



Jan Ruschel (Autor)

Ursachen der stromgetriebenen Degradation von UV-LEDs



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8569>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Licht emittierende Dioden (LEDs), deren Emission im ultravioletten (UV) Spektralbereich liegt, haben das Potenzial konventionelle UV-Lichtquellen in vielen Anwendungen abzulösen. Die kurzen Wellenlängen von UVC-LEDs im Bereich zwischen 260 nm und 280 nm, die in der Lage sind, chemische Bindungen in DNA oder RNA zu zerstören, erlauben beispielsweise die effiziente Inaktivierung von Viren, Bakterien und Pilzsporen [1][2][3]. Daher eignen sich UVC-LEDs für die Desinfektion von Oberflächen, Wasser und Luft [2]. Dadurch haben sie unter anderem das Potenzial, einen Beitrag zur Verringerung der Ausbreitung von Viren wie dem SARS-CoV-2 zu leisten [4]. Im Gegensatz dazu eignet sich der Wellenlängenbereich von 280 nm bis 315 nm von UVB-LEDs für Anwendungen im Bereich der Aushärtung [5], der Phototherapie [6] und dem Pflanzenwachstum. So zeigen aktuelle Untersuchungen zum Beispiel, dass eine Bestrahlung mit UVB-Licht die Produktion von Sekundärmetaboliten in Pflanzen anregt [7], welche nachweislich Vorteile für die Gesundheit haben, da sie die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Krankheiten wie Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen verringern können [8].

Bei der Entwicklung von UV-LEDs sind die III-V-Verbindungshalbleiter von besonderem Interesse, da sich die Bandlückenenergie durch das Mischverhältnis von GaN und AlN über einen großen Bereich von (3,4–6,2) eV einstellen lässt, wodurch theoretisch Emissionswellenlängen zwischen (200–360) nm realisierbar sind. Zudem handelt es sich bei dem Materialsystem um einen direkten Halbleiter, wodurch eine effiziente strahlende Rekombination ermöglicht wird.

Die meisten Anwendungen benötigen hohe optische Leistungen, die während des Langzeitbetriebs (typischerweise $> 10^4$ h) stabil bleiben. Obwohl bereits ein großer Fortschritt bei der Entwicklung von (In)AlGaIn-basierten UV-LEDs erzielt wurde, können diese aktuell noch nicht in ihrer Leistung und Stabilität mit (In)GaN-basierten blau emittierenden LEDs mithalten [9], deren L70-Lebensdauern typischerweise bei $\approx 5 \cdot 10^4$ h liegen [8][10]. Im Gegensatz dazu ist die L70-Lebensdauer, welche der Betriebszeit entspricht, nach der die optische Leistung auf 70 % des Anfangswerts abfällt, von (In)AlGaIn-basierten UVB- und UVC-LEDs zumeist auf einige hundert bis einige tausend Stunden begrenzt [8][11][12]. Neben der Erhöhung der emittierten optischen Leistung erfordert die Entwicklung von langzeitstabilen (In)AlGaIn-basierten UV-LEDs die Erforschung und das Verständnis der Degradationsmechanismen, die während des Betriebs zur Reduktion der optischen Leistung führen. Jedoch lassen sich bislang nur wenige Veröffentlichungen finden, die sich mit der physikalischen Untersuchung der Degradation von UV-LEDs beschäftigen. Dieser Umstand liefert die Motivation für diese Arbeit.

Überblick über die Arbeit: Im Fokus der Arbeit steht die physikalische Untersuchung der betriebsbedingten Degradation von (In)AlGa_N-basierten UVB- und UVC-LEDs. Dabei liegt die globale Zielstellung einerseits im Erkenntnisgewinn über die relevanten Degradationsmechanismen. Andererseits liegt das Ziel darin, Ansätze zu finden, die die Entwicklung von UVB- und UVC-LEDs mit erhöhter Langzeitstabilität ermöglichen sollen. Die Untersuchungen dieser Arbeit lassen sich in drei Teile unterteilen.

Im ersten Teil wird zunächst der Einfluss der Betriebsparameter Stromdichte und Temperatur auf die zeitliche Reduktion der optischen Leistung untersucht. Dabei soll der für die Degradation maßgebliche Beschleunigungsfaktor gefunden und dessen Einfluss quantifiziert werden. Aus den Ergebnissen wird dann eine mathematische Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Leistungsreduktion abgeleitet und es wird eine erste Eingrenzung möglicher Degradationsprozesse erfolgen. Diese Beschreibung soll einerseits den maßgeblichen Beschleunigungsfaktor enthalten und andererseits eine zeitliche Extrapolation der optischen Leistung einer UV-LED im Betrieb ermöglichen. Zudem werden Messungen der Intensitätsverteilung der Elektrolumineszenz verifizieren, ob die nominelle Stromdichte ein aussagekräftiges Maß für die tatsächliche Stromdichte ist. Weitere Degradationsexperimente an UV-LEDs mit gezielter Variation der Heterostruktur werden schließlich die verursachenden Degradationsprozesse soweit eingrenzen, dass die Entwicklung eines physikalischen Degradationsmodells möglich ist. Dabei werden Ergebnisse aus der eindimensionalen Simulation der Bandkantenverläufe und der Ladungsträgerdichteverteilung zur Interpretation der Ergebnisse beitragen. Das Degradationsmodell soll insbesondere eine Antwort darauf geben, woher der nötige Energieeintrag für die betriebsbedingten Veränderungen der Eigenschaften der Halbleiterschichten kommt, die die Veränderung der optischen Leistung zur Folge haben.

Der zweite Teil widmet sich der Untersuchung von Effekten jenseits der zeitlichen Leistungsabnahme, die während des Betriebs von UV-LEDs beobachtet werden können. Dabei steht der Verlustmechanismus, der mit der betriebsbedingten Reduktion der optischen Leistung von UV-LEDs verbunden ist, im Vordergrund. Hierzu erfolgt die Betrachtung der Rolle von Leckströmen als Verlustmechanismus. Zudem wird mittels zeitaufgelöster Photolumineszenz untersucht, inwieweit der in der Literatur häufig diskutierte Verlustmechanismus der Zunahme der nichtstrahlenden Shockley–Read–Hall-Rekombinationsrate [13][14][15][16][17] eine mögliche Erklärung für die betriebsbedingte Reduktion der optischen Leistung ist. Außerdem wird die zweidimensionale Intensitätsverteilung der Elektro- und Photolumineszenz von UVB-LEDs im Laufe des Betriebs untersucht. Mögliche Änderungen der Homogenität der Verteilungen sollen mit den Ergebnissen aus Teil 1 und Teil 2 in Verbindung gebracht werden und so das physikalische Verständnis erweitern. Schließlich soll zudem ein physikalischer Ansatz gefunden werden, der die Zeitabhängigkeit der

Reduktion der optischen Leistung erklären kann.

Im Gegensatz zu den ersten Teilen, die sich mit der graduellen Degradation beschäftigen, soll im dritten Teil das Auftreten plötzlicher Totalausfälle untersucht werden. In diesem Kontext wird zunächst der Einfluss der Betriebsparameter auf deren Häufigkeit untersucht. Schließlich soll die zeitliche Entwicklung der Häufigkeit plötzlicher Totalausfälle im Betrieb von UVB-LEDs quantifiziert werden. Dies soll einerseits eine zeitliche Extrapolation der Wahrscheinlichkeit des Auftretens ermöglichen. Andererseits soll herausgefunden werden, welche Relevanz dieser Effekt für den Langzeitbetrieb der LEDs hat.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Wissensgebiet im Bereich der Physik der betriebsbedingten Degradation von UV-LEDs erweitert werden. So werden die Ergebnisse zeigen, dass es wahrscheinlich die Auger-Rekombination ist, die die Degradation im Betrieb der UV-LEDs vorantreibt. Dieser Prozess liefert zugleich eine Antwort darauf, woher der nötige Energieeintrag kommt, der zur Veränderung der Halbleitereigenschaften führt. Zudem wird sich ergeben, dass der Verlustmechanismus, der die Reduktion der optischen Leistung zur Folge hat, wahrscheinlich auf die Zunahme der nichtstrahlenden SRH-Rekombinationsrate zurückgeht. Des Weiteren wird sich zeigen, dass die Defektdichte eine wichtige Stellschraube für die Lebensdauer von UV-LEDs ist.

2 Stand der Forschung

Während des Konstantstrombetriebs von UV-LEDs ist typischerweise eine Reduktion der optischen Leistung mit der Betriebszeit zu beobachten. Da die Langzeitstabilität der optischen Leistung für viele Anwendungen erforderlich ist, kann dieser Effekt als zentraler Effekt bei der betriebsbedingten Degradation gesehen werden. Daher steht die betriebsbedingte Änderung der optischen Leistung im Fokus dieser Arbeit. Über die damit zusammenhängenden Effekte und Ursachen soll zunächst in Abs. 2.1 ein Überblick zum aktuellen Stand der Forschung gegeben werden. Abgesehen von der optischen Leistung können sich auch weitere elektrooptische Eigenschaften von UV-LEDs während des Betriebs ändern, wozu in Abs. 2.2 ein Überblick gegeben werden soll. Schließlich soll in Abs. 2.3 auf wesentliche Unterschiede zwischen (In)AlGa_N-basierten UV-LEDs und LEDs mit Emissionswellenlängen im sichtbaren Bereich eingegangen werden. Hierdurch soll beleuchtet werden, weshalb für UV-LEDs ein anderes Degradationsverhalten zu erwarten ist.

2.1 Reduktion der optischen Leistung

Bei dem Betrieb von UV-LEDs wurde bereits festgestellt, dass ein hoher **Betriebsstrom** zu einer schnelleren Abnahme der optischen Leistung führt [18][19][20]. Eine stromgetriebene Abnahme der optischen Leistung wurde ebenfalls für Nitrid-basierte LEDs mit Emissionswellenlängen im sichtbaren Bereich beobachtet [21]. In einigen Veröffentlichungen wurde ebenfalls berichtet, dass die optische Leistung bei höheren **Betriebstemperaturen** schneller abnimmt [22][23]. Ein Ziel dieser Arbeit besteht darin, den Einfluss der Betriebsparameter Strom und Temperatur auf die betriebsbedingte Reduktion der optischen Leistung systematisch zu untersuchen.

Bei der **Beschreibung des Zeitverhaltens** der Reduktion der optischen Leistung einer LED im Konstantstrombetrieb wird in der Literatur häufig ein näherungsweise exponentieller Abfall beobachtet oder angenommen [12][24][25, S. 168][26][27]. Daher wird für UV-LEDs teilweise ebenfalls ein exponentielles Zeitverhalten postuliert [12][26][22]. Dennoch zeigen viele Untersuchungen, dass die zeitliche Änderung der optischen Leistung von UV-LEDs nicht exponentiell abläuft [14][18][28]. Dass die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Abnahme der optischen Leistung von UV-LEDs nicht durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann, ist exemplarisch in Abb. 2.1a dargestellt. Einige Untersuchungen ließen den Schluss zu, dass die Reduktion der optischen Leistung eine wurzelförmige Zeitabhängigkeit besitzt,

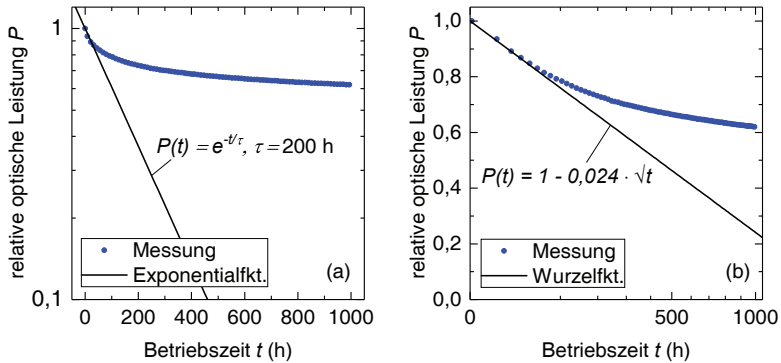


Abbildung 2.1: Typischer Verlauf der gemessenen relativen optischen Leistung einer in dieser Arbeit untersuchten UVB-LED über der Betriebszeit, wobei in (a) die y-Achse logarithmisch und in (b) die x-Achse wurzelförmig skaliert ist. Eingezeichnet sind zudem eine Exponentialfunktion und eine Wurzelfunktion.

was häufig mit einem Diffusionsprozess in Verbindung gebracht wird [18][28][29][30, S.221]. Dennoch lässt sich die Abnahme der optischen Leistung der in dieser Arbeit untersuchten UV-LEDs nicht durch eine einfache Wurzelfunktion beschreiben (Abb. 2.1b). Glaab et al. [31] versuchten diesbezüglich eine Exponentialfunktion mit einer Wurzelfunktion zu kombinieren, wobei die optische Leistung über der Zeit näherungsweise beschrieben werden konnte. Ziel dieser Arbeit ist es, empirisch eine mathematische Beschreibung herzuleiten, welche die Extrapolation des zeitlichen Verlaufs der optischen Leistung ermöglicht.

Die Reduktion der optischen Leistung wird in einigen Veröffentlichungen mit der **Generation oder Aktivierung von Defekten** verbunden, welche sich innerhalb oder nahe an der aktiven Zone der LED befinden [13][14][15][32][33][34]. Hierbei wird häufig von Punktdefekten ausgegangen, die als nichtstrahlende Rekombinationszentren agieren [35][36][37], da diese zu einer Erhöhung der Anzahl von Defektzuständen innerhalb der Bandlücke beitragen [14]. Die damit einhergehende Zunahme der nichtstrahlenden Shockley–Read–Hall-Rekombinationsrate (SRH) führt dann zur Abnahme der optischen Leistung [14]. In diesem Fall würde sich zudem die Ladungsträgerlebensdauer in der aktiven Zone verkürzen. Obwohl die Zunahme der nichtstrahlenden SRH-Rekombinationsrate [13][14][15][16][17] häufig als Ursache für den Verlust der optischen Leistung diskutiert wird, fehlen bislang systematische Untersuchungen, die eine Abnahme der Ladungsträgerlebensdauer während

des Betriebs bestätigen. Einerseits konnten Moe et al. [19] bereits einen Hinweis auf eine Verkürzung der Ladungsträgerlebensdauer finden. Andererseits wurde dieser Effekt hinsichtlich der Reduktion der optischen Leistung als vernachlässigbar eingestuft. Andere Untersuchungen deuteten darauf hin, dass sich die Ladungsträgerlebensdauer im Betrieb nicht ändert [32]. Mittels der zeitaufgelösten Messung der Photolumineszenz soll im Rahmen dieser Arbeit unter anderem untersucht werden, inwieweit eine betriebsbedingte Verkürzung der Ladungsträgerlebensdauer (bzw. eine Zunahme der SRH-Rekombinationsrate) ein realistischer Erklärungsansatz für die zeitliche Reduktion der optischen Leistung von UV-LEDs ist.

Abgesehen davon wurde bereits diskutiert, dass eine Erhöhung der Dichte an Defektzuständen möglicherweise dazu führt, dass sich leitfähige Pfade ausbilden [32], entlang derer Ladungsträger schrittweise durch Tunnel-Prozesse den pn-Übergang überwinden. Hierdurch nimmt der **Leckstrom** zu, wodurch sich die Injektionseffizienz verringert und so zu einer Abnahme der strahlenden Rekombinationsrate führen würde. Zudem könnten Leckströme entlang der Mesakante ebenfalls eine Rolle spielen [38]. In beiden Fällen wäre dann zu erwarten, dass der gemessene Strom bei einer Spannung, die kleiner als die Diffusionsspannung ($U_D \approx 4\text{ V}$) ist, zunimmt [38][39]. Der mögliche Zusammenhang zwischen der Änderung des Leckstroms und der Reduktion der optischen Leistung soll im Rahmen dieser Arbeit beleuchtet werden. Abgesehen von Leckströmen kann die Abnahme der Injektionseffizienz der Ladungsträger in die aktive Zone ebenfalls mit der Änderung interner elektrischer Felder zusammenhängen [40]. Dieser Aspekt wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht untersucht.

Bei **Punktdefekten** wird insbesondere die Rolle von Gruppe-III-Vakanzen oder von Defektkomplexen diskutiert [14][15][19][32][33][34]. Eine Zunahme der Punktdefekt- oder der Defektkomplexdichte während des Betriebs von UV-LEDs konnte jedoch bislang nicht durch eine direkte strukturelle Untersuchung bestätigt werden. Derartige Untersuchungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Neben Punktdefekten steht ebenfalls die Rolle von **Versetzungen** unter Diskussion [15][32]. Für Versetzungen, bei denen es sich um eindimensionale Defekte handelt, die typischerweise in AlGaIn-basierten Halbleitern beobachtet werden, ist bekannt, dass diese einen Einfluss auf die interne Quanteneffizienz haben [41]. Bislang existiert jedoch keine Veröffentlichung, die sich mit dem Einfluss der Versetzungsdichte auf die Lebensdauer von AlGaIn-basierten UV-LEDs beschäftigt. Dennoch lassen Untersuchungen an InGaIn-basierten LEDs mit Emission bei 365 nm darauf schließen, dass Versetzungen hinsichtlich der betriebsbedingten Degradation eine Rolle spielen [27]. Es ist jedoch offen, inwieweit sich diese Ergebnisse auf AlGaIn-basierte UV-LEDs übertragen lassen. Diese Arbeit soll unter anderem klären, wie stark der Einfluss der Versetzungsdichte auf die betriebsbedingte Degradation von UV-LEDs ist.

Abgesehen von einer Gerneration bzw. einer Aktivierung von Defekten gibt es

in der Literatur Hinweise auf eine **Migration von Defekten** innerhalb der Heterostruktur von UV-LEDs. So wurde bereits eine Diffusion von Al-Atomen diskutiert [28][42]. Ebenfalls konnten Glaab et al. [34] mittels Sekundärionenmassenspektrometrie zeigen, dass Wasserstoffatome durch die Heterostruktur migrieren. Derartige Untersuchungen sind nicht Teil dieser Arbeit. Dennoch soll insbesondere die Kenntnis von der Migration von Wasserstoff bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Bei einem Diffusionsprozess kann davon ausgegangen werden, dass die thermische Energie die Degradation antreibt, da sich die Diffusionsgeschwindigkeit mit der Temperatur erhöht. Es stellt sich jedoch die Frage, wodurch der nötige **Energieeintrag für den Degradationsprozess** der Aktivierung bzw. der Generation von Defekten während des Betriebs bereitgestellt wird. Schließlich lässt sich für das Ablösen von Wasserstoffatomen, die an Defekte gebunden sind, ein notwendiger Energieeintrag von $> 1 \text{ eV}$ abschätzen [34]. Da Iveland et al. [43] bereits heiße Ladungsträger, die aus einem Auger-Rekombinationsprozess hervorgehen, in GaN-basierten LEDs nachweisen konnten, kann man vermuten, dass derartige Ladungsträger ebenfalls in AlGaN-basierten LEDs existieren und möglicherweise die nötige Energie bereitstellen. Bislang lassen sich jedoch keine Veröffentlichungen finden, die das Vorhandensein von heißen Ladungsträgern mit der Reduktion der optischen Leistung im Betrieb von UV-LEDs in Verbindung bringen. Eine weitere Möglichkeit, für die De Santi et al. [44] in GaN-basierten Photodetektoren einen Hinweis gefunden haben, wäre, dass der Prozess der Generation oder Aktivierung von Punktdefekten auf die Absorption von Photonen zurückgeht. Im Rahmen dieser Arbeit sollen mittels Variationen des Heterostrukturdesigns und der Betriebsparameter Erkenntnisse gewonnen werden, die Rückschlüsse auf den **treibenden Prozess** hinter der betriebsbedingten Degradation zu ziehen erlauben.

2.2 Weitere Degradationseffekte

Abgesehen von der Stabilität der optischen Leistung kann die Stabilität des **Emissionsspektrums** für viele Anwendungen eine große Rolle spielen. Für UV-LEDs wurde bereits beobachtet, dass sich die Intensitätsverteilung des Emissionsspektrums im Laufe des Betriebs ändern kann [16][42][45]. So beobachteten Pinos et al. [42] beispielsweise eine Rotverschiebung des Maximums des Emissionsspektrums, wobei eine Diffusion von Aluminium als Erklärungsansatz diskutiert wurde. Die LEDs, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, zeigen jedoch im Laufe des Betriebs keine Verschiebung des Maximums, was in Abb. 2.2a exemplarisch für eine UVC-LED mit Hauptemission bei $\lambda \approx 265 \text{ nm}$ dargestellt ist. Zudem bleibt die Halbwertsbreite der Verteilung der Hauptemission der untersuchten UV-LEDs während des Betriebs konstant und es zeigt sich im Rahmen dieser Arbeit keine Änderung der Intensitätsverteilung der Emissionsspektren. Außerdem fallen die Intensitäten der parasitären Lumineszenz im langwelligen Bereich ($\lambda > 310 \text{ nm}$ für die

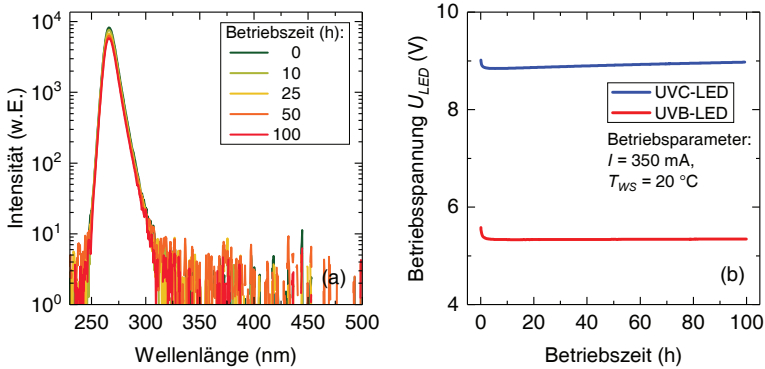


Abbildung 2.2: a) Die während des Betriebs gemessenen Spektren einer typischen UVC-LED, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. b) Der typische Verlauf der Betriebsspannung einer in dieser Arbeit untersuchten UVB- und UVC-LED während des Betriebs.

dargestellte UVC-LED) typischerweise um drei Größenordnungen geringer aus als die Intensität des Maximums. Daher wird die Betrachtung der betriebsbedingten Änderung der Emissionscharakteristik im Rahmen dieser Arbeit auf die optische Leistung beschränkt.

In einigen Veröffentlichungen konnte beobachtet werden, dass sich die **Betriebsspannung** während des Konstantstrombetriebs von UV-LEDs ändert [28][31][46][47]. Dies wurde mit der Änderung der Leitfähigkeit der p-Seite bzw. des Kontaktwiderstands der p-Seite in Verbindung gebracht, wobei die Bildung bzw. das Aufbrechen von Mg-H-Komplexen als Ursache diskutiert wurde [34][46][47]. Die in dieser Arbeit untersuchten UVB- und UVC-LEDs zeigen ebenfalls eine Änderung der Betriebsspannung während des Betriebs (Abb. 2.2b). Hierbei verringert sich die Betriebsspannung typischerweise innerhalb der ersten (0,2–5,0) h des Betriebs um etwa (0,1–0,5) V und nimmt im Anschluss innerhalb der folgenden (100–300) h des Betriebs um (0,1–2,0) V zu. Die Untersuchung dieses Effekts steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Dennoch wird eine mögliche Ursache für die zeitliche Änderung der Betriebsspannung im Kontext dieser Arbeit diskutiert.

Neben den graduellen Änderungen der elektrooptischen Eigenschaften von UV-LEDs während des Betriebs, wurde in einigen Veröffentlichungen bereits berichtet, dass ebenfalls **plötzliche Totalausfälle** auftreten können [32][48]. Dabei zeigt

sich typischerweise ein plötzlicher Totalverlust der optischen Leistung, welcher von einer Reduktion der Betriebsspannung begleitet wird. Plötzliche Totalausfälle beschränken sich jedoch nicht auf AlGaIn-basierte UV-LEDs, sondern wurden ebenfalls für GaN-basierte LEDs beobachtet [49]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Wahrscheinlichkeit und die zeitliche Verteilung des Auftretens der plötzlichen Totalausfälle untersucht werden. Zudem soll die Häufigkeit in Abhängigkeit der Betriebsparameter betrachtet werden.

Die für die Anwendung relevanten Degradationseffekte müssen nicht zwangsläufig auf die Eigenschaften des LED-Chips beschränkt sein, sondern können ebenfalls Änderungen der Eigenschaften von **Verpackungs- und Vergussmaterialien** beinhalten. Beispielweise wurde bereits beobachtet, dass es bei Vergussmaterialien infolge der UV-Strahlung und der Selbsterwärmung im Betrieb zu Vergilbung [50] oder zur Rissbildung [51][52] kommen kann. Ein weiterer Aspekt ist die Bildung von Ablagerungen an der Grenzfläche zwischen Chip und Umgebung, welche eine Verringerung der Effizienz der Lichtauskopplung zur Folge haben kann. Hierbei kann die umgebende Gasatmosphäre eine wesentliche Rolle spielen. So beobachteten beispielsweise Schoedl et al. [53], dass es im Betrieb von (Al,In)GaIn-basierte Laserdioden sowohl unter Stickstoffatmosphäre als auch unter wasserreichen Atmosphären zu Ablagerungen auf der Facette kommen kann. Für AlGaIn-basierte UV-LEDs lassen sich zum aktuellen Zeitpunkt jedoch keine Veröffentlichungen finden, in denen von einem solchen Effekt berichtet wird. Derartige Untersuchungen liegen außerhalb des Rahmens dieser Arbeit.

Ein weiterer Aspekt, der für die betriebsbedingte Degradation von UV-LEDs eine Relevanz haben könnte, sind **Temperatur- und Stromwechselzyklen** [51]. Insbesondere aufgrund der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien eines UV-LED-Chips (Saphir, AlGaIn, Metallkontakte, Lot, etc.) ist denkbar, dass es in einem zyklischen Betrieb beispielsweise zur Rissbildung oder Ablösung von Schichten innerhalb des Chips kommen kann. Die Untersuchung des zyklischen Betriebs ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

2.3 Besonderheiten bei AlGaIn-basierten UV-LEDs

Während (In)GaIn-basierte blau emittierende LEDs **Konversionseffizienzen** (WPE, „wall-plug efficiency“) von $> 80\%$ erreichen, ergeben sich für (In)AlGaIn-basierten UVB- und UVC-LEDs typischerweise geringere Konversionseffizienzen von $< 10\%$ [8]. Daraus ergibt sich für den Betrieb von UVB- und UVC-LEDs eine deutlich höhere Verlustleistung, die unter anderem zur Selbsterwärmung des Chips führt. Die Verlustleistung kann möglicherweise zu einem (im Vergleich zu blauen LEDs) anderen Degradationsverhalten führen. Die verhältnismäßig kleinen Konversions-