt in den letzten Jahren deutlich geworden. Mit der Veränderung der Bauteile müssen jedoch weitere Alterungsmechanismen betrachtet werden, die bei den vorherigen Hochleistungs-LEDs noch nicht relevant waren.

1. Einleitung und Motivation

Die vorliegende Dissertation ist in folgende Kapitel gegliedert.

Grundlagen

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen erläutert, die in den nachfolgenden Kapiteln benötigt werden. Diese umfassen die Bereiche der Messtechnik, thermischen Analyse und speziell in LED-Packages verwendete Materialien.

Stand der Forschung

Das dritte Kapitel führt einen Teil der bisherigen Forschungsergebnisse auf, die sich bereits mit der Thematik befassen haben und zu bedeutenden Erkenntnissen gelangt sind.

Alterung von Hochleistungs-LEDs

Im vierten Kapitel werden die experimentellen Aufbauten und Messtechnik zur Untersuchung der Alterung von Hochleistungs-LEDs vorgestellt. Daraufhin findet eine Analyse der Ergebnisse der Langzeitalterung statt, welche elektrische, thermische und optische Phänomene beinhaltet.

Alterung von COB-Modulen

Das fünfte Kapitel stellt den Alterungsaufbau und die Messtechnik für chip-on-board-Module vor. Der Einfluss der Temperatur kann bei den Ergebnissen besonders gut beobachtet werden, da fünf verschiedene Temperaturen eingesetzt wurden.

Lebensdauerberechnung

Im sechsten Kapitel wird die Berechnungsverfahren der Lebensdauer näher betrachtet. Diese sind teilweise bereits in Normen eingeflossen, dessen Inhalt hier erläutert wird. Außerdem werden unterschiedliche Definitionen der Lebensdauer von LED-Packages aufgeführt und an Beispielen näher erläutert. Sowohl Einflüsse durch Temperatur, als auch durch Strom werden für die Entwicklung eines Alterungsmodells verwendet. Eine statistische Analyse schlägt die Brücke zu bereits bekannten Methoden zur Berechnung der Zuverlässigkeit.

LED-Package

Das siebte Kapitel zeigt die grundlegenden Bestandteile von LED-Packages auf. Dabei werden die sich oberhalb und unterhalb des Chips befindenden Teile getrennt voneinander betrachtet. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf dem thermischen Verhalten bzw. den Wärmeflüssen und Temperaturen.

Thermische Einflüsse auf LED-Systeme

Im achten Kapitel werden Systemen betrachtet, welche LEDs als Lichtquelle verwenden. Die zuvor genannten Temperaturbetrachtungen können auch für diese LED-Systeme erfolgen. Die Temperatur hat direkte Auswirkung auf messtechnische Größen, was unmittelbaren Einfluss auf die Auslegung von Messverfahren mit sich führt.

Schlussfolgerungen

Das neunte Kapitel fasst die Ergebnisse der vorherigen Kapitel zusammen und führt dazu Kritikpunkte auf. Außerdem enthält es einen Ausblick auf weitergehende Forschungsthemen.

2. Grundlagen

Das folgende Kapitel stellt wesentliche Grundlagen zusammen, die für das Verständnis der weiteren Arbeit hilfreich sind. Neben der Vorstellung theoretischer Zusammenhänge werden ebenfalls Messverfahren und Berechnungsmethoden angesprochen.

2.1. Lumineszenzemittierende Diode

Es existieren verschiedene Bezeichnungen für den häufig verwendeten Begriff der Leuchtdiode, unter anderem lumineszenzemittierende Diode und lichtemittierende Diode, beide werden als LED abgekürzt. Im folgenden Abschnitt werden die physikalischen Grundlagen von LEDs dargestellt. Die elektronischen Zustände innerhalb des Halbleitermaterials werden dabei besonders betrachtet, da diese das elektrische und optische Verhalten von Leuchtdioden wesentlich beeinflussen.

2.1.1. P-N-Übergang im Bändermodell

Durch unterschiedliche Ladungsträgerkonzentrationen entsteht beim Zusammenbringen von p- und n-dotiertem Halbleiter ein Diffusionsstrom, wobei jeweils die Majoritätsladungsträger beteiligt sind. Die Elektronen bewegen sich vom n-Gebiet ins p-Gebiet, die Löcher wandern vom p-Gebiet ins n-Gebiet. Dort rekombinieren sie, was zu einer Verarmung an freien Ladungsträgern führt. Dieser Bereich wird auch als Raumladungszone bezeichnet, da hier die ortsfesten Atomrümpfe eine positive oder negative Ladung besitzen. Im n-Gebiet fehlen die Elektronen der Donatoratome, so dass diese nun eine positive Ladung tragen. Die dadurch entstehende Diffusionsspannung ist abhängig von der Temperatur, der Akzeptorkonzentration N_A und Donatorkonzentration N_D , sowie der intrinsischen Ladungsträgerkonzentration n_i .

$$U_{\text{diff}} = \frac{k_B T}{e} \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.1)$$

Das Fermi-niveau eines undotierten Halbleiters liegt etwa in der Mitte der Bandlücke. Die Bandstruktur des p-dotierten Halbleiters besitzt im Vergleich dazu ein tieferes Fermi-niveau, welches etwas oberhalb des Valenzbands sitzt. Dies liegt daran, dass nun Akzeptoren eingebracht sind, an denen Elektronen fehlen. Im Gegensatz dazu liegt das Fermi-niveau beim n-dotierten Halbleiter höher, etwas unterhalb der Leitungsbandkante, da die Donatoren hier im Vergleich zum undotierten Halbleiter zusätzliche Elektronen zur Verfügung stellen.

Werden die beiden Halbleitermaterialien zusammengebracht, so stellt sich das Fermi-niveau durch Teilchenaustausch räumlich auf ein gleiches Level ein. Es entsteht eine Bandverbiegung, so dass die Bänder

2. Grundlagen

am p-Gebiet insgesamt gegenüber den Bändern des n-Gebiets nach oben verschoben sind. Die Höhe der Verschiebung entspricht der Diffusionsspannung U_d . Elektronen aus dem n-Gebiet müssen somit eine Energiebarriere überwinden, um ins p-Gebiet zu gelangen. Die Breite der Raumladungszone hängt von der Stärke der Dotierung ab.

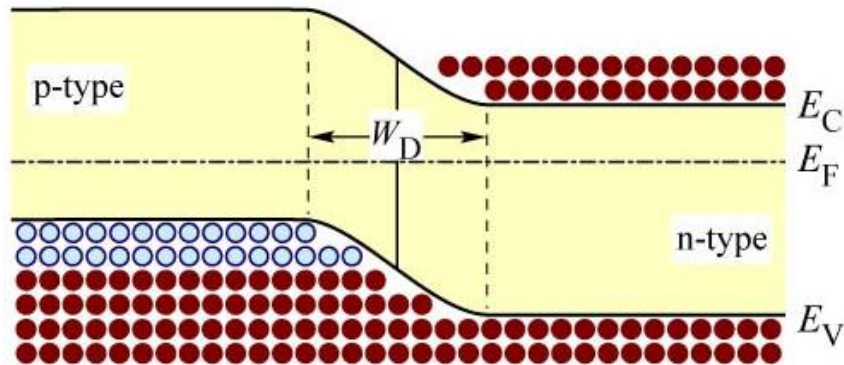


Abbildung 2.1.: Bänderdarstellung des p-n-Übergangs im unbestromten Zustand. Elektronen (in rot) im Leitungsband des n-Gebiets, Löcher (in blau) im Valenzband des p-Gebiets bilden jeweils die Majoritätsladungsträger.[11]

Bei Anlegen einer externen Spannung kann eine (Leucht-)Diode je nach Polung in Sperr- oder Durchlassrichtung betrieben werden. Im Weiteren wird die Flussrichtung näher erläutert, welche vorliegen muss, damit überhaupt eine Lichtemission stattfinden kann. Dazu wird die Leuchtdiode mit Spannung versorgt, wobei die Anode (p-Seite) mit dem positiven Pol und die Kathode (n-Seite) mit dem negativen Pol verbunden ist. Abbildung 2.2 stellt die veränderte Situation des p-n-Übergangs im Bändermodell vor.

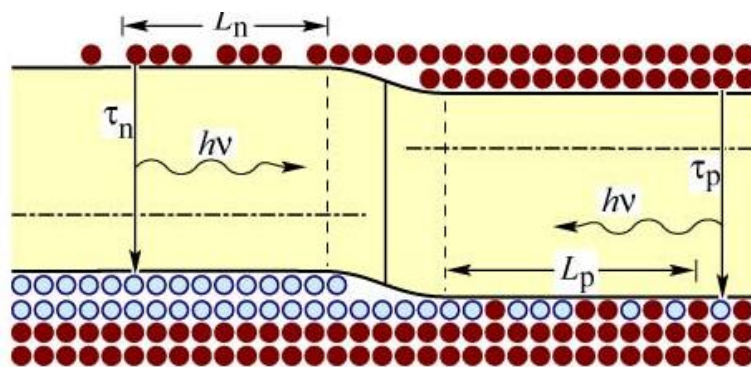


Abbildung 2.2.: Bänderdarstellung des p-n-Übergangs in Durchlassrichtung. Elektronen (in rot) im Leitungsband des n-Gebiets, Löcher (in blau) im Valenzband des p-Gebiets bilden jeweils die Majoritätsladungsträger.[11]

Das von außen angelegte Feld führt zu einer Verschiebung der Bänder, so dass der Energieunterschied zwischen den Leitungsbandern des p- und n-Gebiets verringert wird. Die Fermi-niveaus werden ebenfalls getrennt und besitzen nun aufgrund der angelegten Spannung U eine Energiedifferenz von

$$\Delta E = E_{F,n} - E_{F,p} = e \cdot U. \quad (2.2)$$

Außerdem wird die Breite der Raumladungszone verringert. Elektronen können nun aufgrund des verringerten Potentialwalls von der n-Seite hin zur p-Seite diffundieren, wo sie als Minoritätsladungsträger mit den im Überfluss vorhandenen Löchern rekombinieren. In entgegengesetzter Richtung erreichen die Löcher die n-Seite, wodurch es ebenfalls zur Rekombination kommt. Die mittlere Weglänge, bis zu der die jeweiligen Minoritätsladungsträger aufgrund von Rekombination verschwinden, wird als Diffusionslänge L_{diff} bezeichnet. Die für diesen Vorgang benötigte Zeit definiert die Lebensdauer τ des Minoritätsladungsträgers. Mit der Einführung eines Diffusionskoeffizienten D , der sich für Elektronen und Löcher unterscheidet, kann nun der Zusammenhang zwischen Diffusionslänge und Lebensdauer mit Gleichung 2.3 bestimmt werden.

$$L_{\text{diff}} = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (2.3)$$

2.1.2. Elektrisches Verhalten

Aus der Kenntnis der Minoritäts- und Majoritätsladungsträger, deren Lebensdauer und Diffusionslängen, sowie der Diffusionsspannung kann das elektrische Verhalten einer Diode mit Querschnittsfläche A hergeleitet werden. Die Shockley-Gleichung beschreibt dies allgemein, bei Betrachtung der Durchlassrichtung vereinfacht sie sich zu

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) \exp \left(\frac{e(U - U_{\text{diff}})}{k_B T} \right). \quad (2.4)$$

Aus Gleichung 2.4 ist im exponentiellen Term zu erkennen, dass der Strom sehr stark ansteigt, sobald die angelegte Spannung U etwa die Höhe der Diffusionsspannung U_{diff} erreicht. Daher wird sie auch als Schwellenspannung bezeichnet.

Die Terme der Shockley-Gleichung werden zusammengefasst und bilden dann eine Gleichung zur Beschreibung experimenteller Ergebnisse, vorerst unter idealen Bedingungen:

$$I = I_s \exp \left(\frac{eU}{n_{\text{ideal}} k_B T} \right) \quad (2.5)$$

Der Faktor n_{ideal} entspricht 1,0 für eine perfekte Diode, weicht jedoch für unterschiedliche Halbleitermaterialien davon ab. Zusätzlich können parasitäre Widerstände auftreten, die sowohl in Reihe, als auch parallel zur Diode geschaltet sind. Ein Serienwiderstand entsteht beispielsweise durch den elektrischen Kontakt und die nicht zu vernachlässigenden Widerstände des dotierten Halbleitermaterials in den neutralen Bereichen. Parallelwiderstände bilden sich durch geschädigte Regionen im Halbleiter und können im Fall einer Degradation während der Alterung zunehmen. Der Einfluss eines parasitären Widerstands ist in der Strom-Spannungs-Kennlinie gut zu erkennen. Die ideale Diodenkennlinie (Gleichung 2.5) wird durch zusätzliche Terme erweitert, um die Wirkungen der Serien- und Parallelwiderstände zu beschreiben:

$$I - \frac{U - IR_S}{R_P} = I_s \exp \left(\frac{e(U - IR_S)}{n_{\text{ideal}} k_B T} \right) \quad (2.6)$$

2. Grundlagen

Für den Durchlassbereich sind die Verschiebungen der Kennlinie einer GaAs-Diode in Abbildung 2.3 dargestellt. Ein Parallelwiderstand führt zum Anstieg des Vorwärtsstroms unterhalb der Schwellenspannung, er ist so dominant, dass die Kennlinie sich einer Widerstandskennlinie annähert. Ein Serienwiderstand verringert die Steigung der Kennlinie im Hochstrombereich.

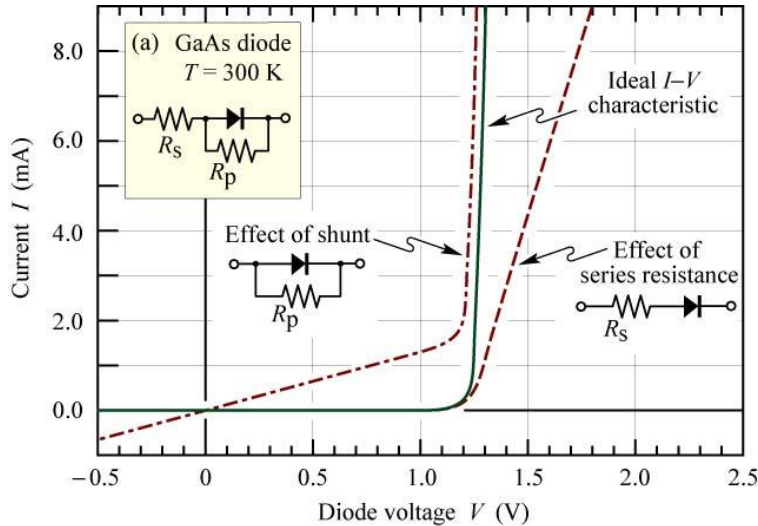


Abbildung 2.3.: Ideale Diodenkennlinie unter Einfluss von Parallel- und Serienwiderständen.[11]

Temperatureinfluss

Die Temperatur hat direkten Einfluss auf das elektrische Verhalten, da nahezu alle Prozesse im Halbleiter temperaturabhängig sind. Von besonderer Bedeutung ist die Veränderung der Vorwärtsspannung durch die Temperatur, was im folgenden Abschnitt beschrieben wird. Die Bandlücke wird aufgrund von zwei Effekten kleiner, wenn sich die Temperatur des Halbleiters erhöht. Ein Kristall dehnt sich aus, was einen größeren Abstand der Gitteratome zur Folge hat. Die Ausdehnung ist proportional zur Temperatur und verursacht eine Bandverschiebung, die bei Isolatoren zu einer langwelligen Verschiebung des Absorptionsspektrums führt [12],[13]. Der Haupteffekt ist jedoch die temperaturabhängige Interaktion zwischen Elektronen und Gitterschwingungen. VARSHNI stellte eine phänomologische Formel auf, die die Bandlückenenergie in Abhängigkeit der Temperatur beschreibt [14]. Die DEBEYE-Temperatur β und ein wählbarer Koeffizient α bestimmen dabei die Stärke der Bandlückenreduzierung.

$$E_g(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.7)$$

2.1.3. Optisches Verhalten

Der mittlere Impuls eines Elektrons liegt zu dem aus der DE-BROGLIE-Beziehung hergeleiteten Impuls des emittierten Photons mehrere Größenordnungen höher. Dies bedeutet, dass der Impuls des Elektrons sich beim Übergang zum Valenzband verschwindend gering ändert, so dass die Übergänge vertikal erfolgen. Je nach Position auf den Energieparabeln werden Photonen anderer Wellenlänge ausgesendet. Um das emittierte Spektrum einer Leuchtdiode theoretisch zu ermitteln, wird die Zustandsdichte benötigt. Diese ist in folgender Gleichung wiedergegeben:

$$D(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_r^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_g} \quad (2.8)$$

Die Anzahl möglicher Zustände pro Energieintervall beginnen ab der Bandlückenenergie und steigen mit einer Wurzelfunktion an. Die tatsächlich besetzten Zustände ergeben sich aus der temperaturabhängigen BOLTZMANN-Verteilung. Nach der Multiplikation mit dem BOLTZMANN-Faktor ergibt sich die Intensität der emittierten Strahlung in Abhängigkeit von der Energie:

$$I(E) \sim \sqrt{E - E_g} \cdot \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (2.9)$$

Dieses theoretische Spektrum (Abbildung 2.4) besteht somit im Wesentlichen aus zwei Bereichen.

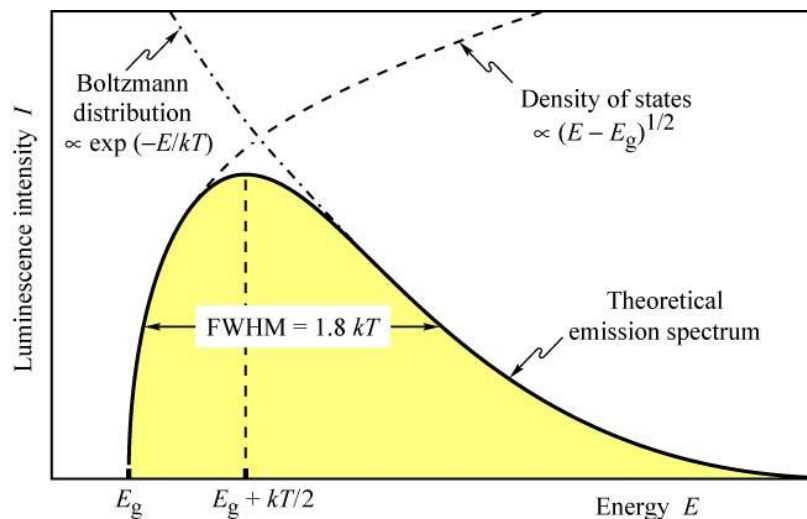


Abbildung 2.4.: Theoretisches Spektrum einer lumineszenzemittierenden Diode, ausgehend von der Zustandsdichte und der Boltzmann-Verteilung elektronischer Zustände im Halbleiter.[11]

Mit Hilfe des physikalischen Hintergrunds der spektralen Form sind Änderungen aufgrund von Strom und Temperatur leichter zu ermitteln.

Nicht-strahlende Rekombination

Der Übergang eines Elektrons vom Leitungsband ins Valenzband setzt Energie frei, die in Form von Strahlungsenergie als Photon ausgesendet wird. Die Energieabgabe kann jedoch auch an das Kristallgitter erfolgen, welches daraufhin zu Vibrationen angeregt wird. Diese Gitterschwingungen werden als Phononen bezeichnet. Bei dieser strahlungslosen Rekombination wird kein Photon emittiert. Im Fall eines Halbleiters mit indirekter Bandlücke ist dies der Hauptanteil der Übergänge, da der kleinste energetische Abstand zwischen Leitungs- und Valenzband nicht direkt senkrecht (bei gleichem k-Wert) liegt. Dieser Übergang kann somit nur unter Beteiligung eines Phonons erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit dazu ist gering, wodurch ein indirekter Halbleiter nur ineffizient Strahlung erzeugt. Der in der

2. Grundlagen

Vergangenheit für blaue LEDs verwendete Halbleiter SiC liegt mit einer Quanteneffizienz von 0,02 % deutlich unter der von GaN mit 12 % [15].

Beim direkten Halbleiter können Fehlstellen und Defekte in der Kristallstruktur ebenfalls strahlungslose Rekombinationen zur Folge haben. Fehlstellen und Defekte bilden oft tiefe Störstellen, welche effizient für eine Rekombination wirken. Im Gegensatz zu flachen Störstellen, die sich nahe an den Bandkanten befinden, liegen sie in der Mitte der Bandlücke mit großem Energieabstand zum Leitungs- und Valenzband.

2.2. Packagematerialien

Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen LED-Packages. Im Rahmen der Arbeit liegt der Hauptschwerpunkt auf der Untersuchung von Hochleistungs-LEDs. Exemplarisch soll ein Schliffbild einer Hochleistungs-LED die einzelnen Bestandteile darstellen.

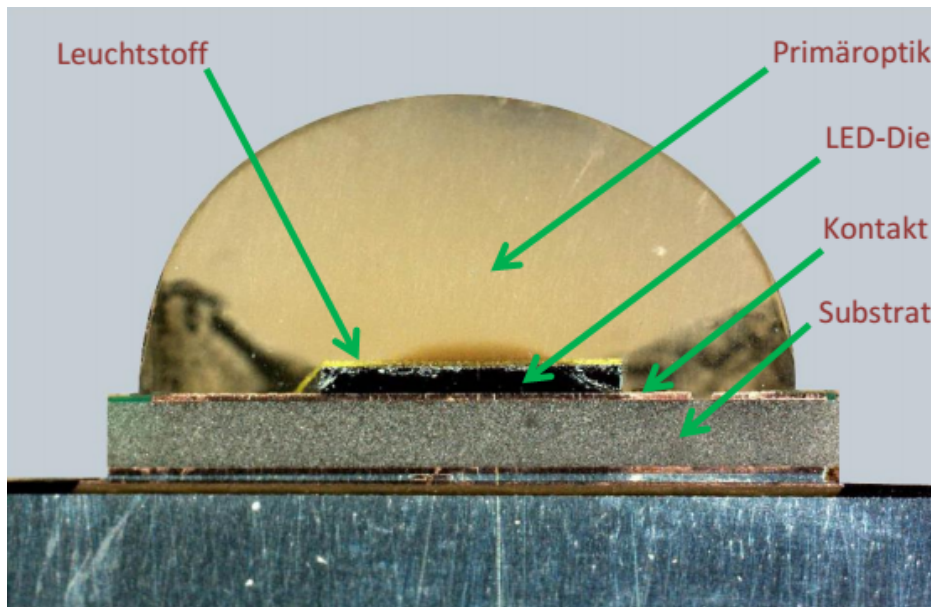


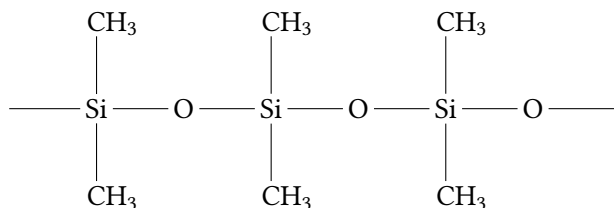
Abbildung 2.5.: Schnittbild einer weißen Hochleistungs-LED mit Leuchtstoff und Silikonlinse [10]

Der Chip ist in Abbildung 2.5 als schwarzes Plättchen zu erkennen. Er ist elektrisch und thermisch mit einer Kupferschicht verbunden, die wiederum auf einem keramischen Substrat liegt. Der große metallische Block stellt die Aluminiumkernplatine dar. Auf dem Chip ist eine dünne Leuchtstoffschicht aufgebracht, die Verbräunung darüber ist ein bekannter Alterungseffekt. Das Package besitzt eine aus Silikon bestehende Verkapselung in Form einer Halbkugel.

2.2.1. Silikone

Silikone gehen auf den englischen Chemiker FREDERIC STANLEY KIPPING zurück, der Silizium-Kohlenstoffverbindungen herstellte. Er nannte diese harzartigen Produkte „silicone ketones“. Der heute in der Industrie verwendete Name Silikon ist die Bezeichnung für lineare Polymerketten, bestehend aus abwech-

sind Silizium und Sauerstoff, den sogenannten Siloxanen. Meist hängt an dieser Kette ein Methylrest (CH_3). Die folgende Strukturformel zeigt ein Polydimethylsiloxan mit drei Kettengliedern.



Die Methylgruppen an den Seiten der Kette können auch durch andere Gruppen ersetzt werden. Der Einbau von Phenyl (C_6H_5) erzeugt ein phenylbasiertes Silikon, welches andere Eigenschaften als das methylbasierte Silikon aufweist (Tabelle 2.1). Beide Arten werden für Verkapselungen von LED-Packages verwendet. Das mechanische Verhalten der Silikone ändert sich in einem weiten Temperaturbereich von -40°C bis 150°C nur geringfügig. Die Eigenschaften weisen verschiedene Qualitätsmerkmale auf, die in Tabelle 2.1 dargestellt werden.

Tabelle 2.1.: Eigenschaften von Silikonen für LED-Verkapselungen, nach Datenblatt im Anhang

	methylbasiert	phenylbasiert
Brechungsindex n	1,41	1,53-1,54
Transmission	sehr hoch	sehr hoch
Lichtstabilität	sehr hoch	hoch
Temperaturstabilität	sehr hoch	sehr hoch
Gasbarriere	gering	hoch

Ein höherer Brechungsindex führt zu einer höheren Auskopplung des Lichts, da der Grenzwinkel der Totalreflexion beim Übergang aus dem LED-Kristall ins Silikon größer wird. Für die Verhinderung von chemischen Prozessen ist eine hohe Gasbarriere von Vorteil, da diese das Eindringen von flüchtigen Molekülen ins Silikon verhindert. Ein Nachteil bei phenylbasierten Silikonen ist eine schnellere Versprödung des Materials bei Alterung, da die Polymerketten stärker vernetzt sind.

2.3. Spektren von farbigen und weißen LEDs

Im folgenden Abschnitt sollen die Spektren von farbigen und weißen LEDs näher betrachtet werden. Dabei wird besonders der Einfluss der Temperatur und des Vorwärtsstroms untersucht.

2.3.1. Einfluss der Temperatur

Die Temperaturerhöhung zieht drei grundlegende Folgen für das emittierte Spektrum nach sich. Diese Veränderungen sind alle in Abbildung 2.6 zu erkennen, auch wenn sie sich gegenseitig überlagern. Hierfür wird eine rote LED mit einem konstanten Vorwärtsstrom bei unterschiedlichen Temperaturen betrieben und spektral vermessen.

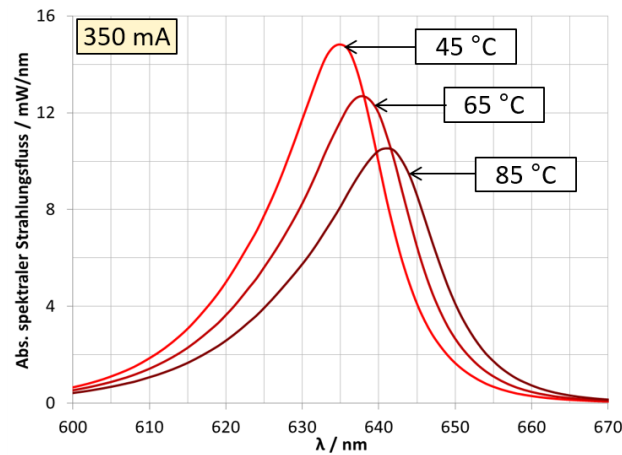


Abbildung 2.6.: Thermischer Einfluss auf das Spektrum einer roten LED

Eine Folge ist die Verschiebung des Spektrums in den längerwelligen Bereich. Die Ursache ist die Verringerung der Bandlücke, die mit VARSHNI-Gleichung 2.7 bestimmt werden kann. Die Energie der emittierten Photonen ist somit geringer, so dass sich das gesamte Spektrum und damit auch die Peakwellenlänge zu größeren Wellenlängen verschiebt.

Die Temperatur ist im BOLTZMANN-Term enthalten, der bei Auftragung über die Wellenlänge den linken Ast des Spektrums beeinflusst. Bei höheren Temperaturen sinkt der Vorfaktor $1/kT$ der Energie, so dass die exponentiell abfallende Funktion flacher verläuft. Dies ist bei den linken Seiten der jeweiligen Spektren sehr gut zu erkennen.

Die dritte Folge der Temperaturerhöhung ist eine reduzierte optische Effizienz des Halbleiters. Ein Hauptursache dabei ist die strahlungslose Emission an Fehlstellen, da die tiefen Störstellen bei höherer Temperatur eine größere Wirkung entfalten. Die absoluten Werte des Spektrums sinken daher ab. Eine gute Übersicht des Temperaturverhaltens von verschiedenen kommerziell erhältlichen LEDs findet sich in einer Veröffentlichung von YURTSEVEN aus dem Jahr 2016 [16].

2.3.2. Einfluss der Stroms

Eine Änderung des Stroms führt meist aufgrund erhöhter thermischer Leistung auch zu einer Änderung der Temperatur in der LED. Bei gepulster Messung erwärmt sich die LED nicht stark, so dass dieser Einfluss vernachlässigt werden kann. Abbildung 2.7 zeigt das Spektrum einer blauen LED bei drei verschiedenen Vorwärtsströmen, die bei kurzen Pulsen aufgenommen wurden. Die Erhöhung des Stroms führt zu einer Zunahme der Rekombinationen von Elektronen und Löchern und somit auch zu einem Anstieg der emittierten Photonen, was eine Erhöhung des gesamten Spektrums nach sich zieht.

Die Effizienz der ausgesendeten Strahlung hängt von der Stromdichte ab. Bei höheren Strömen sinkt die Strahlungsausbeute, was als droop-Effekt bezeichnet wird. Die Abhängigkeit beruht auf vielen Mechanismen, ein Teil derer wird im Stand der Forschung näher erläutert.

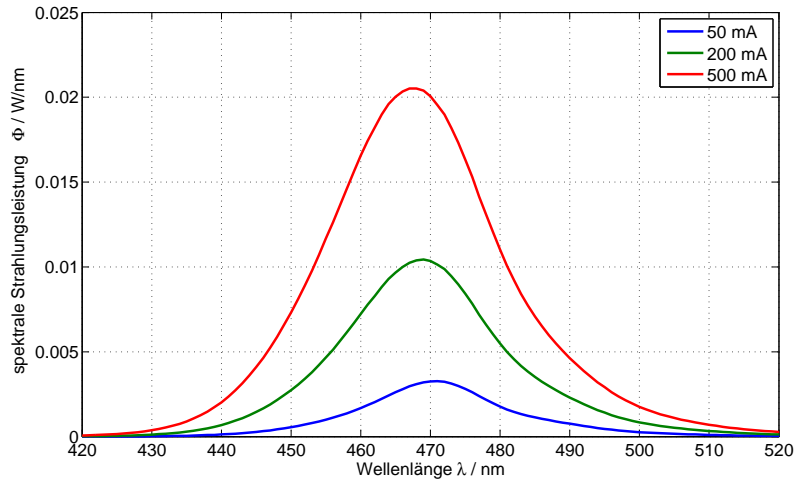


Abbildung 2.7.: Einfluss des Vorwärtsstroms auf das Spektrum einer blauen LED

Bei kleinen Strömen herrscht eine geringe Vorwärtsspannung. Daher werden die höheren energetischen Zustände der Elektronen nicht so stark besetzt. Bei einer Stromerhöhung werden diese Zustände aufgefüllt, was zu einem relativen Anstieg des linken Asts bei niedrigen Wellenlängen führt. Das Maximum des Spektrums verschiebt sich somit nach links. Dieser Effekt kann jedoch bei Temperaturerhöhung aufgehoben werden, da sich hierbei das gesamte Spektrum nach rechts verschiebt.

2.4. Strahlungs- und Lichtmesstechnik

2.4.1. Strahlungs- und lichttechnische Größen

Der Strahlungsfluss Φ_e entspricht der Energie aller emittierten Strahlung pro Zeiteinheit. Zwar ist bei Raumtemperatur auch noch Wärmestrahlung vorhanden, diese wird dabei jedoch nicht mitberücksichtigt. Die spektrale Verteilung $s(\lambda)$ wird zur Bildung des Strahlungsflusses über den gewählten Bereich integriert (Gleichung 2.10), während die Eingrenzung der Wellenlängen mit 380 nm bis 780 nm im sichtbaren Bereich liegt.

$$\Phi_e = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s_e(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

Der Lichtstrom wird zusätzlich mit der für die Hellempfindlichkeit entwickelten $V(\lambda)$ -Funktion gewichtet:

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (2.11)$$

Die Strahlungsausbeute η_e gibt an, wieviel Strahlungsleistung pro eingespeister elektrischer Leistung vom Leuchtmittel emittiert wird. Sie ist ein Verhältnis und kann daher prozentual angegeben werden. Wichtig ist die Einschränkung der Strahlung auf einen engen Wellenlängenbereich, da nicht sichtbare

2. Grundlagen

Wärmestrahlung sonst mit berücksichtigt wird. Diese beträgt bei thermischen Strahlern wie Glühlampen bis zu 95 %.

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P_{el}} \quad (2.12)$$

Die Lichtausbeute η_v beschreibt das Verhältnis von ausgesendetem Lichtstrom zu eingebrachter elektrischer Leistung.

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P_{el}} \quad (2.13)$$

Sie ist für den Vergleich von energieeffizienter Beleuchtung die wichtigste Größe. Die Einheit lautet lm/W. Glühlampe der alten Generation weisen Werte von 12 lm/W auf, aktuelle Leuchtdioden bereits einen fünfzehnfachen Wert von bis zu 175 lm/W.

2.4.2. Kolorimetrische Größen

Für die Beschreibung von Farbeindrücken sind eine Reihe von Farbmetriken entstanden, auf deren Vielzahl hier nicht umfassend eingegangen wird. Nach der Dreifarbentheorie lässt sich jeder Farbeindruck aus drei Farbreizen erzeugen. In Experimenten von WRIGHT [17] und GUILD [18] wurden aus drei monochromatischen Reizen Mischungen erzeugt und mit den Farben der jeweiligen Wellenlänge entsprechenden Farben abgeglichen. Die einzelnen Anteile der drei Stimuli über der Wellenlänge ergeben die sogenannten Spektralwertfunktionen. Aufgrund negativer Werte wurden diese in die Normspektralwertfunktionen mit ausschließlich positiven Werten transformiert. Diese sind in folgender Abbildung dargestellt.

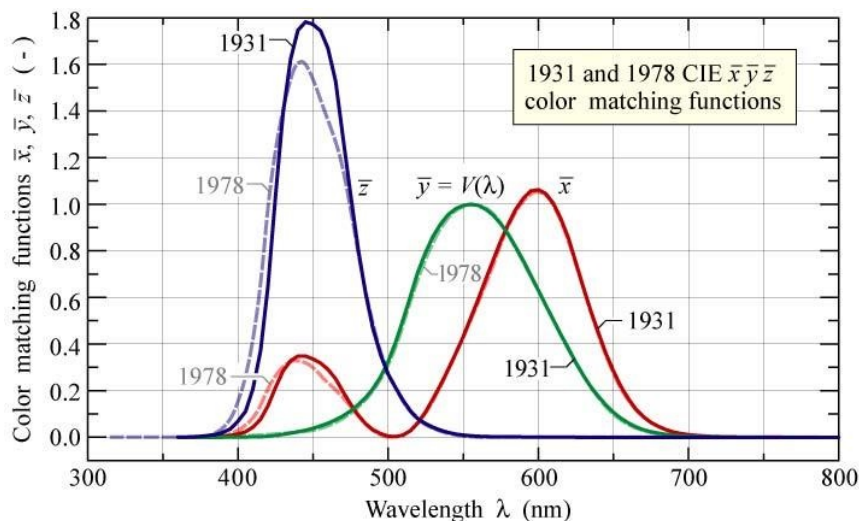


Abbildung 2.8.: Normspektralwertfunktionen von 1931, [11]

Farben können nun über das Verhältnis der einzelnen Funktionsanteile klar zugeordnet werden. Die Darstellung aller Farben geschieht in der CIE-Normfarbtafel, wobei nur die x- und y-Komponente aufgetragen werden. Durch die Beziehung $x + y + z = 1$ kann z rechnerisch ermittelt werden. Die CIE-

Normfarbtafel hat den Nachteil, dass sie nicht gleichabständig ist. Farbunterschiede im grünen Bereich besitzen im Diagramm weitaus größere Abstände als beispielsweise im roten und blauen Bereich. Daher wurde 1967 ein neuer Farbraum entwickelt, welcher durch eine Verzerrung der Normfarbtafel mittels folgender mathematischer Transformation entsteht.

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad \text{und} \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.14)$$

Die UCS-Farbtafel ist in folgender Abbildung 2.9 dargestellt. Den Rand bilden die Farben mit höchster Sättigung. Diese maximal gesättigten Farben können beispielsweise von sehr schmalbandigen Lichtquellen mit entsprechend eingezeichneten Wellenlängen erzeugt werden.

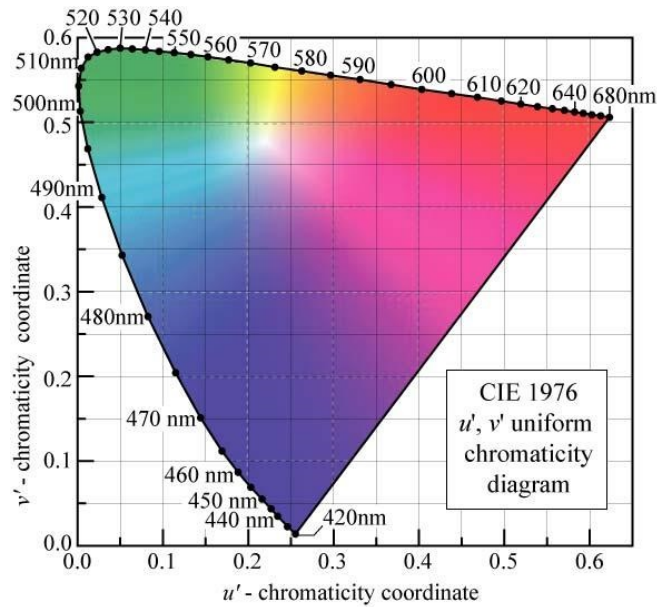


Abbildung 2.9.: CIE-UCS-Farbtafel von 1976 auf Grundlage des CIE 1931 2° Standardbeobachters, [11]

Der Farbabstand wird über den euklidischen Abstand zweier Koordinaten im Diagramm gebildet und ist in einer Technical Note der CIE [19] mit folgender Gleichung definiert.

$$\Delta_{u',v'} = \sqrt{(u'_2 - u'_1)^2 + (v'_2 - v'_1)^2} \quad (2.15)$$

2.5. Wärmeübertragung

Es existieren drei Formen der Wärmeübertragung, die auch für die Betrachtung von LEDs und LED-Leuchten eine relevante Rolle spielen: Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung.

2.5.1. Wärmeleitung

Das FOURIERSche Gesetz beschreibt die Wärmeleistung \dot{Q} , welche aufgrund eines Temperaturunterschieds durch ein quaderförmiges Objekt fließt (Gleichung 2.16) [20]. Hierfür sind die Querschnitts-

2. Grundlagen

fläche A , die Länge d in Richtung der Wärmeströmung und die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ zu bestimmen.

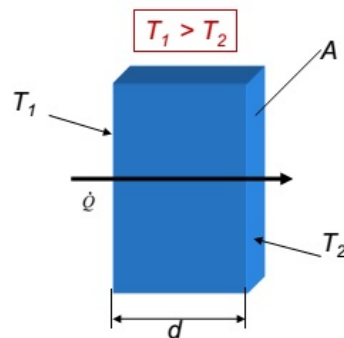


Abbildung 2.10.: Wärmeleitung durch ein quaderförmiges Objekt, Skizze zum FOURIERSchen Gesetz

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

Die Wärmeleistung, die aufgrund von Wärmeleitung durch ein Material fließt, ist proportional zur Temperaturdifferenz ΔT . Analog zur Elektrotechnik kann ein sogenannter thermischer Widerstand R_{th} mit der Einheit K/W definiert werden. Dabei entsprechen die Temperaturdifferenz ΔT der elektrischen Spannung und der Wärmestrom dem elektrischen Strom. Im oben gezeigten eindimensionalen Fall ist es möglich, den thermischen Widerstand durch die gegebenen Größen zu berechnen.

Tabelle 2.2.: Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien [21]

	Kupfer	Silikon	Luft	Aluminium
Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	401	0,2-0,3	0,026	235

2.5.2. Wärmekonvektion

Teilchen eines Fluids (Gas oder Flüssigkeit) können Wärmeenergie an Grenzflächen aufnehmen und durch ihre Eigenbewegung wegtragen. Diese Art der Wärmeübertragung wird als Konvektion bezeichnet.

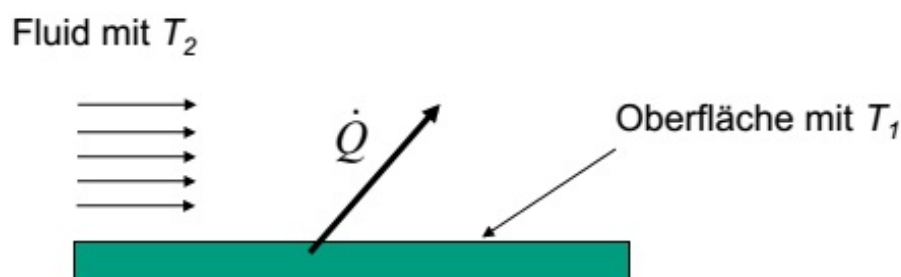


Abbildung 2.11.: Konvektion über einer planen Oberfläche

Die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst die Konvektion sehr stark, aufgrund von laminarer und turbulenter Strömungen ist die korrekte Beschreibung sehr komplex. Daher wird ein empirischer Parameter verwendet, der als Wärmeübergangskoeffizient α bezeichnet wird. Folgende Gleichung zeigt die Berechnung der Wärmeleistung [20].

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.17)$$

Die Wärmeleistung hängt von der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Oberfläche ab.

Für den Wärmeübergang einer Innenwand im geschlossenen Raum mit dem Fluid Luft stellt sich ein Wärmeübergangskoeffizient von etwa $8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ein [20].

2.5.3. Wärmestrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts von 0 K sendet elektromagnetische Strahlung aus, was als Wärmestrahlung bezeichnet wird. Daher müssen für eine Wärmeübertragung immer mehrere Oberflächen betrachtet werden.

Zwei Oberflächen stehen sich in beliebiger Ausrichtung gegenüber (Abbildung 2.12). Beide senden jeweils Wärmestrahlung aufgrund ihrer Temperatur aus, es besteht also ein Wärmeaustausch zwischen den Flächen.

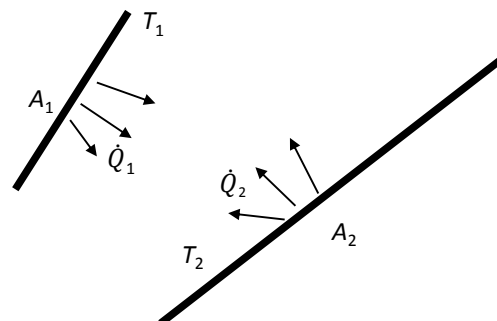


Abbildung 2.12.: Wärmestrahlung zwischen zwei Oberflächen

Die Netto-Wärmeübertragung durch Strahlung lässt sich durch die Differenz der beiden Wärmeleistungen \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2 bestimmen und somit fließt die Wärmeleistung von der Oberfläche mit höherer Temperatur zu der Oberfläche mit niedriger Temperatur. Die Oberflächenbeschaffenheit hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Höhe der ausgesendeten Strahlung und wird mit dem Emissionskoeffizient ε beschrieben. Ist eine Oberfläche klein im Vergleich zu einer zweiten Oberfläche (Körper in Umgebung mit Temperatur T_2), so kann die Wärmeleistung mit folgender Formel bestimmt werden [20].

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.18)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Leistung nicht von der einfachen Temperaturdifferenz, sondern nach dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz proportional zur vierten Potenz der Temperatur abhängt.

2.6. Thermische Widerstände

Thermische Größen weisen Analogien zu elektrischen Größen auf, was folgende Tabelle 2.3 zeigt. Oft können auch Gesetzmäßigkeiten im thermischen und elektrischen Bild miteinander verglichen werden.

Tabelle 2.3.: Analogien zwischen elektrischen und thermischen Größen

Elektrische Spannung U	Temperaturdifferenz ΔT
Elektrischer Strom I	Wärmestrom \dot{Q}
Elektrischer Widerstand R	Thermischer Widerstand R_{th}
Elektrische Leitfähigkeit σ	Wärmeleitfähigkeit λ
Elektrische Kapazität C	Wärmekapazität C_{th}

Der thermische Widerstand ist der Quotient aus einer Temperaturdifferenz und einem Wärmestrom bzw. thermischer Leistung.

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{P_{\text{th}}} \quad (2.19)$$

Aus dem Fourierschen Gesetz 2.16 kann er in manchen Fällen auch mit Hilfe von Materialparametern bestimmt werden.

2.6.1. Cauer- und Foster-Netzwerk

Thermisches Verhalten kann mittels thermischen Netzwerken dargestellt werden, wobei oft Glieder mit thermischen Widerständen und Kapazitäten verwendet werden. Für jedes einzelnes R-C-Glied gilt folgende exponentielle Funktion.

$$\Delta T(t) = P_{\text{th}} \cdot R_{\text{th}} \cdot (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (2.20)$$

Die Zeitkonstante τ ergibt sich aus der Multiplikation des Widerstands mit der Kapazität. Sie bestimmt maßgeblich die Antwort eines Systems auf zeitliche Änderungen einer Eingangsgröße.

$$\tau = R_{\text{th}} \cdot C_{\text{th}} \quad (2.21)$$

Die Reihenschaltung vieler dieser R-C-Glieder zu einem FOSTER-Netzwerk entspricht der Summe der einzelnen Kettenglieder. Eine konstante Wärmeleistung P_{th} kann vor die Summe gezogen werden. Jedes Kettenglied besitzt eine eigene Zeitkonstante τ_i . Das transiente Verhalten der Chip-Temperatur bei fester Umgebungstemperatur T_A kann mit diesem Netzwerk bestimmt werden.

$$\Delta T(t) = P_{\text{th}} \cdot \sum_{i=1}^n R_{\text{th},i} \cdot (1 - \exp(-t/\tau_i)) \quad (2.22)$$

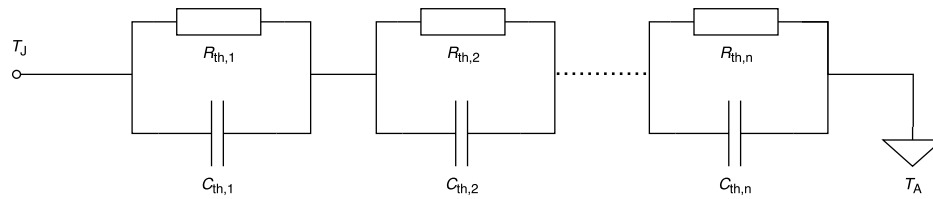


Abbildung 2.13.: FOSTER-Netzwerk zur thermischen Analyse mittels R-C-Gliedern

Die Werte für die Kapazitäten und Widerstände entsprechen nicht den physikalischen Werten. Daher muss noch eine Transformation ins CAUER-Netzwerk erfolgen.

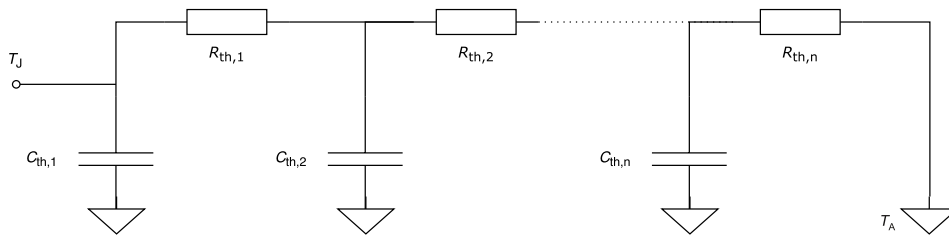


Abbildung 2.14.: CAUER-Netzwerk zur thermischen Analyse, die einzelnen Kettenglieder können verschiedenen thermischen Schichten zugeordnet werden und enthalten physikalisch korrekte Werte der Widerstände und Kapazitäten

2.7. Thermische Impedanzmessung

Die thermische Impedanzmessung ermittelt den Anstieg der Temperatur aufgrund eines thermischen Widerstands, nachdem eine Wärmeleistung in ein thermisches System eingebracht wird. Analog dazu erfolgt im elektrischen Bild eine Spannungserhöhung an einem Widerstand nach einer Stromflanke.

Das Messverfahren erfolgt in zwei Schritten, die nachfolgend erläutert werden.

2.7.1. Kalibrierung

Bei einem konstantem Strom führt die Temperaturerhöhung der Chip-Temperatur zu einer sinkenden Vorwärtsspannung. Im betrachteten Bereich von etwa 20 °C bis 100 °C ist diese Abhängigkeit näherungsweise linear [22]. Ein Beispiel dieser Kalibrierung mit den Stützstellen 25 °C, 55 °C und 85 °C (Abbildung 2.15) verwendet einen konstanten Messstrom von 1 mA. Dieser wird klein gewählt, damit er nicht zu einer Aufheizung des p-n-Übergangs beiträgt. Somit besteht ein vernachlässigbarer Unterschied zur gemessenen Temperatur am T_C -Punkt. Dieser Messpunkt wird in die Nähe des LED-Packages angebracht, um den Temperaturabstand zum LED-Chips möglichst gering zu halten.

Die lineare Anpassungsfunktion liefert im Fall des obigen Beispiels einen Temperaturkoeffizienten von 1,5 mV/K. Eine Temperaturänderung kann daher während des Messvorgangs über die Änderung der Vorwärtsspannung mit diesem Koeffizienten direkt berechnet werden.

2. Grundlagen

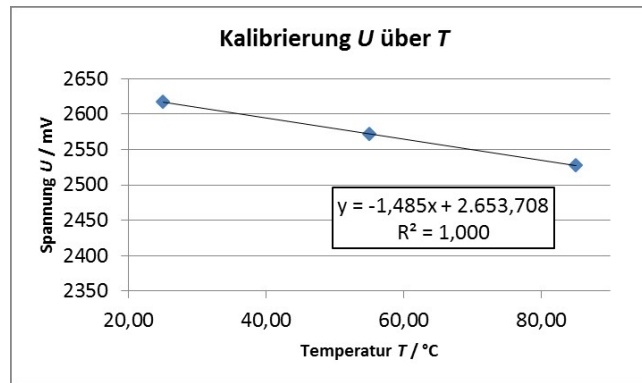


Abbildung 2.15.: Ermittlung des Temperaturkoeffizienten: Vorwärtsspannung bei einem konstanten, kleinen Messstrom (1 mA) und drei Temperaturen

2.7.2. Transiente Messung

Bei der transienten Messung wird das LED-Package vorerst mittels Heizstrom soweit betrieben, bis sich die Temperatur stabilisiert. Danach wird sehr schnell auf den vorher kalibrierten Messstrom geschaltet und die Spannung gemessen. Diese Spannungsänderung kann nun in eine Temperaturänderung umgerechnet werden. Eine weitere Berechnung liefert am Ende die thermische Strukturfunktion.

2.8. Alterungsmechanismen

In den letzten Jahren ist die Anzahl der für LED-Packages bekannten Fehlermechanismen von zehn im Jahr 2012 auf über fünfzig im Jahr 2016 angestiegen [23]. Dabei beziehen sich die Mechanismen auf verschiedene Bestandteile des LED-Packages. Eine Gegenüberstellung der Mechanismen bis 2013 mit dem Zeitraum zwischen 2013 und 2016 zeigt, dass die auftretenden Fehler an ganz unterschiedlichen Stellen wirken und auch nicht gleich häufig in Erscheinung treten [23]. Eine weitere Zusammenfassung von Fehlermechanismen von LEDs zum Stand Jahr 2010 findet sich bei MENEGHESSO [24].

2.9. Physikalische Fehleranalyse

Um die Ursache von Ausfällen und Degradation zu ergründen, müssen die physikalischen Zusammenhänge betrachtet werden. Im Englischen wird diese Herangehensweise mit *Physic of Failure* (PoF) bezeichnet. Ein Auszug allgemein bekannter Fehlermechanismen zeigt Tabelle 2.4. Dabei wird zwischen Überbeanspruchung, nach der meistens ein Totalausfall erfolgt, und dem Verschleiß unterschieden. Beim Verschleiß ähnlich einer Abnutzung handelt es sich um langsame Prozesse, die bei der Langzeitalterung besonders beachtet werden müssen.

Tabelle 2.4.: Fehlermechanismen bei elektronischen Bauteilen, unterteilt in Überbeanspruchung und Verschleiß, nach [25]

Fehlerart	Überbeanspruchung	Verschleiß
Mechanisch	Adhäsionsverlust an Grenzflächen, Dehnung, Bruch	Ermüdung, Schwindung, Kriechen
Thermisch	Glas- und Phasenübergang	Stressbedingte Diffusion
Elektrisch	Dielektrischer Durchbruch, Elektrische Überbeanspruchung	Elektromigration, heiße Elektronen
Strahlung	Einzelner Ausfall	Versprödung, Oxidation
Chemisch	Kontaminierung	Korrosion, intermetallisches Wachstum

Wie bereits erläutert, existieren eine hohe Anzahl an Fehlermechanismen. Im folgenden soll ein Ausschnitt dieser den einzelnen Bestandteilen des LED-Packges zugeordnet werden. Dabei handelt es sich nur um Mechanismen, die keinen Totalausfall verursachen. Zu Totalausfällen zählen beispielsweise der Bruch des Bonddrahts, oder ein Kurzschluss durch elektrische Überbeanspruchung, die Elektromigration zur Folge hat. In diesen Fällen wird kein Licht mehr emittiert. Die für LED-Packages wichtigen Fehlermechanismen werden nun für einzelne Bestandteile aufgeführt [26].

Halbleiterchip

Durch hohe Stromdichte induzierte JOULEsche Wärme führt zu thermomechanischem Stress. Dies begünstigt die Generation und Bewegung von Defekten und Versetzungen im Kristallgitter.

Eine Diffusion der Dotieratome im p-n-Übergang, insbesondere im p-Bereich führt zu Lichtstromrückgang und einem Anstieg des Serienwiderstands. Ein Beispiel dafür ist die Entstehung von Mg-H Komplexen. Ein für die LED positiver Effekt stellen die sogenannten Ausheilungseffekte dar, bei denen sich Kristalldefekte und Versetzungen zurückbilden können [27],[28]. Dies führt zu einer besseren Strahlungsemission, was zu Beginn der Alterung für verschiedene LED-Packages beobachtet wird.

Elektrische Anschlüsse

Metallurgische Prozesse wie Diffusion am Bonddraht und weiteren elektrischen Kontakten haben eine Zunahme des Serienwiderstands und Lichtstromdegradation zur Folge.

Package

Eine Vergilbung der Verkapselung entsteht durch UV-Bestrahlung, kann jedoch bereits durch das blaue Licht des Chips verursacht werden. Die Folge davon ist neben einer geringeren Lichttransmission auch eine Farbverschiebung, da kürzere Wellenlängen absorbiert werden.

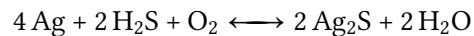
Die Ursache einer Delamination ist hauptsächlich der Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von zwei direkt verbundenen Materialien. Tritt dieser Effekt zwischen Chip und Verkapselung auf, führt dies zu einer Lichtstromdegradation.

Rissbildungen der Linse werden durch hohe Temperaturen im Material (Silikon) beschleunigt, wenn durch eine Versprödung das Polymermaterial die thermomechanischen Kräfte nicht mehr aufnehmen

2. Grundlagen

kann. Je nachdem an welchem Ort Risse auftreten, entstehen andere Effekte, die näher in Kapitel 4 analysiert werden.

Eine Korrosion des Silberspiegels wird durch die Temperatur beschleunigt und führt bei speziellen LED-Packages zu einer verminderten Reflexionsfähigkeit. Je nach Bauweise kann dies neben einem Lichtstromrückgang auch zu einer Farbverschiebung führen. Durch Schwefelverbindungen bildet sich auf der Oberfläche Silbersulfid, diese Reaktion wird bei Anwesenheit von Sauerstoff noch beschleunigt [29]. Folgende Reaktionsgleichung zeigt die beteiligten Stoffe.



Schwefelwasserstoff sowie Sauerstoff können durch das Silikon hindurch diffundieren und gelangen somit von der Außenluft bis zum Silberspiegel. Ohne eine geeignete Passivierung als Schutzschicht stellt sich daher eine Korrosion ein, die mit der Temperatur beschleunigt wird.

2.10. LM-80-08 und TM-21-11

Für die Bestimmung der Lebensdauer von LEDs hat die Illumination Engineering Society (IES) ein standardisiertes Messverfahren entwickelt, das sogenannte IES LM-80-2008 (Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources, LM-80) [9]. Hier sind neben den Test-, auch genaue Messbedingungen festgelegt.

Mindestens zwei T_C -Temperaturen sollen in den Tests enthalten sein, wobei eine davon entweder 55 °C oder 85 °C betragen muss. Vorwärtsströme sollen jeweils den Strömen entsprechen, mit der die LED im Standardfall betrieben wird.

Da die definierten Lebensdauern innerhalb der Testdauer häufig nicht erreicht werden, legen Extrapolationsmethoden im Standard IES TM-21-2011 (Projection Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources) die Berechnung der Lebensdauer fest [6].

Die in einem Abstand von 1000 h gemessenen Lichtströme werden im ersten Schritt jeweils auf den Anfangslichtstrom normiert. Bei beispielsweise zehn Objekten ergeben sich zehn relative Kurven, die alle bei 0 h mit einem Wert von 100 % starten. Im zweiten Schritt folgt zu jedem Messzeitpunkt die Bildung des Mittelwerts der relativen Werte. Um die Lebensdauer eines Testobjekts zu bestimmen, wird dieser mittlere Verlauf weiter ausgewertet. Den wichtigsten Schritt bei der Berechnung der Lebensdauer bildet folgende exponentielle Anpassungsfunktion.

$$\Phi(t) = B \cdot \exp(-\alpha t) \quad (2.23)$$

Je nach Gesamtdauer des LM-80-Tests sind die zur Bildung der Anpassungsfunktion verwendeten Daten unterschiedlich.

2.11. Arrhenius-Methodik

SAVANTE ARRHENIUS untersuchte im Jahr 1889 den Effekt der Temperatur auf chemische Reaktionsraten und fand dabei einen generellen Zusammenhang [30]. Dieser wird in der folgenden, als ARRHENIUS-Gleichung bezeichneten Formel dargestellt.

$$k(T) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right) \quad (2.24)$$

Die Reaktionsrate k steht somit in einem exponentiellen Zusammenhang mit der reziproken Temperatur. Durch eine Temperaturerhöhung steigert sich nach der BOLTZMANN-Verteilung die Anzahl der Teilchen, welche die Aktivierungsenergie E_A des Prozesses überwinden können. Dies führt dazu, dass bei höheren Temperaturen auch höhere Reaktionsgeschwindigkeiten erreicht werden.

Die Logarithmierung der Gleichung 2.24 führt zu einem linearen Zusammenhang, der im sogenannten ARRHENIUSgraph überprüft werden kann.

$$\ln k(T) = -\frac{E_A}{k_B T} + \ln A \quad (2.25)$$

Im semilogarithmischen Diagramm wird der zu untersuchende Parameter dafür über der reziproken Temperatur ($1/T$) aufgetragen. Alle Datenpunkte liegen auf einer Geraden, falls das Verhalten dem Gesetz von ARRHENIUS unterliegt.

Ob Prozesse allein von der Temperatur beschleunigt werden, kann mit Hilfe der ARRHENIUS-Methode untersucht werden.

2.12. Zuverlässigkeitsmethodik

Befinden sich mehrere Messobjekte in einem Alterungstest, so entstehen für die einzelnen Objekte jeweils individuelle Alterungskurven. Bei der Betrachtung von Ausfällen wird jedem Messobjekt eine Zeit zugeordnet, nach der es ausgefallen ist. Bei vielen Produkten bildet sich eine Kurve aus, die einem Querschnitt einer Badewanne ähnelt (Abbildung 2.16). Zu Beginn sind Ausfälle häufiger, hier sortieren sich die Objekte aus, welche leichte Produktionsfehler besitzen. Nach diesen Frühausfällen ist die Ausfallrate konstant, es handelt sich um zufällige Fehler. Am Ende des betrachteten Zeitraums fallen wieder mehr Produkte pro Zeit aus. Dies entspricht nun der Lebensdauer, die Alterungserscheinungen sind so stark, dass sie die zufälligen Ausfälle überwiegen.

Bei der LED-Herstellung können nach einem zu Beginn stattfindenden, sogenannten „Burn-In“ die LED-Packages aussortiert werden, die von einem Frühausfall betroffen sind. Der Kunde erhält somit nur die LED-Packages ohne Produktionsfehler. Die konstante Ausfallrate ist bei LEDs oft sehr niedrig, so dass die Wahrscheinlichkeit eines Totalausfalls innerhalb der angegebenen Lebensdauer fast verschwindend gering ist. Nicht alle Produkte verhalten sich gleich, dies wird im Folgenden mathematisch genauer betrachtet.

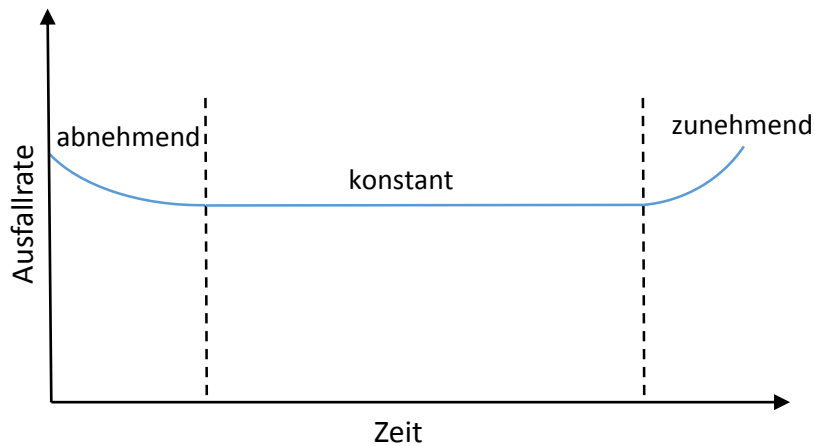


Abbildung 2.16.: Zeitliche Entwicklung der Ausfallrate in drei Abschnitten, aufgrund der Form auch als Badewannen-Kurve bezeichnet

Die Häufigkeit der Ausfälle in einem bestimmten Zeitintervall kann zeitlich verschieden sein. Somit ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ für einen Ausfall zur Zeit t . Die Ausfallrate ist die Anzahl der pro Zeit ausfallenden Messobjekte. Bei einer konstanten Ausfallrate ist ihr Symbolzeichen λ mit der Einheit $1/s$. Die gesamte Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ erhöht sich mit der Zeit, sie ist die Integration der Wahrscheinlichkeitsdichte.

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2.26)$$

Die Ausfallrate zum Zeitpunkt t wird mit Hilfe folgender Gleichung berechnet:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.27)$$

Die Ausfallrate der Exponentialverteilung $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ soll nun exemplarisch ermittelt werden. Dazu ist vorerst die Ausfallwahrscheinlichkeit mit Gleichung 2.26 zu ermitteln.

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.28)$$

Die Ausfallrate zum Zeitpunkt t wird nach Gleichung 2.27 bestimmt.

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})} = \lambda \quad (2.29)$$

Im Fall der Exponentialverteilung ergibt sich somit eine konstante Ausfallrate, was dem mittleren Abschnitt der Badewannenkurve entspricht. Sollen auch der erste und dritte Teil mit ansteigender und abfallender Ausfallrate beschrieben werden, so lässt sich die sogenannte WEIBULLverteilung ansetzen. Dabei handelt es sich um eine erweiterte Exponentialverteilung mit den Formparametern β und η .

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2.30)$$

Für $\beta = 1$ ergibt sich die oben genannte Exponentialverteilung. Weitere im Gebiet der Zuverlässigkeitsberechnung oft verwendete Verteilung ist die folgende Normalverteilung, welche durch die WEIBULLverteilung lediglich approximiert werden kann.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (2.31)$$

Sind logarithmische Werte normalverteilt, so entspricht dies einer Lognormalverteilung (Gleichung 2.32). Diese ist im Gegensatz zur Normalverteilung asymmetrisch, meist ist sie linksschief.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (2.32)$$

Die Lognormalverteilung beschreibt unter anderem Migration oder Diffusion, häufige Ausfallursachen in Halbleitern. Daher wird sie im Kapitel 6 bei der statistischen Betrachtung der Lebensdauer einzelner LED-Packages eingesetzt.

3. Stand der Forschung

Das folgende Kapitel zeigt einen Ausschnitt der bisherigen Forschung und legt einen Schwerpunkt auf die Degradationsmechanismen und Alterungsberechnungen. Dabei wird jeweils der Einfluss von Temperatur und Strom mit betrachtet. Am Ende des Kapitels werden die Forschungsfragen vorgestellt und den weiteren Kapiteln zugeordnet.

3.1. Degradationsmechanismen

Bereits 1976 gab es von JORDAN und RALSTON Untersuchungen zur Degradation von LEDs, in diesem Fall rote GaP-LEDs. Als Hauptalterungsprozess wurde die Diffusion von nichtstrahlenden Rekombinationszentren angenommen [31]. Die Konzentration dieser Zentren steigt bei einer Chip-Temperatur von 220 °C innerhalb von 1000 h bis auf das achtzigfache des Anfangswerts an. Bereits hier ließ sich feststellen, dass die Temperatur einen hohen Einfluss auf den Degradationsmechanismus hat. Bei einer Chip-Temperatur von 120 °C steigt die Konzentration nur noch um das Zehnfache an. Diese fließt ebenfalls in die Beschreibung der Abnahme der relativen Effizienz der Elektrolumineszenz ein. Der Anstieg kann für verschiedene Temperaturen mit Hilfe einer Gleichung abgebildet werden. Sie fließt ebenfalls in eine weitere Formel ein, die den Rückgang der optischen Effizienz beschreibt.

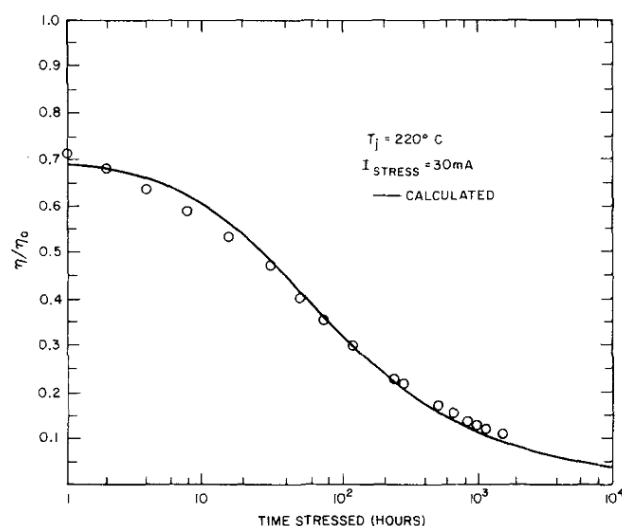


Abbildung 3.1.: Zeitliche Entwicklung der relativen Strahlungseffizienz roter LEDs bei einer Chip-Temperatur von 220 °C und Vorwärtsstrom von 30 mA [31]

Der Rückgang der Strahlungseffizienz verläuft in der halb-logarithmischen Darstellung nicht linear. Das Alterungsverhalten ist aufgrund der hohen Temperatur stark beschleunigt. Nach 1000 h bei 220 °C ist die Effizienz von 70 % auf 10 % gesunken.

3. Stand der Forschung

GRILLOT veröffentlichte im Jahr 2006 Messdaten von Leuchtdioden auf der Materialbasis AlGaInP. Dabei wurde der Lichtstromrückgang über 60 000 h (etwa sieben Jahre Dauerbetrieb) dokumentiert [32]. Es ergeben sich erstaunlich geringe Werte von etwa 20 % Degradation. Der strahlenden Rekombination werden andere Prozesse entgegengestellt, die sich mit der Zeit verstärken können. Dazu zählen die SHOCKLEY-READ-HALL- und ER-Rekombination, Einfangprozesse von Elektronen und Löchern und Leckströme aus der aktiven Region heraus. Die Degradationsdaten werden mit Hilfe einer empirischen Funktion beschrieben, in die der eingebrachte Strom linear eingeht. Außerdem handelt es sich um eine Funktion über $\ln(t)$, was erklärt, warum die Autoren die x-Achse als Zeitachse logarithmisch darstellen. In dieser halb-logarithmischen Darstellung sind Logarithmusfunktionen als Geraden erkennbar. Die untersuchten LEDs besaßen eine Doppelheterostruktur und wurden lediglich mit höchstens 50 mA betrieben. Die Studie enthält auch Alterungsdaten von damals aktuellen Hochleistungs-LEDs (LUXEON), die als aktive Region bereits Mehrfachpotentialtöpfe (multi-well) verwenden. Die Degradationskurven erreichen nach 10 000 h ähnliche Werte. Außerdem zeigt sich, dass der einfache logarithmische Zusammenhang erst nach einer gewissen Zeit von hundert bis mehreren Tausend Stunden eintritt. Diese Ergebnisse deuten daraufhin, dass eine einfache mathematische Beschreibung der Alterung von Hochleistungs-LEDs wahrscheinlich nur schwer zu erreichen sein wird.

Für weiße LED-Packages veröffentlichte ISHIZAKI im Jahr 2007 eine Lebensdaueruntersuchung [33], bei denen weiße Hochleistungs-LEDs untersucht wurden. Die Degradation des Lichtstroms verläuft hier bei fünf verschiedenen Chip-Temperaturen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

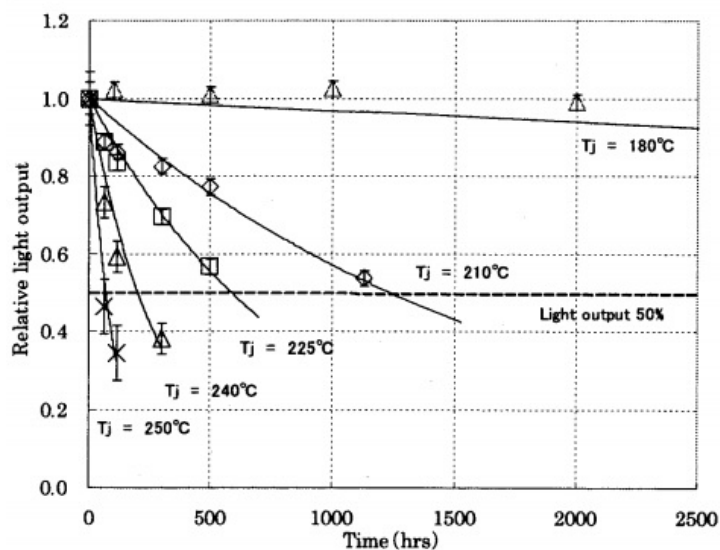


Abbildung 3.2.: Lichtstromrückgang weißer LED-Packages bei verschiedenen Chip-Temperaturen, die Grenze von 50 % wird als Lebensdauer gesetzt [33]

Der ARRHENIUSgraph für die Lebensdauern bezüglich eines Lichtstroms von 50 % bestätigt, dass die Temperatur die Alterungsprozesse beschleunigt hat und zusätzlich für andere Temperaturen bestimmbar ist. Als Fitfunktionen werden hierbei exponentielle Funktionen verwendet, welche in früheren Untersuchungen von weißen LEDs bereits zur Anwendung kamen. Nach der Erfahrung von NARENDRA im Jahr 2005 ist die Verwendung einer exponentiellen Funktion sinnvoll, wenn die Daten der ersten 1000 h verworfen werden und die Testdauer mindestens 5000 h beträgt [34].

Eine Veränderung des Vorwärtsstroms hat direkten Einfluss auf die Chip-Temperatur, wenn der thermische Pfad nicht geändert wird. Um die Auswirkungen des Stroms bei gleicher Temperatur zu untersuchen, wurde daher die Umgebungstemperatur so geändert, dass die Chip-Temperatur bei jeder Bedingung gleich war. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erhöhung der Stromdichte zu keiner signifikant stärkeren Degradation führt. Lediglich die Bedingungen ohne Bestromung und bei einer geringen Stromstärke von 5 mA weisen eine geringere Alterung auf (Abbildung 3.3). Den Haupteffekt der Alterung der untersuchten weißen Hochleistungs-LEDs aus dem Jahr 2007 ist somit der Temperatur zuzuschreiben.

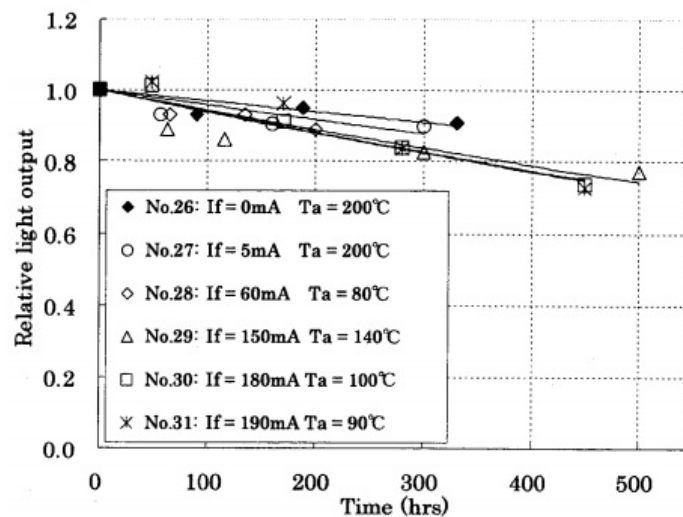


Abbildung 3.3.: Lichtstromrückgang weißer LED-Packages bei verschiedenen Vorwärtsströmen und gleichen Chip-Temperaturen. [33]

Eine Studie von MENEGHINI enthält den Ansatz die Zuverlässigkeit von GaN basierten LEDs auf verschiedene Degradationsprozesse zurückzuführen. Dabei werden spezielle Testmethoden vorgestellt, die sich von den klassischen Alterungstests mit Nennstrom und verschiedenen Temperaturen unterscheiden. Unter anderem soll ein Stresstest bei kleinen Strömen von 20 mA den alleinigen Einfluss der Ladungsträger zur Veränderung der aktiven Zone herausarbeiten [35]. Aufgrund der geringen Temperatur von 35 °C sind Instabilitäten der Dotierung an der p-Seite der Diode ausgeschlossen [36].

Im Jahr 2009 schlägt die Firma CREE in ihrer Applikationsschrift über Testmethodiken bezüglich LED-Alterung lineare Funktionen zur Beschreibung der Lichtstromdegradation vor [37]. Außerdem wird die Alterungszeit in zwei Phasen unterteilt, Periode A und Periode B. Die Steigungen der linearen Funktionen werden durch ein Steigungsdreieck berechnet, dessen Hypotenuse die Werte des relativen Lichtstroms am Beginn und am Ende des betrachteten Zeitabschnitts verbindet (Abbildung 3.4). Es handelt sich somit um eine mittlere Steigung, die gemessene Alterungskurve kann jedoch davon abweichen. Außerdem werden folgende Betriebsparameter als kritisch angesehen: Lötpunkttemperatur, Vorwärtsstrom, Chip-Temperatur und Umgebungstemperatur der Luft. Das abschnittsweise modellierte, lineare Verhalten ist jedoch für jede Kombination dieser genannten Parameter berechenbar.

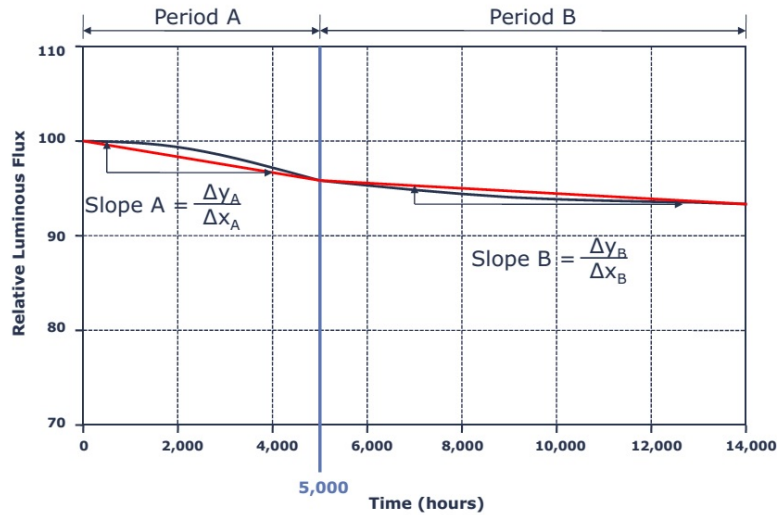


Abbildung 3.4.: Abschnittsweise lineare Modellierung des Lichtstromrückgangs [37]

CREE hat mehrfach beobachtet, dass eine hohe Umgebungstemperatur die Lichtstromdegradation in einem Maß beschleunigt, was bei Tests mit Raumtemperatur nicht festgestellt werden kann [37]. In einer 2016 veröffentlichten, neuen Auflage der Anwendungsschrift wird dieses Thema nicht mehr angesprochen [38]. Ein weiteres Dokument von CREE zur chemischen Kompatibilität zeigt die Degradation von LED-Packages aufgrund flüchtiger organischer Moleküle (VOCs). Diese können leicht ins Silikon eindringen und gelangen dann auf die lichterzeugende Oberfläche, wo sie sich aufgrund von Hitze und Photonenenergie verfärben [39]. Dieser Effekt ist jedoch reversibel. Sobald ein Gasaustausch mit der Umgebung ermöglicht wird, können die VOCs wieder entweichen.

Das Material Silikon der Verkapselung spielt bei manchen LED-Packages eine entscheidende Rolle für die Alterung. In einer Untersuchung von 2015 wurde das mechanische Verhalten des Silikons näher betrachtet [40]. Als Ergebnis wurde ein Modell entwickelt, das die Lichtstromdegradation in Abhängigkeit der durchschnittlichen Rate der Kriechdehnung stellt. Eine weitere Untersuchung aus dem Jahr 2015 zeigt die Entstehung von Mikrorissen im Silikon bei verschiedenen Umgebungsbedingungen und Temperaturen [41].

Die Lebensdauerberechnung auf Basis von TM-21 wird in einer Veröffentlichung von VAN DRIEL noch erweitert [42]. Um die Form der exponentiellen Funktion zu verändern wird der Faktor β eingeführt. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Anpassungsfunktion den realen Kurvenverläufen entspricht.

$$\Phi(t) = \exp(-\alpha t^\beta) \quad (3.1)$$

Neben diesem neuen Formfaktor ist ebenfalls der Strom mit integriert, indem das Potenzgesetz angewendet wird. Dies wird oft zur Beschleunigung von nicht-thermischen Größen eingesetzt. Es wird über den Exponent n gebildet, der Vorfaktor C muss zusätzlich aus den Daten berechnet werden. Die Steilheit der exponentiellen Alterungsfunktion 3.1 wird durch den Parameter α bestimmt, in welchen sowohl die Temperatur, als auch der Strom eingehen.

$$\alpha = C \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B \cdot T_s}\right) \cdot I^n \quad (3.2)$$

Das Modell trennt den Einfluss der Temperatur und Strom in zwei unterschiedliche mathematische Funktionen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein erhöhter Strom auch eine Erhöhung der betrachteten Temperatur nach sich führt. Diese Abhängigkeit sollte durch Messungen auch quantitativ bekannt sein, damit durch das Modell eine echte Trennung beider Größen abgebildet wird.

Die bis hier vorgestellten Untersuchungen des Alterungsverhaltens von LEDs beschreiben den mittleren zeitlichen Verlauf der Degradation. Das Verhalten einzelner Messobjekte ist ebenfalls Gegenstand von aktueller Forschung und soll am folgenden Beispiel erläutert werden.

Statistische Analyse auf Basis von WEIBULL-Funktionen finden sich bei ZHANG [43]. Eine im Jahr 2011 veröffentlichte Studie analysiert echte Ausfälle in Form von entstehenden offenen Stromkreisen (open circuit) bei roten LEDs [44]. Die Darstellung erfolgt im WEIBULL-Graph (Abbildung 3.5), für unterschiedliche Temperaturen verlaufen die Kurven parallel.

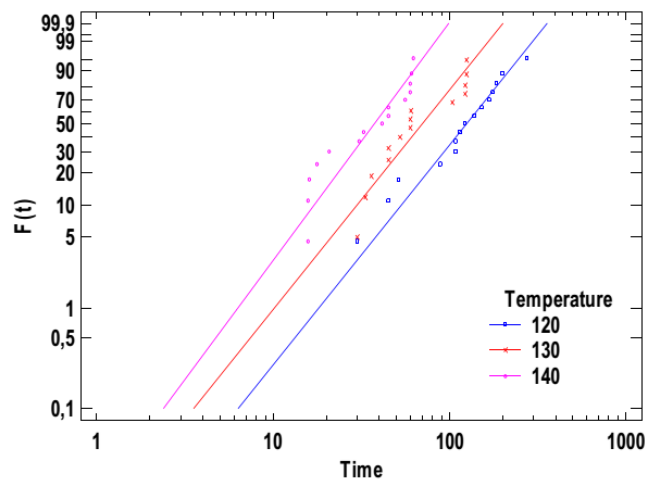


Abbildung 3.5.: WEIBULLgraphen von echten LED-Ausfällen bei verschiedenen Temperaturen, einem Vorwärtsstrom von 40 mA und einer Luftfeuchtigkeit von 85 % [44]

Wird der Vorwärtsstrom als Parameter variiert, sind die Geraden im WEIBULL-Graph nicht mehr parallel, sondern laufen bei späteren Zeitpunkten aufeinander zu. Daher wird der Einfluss des Stroms mit anderen Funktionen getestet, wobei sich das inverse Potenzgesetz als am besten geeignet herausstellt [44].

Das elektrische Verhalten bei der Änderung der Chip-Temperatur ist umfangreich von KEPPENS [45] untersucht worden. Ebenfalls befasste er sich mit der Modellierung von LED-Spektren auf Basis physikalischer Grundlagen [46]. Hierbei ist die Temperatur einer der Hauptparameter der Modellgleichungen. Das Wechselspiel von blauer Strahlung mit Leuchtstoffen ist jedoch immer noch schwierig nachzubilden.

Thermische Simulation von gesamten Leuchten sind mit Hilfe von Programmen möglich, die die Methode der finiten Elemente einsetzen [47]. Somit sollte möglich sein, schon bei der Entwicklung der Leuchte die entstehenden Temperaturen und damit Lebensdauern abzuschätzen.

3.2. Fragestellungen und Ziele der Arbeit

Kapitel 1 fasst die Entwicklung der LED-Technologie grob zusammen und gibt einen Überblick der Zuverlässigkeitsbetrachtung von LED-Packages.

Kapitel 2 erläutert die für das Verständnis der Analyse und Berechnung wichtigen Grundlagen. Dabei entwickeln sich Teile der Fragestellungen bereits aus den speziellen Themengebieten, die dort behandelt werden.

Kapitel 3 stellt grundlegende Forschungsergebnisse in den für die vorliegende Dissertation betreffenden Themenbereichen dar. Es lässt sich ableiten, dass bereits vor Jahrzehnten manche Fragen behandelt wurden, die bis in aktuelle Forschungen hineinreichen.

Die **Hauptforschungsfrage** lässt sich aus dem Titel der Dissertation direkt ableiten:

Welchen Einfluss hat die Temperatur und der Strom auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten von LED-Systemen?

Zwei Hauptaspekte sollen betrachtet werden, die **Zuverlässigkeit** und das **lichttechnische Verhalten**.

Das Thema **Zuverlässigkeit** ist so umfangreich, dass es nicht auf einzelne Kapitel beschränkt wird. Der Begriff wurde im **Kapitel 2** erläutert, außerdem existieren Parallelen zur Lebensdauerberechnung, die im **Kapitel 6** näher behandelt wird.

Das durch die Temperatur und Strom beeinflusste **lichttechnische Verhalten** wird in den Grundlagen im **Kapitel 2** für LED-Packages untersucht. **Kapitel 7** befasst sich ausschließlich mit diesem Gesichtspunkt, wobei die Analyse auf komplette LED-Systeme erweitert wird.

Mit der Durchführung und Bewertung der Alterungstests lassen sich drei weitere Fragestellungen entwickeln:

Welche der beiden Größen Temperatur und Strom ist für die Analyse der Alterungsergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten LED-Packages besser geeignet?

Sind die Daten aus der Beschleunigung mittels Temperatur mit dem Arrhenius-Verhalten abbildbar?

Lassen sich durch die durchgeführten Messungen bestimmte Alterungsmechanismen erkennen und einzelnen Bereichen im LED-Package zuordnen?

Antworten darauf werden insbesondere in den **Kapiteln 4 und 5** erarbeitet, welche die Alterungsergebnisse vorstellen und analysieren.

Kapitel 6 erarbeitet folgende Fragestellung, unter anderem unter Einbeziehung externer Daten:

Ist eine Beschreibung und Extrapolation der Degradation mittels mathematischer Funktionen möglich?

Thermische Zusammenhänge innerhalb eines LED-Packages werden in **Kapitel 7** analysiert, wobei folgende Forschungsfrage im Mittelpunkt steht.

Inwiefern beeinflussen einzelne Package-Bestandteile die während des Betriebs erzeugten Wärmeflüsse und Temperaturen innerhalb eines LED-Packages?

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

Das folgende Kapitel stellt zu Beginn den Teststand und die Messtechnik für die LED-Alterung vor. Die darauffolgende Analyse der Messergebnisse befasst sich mit dem Rückgang des Strahlungsflusses sowie den elektrischen, thermischen und spektralen Änderungen.

4.1. Teststand für LED-Alterung

Am Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt werden zwei Typen von Hochleistungs-LEDs im Dauerbetrieb gealtert. Der Teststand stellt dazu die notwendigen Temperaturen (55 °C, 85 °C und 95 °C) und Ströme (350 mA, 700 mA und 1000 mA) zur Verfügung, bei denen die LED-Packages zu jeweils zehn Mustern gealtert werden. Hierbei wurde sich an den Testbedingungen nach LM-80 orientiert. Die optischen Messungen erfolgen in Form von Pulsmessungen bei 25 °C mit Hilfe einer U-Kugel, an welche ein Spektrometer angeschlossen ist.

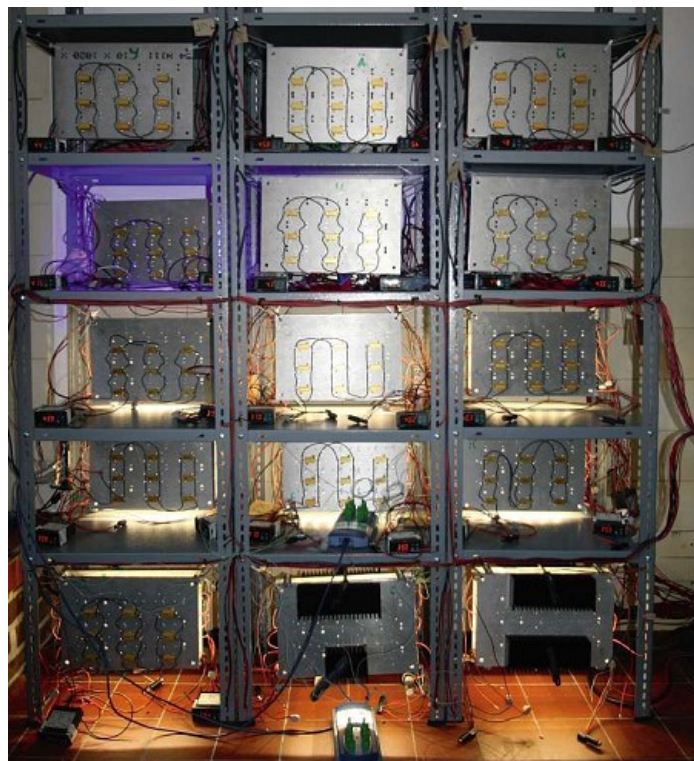


Abbildung 4.1.: Alterungsaufbau der Hochleistungs-LEDs. Jeweils zwanzig LED-Packages laufen bei einer Bedingung und werden über Netzteile mit Konstantstrom versorgt. Die Temperatur wird über geheizte Aluminiumbleche geregelt.

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

Die LED-Packages sind auf Messplatinen bestückt, welche wiederum auf 10 mm starken Aluminiumplatten mit Schrauben befestigt sind. Diese Platten hängen vertikal in Metallregalen und sind paarweise so angebracht, dass die Messobjekte auf der jeweiligen Innenseite sitzen. Zur Erreichung der für die Alterung nötigen Temperaturen dienen auf der Außenseite befestigte Heizwiderstände.

Die Hochleistungs-LEDs werden auf speziell entwickelten Messplatinen gealtert. Die Temperatur wird während der Alterung auf einer in der Mitte der Platte platzierten LED-Platine geregelt, wobei ein zusätzliches Thermoelement (Typ K) ausgelesen wird. Die Wärmeverteilung ist ausreichend homogen, so dass die LEDs auf einer Platte mit jeweils der gleichen Temperatur altern.

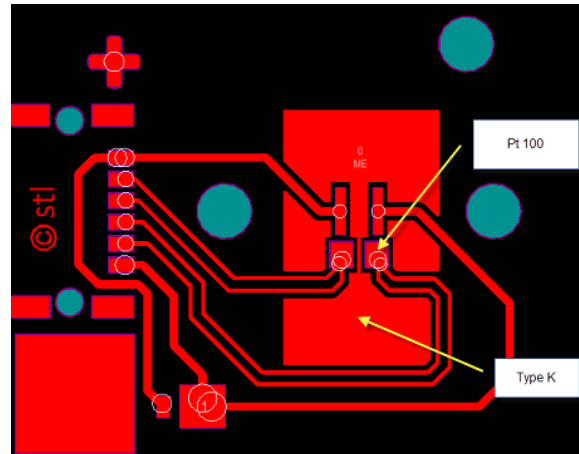


Abbildung 4.2.: Platine für die zu alternden Hochleistungs-LEDs. Ein Temperatursensor (Pt100) ist in der Nähe des Lötpoints des LED-Packages angebracht.

Für die Temperaturmessung während des Messvorgangs dienen auf den Platinen aufgebrachte Pt100-Sensoren, die mittels Vierdraht angeschlossen sind. Sie befinden sich direkt neben den Löt pads der LED, sind jedoch thermisch über das Dielektrikum der Leiterplatte verbunden. Spätere Analysen zeigen, dass aufgrund dessen die Chip-Temperatur nicht mit der Sensortemperatur übereinstimmt.

4.2. Messsystem für LEDs

Das Messsystem für LEDs besteht aus mehreren elektrischen, optischen und thermischen Komponenten. Abbildung 4.3 gibt einen Überblick der einzelnen Geräte und deren Verbindung untereinander.

4.2.1. Optische Messung

Die gesamte emittierte Strahlung des LED-Packages soll in der Alterungsuntersuchung betrachtet werden. Daher kommt entweder eine winkelabhängige Messung mit einem Goniophotometer oder eine integrale Messung mit Hilfe einer ULBRICHTschen Kugel in Frage. Winkelabhängige Messungen sind sehr zeitaufwendig, daher wurde das integrale Verfahren verwendet, bei dem zusätzlich spektrale Informationen des Lichts über ein Spektrometer geliefert werden.

Dazu steht eine Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 300 mm zur Verfügung, die an ihrer Vorderseite eine Öffnung besitzt, an welche die Messaufnahme so angebracht wird, dass sie plan zur Kugellinnenseite steht. Mittels eines mechanischen Anschlags wird die geometrische Position während der Messung sichergestellt. Eine Blende verhindert das Auftreffen direkter Strahlung auf die Sensoroberfläche, eine an ein Lichtfaserbündel angekoppelte LAMBERTSche Streuscheibe. Von dort aus gelangt die optische Strahlung über die Lichtfaser zu einem Gitter-Spektrometer, welches für optische Leistung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm empfindlich ist.

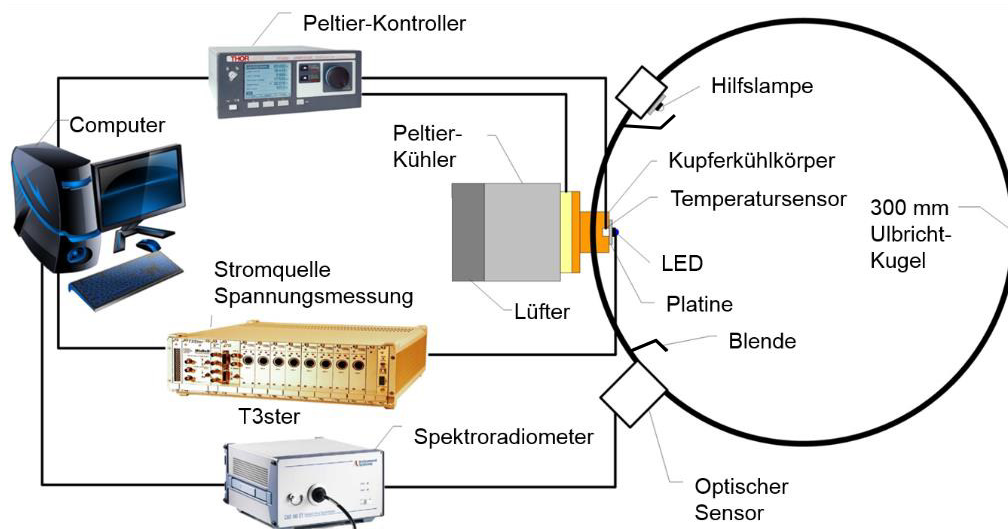


Abbildung 4.3.: Messaufbau für optische und thermische Charakterisierung von LED-Packages. Die spektrale Leistung wird mittels ULBRICHT-Kugel integral über ein angeschlossenes Spektrometer gemessen.

Alle Einstellungen erfolgen je nach Art der Messung über eine graphische Benutzeroberfläche des Spektrometers oder thermischen Messgeräts. Zur Dunkelstrom-Bereinigung wird vor jedem Messvorgang mit Hilfe eines im Messgerät integrierten Shutter eine Dunkelstrommessung durchgeführt. Die Messung findet gepulst statt, damit sich das LED-Package durch die internen Wärmeverluste nicht zu stark aufheizt. Die Integrationszeit beträgt 10 ms und zehn Messintervalle tragen zur Mittelung bei. Das bedeutet, dass das Licht während 10 ms auf den CCD-Sensor fällt, welcher daraufhin aufgeladen und elektronisch ausgelesen wird. Dieser Vorgang läuft insgesamt zehnmal direkt hintereinander ab, danach erfolgt die Mittelung und Übertragung der Daten.

4.2.2. Elektrische Messung der LED

Die elektrische Messung erfolgt durch ein SMU-Gerät, welches Befehle vom Spektrometer erhält. Zur genauen Spannungsmessung wird der Vierleiteranschluss verwendet, um den Einfluss der Leitungswiderstände zu minimieren. Die Leuchtdiode wird kurz mit einem Konstantstrom beaufschlagt und die dazugehörige Vorwärtsspannung ermittelt. Den Befehl zur Stromversorgung erhält das Gerät vom Spektrometer, das daraufhin zeitgleich die CCD-Zeile empfangsbereit schaltet. Die Spannungsmessung erfolgt im synchronen Modus am Ende der Integrationszeit.

4.2.3. Thermische Messung

Die Messaufnahme besteht aus einem massiven Kupferblock, der mit Hilfe eines Peltier-Elements thermisch stabil gehalten werden kann. Die Messung der Temperatur erfolgt in diesem Fall direkt auf der Messplatine mit einem Platin-Messwiderstand (PT100). Die Verarbeitung der Temperaturdaten ist bereits in der TEC-Source implementiert, dort kann die Temperatur auf einem Display abgelesen werden. Außerdem wird das Peltier-Element auf Basis einer PID geregelt. Die Regelungsgenauigkeit des Kupferblocks liegt unterhalb von 0,1 K und ist somit ausreichend genau, um LEDs thermisch zu vermessen.

4.3. Ergebnisse der LED-Alterung

Der Strahlungsfluss eignet sich allein wegen seines rein physikalischen Bezugs besser als der Lichtstrom, um physikalische Prozesse zu analysieren. Daher und aufgrund voriger genannter Gründe wird er im Folgenden als Größe zur Untersuchung der Degradation von LED-Packages verwendet.

Die Ergebnisse der beiden LED-Typen unterscheiden sich deutlich, besonders im elektrischen Verhalten und der Farbverschiebung. Daher werden die unterschiedlichen Messobjekte jeweils getrennt voneinander dargestellt und als LED-Typ A und B bezeichnet.

4.3.1. Strahlungsfluss

Eine wichtige Erkenntnis vorheriger Untersuchungen ist, dass die Veränderung der Temperatur im Vergleich zum Strom zu besser unterscheidbaren Alterungsergebnissen hinsichtlich der Lichtstromdegradation führt. Folgend soll diese Aussage auch für die verwendeten Hochleistungs-LEDs überprüft werden. Dazu sind die Mittelwerte der relativen Strahlungsflüsse von zehn LED-Packages zeitlich aufgetragen. Variiert wird dabei nur die Temperatur oder der Vorwärtsstrom.

Konstanter Strom

Die folgenden Diagramme zeigen den relativen Rückgang des Strahlungsflusses bei jeweils drei Alterungstemperaturen und konstantem Vorwärtsstrom. Die Analyse soll zeigen, inwiefern sich die Degradation für verschiedene Bedingungen verändert. Abbildung 4.4 zeigt drei Verläufe des mittleren relativen Strahlungsflusses bei einem Strom von 350 mA und den drei Temperaturen 55 °C, 85 °C und 95 °C. Auffällig ist hierbei, dass alle Kurven vorerst ansteigen, was wahrscheinlich auf Ausheilungsprozesse des LED-Chips zurückzuführen ist.

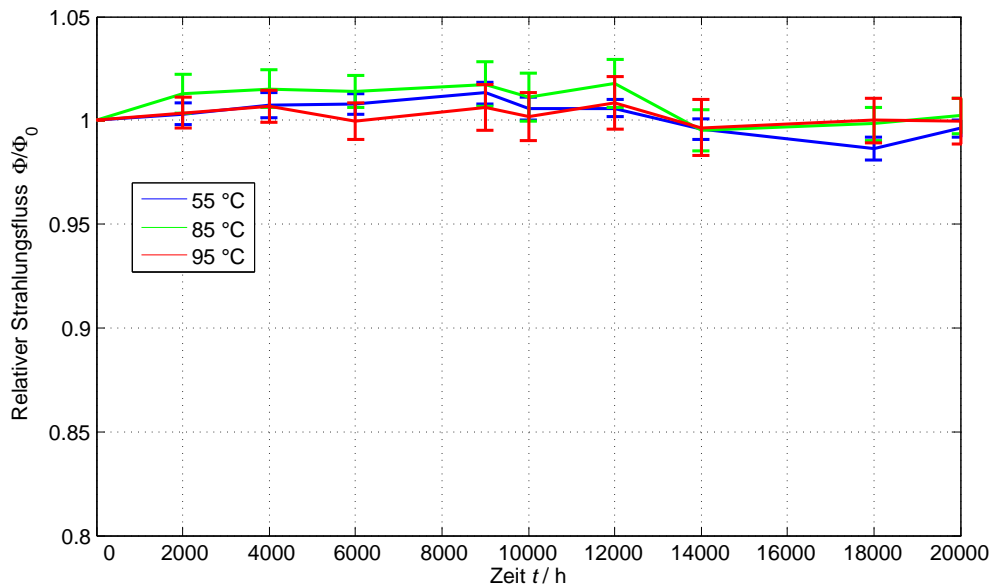


Abbildung 4.4.: Rückgang des Strahlungsflusses bei konstantem Strom von 350 mA und verschiedenen Temperaturen (55 °C, 85 °C und 95 °C) (Typ A)

Die drei Kurven für die jeweilige Temperatur schwanken innerhalb des betrachteten Alterungszeitraums um den Anfangswert. Dabei überlappen sich die Standardabweichungen, es lässt sich hier kein signifikanter Unterschied feststellen. Einige der im Langzeittest von CALiPER [8] gezeigten Kurven von Lampen mit Hochleistungs-LEDs zeigen über einen Zeitraum von 14 000 h ebenfalls keinen Lichtstromrückgang, teilweise erhöht sich dieser sogar.

Die nächsten Alterungskurven repräsentieren den Strahlungsflussrückgang bei einem Strom von 700 mA. Dazu zeigt Abbildung 4.5 drei Verläufe des mittleren relativen Strahlungsflusses bei einer Temperatur von 55 °C, 85 °C und 95 °C.

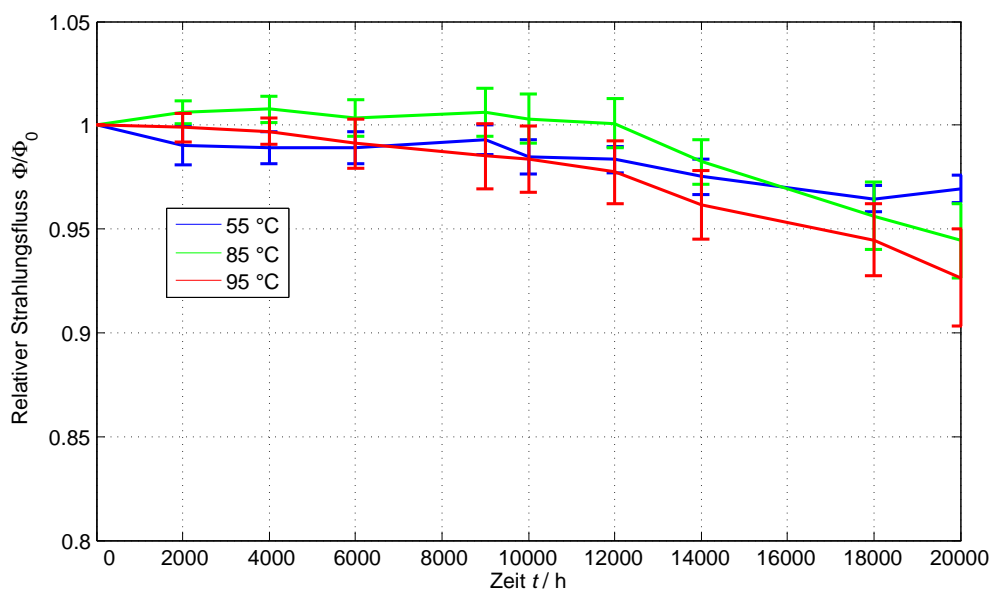


Abbildung 4.5.: Rückgang des Strahlungsflusses bei konstantem Strom von 700 mA und verschiedenen Temperaturen (55 °C, 85 °C und 95 °C) (Typ A)

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

Die Erhöhung des Stromes bewirkt nun einen Rückgang aller Bedingungen. Trotzdem unterscheiden sich die Kurven in den ersten 10 000 h zwar, es gibt jedoch wiederum teilweise Überlappungen der Standardabweichungen. In der zweiten Hälfte des betrachteten Alterungszeitraums stellt sich ein deutlicher Unterschied der beiden höheren Temperaturen ein. Dies führt unter anderem dazu, dass sich zwei Kurven überkreuzen. Der relative Strahlungsfluss für LED-Packages bei 85 °C liegt oberhalb der Messobjekte bei 55 °C. Die stärkere Degradation ab 12 000 h hat zur Folge, dass dieser die Bedingung der niedrigeren Temperatur kreuzt und sich am Ende unterhalb befindet. Der große Temperaturunterschied zwischen 55 °C und 85 °C hat somit einen stärkeren Einfluss als der geringere zwischen 85 °C und 95 °C.

Die Mittelwerte aller drei Bedingungen lassen sich zwar von Beginn an differenzieren, jedoch nicht auf den weiteren Verlauf der Kurven vorhersagen.

Der höchste bei der Langzeitalterung eingesetzte Strom liegt bei 1000 mA. Abbildung 4.6 zeigt drei Verläufe des mittleren relativen Strahlungsflusses für drei Temperaturen. Es zeigt sich ein deutlich stärkerer Rückgang der Strahlungsflüsse.

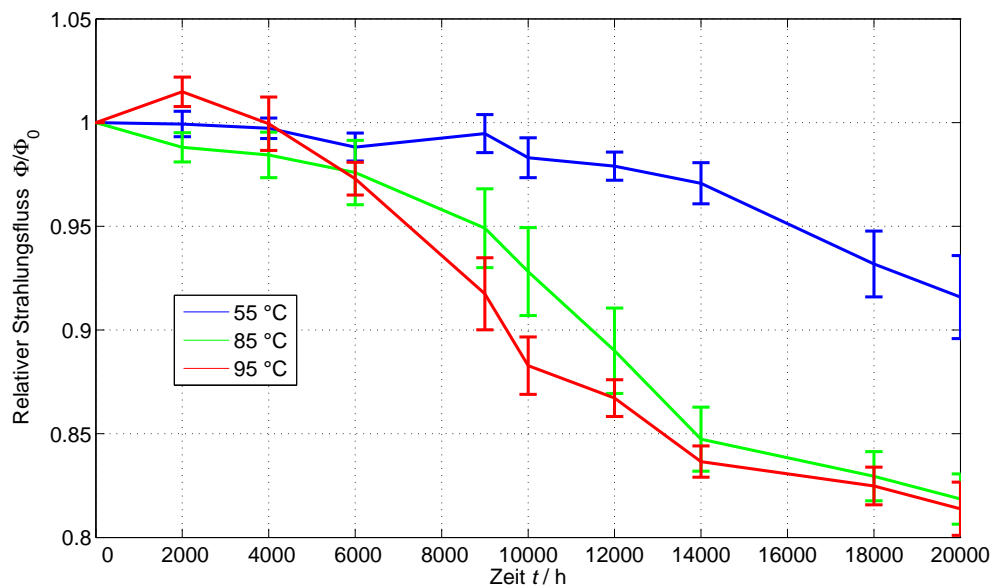


Abbildung 4.6.: Rückgang des Strahlungsflusses bei konstantem Strom von 1000 mA und verschiedenen Temperaturen (55 °C, 85 °C und 95 °C) (Typ A)

Die Alterung bei einem Vorwärtsstrom 1000 mA und 55 °C ähnelt hier den Verläufen entsprechend der beiden hohen Temperaturen bei 700 mA. Dieser Vergleich weist darauf hin, dass die Betrachtung der Temperatur alleine als Parameter nicht ausreicht.

Der Verlauf für LED-Packages bei 95 °C lässt sich in drei Phasen unterteilen: Eine erste leichte Alterung, danach ein starker Rückgang und schlussendlich wiederum ein geringerer Abfall des relativen Strahlungsflusses. Die Ursachen dieser verschiedenen Phasen werden im Abschnitt 4.3.3 näher untersucht. Für die höchste Temperatur ist in den ersten 10 000 h ein Anstieg zu verzeichnen. Diese Erhöhung der Strahlungsleistung kann auftreten, wenn eine Ausheilung des Halbleiterkristalls stattfindet [28]. Dieser Effekt ist temperaturabhängig und wurde ebenfalls bei blauen LEDs mit und ohne Verkapselung beobachtet, es ist daher nicht dem Leuchtstoff oder Silikon zuzuschreiben [48]. Nach dem ersten Anstieg setzt jedoch eine starke Degradation ein, die bis 14 000 h anhält. Im letzten Abschnitt verläuft die Kurve

nur leicht unterhalb der 85 °C entsprechenden Daten und erreicht bei 20 000 h einen Wert knapp oberhalb von 80 %. Dies könnte je nach Definition bereits das Ende der Lebensdauer für diese LED-Packages bedeuten.

Konstante Temperatur

Die Temperatur im Alterungsteststand wird konstant an einem Sensor geregelt. Da nicht alle LED-Packages direkt mit dem Sensor verbunden sind, können Temperaturunterschiede zwischen den Messobjekten auftreten. Außerdem befindet sich der Temperatursensor nicht am Lötunkt des LED-Packages, so dass die Temperatur des LED-Kristalls etwas höher liegt und sich bereits allein durch verschiedene thermische Leistungen ändert. Durch die einsetzende Degradation kann sie zusätzlich erhöht werden. Daher sind die Temperaturen im LED-Package zeitlich nicht konstant. Trotzdem soll hier vorerst die geregelte Temperatur für die Auswertung verwendet werden, da diese auch in den Standardtests betrachtet wird.

Abbildung 4.7 zeigt drei Verläufe des mittleren relativen Strahlungsflusses bei einer Temperatur von 55 °C und den drei Vorwärtsströmen 350 mA, 700 mA und 1000 mA.

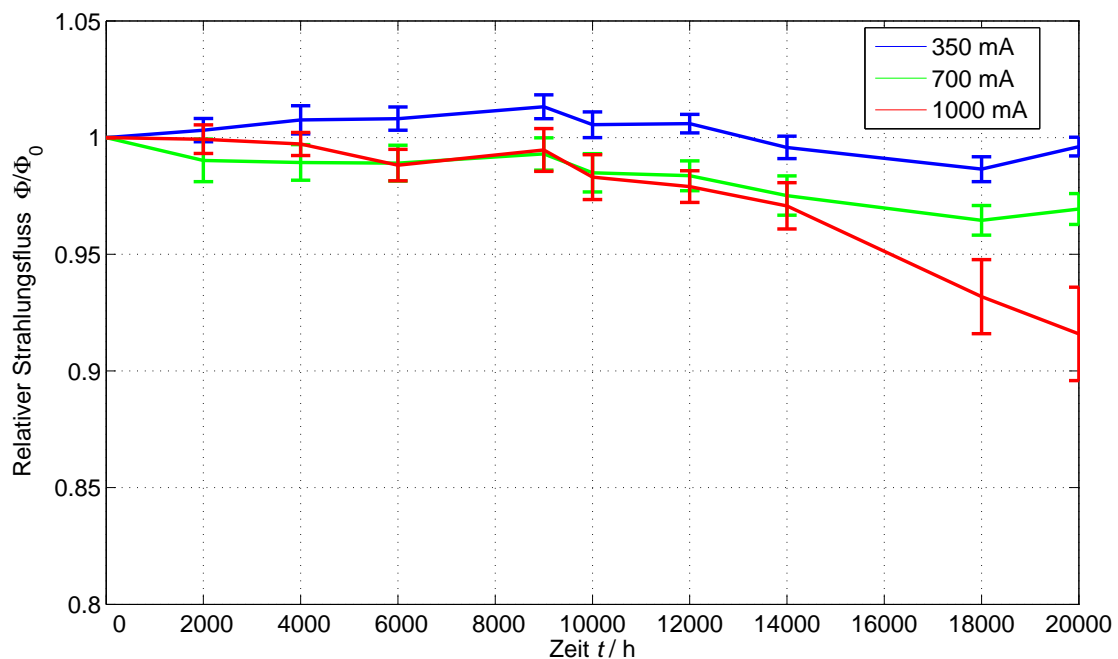


Abbildung 4.7.: Rückgang des Strahlungsflusses bei konstanter Temperatur von 55 °C und verschiedenen Strömen (350 mA, 700 mA und 1000 mA) (Typ A)

Bei 350 mA steigt der relative Strahlungsfluss vorerst an, schwankt danach jedoch um etwa $\pm 1\%$ um den Anfangswert. Es findet daher bei dieser Bedingung eine verschwindend geringe Alterung statt. Beim Wechsel zum nächsthöheren Strom von 700 mA sinkt der Strahlungsfluss direkt zu Beginn ab. Danach bewegt er sich jedoch parallel zu der Kurve des geringeren Stroms. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Erhöhung des Stromes ähnliche Degradationsmechanismen und -raten bewirkt, wenn Alterungszeiten nach 6000 h betrachtet werden.

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

Auch ein Strom von 1000 mA zeigt zu Beginn Abweichungen der anderen beiden Kurven, und ist zwischenzeitlich sogar deckungsgleich zu der Kurve bei 700 mA. Dies ändert sich erst nach 10 000 h mit einem starken Rückgang der relativen Strahlungsflusses.

Besonders stark ist die Degradation nach 14 000 h, wobei ein Teil der Messobjekte am Ende 90 % erreichen. Daher ist ein weiterer Degradationsmechanismus wahrscheinlich, der bei den niedrigeren Strömen nicht oder verlangsamt auftritt. Die Streuung der einzelnen LED-Packages unterscheidet sich hier auch kaum. Beim höchsten Strom ist sie jedoch größer und steigt dann an und überdeckt nach 20 000 h einen Bereich von etwa 5 %. Dies ist ebenfalls ein Hinweis, dass in diesem Fall ein weiterer Degradationsmechanismus wirkt.

Im folgenden werden alle drei Ströme bei der nächsthöheren Temperatur von 85 °C betrachtet. Abbildung 4.8 zeigt dazu drei Verläufe des mittleren relativen Strahlungsflusses bei einer Temperatur von 85 °C und den drei Vorwärtsströmen 350 mA, 700 mA und 1000 mA.

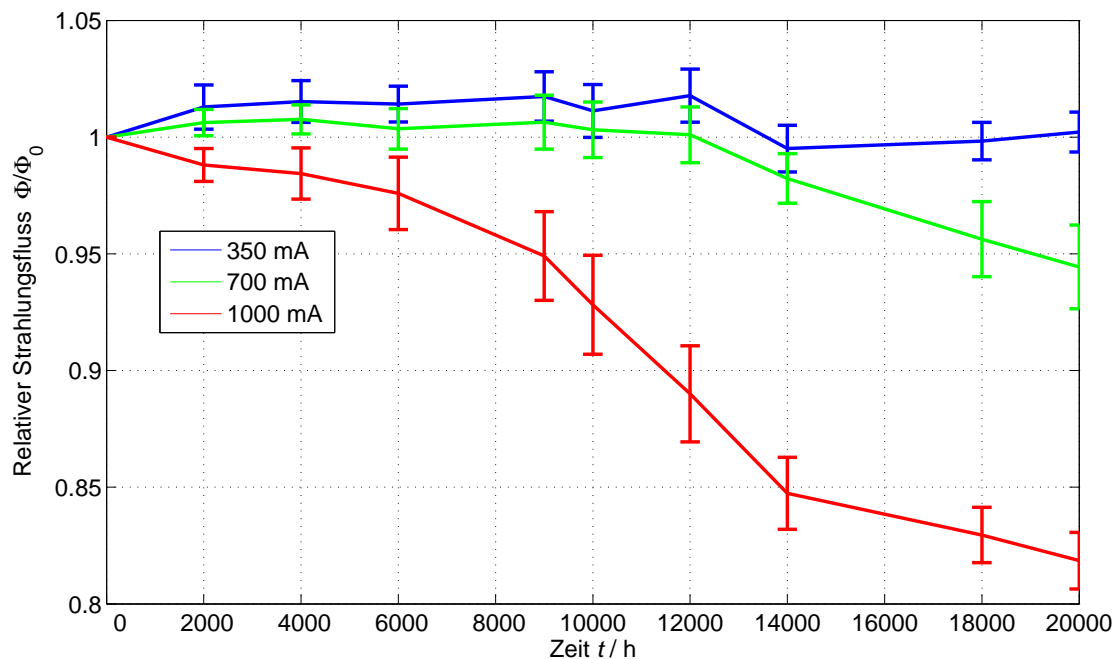


Abbildung 4.8.: Rückgang des Strahlungsflusses bei konstanter Temperatur von 85 °C und verschiedenen Strömen (350 mA, 700 mA und 1000 mA) (Typ A)

Im Vergleich zur niedrigeren Temperatur steigen die Kurven von 350 mA und 700 mA zu Beginn beide an, der niedrigere Strom liegt wieder oberhalb. Im zweiten Abschnitt ähnelt der 700 mA entsprechende Verlauf dem von 1000 mA im Diagramm 4.7 bei 55 °C.

Abbildung 4.9 zeigt drei Verläufe des mittleren relativen Strahlungsflusses bei einer Temperatur von 95 °C und den drei Vorwärtsströmen 350 mA, 700 mA und 1000 mA.

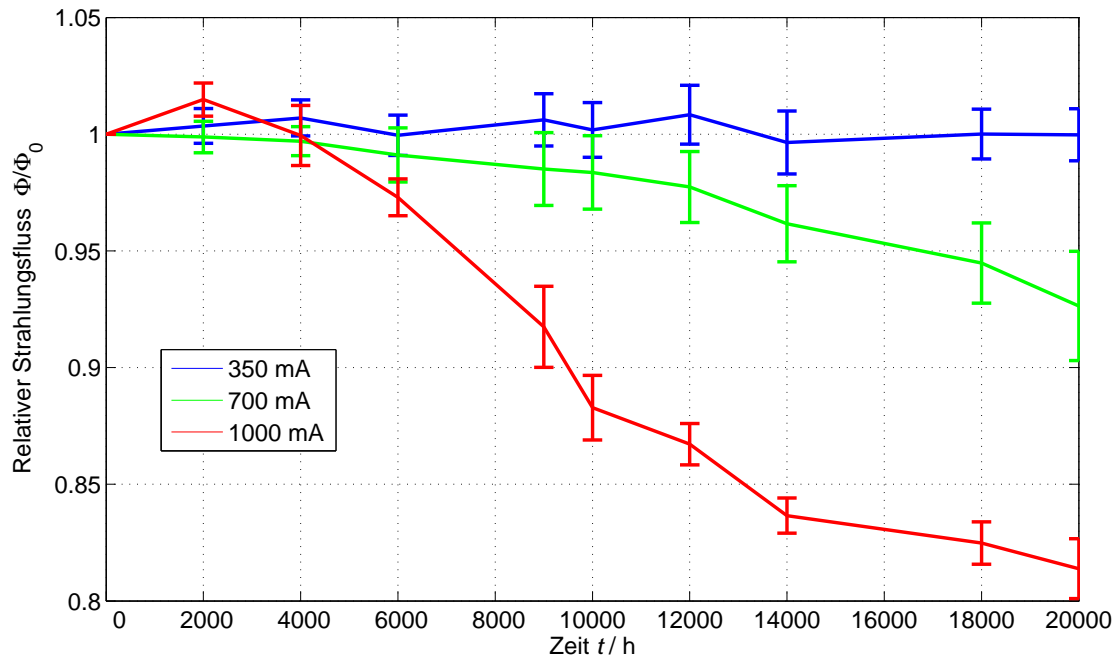


Abbildung 4.9.: Rückgang des Strahlungsflusses bei konstanter Temperatur von 95 °C und verschiedenen Strömen (350 mA, 700 mA und 1000 mA) (Typ A)

Nach den ersten zweitausend Stunden ist ein vom Vorwärtsstrom abhängige Alterungsverhalten zu erkennen. Der mittlere Strahlungsfluss steigt bei Verwendung von 350 mA stärker an als bei 700 mA und sinkt bei den mit 1000 mA betriebenen LED-Packages ab. Das Verhalten nach 2000 h ändert sich grundlegend: Die Werte der Packages der beiden niedrigen Ströme bleiben fast konstant bis 14 000 h, wobei sich die Standardabweichungen sogar teilweise überlappen. Hier ist somit mathematisch keine Unterscheidung möglich. Eine stromabhängige Analyse ist in diesem Fall daher ungünstig. Im weiteren Verlauf trennen sich die Kurven, wobei der höhere Strom zu einer Reduktion des Strahlungsflusses führt, der niedrige jedoch am Ende der Alterung wieder fast seinen Anfangswert erreicht. Damit ist für die Bedingung von 55 °C und 700 mA ebenfalls keine sinnvolle Extrapolation auf Basis der gemessenen Datenpunkte möglich. Die Degradation bei 1000 mA weist abschnittsweise verschiedene Steigungen auf. Dies ist ein Hinweis auf mehrere Alterungsmechanismen, welche in den folgenden Abschnitten noch näher behandelt werden. Zwar führt ein höherer Strom zu einem stärkeren Rückgang des Strahlungsflusses, jedoch sind die Unterschiede in dieser Untersuchung erst nach einem langen Zeitraum von über 10 000 h zu erkennen. Daher kann – wie bereits für LED-Packages anderer Bauart gezeigt – davon ausgegangen werden, dass der Strom allein auch für Hochleistungs-LEDs nicht als Einflussparameter zur Alterungsberechnung geeignet ist.

Durch eine Analyse der Vorwärtsspannungsmessungen der LED-Packages bei verschiedenen Temperaturen und Betriebsströmen konnten die p-n-Übergangstemperaturen im LED-Chip bestimmt werden.

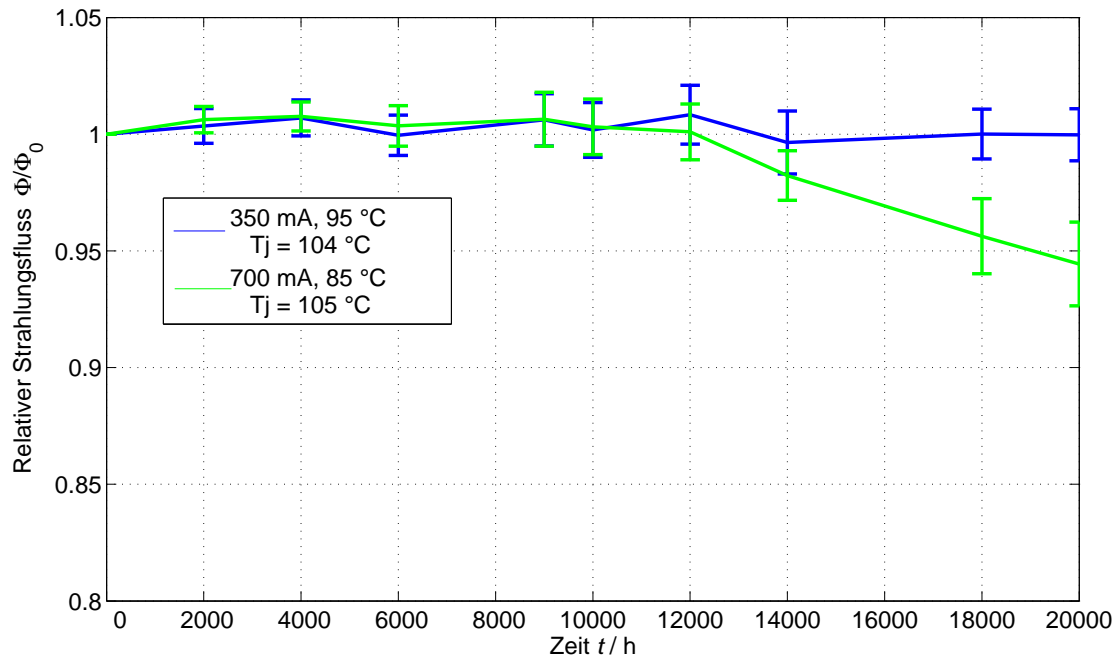


Abbildung 4.10.: Rückgang des Strahlungsflusses bei Temperatur von 85 °C und 95 °C und den Strömen 350 mA und 700 mA bei ähnlicher Chip-Temperatur (Typ A)

Der Strom verursacht generell eine Temperaturerhöhung im LED-Chip. Der Vergleich der beiden Kurven aus Abbildung 4.10 liefert dazu noch eine weitere Erkenntnis: Obwohl die Chip-Temperaturen fast gleich sind, degradieren die Packages ab 12 000 h bei 700 mA im Gegensatz zu den Messobjekten bei 350 mA.

Eine höhere Strombelastung führt bei verschiedenen Bauelementen wie dem Bonddraht, den Lötstellen und natürlich beim Chip selbst zu einer stärkeren Degradation. Inwiefern der Leuchtstoff und die Silikonverkapselung mit zur Lichtstromdegradation beitragen, sollte weiter untersucht werden.

4.3.2. Elektrische Änderungen

Neben den bisher betrachteten zeitlichen Verläufen des Strahlungsflusses, ergeben sich während der Alterung ebenfalls elektrische Änderungen. Vorwärtsspannungen wurden bei jedem Messintervall mit aufgenommen und können daher zeitlich untersucht werden. Elektrische Kennlinien sind erst am Ende des Alterungszeitraums erstellt worden.

Strom-Spannungs-Kennlinie

Neben der Aufnahme elektrischer Messwerte während der Alterung ist die Betrachtung von Strom-Spannungs-Kennlinien hilfreich, um Veränderungen des LED-Chips zu erkennen. Eine gemessene Kennlinie unterscheidet sich von der idealen Diodenkennlinie, welche durch die SHOCKLEY-Gleichung beschrieben wird. Die Abweichungen im Kurvenverlauf werden vor allem durch Serien- oder Parallelwiderstände erzeugt, die unterschiedliche Ursachen haben können [11]. Aufgrund des speziellen Diodenverhaltens liefert eine Analyse je nach Quadrant und Spannungsbereich verschiedene Rückschlüsse.

Oberhalb der Durchlassspannung ist der statische Widerstand direkt über den Quotienten aus Spannung und Strom bestimmbar. Ein Serienwiderstand erzeugt in der linearen Darstellung eine Gerade, deren Schnittpunkt mit der Spannungsachse bei der Durchlassspannung liegt. Je geringer die Steigung dieser Gerade, desto höher ist der zugehörige Serienwiderstand.

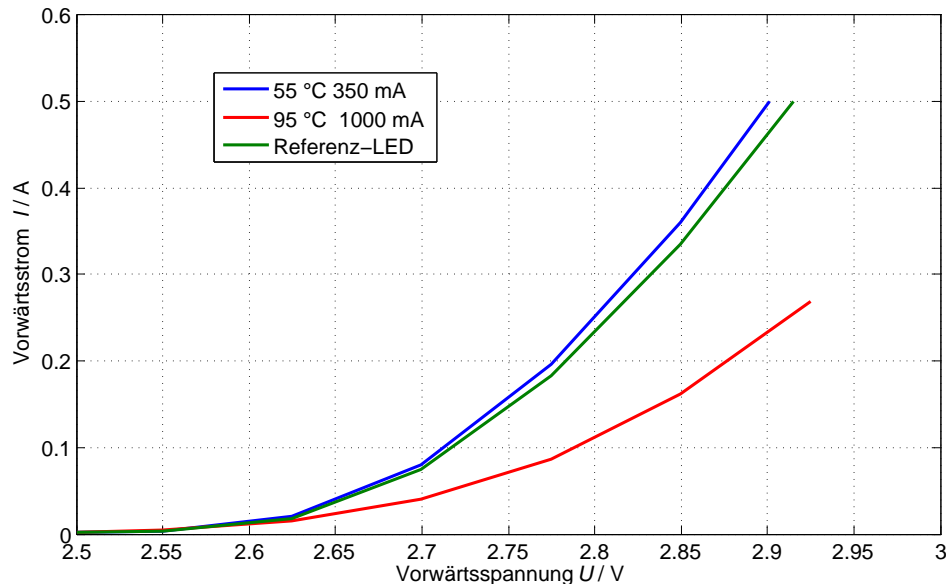


Abbildung 4.11.: Strom-Spannungskennlinien in linearer Darstellung, drei LED-Packages bei verschiedenen Bedingungen nach 20 000 h.

Dieser flachere Anstieg der Kennlinie wird in Abbildung 4.11 bei der roten Kurve deutlich. Dargestellt sind Kennlinien von einer nicht gealterten Referenz-LED und zwei gealterten LEDs. Bei der niedrigen Bedingung (blaue Kurve) ist noch kein Anstieg eines Serienwiderstands sichtbar. Der kleinere Wert im Vergleich zur Referenz-LED erklärt sich durch Unterschiede in der Produktion.

Im Rückwärtsbetrieb entsteht ein Rückwärtsstrom, der in die andere Richtung fließt und daher ein negatives Vorzeichen erhält. Für eine halblogarithmische Darstellung werden jedoch Absolutwerte der Ströme gezeigt (Abbildung 4.12).

Der Rückwärtsstrom unterscheidet sich bei allen drei LED-Packages. Die gealterten Messobjekte weisen um zwei Größenordnungen höhere Rückwärtsströme auf als die Referenz. Dies gibt einen Hinweis auf parallele Strompfade innerhalb des Halbleiters, die während der Alterung entstanden sind. Die härteren Alterungsbedingungen erzeugen dabei einen stärkeren Effekt. Der parallele Strompfad macht sich ebenfalls bei kleinen Spannungen sichtbar, da hier im Ersatzschaltbild der Widerstand der LED im Vergleich zum entstandenen parallelen Widerstand klein ist. Daher fließt somit der Hauptanteil des Stromes über den Pfad ab. Dieser Effekt ist wie im Rückwärtsbereich wiederum von der Alterungsbedingung des Messobjekts abhängig. Bei etwa 2,5 V kreuzen sich die Kennlinien und werden nun hauptsächlich durch den geringen Widerstand der LED und dem Serienwiderstand beeinflusst.

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

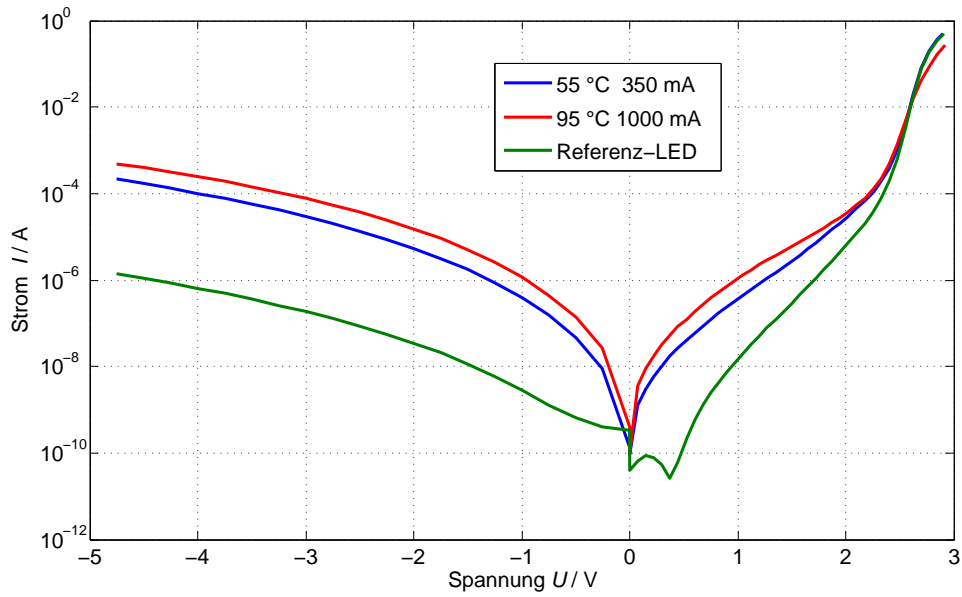


Abbildung 4.12.: Strom-Spannungskennlinien in halb-logarithmischer Darstellung, drei LED-Packages bei verschiedenen Bedingungen nach 20 000 h.

Bei normalen Betriebsbedingungen ist ein entstehender paralleler Strompfad somit nicht erkennbar, da er in diesem hohen Spannungsbereich nur sehr kleine Auswirkungen hat. Bei der Messung mit Konstantstrom überwiegt der Serienwiderstand, der die gemessene Spannung direkt beeinflusst.

Vorwärtsspannung

Die in der Pulsmessung bestimmte Vorwärtsspannung verändert sich je nach Alterungsbedingung in unterschiedlicher Weise.

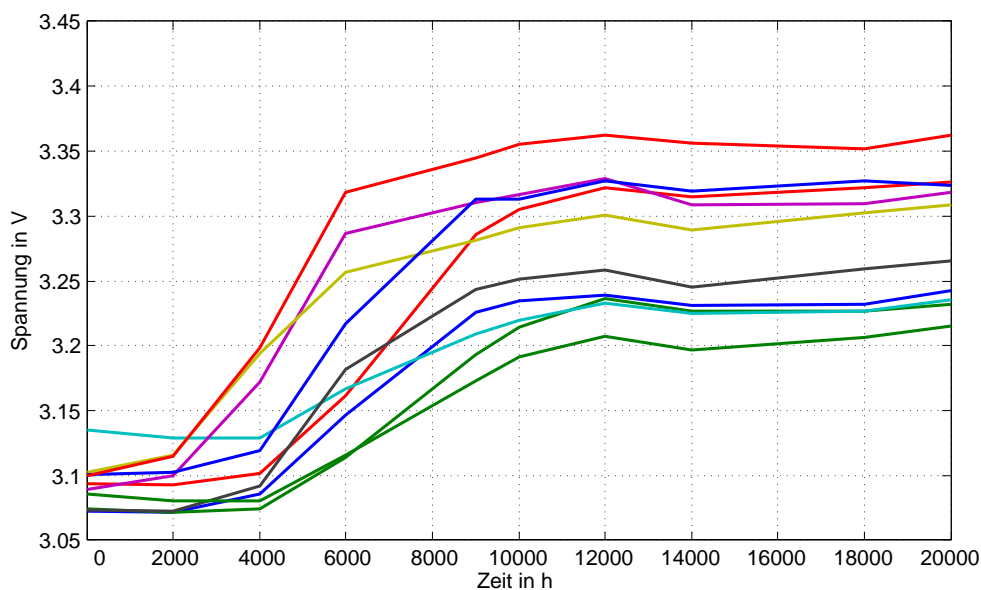


Abbildung 4.13.: Zeitliche Veränderung der Vorwärtsspannung von zehn LED-Packages im Zeitraum von 20 000 h bei 85 °C und 1000 mA (Typ A)

Für die Bedingung von 55 °C und 350 mA zeigen sich nur leichte Schwankungen der Vorwärtsspannung um 50 mV. Abbildung 4.13 zeigt die zeitlichen Verläufe der Vorwärtsspannungen von zehn LED-Packages bei 85 °C und 1000 mA.

Während der ersten 2000 h bleiben die meisten Packages in ihrer Spannung stabil, lediglich zwei steigen bereits stark an. Nach 4000 h erfolgt jedoch bei allen Messobjekten ein Anstieg, der sich erst nach 10 000 h sättigt. Im Vergleich dazu zeigt die folgende Abbildung 4.14 einen früheren Start des Spannungsshifts.

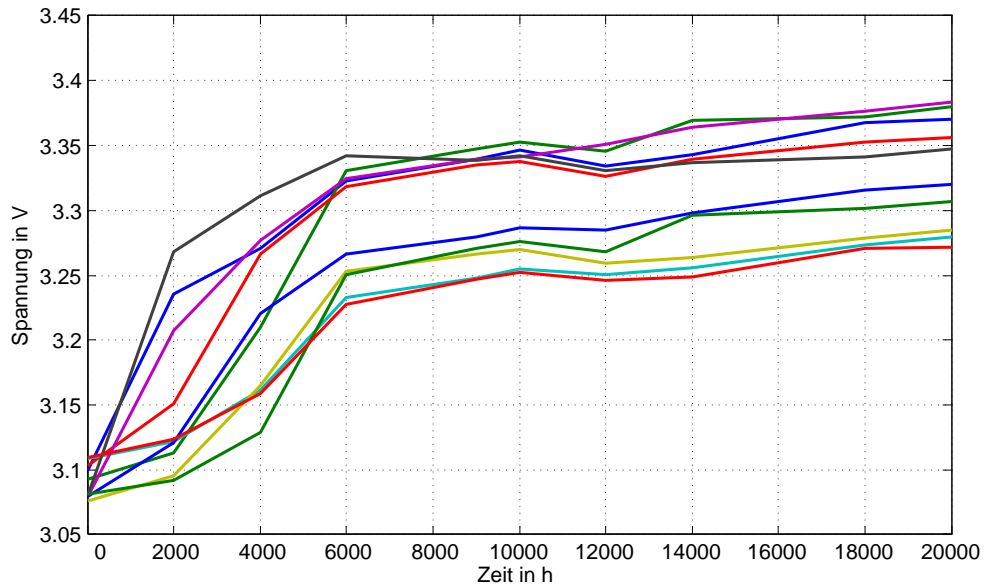


Abbildung 4.14.: Zeitliche Veränderung der Vorwärtsspannung von zehn LED-Packages im Zeitraum von 20 000 h bei 95 °C und 1000 mA (Typ A)

Da sich die Spannungen auch nach dem abrupten Anstieg weiter erhöhen, besteht die Möglichkeit von zwei verschiedenen Alterungsmechanismen, die sich überlagern. Gut zu erkennen ist eine Beschleunigung durch die höhere Temperatur, was sich in einer Verschiebung der Start- und Endpunkte der raschen Änderung äußert. Über diese zeitlichen Versätze können Beschleunigungsfaktoren berechnet werden und bei Kenntnis der Temperatur die Aktivierungsenergie des betrachteten Mechanismus ermittelt werden. Der Anstieg der Spannung folgt aus der Erhöhung des elektrischen Widerstands des LED-Chips. Eine mögliche Ursache dafür ist der Anstieg von parasitären, resistiven Komponenten der p-GaN-Gebiete [35]. Weiterführende Analysen und ein Vergleich mit den anderen Alterungsmechanismen finden sich in einer Veröffentlichung des Autors [49].

4.3.3. Farbverschiebungen

Das emittierte Spektrum der LED verändert sich mit der Zeit, was zu Farbverschiebungen führt.

Die Darstellung hier erfolgt mit $\Delta_{u',v'}$ als Farbabstand gemessen zur Farbkoordinate bei Alterungsbeginn. Erneut sind je nach Temperatur Unterschiede zu erkennen. Abbildung 4.15 und 4.16 zeigen den zeitlichen Verlauf der Farbverschiebungen.

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

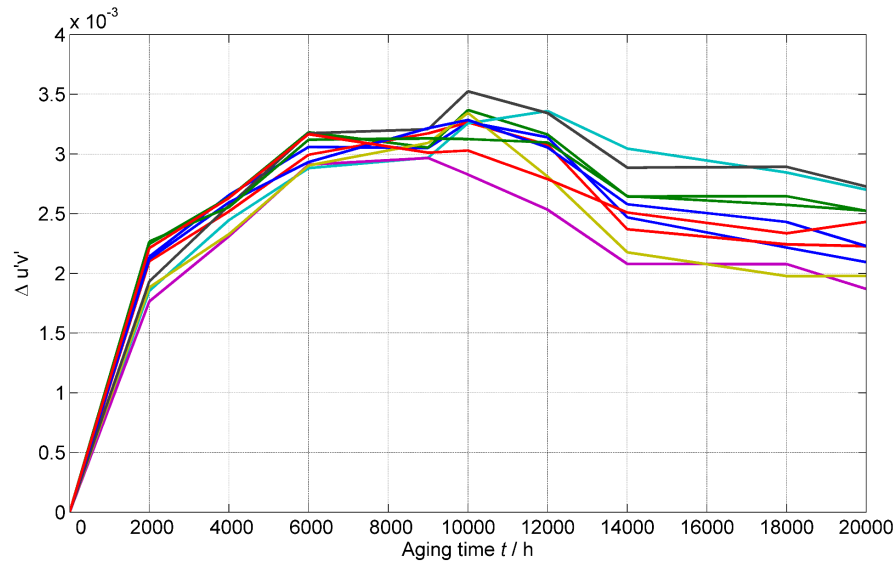


Abbildung 4.15.: Farbverschiebung von zehn LED-Packages im Zeitraum von 20 000 h bei 85°C und 1000 mA (Typ A)

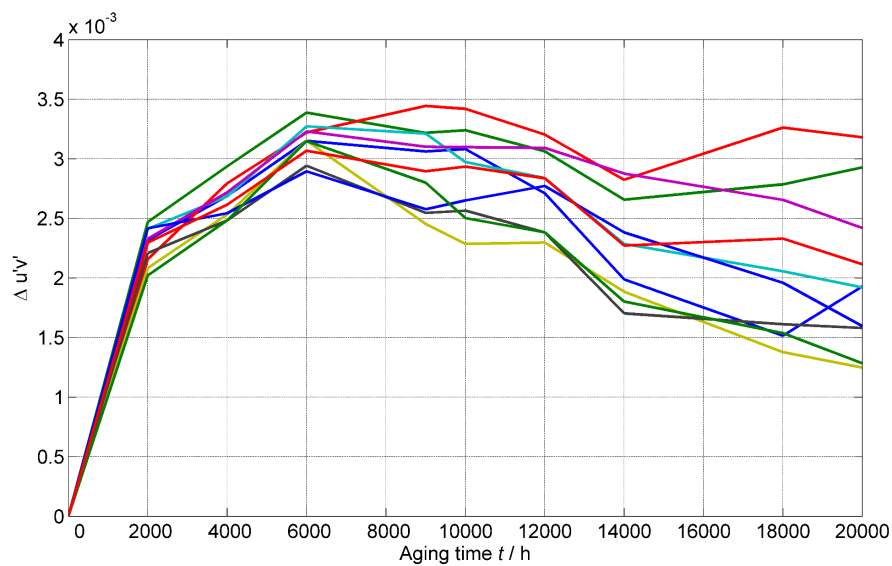


Abbildung 4.16.: Farbverschiebung von zehn LED-Packages im Zeitraum von 20 000 h bei 95°C und 1000 mA (Typ A)

Am deutlichsten fällt auf, dass nach dem sehr raschen Anstieg eine weitere Phase startet, bei der die Kurven auseinander laufen. Bei der höheren Temperatur ist dieser Zeitpunkt früher. Während den Alterungsmessungen stellte sich heraus, dass sich nach diesen Zeitpunkten Risse in der Silikonlinse bildeten. Dies erklärt auch die Divergenz der Farbverschiebungen, da die Risse geometrisch zufällige Formen annehmen.



Abbildung 4.17.: Rissbildung in der Silikonverkapselung nach 10 000 h bei einer Alterungsbedingung von 85 °C und 1000 mA (Typ A)

Die entstehenden Risse verlaufen quer durch die Verkapselung und stören daher die Lichtemission. Dies zieht den starken Rückgang des Strahlungsflusses nach sich, der ebenfalls nach 10 000 h startet (siehe Abbildung 4.8). Eine weitere Folge ist die Streuung der einzelnen Farbverschiebungen. Durch das Zusammenspiel von Chip und Leuchtstoffschicht werden in verschiedene Richtungen auch leicht unterschiedliche Spektren emittiert. Zur Seite hin ist der Weg durch den Leuchtstoff länger, was zu niedrigeren Farbtemperaturen führt. Entstehen nun Risse, so werden manche Richtungen mehr beeinflusst als andere. Daher muss es zu einer Farbverschiebung kommen, die aufgrund der zufälligen Rissgeometrie auch unsystematisch ausfällt. Insgesamt bewegt sich die Verschiebung mit einem Farbabstand von 0,003 jedoch im nicht störenden Bereich.

Thermographiemessungen ergeben, dass die Temperatur der Silikonoberfläche bei den vorliegenden Betriebsbedingungen 114 °C beträgt und somit fast 20 K höher als die T_C -Temperatur liegt. Ergebnisse von WATZKE zeigen, dass bei 270 °C bereits nach 10 h eine Schrumpfung von über 3 % zu beobachten ist. Außerdem geht ebenfalls eine Verhärtung des Silikons einher, was in Messungen bestätigt wurde [41]. Die Versprödung des Silikons entsteht durch eine zunehmende Vernetzung, wodurch die einzelnen Polymerketten unbeweglicher werden.

4.3.4. Thermische Änderungen

Die thermischen Änderungen während der Alterung stammen nicht nur von der erhöhten thermischen Leistung, die sich aufgrund des Effizienzverlusts der einzelnen LED-Packages ergibt. Der thermische Widerstand kann sich außerdem aufgrund von Materialveränderungen verschieben. Um dies zu ermitteln, wurden thermische Widerstände einzelner Packages zu unterschiedlichen Alterungszeiten gemessen. Das thermische Messsystem stand jedoch erst später nach dem Beginn der Alterung zur Verfügung. Damit sind Messdaten aus der ersten Phase der Alterung nicht vorhanden. Um einen Vergleich zum Beginn zu ermöglichen, dient die Messung einer Referenz-LED des gleichen Typs, welche nicht gealtert wird. Das Ergebnis für ein LED-Package wird in Abbildung 4.18 mittels Strukturfunktionen dargestellt.

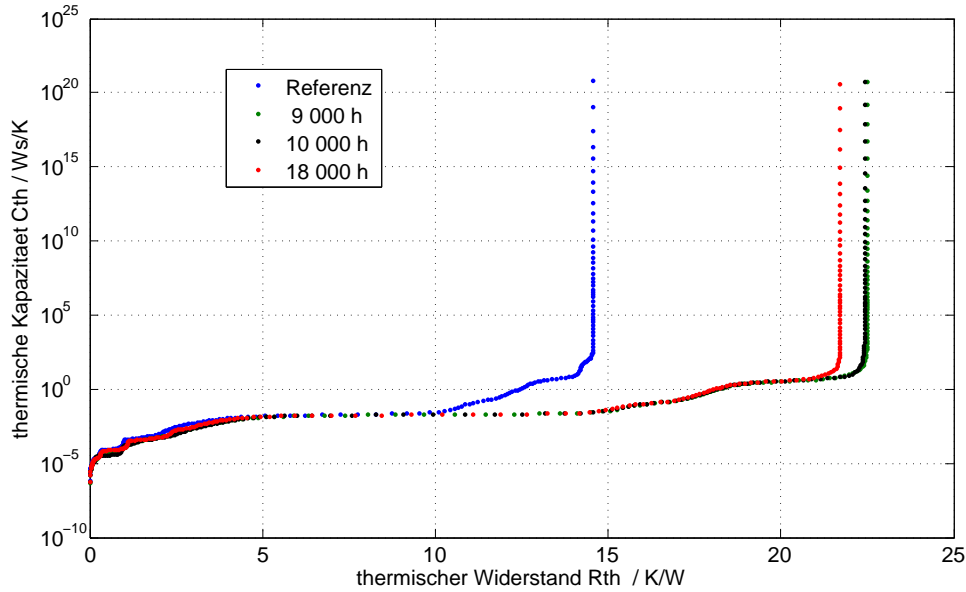


Abbildung 4.18.: Thermische Strukturfunktion nach verschiedenen Zeiten (Typ B), die Erhöhung des thermischen Widerstands läuft zeitlich in Sättigung

Deutlich ist zu erkennen, dass alle Kurven außer der Strukturfunktion der Referenz deckungsgleich sind. Der Anstieg muss also im Zeitraum vor 9000 h entstanden sein, danach stellt sich bei diesem LED-Typ keine Veränderung des thermischen Widerstands mehr ein. Die weitere Analyse der Strukturfunktion zeigt, dass mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit das Dielektrikum der Leiterplatte gealtert ist. Dabei ist der thermische Widerstand am Übergang des Dielektrikums zum Metall der Platine von 10 K/W auf 15 K/W erhöht. Der lange horizontale Ast entspricht dem Leiterplattendielektrikum. Eine tieferen Einblick in die Thematik der einzelnen Packagebestandteile und deren Zuordnung zur Strukturfunktion findet sich im Kapitel 7.

Die Ergebnisse einer anderen Untersuchung von Hochleistungs-LEDs zeigt, dass der thermische Widerstand in den ersten 100 h sinkt und anschließend zwischen 2000 h und 4000 h von 15 K/W auf 18 K/W ansteigt [50].

Thermische Leistung

Durch die Verringerung des Strahlungsflusses während der Alterung erhöht sich zwangsläufig die thermische Leistung des LED-Packages, wenn die zugeführte elektrische Leistung konstant gehalten wird. Die Zusammenhänge der einzelnen Leistungen und der Strahlungsausbeute η_e sind bereits in Abschnitt 2.4.1 dargestellt. Die zeitliche Veränderung der Strahlungsausbeute kann unter Voraussetzung einer konstanten elektrischen Leistung mit Kenntnis des Alterungsverhaltens folgendermaßen bestimmt werden.

$$\eta_e(t) = \frac{\Phi_e(t)}{P_{el}} = \frac{l_e(t) \cdot \Phi_{e,0}}{P_{el}} = l_e(t) \cdot \eta_{e,0} \quad (4.1)$$

Der zeitliche Verlauf der absoluten Strahlungsleistung $\Phi_e(t)$ wird über einen Faktor $l_e(t)$ und der anfänglichen Strahlungsleistung beschrieben.

Die thermische Leistung P_{th} zum Zeitpunkt t kann nun mit

$$P_{th}(t) = \frac{1 - \eta_e(t)}{1 - \eta_{e,0}} \cdot P_{th,0} \quad (4.2)$$

berechnet werden. Die thermische Leistung zu Beginn der Alterung wird dabei mit $P_{th,0}$, die Strahlungsausbeute mit $\eta_{e,0}$ bezeichnet.

Für Strahlungsausbeuten zwischen 20 % und 80 % wird die relative Erhöhung der thermischen Leistungen bei festen Werten des Strahlungsflusserhalts ermittelt und in folgendem Diagramm dargestellt.

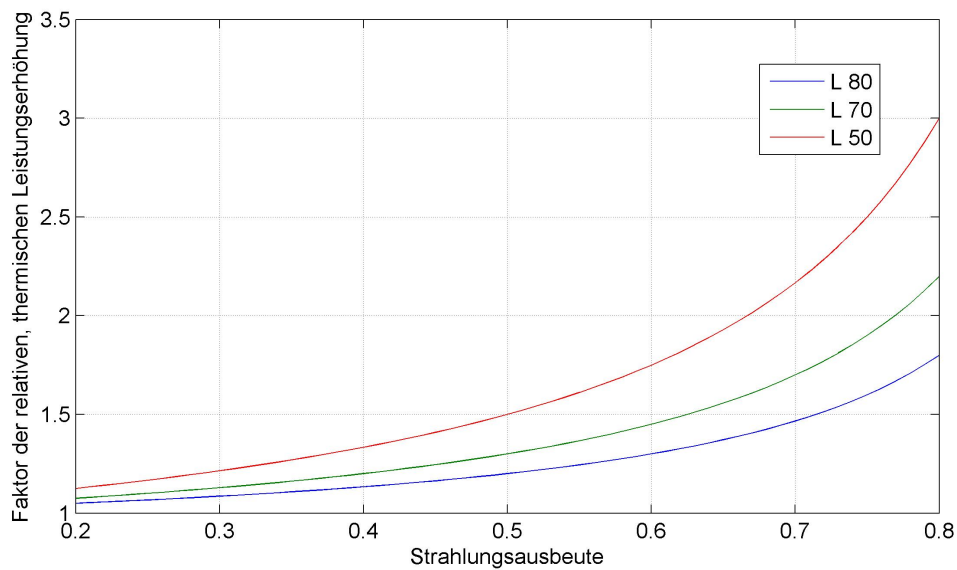


Abbildung 4.19.: Relative Erhöhung der thermischen Leistungen nach Erreichen der jeweiligen Lebensdauer (L_{50} , L_{70} , L_{80}) in Abhängigkeit der anfänglichen Strahlungsausbeuten

Die relative Erhöhung der thermischen Leistung ist bei effizienteren LED-Packages höher. Außerdem ist die Lebensdauerdefinition für die mögliche thermische Erhöhung von Bedeutung. Dazu sind drei Kurven eingezeichnet, die für einen Strahlungsflusserhalt von 80 %, 70 % und 50 % gelten. Es ist zwar außerhalb der Displaytechnologie nicht üblich, die Halbierung als Lebensdauer zu wählen, in der Praxis werden jedoch wahrscheinlich auch Produkte bis über ihre eigentliche Bestimmung betrieben. Bei einer anfänglichen Strahlungsausbeute von 0,5 bedeutet dies bereits eine 50-prozentige Erhöhung der thermischen Leistung nach der Halbierung des emittierten Strahlungsflusses.

Temperatur der Silikonverkapselung

Wie bereits erläutert gibt es mehrere zu betrachtende Temperaturen. Auf direkte Weise kann die Temperatur der Silikonverkapselung gemessen werden. Dazu nimmt eine Wärmebildkamera Bilder der Silikonoberfläche auf, während die gealterten LED-Packages auf die T_C -Temperatur geregelt und beim jeweiligen Vorwärtstrom betrieben werden. Da die Regelung eine Temperatur von 95 °C nicht mehr erreichen kann, wird in diesem Fall 85 °C angefahren. Auf die gemessenen Silikontemperaturen wird

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

daher 10 K aufaddiert. In Abbildung 4.20 werden für die drei Alterungsströme die Oberflächentemperaturen der Silikonverkapselung aufgezeigt.

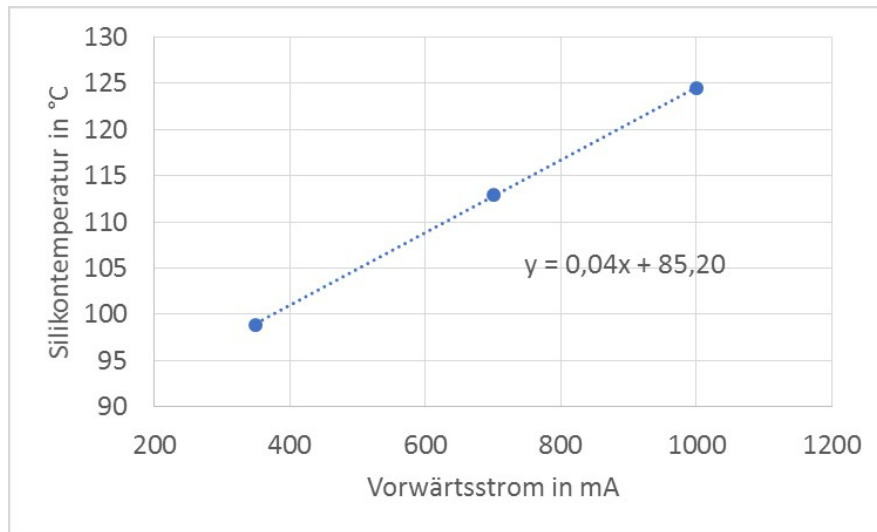


Abbildung 4.20.: Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Silikonverkapselung vom Vorwärtssstrom bei einer Regelungstemperatur von 95 °C

Die Oberflächentemperatur des Silikons T_S lässt sich vereinfacht als lineare Funktion vom Vorwärtssstrom I darstellen. Der Koeffizient k hat die Einheit K/mA, die Temperatur ohne Betrieb ($I = 0$ mA) wird als $T_{S,0}$ bezeichnet.

$$T_S = T_{S,0} + k \cdot I \quad (4.3)$$

Der Temperaturkoeffizient beträgt etwa 0,04 K/mA, mit einer Erhöhung des Stroms um 100 mA steigt die Temperatur der Silikonoberfläche um 4 K. Der Ordinatenachsenabschnitt liegt bei 85 °C, also 10 K unterhalb der Regelungstemperatur. Ohne Bestromung wurde jedoch nur ein Unterschied von 2 K festgestellt. Dies bedeutet, dass der Zusammenhang nur für LED-Packages im Betrieb eignet. Der Unterschied lässt sich damit erklären, dass durch die Bestromung zwei zusätzliche Wärmequellen vorhanden sind, der Chip selbst und der Leuchtstofflayer. Dies verändert die Wärmeströme im Package und macht einen direkten Vergleich unmöglich.

4.3.5. Lichtstrom und Strahlungsfluss

In der Methode des Standards TM-21 wird der Lichtstrom als Größe verwendet, um die zeitliche Degradation des Messobjekts zu extrapolieren [6]. Die Lebensdauer gilt als die Zeit, nach der beispielsweise 80 % des Anfangslichtstroms erreicht ist. Der Lichtstrom ergibt sich aus der Gewichtung der spektralen Verteilung mit der $V(\lambda)$ -Funktion. Aufgrund ihrer glockenförmigen Kurve mit Maximum im gelbgrünen Bereich werden spektrale Anteile im blauen und roten Bereich nur schwach bewertet. Somit wirken sich Änderungen dort weniger stark aus. Im Fall einer weißen, leuchtstoffkonvertierten LED trägt der blaue Peak gegenüber dem gelben Anteil des Leuchtstoffs weniger zum Lichtstrom bei. Für Degradationen ohne jegliche spektrale Änderungen ist der relative Verlauf von Lichtstrom und Strahlungsfluss identisch. Der Strahlungsfluss gewichtet jedoch nicht spektral und daher wird jede spektrale

Änderung gleich stark erfasst. Die Gegenüberstellung des zeitlichen Verhaltens von Lichtstrom und Strahlungsfluss zeigt eindeutig ein Auseinanderlaufen der beiden Kurven (4.21).

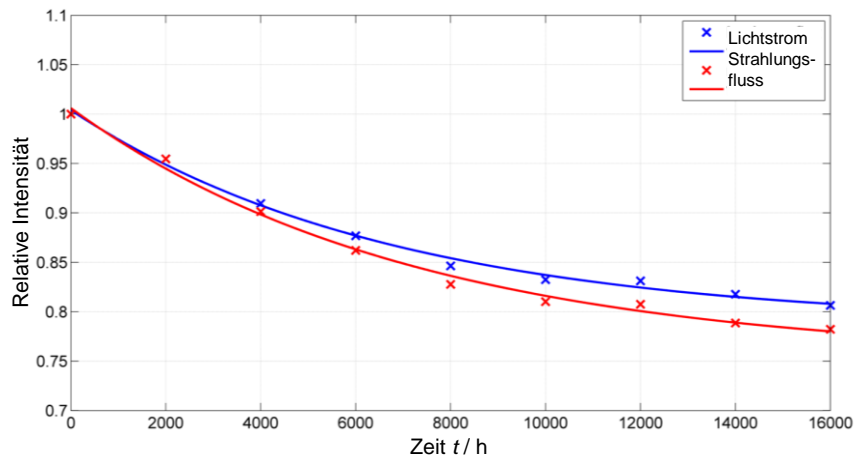


Abbildung 4.21.: Lichtstrom und Strahlungsfluss bei 100 mA und 95 °C (Typ B) nach [51]

Die Degradation des Messobjekts führt nicht nur zu einer Reduzierung des absoluten Spektrums, spektrale Abschnitten können auch unterschiedlich stark sinken. Daher liegt hier die Kurve des Lichtstroms aufgrund seiner Unterbewertung der spektralen Randbereiche oberhalb der Kurve des Strahlungsflusses. Für beide Kurven wurde eine mathematische Anpassung mit einer Exponentialfunktion angelegt, welche der Funktion der TM-21-Methode ähnelt.

4.3.6. Spektrum und Farbort

Die vorgestellten Alterungsergebnisse betrachten den Rückgang integraler Größen wie Lichtstrom und Strahlungsfluss. Eine umfassende Information über die Änderung der emittierten Strahlung sollte jedoch spektral erfolgen. Das Auftragen des relativen Spektrums über die Zeit erlaubt Schlüsse zum Verhalten der gelben und blauen Lichtanteile, die von unterschiedlichen Orten im LED-Package ausgesendet werden. Aus den spektralen Änderungen ergeben sich direkt eine Verschiebungen der Farborte, welche ebenfalls im folgenden untersucht werden.

Abbildung 4.22 zeigt die zeitliche Entwicklung des Spektrums einer weißen High-Power-LED, welches auf das Maximum des blauen Anteils normiert ist. Klar zu erkennen ist der relative Anstieg des Leuchtstoffanteils gegenüber der Strahlung des LED-Chips. Das Verhältnis gelb zu blau wird durch folgende Definition quantifiziert:

$$\frac{\text{gelb}}{\text{blau}} = \frac{\int_{480 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} s_e(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{480 \text{ nm}} s_e(\lambda) d\lambda} \quad (4.4)$$

Die Verhältnisse des gelben zum blauen Anteil des Spektrums werden für eine Alterungstemperatur (95 °C) und drei Ströme 350 mA, 700 mA und 1000 mA berechnet. Alle Verhältnisse steigen mit der Zeit

4. Alterung von Hochleistungs-LEDs

an, da der Leuchtstoff-konvertierte Anteil mit zunehmender Alterung zunimmt. Die Veränderung der Verhältnisse läuft jedoch desto schneller, je höher das LED-Package bestromt wird.

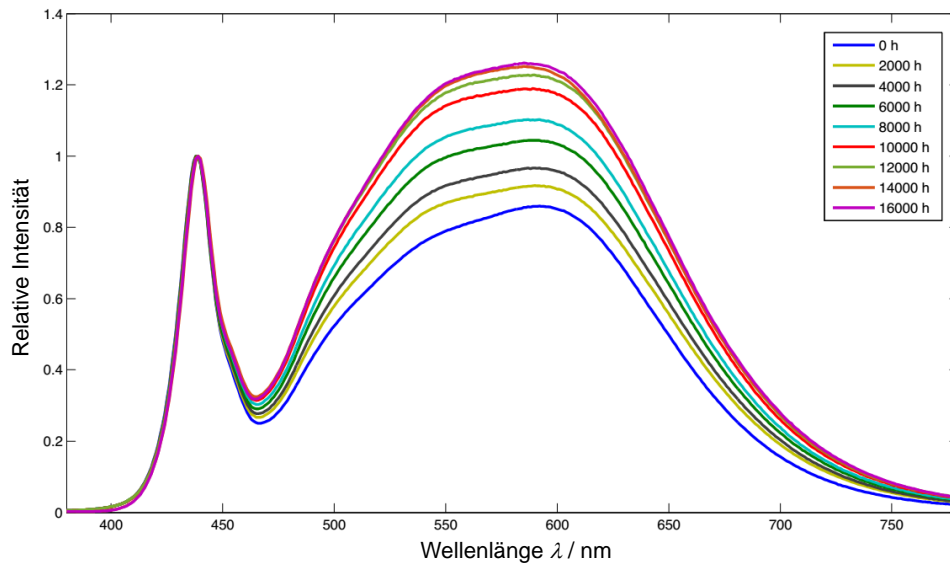


Abbildung 4.22.: Veränderung des relativen Spektrums bei Alterungsbedingungen von 95 °C und 1000 mA (Typ B), normiert auf die maximale Intensität der blauen LED nach [51]

Die Geraden in Abbildung 4.23 verbinden jeweils den ersten und letzten Datenpunkt und stellen somit eine mittlere Steigung des Anstiegs der Verhältnisse dar. Dieser Wert wird mit m bezeichnet ihre Einheit ist 1/kilostunde.

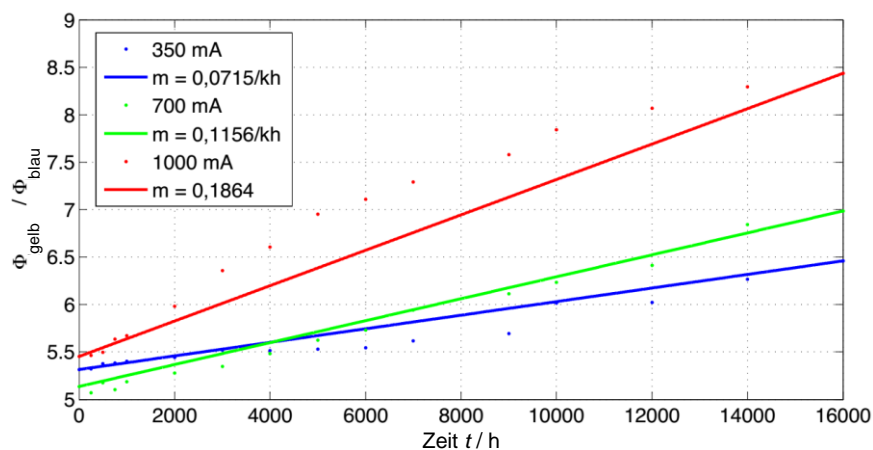


Abbildung 4.23.: Zeitlicher Verlauf des spektralen Verhältnisses blau zu gelb bei 95 °C und drei Strömen (Typ B) nach [51]

Da die spektrale Änderung aufgrund der Degradation des Leuchtstofflayers auftritt, ist die Kenntnis der Temperatur an diesem Ort des LED-Packages von großer Bedeutung. Eine höherer Vorwärtsstrom führt zu einem höheren Strahlungsfluss des blauen Chips, der im Leuchtstoff zum Teil in längerwellige Strahlung konvertiert wird. Dabei entsteht Wärme, so dass sich der Leuchtstofflayer aufheizt. Eine Messung

der Temperatur ist mit Hilfe der Thermographie schwierig, da die Silikonverkapselung einen hohen Absorptionsgrad im Bereich der ferninfraroten Strahlung aufweist. Messungen mit einer Wärmebildkamera führen somit immer nur zu einer Oberflächenmessung, ohne dass die Temperatur des Leuchtstofflayers direkt bestimmt werden kann. Messfühler eignen sich aufgrund der ausgesandten optischen Strahlung ebenso wenig. Daher wird hier ein Modell zur Abschätzung der Leuchtstofftemperatur T_x verwendet, welches neben der Gehäusetemperatur T_C einen Temperaturkoeffizienten k beinhaltet:

$$T_x = T_C + k \cdot I \quad (4.5)$$

Die für drei Vorwärtsströme und drei Koeffizienten berechneten Temperaturen werden in der nachfolgenden Tabelle 4.1 dargestellt. Die T_C -Temperatur beträgt hier 95 °C.

Tabelle 4.1.: Abschätzung der Leuchtstoff-Temperaturen für verschiedene Ströme und Koeffizienten

$k \backslash I$	350 mA	700 mA	1000 mA
0,04 K/mA	109 °C	123 °C	135 °C
0,06 K/mA	116 °C	137 °C	155 °C
0,08 K/mA	123 °C	151 °C	175 °C

Nun soll überprüft werden, ob sich die Geschwindigkeit der spektralen Änderung so beschleunigen lässt, dass sie auch für andere Ströme und Temperaturen berechenbar wird. Dazu werden drei ARRHENIUS-Graphen (Abbildung 4.24) für drei Ströme und die daraus resultierenden Leuchtstofftemperaturen erstellt.

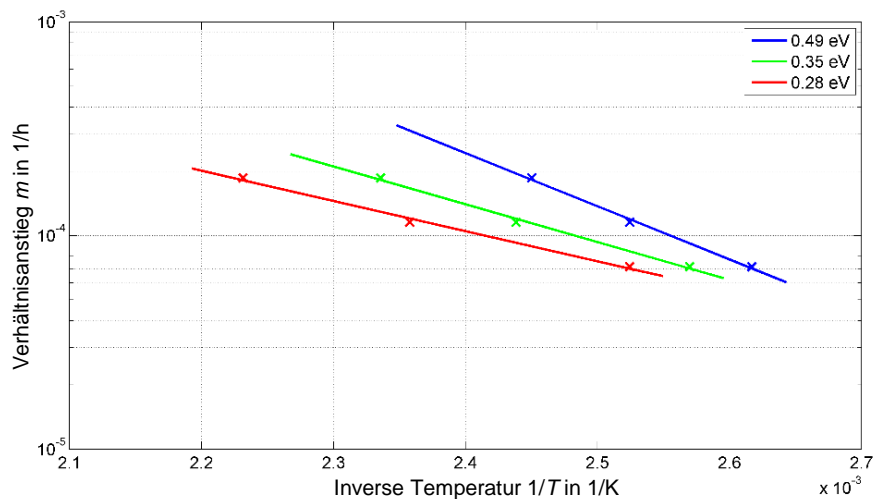


Abbildung 4.24.: ARRHENIUSgraphen bei 95 °C und drei Strömen (Typ B) nach [51]

Die logarithmische Ordinate repräsentiert die bereits berechnete Steigung der spektralen Verhältnisse. Die blauen Punkte stellen die für die drei Ströme niedrigsten Temperaturen dar, sie liegen weiter rechts, da auf der Abszisse die inverse Temperatur aufgetragen ist. Aus den Geradensteigungen werden die Aktivierungsenergien bestimmt. Je nach gewählten Koeffizienten k liegen sie zwischen 0,3 eV und

0,5 eV. Diese Streuung macht deutlich, wie wichtig die Kenntnis der genauen Temperatur für die Bestimmung der Aktivierungsenergie ist, mit deren Hilfe mögliche Alterungsmechanismen zugeordnet werden können. Eine Vermutung ist, dass die Silikonmatrix mit der Zeit versprödet, was zu Rissen führt und damit die Strahlungszentren des eingebetteten Leuchtstoffs geometrisch verschiebt. Beschleunigungstests von Silikonverkapselungen zeigen, dass die Dehnbarkeit des Silikons um den Faktor zehn erniedrigt wird, wenn es während 4000 h einer Temperatur von 225 °C ausgesetzt wurde [52].

Die spektrale Änderung ist physikalisch gut zu bewerten, jedoch nicht als Größe für die Beschreibung einer Farbverschiebung geeignet. Dazu wurden Koordinaten entwickelt, welche die Farbwahrnehmung des Menschen weitestgehend abbilden können. Die für eine Farbabweichung meist verwendeten Farbkordinaten werden mit u' und v' bezeichnet. Der euklidische Abstand zwischen zwei Koordinaten $\Delta_{u',v'}$ stellt eine Größe für den Farbabstand dar [19].

Für drei unterschiedliche Bedingungen wird die zeitliche Veränderung des Farbabstands dargestellt. Dabei wird jeweils der Abstand zu den Anfangskoordinaten bei Alterungsbeginn betrachtet. Abbildung 4.25 zeigt die gemessenen Farbabstände und dazu berechnete Anpassungsfunktionen.

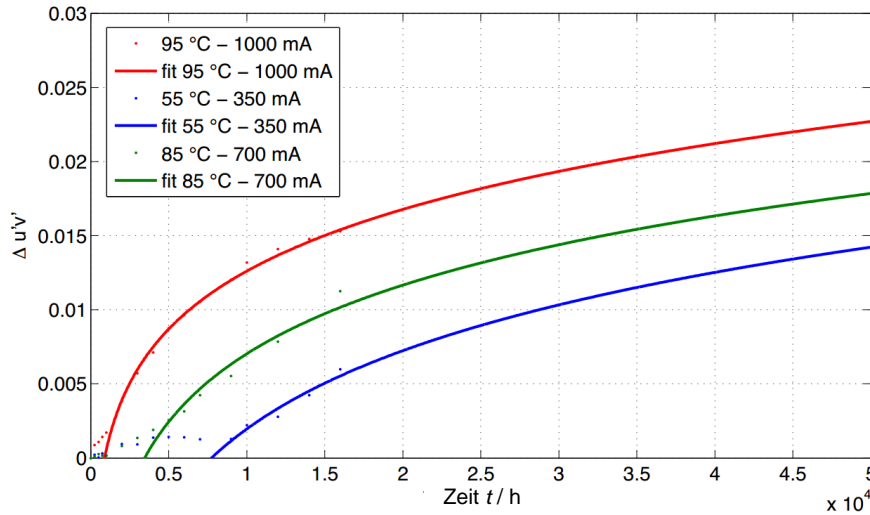


Abbildung 4.25.: Wurzelfunktionen bei 95 °C und drei Strömen (Typ B) nach [51]

Betrachtet werden drei unterschiedliche Ströme und Temperaturen: eine sanfte Bedingung bei 55 °C und 350 mA, eine mittlere Bedingung bei 85 °C und 700 mA und die härteste Bedingung bei 95 °C und 1000 mA. Die Funktionen können gut an die Daten jeder Bedingung angepasst werden. Der Farbdrift stagniert anfangs, bevor er dann kontinuierlich steigt. Dafür enthält die Anpassungsfunktion die Stufenfunktion $\theta(t - d)$, so dass der Startpunkt mit dem Parameter d variiert werden kann. Insgesamt handelt es sich um eine Wurzelfunktion vierten Grades.

$$\Delta_{u',v'}(t) = \theta(t - d) \cdot \sqrt[4]{a \cdot t} + c \quad (4.6)$$

Ein Vergleich der erreichten Lebensdauern für den Lichtstrom (L_{80}) und Farbdrift ($\Delta_{u',v'} = 0.0054$) führt zu einer eindeutigen Schlussfolgerung aus den Untersuchungen: Für einen Teil der Messobjekte wird die Lebensdauer durch den Farbdrift viel schneller erreicht, als durch die Abnahme des Lichtstroms. Farbkordinaten können auch aus einem relativen Spektrum bestimmt werden, was mittels mobilen

Spektrometern möglich ist. Daher könnte der Farbdrift auch ohne komplexe Labormesstechnik direkt an Produkten im Einsatz vor Ort gemessen werden.

4.3.7. Strahlungsausbeute

Die spektralen Messungen in der Kugel werden bei drei Strömen durchgeführt: 350 mA, 700 mA und 1000 mA. So können aus den drei erzeugten Spektren optische Parameter bezogen auf die elektrische Eingabe berechnet werden. Das Verhältnis des Strahlungsflusses zur elektrischen Leistung liefert die Strahlungsausbeute des LED-Packages.

Die abnehmende Effizienz bei höherem Strom wurde für Leuchtdioden mit GaInN/GaN Mehrfachquantentopf (MQW) untersucht. Ein Grund für das Absinken der Effizienz ist die höhere Fluchtwahrscheinlichkeit von Elektronen aus dem MQW [53]. Eine weitere Ursache ist eine verstärkte Erzeugung von Auger-Elektronen aufgrund der höheren Elektronendichte. Dabei rekombinieren Elektronen zwar mit Löchern, die Energie wird bei diesem Prozess jedoch an ein anderes Elektron im Leitungsband übertragen, so dass kein Photon emittiert wird [54].

Die Ergebnisse von zwei verschiedenen Hochleistungs-LEDs werden für drei Alterungszeiten (1000 h, 10 000 h und 20 000 h) gezeigt. Die Strahlungsausbeute des Packages wird während der Alterung reduziert, aber der allgemeine Trend der Kurven wird für jede einzelne LED nicht geändert (4.26). Die abnehmende Effizienz ist nicht zeitlich konstant, scheint aber bei langen Alterungszeiten niedriger zu werden. Für das andere LED-Package (Typ B, Abbildung 4.27) ist ein anderes Verhalten zu sehen. Die Kurve zeigt nach einer Alterungszeit von 20 000 h nicht den höchsten Wirkungsgrad für den niedrigsten Teststrom.

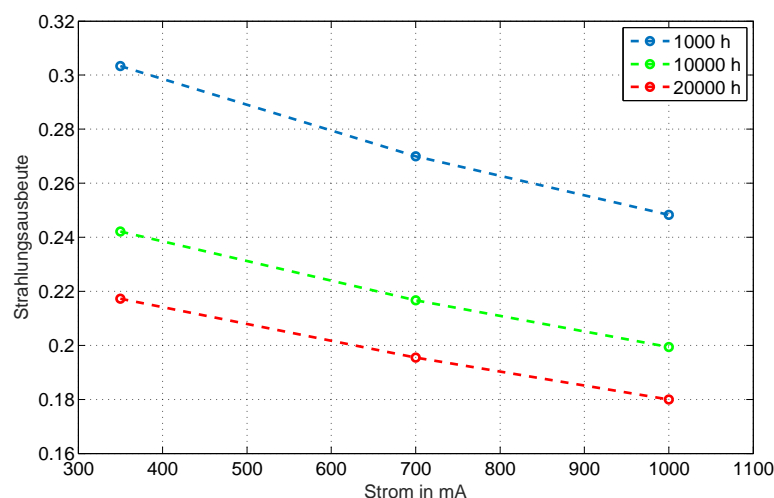


Abbildung 4.26.: Strahlungsausbeute bei verschiedenen Strömen und Alterungszeiten von zwei LED-Gehäusetypen (Typ A)

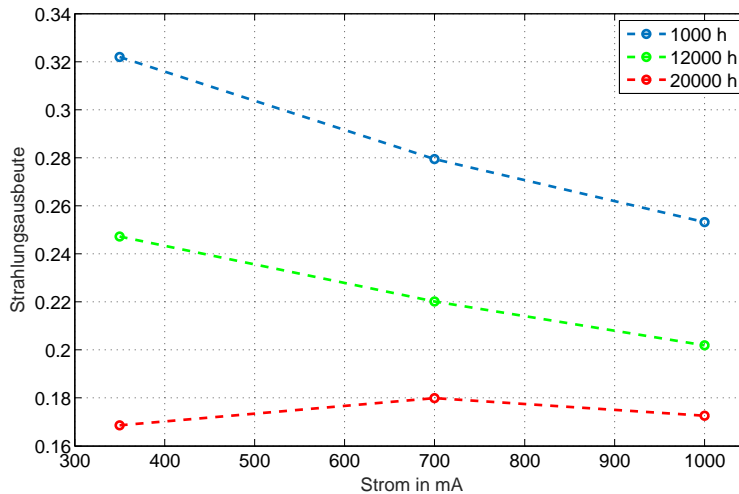


Abbildung 4.27.: Strahlungsausbeute bei verschiedenen Strömen und Alterungszeiten von zwei LED-Gehäusetypen (Typ B)

Bei 350 mA ist der Wirkungsgrad geringer, da ein Teil des Stroms durch einen Parallelpfad verläuft und somit nicht zur Strahlung beitragen kann. Bei höherer Spannung ist die Leitfähigkeit der Diode besser, so dass der Hauptteil des Stroms durch die Diode fließt, so dass die Effizienz wieder steigt.

4.4. Fazit des 4. Kapitels

Die Langzeituntersuchung von Hochleistungs-LEDs zeigt, dass die Alterung sowohl von der Temperatur, als auch vom Betriebsstrom abhängig ist. Wird alleine die Temperatur bei konstantem Vorwärtstrom verändert, dann liegen die Messkurven von 85 °C und 95 °C nahe zusammen und setzen sich von den 55 °C entsprechenden Daten ab. Bei konstanter Temperatur und verschiedenen Strömen verlaufen die Kurven deutlich stärker auseinander. Die Ursache hier liegt an den durch den Strom erhöhten Chip-Temperaturen, die auch berücksichtigt werden müssen. Ein Vergleich von Kurven gleicher Chip-Temperatur und verschiedenen Strömen zeigt, dass eine Erhöhung des Stroms alleine zu einer stärkeren Degradation führt. Die Frage *welche der beiden Größen Temperatur und Strom für die Analyse der Alterungsergebnisse besser geeignet ist*, lässt sich daraufhin beantworten, dass die Variation der Temperatur einfacher umzusetzen ist. Der Strom kann nur dann als einzig zu variierender Parameter betrachtet werden, wenn zugleich die Temperatur im LED-Package bekannt ist.

Die elektrischen, optischen und thermischen Verhalten des LED-Packages beeinflussen sich gegenseitig, laufen jedoch teilweise zeitlich nicht immer synchron. Ein Haupteffekt der Alterung ist die Entstehung von Rissen in der Silikonverkapselung. Diese führen sowohl zu einer Reduzierung des Strahlungsflusses, als auch zu einer geringen Änderung des emittierten Spektrums. Eine Delamination und Versprödung der auf den Chip aufgetragenen Leuchtstoffschicht ist ein weiterer Effekt, der bei der Alterung auftreten kann. Die Farbverschiebungen sind in diesem Fall jedoch wesentlich höher. Die zeitliche Erhöhung des Farbabstands $\Delta_{u',v'}$ lässt sich mit Wurfelfunktionen beschreiben. Mit einer Abschätzung der Leuchtstofftemperatur gelingt die Beschleunigung des Effekts mit der ARRHENIUS-Methode. Die Entstehung von parallelen Strompfaden und Serienwiderständen am LED-Chip lässt sich aus Strom-Spannungskennlinien gut ermitteln.

Entsprechend der Reduzierung der optischen Leistung steigt die im Chip erzeugte thermische Leistung an. Dies führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der Temperatur während der Alterung. Eine weitere Erkenntnis ist, dass der thermische Widerstand im Laufe der Zeit ansteigt. Dabei ist die Degradation dem Dielektrikum der Leiterplatte zuzuordnen, das LED-Package verändert seine internen thermischen Widerstände dagegen nur unmerklich. Aus den in diesem Kapitel durchgeführten Analysen lässt sich schlussfolgern, dass sich *mit Hilfe der durchgeführten Messungen bestimmte Alterungsmechanismen erkennen und einzelnen Bereichen im LED-Package zuordnen lassen.*

5. Alterung von COB-Modulen

Bei der Chip-on-Board-Technologie werden LED-Chips ohne Gehäuse direkt auf die Leiterplatte montiert. Bei der Verwendung eines einzelnen Chips entsteht somit eine COB-LED. Eine große Anzahl an Chips in Parallel- und Reihenschaltung auf einem Board wird als COB-Modul oder multi-COB bezeichnet. Bei weißen COB-Modulen befinden sich die einzelnen LEDs in einem gemeinsamen Leuchtstoffverguss.

COB-Module erzeugen auf kleiner Fläche einen hohen Lichtstrom. Sie bilden oft zusammen mit einem Reflektor eine Leuchte, welche das Licht gerichtet aussendet. Diese sogenannten Downlights finden beispielsweise Anwendung bei der Beleuchtung von Waren. In der Industrie werden sie unter anderem für die Außenbeleuchtung als Strahler eingesetzt. Hier ist in manchen Fällen auch ein Dauerbetrieb nötig, wodurch die Betriebsstunden bereits nach sechs Jahren über 50 000 h erreichen. Die elektrischen Leistungen liegen mit beispielsweise 160 W um ein Vielfaches höher als bei Hochleistungs-LEDs. Die dadurch erzeugte thermische Leistung muss zuverlässig abgeführt werden, um eine vorschnelle Alterung zu verhindern.

5.1. Teststand für COB-Alterung

Der Teststand für die Alterung von COB-Modulen verwendet zur Temperaturregulierung luftdurchströmte Kühlkörper. Diese befinden sich aufgrund der Wärmeentwicklung in einem Metallregal (Abbildung 5.1). Zur Spannungsversorgung der Lüfter in den Kühlkörpern werden Labornetzteile verwendet. Jedes einzelne COB-Modul wird während der Alterung permanent mit einem Treiber versorgt, der den für die Untersuchung definierten Konstantstrom liefert. Um konstante Umgebungsbedingungen unabhängig von Jahreszeit und Witterung zu schaffen, ist im Laborraum ein Kühlsystem installiert, das für eine konstante Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit sorgt.

Die hohe thermische Leistung der Module muss abgeführt werden, damit die Messobjekte ihre für die Alterung definierten Temperaturen erreichen. Dazu dienen Kühlkörper aus Aluminium, die auf ihrer Innenseite mit Lamellen ausgestattet sind. Ein Querschnitt des Kühlprofils ist auf Abbildung 5.2 rechts dargestellt. Mit Hilfe von elektrischen Lüftern wird die Luft der Umgebung angesaugt, sie strömt daraufhin durch das Profil entlang der Lamellen. Eine große Oberfläche für eine möglichst hohe Wärmeübertragung wird durch eine wellenförmige Strukturierung der Lamellen erreicht. Über die Drehzahl der Lüfter kann die Geschwindigkeit des Luftstroms und somit die mittels Konvektion abgeführte Wärmeleistung verändert werden.

5. Alterung von COB-Modulen

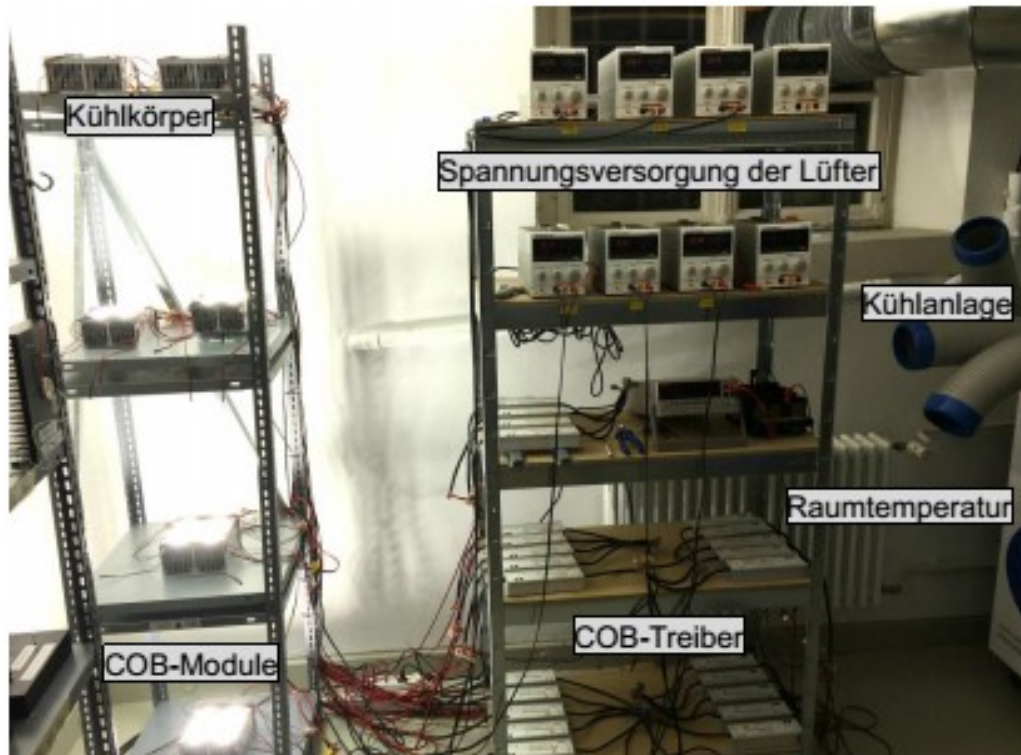


Abbildung 5.1.: Alterungsaufbau für COB-Module inklusive elektrischer Versorgung

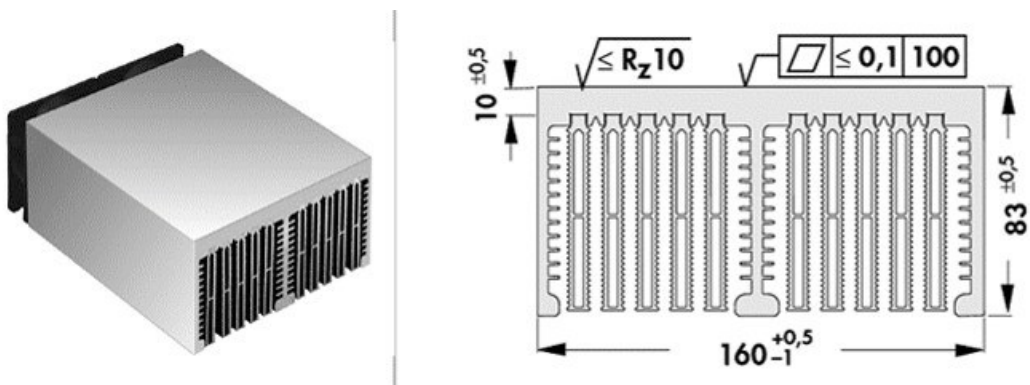


Abbildung 5.2.: Luftdurchströmter Lamellenkühlkörper für jeweils vier COB-Module

Jeweils vier COB-Module sind auf der Oberseite eines Kühlkörpers angebracht und werden während der Alterung mit dem gleichen, konstantem Strom betrieben. Die elektrische Versorgung erfolgt über Kupferleitungen, welche auf die elektrischen Kontakte der Module gelötet sind. Außerdem sind Temperatursensoren mit zweiadrigen Leitungen an den T_C -Punkten der Module angebracht. Zur Wärmeableitung dienen Wärmeleitfolien auf Basis verschiedener Materialien. Abbildung 5.3 zeigt Folien auf Kunststoffbasis. Aufgrund der unterschiedlichen Positionen ist davon auszugehen, dass sich die Temperatur der Module paarweise unterschiedlich einstellt. Jedes Modul ist eine Wärmequelle, deren Leistung hauptsächlich durch Wärmeleitung an den Kühlkörper abgegeben wird. Erreicht nun die einströmende Luft den Bereich der ersten beiden Module, so nimmt sie die thermische Leistung über Konvektion auf, woraufhin sie sich erwärmt. Somit muss die Temperatur der nächsten zwei Module höher sein, da die abgeführte Wärmeleistung proportional zur Temperaturdifferenz ist.

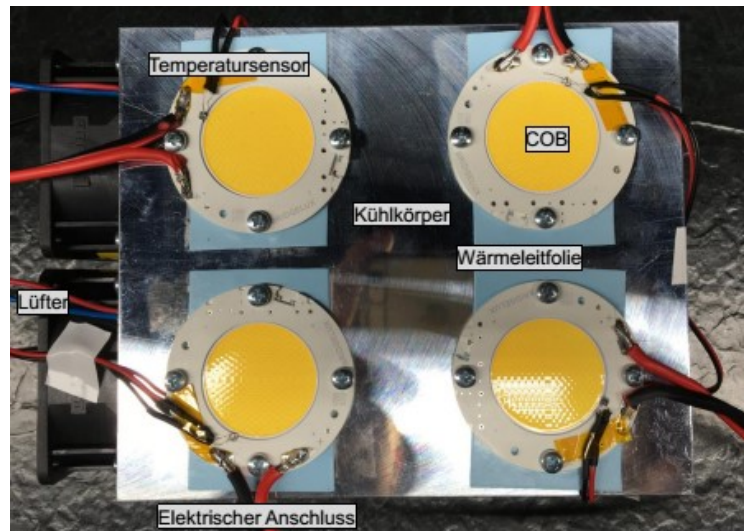


Abbildung 5.3.: Thermische und elektrische Anbindung der COB-Module auf dem Kühlkörper: Wärmeleitfolien liefern definierte Wärmewiderstände zwischen Modul und Kühlkörperoberfläche, Platinmesswiderstände (Pt100) am Temperaturreferenzpunkt

5.2. Messsystem für COB-Module

Der Strahlungsfluss der untersuchten COB-Module ist so hoch, dass er in der zur Messung von LED-Packages verwendeten ULBRICHT-Kugel mit einem Durchmesser von 30 cm zu einer Signalübersteuerung führt. Abbildung 5.4 zeigt eine Übersicht des Messaufbaus. Dabei wird eine Kugel mit einem Durchmesser von 100 cm mit angeschlossenem Photometer und Array-Spektrometer eingesetzt.

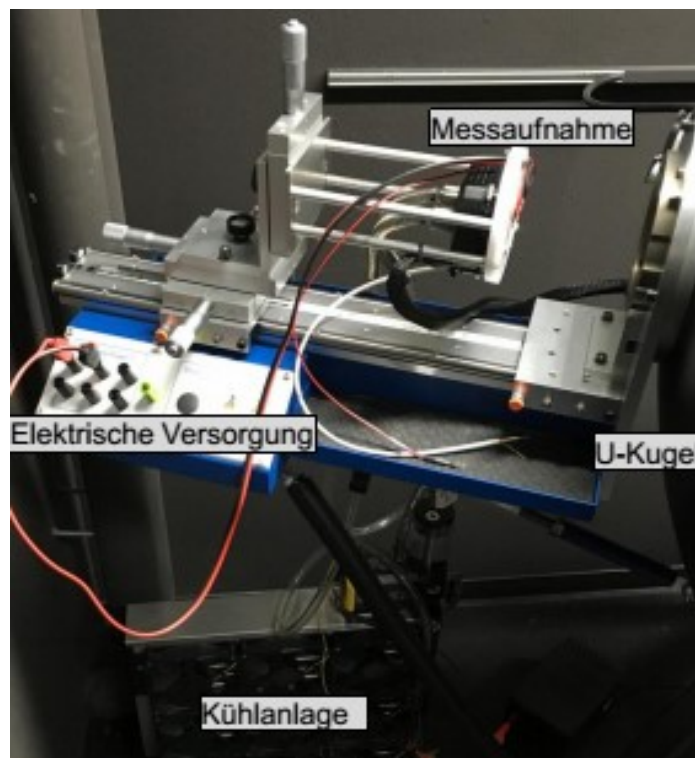


Abbildung 5.4.: Messaufbau an der Ulbrichtschen Kugel (1000 mm) für die Ermittlung des integralen und spektralen Strahlungsflusses von COB-Modulen

5. Alterung von COB-Modulen

Außerdem dient eine speziell entwickelte Messaufnahme zur Kühlung der COB-Module. Diese besteht aus einer Kupferplatte, welche direkt mit einem temperaturgeregelten PELTIER-Element wärmeleitend verbunden ist. Die Rückseite des Elements wird wassergekühlt, wodurch hohe Wärmeleistungen im Bereich von mehreren hundert Watt abtransportiert werden können. Die Pumpe des Wasserkreislaufs befindet sich in der Nähe des Kühlradiators und damit in ausreichender Entfernung zu den Temperatursensoren. Bei zu geringem Abstand können die Wechselfelder des Pumpenmotors Störspannungen in die Sensorkabel induzieren.

Mittels Linearführung und mechanischem Anschlag kann die Vorderseite der Messaufnahme mit einer Präzision im Millimeterbereich an die Innenseite der Kugeloberfläche platziert werden. Zur elektrischen Versorgung stehen mehrere Anschlüsse bereit, die für eine Vierleiter-Messung geeignet sind.

5.3. Ergebnisse der COB-Alterung

Die COB-Module wurden über einen Zeitraum von 6000 h gealtert, Messungen erfolgten jeweils nach 1000 h. Die Messergebnisse werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

5.3.1. Lichtstromdegradation

Für die COB-Module wird der Lichtstrom als Alterungsgröße gewählt. Dieser wurde von jeweils vier Modulen ermittelt und wird anschließend für verschiedene Alterungsbedingungen gezeigt. Abbildung 5.5 stellt die zeitliche Entwicklung des absoluten Lichtstroms aller vier Module bei einer Temperatur von 55 °C und einem Vorwärtsstrom von 3300 mA dar.

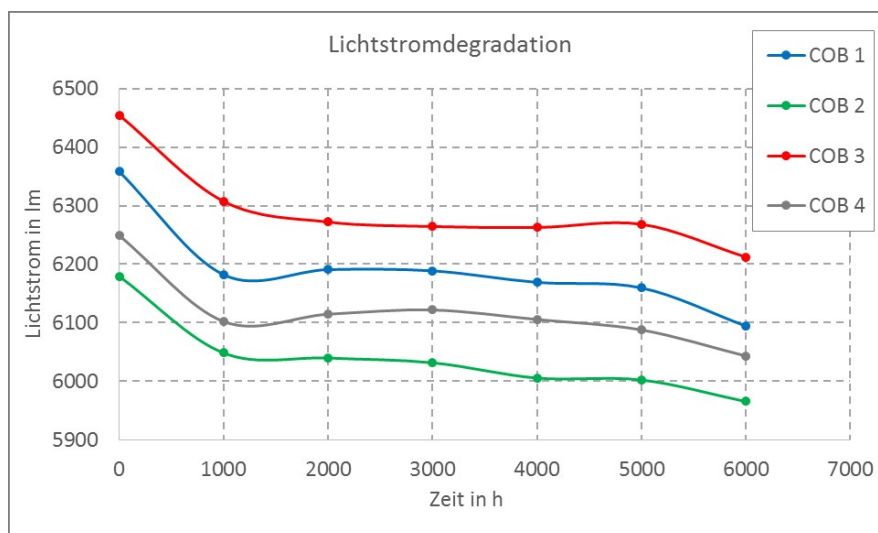


Abbildung 5.5.: Lichtstromrückgang von vier COB-Modulen bei 55 °C und 3300 mA

Auffällig ist die erste Abnahme des Lichtstroms innerhalb der ersten Tausend Stunden. Hier zeigt eine spektrale Untersuchung, dass sich lediglich die Emission des Leuchtstoffs reduziert. Danach laufen die Kurven bis 5000 h weitestgehend parallel und stabil. Ab diesem Zeitpunkt sinkt der Lichtstrom aller Module ab.

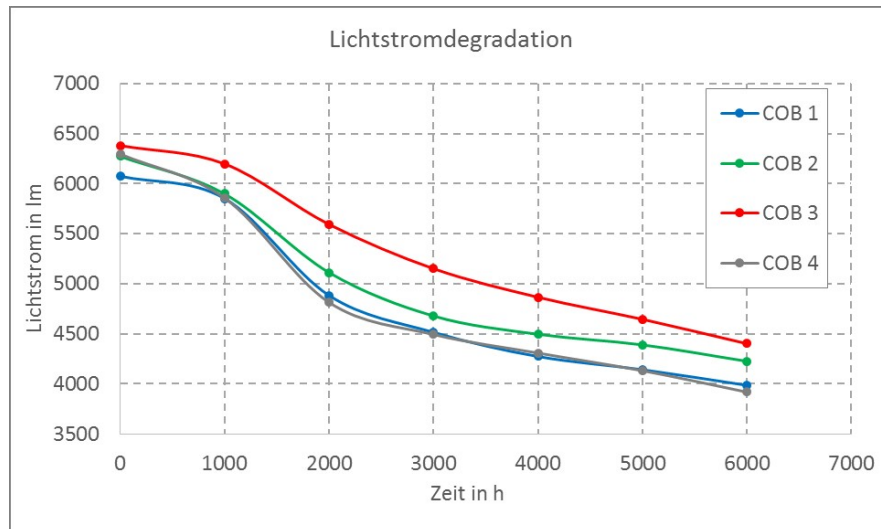


Abbildung 5.6.: Lichtstromrückgang von vier COB-Modulen bei 120 °C und 3300 mA

Das Alterungsverhalten bei gleichem Vorwärtsstrom, aber höherer Temperatur von 120 °C unterscheidet sich grundlegend. Nach leichtem Rückgang innerhalb der ersten tausend Stunden fällt der Lichtstrom bis 2000 h stark ab und nimmt danach bis zum Ende des Lebensdauertests kontinuierlich ab. Die Kurven sind nicht parallel, jedoch ähnlich im Verlauf.

Da sich alle Module von Anfang an in ihrem Lichtstrom unterscheiden, wird die Alterung relativ betrachtet. Hierbei stellt sich heraus, dass es bei den mittleren Temperaturen zu einer Gruppenbildung kommt, bei der sich jeweils zwei Module im Wert annähern.

Die mittleren Lichtstromabnahmen werden für alle vier Temperaturen in Abbildung 5.7 zusammen dargestellt. Die vertikalen Balken stellen die Standardabweichungen dar.

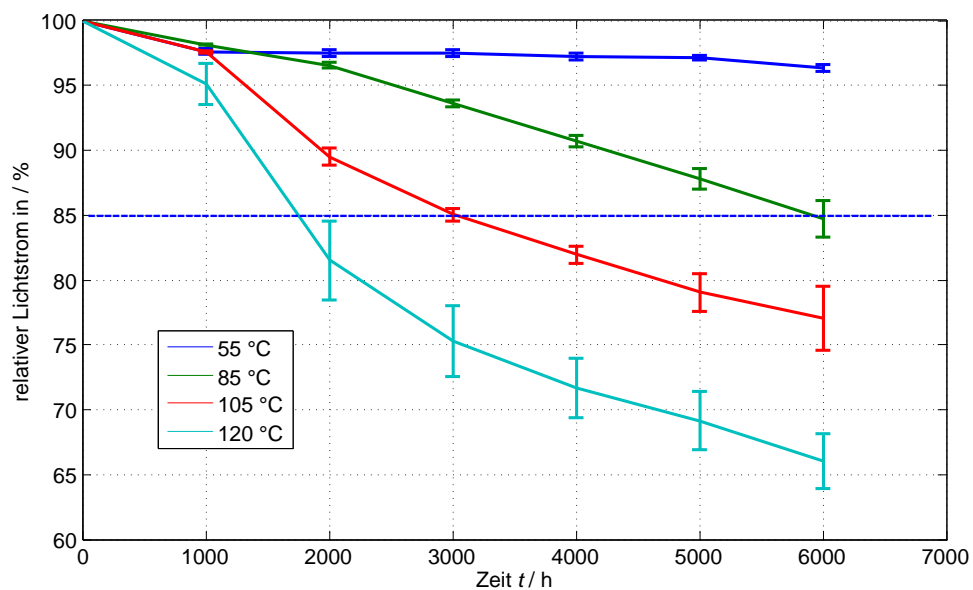


Abbildung 5.7.: Mittlere Lichtstromdegradation bei 3300 mA und vier Temperaturen

Die mittlere Lichtstromdegradation zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Kurvenverläufen. Bei 55 °C stabilisiert sich der Lichtstrom vorerst, während er bei 85 °C bereits kontinuierlich absinkt. Die

5. Alterung von COB-Modulen

Kurven der beiden hohen Temperaturen weisen zwischen 1000 h und 2000 h einen starken Lichtstromrückgang auf, der sich danach abschwächt. Die unterschiedlichen Steigungen der Verläufe sind ein Hinweis auf verschiedene Alterungsmechanismen, die durch Temperatur beschleunigt werden. Außerdem zeigt sich, dass die Auswirkungen einzelner Mechanismen zu unterschiedlichen Start- und Endzeitpunkten im Verlauf des Lichtstroms führen. Diese sind jedoch aufgrund der zeitlichen Auflösung nur grob bestimmbar.

Die Beschleunigung der Alterung durch die Temperatur soll im folgenden näher betrachtet werden. Für eine spätere Modellbildung ist es wichtig, dass der Zusammenhang auch mathematisch beschreibbar ist. Dazu wird die Arrhenius-Methodik angewendet und in einem Graphen (Abbildung 5.8) dargestellt. In diesem Fall werden keine Funktionen der einzelnen zeitlichen Verläufe bestimmt. Trotzdem kann getestet werden, ob sich die Daten nach dem Arrhenius-Gesetz verhalten.

Dazu werden für die drei höheren Temperaturen die Zeiten ermittelt, an denen der Lichtstromerhalt 85 % beträgt. Die Darstellung im ARRHENIUSgraphen zeigt eine an die Daten angepasste lineare Funktion, aus der sich eine Aktivierungsenergie von 0,42 eV ergibt. In einer Studie von BUFFALO über Mid-Power LEDs wird eine Aktivierungsenergie zwischen 0,38 eV und 0,6 eV ermittelt [55]. Die Degradationsmechanismen sind hier ähnlich wie bei den COB-Modulen.

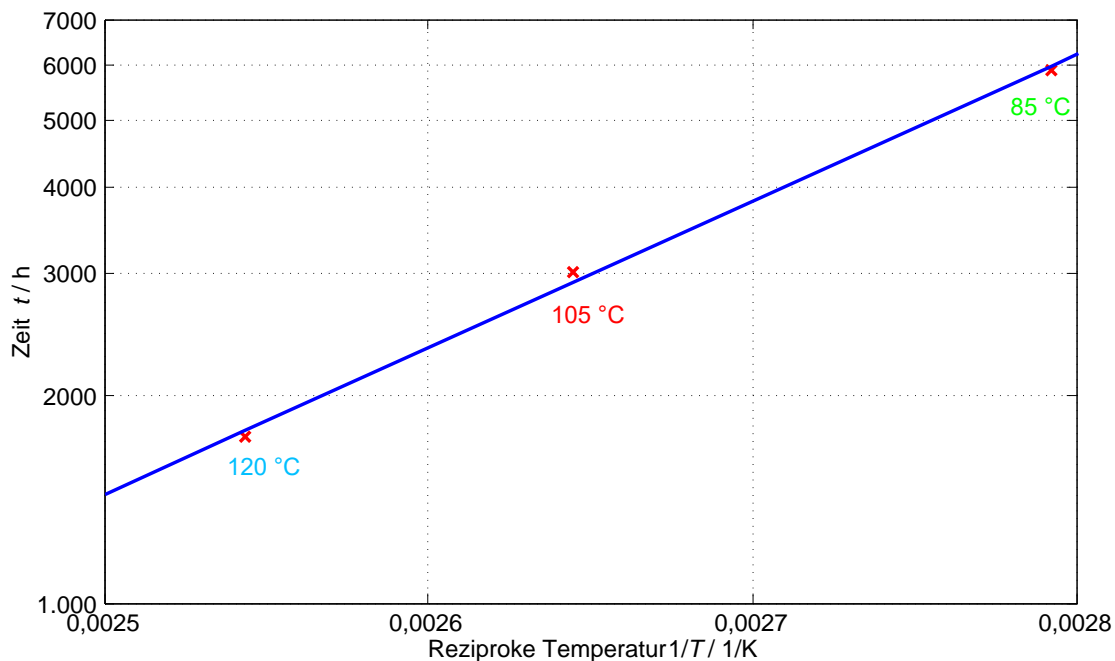


Abbildung 5.8.: ARRHENIUSgraph für die Lebensdauerzeiten (L_{85}) von COB-Modulen bei 3300 mA und Temperaturen von 85 °C, 105 °C und 120 °C

Der starke Lichtstromrückgang ist hauptsächlich einer Änderung im Spektrum zuzuordnen. Der durch den Leuchtstoff erzeugte Anteil sinkt mit der Zeit stark ab. Folgende Abbildung zeigt zwei Spektren zu unterschiedlichen Zeiten.

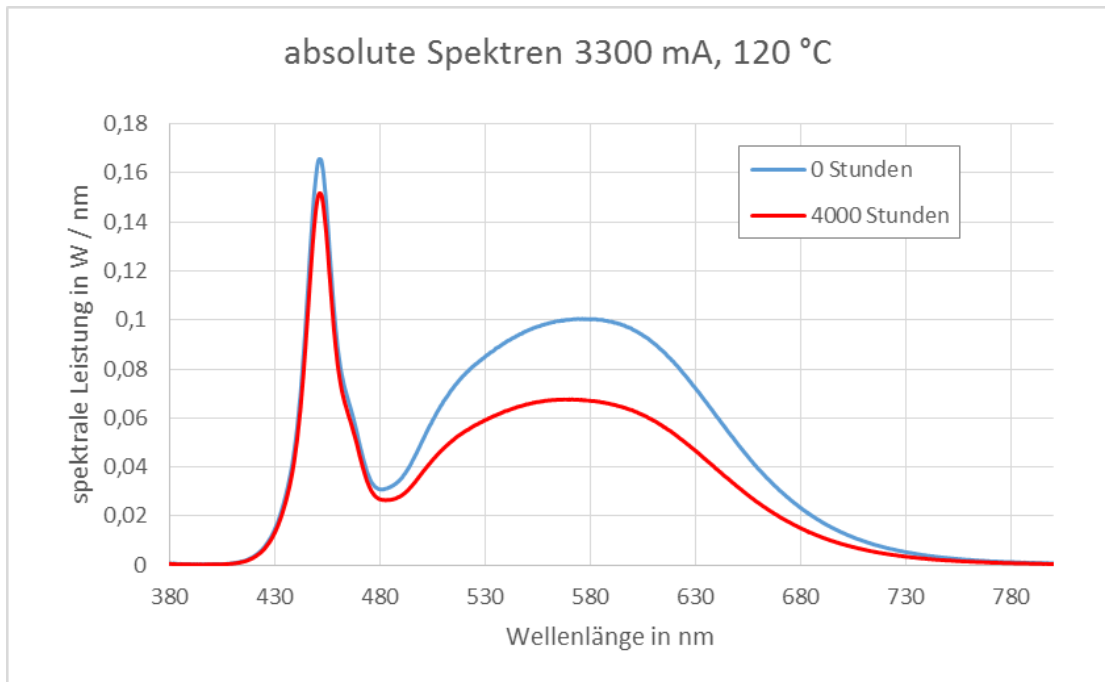
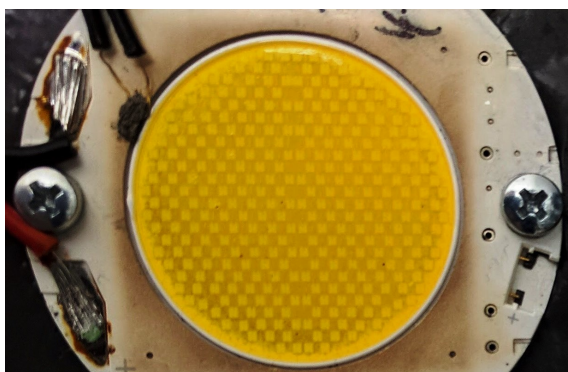


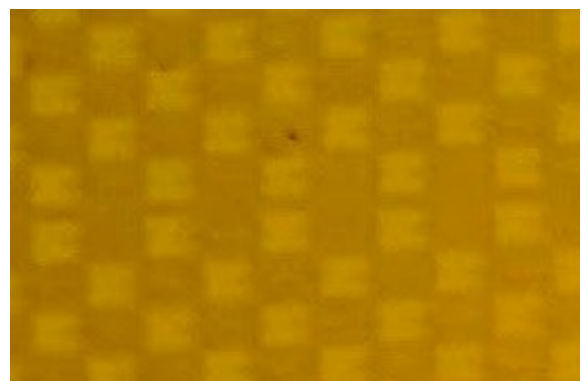
Abbildung 5.9.: Spektrum eines COB-Moduls zu Beginn der Alterung und nach 4000 h

Zwar sinkt ebenfalls der blaue Anteil des Chips, die Degradation der gelb emittierten Strahlung ist jedoch um ein Vielfaches höher.

Der Farbeindruck verschiebt sich ins Bläuliche. Der Grund der abnehmenden gelben Emission ist klar auf Photographien des COB-Moduls zu erkennen. Da der Leuchtstoff-Silikon-Verguss teilweise transparent ist, sind die Chips und deren Bonddrähte direkt sichtbar. Zu Beginn der Alterung heben sich die Chips etwas dunkler gegenüber den Zwischenräumen ab. Nach 3000 h bei 120 °C kehrt sich dieser Kontrast um: Die Umgebung der Chips ist nun deutlich dunkler.



COB-Modul mit deutlicher Verbräunung



Ausschnitt der Oberfläche mit einzelnen Chips

Abbildung 5.10.: Photographie der Oberfläche eines COB-Moduls nach 3000 h bei 120 °C und 3300 mA

Dies liegt an der Degradation des metallischen Spiegels, auf dem die einzelnen Chips angebracht sind. Dieser reflektiert das von oben erzeugte gelbe Licht im Laufe der Zeit schlechter, da eine Oxidationsschicht gebildet wird. Da der Spiegel im Verhältnis mehr gelbe als blaue Strahlung reflektiert, kommt es zur Farbverschiebung. Ähnliche Ergebnisse sind auch bei Mid-Power-LEDs zu beobachten, da hier der

5. Alterung von COB-Modulen

Reflektor auch optisch degradieren kann. Diese Zusammenhänge lassen sich in folgender Abbildung nachvollziehen.

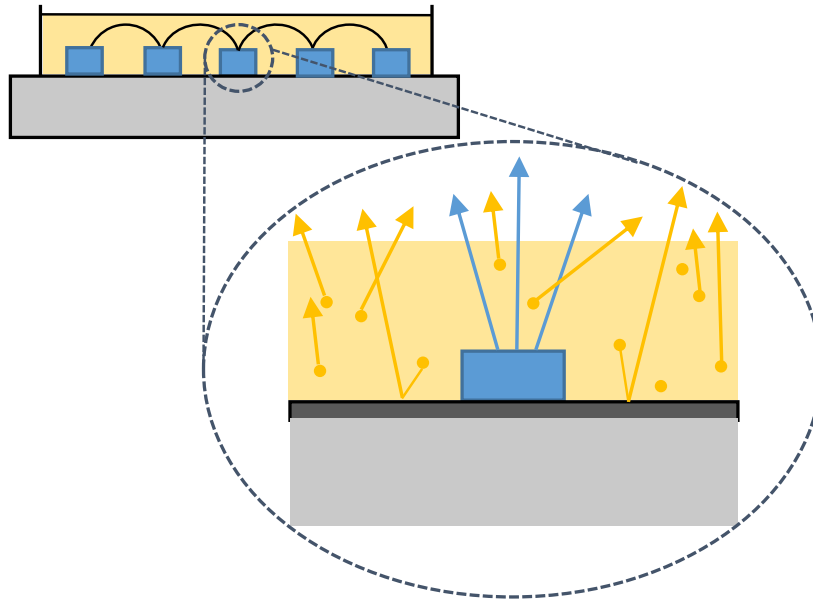


Abbildung 5.11.: Schnittzeichnung eines COB-Moduls. Die einzelnen LED-Chips werden elektrisch von oben angebunden. Der Chip sitzt direkt auf einem Spiegel, der überwiegend das vom Leuchtstoff emittierte Licht nach oben lenkt.

5.3.2. Elektrisches Verhalten

Das getestete COB-Modul hat mehrere parallele Stränge, in denen jeweils LED-Chips in Reihe geschaltet sind. Bei einem Strangausfall mit Ausbildung eines hohen Widerstands verteilt sich der konstante Vorwärtsstrom auf die reduzierte Stranganzahl und steigt dort für jeden einzelnen Chip an. Diese stärker betriebenen Chips emittieren daraufhin eine höhere Strahlungsleistung, was den Ausfall der anderen Chips sogar kompensiert. Dies führt bei diesen jedoch zu einer höheren Wärmeentwicklung, welche die Degradation weiter beschleunigt. Als Folge des Strangausfalls steigt die Vorwärtsspannung aufgrund des gesamt höheren Widerstands des COB-Moduls an.

5.3.3. Oberflächentemperatur des Silikonvergusses

Wie bereits für Hochleistungs-LEDs wird der Einfluss des Stroms auf die Temperatur der Silikonoberfläche auch für die untersuchten COB-Module bestimmt.

Für die Temperaturmessung des Silikonvergusses eignet sich die Thermographie. Dafür ist jedoch die Kenntnis des Emissionsgrads der Oberfläche für genaue Messergebnisse essenziell. Der Emissionsgrad der Silikonoberfläche wurde im Rahmen einer Studienarbeit auf 0,94 ermittelt [56].

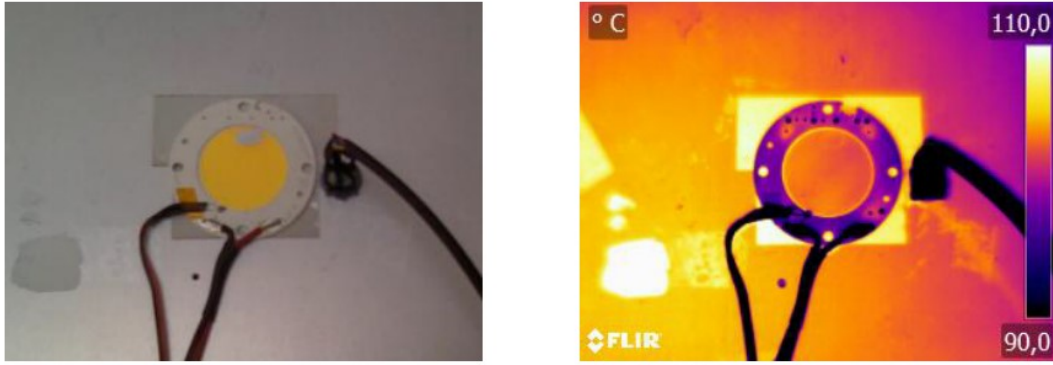


Abbildung 5.12.: Emissionsgradbestimmung der Silikonoberfläche bei einer Regelungstemperatur von 100 °C. Die weiße Korrekturflüssigkeit dient als Referenz.

Wie bereits für Hochleistungs-LEDs wird der Einfluss des Stroms auf die Silikonoberfläche auch für die untersuchten COB-Module bestimmt. Dazu wird ein COB-Modul bei verschiedenen Konstantströmen betrieben und die entsprechende Oberflächentemperatur ermittelt. Die Temperatur am Referenzpunkt wird dabei konstant gehalten.

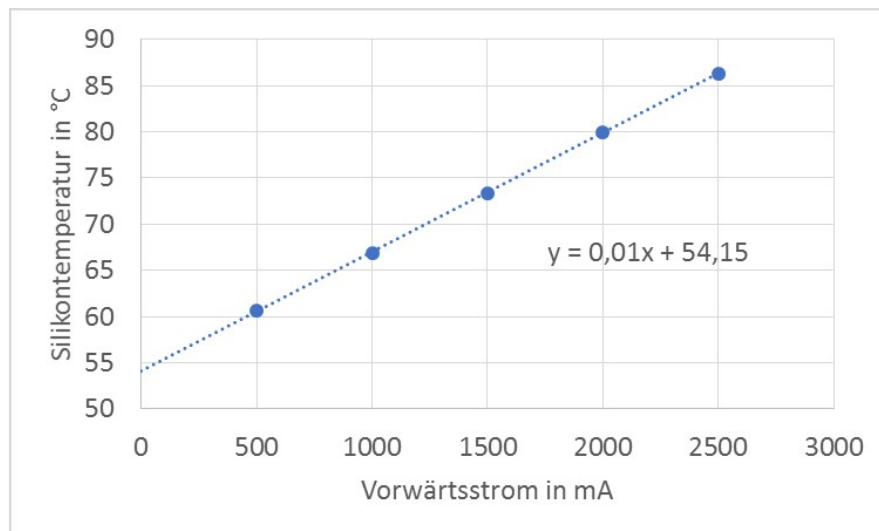


Abbildung 5.13.: Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Silikonoberfläche vom Vorwärtsstrom bei einer Regelungstemperatur von 55 °C

Die Oberflächentemperatur ohne Bestromung unterscheidet sich hier nur leicht von der Regelungstemperatur. Mit Hilfe folgender Formel können die Oberflächentemperaturen des Silikons berechnet werden.

$$T = 0,01286 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mA} \cdot I + 54,15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.1)$$

5.4. Umgebungsbedingungen der COB

Die COB-Module sind je nach Anwendungsfall verschiedenen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Dabei spielt die Lufttemperatur eine besondere Rolle. Die Alterung nach LM-80 setzt voraus, dass die Tem-

peratur am TC-Punkt nicht höher als 5 K zur Lufttemperatur in der Nähe des Messobjekts liegt [9]. Wird die COB auf einem von Luft durchströmten Kühlkörper aufgebracht, so ist die Oberflächentemperatur der Kühlfläche mindestens so hoch wie die Temperatur des Klimaschranks. Gute Werte für den thermischen Widerstand einer COB liegen unter 0,1 K/W. Die thermischen Interfacematerialien, mit denen das COB-Modul mit dem Kühlkörper verbunden wird, hat daher mehr Einfluss auf die Temperaturerhöhung. Es ist bei einer Wärmeleistung von beispielsweise 100 W nicht möglich, die Temperaturdifferenz von 5 K einzuhalten. Nur durch eine aktive Kühlung der Oberfläche unterhalb der Umgebungstemperatur kann dies gewährleistet werden. Um im Klimaschrank die Bildung eines Temperaturgradienten zu verhindern, wird die Luft im Schrank umgewälzt. Dies führt zu einer erzwungen Konvektion, die auf alle Oberflächen wirkt.

Im Alterungsstand der TU Darmstadt befinden sich die COB-Module auf luftdurchströmten Kühlaggregaten innerhalb eines auf 25 °C temperierten Raumes. Die unmittelbare Umgebungsluft ist somit deutlich kühler als in einem Klimaschrank. Das bedeutet, dass sich in diesem Fall der Wärmeaustausch des Messobjekts mit seiner Umgebung im Vergleich zum LM-80-Test unterscheidet.

5.4.1. Einfluss der Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur verändert die Wärmeströme der Messobjekte an die Umgebung, da sie für alle Wärmeübergangsprozesse eine Rolle spielt.

Eine COB wurde dazu bei einem Konstantstrom von 2000 mA betrieben und an Freiluft, sowie zusätzlich in einem Ofen verschiedenen Umgebungstemperaturen ausgesetzt. Die Vorwärtsspannung gibt dabei Hinweise auf die Chiptemperaturen.

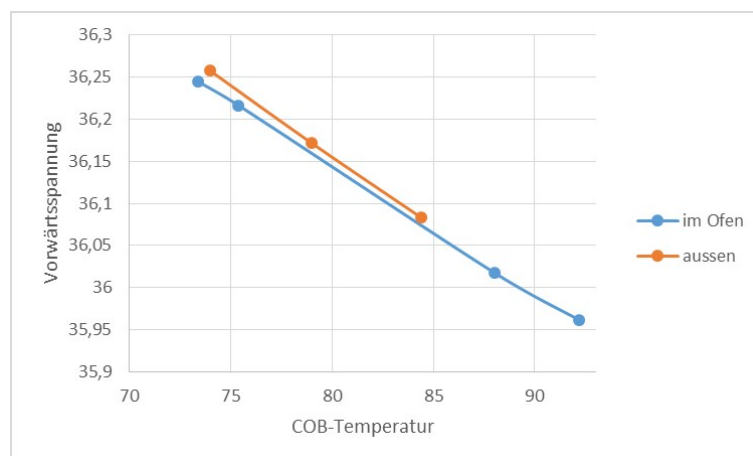


Abbildung 5.14.: Ermittlung der Vorwärtsspannung bei unterschiedlichen Temperaturen des COB-Moduls und verschiedenen Umgebungstemperaturen

Die Strahlungsleistung, die netto an die Umgebung abgegeben wird, kann mit Hilfe des STEFAN-BOLTZMANN-Gesetzes abgeschätzt werden. Für die Lichtaustrittsfläche der COB ergibt sich bei einer Oberflächentemperatur von 120 °C eine Wärmeleistung von 0,56 W, die in Form von Strahlung netto ausgesendet wird. Dies liegt im einstelligen Prozentbereich der gesamten thermischen Leistung, welche im Betrieb erzeugt wird. Der Einfluss der umgebenden Strahlung sollte sich somit nur gering auf die Temperaturen des COB-Packages auswirken.

5.4.2. Einfluss der thermischen Anbindung

Die thermische Anbindung hat möglicherweise Einfluss auf die Temperaturdifferenz zwischen T_C -Punkt und den Chips. Als Test wird die Vorwärtsspannung bei gleicher T_C -Temperatur, jedoch unterschiedlicher Anbindung gemessen. Zuerst wird eine Folie gewählt, welche aus dem Material Graphit besteht. Drei Temperaturen werden dafür mittels Ofen stabil angefahren und die Vorwärtsspannung jeweils gemessen. Mit der aus den drei Messpunkten bestimmten Geraden kann nun jede Temperatur berechnet werden. Zum Vergleich wird das COB-Modul blank auf der Aluminiumoberfläche des Kühlkörpers befestigt. Dies bedeutet, dass die Wärme über den direkten Metallkontakt mit eingeschlossenen Luftporen fließt, eine schlechtere Wärmeanbindung als mit Graphitfolie. Der Temperaturbereich wird daher ohne zusätzliche Wärmeleistung des Ofens erreicht. Der Vergleich der Spannungen bei gleicher Temperatur führt nun über die für das Modul durchgeführte Kalibrierung zu den Temperaturen der Chips.

Tabelle 5.1.: Vergleich der Vorwärtsspannungen eines COB-Moduls bei Konstantstrom von 2000 mA und unterschiedlichen thermischen Anbindungen

Anbindung	COB-Temperatur T_C	Vorwärtsspannung U_F
Graphitfolie	$70\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$	36,2555 V
ohne	$70\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$	36,2605 V

Der Unterschied der Vorwärtsspannungen beträgt 5 mV, was zu einem Temperaturunterschied von etwa 0,28 K führt, wenn als Kalibrierfaktor 18 mV/K angenommen wird. Dies liegt innerhalb der Messunsicherheit des Temperatursensors. Insgesamt ist die Temperaturdifferenz also so gering, dass es für einen Alterungstest keine Rolle spielt, welches Interface-Material für die thermische Anbindung der COB-Module verwendet wird. Der Wärmeausdehnungskoeffizient muss jedoch auch berücksichtigt werden. Bei dem hier verwendeten IAMS (Insulated Aluminum Materials System) ist er entscheidend besser angepasst als im Vergleich zu Metallkernplatinen (MCPCB) besser angepasst [57].

5.5. Fazit des 5. Kapitels

Die Alterung von COB-Module wurde während der Promotion später begonnen, so dass lediglich eine Testzeit von 6000 h ausgewertet werden konnte. Trotzdem zeigt sich eine starke Degradation, besonders weil bei der Planung darauf geachtet wurde, dass mindestens eine Temperatur über die Spezifikation hinaus gelegt wird. Mit einer Wahl von vier Temperaturen wird ebenfalls gewährleistet, dass die Überprüfung des *ARRHENIUS*-Verhaltens sicher durchzuführen ist.

Der zur Alterung am stärksten wirkende Fehlermechanismus ist die Verfärbung des Spiegels, auf den die einzelnen Chips aufgebracht sind. Die Folge ist eine stärkere Reduzierung des durch den Leuchtstoff emittierten Spektrums im Verhältnis zum blauen Strahlungsanteil des Chips. Somit setzt eine Verschiebung zu höherer Farbtemperatur ein, die bei höherer Temperatur schneller abläuft.

Das getestete COB-Modul besitzt mehrere parallele Stränge, in denen jeweils LED-Chips in Reihe geschaltet sind. Ein Strangausfall führt wie erläutert zu einer sehr geringen Reduzierung des emittierten

5. Alterung von COB-Modulen

Strahlungsflusses. Als Folge des Strangausfalls steigt jedoch die Vorwärtsspannung aufgrund des höheren Gesamtwiderstands an.

Über die genaue Kenntnis des Emissionsgrads kann die Oberflächentemperatur der Silikonoberfläche bestimmt werden. Es ergibt sich ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Vorwärtsstrom. Bei dem für die Alterung eingesetzten Strom liegt die Silikontemperatur etwa 40 K über der Sensortemperatur. Eine weitere Fragestellung war, ob sich bei anderen Umgebungstemperaturen die Differenz der internen Chip-Temperaturen zur Sensortemperatur ändert. Die Analyse zeigt, dass weder die thermische Anbindung des Moduls, noch die Umgebungstemperatur einen außerhalb der Messunsicherheit liegenden Einfluss auf diese Temperaturdifferenz haben. Lediglich ein veränderter Luftstrom über der Moduloberfläche senkt die Differenz etwas ab, da die Konvektion hier deutlich ansteigt.

6. Lebensdauerberechnung

Die Alterungsdaten des langen Zeitraums von 20 000 h lassen Rückschlüsse auf die Plausibilität von extrapolierten Daten zu. Abbildung 6.1 zeigt die Degradation des relativen, mittleren Strahlungsflusses für zehn Hochleistungs-LED-Packages bei 1000 mA und 95 °C.

6.1. Unterschiedliche Alterungszeiten

Die Alterungsdaten des langen Zeitraums von 20 000 h lassen Rückschlüsse auf die Plausibilität von extrapolierten Daten zu. Abbildung 6.1 zeigt die Degradation des relativen, mittleren Strahlungsflusses für zehn Hochleistungs-LED-Packages bei 1000 mA und 95 °C.

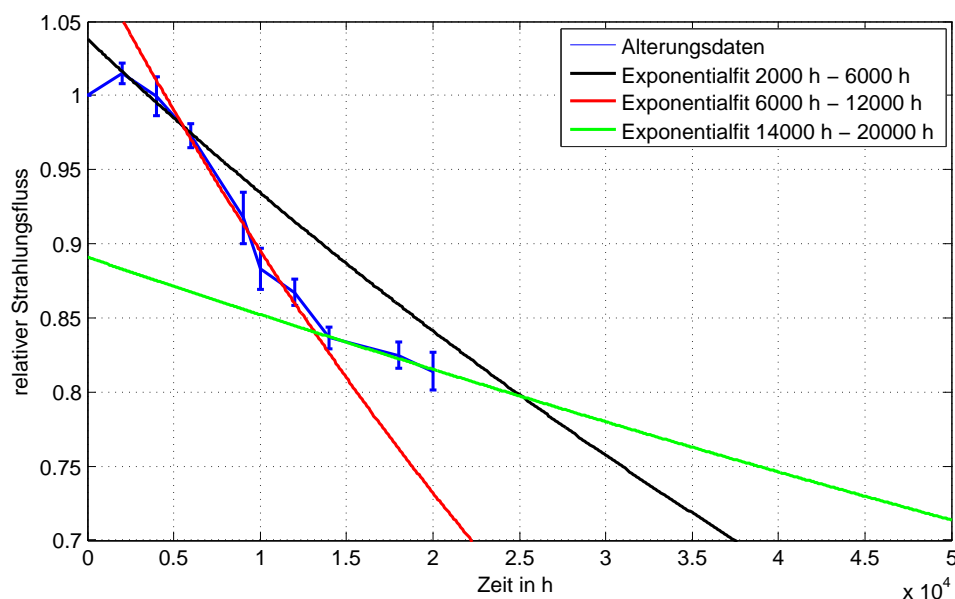


Abbildung 6.1.: Exponentielle Anpassungsfunktionen über verschiedene Zeiträume

Exponentielle Anpassungsfunktionen werden über verschiedene Zeiträumen ermittelt. Hierfür liegen ein früher, mittlerer und später Zeitraum zu Grunde. Es zeigt sich deutlich, dass die Extrapolationen verschiedene Lebensdauern ergeben. Beispielsweise liegen Werte für L_{80} bei 15 000 h als Ergebnis der mittleren und 25 000 h als Lebensdauer basierend auf den frühen und späten Daten. Die extrapolierte Degradation bis auf 70 % erstreckt sich über eine Zeitspanne von etwa 30 000 h. Die Lebensdauerberechnung hängt somit stark vom gewählten Zeitraum und der Dauer der Alterungsuntersuchung ab. Viele LM-80-Tests laufen lediglich über 6000 h, sogar für stärkere Alterungsbedingungen kann dies zu kurz sein, um zuverlässig extrapolieren zu können.

Diese Erkenntnis ist Bestandteil einer Berechnungsmethodik, die in einer Veröffentlichung über die Vorhersage des Lichtstromerhalts von LED-Packages mit eingeht [42]. Dazu werden nacheinander die Extrapolationsergebnisse für ansteigende Zeiträume analysiert. Der Zeitpunkt, ab dem diese Ergebnisse gegen einen festen Wert konvergieren, gilt als Mindestzeit für den Lebensdauertest. Diese Zeit gilt jedoch nur für einen Typ von LED-Package (High Power oder Mid Power LED) und unterscheidet sich ebenfalls je nach Hersteller.

6.2. Funktionen zur Extrapolation

Die Lebensdauerdaten zeigen unterschiedliche Verläufe, besonders wenn andere Packagetechnologien miteinander verglichen werden. Dankenswerterweise wurden uns Daten von einem Konsortium, das sich mit der Entwicklung von Standards zur Lebensdauerberechnung beschäftigt, zur Verfügung gestellt. Im folgenden soll untersucht werden, welche Funktionen am besten den Verlauf der Daten annähern können. Teile der hier vorgestellten Ergebnisse stammen aus einer Veröffentlichung des Autors, die sich mit der Methodik der Extrapolation befasst [58].

6.2.1. Exponentielle Funktionen

Die am häufigsten verwendete Funktion ist eine exponentielle Funktion mit zwei Parametern. Dabei stellt Φ_0 den Anfangslichtstrom und α einen Koeffizienten dar, welcher allein für die Krümmung der Funktion verantwortlich ist.

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \quad (6.1)$$

Gleichung 6.1 ist eine von neun vorgeschlagenen Modellfunktionen, welche im Anhang des Standards TM-21 [6] zu finden sind. Sie beschreibt einen abklingenden Prozess ähnlich wie beim radioaktiven Zerfall. Frühe Untersuchungen von LEDs zeigen, dass die Funktion das Alterungsverhalten gut beschreibt [33]. Da sich jedoch die Produkte verbessert haben und zusätzlich auch bei niedrigen Bedingungen getestet wird, sind in einigen Fällen die Koeffizienten so klein, dass sich die an die Daten angepasste exponentielle Funktion nicht wesentlich von einer Gerade unterscheidet. Abbildung 6.2 zeigt Alterungsdaten über 12 000 h für eine Temperatur von 55 °C. Die Norm besagt, dass die Anpassung der Exponentialfunktion an die letzte Hälfte der Daten erfolgen soll.

Im Bereich bis 20 000 h liegen die beiden Funktionen noch sehr dicht aneinander. Eine weitere Bedingung in der Norm besagt, dass extrapolierte Daten nur bis zu dem Sechsfachen des Testzeitraums für eine Vorhersage verwendet werden dürfen. In diesem Fall kann höchstens eine Lebensdauer von 72 000 h angegeben werden. Der Unterschied beider Funktionswerte beträgt dort lediglich 0,7 %. Die Datenpunkte der ersten 2000 h liegen weit oberhalb der Alterungsfunktion. Dies ist wahrscheinlich einem schnellen Alterungsmechanismus zuzuschreiben, der besonders zu Beginn der Alterung den Rückgang des Lichtstroms bewirkt. Der Mindestzeitraum für einen LM-80-Test beträgt 6000 h. Eine an die ersten Datenpunkte angepasste Funktion fällt deutlich steiler ab, als die in Abbildung 6.2 dargestellten Funktionen. Somit würde damit eine niedrigere Lebensdauer extrapoliert werden.

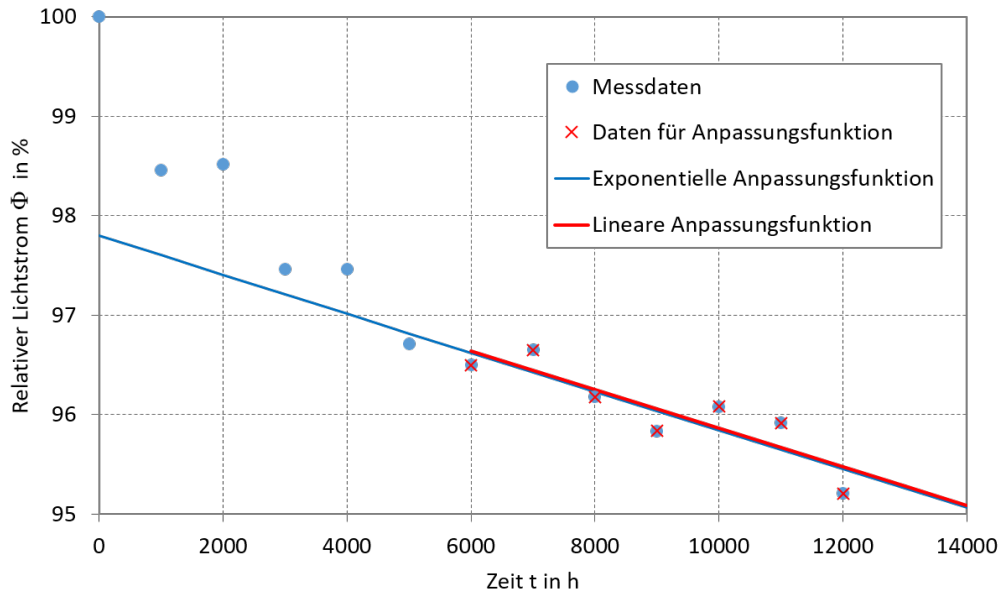


Abbildung 6.2.: Vergleich von exponentieller und linearer Anpassungsfunktionen nach [58]

Einige Alterungsverläufe weisen den schnell abfallenden anfänglichen Trend auf. Falls es sich um ein exponentielles Verhalten handelt, welches sich einem anderen Alterungsverhalten überlagert, sollte auch eine Exponentialfunktion zur Anpassung getestet werden. Der Unterschied zur vorher genannten Funktion ist ein Offset Φ_E , gegen den die Funktionswerte laufen. Φ_0 ist wiederum der Anfangswert, also der Schnittpunkt der Funktion mit der Ordinate. Er kann je nach Datenlage von 100 % abweichen.

$$\Phi(t) = (\Phi_0 - \Phi_E) \cdot \exp(-\alpha \cdot t) + \Phi_E \quad (6.2)$$

Anpassungsfunktionen sind bei etwas komplexeren Funktionen mit mehreren Parametern nicht immer leicht zu erhalten. Die Vorgabe von Startwerten lenkt den Algorithmus in den Bereich der sinnvollen Lösungen. Daher sollen auch in diesen Fällen Startwerte bereitgestellt werden. Die Startwerte für Φ_0 und Φ_E können leicht durch die Wahl des Maximums und Minimums der Daten abgeschätzt werden.

$$\Phi_{0,s} = \max(\Phi(t)) \text{ und } \Phi_{E,s} = \min(\Phi(t)) \quad (6.3)$$

Die Abschätzung des Startwerts für den Exponentialfaktor α erfolgt daraufhin durch eine Umstellung von Gleichung 6.2 und das Einsetzen der anderen Startwerte:

$$\alpha_s = \frac{1}{t} \cdot \ln \left(\frac{\Phi_{0,s} - \Phi_{E,s}}{\Phi(t) - \Phi_{E,s}} \right) \quad (6.4)$$

Folgende Abbildung 6.3 zeigt drei Alterungskurven einer Hochleistungs-LED, die bei drei Temperaturen (55 °C, 85 °C und 105 °C) gealtert ist.

6. Lebensdauerberechnung

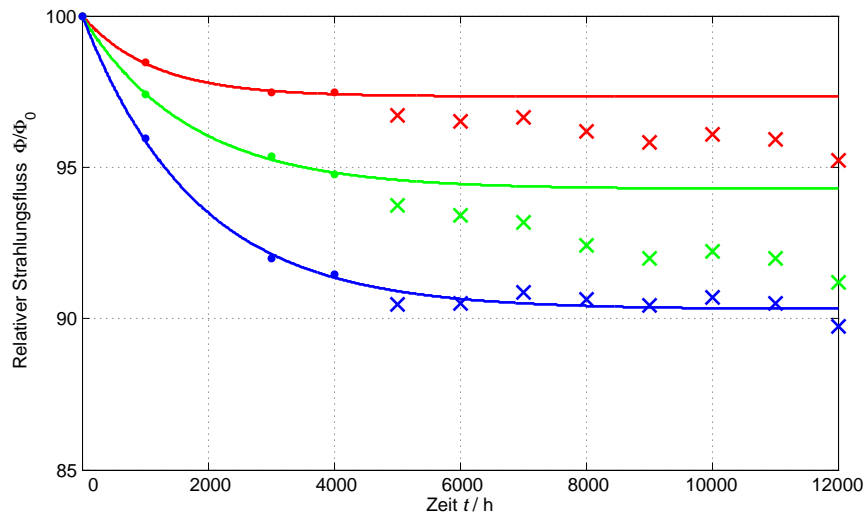


Abbildung 6.3.: Degradation des Lichtstroms bei drei Alterungstemperaturen (55 °C, 85 °C und 105 °C), exponentielle Anpassungsfunktionen. Die Punkte gehen in die Berechnung der Anpassungsfunktion ein, die Kreuze entsprechen den weiteren Messpunkten.

Die exponentielle Funktion mit Offset kann die Daten für 105 °C in blau gut annähern. Dabei gehen die Punkte in die Berechnung der Anpassungsfunktion ein, die Kreuze stellen die weiteren Messpunkte dar. Für die beiden niedrigeren Temperaturen ist die getestete Funktion jedoch ungeeignet, da sich die Messobjekte wahrscheinlich noch in der ersten absteigenden Phase bewegen und somit mehr Datenpunkte zur Extrapolation verwendet werden müssen.

6.2.2. Weitere Funktionen

Im folgenden soll eine Wurzel-Funktion getestet werden, die im Zusammenhang mit der Diffusionskonstante die Diffusionslänge bildet. Hierbei zeigt sich das genaue Gegenteil von Abbildung 6.3, da jetzt nur die beiden höheren Temperaturen abgebildet werden können.

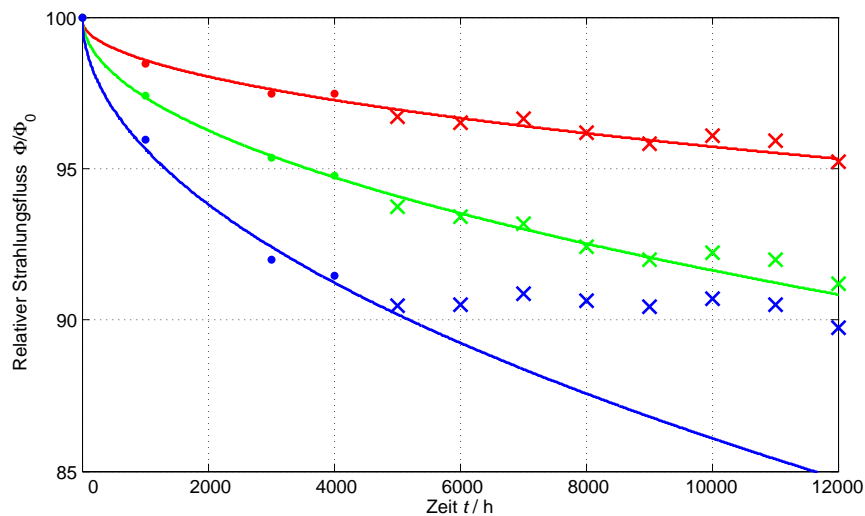


Abbildung 6.4.: Degradation des Lichtstroms bei drei Alterungstemperaturen (55 °C, 85 °C und 105 °C), Wurzelfunktionen. Die Punkte gehen in die Berechnung der Fitfunktion ein, die Kreuze entsprechen den weiteren Messpunkten.

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cdot (1 - \sqrt{D \cdot t}) \quad (6.5)$$

Als letztes soll noch eine nach rechts gekrümmte Funktion getestet werden. Dies wird mit einem quadratischen Term erreicht, der sich mit stärker als linear mit der Zeit erhöht. Der Parameter α wird auf ARRHENIUS-Verhalten getestet. Es zeigt sich, dass in diesem Fall eine Interpolation der Daten über die Temperatur gelingt.

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cdot (1 - (\alpha \cdot t))^2 \quad (6.6)$$

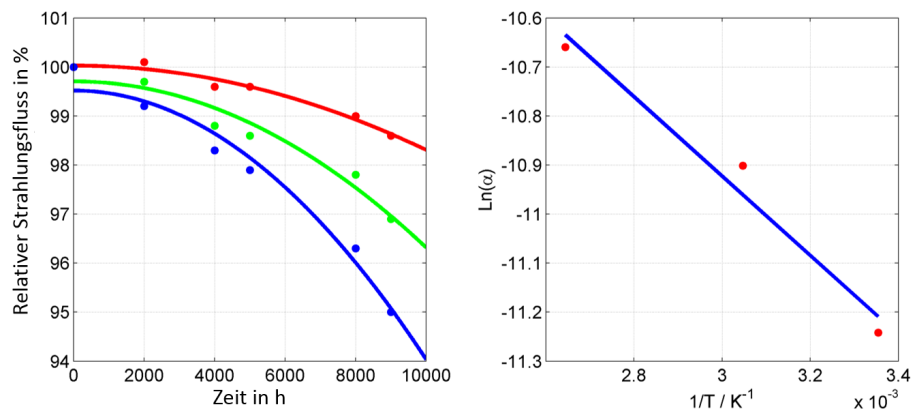


Abbildung 6.5.: Degradation des Lichtstroms bei drei Alterungstemperaturen (55 °C, 85 °C und 105 °C), quadratische Anpassungsfunktionen [58]

6.3. Beschleunigungsmethoden

Der sogenannte Beschleunigungsvektor verbindet zwei Datenpunkte von zwei Alterungskurven. Diese besitzen den gleichen Wert auf der Ordinate, daher liegt der Vektor horizontal im Diagramm. Er wird in der IEC 63013 verwendet, um Alterungskurven zu extrapolieren. Sein Hintergrund ist der Beschleunigungsfaktor AF , der aus dem ARRHENIUS-Gesetz hergeleitet werden kann.

$$AF = \frac{t_1}{t_2} = \exp \left(-\frac{E_A}{k_B T} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right) \quad (6.7)$$

Beschleunigungsfaktoren werden beispielsweise in einer Untersuchung von Hochleistungs-LEDs eingesetzt [48]. Hierbei wird die Degradation mit einer Temperatur von 170 °C sehr stark beschleunigt.

6.4. Lebensdauerfunktionen

Lebensdauerfunktionen sind für verschiedene Parameter entwickelt worden. Im folgenden werden die Lebensdauerfunktion für LEDs für Temperatur und Strom vorgestellt.

6.4.1. Lebensdauerfunktion bezüglich Temperatur

Über eine Abwandlung der Arrhenius-Gleichung kann die Lebensdauer in Abhängigkeit der Temperatur berechnet werden. Dies ist bereits in DIN EN 62506 als Lebensdauerfunktion (Formel 6.8) abgebildet.

$$L(T) = C \cdot \exp\left(\frac{D}{T}\right) \quad (6.8)$$

Sind lediglich zwei Temperaturen T_1 und T_2 und die zugehörigen Lebensdauern L_1 und L_2 bekannt, ist die Bestimmung der Parameter C und D analytisch möglich. Aus Gleichung 6.8 lässt sich zuerst der Wert für D folgendermaßen entwickeln:

$$D = \frac{\ln(L_1) - \ln(L_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (6.9)$$

Der gerade berechnete Parameter wird jetzt in folgende Gleichung eingesetzt, um C zu erhalten. Beide Paar von Temperatur und Lebensdauer führen hierbei zu der gleichen Lösung.

$$C = L_1 \cdot \exp\left(-\frac{D}{T_1}\right) = L_2 \cdot \exp\left(-\frac{D}{T_2}\right) \quad (6.10)$$

6.4.2. Lebensdauerfunktion bezüglich Strom

Verschiedene Quellen schlagen das inverse Potenzgesetz (Gleichung 6.11) vor, um nicht-thermische Beschleunigungen zu analysieren.

$$L(I) = \frac{1}{K \cdot I^n} \quad (6.11)$$

Wird Gleichung 6.11 logarithmiert, so folgt daraus

$$\ln(L(I)) = -\ln(K) - n \ln(I) \quad (6.12)$$

Im doppellogarithmischer Darstellung bildet dieser Zusammenhang eine Gerade. Für das Ergebnis der Alterung von Hochleistungs-LEDs soll diese Methode nun angewendet werden. Dazu sind vorerst die mittleren Lebensdauern bei verschiedenem Strom zu ermitteln. Abbildung 6.6 zeigt die Messergebnisse der Alterung bei konstanter Temperatur von 95 °C.

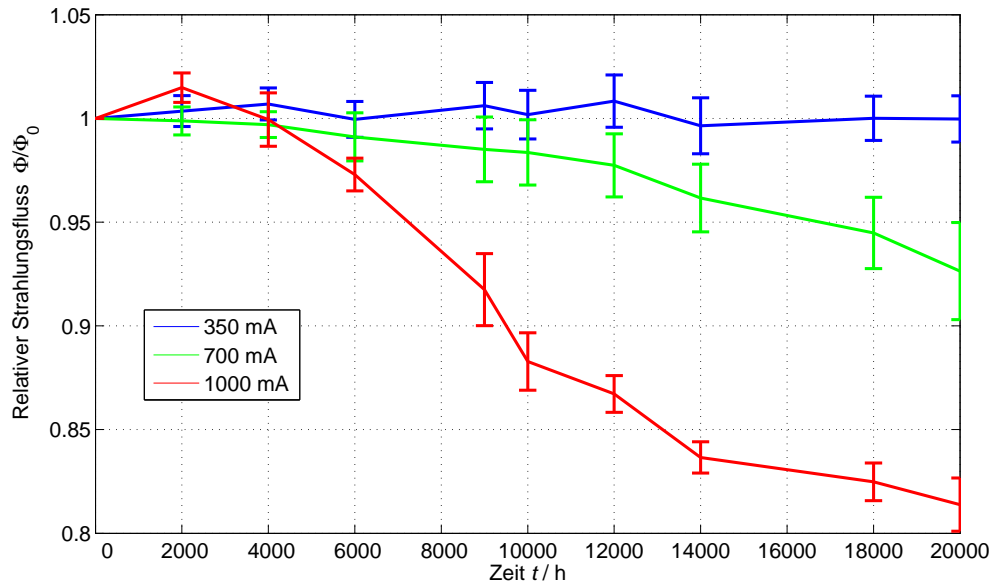


Abbildung 6.6.: Rückgang des relativen Strahlungsflusses bei konstanter Temperatur von 95 °C und verschiedenen Strömen (Typ A)

Die mittleren Lebensdauern bei 95 % und 90 % sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Tabelle 6.1.: Mittlere Lebensdauer bei verschiedenen Strömen (350 mA, 700 mA und 1000 mA)

Strom	L 95	L 90	Art der Ermittlung
1000 mA	7000 h	9000 h	Messung
700 mA	17 000 h	22 000 h	Messung
350 mA	95 000 h	125 000 h	Extrapolation

Die Extrapolation der Lebensdauer für den dritten Strom erfolgt auf Basis von zwei bekannten Strömen und deren zugehörigen Lebensdauern. Aus Gleichung 6.11 lässt sich der Wert für n folgendermaßen bestimmen:

$$n = \log_{(I_2/I_1)} \frac{L_1}{L_2} \quad (6.13)$$

Daraufhin ist der Parameter K zu berechnen.

$$K = \frac{1}{L_1 \cdot I_1^n} = \frac{1}{L_2 \cdot I_2^n} \quad (6.14)$$

Nun können aus dem inversen Potenzgesetz (Gleichung 6.11) für jeden beliebigen Strom die Lebensdauer extra- oder interpoliert werden. Bei doppellogarithmischer Auftragung ist das Ergebnis der Extrapolation für 350 mA mit enthalten.

6. Lebensdauerberechnung

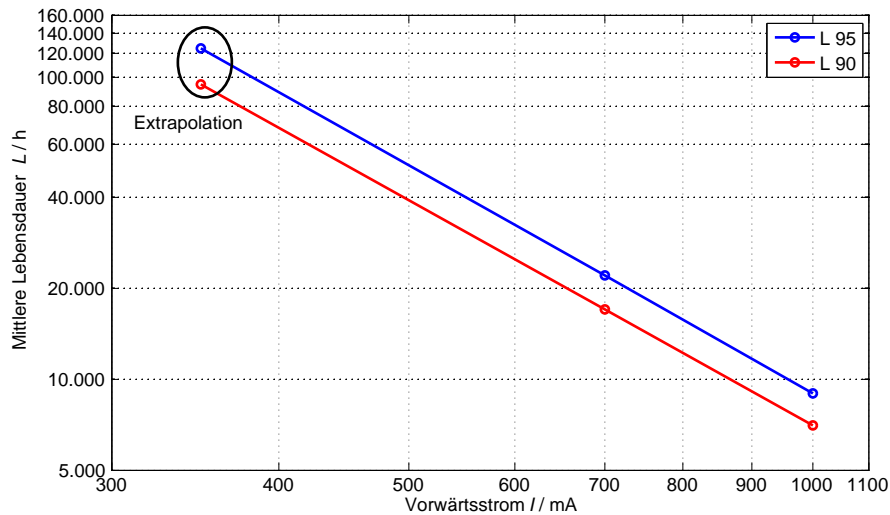


Abbildung 6.7.: Extrapolation der mittleren Lebensdauer von LED-Packages (Typ A) aus zwei Alterungsströmen (700 mA und 1000 mA), doppellogarithmische Auftragung

6.5. Lebensdauermodell

Die beiden vorigen Abschnitte betrachten die Berechnung der Lebensdauer in Abhängigkeit eines Parameters, entweder der Temperatur oder des Stroms. Im folgenden wird ein Modell entwickelt, welches beide Parameter zusammen berücksichtigt.

6.5.1. Mathematische Zusammenhänge

Die beiden Lebensdauerfunktionen zeigen zwei unterschiedliche mathematische Beschreibungen, je nach Betrachtung von Temperatur und Strom. Die Lebensdauer ist im Fall der Temperatur proportional zu einer Exponentialfunktion, falls die Daten dem ARRHENIUS-Gesetz unterliegen.

$$L_x(T) \sim \exp\left(\frac{D}{T}\right) \quad (6.15)$$

Der Einfluss des Stroms auf die Lebensdauer wird mit einer inversen Potenzfunktion beschrieben.

$$L_x(I) \sim \frac{1}{I^n} \quad (6.16)$$

Die Gleichungen 6.15 und 6.16 können daher gekoppelt werden, so dass durch eine Multiplikation eine Abhängigkeit von Temperatur und Strom entsteht. Zu beachten ist dabei, dass die beiden Parameter unabhängig voneinander sein müssen.

$$L_x(T, I) \sim \exp\left(\frac{D}{T}\right) \cdot \frac{1}{I^n} \quad (6.17)$$

Um aus dem proportionalen Verhalten eine Gleichung zu erhalten, muss schließlich eine weitere Konstante B eingeführt und für jedes Modell neu bestimmt werden. Mittels Formel 6.18 kann die Lebensdauer für beliebige Ströme und Temperaturen berechnet werden.

$$L_x(T, I) = B \cdot \exp\left(\frac{D}{T}\right) \cdot \frac{1}{I^n} \quad (6.18)$$

6.5.2. Erzeugung des Modells

Die Erzeugung des Modells aus Alterungsdaten der COB-Module soll im Weiteren aufgezeigt werden. Die beiden Hauptschritte sind dabei die Ermittlung der Parameter D und n aus den Abhängigkeiten der Lebensdauer von Temperatur und Strom.

Im ersten Schritt muss das Kriterium für die Lebensdauer definiert werden, hier ist es 85 % des Anfangslichtstroms. Dieser Wert wird in folgendem Diagramm mit einer horizontalen gestrichelten Linie dargestellt.

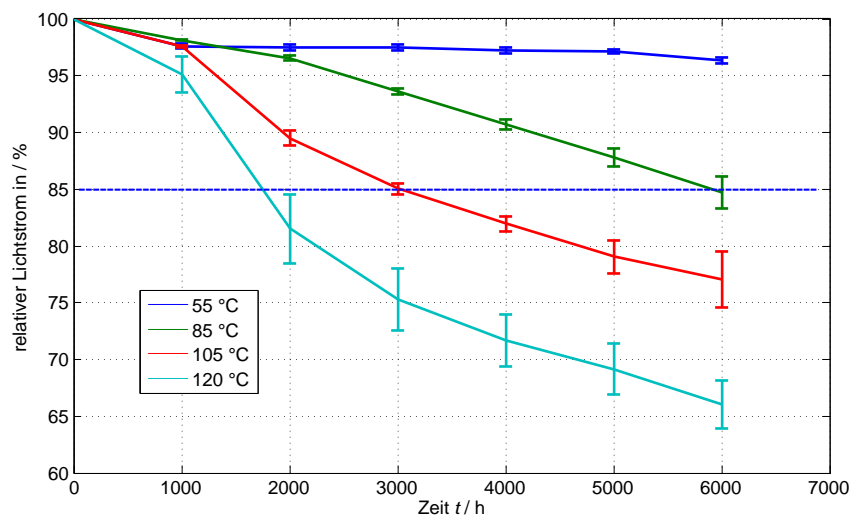


Abbildung 6.8.: Ermittlung der Lebensdauern (L_{85}) von COB-Modulen bei drei Temperaturen, die Daten der niedrigen Temperatur erreichen nicht die definierte Lebensdauer fließen daher nicht in die Modellbildung ein.

Die Zeitpunkte der Schnittpunkte der einzelnen Kurven mit der horizontalen Linie gehen in die weitere Berechnung ein. Dabei kommen nur die drei höheren Temperaturen in Betracht, da die Kurve von 55 °C noch weit oberhalb von 85 % liegt. Die Darstellung erfolgt im ARRHENIUSgraphen mit reziproker Temperatur und logarithmisch dargestellter Lebensdauer.

6. Lebensdauerberechnung

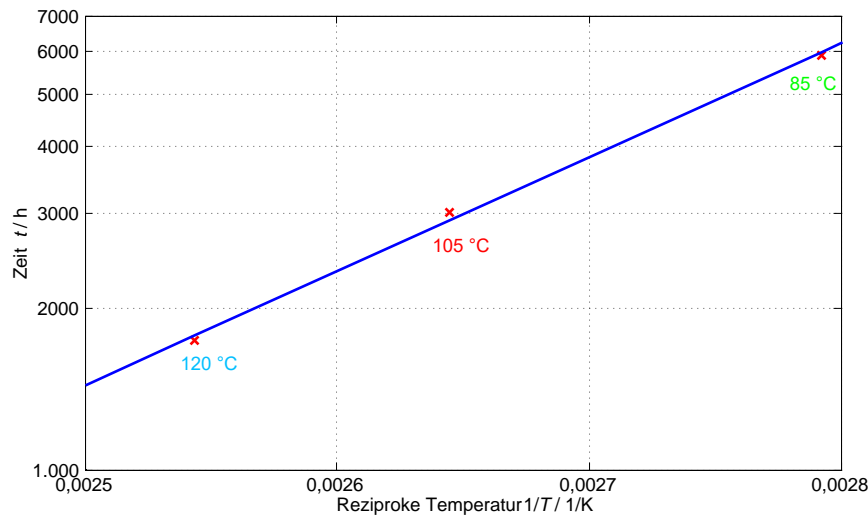


Abbildung 6.9.: ARRHENIUSgraph der mittleren Lebensdauer für einen Lichtstromrückgang auf 85 % bei drei Temperaturen

In den hier untersuchten Alterungsdaten ist das ARRHENIUS-Gesetz gut erfüllt. Es existieren jedoch ebenfalls Datensätze, welche im oberen Graphen keine Gerade bilden. Somit könnte durch ein bei diesem Schritt der Modellbildung zu erfüllendes Kriterium eine Vorauswahl der Daten geschehen. Die Anwendung des Modells ist dadurch eingeschränkt, jedoch wird die Zuverlässigkeit der Vorhersage erhöht.

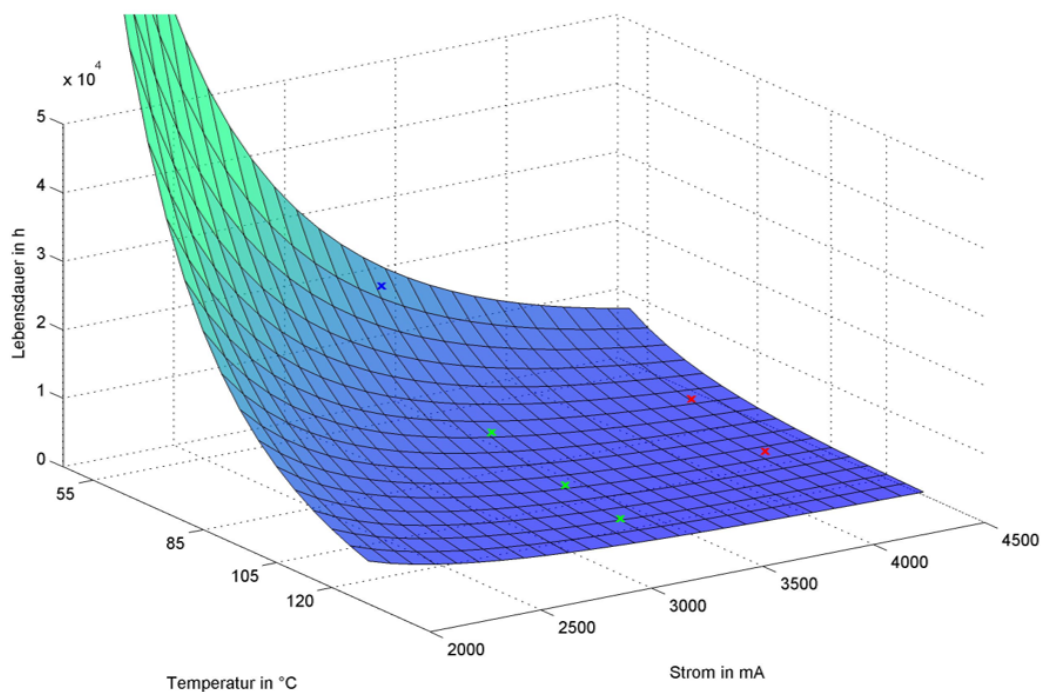


Abbildung 6.10.: Ergebnis des Lebensdauermodells in Abhängigkeit von Temperatur und Strom

Nach der Bestimmung des Parameters D mittels Temperatur wird nun der Parameter n aus den Stromdaten ermittelt. Da lediglich zwei Ströme verwendet wurden, berechnet sich der Parameter n direkt aus

Formel 6.13. Folgende Abbildung zeigt die Lebensdauer in Abhängigkeit von Temperatur und Strom.

Die grünen Punkte bilden die Alterungsdaten von 3200 mA und den drei höheren Temperaturen. Dem höheren Strom von 4200 mA liegen nur zwei Temperaturen zu Grunde. Der blaue Punkt stammt aus einer Extrapolation der blauen Kurve aus Abbildung 6.8. Da er ebenfalls nahe an der in Abbildung 6.10 dargestellten Oberfläche liegt, lassen sich Lebensdauern mit dem Modell sehr wahrscheinlich auch bei höheren, nicht getesteten Temperaturen berechnen.

Aufgrund der geringen Anzahl der Ströme lassen sich keine Aussagen zur Zuverlässigkeit des Modells im Hinblick auf andere Vorwärtsströme treffen.

6.6. Ausfallstatistik

Die Ergebnisse der LED-Alterung zeigen, dass oft keine einfache Funktion existiert, welche die komplette Alterungskurve beschreiben kann. Besonders bei verschiedenen Bedingungen (Temperatur, Strom) unterscheiden sich die einzelnen Verlaufsformen und sind nicht immer stetig.

Eine andere Methode, um LED-Alterung zu untersuchen, basiert auf statistischen Verfahren. Dies wurde erfolgreich innerhalb der Halbleitertechnologie (z.B für Transistoren) eingesetzt. In diesem Fall geht jedes einzelne LED-Package in die Betrachtung ein, weil Verteilungen die Hauptkomponente der Analyse bilden. Die WEIBULL-Statistik wird für die Daten bei verschiedenen Bedingungen getestet. Um eine Ausfallrate zu erhalten, wird ein bestimmter relativer Wert des Strahlungsflusses gewählt, den die einzelnen Messobjekte unterschreiten.

6.6.1. Methodik

Die Analyse der Alterungskurven geschieht mit einer statistischen Methode, bei der Verteilungen der Daten ausgewertet werden. Dafür wird für jedes Messobjekt die eigene Lebensdauer betrachtet. Diese Zeiten bilden daraufhin Verteilungen, die mit verschiedenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen angenähert werden. Zur Wahl stehen die Normal-, Lognormal- und WEIBULLverteilung, diese sind für Ausfallanalysen bereits erprobt [59]. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung eines KALMAN-Filters zur Reduzierung von Fehlern der Messwerte und eine anschließende Auswertung mit Hilfe der WEIBULL-Funktion [60].

Die empirische kumulative Dichtefunktion zeigt den kumulierten Anteil der Messobjekte, welche die Lebensdauer erreicht haben. Auf der Abzisse wird daher die Zeit aufgetragen. Es ergibt sich eine Stufenfunktion mit n Stufen für n Messobjekte, welche von 0 bis 1 aufsteigt. Die kumulative Verteilungsfunktion entsteht durch Integration der vorher angepassten Verteilungsfunktion. Der Funktionswert bei 50 % beschreibt die mittlere Lebensdauer der gealterten Messobjekte.

Der Wahrscheinlichkeitsgraph verwendet je nach zu testender Funktion eine logarithmische oder doppelt-logarithmische Skalierung. Die Funktion wird im Graph dargestellt, die Messwerte sollten dann auf einer Geraden liegen, wenn sie der Verteilung entsprechen.

6.6.2. Ergebnisse

Der relative Strahlungsfluss von zehn LED-Packages bei 85 °C und 1000 mA wird in Abbildung 6.11 dargestellt. Kein Package verzeichnet einen katastrophalen Ausfall, der für die Ausfallanalyse benötigt wird. Also muss die Methode hier auf eine andere Weise angewendet werden. Die Definition der Lebensdauer ist der Rückgang des Strahlungsflusses auf 70 % oder 80 % seines Anfangswerts. Diese Lebensdauer wird nun wie ein echter Totalausfall behandelt, damit die statistische Methodik direkt transferiert werden kann.

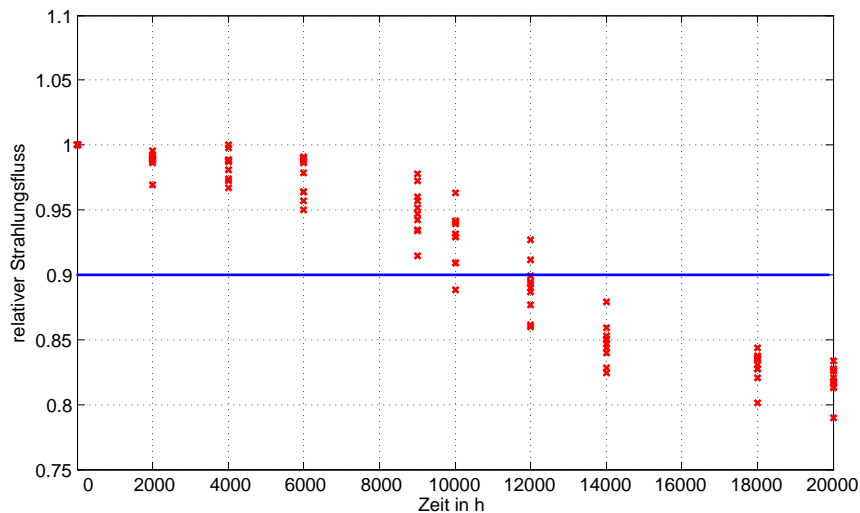


Abbildung 6.11.: Rückgang des relativen Strahlungsflusses von zehn einzelnen LED-Packages

Die Alterungsdaten jedes LED-Packages werden in Abbildung 6.11 mit einer horizontalen Linie bei 90 % verglichen, die einer mögliche Lebensdauer entspricht. Aufgrund der großen Schritte von 2000 h variieren die Daten für die Verteilung nicht stark: Ein Package erreicht seine Lebensdauer nach 10 000 h, die nächsten sieben nach 12 000 h und die letzten nach 14 000 h. Die daraus erstellte kumulative Verteilung zeigt folgende Abbildung 6.12. Bereits hier ist erkennbar, dass die Daten zu grob aufgelöst sind, um eine Aussage über die Anpassungsgüte der Verteilung zu machen.

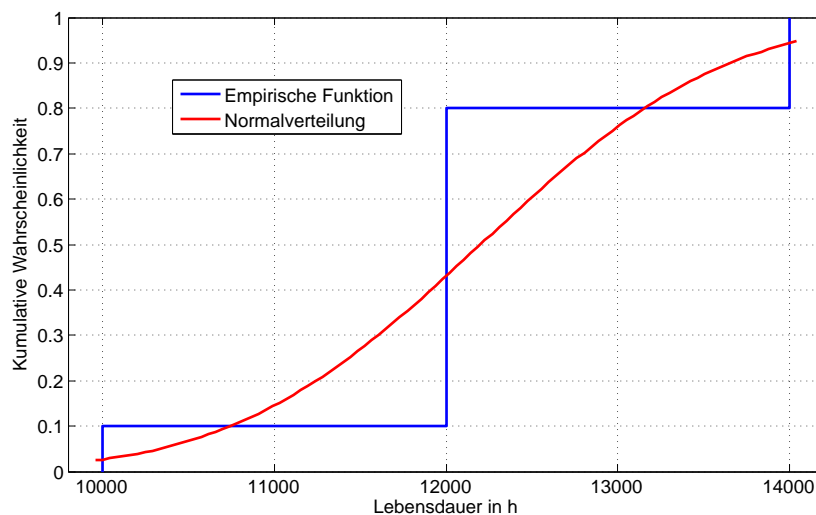


Abbildung 6.12.: Kumulative, empirische Funktion und angepasste Normalverteilung der Lebensdauer

Die Daten werden in einem Wahrscheinlichkeitsgraph (Abbildung 6.13) dargestellt, um das statistische Verhalten der Messobjekte zu prüfen. Da nur drei unterschiedliche Lebensdauern gegeben sind, ist der Graph in diesem Fall für einen Test auf Normalverteilung nicht geeignet. Daher müssen die Lebensdauern der einzelnen LED-Packages zeitlich feiner aufgelöst ermittelt werden, um eine sinnvolle Interpretation zu gewährleisten.

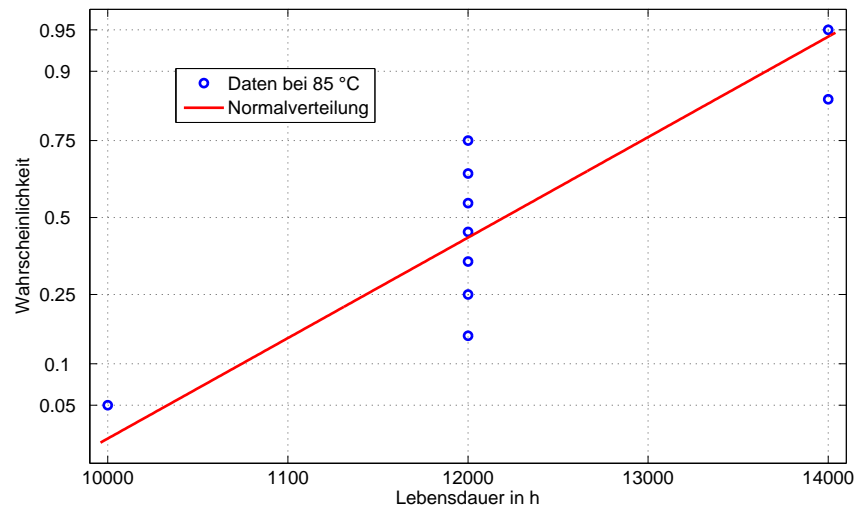


Abbildung 6.13.: Wahrscheinlichkeitsgraph zum Test auf Normalverteilung

Der Wahrscheinlichkeitsgraph zeigt wie Abbildung 6.12, dass für 80 % der Messobjekte die mittlere Lebensdauer bei 12 000 h liegt. Um eine höhere zeitliche Auflösung der Lebensdauern zu erhalten, werden die Daten zwischen den einzelnen Messzeitpunkten linear interpoliert. Die Schnittpunkte dieser Geraden mit einer horizontalen Linie bei 90 % bilden die Lebensdauern der einzelnen Messobjekte. Aus den erhaltenen Daten wird ein Histogramm erzeugt, wobei sich die Anzahl der Klassen nach der Regel von FRIEDMAN und DIACONIS berechnet [61]. Die Normal- und WEIBULL-Verteilung werden als Anpassungsfunktionen der Häufigkeitsverteilung ausgewählt (Abbildung 6.14).

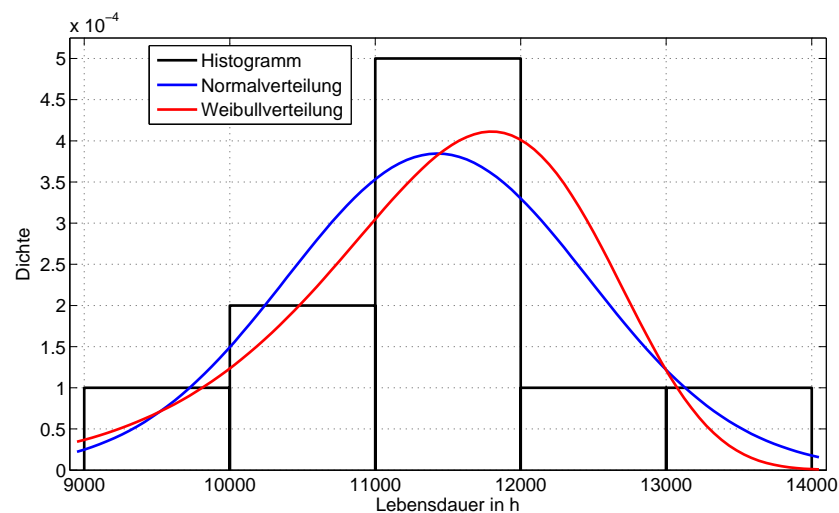


Abbildung 6.14.: Anpassung der Lebensdauerterteilung mittels Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Normal- und Weibullverteilung

6. Lebensdauerberechnung

Die empirische Dichtefunktion in Abbildung 6.15 besteht in diesem Fall aus Werten zwischen 0 und 1 mit einer Schrittweite von 0,1, da durch zehn Messobjekte zehn verschiedene Lebensdauern berechnet werden. Entsprechend der jeweiligen Dichtefunktion werden sowohl die kumulative Normal-, als auch WEIBULL-Verteilung mit eingezeichnet.

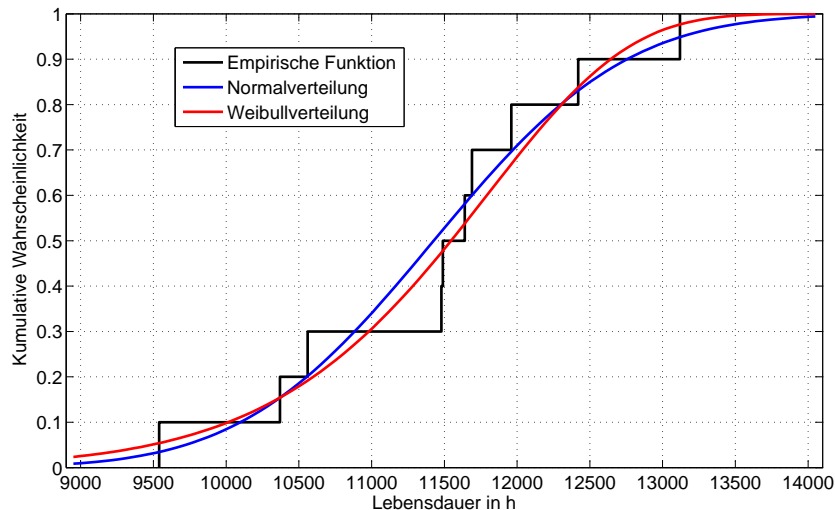


Abbildung 6.15.: Kumulierte, empirische Lebensdauerverteilung mit den integrierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Normal- und Weibullverteilung

Die mittlere Lebensdauer beträgt 11 430 h für die Normalverteilung und 11 550 h für die WEIBULL-verteilung, der empirische Wert liegt zwischen den beiden Funktionen. In den folgenden Diagrammen werden die Verteilungen mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsgraphen verglichen und näher analysiert.

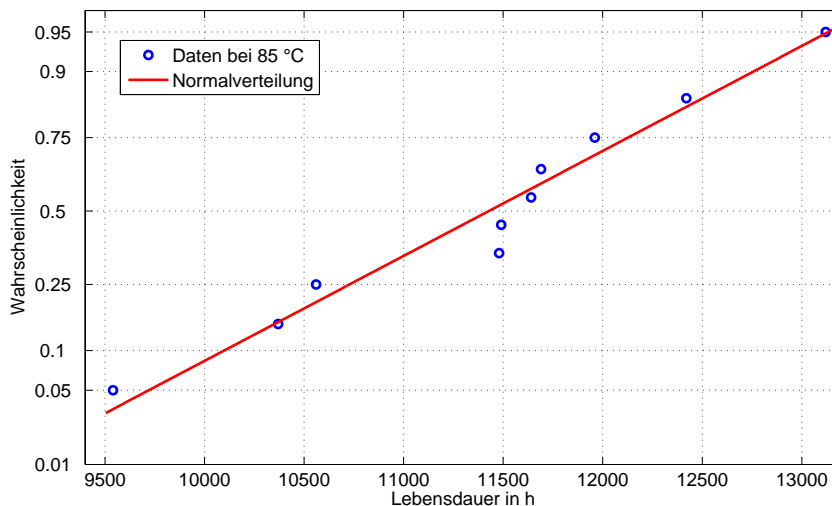


Abbildung 6.16.: Wahrscheinlichkeitsgraph zum Test auf Normalverteilung

Die den Lebensdauern zugeordneten Wahrscheinlichkeitswerte werden mit Hilfe der Formel $(k - 0,5)/n$ berechnet, wobei k die Anzahl der Daten und n die Anzahl der untersuchten Messobjekte darstellt. Diese Gleichung wurde verwendet, da sie für Daten geeignet ist, die eine geringe Anzahl an Mustern beinhalten. Einige Wahrscheinlichkeitspunkte streuen um die theoretische Kurve der Normalverteilung. Es gibt jedoch keinen Hinweis darauf, dass die Wahl der Verteilung grundlegend falsch ist. In diesem Fall

würden Datenpunkte im vorderen oder hinteren Abschnitt der Kurve stärker vom linearen Verhalten abweichen.

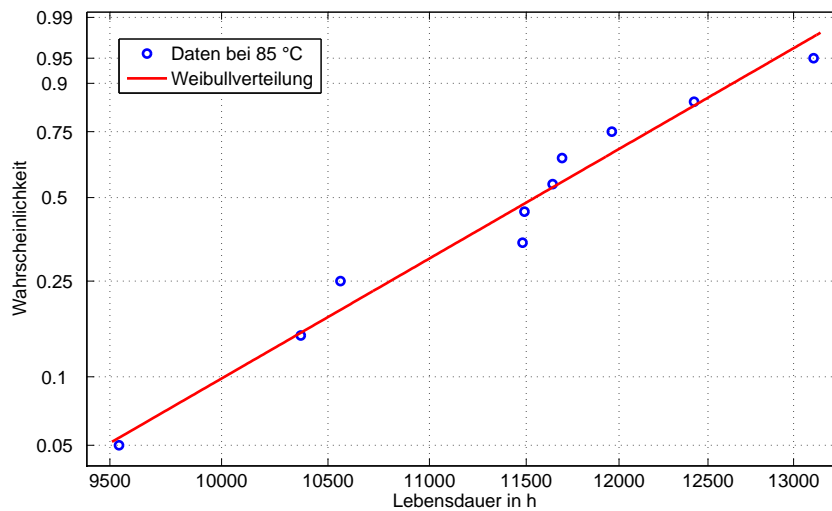


Abbildung 6.17.: Wahrscheinlichkeitsgraph zum Test auf Weibullverteilung

Das WEIBULL-Wahrscheinlichkeitspapier verwendet zusätzlich eine logarithmische Ordinate. Ein Vergleich zeigt, dass viele Datenpunkte von der linearen Kurven abweichen, die auch im vorigen Diagramm nicht dem theoretischen Verlauf entsprechen. Somit kann keine der beiden getesteten Verteilungen favorisiert werden. Die zusätzlich getestete Lognormal-Verteilung weist einen noch kleineren Unterschied zur Normalverteilung auf.

Um die Alterung der LED-Packages zu beschleunigen, wurde wie bereits in Kapitel 4 gezeigt, eine Temperatur von 95 °C im Alterungstest gewählt. Diese Daten wurden für einen Vergleich ebenfalls mit Hilfe der statistischen Methoden ausgewertet, indem wiederum 90 % als definierte Lebensdauer zum Einsatz kommt. Das folgende Diagramm zeigt Normalverteilungen im Wahrscheinlichkeitsnetz für die zwei verschiedenen Alterungsbedingungen. Die roten Punkte stammen aus den Daten der höheren Temperatur.

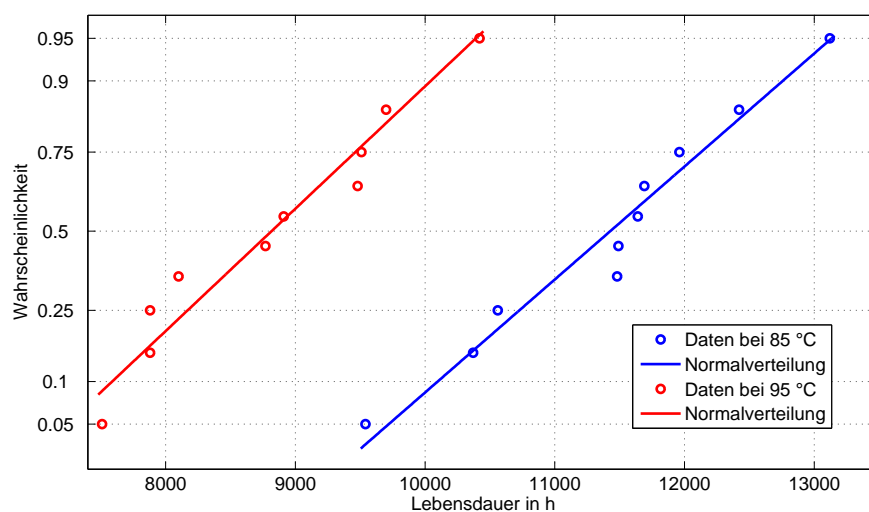


Abbildung 6.18.: Wahrscheinlichkeitsgraphen bei zwei Temperaturen zur Untersuchung der Alterungsbeschleunigung

Unter der Annahme eines *ARRHENIUS*-Verhaltens für alle Bedingungen werden die Zeiten bei einer Wahrscheinlichkeit von 50 % verwendet, um eine dritte Bedingung zu extrapolieren. Diese zwei Zeiten betragen 8810 h für 95 °C und 11 420 h für 85 °C. Die Lebensdauer für LED-Packages bei einer Temperatur von 55 °C kann somit mit Hilfe von *ARRHENIUS* bestimmt werden. Dieser Wert liegt bei 27 000 h und beträgt somit das mehr als Dreifache der Lebensdauer bei härtesten Bedingungen.

6.6.3. Folgerungen

Eine neuer Ansatz basierend auf statistischen Methoden wurde getestet, um die Messergebnisse von gealterten LED-Packages zu untersuchen. Dabei führen die Zeiten, nach denen die Kurven des relativen Strahlungsflusses eine definierte Degradation erreichen, zur benötigten Verteilung der Lebensdauer. Aufgrund einer groben Zeitauflösung der Datenpunkte (2000 h) wird eine lineare Interpolation angewendet. Keine Verteilung hat sich als beste Anpassungsfunktion für den untersuchten Datensatz herausgestellt. Die Wahrscheinlichkeitsgraphen der beiden Temperaturen können für eine *ARRHENIUS*-Berechnung dienen. Zukünftige Untersuchungen sollen andere Funktionen für die Interpolation, sowie weitere Schätzer für die Wahrscheinlichkeitswerte der Messpunkte testen.

6.7. Fazit des 6. Kapitels

Die Berechnung und Extrapolation der Lebensdauer von LED-Packages weist klare Unterschiede zur Zuverlässigkeitsmethodik auf. Die Ursache liegt daran, dass die Lebensdauer einer LED dann erreicht ist, wenn ihr Lichtstrom bis zu einem definierten Anteil des anfänglichen Lichtstroms gesunken ist. Diese langsam ablaufende Degradation soll durch die Berechnung mathematisch beschreibbar werden. In der Regel wird eine exponentielle Funktion verwendet, die sich bei vielen Datenanalysen in der Vergangenheit bewährt hat. Heutige LED-Packages weisen jedoch zahlreiche Bestandteile auf, so dass mehrere Alterungsmechanismen wirken. Dies führt besonders bei der Beschleunigung durch die Temperatur oder den Strom zu Kurvenverläufen, die abschnittsweise aus einzelnen Funktionen zusammengesetzt werden müssen. Die Ergebnisse der Langzeitalterung von Hochleistungs-LEDs zeigen, dass allein der betrachtete Messzeitraum Einfluss auf die extrapolierte Lebensdauer haben kann.

Ein neu entwickeltes Lebensdauermodell beinhaltet die beiden Parameter Temperatur und Strom. Dabei werden keine Funktionen an die zeitliche Degradation angepasst, sondern lediglich Zeiten benötigt, nach denen die definierte Lebensdauer erreicht wird. Ein Test auf den Basis der Daten der COB-Alterung zeigte, dass das Modell geeignet ist, falls der Lichtstromrückgang stark genug ist.

Durch die Definition eines Ausfalls durch die Lebensdauer jedes einzelnen Messobjekts kann auf die bewährte Zuverlässigkeitsmethodik zurückgegriffen werden. Dabei zeigt sich, dass nur mittels Dateninterpolation eine ausreichende Genauigkeit der Lebensdauern erreicht wird. Im Fall der Hochleistungs-LEDs ist die Verteilung für den bestehenden Datensatz nicht eindeutig. In vielen Fällen wird die Lognormalverteilung für die Lebensdauer von Hochtechnologie-Anwendungen bevorzugt. Im vorliegenden Fall besteht jedoch nur ein geringer Unterschied zur Normalverteilung. Der Formfaktor der WEIBULL-Verteilung weist mit einem Wert von neun auf einen Bereich der hohen Verschleißphase hin. Für genauere Verteilungsuntersuchungen sollte jedoch die Anzahl und Genauigkeit der Daten erhöht werden.

7. LED-Package

Zur hauptsächlich mechanischen und elektrischen Anbindung ist bei einer LED-basierten Lichtquelle der lichtemittierende Halbleiterkristall innerhalb eines Gehäuses untergebracht, welches als LED-Package bezeichnet wird. Der geometrische Aufbau und die verwendeten Materialien haben direkte Einflüsse auf das thermische und optische Verhalten. Es existiert eine Vielfalt unterschiedlicher LED-Packages, die jeweils an die Anforderungen und Umgebungsbedingungen des LED-Systems angepasst ist. Je nach Art des Packages kann außerdem die Anzahl von einem einzelnen bis zu mehreren hundert Chips variieren.

Temperaturen im Betrieb sind im Package örtlich verschieden. Nicht alle Bestandteile können thermisch auf direktem Weg untersucht werden. Da sich Temperaturen im Chip und Leuchtstoff auf unterschiedliche Weise auf das lichttechnische Verhalten und die Lebensdauer auswirken, muss die Wärmeverteilung innerhalb des Packages bekannt sein, um die Effekte auch quantitativ analysieren zu können.

In folgendem Kapitel werden Packages untersucht, die auf der Chip-on-Board-Technologie basieren. Dabei ist jeweils ein LED-Chip direkt auf einer Metallkernplatine angebracht.

In den Analysen wird eine Unterscheidung in untere und obere Bestandteile vorgenommen. Die unteren Komponenten stellen alle Schichten unterhalb des LED-Chips dar. Diese dienen hauptsächlich der Stromversorgung und Wärmeabfuhr. Variationen der Geometrie und Materialien konnten in speziell angefertigten Packages während einer Masterarbeit von ZHANG [62] vorgenommen und untersucht werden.

Als obere Bestandteile zählen der Leuchtstoff und die Silikonverkapselung. Die Temperaturbestimmung innerhalb des Silikonvergusses ist mit direkten Messungen nicht möglich, da die eintreffende optische Strahlung stört und Wärmestrahlung erst von der Oberfläche abgestrahlt wird. Über die Betrachtung der thermischen Leistungen und Wärmeflüsse können jedoch trotzdem Aussagen über den Einfluss der Materialien auf die Temperatur getroffen werden

7.1. Aufbau der untersuchten LED-Packages

Bei den untersuchten LED-Packages auf COB-Basis sind hauptsächlich die Schichten unterhalb des Halbleiterchips von Bedeutung, da in diesem Fall kein Leuchtstoff und Silikonverguss vorhanden sind. Dieser Schichtaufbau kann durch Schliffbilder sichtbar gemacht und geometrisch bemessen werden.

7. LED-Package

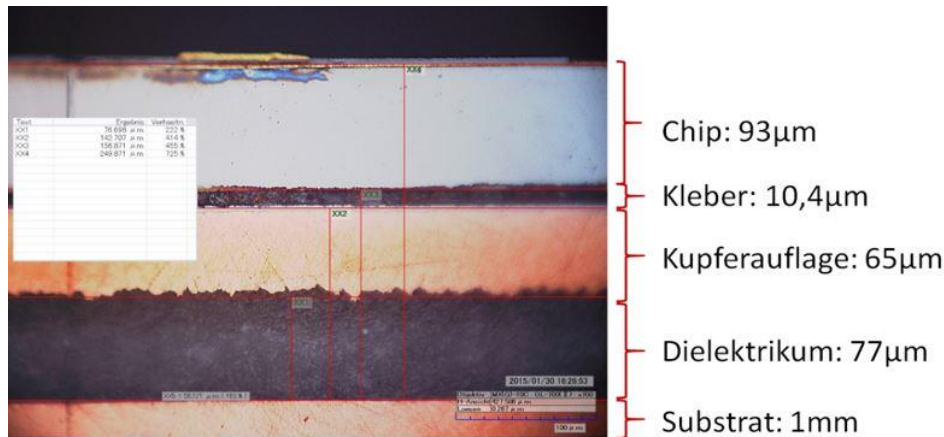


Abbildung 7.1.: Schliffbild einer COB-LED: der Chip ist mittels Silberleitkleber auf der Kupferauflage der Leiterplatte befestigt [62]

Durch die genaue Kenntnis aller Schichten und deren Variation können diese nach der Messung charakteristischen Abschnitten in der Strukturfunktion zugeordnet werden.

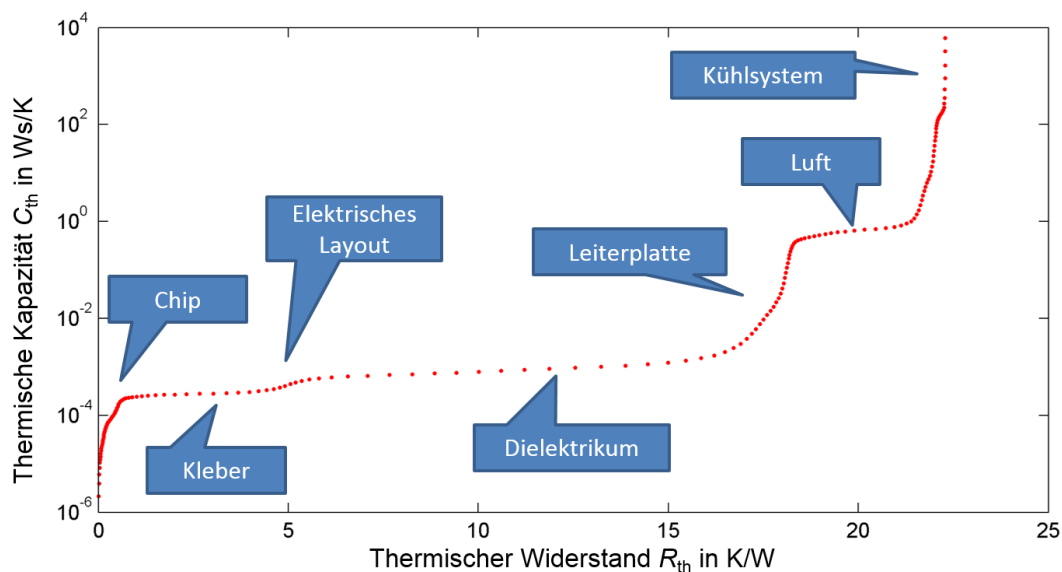


Abbildung 7.2.: Strukturfunktion einer COB-LED mit Zuordnung einzelner Schichten

Die Analyse der Strukturfunktion ist durch folgende Regel grob möglich: Steile Abschnitte beziehen sich auf thermisch gut leitende Materialien wie Metall oder Halbleiter. Flach verlaufende Abschnitte der Funktion können meist schlecht leitenden Materialien wie Kleber, Dielektrika oder Luft zugeordnet werden. Im vorliegenden Fall sind alle Abschnitte bekannt, so dass die Identifikation einzelner Schichten möglich ist.

7.1.1. LED-Chip

Der Chip besteht aus einem Substrat und darauf aufgewachsenen Halbleitermaterial. Je nach Technologie befindet es sich unter- oder oberhalb des p-n-Übergangs wie bei der Flip-Chip-Technologie. In den

zwei Typen von untersuchten Chips (blau und rot) ist die lichtemittierende Schicht auf dem Substrat aufgebracht. Dies führt dazu, dass das Substratmaterial auch elektrisch leitfähig sein muss. Der Aufbau wird als vertikal bezeichnet, die elektrischen Anschlüsse befinden sich oben an der n-Seite und unterhalb des Substrats.

Beide Chips weisen verschiedene Substratmaterialien auf, da sich die Halbleitermaterialien des roten und blauen Chips unterscheiden. Genaue Angaben sind nur zum roten Chip bekannt. Dieser beinhaltet AlInGaP als Halbleitermaterial, welches Strahlung im roten Bereich emittiert. Für eine höhere Auskoppelungseffizienz wird ein Spiegel verwendet. Zum Substrat gibt es keine Angaben im Datenblatt, wahrscheinlich handelt es sich um GaAs oder GaP, wobei GaP eine höhere thermische Leitfähigkeit besitzt. Exemplarisch soll dies mit Hilfe von thermischen Betrachtungen ermittelt werden.

Die thermisch-transiente Messung beider Chip-on-Board-Gehäuse zeigt deutliche Unterschiede in den Wärmewiderständen.

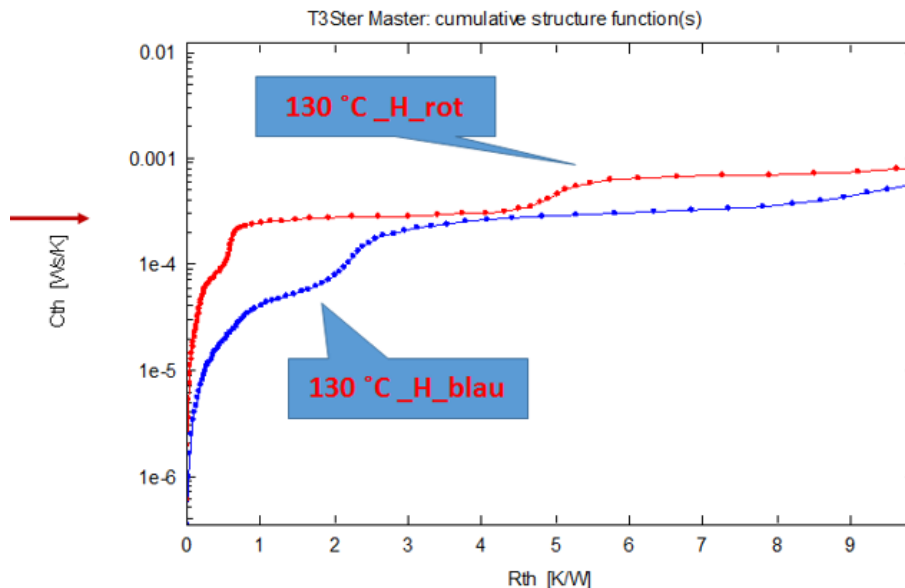


Abbildung 7.3.: Strukturfunktionen eines roten und blauen Chips, deutliche Unterschiede im thermischen Widerstand und der thermischen Kapazität [62]

Der Anstieg der roten Kurve verläuft steiler, da hier der thermische Widerstand im Vergleich zum blauen Chip kleiner ist. Die Wärmekapazität beider Chips ist etwa gleich, daher berühren sich die Kurven beinahe. Der waagerechte Abschnitt kann jeweils dem Kleber zugeordnet werden, mit dem der Chip auf dem Board befestigt ist. Unmittelbar links davon in der Strukturfunktion ist ein steiler Anstieg zu erkennen, welcher aus dem thermischen Verhalten des Halbleiterchips stammt. Der thermische Widerstand des blauen Chips beträgt mit etwa 2,3 K/W fast das Vierfache des roten Chips mit 0,6 K/W. Da der Aufbau des blauen Chips nicht bekannt ist, sind nur Mutmaßungen möglich. Aus diesem Grund wird im folgenden nur der rote Chip näher analysiert.

Die Abmessungen des Chips sind bekannt, er besitzt eine Dicke von 4 mil, was etwa 0,1 mm entspricht. Die quadratische Fläche wird mit 41 mil Seitenlänge angegeben. Dies ergibt eine Oberfläche von etwa 1 mm^2 . Nun kann der thermische Widerstand dieses aus Halbleitermaterial bestehenden Quaders mit Hilfe der Gleichung 7.1 berechnet werden.

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \quad (7.1)$$

Die absolute thermische Kapazität wird aus der Masse und der spezifischen Wärmekapazität des jeweiligen Halbleitermaterials bestimmt:

$$C_{th} = m \cdot c_{th} = \rho \cdot V \cdot c_{th} \quad (7.2)$$

Aus den anderen Materialparametern lässt sich nun der thermische Widerstand und die Wärmekapazität berechnen (Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1.: Ermittlung der thermischen Parameter auf Basis von Materialeigenschaften

Substrat	Wärmeleitfähigkeit λ	Wärmekapazität c_{th}	Dichte ρ	R_{th}	C_{th}
GaAs	$40 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$330 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	5317 kg/m^3	$1,60 \text{ K/W}$	$1,93 \times 10^{-4} \text{ W s/K}$
GaP	$70 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$430 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	4138 kg/m^3	$2,75 \text{ K/W}$	$1,96 \times 10^{-4} \text{ W s/K}$

Ein Vergleich mit Diagramm in Abbildung 7.3 zeigt, dass die Werte für die Wärmekapazität gut passen. Für den thermischen Widerstand liegt der Wert von GaP näher am gemessenen Wert, ein Hinweis auf die mögliche Verwendung dieses Materials.

Abschließend lässt sich nicht hundertprozentig ermitteln, welche Halbleitermaterialien für die analysierten Chips verwendet werden. Es zeigt sich jedoch, dass die Auflösung des Messverfahrens hoch genug ist, um Chiptechnologien zu vergleichen.

7.2. Variation der unteren Gehäusebestandteile

7.2.1. Silberleitkleber

Zur elektrischen und mechanischen Anbindung der Chips auf die Leiterplatte dient ein Silberleitkleber, der eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen sollte. Er besteht aus einer Polymermatrix, in welche Silberpartikel eingebettet sind (Abbildung 7.4). Die elektrische Leitfähigkeit wird durch den hohen Silberanteil im Material gewährleistet.



Abbildung 7.4.: Schliffbild eines Silberleitklebers: Helle Bereiche stellen Silberpartikel dar, die dunklen Bereiche bilden die Polymermatrix.

Bei der Herstellung der LED-Gehäuse müssen die Kleber in einem Ofen bei bestimmten Temperaturen und Zeitdauern aushärten. Dabei findet eine zunehmende Vernetzung der Polymerketten statt, die auch die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Die Aushärtetemperatur sollte somit Auswirkungen auf den thermischen Widerstand haben. Für den roten Chip wurden LED-Packages mit gleichen Geometrien, jedoch bei unterschiedlichen Ofentemperaturen hergestellt. Das Ergebnis zeigt eindeutige Abweichungen der Strukturfunktion im Bereich, welcher dem Kleber zuzuordnen ist.

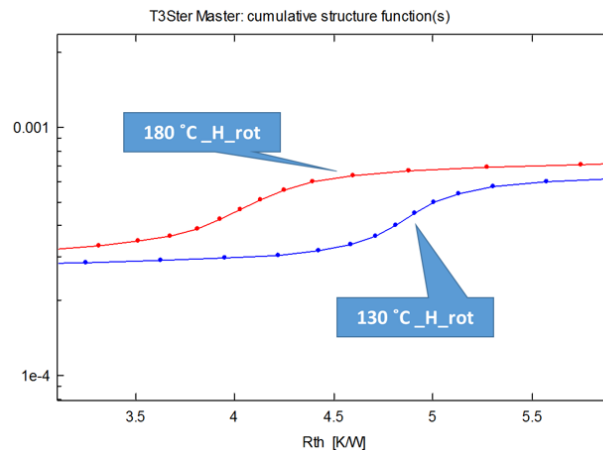


Abbildung 7.5.: Thermische Strukturfunktion im Bereich des Silberleitklebers nach unterschiedlichen Aushärtetemperaturen [62]

7.2.2. Elektrisches Layout

Der elektrische Anschluss der Anode erfolgt über eine Kupferschicht, die auf der Metallkernplatine aufgebracht ist. Somit fließt die im Chip entstehende Wärme über den Silberleitkleber nach unten durch diese Schicht, daraufhin durch das Dielektrikum und schließlich ins Metall der Leiterplatte. Die Kathode, welche sich oben auf dem Halbleiterchip befindet, ist über einen Bonddraht mit einem weiteren Kupferpad verbunden. Da dieser Draht jedoch sehr dünn ist, ist die Wärmeabfuhr hier gegenüber der Richtung nach unten vernachlässigbar.

Für die Dimensionierung des Kupferpads spielen vor allem die Größe und Dicke der Fläche eine Rolle. Beide Parameter werden variiert, um deren Einfluss auf den Wärmewiderstand zu untersuchen. Besonders ist dabei zu beachten, dass Kupfer eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Die Größe der Kupferschicht wird von etwa 1 mm × 1 mm bis 5 mm × 5 mm schrittweise vergrößert, die Breite der angeschlossenen Leiterbahn bleibt dabei unverändert bei einem Millimeter.

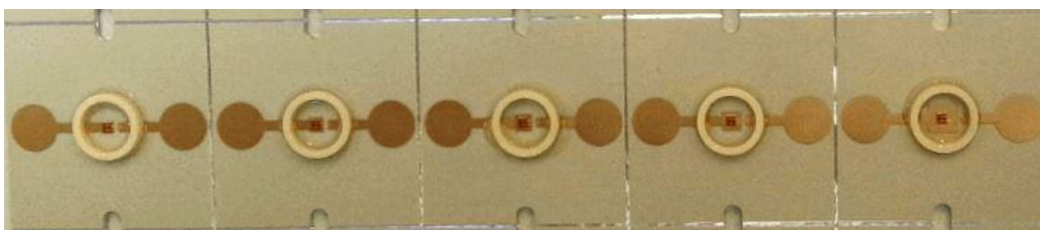


Abbildung 7.6.: Messmuster von COB-LEDs: Variation der Fläche der Kupferauflage [62]

Das Ergebnis der thermischen Messung ist in folgender Abbildung 7.7 dargestellt.

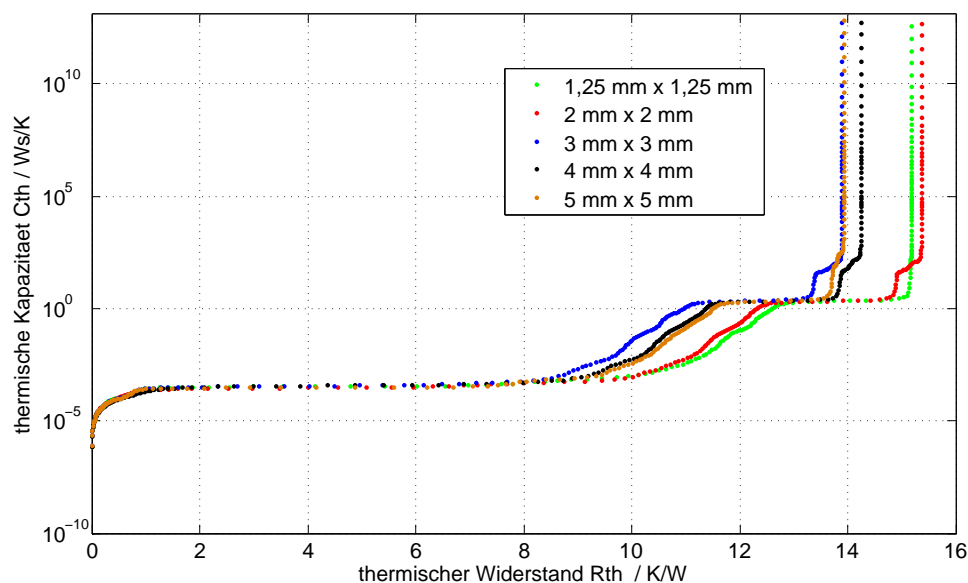


Abbildung 7.7.: Strukturfunktionen bei verschiedenen Flächenausmaßen der Kupferauflage

Die kleinen Oberflächen (grüne und rote Kurve) weisen höhere thermische Widerstände auf. Unterschiede stellen sich im Bereich des Dielektrikums ein. Dies liegt daran, dass sich durch unterschiedliche Flächen des Kupferlayouts die Wärmespreizung ändert. Ist die Querschnittsfläche des Wärmeflusses in das Dielektrikum größer, so verringert sich der thermische Widerstand. Bei der blauen Kurve handelt es sich um einen Ausreißer, theoretisch sollte sie sich in die Reihe einfügen.

7.2.3. Dielektrikum

Den Einfluss des Dielektrikums auf den thermischen Widerstand zeigt die folgende Abbildung.

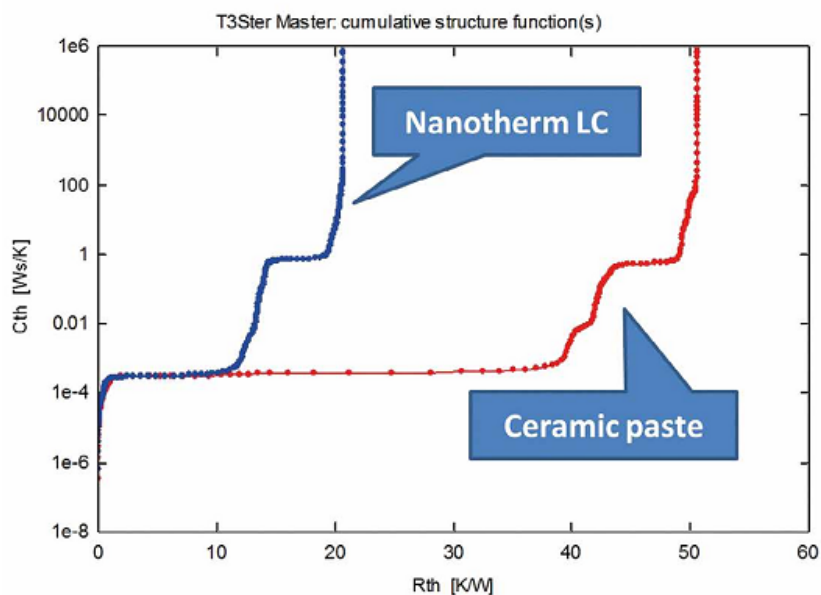


Abbildung 7.8.: Auswirkung verschiedener Dielektrika auf die Strukturfunktion [63]

In der Strukturfunktion (Abbildung 7.2) wird klar, dass die thermischen Widerstände des Dielektrikum und Platinenkernmaterial den Hauptanteil am gesamten thermischen Widerstand besitzen. Daher sollte besonders in diesen beiden Bereichen eine Reduzierung des Widerstands erfolgen, wenn die thermische Wärmeabfuhr des LED-Packages verbessert werden soll.

Der thermische Widerstand von Nanotherm LC ist kleiner, da das keramische Material direkt auf das Aluminiumsubstrat aufgebracht ist. Die keramische Paste ist dagegen erstens dicker, zweitens enthält sie Polymere, die eine schlechtere Wärmeleitung aufweisen.

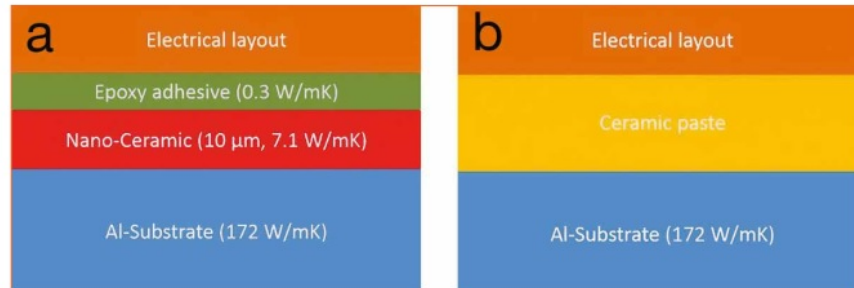


Abbildung 7.9.: Strukturvergleich zweier Leiterplatten mit unterschiedlichen Dielektrika [63]

7.2.4. Herstellungsprozess

Die Vereinzelung der Platinen erfolgt durch Sägen oder Brechen. Die dazu nötigen Bruchstellen werden durch Stanzen erzeugt. Die mechanische Beanspruchung ist je nach Herstellungsprozess verschieden, beim Sägen treten unter anderem Vibrationen auf. Als Dielektrikum dient Titanoxid (TiO_x), das als Paste oder mittels PVD-Verfahren auf die Metallkernplatine aufgebracht wird. Der Einfluss des Herstellungsprozesses auf das thermische Verhalten wird in Abbildung 7.10 dargestellt.

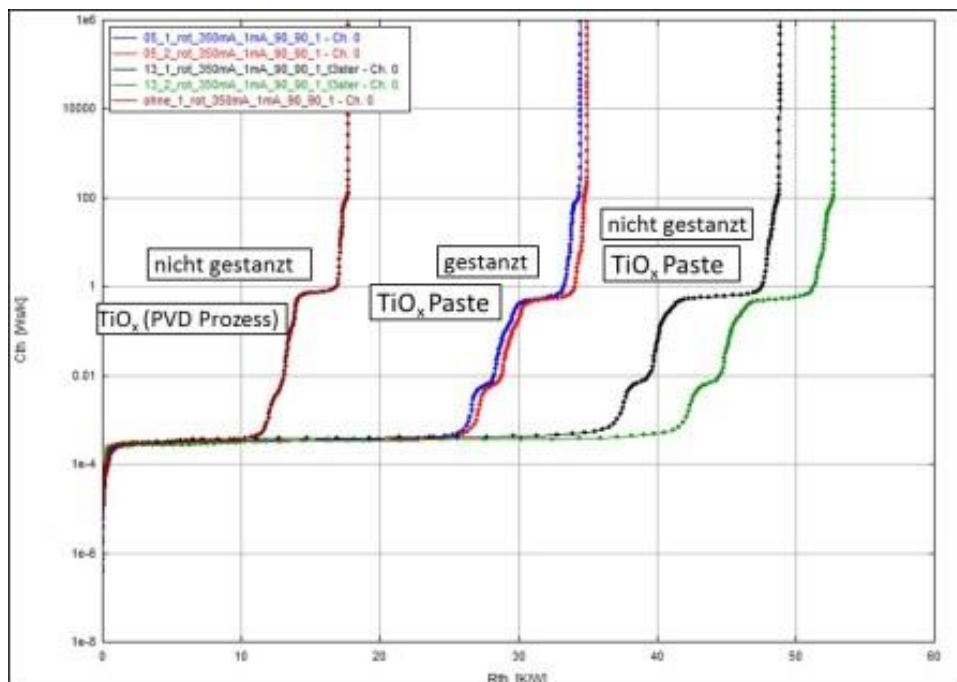


Abbildung 7.10.: Strukturfunktionen nach verschiedenen Herstellungsverfahren der Platine

Die beiden verschiedenen Technologien des Dielektrikum wirken sich stark auf die thermische Leitfähigkeit aus. Die Paste weist einen mehr als doppelten thermischen Widerstand im Vergleich zum PVD-Prozess auf. Die gestanzten Platinen führen zu einem kleineren thermischen Widerstand als gesägte Platinen. Außerdem weist der Unterschied der beiden Strukturfunktionen der gesägten Proben auf eine höhere Streuung hin. Aufgrund der geringen Anzahl an Messobjekten lässt sich hier jedoch keine allgemeine Aussage über die Variation innerhalb eines Herstellungsprozesses aussagen.

7.3. Untersuchung der oberen Packagebestandteile

7.3.1. Silikonverguss

Die Temperaturerhöhung nach Einschalten des Chips verläuft wegen unterschiedlichen Schichten nicht konstant, sondern stufenförmig. Die Erhöhung ist abhängig vom thermischen Widerstand und der thermischen Leistung, welche in das System eingebracht wird.

Zum Schutz des LED-Chips wird oft ein Silikonverguss verwendet, der den Chip umschließt. Es stellt sich daher die Frage, ob diese Vergussmasse das thermische Verhalten beeinflusst. Wie bereits gezeigt ist der Wärmetransport durch Strahlung und Konvektion gering. Daher ist lediglich durch Wärmeleitung eine deutliche Änderung der Wärmeabfuhr möglich. Der Wärmestrom kann jedoch nur an den Stellen abfließen, an denen der Silikonverguss mit der Platine direkten Kontakt aufweist. Beide Szenarien werden in folgender Abbildung skizziert.

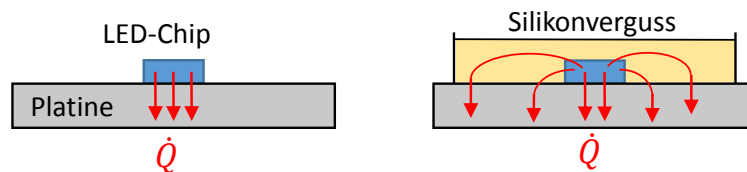


Abbildung 7.11.: Package mit rohem Chip (links) und Silikonverguss (rechts). Die thermische Leistung fließt über Wärmeleitung je nach Aufbau in verschiedenen Pfaden in die Platine.

Je größer diese Kontaktfläche von Platine und Silikon, desto höher sollte der Einfluss sein. Zur Ermittlung des Silikoneinflusses auf die Wärmeabfuhr wird folgende Untersuchung durchgeführt. Zuerst wird ein roher LED-Chip, also ohne Verguss thermisch transient gemessen. Daraufhin erfolgt der Verguss mit Silikon, welcher innerhalb eines Rings aufgefüllt wird. Der LED-Chip ist in diesem Fall für eine Anwendung ohne Vergussmaterial optimiert, daher führt der Kontakt zum Silikon hier zu einer niedrigeren Strahlungsauskopplung. Dies hat eine höhere thermische Leistung zu Folge, die für die weitere Betrachtung besonders zu beachten ist. Insgesamt wurden drei Packages untersucht, für ein Messobjekt werden die verschiedenen Leistungen exemplarisch in folgender Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2.: Leistungen im LED-Package (roher Chip und nach Silikonverguss)

LED	elektrische Leistung P_{el}	optische Leistung R_{op}	thermische Leistung P_{th}
roh	1,09 W	0,49 W	0,60 W
vergossen	1,09 W	0,31 W	0,78 W

Bei gleicher eingebrachter elektrischer Leistung von etwa 1,09 W bei einem Konstantstrom von 350 mA unterscheiden sich die optischen und thermischen Leistungen deutlich. Bei nicht veränderten thermischen Randbedingungen sollte sich der vergossene Chip aufgrund seiner höheren thermischen Leistung stärker aufheizen. Die nach Einschalten innerhalb von 60 s gemessene Vorwärtsspannung wird in die Chip-Temperatur umgerechnet und in Abbildung 7.12 dargestellt.

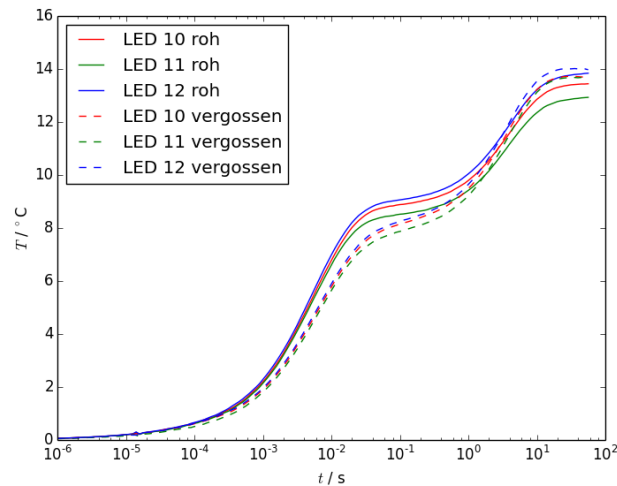


Abbildung 7.12.: Absolute Temperaturerhöhung bei rohen und vergossenen LED-Chips

Das Diagramm zeigt, dass sich die Temperaturanstiege der rohen und vergossenen Chips teilweise überlappen. Dies ist ein erster Hinweis dafür, dass sich die Wärmeableitung durch den Silikonverguss geändert haben muss. Für eine klarere Einschätzung werden alle Temperaturanstiege für eine angenommene thermische Leistung von 1 W neu berechnet (Abbildung 7.12).

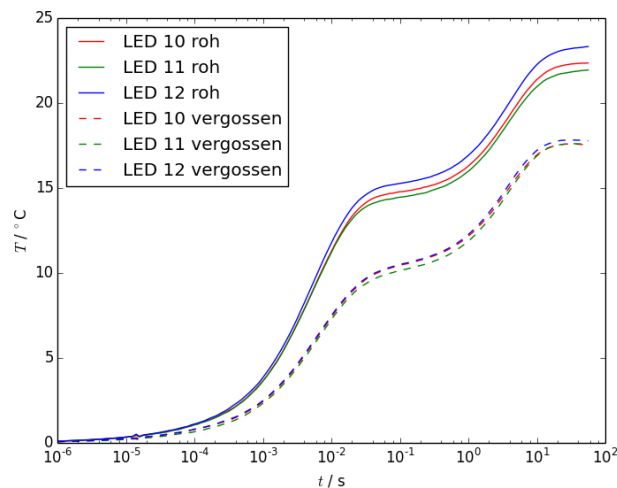


Abbildung 7.13.: Auf thermische Leistung normierte Temperaturerhöhung bei rohen und vergossenen LED-Chips

Die Kurven der rohen Chips (durchgezogene Linien) liegen oberhalb der gestrichelten Linien, die den vergossenen Chips zuzuordnen sind. Nach 100 ms ist bereits ein Unterschied von 5 K zu verzeichnen,

wenn eine Wärmeleistung von 1 W eingebracht wird. Dies bedeutet, dass der Silikonverguss eine kühlende Wirkung für den LED-Chip zur Folge hat. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in einer Studie nachgewiesen worden, in der thermische Widerstände von Chip-on-Board-LEDs mit und ohne klarer Verkapselung gemessen wurden [64].

7.3.2. Parallelwiderstand

Der Einfluss des Vergusses soll im Folgenden weiter untersucht werden. Dazu wird ein Layer (Plättchen) aus Silikon und Leuchtstoff auf den blauen Chip befestigt. Dieser wird thermisch vermessen und seine Strukturfunktion ermittelt. Nachfolgend wird das Package mit Silikon vergossen, wodurch sich der thermische Widerstand ändert. Die thermische Leistung bei einem Messstrom von 700 mA steigt von 1,64 W auf 1,69 W an, da weniger Strahlung ausgekoppelt wird. Trotz dieser leicht erhöhten Leistung nimmt der thermische Widerstand nach dem Verguss ab. Dies liegt daran, dass die entstehende Wärmeleistung auch über den Verguss seitlich weg und dann nach unten zur Platine fließen kann. Aufgrund des großen Verhältnis von Vergussbedeckung und Chipoberfläche ist der zusätzlich parallel abfließende Wärmestrom so hoch, dass es deutlich in der Strukturfunktion erkennbar ist (Abbildung 7.14).

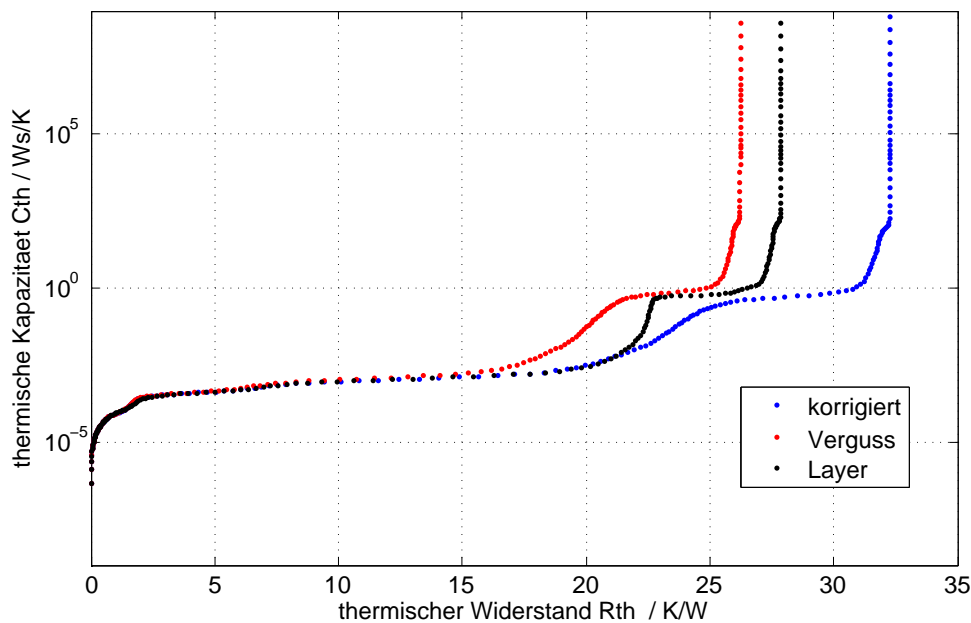


Abbildung 7.14.: Strukturfunktionen: unvergossener LED-Chip (schwarz), nach dem Verguss mit Silikon (rot) und mittels parallelem Widerstand korrigierte Funktion (blau)

Die schwarze Kurve entspricht der Strukturfunktion des Layers ohne Verguss. Es sind klare Stufen zu erkennen, die den jeweiligen Schichten des Packages entsprechen. Der steil ansteigende Ast ist der Leiterplatte zuzuordnen. Für den größten Anteil des thermischen Widerstands ist wiederum das Dielektrikum zuständig. Mit einem klaren Verguss ändert sich das thermische Verhalten, was eine Änderung der Strukturfunktion nach sich führt. Die rote Kurve zeigt einen nach links verschobenen Anstieg im Bereich der Leiterplatte. Dies liegt daran, dass sich die Wärmeströme im Vergleich ohne Verguss geändert haben. Ein Teil des Wärmestroms fließt nun durch den Verguss (siehe Abbildung 7.11), der einen

direkten Kontakt mit dem Dielektrikum der Leiterplatte aufweist. Dadurch erhöht sich die vom Wärmestrom durchflossene Querschnittsfläche, was zu einer Reduzierung des thermischen Widerstands führt.

Bei der Auswertung des transienten Temperaturverlaufs besteht die Möglichkeit einen parallelen Widerstand beizufügen. Das Netzwerk erweitert sich dadurch um einen Zweig, dessen thermischer Widerstand beliebig gewählt werden kann. Als Ergebnis wird eine neue Strukturfunktion gebildet, welche zusammen mit dem parallelen Widerstand die vorher gemessene Strukturfunktion erzeugt. Diese Kurve liegt weiter rechts, da die Parallelschaltung immer zur Verringerung des Gesamtwiderstands führt. Die blaue Kurve entspricht dem thermischen Verhalten, welche dem direkten Wärmestrom nach unten in die Leiterplatte entspricht. Zusammen betrachtet mit dem parallelen Widerstand ergibt sich wieder die ursprünglich gemessene rote Kurve des Packages mit Verguss.

Der Wert des parallelen Widerstands wird nun so lange verändert, bis die blaue Kurve bis zu einem bestimmten Punkt deckungsgleich mit der schwarzen Kurve verläuft, da diese den Wärmestrom ohne Verguss darstellt. In diesem Fall beträgt der Wert des parallelen thermischen Widerstands 140 K/W.

Der Gesamtwiderstand bei Parallelschaltung zweier Widerstände wird auf folgende Weise berechnet.

$$R_{th,ges} = \frac{R_{th,k} \cdot R_{th,p}}{R_{th,k} + R_{th,p}} \quad (7.3)$$

Zur Überprüfung der Methodik werden nun die Werte des neu bestimmtem ($R_{th,k}$) und parallelen Widerstands ($R_{th,p}$) mit Formel 7.3 berechnet. Der neue Gesamtwiderstand sollte dem der Messkurve mit Verguss entsprechen.

Tabelle 7.3.: Thermische Widerstände unterschiedlicher Layermaterialien

Layer	$R_{th,k}$	$R_{th,p}$	$R_{th,ges}$
Standard	32 K/W	140 K/W	26 K/W
Keramik	35 K/W	60 K/W	22 K/W

7.4. Fazit des 7. Kapitels

Durch die Herstellung von eigens entworfenen LED-Packages konnten thermische Analysen durchgeführt werden, die bei kommerziell erhältlichen nur eingeschränkt möglich sind. Die genaue Kenntnis der Aufbauten konnte mit Schlißbildern gewonnen werden. Die Interpretation der thermischen Strukturfunktion führt zu korrekten Zuordnungen der wärmeabführenden Schichten im Package mit ihren zugehörigen Wärmewiderständen und -kapazitäten.

Die Variation verschiedener Schichten wie des Silberleitkleber, elektrischen Layouts oder Dielektrikums verändert die Wärmeflüsse und thermischen Widerstände im LED-Package. Wird die Geometrie des elektrischen Layouts geändert, so hat dies Einfluss auf die Wärmespreizung. Die Analyse zeigt, dass die größte Verringerung des thermischen Widerstands durch die Art der Vereinzelung der Platinen, sowie durch einen Wechsel des Dielektrikums möglich ist.

Der Chip selbst und der auf dem Chip aufgebrachte Leuchtstoff stellen die Hauptwärmequellen eines

7. LED-Package

LED-Packages dar. Messungen mit und ohne Silikonverguss zeigen, dass ein Teil des Wärmeflusses durch die Silikonverkapselung bis zur Platine gelangt. Je nach Geometrie des LED-Packages kann dies zu einer weiteren Kühlung des Chips führen. Das Material, in dem der Leuchtstoff eingebettet wird, trägt ebenfalls zur Wärmeabfuhr bei. In der Regel ist der Leuchtstoff direkt auf den Chip in einer Silikonschicht aufgebracht oder befindet sich in einem Silikonplättchen. Die Wärmeleitung wird verbessert, wenn der Leuchtstoff anstatt dessen in einem Keramikplättchen sitzt.

8. Thermische Einflüsse

Der Einfluss der Temperatur auf die LED-Lebensdauer wurde in den vorigen Kapiteln erörtert. Näher betrachtet sind viele Temperaturen an unterschiedlichen Orten im LED-Package für die Analyse von Alterungsmechanismen relevant. In diesem Kapitel soll der Temperatureinfluss auf gesamte LED-Systeme untersucht werden. Zusammenhänge zwischen der emittierten Leistung und dem Spektrum eines LED-Packages wurden bereits im Grundlagenkapitel erläutert. Durch die speziellen thermischen Eigenschaften eines LED-Systems kommt es daher auch während des Betriebs und bei Messungen zu Veränderungen der emittierten optischen Strahlung. Die Ursachen und Auswirkungen des thermischen Verhaltens sollen nun näher untersucht werden.

8.1. Thermisches Verhalten von LED-Leuchten

Für ein grundsätzliches Verständnis des thermischen Verhaltens von LED-Leuchten dient vorerst die Betrachtung unterschiedlicher Arten der Wärmeübertragung. Je nach Art der Anwendung unterscheiden sich die Gehäuse der Leuchten. Daher werden die thermischen Einflüsse der einzelnen Bestandteile untersucht. Außerdem findet eine Analyse statt, inwiefern die Temperatur Änderungen in den daten gängiger lichttechnischer Messungen verursacht.

8.1.1. Thermischer Pfad einer LED-Leuchte

Das thermische Ersatzschaltbild in Abbildung 8.1 zeigt den Wärmefluss Φ in einer Leuchte vom LED-Package bis nach außen zum Gehäuse, wo meist die Wärmeabgabe an die Umgebung stattfindet. Auf dem Modul wird die Wärmeleistung aus der LED vor allem über Wärmeleitung zum T_C -Punkt und von dort aus bis zum im Regelfall metallischen Leuchtengehäuse transportiert. Dieses dient als Kühlkörper und gibt nun hauptsächlich über Konvektion und Strahlung Wärme an die Umgebung ab. Seine Temperatur wird im Ersatzschaltbild mit T_K bezeichnet. Die Umgebungstemperatur T_a (ambient temperature) schließt neben der Raumlufttemperatur auch (heiße) Oberflächen mit ein. Es existieren weitere Bauformen, bei denen das LED-Modul nicht direkt mit dem Außengehäuse verbunden ist und die Wärme über innen liegende Kühlkörper vorerst an den Innenraum der Leuchte abgibt. Daher ist das Ersatzschaltbild nicht auf jede Bauform anzuwenden.

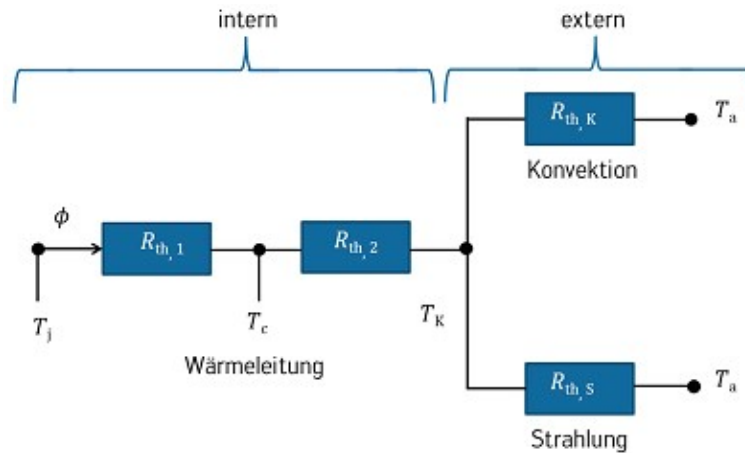


Abbildung 8.1.: Ersatzschaltbild zur thermischen Betrachtung einer LED-Leuchte

8.1.2. Einbrennverhalten

Bei LED-Leuchten wird das Einbrennverhalten hauptsächlich durch die Änderung der Chip-Temperatur bestimmt. Ab dem Einschalten heizt sich die LED immer weiter auf, bis ein thermisch stabiler Zustand erreicht wird. Dies liegt vor allem daran, dass die Leiterplatten und der Leuchtenkühlkörper eine gewisse Zeit benötigen, um ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung zu erreichen. Der Vorgang kann vereinfacht mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden, was bereits Newton in seinem Abkühlungsgesetz formulierte [65]. Werden die thermischen Kapazitäten der LED und Leiterplatte gegenüber dem Kühlkörpers vernachlässigt, so ergibt sich für die LED-Temperatur folgende ansteigende Exponentialfunktion.

$$T(t) = (T_E - T_0) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + T_E \quad (8.1)$$

Gleichung 8.1 beinhaltet die Anfangstemperatur T_0 sowie die Endtemperatur T_E , die sich nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts einstellt. Die Zeitkonstante τ ist eine charakteristische Größe, die in diesem Fall den Zeitpunkt angibt, an dem das System etwa 63 % seines Temperaturanstiegs erreicht hat.

Da die optische Effizienz des Halbleiters im vorliegenden Temperaturbereich näherungsweise linear mit der Temperaturerhöhung abfällt, folgt die Höhe der emittierten Strahlung einer entgegengesetzt fallenden Exponentialfunktion.

$$\Phi(t) = (\Phi_0 - \Phi_E) \cdot e^{-t/\tau} + \Phi_E \quad (8.2)$$

Hierbei ist T_0 der Lichtstrom unmittelbar nach dem Einschalten und T_E der Wert, auf den sich die Leuchte stabilisiert. Zur Aufnahme dieses Zusammenhangs können auch andere lichttechnische Größen verwendet werden, wenn er sich proportional zum Lichtstrom verhält.

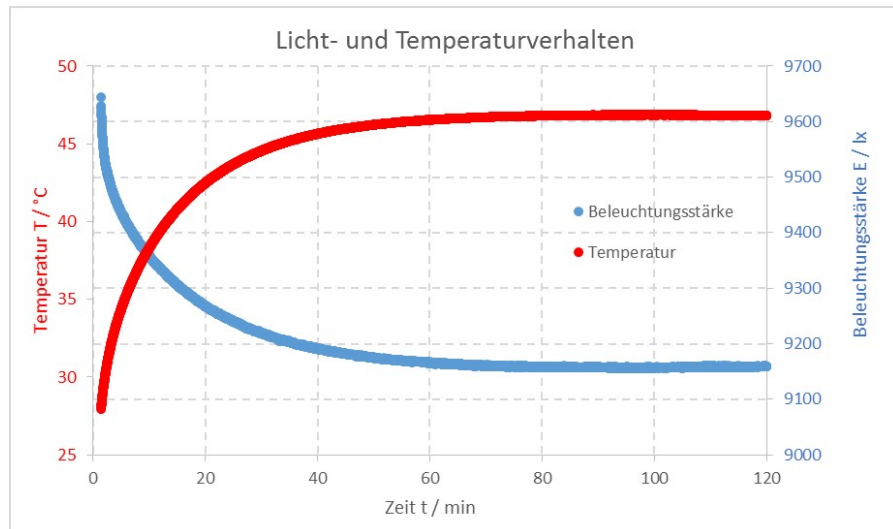


Abbildung 8.2.: Zeitliches Verhalten der Temperatur und Beleuchtungsstärke einer LED-Leuchte nach dem Einschalten

Exponentielle Anpassungsfunktion

Die Anpassung einer exponentiellen Funktion an Messdaten der Lichtstärke im zeitlichen Verlauf soll nun exemplarisch gezeigt werden. Nach dem Ende der Messzeit kann die Anpassungsfunktion den weiteren Temperaturverlauf extrapolieren. Dies ist für die Bestimmung der Stabilisierungszeit und den Wert des gesamten relativen Lichtstärkerückgangs wichtig.

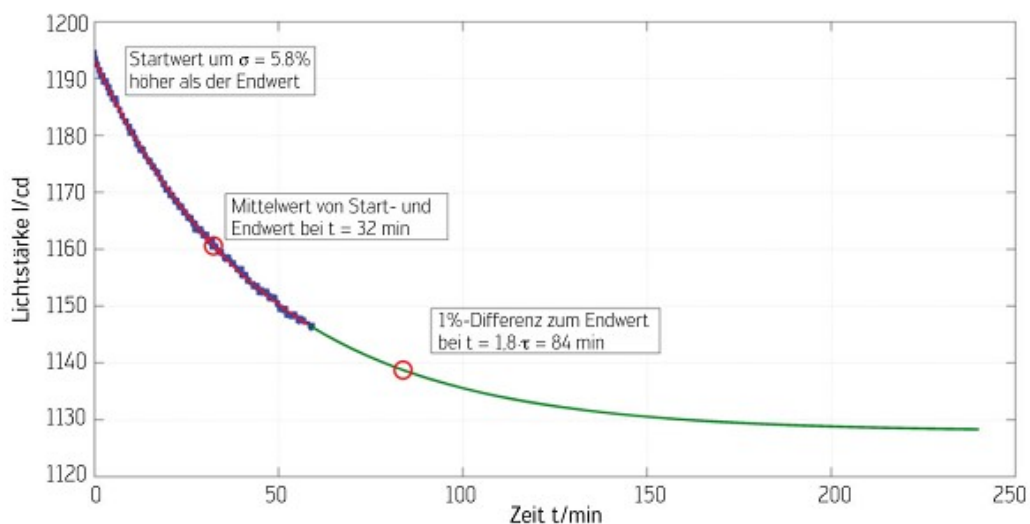


Abbildung 8.3.: Typisches Einbrennverhalten einer LED-Leuchte, die Lichtstärkedaten werden mittels exponentieller Funktion angepasst und extrapoliert

Vergleich von Netzteil und COB-Modul

Auffallend ist die Kurve, die das Temperaturverhalten des Netzteils beschreibt. Einerseits unterscheidet sich ihre Form zu der des COB-Moduls, andererseits repräsentiert sie mit etwa 55 % die Maximaltemperatur aller Bauteile. Das Netzteil befindet sich in einem eigenen Gehäuse und ist somit thermisch entkop-

pelt. Für das Netzteil und das COB-Modul wird die exponentielle Funktion 8.1 an die Daten angepasst. Die Funktionsparameter enthalten unter anderem die Zeitkonstante τ , die für das Netzteil 23 min und für das COB-Modul 14 min beträgt.

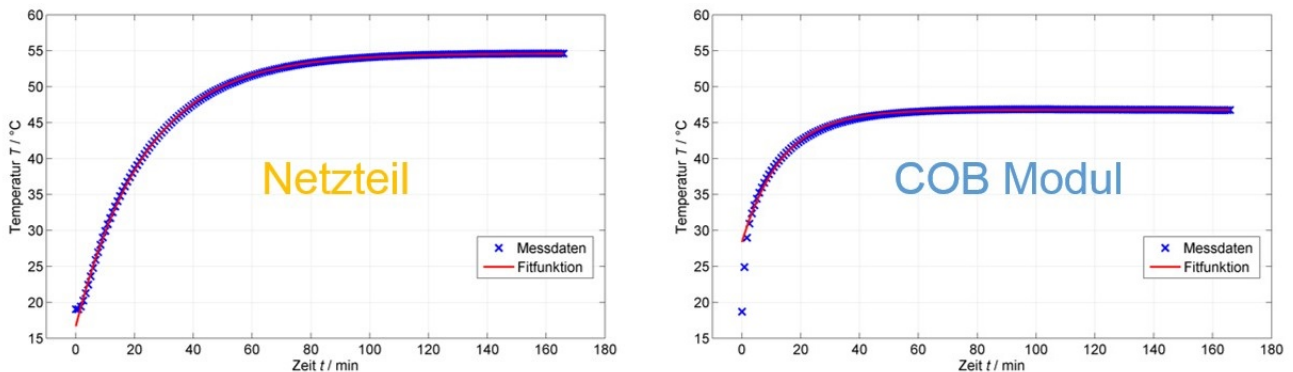


Abbildung 8.4.: Temperaturanstieg von Netzteil und COB-Modul während des Einbrennverhaltens

Die Zeitkonstante hängt über $\tau = R_{th} \cdot C_{th}$ mit dem thermischen Widerstand und der thermischen Kapazität zusammen. Dies ist jedoch nur gültig, wenn kleine Kapazitäten gegenüber der großen thermischen Kapazität des Leuchtengehäuses vernachlässigt werden. Mit Kenntnis der Zusammensetzung und den jeweiligen Masseanteilen der Gehäusematerialien ließe sich theoretisch diese thermische Kapazität bestimmen. Somit ist allein durch die lichttechnische Messung des Einbrennvorgangs und einer genauen Bauteilkenntnis der thermische Widerstand berechenbar, ohne dass Temperaturen im System gemessen werden müssen. Der thermische Widerstand zwischen einer bestimmten Stelle in der Leuchte bis zur Umgebung lässt sich aus folgendem Zusammenhang berechnen.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{th}} \quad (8.3)$$

Die thermische Leistung wird über wärmeableitende Materialien nach außen transportiert. Je nach Höhe des thermischen Gesamtwiderstands bildet sich eine Temperaturdifferenz aus. Es ergeben sich Widerstände von $36 \text{ K/4 W} = 9 \text{ K/W}$ für das Netzteil, sowie $28 \text{ K/20 W} = 1,4 \text{ K/W}$ für das COB-Modul. Somit ist der thermische Widerstand des Netzteils um ein Vielfaches höher. Dies liegt hauptsächlich am Netzteilgehäuse, welches aus Kunststoff gefertigt ist und daher Wärme schlechter ableitet als Metall.

8.1.3. Einbrennverhalten von Straßenleuchten

Der mechanische Aufbau von Straßenleuchten unterscheidet sich je nach Leistung und Anwendung, was zu unterschiedlichem thermischen Verhalten führt. Zusätzlich beeinflusst die Qualität der thermischen Anbindung des LED-Moduls an die Umgebung ebenfalls das thermische Verhalten. Die folgende Analyse des Einbrennvorgangs verschiedener Straßenleuchten lässt Rückschlüsse auf das thermische Management der jeweiligen Leuchte zu. Zum Vergleich verschiedener Zeiten wird anstatt einer Halbwertszeit die Zeit bestimmt, nachdem die Lichtstärke nur noch ein Prozent Abweichung zum stabilisierten Zustand hat. Außerdem wird der relative Lichtstärkerückgang betrachtet, der sich mit Hilfe der exponentiellen Anpassungsfunktion berechnen lässt. Abbildung 8.5 zeigt vier Einbrennkurven unterschiedlicher Straßenleuchten.

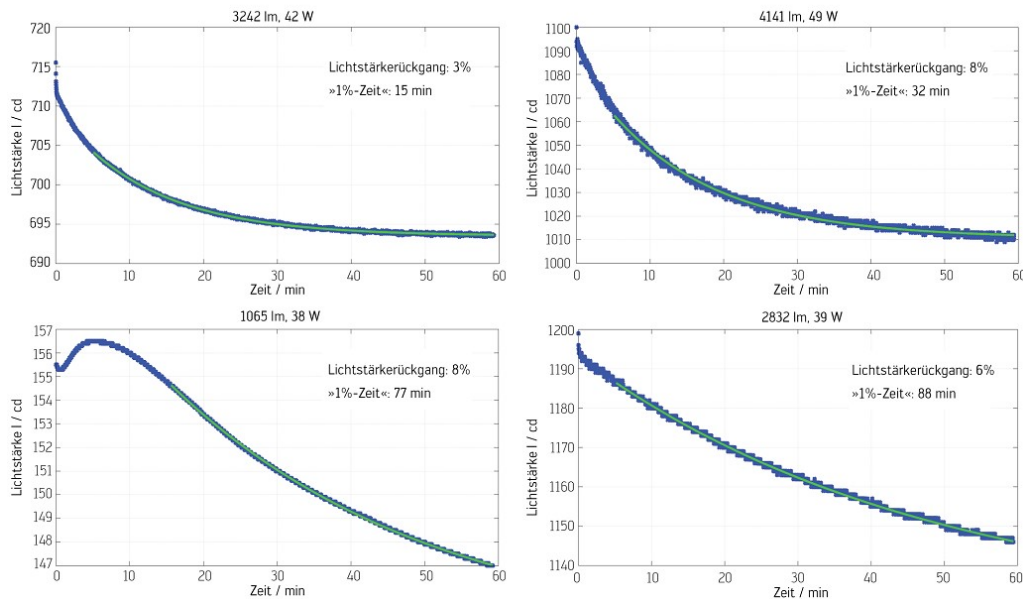


Abbildung 8.5.: Einbrennkurven von unterschiedlichen Straßenleuchten. Die Daten (blau) werden mittels exponentieller Fitfunktion (grün) angenähert.

Der Lichtstärkerückgang und die Zeit bis zur Stabilisierung unterscheiden sich je nach Leuchte stark. Je besser das LED-Modul seine Wärme abführen kann und je effizienter die eingesetzten LEDs selbst sind, desto weniger stark prägt sich dieser Rückgang aus. Die Zeitkonstante wird neben dem thermischen Widerstand auch von der thermischen Kapazität beeinflusst. Leuchten mit großer Masse weisen daher lange Einbrennzeiten bis über 90 min auf. Ein besonderer Fall ist die Einbrennverhalten, das im Diagramm links unten in Abbildung 8.5 dargestellt ist. Nach dem Einschalten sinkt die Lichtstärke innerhalb der ersten Minute wie gewohnt ab, in den folgenden vier Minuten erhöht sie sich jedoch, was durch das Vorschaltgerät hervorgerufen wird. Erst danach findet keine Nachregelung mehr statt, so dass die Lichtstärke der Leuchte in den gewohnten Abklingvorgang übergeht. Der Startpunkt der Anpassungsfunktion liegt hier daher auch weiter rechts.

8.1.4. Einfluss der Brennlage

Je nach Anwendungsbereich befinden sich Leuchten und Lampen in unterschiedlichen Brennlagen. Häufig kommt in der Praxis die horizontale Brennlage vor, bei der das Licht nach unten gerichtet ist. Es sind jedoch durchaus auch vertikale und schräge Brennlagen denkbar, beispielsweise in der Industrie- und Straßenbeleuchtung. Hängen nun der Lichtstrom oder andere Größen von der Brennlage ab, so sollte dies für Anwender auch im Datenblatt vermerkt sein. Die Messung unterschiedlicher Brennlagen kann statisch erfolgen und bringt somit weniger Aufwand mit sich, als eine komplette goniophotometrische Messung. Zur Messung der Lageabhängigkeit muss die Leuchte um eine ihrer Achsen gedreht werden.

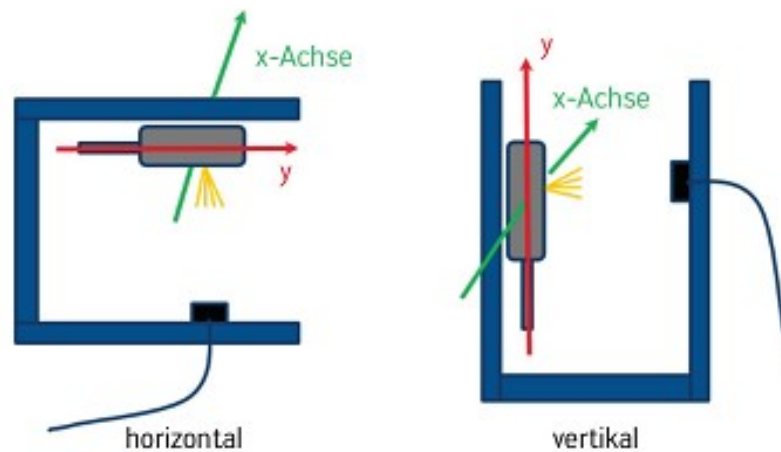


Abbildung 8.6.: Messaufbau zur Untersuchung unterschiedlicher Brennlagen einer LED-Leuchte, der gegenüber angebrachte Sensor misst die Beleuchtungsstärke

In Abbildung 8.6 entsteht der Wechsel von horizontaler zu vertikaler Brennlage über eine Drehung um die x-Achse. Dazu dient ein mechanischer Aufbau, der einen Beleuchtungsstärkesensor senkrecht zur leuchtenden Fläche in einer geometrisch gleichen Position hält. Selbst kleine Abstandsänderungen haben messbare Auswirkungen auf die Beleuchtungsstärke. Daher entsteht nach der Drehung ein Offset, der bei der Auswertung mitberücksichtigt werden muss.

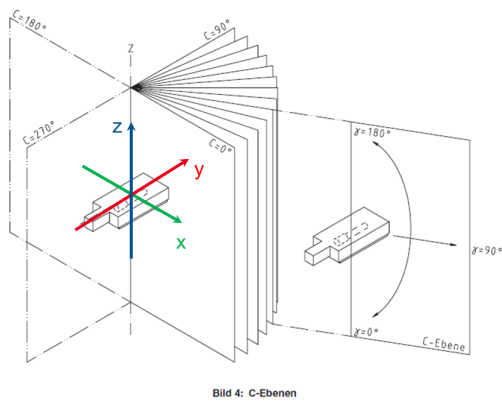
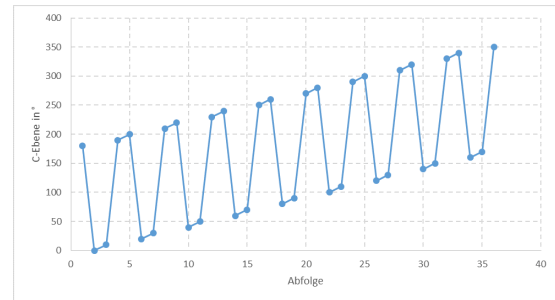
8.1.5. Temperatureinfluss bei goniophotometrischen Messungen

Für winkelabhängige Messungen der Lichtstärke steht ein Goniophotometer nach dem Prinzip des Leuchtenwenders zur Verfügung. Als Messobjekt dient eine Leuchte in Form eines Downlights mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 39 W, die zur Wärmeabführung einen außerhalb angebrachten Strangkühlkörper mit großen Kühlrippen besitzt. Die Lichtstärkeverteilungskurven besitzen aufgrund einer Streuscheibe weiche Verläufe.

Der Leuchtenwender fährt nacheinander die C-Ebenen ab, deren Anzahl sich durch die Feinheit der Winkelauflösung ergibt. Das Messobjekt wird dabei um die z-Achse zur nächsten Ebene gedreht. Durch die Lagen der Halbebenen im Raum entsteht eine alternierende Messaufnahme der C-Ebenen. Der Start erfolgt mit der C180-Ebene, die Messung endet hier im Beispiel aufgrund der Auflösung in 10°-Schritten bei der C350-Ebene (Abbildung 8.7).

Die Speicherung der Messwerte erfolgt im Eulumat-Format, einer Textdatei, in der lediglich eine Spalte für alle Informationen zur Verfügung steht. Mit Hilfe spezieller Editoren können die Lichtstärken der einzelnen Winkel in einer Tabelle dargestellt werden. Jede Spalte repräsentiert hierbei eine C-Ebene und enthält alle γ -Winkel.

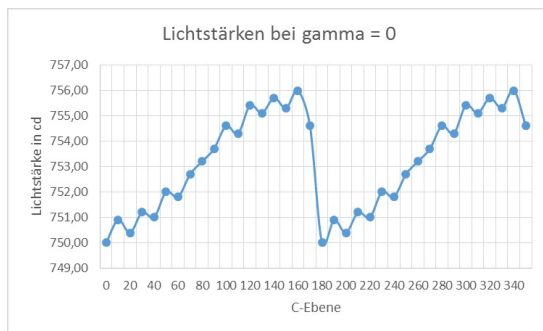
Das Messobjekt befindet sich beim Abfahren jeder C-Ebene in einem anderen Winkel zur Richtung der Erdanziehung. Um den Temperatureinfluss bei allen Winkeln zu bestimmen, kann ein Hilfsphotometer im festen geometrischen Abstand zur Leuchte montiert werden, um die relative Änderung des Lichtstroms mit aufzuzeichnen. Es erfordert jedoch höchste Präzision und Stabilität, damit sich bei der

Bild 4: C-Ebenen
C-γ-Koordinatensystem

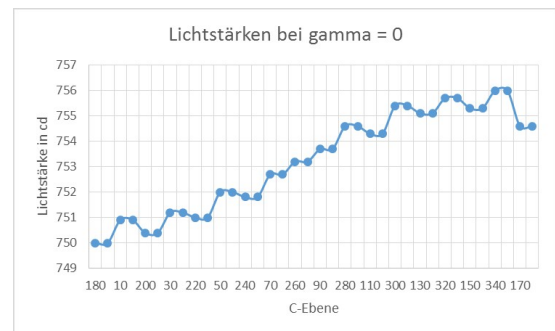
zeitliche Abfolge der C-Ebenen

Abbildung 8.7.: Zeitliche Winkelabtastung bei Messung mit Goniophotometer

Drehung keine Schwingungen oder Abstandsänderungen ergeben. Dies ist als Vorschlag zur nachträglichen Lagekorrektur im Standard CIE S 025/E:2015 [66] enthalten. Für die hier vorgestellte Untersuchung wurde jedoch eine andere Methode entwickelt. Dazu wird in jeder C-Ebene nur der Winkel bei $\gamma=0^\circ$ betrachtet. Die Leuchte steht hier immer genau senkrecht zur Sensoroberfläche, allein eine Drehung um die z-Achse findet statt. In einem anderen Bild liegen diese Punkte alle am Pol einer gedachten Kugeloberfläche, auf der sich der Sensor relativ zur Leuchte bewegt. Bei nicht stark gebündelten Strahlengängen sollte daher der Wert der Lichtstärke für 0° in jeder C-Ebene identisch sein. Somit prägt sich ein möglicher Temperaturunterschied direkt in diese Messwerte ein. Der Einfluss dieser Unterschiede aufgrund verschiedener Brennlage während der Messung kann somit hinterher noch festgestellt werden, wenn die zeitliche Abfolge der einzelnen Messwerte bekannt ist.



C-Ebenen aufsteigend



C-Ebenen zeitlich sortiert

Abbildung 8.8.: Lichtstärkewerte am Pol bei $\gamma = 0^\circ$, dargestellt für jede C-Ebene und sortiert nach C-Ebenen (links) und zeitlicher Abfolge während der Messung (rechts)

Das linke Diagramm in Abbildung 8.8 zeigt die gemessenen Lichtstärken nach aufsteigenden C-Ebenen. Zeitlich sortiert wird deutlich, dass die Lichtstärken in zwei aufeinander folgenden C-Ebenen gleich sind, da diese jeweils die gleiche Orientierung im Raum aufweisen. Außerdem steigt die Lichtstärke mit der Zeit an, geht in Sättigung und fällt zum Schluss wieder ab. Dies lässt sich damit erklären, dass die Kühlrippen der Leuchte zu Beginn der Messung waagerecht standen. Daraufhin dreht sich die Leuchte bis die Kühlrippen der Mitte des Messablaufs senkrecht stehen, um dann wieder in Richtung waagerecht zu fahren. Aufgrund der besseren Kühlung steigt nun die Lichtstärke an, geht in Sättigung

8. Thermische Einflüsse

und fällt danach wieder ab. Die thermische Trägheit des Kühlkörpers verschiebt das Maximum der Kurve nach rechts.

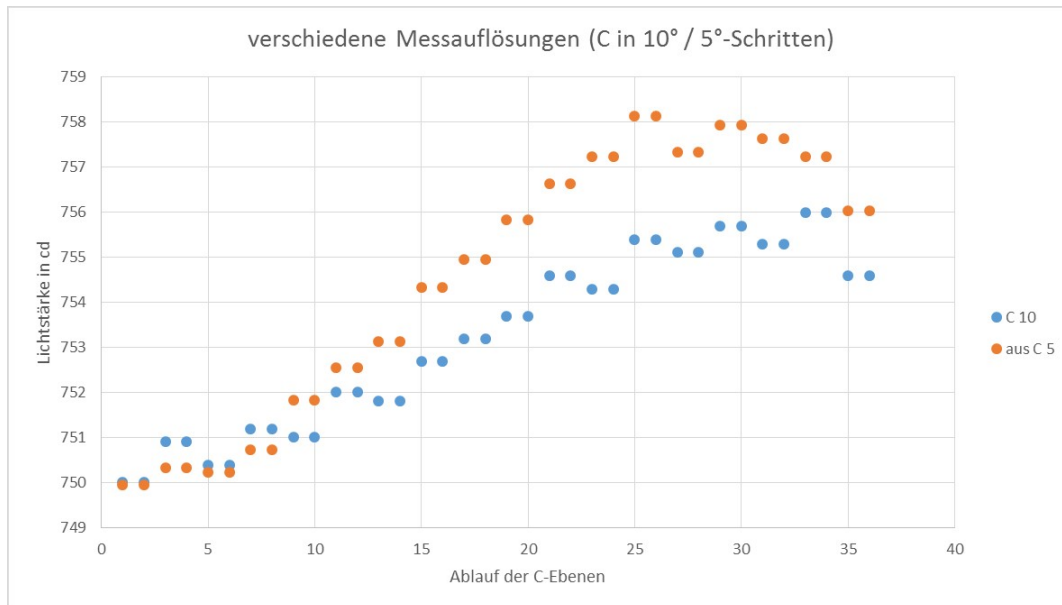


Abbildung 8.9.: Zeitliche sortierte Lichtstärkewerte der C-Ebenen, 10°-Auflösung (blau) und identische Ebenen aus der Messung mit 5°-Auflösung

Die Messzeit bei der Verwendung eines Leuchtenwenders hängt vor allem von der Anzahl der C-Ebenen ab. Die Verweildauer in einzelnen Brennlagen nimmt somit mit einer höheren Winkelauflösung zu. Um den Einfluss der Auflösung zu untersuchen, wurde dieselbe Leuchte zweimal hintereinander mit gleicher Auflösung der γ -Winkel von 1° , jedoch unterschiedlicher C-Auflösung (10° und 5°) goniophotometrisch vermessen. Zum Vergleich werden die gleichen C-Ebenen betrachtet, wiederum für $\gamma = 0^\circ$. Abbildung 8.9 zeigt den Anstieg der Lichtstärkewerte aufgrund der besseren Kühlung bei senkrecht orientierten Kühlrippen. Da bei einer höheren Messauflösung diese Orientierung länger besteht, liegen die Lichtstärkewerte der orangen Messpunkte über den Werten der blauen Kurve. Der Gesamtlichtstrom bei einer Auflösung der C-Ebenen von 5° beträgt 1413 lm, die Messung mit 10° -Auflösung 1410 lm. Dies ist lediglich ein Unterschied von 0,2 %. Insgesamt verschieben sich die Lichtstärkewerte innerhalb der Lichtstärkeverteilung jedoch um mindestens 1,1 %.

8.2. Fazit des 8. Kapitels

Das Einbrennverhalten von LED-Leuchten lässt sich gut aus einfachen thermischen Zusammenhängen herleiten. Aus der Gleichung, die den Lichtstromrückgang nach dem Einschalten einer LED-Leuchte beschreibt, lassen sich Rückschlüsse auf das thermische Design des Produkts ziehen. Die Brennlage einer Leuchte hat Einfluss auf die Temperatur des LED-Moduls und sollte daher bei der Betrachtung von Lebensdauern mitberücksichtigt werden. Den emittierten Lichtstrom beeinflusst die Brennlage bei den untersuchten Leuchten jedoch nur im niedrigen, einstelligen Prozentbereich. Eine Lagekorrektur lässt sich mit einem Hilfsphotometer erreichen, jedoch muss dazu das Messprogramm zeitlich identisch zur eigentlichen Messung ablaufen. Dies führt unweigerlich zu einer Erhöhung der Messzeit. Die hier vorgestellte Methode betrachtet für eine nachträgliche Korrektur nur einen Messwert pro C-Ebene, der

sich bequem aus der Messdatei ziehen lässt. Inwieweit dies zur Korrektur der gesamten Lichtverteilung ausreicht, sollte weiter untersucht werden. Der Einfluss der Brennlage in der Anwendung und während der Messung auf einem Goniophotometer ist bei den untersuchten LED-Leuchten in Bezug auf andere Messunsicherheiten gering. Die Messobjekte verwenden ausschließlich weiße, leuchtstoffkonvertierte Leuchtdioden zur Lichterzeugung. Zukünftige Leuchten werden jedoch Kombinationen von farbigen und weißen leuchtstoffkonvertierenden LEDs integrieren, um eine dynamische Farbtemperatureinstellung (dynamisches Licht, tageslicht-nachgesteuerte intelligente LED-Leuchten) zu gewährleisten. Der thermische Einfluss auf die Effizienz kann bei farbigen LEDs ohne Leuchtstoff um ein Vielfaches höher liegen. Daher bleibt abzuwarten, ob die Brennlageabhängigkeit verschiedener lichttechnischer Größen in Zukunft eine größere Rolle spielen wird.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Das übergreifende Thema der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Einflüsse von Temperatur und Strom auf LED-Systeme. Dabei soll ein besonderer Augenmerk auf die Zuverlässigkeit und das lichttechnische Verhalten gelegt werden. Einen Überblick der einzelnen Gesichtspunkte und Verknüpfungen mit den durchgeführten Untersuchungen stellt folgendes Schaubild dar.

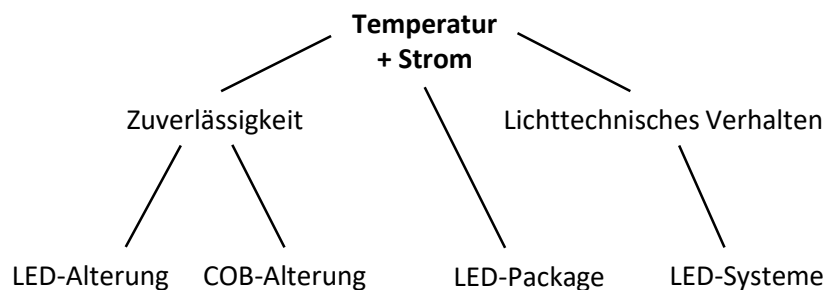


Abbildung 9.1.: Themenüberblick der Dissertation

Die Literaturrecherche zeigt, dass die überwiegende Anzahl an Langzeitdaten von LED-Packages stammen, die nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Lebensdauerberichte der Hersteller (LM-80-Reports) basieren meistens auf Temperatur- und Stromwerten, welche im betrachteten Zeitraum eine niedrige Degradation zeigen, die oft für eine belastbare Berechnung nicht geeignet ist. Eine auf den Standard TM-21-11 basierende, jedoch weiterentwickelte Methodik zur Lebensdauerextrapolation wurde von VAN DRIEL publiziert [42].

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Lebensdauermodell berücksichtigt die Einflüsse von Temperatur und Strom auf das Degradationsverhalten. Dabei ist von untergeordneter Bedeutung, mit welcher Funktion sich die Alterung beschreiben lässt. Die Definition der Lebensdauer (beispielsweise ein Rückgang auf 80 % des Anfangslichtstroms) fließt in die Bildung des Modells ein. Für verschiedene Definitionen ergeben sich daher unterschiedliche Parameter. Bereits bei der Bestimmung dieser Parameter mit gegebenen Messdaten zeigt sich, ob es für eine zuverlässige Interpolation und Vorhersage geeignet ist. Die Erreichung der definierten Lebensdauer für unterschiedliche Randbedingungen innerhalb des Messzeitraums ist dabei notwendig.

Der thermische Einfluss auf LED-Systeme wurde für verschiedene Bereiche untersucht. Ein Hersteller von Lichtmesstechnik hat seine Messergebnisse in Hinblick des Brennlageverhaltens veröffentlicht. Diese und weitere Erkenntnisse flossen in die Entwicklung der CIE Norm CIE S 025 über Testmethoden für LED-Lampen, -Leuchten und -Module ein [66]. Insbesondere das Einbrennverhalten und dessen Berechnung findet sich in einer Dissertation von SCHOLDT [67].

Die zu den Untersuchungen notwendigen Versuchsaufbauten und Testmuster lassen sich in vier Bereiche untergliedern:

- Versuchsstand zur Langzeitalterung von Hochleistungs-LEDs
- Versuchsstand zur Langzeitalterung von COB-Modulen
- Entwurf und Herstellung spezieller LED-Packages
- Messstand zur thermischen Analyse von LED-Systemen

Für die Alterung von Hochleistungs-LEDs wurde ein bereits vorhandener Versuchsaufbau weiter betrieben, um Langzeitdaten zu generieren.

Der Alterungsteststand für COB-Module weist aufgrund der hohen elektrischen und damit auch thermischen Leistung spezielle Anforderungen auf. Der neu entwickelte Teststand enthält regelbare, luftgekühlte Hochleistungskühlkörper, um die Wärme abführen zu können.

Im Rahmen einer Masterthesis wurden spezielle LED-Packages entworfen und bei einer externen Firma hergestellt. Alle thermischen Messungen erfolgten im Labor der TU Darmstadt, lediglich die Schliffbilder der LED-Packages wurden bei der externen Firma angefertigt.

Die Messungen von Leuchten erfolgten sowohl am Goniophotometer des Lichtlabors, als auch an einem selbst entwickelten Testaufbau. Außerdem stellte eine externe Firma LED-Leuchten mit eingebauten Temperatursensoren zur Verfügung. Messungen dieser Leuchten im Klimaschrank wurden ebenfalls vor Ort durchgeführt sowie deren Rohdaten übermittelt.

Im folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Themengebiete vorgestellt. Die *Forschungsfragen* sind dabei in *kursiver Schrift* hervorgehoben.

Alterung von Hochleistungs-LEDs

Die Langzeituntersuchung von Hochleistungs-LEDs zeigt, dass die Alterung sowohl von der Temperatur, als auch vom Betriebsstrom abhängig ist. Besonders wichtig ist die Kenntnis der Chip-Temperaturen, die je nach Betriebsstrom höhere Werte als die am Package definierten T_C -Temperaturen aufweisen. Ein Vergleich von Kurven gleicher Chip-Temperatur und verschiedener Ströme zeigt, dass eine Erhöhung des Stroms alleine auch zu einer stärkeren Degradation führt. Die Frage *welche der beiden Größen Temperatur und Strom für die Analyse der Alterungsergebnisse besser geeignet* ist, lässt sich daraufhin beantworten, dass die Variation der Temperatur einfacher umzusetzen ist. Der Strom kann nur dann als einzig variierender Parameter betrachtet werden, wenn zugleich die Temperatur im LED-Package bekannt ist.

Die elektrischen, optischen und thermischen Verhalten eines LED-Packages beeinflussen sich gegenseitig, laufen jedoch während der Alterung zeitlich nicht immer synchron. Die Haupteffekte der Degradation von Hochleistungs-LEDs bei hohen Temperaturen und Strömen sind die Entstehung von Rissen in der Silikonverkapselung und die Delamination der Leuchtstoffschicht. Silikonrisse führen hauptsächlich zu einer Reduzierung des Strahlungsflusses, Veränderungen des Leuchtstoffs zu Farbverschiebungen. Mit einer Abschätzung der Leuchtstofftemperatur gelingt die Beschleunigung des Effekts mittels ARRHENIUS-Methode.

Entsprechend der altersbedingten Reduzierung der optischen Leistung steigt die im Chip erzeugte thermische Leistung an. Dies führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der Temperatur während der Alterung. Eine weitere Erkenntnis ist, dass der thermische Widerstand aufgrund der Alterung des Leiterplatten-dielektrikums im Laufe der Zeit ansteigt. Aus den Langzeitdaten durchgeführte Analysen zeigen, dass sich *mit Hilfe der durchgeführten Messungen bestimmte Alterungsmechanismen erkennen und einzelnen Bereichen im LED-Package zuordnen lassen.*

Alterung von COB-Modulen

Die Alterung von COB-Modulen wurde während der Promotion später begonnen, so dass eine Testdauer von 6000 h ausgewertet werden konnte. Trotz der kurzen Zeitspanne zeigt sich eine starke Degradation, besonders weil bei der Planung darauf geachtet wurde, dass mindestens eine Temperatur oberhalb der Spezifikation liegt. Mit einer Wahl von vier Temperaturen wurde ebenfalls gewährleistet, dass die Überprüfung des *ARRHENIUS*-Verhaltens sicher durchzuführen ist.

Ein Alterungsmechanismus lässt sich deutlich einem Bereich im LED-Package zuordnen. Dieser zur Alterung am stärksten beitragende Mechanismus ist die Verfärbung des Spiegels, auf den die einzelnen Chips aufgebracht sind. Die Folge ist eine spektrale Verschiebung zu höheren Farbtemperaturen, ein Effekt, der bei höherer Temperatur schneller abläuft. *Die Daten sind aus der Beschleunigung mittels Temperatur mit dem *ARRHENIUS*-Verhalten abbildbar.* Eine Besonderheit bei der Alterung von COB-Modulen ist der Ausfall einzelner Stränge, was jedoch überraschenderweise fast keine Reduzierung des emittierten Strahlungsflusses nach sich zieht, jedoch einen Anstieg der Vorwärtsspannung zur Folge hat.

Zwischen der Silikontemperatur und dem Vorwärtsstrom konnte ein linearer Zusammenhang ermittelt werden. Bei dem für die Alterung eingesetzten Strom liegt die Temperatur der Silikonoberfläche etwa 40 K oberhalb der Sensortemperatur. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Differenz der internen Chip-Temperaturen zur Sensortemperatur bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen immer annähernd gleich ist.

Lebensdauerberechnung

Die Berechnung der Lebensdauer von LED-Packages wurde mit verschiedenen Methoden und Funktionen getestet. Es stellte sich heraus, dass sich die Alterungsdaten von verschiedenen Package-Typen so stark unterscheiden, dass die Wahl einer einzigen Anpassungsfunktion zur Extrapolation der zeitlichen Verläufe nicht genügt.

In der Regel wird eine exponentielle Funktion verwendet, die sich bei vielen Datenanalysen in der Vergangenheit bewährt hat. Heutige LED-Packages weisen jedoch zahlreiche Bestandteile auf, so dass mehrere Alterungsmechanismen wirken. Dies führt besonders bei der Beschleunigung durch die Temperatur oder den Strom zu Kurvenverläufen, die abschnittsweise aus einzelnen Funktionen zusammengesetzt werden müssen. Die Ergebnisse der Langzeitalterung von Hochleistungs-LEDs zeigen, dass allein der betrachtete Messzeitraum entscheidend für die extrapolierte Lebensdauer ist. Dieser legt die Anzahl und den Zeitabschnitt der in die zur Funktionsbildung eingehenden Datenpunkte fest. Die Folgerung ist also, dass *eine Beschreibung und Extrapolation der Degradation mittels mathematischer Funktionen nur unter bestimmten Umständen möglich ist.*

Die Messergebnisse und Erkenntnisse der Alterungsuntersuchungen bilden die Grundlage eines neuen Lebensdauermodells. Die Einflüsse von Temperatur und Strom werden dabei jeweils mathematisch un-

terschiedlich behandelt. Die Temperatur fließt über das *ARRHENIUS*-Gesetz, der Strom über das inverse Potenzgesetz in das Modell ein. In diesem Schritt kann bereits getestet werden, ob die eingehenden Daten für das Modell geeignet sind. Je nach Anzahl der getesteten Temperaturen und Ströme werden die Parameter entweder über Anpassungsfunktionen oder direkt analytisch berechnet. Das Ergebnis des Modells ist eine Funktion mit zwei unabhängigen Variablen (Temperatur und Strom), als Funktionsgraph ergibt sich eine gekrümmte Fläche im dreidimensionalen Raum. Werden die im Alterungstest betriebenen Temperaturen und Ströme als Datenpunkte in die Fläche eingezeichnet, ist direkt ersichtlich, welche Modellergebnisse aus einer Interpolation oder Extrapolation stammen.

Lebensdauerberechnungen verwenden in vielen Fällen lediglich den Mittelwert oder Median aller getesteten Messobjekte. Ein statistisches Verhalten wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls betrachtet. Dazu wird jedem einzelnen Messobjekt eine Ausfallzeit zugeordnet. Auf diese Weise kann auf die bewährte Ausfallstatistik aus dem Themenbereich der Zuverlässigkeit zurückgegriffen werden. Dabei zeigt sich, dass nur mittels Dateninterpolation eine ausreichende Genauigkeit der Lebensdauern für die weitere Analyse der statistischen Verteilungen erreicht wird.

LED-Package

Durch die Herstellung von eigens entworfenen LED-Packages konnten thermische Analysen durchgeführt werden, die bei kommerziell erhältlichen LEDs nur eingeschränkt möglich sind. Die genauen Maße und Schichtabfolgen der Packages wurden aus Schliffbildern ermittelt. Die Interpretation der thermischen Strukturfunktion führt zu korrekten Zuordnungen der wärmeabführenden Schichten im Package mit ihren zugehörigen Wärmewiderständen und -kapazitäten.

Die Variation verschiedener Bestandteile wie des Silberleitklebers, elektrischen Layouts und Dielektrikums verändert die Wärmeflüsse und thermischen Widerstände im LED-Package. Die Analyse zeigt, dass der Prozess der Platinen-Vereinzelung und die Wahl des Dielektrikum den größten Einfluss auf die Höhe des thermischen Widerstands haben.

Der Chip selbst und der auf dem Chip aufgebrachte Leuchtstoff stellen die Hauptwärmequellen eines LED-Packages dar. Eine gewonnene Erkenntnis ist, dass bei entsprechenden Geometrien von LED-Packages ein Teil der entstehenden Wärmeleistung über die Silikonverkapselung in die Leiterplatte abfließen kann. Die Wärmeleitung kann weiterhin verbessert werden, wenn der Leuchtstoff in einem Keramikplättchen untergebracht ist. Es konnte somit die Frage beantwortet werden, *inwiefern einzelne Package-Bestandteile während des Betriebs die erzeugten Wärmeflüsse und Temperaturen innerhalb eines LED-Packages beeinflussen.*

Thermische Einflüsse auf LED-Systeme

Aus dem Lichtstromrückgang nach Einschalten einer LED-Leuchte lassen sich Rückschlüsse auf das thermische Design des Produkts ziehen. Die Brennlage einer Leuchte hat Einfluss auf die Temperatur des LED-Moduls und sollte daher bei der Betrachtung von Lebensdauern mitberücksichtigt werden. Der *Einfluss der Temperatur auf das lichttechnische Verhalten* von Leuchten wurde besonders im Hinblick auf lichttechnische Messungen untersucht.

Eine Lagekorrektur lässt sich mit einem Hilfsphotometer erreichen, was jedoch eine hohe mechanische Präzision erfordert und unweigerlich zu einer Erhöhung der Messdauer führt. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Methode basiert auf einer nachträglichen Korrektur der vorhandenen Messwerte

und kann somit direkt in die Software integriert werden. Der Einfluss der Brennlage in der Anwendung und während der Messung auf einem Goniophotometer ist bei den untersuchten LED-Leuchten in Bezug auf andere Messunsicherheiten gering.

Kritik und Ausblick

Alle Untersuchungen zur Lebensdauer sind lediglich bei fester Temperatur und konstantem Vorwärtstrom erfolgt. In realen Anwendungen sind diese Randbedingungen oft nicht gegeben. In der Straßenbeleuchtung ändert sich die Temperatur des LED-Systems durch jahres- und tageszeitlich bedingte Schwankungen der Außentemperatur. Zwar herrscht bei der Innenraumbelichtung eine fast konstante Umgebungstemperatur, jedoch ändert sich die elektrische Ansteuerung im Falle einer Dimmung. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Temperatur des LED-Systems. Bei mehrkanaligen Systemen sind feste Werte bei wechselnden Lichtbedingungen von vornherein ausgeschlossen. Die Bestimmung einer Lebensdauer ist somit nur auf Labortests anwendbar. Daher sollte die Berechnungsmethodik um eine dynamische Komponente erweitert werden. Dabei ist die Betrachtung einer wechselnden Temperatur von geringerer Komplexität als die Integration von Stromänderungen.

Die Verwendung der Ausfallstatistik stellt eine weitere Art der Lebensdauerberechnungen dar. Für aussagefähigere Verteilungen sollte jedoch die Anzahl und Genauigkeit der Daten erhöht werden. Außerdem sollten die vorhandene Daten mit zahlreichen weiteren statistischen Methoden getestet werden.

Die thermische Beschreibung und Analyse der Komponenten, die sich im LED-Package oberhalb oder neben dem LED-Chip befinden, sollte weiter fortgeführt werden. Dies dient zur genaueren Bestimmung der Temperaturen im Leuchtstoff und der Verkapselung und kann somit die Analyse der Fehlermechanismen sowie die Berechnung der Lebensdauer präzisieren.

Die im Leuchtstoff erzeugte Wärmeleistung kann beim Einsatz von Keramikplättchen besser abgeleitet werden. Sie wären möglicherweise für das Recycling des Leuchtstoffs geeignet. Keramik ist sehr temperaturbeständig, was eine Isolierung der Plättchen aus der restlichen Silikonmasse erleichtert. Gereinigt ließen sich die Plättchen in neue LED-Packages integrieren, solange die Effizienz der Strahlungskonversion durch den Leuchtstoff noch hoch genug ist.

Messungen des Einbrennverhaltens und der Brennlage sind unter Verwendung des vorgestellten Messaufbaus leicht durchführbar. Die Erkenntnis über die Qualität des thermischen Designs von Lampen und Leuchten ist durch die dargestellte Berechnung daher auch für Interessierte geeignet, die keine aufwendige und kostenintensive Laborausstattung besitzen.

Die Methode der nachträglichen Lagekorrektur bei goniophotometrischen Messungen sollte an weiteren LED-Systemen getestet werden. Besonders wichtig ist die Analyse der Fehlergrenzen, in denen die Lichtverteilung und der Gesamtlichtstrom nach der Korrektur liegen.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Messobjekte bestehen ausschließlich aus weißen, leuchtstoffkonvertierten Leuchtdioden. Zukünftige Leuchten werden jedoch Kombinationen von farbigen und weißen LEDs integrieren, um dynamische Spektren und Farbtemperatureinstellungen zu gewährleisten. Der thermische Einfluss auf die Effizienz kann bei farbigen LEDs ohne Leuchtstoff um ein Vielfaches höher liegen. Daher könnte der Einfluss der Temperatur auf lichttechnische Größen in Zukunft eine größere Rolle spielen.

Literatur

- [1] IHS Markit. “LEDs Took Half a Billion Tons of Carbon Dioxide From the Sky in 2017, IHS Markit Says”. In: (2017). URL: <http://news.ihsmarket.com>.
- [2] Christopher C. M. Kyba et al. “Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent”. In: *Science advances* 3.11 (2017), e1701528. ISSN: 2375-2548. DOI: 10.1126/sciadv.1701528.
- [3] C. D. Elvidge et al. “The Nightsat mission concept”. In: *International Journal of Remote Sensing* 28.12 (2007), S. 2645–2670. ISSN: 0143-1161. DOI: 10.1080/01431160600981525.
- [4] “Verordnung (EU) Nr. 1194/2012 der Kommission vom 12. Dezember 2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lampen mit gebündeltem Licht, LED-Lampen und dazugehörigen GerätenText von Bedeutung für den EWR”. In: ().
- [5] L. L.C. Northeast Group, Hrsg. *Global LED and Smart Street Lighting: Market Forecast (2017-2027): ID: 4456402*. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4456402/global-led-and-smart-street-lighting-market>.
- [6] *IES TM-21-11: Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources*. Illuminating Engineering Society, 2011.
- [7] J. Lynn Davis, Joseph Young und Michael Royer. *CALiPER Report 20.5: Chromaticity Shift Modes of LED PAR38 Lamps Operated in Steady-State Conditions*. Hrsg. von U. S. Department of Energy | Energy Efficiency & Renewable Energy.
- [8] Michael P. Royer. *Lumen and Chromaticity Maintenance of LED PAR38 Lamps Operated in Steady-State Conditions*. 2014. DOI: 10.2172/1170114.
- [9] *IES approved method for measuring lumen maintenance of LED light sources*. Bd. 80-08. IES LM / Illuminating Engineering Society of North America. New York, N.Y.: IESNA, 2008. ISBN: 9780879952273.
- [10] *Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL)*. 2014.
- [11] E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes*. 2. Aufl. Leiden: Cambridge University Press, 2006. ISBN: 978-0-511-34476-3.
- [12] F. Möglich und R. Rompe. “Über den Einfluß der Wärmedehnung auf das Absorptionsspektrum von Isolatoren”. In: *Z. Physik (Zeitschrift für Physik)* 119.7-8 (1942), S. 472–481. DOI: 10.1007/BF01339784.
- [13] J. Bardeen und W. Shockley. “Deformation Potentials and Mobilities in Non-Polar Crystals”. In: *Physical Review* 80 (1950), S. 72–80.
- [14] Y. P. Varshni. “Temperature dependence of the energy gap in semiconductors”. In: *Physica* 34.1 (1967), S. 149–154. ISSN: 00318914. DOI: 10.1016/0031-8914(67)90062-6.
- [15] S. P. DenBaars. “Basic Physics & Materials Technology of GaN LEDs and LDs”. In: *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes*. Hrsg. von S. Nakamura und S. F. Chichibu. CRC Press, 2000, S. 1–28.
- [16] M. B. Yurtseven, S. Mete und S. Onaygil. “The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs”. In: *Lighting Research and Technology* 48.8 (2016), S. 943–965. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153515576785.

- [17] W. D. Wright. "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours". In: *Transactions of the Optical Society* 30.4 (1929), S. 141–164.
- [18] J. Guild. "The colorimetric properties of the spectrum". In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1931), S. 149–187.
- [19] CIE. *CIE Technical Note 001:2014, Chromaticity Difference Specification for Light Sources*. CIE, 2014.
- [20] H. D. Baehr und K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer, 2006.
- [21] William M. Haynes. *CRC handbook of chemistry and physics*. 94. ed. 2013. ISBN: 9781466571143.
- [22] Andras Poppe, Gabór Molnár, Tamás Temesvölgyi. *Temperature Dependent Thermal Resistance in Power LED Assemblies an a Way to Cope with It*. Piscataway, NJ, 2010. DOI: 10 . 1 1 0 9 / S T H E R M . 2 0 1 0 . 5 4 4 4 2 7 6 .
- [23] T. Vos, P. den Breeijan und W. D. van Driel. "Quality and Reliability in Solid-State-Lighting: Qua Vadis?" In: *Solid State Lighting Reliability Part 2*. Hrsg. von Willem Dirk van Driel, Xuejun Fan und Guo Qi Zhang. Bd. 3. Solid State Lighting Technology and Application Series. Cham und s.l.: Springer International Publishing, 2018, S. 1–14. ISBN: 9783319581743.
- [24] G. Meneghesso, M. Meneghini und E. Zanoni. "Recent results on the degradation of white LEDs for lighting". In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 (2010).
- [25] W.D van Driel und X. J. Fan, Hrsg. *Solid State Lighting Reliability: Components to Systems*. Springer, 2013.
- [26] M. G. Pecht und M.-H. Chang. "Failure Mechanisms and Reliability Issues in LEDs". In: *Solid State Lighting Reliability*. Hrsg. von W.D van Driel und X. J. Fan. Springer, 2013.
- [27] J. Bourgoin und M. Lannoo. *Point Defects in Semiconductors II: Experimental Aspects*. Springer Science & Business Media, 1983.
- [28] Frank Börner. "Defektcharakterisierung in Halbleiterschichten mit Hilfe der Positronenannihilation". Dissertation. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2000.
- [29] B. J. C. Jacobs et al. "Corrosion Sensitivity of LED Packages". In: *Solid State Lighting Reliability Part 2*. Hrsg. von Willem Dirk van Driel, Xuejun Fan und Guo Qi Zhang. Bd. 3. Solid State Lighting Technology and Application Series. Cham und s.l.: Springer International Publishing, 2018, S. 527–548. ISBN: 9783319581743.
- [30] S. R. Logan. "The origin and status of the Arrhenius equation". In: *Journal of Chemical Education* 59.4 (1982), S. 279. ISSN: 0021-9584. DOI: 10 . 1 0 2 1 / e d 0 5 9 p 2 7 9 .
- [31] A. S. Jordan und J. M. Ralston. "A diffusion model for GaP red LED degradation". In: *Journal of Applied Physics* 47.10 (1976), S. 4518–4527. ISSN: 00218979. DOI: 10 . 1 0 6 3 / 1 . 3 2 2 4 2 3 .
- [32] Patrick N. Grillo et al. "Sixty Thousand Hour Light Output Reliability of AlGaInP Light Emitting Diodes". In: *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 6.4 (2006), S. 564–574. ISSN: 1530-4388. DOI: 10 . 1 1 0 9 / T D M R . 2 0 0 6 . 8 8 7 4 1 6 .
- [33] Shinya Ishizaki, Hideyoshi Kimura und Masaru Sugimoto. "Lifetime Estimation of High Power White LEDs". In: *Journal of Light & Visual Environment* 31.1 (2007). ISSN: 1349-8398.
- [34] N. Narendran und Y. Gu. "Life of LED-Based White Light Sources". In: *Journal of Display Technology* 1.1 (2005), S. 167–171. ISSN: 1551-319X. DOI: 10 . 1 1 0 9 / J D T . 2 0 0 5 . 8 5 2 5 1 0 .
- [35] Matteo Meneghini et al. "A Review on the Reliability of GaN-Based LEDs". In: *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 8.2 (2008), S. 323–331. ISSN: 1530-4388. DOI: 10 . 1 1 0 9 / T D M R . 2 0 0 8 . 9 2 1 5 2 7 .
- [36] C. H. Seager et al. "Drift, diffusion, and trapping of hydrogen in p-type GaN". In: *Journal of Applied Physics* 92.12 (2002), S. 7246–7252. ISSN: 0021-8979. DOI: 10 . 1 0 6 3 / 1 . 1 5 2 0 7 1 9 .
- [37] Inc. Cree. "Cree XLamp Long-Term Lumen Maintenance". In: (2009).

- [38] Inc. Cree. "Xlamp LED Long-Term Lumen Maintenance". In: *Cartographic Perspectives* (2016). ISSN: 1048-9053.
- [39] Inc. Cree. "Cree XLamp LEDs Chemical Compatibility". In: *Cartographic Perspectives* (2016). ISSN: 1048-9053.
- [40] Sung-Uk Zhang. "Quantification of silicone degradation for LED packages using finite element analysis". In: *Microelectronics Reliability* 55.12 (2015), S. 2678–2684. ISSN: 00262714. DOI: 10.1016/j.microrel.2015.09.006.
- [41] S. Watzke und P. Altieri-Weimar. "Degradation of silicone in white LEDs during device operation: A finite element approach to product reliability prediction". In: *Microelectronics Reliability* 55.5 (2015), S. 733–737. ISSN: 00262714. DOI: 10.1016/j.microrel.2015.02.008.
- [42] W. D. van Driel et al. "Lumen maintenance predictions for LED packages". In: *Microelectronics Reliability* 62 (2016), S. 39–44. ISSN: 00262714. DOI: 10.1016/j.microrel.2016.03.018.
- [43] J. Zhang et al. "An optimized model for lifetime prediction of LED-based light bars using luminance degradation method". In: *Lighting Research and Technology* (2016). ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153516653270.
- [44] E. Nogueira und J. Mateos. "Accelerated Life Testing Leds On Temperature And Current". Piscataway, NJ, 2011.
- [45] A. Keppens et al. "High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics". In: *Journal of Applied Physics* 104.9 (2008), S. 093104. ISSN: 0021-8979. DOI: 10.1063/1.3009966.
- [46] A. Keppens et al. "Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature". In: *Journal of Applied Physics* 108.4 (2010), S. 43104. ISSN: 00218979. DOI: 10.1063/1.3463411.
- [47] M. B. Yurtseven, S. Onaygil und G. Ogus. "Thermal simulation and validation of LED-based luminaires using two-resistor compact thermal model". In: *Lighting Research and Technology* 46.5 (2014), S. 576–586. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153513495689.
- [48] Yu-Hsiang Yang, Yen-Fu Su und Kuo-Ning Chiang. "Acceleration factor analysis of aging test on gallium nitride (GaN)-based high power light-emitting diode (LED)". In: *Proceedings of the Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. Hrsg. von IEEE. 2014, S. 178–181. DOI: 10.1109/ITHERM.2014.6892278.
- [49] Max Wagner und Tran Quoc Khanh. "Impacts of Different Aging Mechanisms on Electrical and Optical Parameters of White High-Power LED Packages." In: *Journal of the Illuminating Engineering Society of North America* (eingereicht im Oktober 2017, reviewed im Januar 2018).
- [50] Jianzheng Hu, Lianqiao Yang und Moo Whan Shin. "Electrical, optical and thermal degradation of high power GaN/InGaN light-emitting diodes". In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41.3 (2008), S. 35107. ISSN: 0022-3727. DOI: 10.1088/0022-3727/41/3/035107.
- [51] M. Wagner, Herzog, A, Ganev, H und T. Q. Khanh. "Life-time Calculation of White HP-LEDs from 16,000 Hours Aging Data". In: *LpR - LED professional Review* 2014 (2014).
- [52] Ralph C. Tuttle. "Method for Projecting Color Shift of High Power LED Packages". In: *Proceedings of the 4th International LED professional Symposium + Expo*. Hrsg. von Luger Research e.U. 2014.
- [53] Min-Ho Kim et al. "Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes". In: *Applied Physics Letters* 91.18 (2007), S. 183507. ISSN: 00036951. DOI: 10.1063/1.2800290.
- [54] Justin Iveland et al. "Direct measurement of Auger electrons emitted from a semiconductor light-emitting diode under electrical injection: identification of the dominant mechanism for efficiency droop". In: *Physical review letters* 110.17 (2013), S. 177406. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.177406.

- [55] M. Buffolo et al. "Long-term degradation mechanisms of mid-power LEDs for lighting applications". In: *Microelectronics Reliability* 55.9-10 (2015), S. 1754–1758. ISSN: 00262714. DOI: 10 . 1016/j.micrelel.2015.06.098.
- [56] Jens Balasus. "Aufbau und Entwicklung einer Strom- und Temperaturüberwachung für COB-Alterung und thermische Analyse von COB-Modulen". Studienarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [57] Eveliina Juntunen et al. "Thermal Performance Comparison of Thick-Film Insulated Aluminum Substrates With Metal Core PCBs for High-Power LED Modules". In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 2.12 (2012), S. 1957–1964. ISSN: 2156-3950. DOI: 10 . 1109/TCPMT . 2012 . 2206390.
- [58] Max Wagner und Tran Quoc Khanh. "Methods of extrapolation of the LED life time and their comparison based on some LED degradation curves". In: *Proceedings of the 11th China International Forum on Solid State Lighting*. Hrsg. von CSA. 2014, S. 144–146. DOI: 10 . 1109 / SSLCHINA . 2014 . 7127242.
- [59] Wayne B. Nelson. *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. John Wiley & Sons. Inc., 2004.
- [60] A. N. Padmasali und S. G. Kini. "LED life prediction based on lumen depreciation and colour shift". In: *Lighting Research and Technology* 49.1 (2017), S. 84–99. ISSN: 1477-1535. DOI: 10 . 1177 / 1477153515593580.
- [61] David Freedman und Persi Diaconis. "On the histogram as a density estimator: L2 Theory". In: *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete* 57 (1981), S. 453–476.
- [62] Hui Zhang. "Charakterisierung thermischer Einflüsse von Interfacematerialien in LED-Packages". Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [63] Hui Zhang, Max Wagner und Tran Quoc Khanh. "Comparing New Dielectric Materials for Chip-on-Board LED Packages". In: *LED professional Review (LpR)* 58 (2016), S. 50–53. ISSN: 1993-890X. URL: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/comparing-new-dielectric-materials-for-chip-on-board-led-packages>.
- [64] Eveliina Juntunen et al. "Effect of Phosphor Encapsulant on the Thermal Resistance of a High-Power COB LED Module". In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 3.7 (2013), S. 1148–1154. ISSN: 2156-3950. DOI: 10 . 1109/TCPMT . 2013 . 2260796.
- [65] Ulrich Grigull. "Das Newtonsche Abkühlungsgesetz: Bemerkungen zu einer Arbeit von Isaac Newton aus dem Jahre 1701". In: *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 29* (1978).
- [66] CIE. *CIE S 025/E:2015 Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules*. CIE, Wien, 2015.
- [67] M. G. Scholdt. "Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System". Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2013.

Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

Buchbeiträge

Quang Vinh Trinh, Tran Quoc Khanh, Hristo Ganev, Max Wagner. *Measurement and Modelling of the LED Light Source*. In: LED Lighting. Technology and Perception. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 133-232, 2014.

Zeitschriftenbeiträge

Zhang, Hui; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Reading between the thermal lines - New dielectric materials for LED-packages*. In: Engineering Edge, 4 (2) pp. 64-66, 2015

Zhang, Hui; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Comparing New Dielectric Materials for Chip-on-Board LED Packages*. In: LED professional Review (LpR) (58) pp. 50-53. ISSN 1993-890X, 2016

Polin, Dmitrij; Klir, Stefan; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Reducing the stroboscopic effects of LED luminaires with pulse width modulation control*. In: Lighting Research and Technology (LRT) (online first) pp. 1-11. ISSN 1477-0938, 2016

Trinh, Quang Vinh; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Farbmessung nach Integralverfahren - Farbmessgenauigkeit in der Beleuchtungstechnik*. In: LICHT, 68 (6) pp. 80-84. ISSN 0024-2861, 2016

Wagner, Max: *Beschleunigtes Altern von LEDs wissenschaftlich untersucht*. In: Elektronik Praxis, 2016

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Vermessung von LED-Leuchten - Einfluss von Einbrennverlauf und Brennlageverhalten*. In: Licht (7-8) ISSN 0024-2861, 2016

Wagner, Max; Herzog, Alexander; Ganev, Hristo; Khanh, Tran Quoc: *Lifetime Calculation of White HP-LEDs from 16,000 Hours Aging Data*. In: LED professional Review (LpR) (59) pp. 34-38. ISSN 1993-890X, 2017

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Impacts of Different Aging Mechanisms on Electrical and Optical Parameters of White High-Power LED Packages*. In: Leukos, Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, eingereicht am 6. Oktober 2017, reviewed am 15. Januar 2018 mit der Möglichkeit zur Überarbeitung

Konferenzbeiträge

Wagner, Max: *Oberflächenvermessung von Absorbercups von Solarturmkraftwerken*. In: DPG-Tagung, 13.-18.03.2011, Dresden.

Wagner, Max: *Heatable optical analyse system for high temperature absorbers*. In: ISES Solar World Congress, 31.8.-2.9.2011, Kassel, Germany.

Wagner, Max; Sauerborn, M.; Telle R.; Hoffschmidt, B.: *Optical Measurement System For High Temperature Absorbers*. In: SolarPaces Conference, Granada, Spanien, 2011

Wagner, Max: *Spectral Optical Measurement System for High Temperature Materials*. In: Internationales Feuerfestkolloquium Aachen, 19.+20. Oktober 2011, Aachen.

Zydek, Bastian Walter; Schiller, Christoph; Wagner, Max; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc: *Performance Evaluation of Vehicles with Adaptive Headlamp Systems*. Vortrag zur Podiumsdiskussion auf dem ISAL Symposium. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), 23.-25. September 2013, Darmstadt. In: Darmstädter Lichttechnik, 15. Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2013

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Einbrennverlauf und Brennlagenverhalten von LED-Leuchten und deren Konsequenzen für die Leuchten-Goniophotometrie*. In: Tagungsband Lux junior 2013, 27.-29. September 2013, Dörfeld/Ilm. Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

Wagner, Max: *Aktueller Stand der LED-Straßenleuchten-Technologien und Vergleich der Herstellerangaben*. In: 11. VDI-Tagung, 13.-14. November 2013, Düsseldorf. VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Vergleich der Simulationsergebnisse mit Dialux und Feldtestmessergebnisse in der LED-Straßenbeleuchtung*. In: Euroforum (Hg.) 2014 – 13. ETP-Kongress Straßenbeleuchtung 2014.

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Methods of extrapolation of the LED life time and their comparison based on some LED degradation curves*. China Solid State Lighting Alliance (CSA) (.) In: China International Forum on Solid State Lighting (SSLChina), 6.-8. November 2014, Guangzhou.

Khanh, Tran Quoc; Ganev, Hristo; Wagner, Max: *Änderungen elektrischer, spektraler und farbmatischer Eigenschaften weißer LEDs*. In: Electrosuisse Fachtagung Lichtqualität von LED und Farbmatrik - LED-Theorieseminar, 15. Januar 2015

Wagner, Max; Trinh, Quang Vinh; Khanh, Tran Quoc: *Berechnung der LED-Lebensdauer nach TM21 und weiteren Kriterien*. VDI Wissensforum GmbH (.) In: 4. VDI-Konferenz - Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, 10.-11. Juni 2015, Düsseldorf.

Zydek, Bastian Walter; Schiller, Christoph; Wagner, Max; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc: *Detection Distance and Glare of Headlamp Systems with ADB-Functions*. China Illuminating Engineering Society (CIES) (.) In: International Forum on Automotive Lighting (IFAL), 17.-19. Juni 2015, Kunshan.

Wagner, Max; Herzog, Alexander G.; Ganev, Hristo; Khanh, Tran Quoc: *LED aging acceleration – an analysis from measuring and aging data of 14,000 hours LED degradation*. China Solid State Lighting Alliance (CSA) (.) In: China International Forum on Solid State Lighting (SSLChina), 2.-4. November 2015, Shenzhen.

Holländer, Edith; Schakib-Ekbatan, Karin; Roser, Annette; Löcherer, Stefanie; Khanh, Tran Quoc; Wagner, Max: *User satisfaction with LED-lighting in schools*. In: LICHT 2016, 25.-28. September 2016, Karlsruhe. Tagungsband der 22. Gemeinschaftstagung der lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, Österreichs, der Schweiz und der Niederlande

Khanh, Tran Quoc; Bodrogi, Peter Zsolt; Wagner, Max: *Straßenbeleuchtung – visuelle, lichttechnische, technologische und soziologische Aspekte aus heutiger Sicht*. TÜV Rheinland (.) In: Fachtagung Straßenbeleuchtung – Aktuelle Themen rund um die LED-Straßenbeleuchtung, 01.-02. Juni 2016, Frankfurt am Main.

Wagner, Max; Herzog, Alexander G.; Ganev, Hristo; Khanh, Tran Quoc: *Life-time Calculation of White HP-LEDs from 16,000 Hours Aging Data*. Luger Research e.U. (Hg.) (.) In: International LED professional Symposium + Expo (LpS), 20.-22. September 2016, Bregenz. Proceedings of the 6th LED professional Symposium + Expo

Schiller, Christoph; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Leuchtenalterung und Verschmutzung - Einfluss auf Lichtstrom und Lichtverteilung*. EW Medien und Kongresse (.) In: Fachtagung Straßen- und Außenbeleuchtung, 15.-16. November 2016, Warnemünde.

Herzog, Alexander G.; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Farbortverschiebung als Lebensdauerkriterium*. VDI Wissensforum GmbH (.) In: 5. VDI-Konferenz Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, 29.-30. Juni 2016, Düsseldorf.

Wagner, Max; Schiller, Christoph: *Einfluss photokatalytischer Oberflächenbeschichtung auf lichttechnische Eigenschaften in der Straßenbeleuchtung*. Fachverband angewandte Photokatalyse (.) In: 4. Photokatalyse-Kolloquium, 11. Oktober 2016, Hanau.

Wagner, Max; Ganev, Hristo; Khanh, Tran Quoc: *Beschleunigte Alterung - Datenlage und Lebensdauer-Umrechnungsfähigkeit*. VDI Wissensforum GmbH (.) In: 5. VDI-Konferenz Lebensdauer und Zuverlässigkeit in der LED-Beleuchtung, 29.-30. Juni 2016, Düsseldorf.

Wagner, Max; Ganev, Hristo; Herzog, Alexander G.; Trinh, Quang Vinh; Khanh, Tran Quoc: *Analysis of Accelerated LED Degradation by Statistical Methods*. China Solid State Lighting Alliance (CSA) (.) In: China International Forum on Solid State Lighting (SSLChina), 15.-18. November 2016, Peking. Proceedings of the 13th China International Forum on Solid State Lighting

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Alterung von Hochleistungs-LEDs über 14.000 Stunden - Lebensdauerberechnung nach TM-21 und LED-Fehlermechanismen*. WEKA Fachmedien GmbH (.) In: 6. Elektronik Lighting Congress, 16. Juni 2016, München.

Balasus, Jens; Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *Beleuchtungssystem zur Untersuchung von Pflanzenwachstum unter zeitlich moduliertem Licht*. In: 22. Symposium (DAfP) - Solarstrahlung: Wirkung, Anwendung, Messung und Simulation, 18.-19. Mai 2017, Freiburg.

Wagner, Max; Khanh, Tran Quoc: *LED degradation - recent data and internationally discussed methods for LED life time calculation*. In: Swiss Photonics: From Daylight to Lighting 4.0, 06. November 2017, Dübendorf, Zürich.

Betreute Arbeiten

Dragana Stojanovic. *Entwicklung und Aufbau einer Versuchseinrichtung zur Erzeugung einer von der Lampengeometrie unabhängigen Lichtverteilung*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013.

Johannes Schaller. *Untersuchung der Lötstellenhaltbarkeit unter besonderer Berücksichtigung der Diffusion, im Heißbereich und bei LED-Baugruppen im Nutzfahrzeugeinsatz*. Bachelorarbeit, MAN Truck & Bus AG, München, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014.

Stefan Klir. *Entwicklung von Verfahren zur Reduzierung visueller Artefakte bei PWM-gesteuerten LED-Leuchten*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014.

Alexander Herzog. *Photobiologische/photochemische Wirkung ultravioletter Strahlung und strahlungsphysikalische Charakterisierung von UV-LEDs*. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014.

Hui Zhang. *Charakterisierung thermischer Einflüsse von Interfacematerialien in LED-Packages*. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2015.

Jipeng Song. *Entwicklung und Konstruktion einer Leuchte für visuelle Untersuchungen der Lichtfunktionen von Kfz-Heckleuchten*. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016.

Bogdan Adrian Chirap. *Entwicklung eines Hybrid-LED Demonstrators für ein modernes Innenbeleuchtungssystem mit Farbqualitätsstabilisierung mittels unterschiedlichen Ansteuerungsschnittstellen*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016.

Jens Balasus. *Aufbau und Entwicklung eines Beleuchtungssystems zur Untersuchung von Pflanzenwachstum unter spektral und zeitlich moduliertem Licht*. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016.

Jens Balasus. *Aufbau und Entwicklung einer Strom- und Temperaturüberwachung für COB-Alterung und thermische Analyse von COB-Modulen*. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017.

Berichte

Holländer, Edith; Schakib-Ekbatan, Karin; Roser, Annette; Khanh, Tran Quoc; Wagner, Max; Groh, Andreas. *LED macht Schule - Evaluierung der Umrüstung von Schulbeleuchtung auf LED im Rahmen der Leitmarktinitiative*. Karlsruhe, 2015

Schahed, Schirin; Schemel, Bianca; Wagner, Max; Holländer, Edith; Koch, Ulrike; Roser, Annette; Schakib-Ekbatan, Karin; Tharan, Almuth; Häfner, Lisa. *LED-Beleuchtung: Funktionsweise - Wirkung - Wahrnehmung, Unterrichtsmaterial für 7. bis 10. Klasse*. UFU Verlag, 2015

Projekte

Folgende Projekte wurden während der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter hauptverantwortlich oder unterstützend betreut:

Mitarbeit beim Projekt *Performance Quality Label für LED-Leuchten (PQL I) für LED-Leuchten*, Förderprojekt des BMWi über die AiF zur Erarbeitung normativer Gütekriterien beim Einsatz von LED-Leuchten, Zeitraum 2011-2013

Projektleitung des Projekts *Deutsch-Chinesischer Wissensaustausch und Projektevaluation auf dem Gebiet der LED-Technologie*, gefördert vom BMBF, FKZ 13N12725, Zeitraum 2013-2016

Übernahme der Projektleitung *Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LED-Komponenten, Modulen und Systemen und Konsequenz für die Auslegung lanzeitstabiler LED-Leuchten (PQL II)*, IGF Vorhaben 19278 N, Zeitraum 2016-2019

Auszeichnungen

Best Scientific Papers (4th prize): *Lifetime Calculation of White HP-LEDs from 16,000 Hours Aging Data*, ausgezeichnet beim International LED professional Symposium + Expo (LpS), September 2016, Bregenz

Best Academic Paper: *Analysis of Accelerated LED Degradation by Statistical Methods*, ausgezeichnet beim 13th China International Forum on Solid State Lighting (SSL CHINA 2016), November 2016, Peking

A. Anhang

Matlab-Programm für exponentielle Anpassungsfunktionen

```
1 function [estimates , model] = expo2value(xdata , ydata , start)
2
3 x_st=round((length(xdata)/2));
4 st_A=max(ydata);
5 st_E=min(ydata);
6 st_lambda=(1/(xdata(x_st)-start))*log((st_A)/(ydata(x_st)-st_E));
7
8 start_point = [st_A st_lambda st_E];
9 model = @expfun;
10 estimates = fminsearch(model, start_point);
11
12 function [sse , FittedCurve] = expfun(params)
13
14 A = params(1);
15 lambda = params(2);
16 E=params(3);
17
18 assignin('base','A',A)
19 assignin('base','lambda',lambda)
20 assignin('base','E',E)
21
22 FittedCurve = (A -E ).* exp(-lambda * (xdata-start)) + E ;
23
24 ErrorVector = FittedCurve - ydata;
25 sse = sum(ErrorVector .^ 2);
26 mw=sum((ydata-mean(ydata)).^ 2);
27 chi=1-sse/mw;
28
29 assignin('base','FittedCurve',FittedCurve)
30 assignin('base','ErrorVector',ErrorVector)
31 assignin('base','sse',sse)
32 assignin('base','chi',chi)
33
34 plot(xdata , ydata , 'bx' , xdata , FittedCurve , 'r' , 'LineWidth' , 3)
35 grid on
36
37 end
38 end
```


Datenblatt eines untersuchten, roten Chip für die thermische Analyse



7F, No. 349, Sec. 2, Renhe Road, Dashi, Taoyuan, Taiwan 335

Cat No.: 7-1S-2000-008

Revision: 0

AlInGaP LED DICE

Part NO.: AOC-341RxM Series

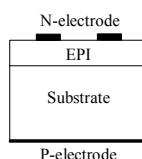
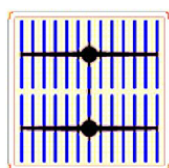
Features

- Red color emission
- Excellent performance and high efficiency
- Great reliability even in harsh environment
- Mirror reflector to increase efficiency

Description

AOC-341 RxM Series is a red color emitting AlInGaP LED grown by MOCVD technique. Its structure enables enhanced quantum efficiency; the mirror reflector greatly increases the light extraction efficiency and therefore a greater light intensity. This device is designed for use in high ambient light condition.

Chip Dimensions



Chip Size : 41mil×41mil±1.0mil
Emitting Area : 38mil×38mil±1.0mil
Bonding Pad : ϕ 4.2mil±0.5mil
Chip Thickness : 4.0mil±1.0mil

Electrical and Optics Characteristics

Measuring Item	Symbol	Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Forward Voltage	V_F	$I_F=350\text{mA}$	1.75	-	3.00	V
Reverse Current	I_R	$V_R=25\text{V}$	-	-	2.0	μA
Dominant Wavelength	λ_d	$I_F=350\text{mA}$	616	-	645	nm
Max. Junction Temperature	T_{max}	-	-	-	120	$^{\circ}\text{C}$

Available Dominate Wavelength and Iv Matrix

Part No.	Wavelength Range	$\geq 4800\text{mcd}$	$\geq 5400\text{mcd}$	$\geq 6000\text{mcd}$	$\geq 6600\text{mcd}$	$\geq 7200\text{mcd}$	$\geq 7800\text{mcd}$	$\geq 8400\text{mcd}$
341RSM	616 ~ 625 nm	-	-	-	Y660	Y720	Y780	Y840
341RMM	620 ~ 630 nm	-	-	Y600	Y660	Y720	-	-
341RLM	625 ~ 635 nm	Y480	Y540	-	-	-	-	-
341RRM	635 ~ 645nm	Y480	-	-	-	-	-	-

Note:

1. All measurements are done with AOC's standard testing equipment.
2. Luminance intensity is measured on bare chip.
3. Above contents are subject to change without notice.
4. Special requests are also welcome, please contact AOC's sale representative for any request.
5. Characteristics curves are measured within TO-46 package.

Vergleich von Silikonarten für LED-Packages

DOW CORNING

Lighting
Solutions

Silicones for Enhanced LED Lighting Designs and Performance

New LED lighting designs must deliver more lumen density and power, withstand wider temperature ranges, simplify assembly and minimize the footprint, weight and cost of next-generation lighting systems. Dow Corning's extensive portfolio of silicone LED materials and design support can help address these tough industry challenges, and offer a competitive edge at every point in the lighting value chain.

Advantages of Silicone

- High transmittance enables low loss optical systems
- High photo- and thermal-stability minimizes yellowing at high heat (150°C+) and withstands high lumen density
- Ultraviolet resistance enhances long-term reliability in outdoor applications
- High resistance to moisture and thermal cycling improves protection and reliability of sensitive electronic components

High Thermal Stability

Note the difference between conventional organic materials used for optical systems in LED lamps, luminaires and silicone resin when aged at 200°C for 24 hours.

Polycarbonate Cyclo-olefin Copolymer Acrylic Silicone Resin

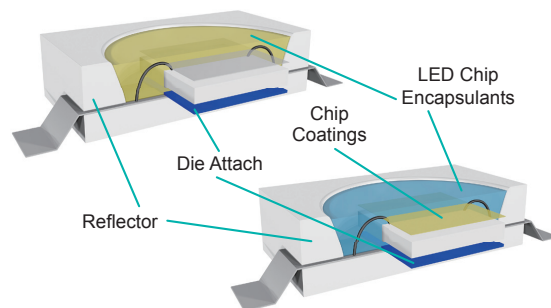


Phenyl Silicone Encapsulants for LED Packaging

High Transmittance: Phenyl Silicones Encapsulants for LED Packaging

Patented phenyl silicones encapsulants from Dow Corning deliver a higher refractive index and higher gas barrier than methyl silicones, enabling LED designs with higher light output and improved lumen maintenance.

	Methyl	Phenyl
Refractive Index (n_p)	1.41	1.53-1.54
Transmittance	Excellent	Excellent
Light Stability	Excellent	Very Good
Gas Barrier	Fair	Very Good



Improved Gas Barrier

Phenyl silicone encapsulants offer better gas barrier properties, and are more resistant to silver corrosion. This helps maintain light output, and can help enhance LED reliability, performance and total cost of ownership.

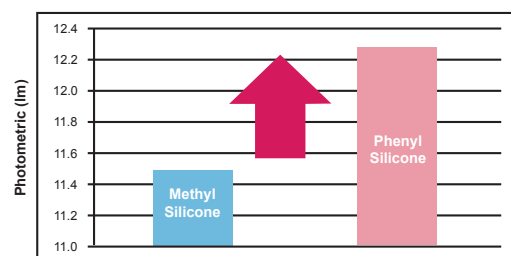
	Initial	20 hours	Result
Methyl Silicone			Low light output due to corroded silver reflective parts
Phenyl Silicone			Stable light output due to minimum change of color

Test Conditions

- 1.2 g of sulfur powder in a 450 ml bottle / Aged at 80°C for 20 hours
- 5050 PKG

Enhanced Light Output

Phenyl silicone can provide about 7% more light output vs. methyl silicone.



Blue LED with silicone encapsulants containing phosphor in 5050 package