

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 1

Artikel: Ausfalluntersuchungen bei LEDs
Autor: Jacob, Peter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856181>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ausfalluntersuchungen bei LEDs

Übersicht über Gehäuse- und Chip-basierte Fehlerquellen

Im letzten Jahrzehnt haben LEDs eine geradezu stürmische Weiterentwicklung durchlaufen und sind gerade dabei, auch in der Beleuchtungstechnik Leuchtstofflampen und die gute alte Glühlampentechnik nicht nur abzulösen, sondern auch neue Masstäbe zu setzen. Genau der richtige Zeitpunkt also, um sich auch einmal die Ausfallmechanismen und speziellen Empfindlichkeiten von LEDs näher anzusehen.

Peter Jacob

Grundsätzlich bestehen LEDs aus zwei Hauptkomponenten, dem eigentlichen LED-Chip, einem kleinen Halbleiterchip, der, abgesehen vom verwendeten Material (z.B. Gallium-Nitrid oder Gallium-Arsenid statt Silizium), mit einem kleinen Mikrochip vergleichbar ist, sowie dem dazugehörigen Gehäuse, das in der Fachsprache auch «Package» genannt wird. Zum Gehäuse im weiteren Sinne gehören auch die Aussenanschlüsse und deren Innenverbindung zum Chip.

Die Ausfallmechanismen können somit einerseits den LED-Chip selbst und andererseits das Package (Gehäuse) betreffen, das die Verbindungstechnik nach aussen, die Abschirmung gegenüber Umwelteinflüssen und die Wärmeabfuhr gewährleisten soll.

Betrachtet man die Gesamtzahl der Ausfälle, so stellt man überrascht fest, dass die meisten Probleme dem Package zuzuordnen sind und nur eine verhältnismässig geringe Zahl von Ausfällen dem Chip selbst. Ferner ist – im Gegensatz zu den meisten anderen Halbleiterprodukten – ein LED-Ausfall nur selten ein abrupter Totalausfall. Meist gehen LED-Ausfälle langsam vonstatten – etwa in Form einer verminderten Lichtleistung oder intermittierenden Verhaltens (etwa vergleichbar mit einem «Wackelkontakt»). Für beides gibt es eine Vielzahl von teils konstruktiven, teils anwendungsorientierten Ursachen (**Tabelle 1**).

Die LED besteht aus dem lichtemittierenden Chip, meist auf Saphir-Substrat, einer sogenannten «Phosphorschicht», einer Bondierung, die den Chip mit den Aussenanschlüssen verbindet sowie einem der Bauform und Anwendung entsprechend gestalteten Gehäuse. Die

Phosphorschicht hat eigentlich nichts mit dem chemischen Element Phosphor gemein. Der Name hat sich aus dem – mit anderer Bedeutung versehenen – Begriff der Phosphoreszenz eingebürgert. Gemeint ist aber eine je nach angestrebter Lichtfarbe unterschiedlich zusammengesetzte Schicht, die das von der LED emittierte Licht ähnlich wie bei der Leuchtstofflampe in die gewünschte Lichtfarbe umwandelt. Auf die zahlreichen Bauformen und LED-Technologien kann an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen werden, hierzu sei auf den gut verständlichen Übersichtsartikel [1] verwiesen.

Fehlerquellen bei Gehäusen

Ausfallmechanismen im Packaging äussern sich auf folgende Weise:

- **Intermittierendes Verhalten oder Unterbruch.** Haftungsprobleme der chipseitigen Ball-Bondierung, Stichbond-Abscherung am Pad, Delamination vom Die-attach, Delamination des transparenten Gehäuse-Oberteils unter «Mitnahme» des darin vergossenen Bonddrahts.
- **Kurzschluss.** Der im Die-attach verwendete Leitkleber ist zu hoch dosiert: Ein seitliches Aufsteigen über die Chipkante schliesst die Chipoberseite und Unterseite kurz. Wachstum von Silberdendriten (meist vom Leitkleber) mit kurzschliessender Wirkung zwischen LED-internen Bondier-Pins.

Die Ursachen dieser Ausfallmechanismen liegen jedoch nicht nur in der Gehäusekonstruktion, sondern häufig auch in der nachfolgenden Verarbeitung. LED-Gehäuse sind gegenüber hohen Temperaturen empfindlich, was sich in einer spürbar höheren Ausfallrate bei der Einführung bleifreier Lötprozesse vor einigen Jahren zeigte.

| Mechanismus | Ursache | Elektr. Messung | Ausfallerscheinung |
|---------------------------------|---|--|---|
| Intrinsische Fehlstellen | (Heiss-)Prozesse Halbleiter | Sperrkennlinie «rund», tiefe Vrev | Nach einiger Zeit: Dark Lines, Dark Spots |
| Extrinsische Fehlstellen | ESD bei Assembly, Betrieb mit Sperrspannungs-Spikes, mangelnde Kühlung | Sperrkennlinie «rund», tiefe Vrev, zeitl. degradierend | Nach einiger Zeit: Dark Lines, Dark Spots, bis hin zum Totalausfall |
| Die-cracking | Die-Pick & Place, Biegebelastung in Karten usw. | Stark verfälschte Kennlinien | Keine oder stark verringerte Lichtleistung |
| Kantenschluss | Zu viel Leitkleber, asymm. Klebung, Dendriten | Mehr oder weniger ohmscher Bypass | Keine oder geringe Lichtleistung |
| Überlastbetrieb | Vorwiderstand / Schutzdiode fehlt / zu gering | Verfälschte, flachere Vorwärts-Kennlinie | Nachlassende Lichtleistung bis Ausfall |
| Die-attach Delamination | Lötprozess, Material Leitkleber, undichter Transparentverguss | Unterbruch, Wackelkontakt | Totalausfall, intermittierender Betrieb, bei AC schwaches Licht |
| Stichbond-Lifting | Lötprozess, Beinlänge zu kurz, Bondprozess | Unterbruch, Wackelkontakt | Totalausfall oder intermittierender Betrieb |
| Chip-Wirebond-Lifting | Bondprozess, starke thermomech. Belastung, zykl. Betrieb bei Power-LEDs | Unterbruch, Wackelkontakt | Totalausfall oder intermittierender Betrieb |
| V-Pitting | Kristallfehler plus Kontamination | Verfälschte Kennlinie | Verringerte Lichtleistung, Farbabweichungen |
| Kontamination | Redeposition bei Plasmareinigung vor Bonden, undichte Gehäuse | Verfälschte Kennlinie, hohe Sperrleckströme | Verringerte Lichtleistung, Farbabweichungen |
| Transparentgehäuse-Delamination | Zu hohe thermomech. Belastg., Vorreinigungen | Unterbruch, Wackelkontakt | Totalausfall oder intermittierender Betrieb |

Tabelle 1 Übersicht über wichtige Ausfallursachen bei LEDs.

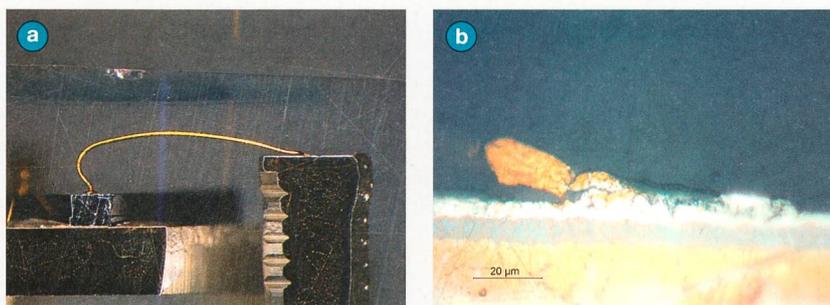


Bild 1 a) Übersicht der Bondierung, rechts endet der Bonddraht auf dem Pin in Form eines Stichbonds; b) Detailbild der geschädigten Stichbondierung.

Bei – infolge möglichst klein gehaltenen Bauformen – nur geringer Überdeckung der Anschlusspins mit Gehäusematerial kann der Wärmeeintrag beim Löten über die Pins mikroskopisch kleine Delaminationen zum Gehäusematerial bewirken. Die dann folgenden thermomechanisch bedingten Relaxationsbewegungen führen nahezu zwingend zu Beschädigungen und Abscherungen von Stichbonds (die Befestigung des von der LED kommenden Bonddrahts auf dem Pin), die sich häufig erst in der späteren Anwendung als Wackelkontakte oder vollständige Unterbrüche bemerkbar machen (**Bild 1**). Bei der Leiterplattenbestückung müssen deshalb die LED-herstellerseitigen Vorgaben für mechanisch spannungsfreie Bestückung und Lötung sowie Vorgaben zu verbleibenden Pin-Mindestlängen für Durchsteck-LEDs unbedingt genau beachtet werden.

Im Gehäuseprozess selbst treten besonders bei SMD-Bauarten mitunter Haftungsprobleme zwischen dem nicht transparenten Gehäuseunterteil und dem transparenten Gehäuseoberteil auf, welche den unterschiedlichen Materialeigenschaften, betrieblich bedingter thermischer Zyklierung bei ungenügender Kühlung oder ungeeigneten Reinigungsprozessen vor dem Aufbringen des Transparentmaterials geschuldet sind. Da zumindest ein Teil der Drahtbondierung vom Transparentmaterial umgeben ist, führt jegliche mechanische Bewegung ebenfalls zum Bondabriss oder mindestens zur Beschädigung des Bonds mit intermittierender Wirkung. In Extremfällen wurde auch beobachtet, dass zwar die Haftung Chip-Transparentmasse sehr gut, die Haftung Gehäuseunterteil-Transparentmasse aber sehr schlecht war. Folge: Delamination des Chips vom Die-attach, ebenfalls oft zunächst in intermittierender Form.

Unabhängig von den beschriebenen elektrischen Folgen führen selbst geringe, örtlich begrenzte Delaminationen, die noch keine Auswirkung auf die Funktionalität zeigen, zu späteren Ausfällen, da über sie nahezu ungebremst Feuchte eindringen kann. In Verbindung mit den im Packaging verwendeten Materialien (z.B. silberhaltiger Leitkleber) fördern die im Betrieb vorhandenen elektrischen Potenziale das Wachstum sogenannter Dendriten, die gehäuseinterne Kurzschlüsse erzeugen (**Bild 2**). Da diese häufig relativ hochohmig beginnen, folgt nicht zwingend ein sofortiger LED-Totalausfall, sondern oft zunächst nur eine Schwächung der abgestrahlten Lichtleistung.

Bei der Anwendung von LEDs sollte man sich generell bewusst sein, dass Kunststoffe nur einen zeitlich begrenzten Schutz vor dem Eindringen von Feuchte bieten und zudem hohe Eigen- und Umgebungstemperaturen sowie zyklische Betriebsbelastungen den Feuchtetransport beschleunigen. LEDs sollten deshalb zumindest in professionellen Anwendungen generell nur in trockener Umgebung eingesetzt werden – die Abdichtung gegen Feuchteinwirkung muss dann durch entsprechende anwenderbezogene, «externe» Gehäuseschutzmassnahmen sichergestellt werden.

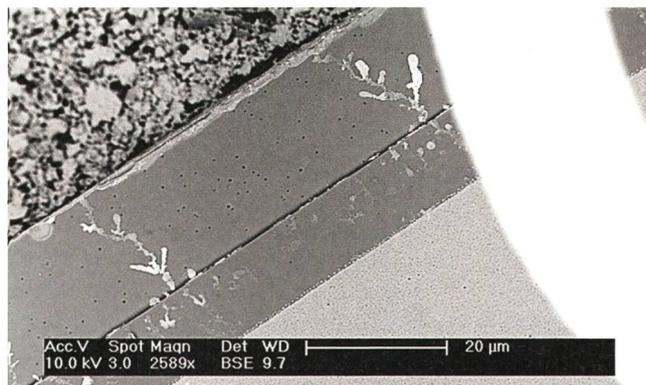


Bild 2 Dendritenwachstum aus einem Silberleitkleber an einer Chipkante. Solche Dendriten treten häufig auch zwischen einzelnen Leiterbahnen innerhalb des LED-Gehäuses auf.

Ausfallursachen im LED-Chip

Auch bei den chipseitigen Ausfallursachen bilden plötzliche Totalausfälle eine Ausnahme, etwa beim Zerschneiden des Chips in mechanisch flexiblen Anwendungen. Chipseitige Fehler oder Schwachstellen äussern sich meist in Form einer ungewöhnlich raschen Abnahme der abgestrahlten Lichtleistung.

Bei der Bewertung von Fehlern in LED-Chips muss zunächst bedacht werden, dass diesen ohnehin eine gewisse intrinsische Fehlerdichte anhaftet, die sich auch anhand der Sperrkennlinie grob bewerten lässt. In normalen CMOS-Halbleitern gibt es eigentlich nur eine sehr geringe intrinsische Fehlerdichte; zudem haben die Fehlstellen auch bei hoch integrierten Si-Halbleitern eine statistisch grosse Chance, irgendwo im (elektrisch inaktiven) Feldoxid aufzutreten, wo sie ohne störende Wirkung bleiben.

Dies ist bei LEDs anders: Die aktive Fläche mit dem Multi-Quantum-Well, MQW, nimmt praktisch die gesamte Chipfläche ein; jeder in diesem Flächenbereich enthaltene Fehler ist prinzipiell elektrisch wirksam, auch dann, wenn er aktuell die Leuchtkraft nicht oder kaum beeinträchtigt. Hinzu kommt die Tatsache, dass die für LEDs verwendeten Halbleitermaterialien generell eine höhere Defektdichte als Silizium aufweisen. Dieser Umstand zeigt sich auch im Sperrverhalten von LEDs; die diesbezüglichen Kennlinien weisen eine relativ grosse Streuung sowohl im Kurvenverlauf als auch in der erreichten Sperrspannung auf (**Bild 3**), was sich auch in entsprechend toleranten Spezifikationen niederschlägt (bereits zweistellige μA -Beträge sind bei -3 V bei den meisten Herstellern erlaubt).

Diese zunächst harmlosen Störstellen können sich durch äussere Einflüsse, z.B. Bestromung mit negativen Schaltflanken oder überlagerten Störimpulsen, elektrostatischen Entladungen (ESD, electrostatic discharge) in Bestückungsprozessen

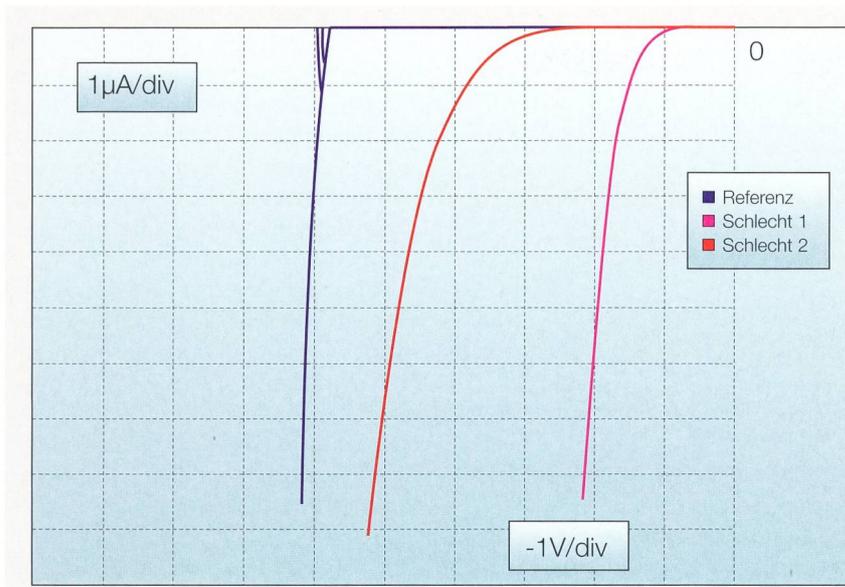


Bild 3 Sperrkennlinien von LEDs (alle aus der gleichen Charge). Alle LEDs sind funktional, zeigen aber unterschiedliches Sperrverhalten.

oder Betrieb mit überhöhten Stromimpulsen zu inneren Shunts erweitern, die wie örtliche Parallelwiderstände wirken (siehe Ersatzschaltbild in **Bild 5**). Als Folge ergibt sich aber kein Totalausfall der LED, sondern es stellen sich, je nach Defekt, sogenannte Dark Lines oder auch Dark Spots ein, die die Lichtemission der LED deutlich herabsetzen. Da sich solche Defekte aufgrund ihrer vergleichsweise zur Umgebung hohen Stromdichte zügig erweitern und dadurch die Licht emittierende Fläche weiter reduziert wird, ist insgesamt in solchen Fällen statt eines Totalausfalls eine Abnahme der Lichtemission und somit eine signifikant reduzierte Lebensdauer zu beobachten. **Bild 4** zeigt ein Beispiel für das beschriebene Degradationsverhalten.

Bei zuverlässigkeitskritischen Anwendungen, wie etwa in LWL-Übertragungsstrecken oder Optokopplern, ist es daher überlegenswert, die Sperrkennlinie der Sende-LED (die einen gewissen Anschluss über die Defektdichte und über allfällige Vorschädigungen, etwa durch ESD gibt) in die Sortierkriterien, dem sogenannten «Binning», miteinzubeziehen. Schädigungen des LED-Chips können aber auch an der «Schnittstelle» zwischen Chip und Gehäuse entstehen. Dazu gehören etwa der Eintrag ionischer Kontamination in den Chip über sogenannte V-Pits (was Gehäuseundichtigkeiten oder einen Eintrag bereits während des Gehäuseungsprozesses bedingt) oder auch chemische Schädigungen der «Phosphor»-Schicht, die Farbverhalten und Lichtemission beeinträchtigen können.

Bei Power-LEDs kommt es häufig zu Ausfällen wegen einer mangelhaften Kühlung. Ebenso wie die sehr hohe ESD-Empfindlichkeit wird auch oft die hohe «punktförmige» Wärmeerzeugung von Hochleistungs-LEDs unterschätzt. Be-

sonders bei längerer Betriebsdauer muss deshalb auf ausreichende Kühlung geachtet werden. Übermäßige Erwärmung kann auch im Gehäuse Schäden verursachen, z.B. durch thermomechanische Spannungen (Delaminationen, Bondabscherungen, Ablösen des transparenten Gehäuseteils, «Erblindung» des transparenten Materials zu einer milchglasartigen Masse mit geringer Transparenz).

Fehler bei Verarbeitung und Anwendung

Es stellt sich schliesslich die Frage, was der Anwender tun kann, um den beschriebenen Fehlermechanismen entgegenzuwirken. Tatsächlich eröffnen sich diesem bei Kenntnis der Anwendungsbedingungen eine Reihe von Möglichkeiten zur Vermeidung von vorzeitigen Ausfällen:

- LEDs immer mit einer seriellen Schutzdiode betreiben, um eine Bepulsung in Sperrrichtung, etwa durch Schaltflanken, zu vermeiden.
- Wärmeableitung in Konstruktion und Auslegung der Leiterplatte beachten.
- Impulsbetrieb mit gezielter Übersteuerung möglichst vermeiden. Wenn erforderlich, Herstellervorgaben und

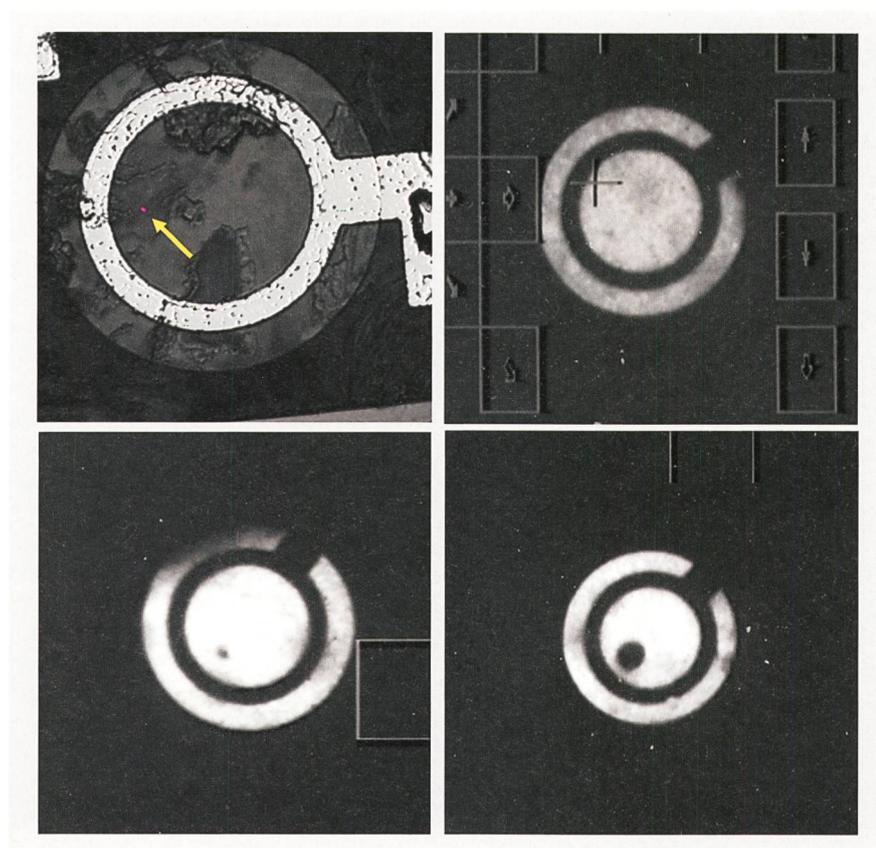


Bild 4 Oben links: LED in Sperrrichtung; mit einem Emissionsmikroskop wurde bei $1\mu\text{A}$ eine Störstelle genau gegenüber der von rechts oben ankommenden Metallisierung (hell) geortet (blauer Punkt, Pfeil). Im Bereich der Störstelle ist zunächst ein winziger dunkler Schatten erkennbar, der sich im Betrieb allmählich vergrößert (unten) und so die abgestrahlte Lichtleistung verringert.

Bilder: Peter Jacob, Empa

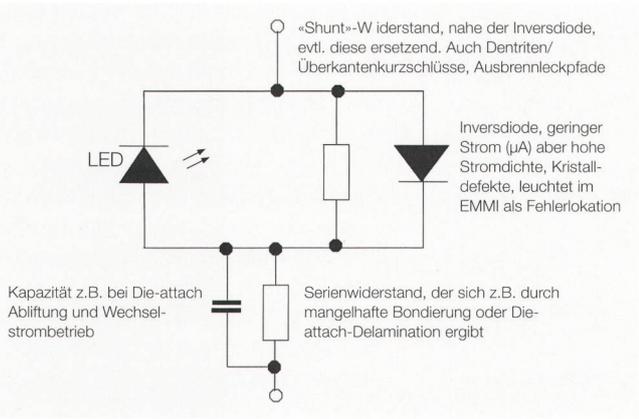


Bild 5 Ersatzschaltbild einer LED mit Fehlerstrompfaden.

Beschaltungsempfehlungen zwingend beachten! Die Einhaltung eines mittleren thermischen Gleichgewichts allein genügt meist nicht.

- In Optokoppler-/LWL-Anwendungen auf Duty-Cycles, d.h. auf Betriebszustände, während derer das Bauteil eingeschaltet ist, achten. Im Ruhe-/Standby-Zustand müssen die Sende-LEDs ausgeschaltet sein. Um dies sicherzustellen, müssen u.U. Inverter in die Schaltung eingefügt werden.
- Dauerstromangaben des Herstellers immer beachten, wenn möglich Derrating (Betrieb unter milderer Bedingungen) vornehmen.
- Bauform gemäss der Anwendung wählen. Für vibrationsbelastete, feuchte Umgebungen mit Temperaturwechseln sind kleine SMD-Bauformen eher ungeeignet. Wenn dennoch nötig, zusätzlichen hermetischen Gehäuseschutz (Verguss, Hinterglasmontage usw.) in Betracht ziehen und die Anwendung mit dem Hersteller absprechen und Gewährleistung vertraglich absichern lassen. Bei gemeinsamer Einhausung mit Ansteuer-elektronik auch deren Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsbedingungen mitberücksichtigen. Bei Feuchte generell Vorsicht bei Bauformen mit Silberleitklebern (Dendritenbildung!); in solchen Fällen auch auf Vergoldung der inneren Verschaltung und Bondierung achten (hemmt korrosive Einflüsse). Generell gilt: Da Kunststoffe mit der Zeit Feuchte aufnehmen, sollten für LEDs bei entsprechender Exposition anwendungsspezifische, hermetisch dichte Umverpackungen vorgesehen werden.
- Beim Bestücken von Leiterplatten mit LEDs auf ESD-Sicherheit, < 50 V HBM¹⁾, und genaue Einhaltung der Lötprofile achten. Lötstress verursacht häufig Undichtigkeiten des Gehäuses und Abscherungen von LED-internen Bondierungen mit der Folge von verfrühten

Ausfällen und/oder Wackelkontakten. Zudem müssen bei Durchsteck-LEDs die Mindestabstände LED-Gehäuse-Leiterplatte (verbleibende Pinlänge!) beachtet werden, um übermässigen Wärmeeintrag in die LED beim Lötprozess zu vermeiden. Nicht unter mechanischer Vorspannung der Pins löten.

- Serienschaltungen von LEDs wenn möglich vermeiden, sonst Spannungsverteilung durch Parallelwiderstände stabilisieren. LEDs sind alternde Komponenten, deren Kennlinien sich mit der Zeit verändern, was sich in Serienschaltungen auf die Spannungsverteilung auswirkt.
- Für besonders zuverlässigkeitskritische Anwendungen evtl. Vorsortierung nach Sperrkennlinienverhalten in Erwägung ziehen.

Zusammenfassung

Der Artikel zeigt in knapper Form einen Querschnitt über die Ausfallursachen von LEDs, die sich in Gehäuse-

bzw. Chip-basierte Fehlerquellen unterteilen. Die meisten Ausfälle sind dem Gehäuse zuzuordnen und nur wenige dem Chip selbst. Ferner ist – im Gegensatz zu den meisten anderen Halbleiterprodukten – ein LED-Ausfall nur selten ein abrupter Totalausfall, sondern stellt eine reduzierte Lichtleistung oder intermittierendes Verhalten dar.

Für beide Fehlerquellen gibt es eine Vielzahl von teils konstruktiven, teils anwendungsorientierten Ursachen. In beiden Kategorien sind zusätzlich anwendungsorientierte Probleme überlagert, deren Vermeidung im letzten Teil dieses Beitrags detailliert besprochen wird.

Referenzen

[1] Simard-Normandin, Martine, «An Overview of LED Technology», Electronic Device Failure Analysis, Volume 15, Issue 4, p. 14–21, November 2013, ASM International, Materials Park, OH 44073 (USA), ISSN 1537-0755.

Angaben zum Autor



Prof. Dipl.-Ing. **Peter Jacob** arbeitet an der Empa an Ausfallanalysen von der Bauteile- bis zur Systemebene. An der TU München hält er einen Lehrauftrag in Raster-Elektronenmikroskopie. 2007 wurde er dort zum Honorarprofessor ernannt, 2010 erhielt er den International Dresden Barkhausen Award für Arbeiten auf dem Gebiet ESD-Schutz in Fertigungslinien. Seine zahlreichen internationalen Fachpublikationen, darunter mehrere mit Auszeichnungen, befassen sich überwiegend mit Ausfallanalysen in der Industrie- und Automobilelektronik, deren Methoden sowie ESD.

Empa, 8600 Dübendorf, peter.jacob@empa.ch

Empa, 8600 Dübendorf, peter.jacob@empa.ch

¹⁾ Human Body Modell: Ein ESD-Modell, welches eine Entladung aus einer elektrostatisch aufgeladenen Person in ein Bauteil über einen Aussenanschluss nachbildet.

Résumé

Analyses des défaillances des LED

Une synthèse des sources d'erreur dues à la puce et au boîtier

D'une manière générale, les LED se composent de deux principaux composants : la puce et son boîtier. Les raccords extérieurs et les connexions internes à la puce font également partie intégrante du boîtier. Par conséquent, les mécanismes de défaillance sont susceptibles de concerner aussi bien la puce que le boîtier qui est censé assurer le raccordement vers l'extérieur, la protection contre les conditions environnementales, ainsi que l'évacuation de la chaleur. La plupart des défaillances doivent être imputées au boîtier alors que la puce n'est, elle, responsable que d'une faible quantité de pannes. Au contraire de la majorité des autres produits semi-conducteurs, une défaillance des LED n'entraîne que rarement une soudaine extinction totale, mais provoque plutôt une réduction du rendement lumineux ou un fonctionnement par intermittence. Dans les deux cas, il est possible d'évoquer une multitude de causes qui concernent aussi bien la structure que l'utilisation. Les utilisateurs disposent de plusieurs possibilités différentes afin d'agir contre les mécanismes de défaillance mentionnés. Ces dernières consistent notamment à observer les principes suivants : toujours équiper les LED d'une diode de protection montée en série, assurer une dissipation thermique suffisante, éviter si possible le régime d'impulsion avec surmodulation, respecter les indications du fabricant relatives au courant permanent, sélectionner une forme de LED appropriée à l'utilisation voulue, veiller à la sécurité contre les décharges électrostatiques et éviter les montages en série de LED.

No