APPLICATION NOTE

ANO006 | Lebensdauer von Optokopplern

Dominik Köck

01. EINLEITUNG UND THEORETISCHER HINTERGRUND

Ein wichtiger Punkt bei einem Schaltungsentwurf ist die zu erwartende Lebensdauer des Produktes, und den darin enthaltenen einzelnen Komponenten. Bauelemente einer Schaltung können mit der Zeit ihr elektrisches Verhalten verändern oder auch vollständig ausfallen. Eine bei Optokopplern wichtige Kenngröße ist das sogenannte Gleichstrom Übertragungsverhältnis, welches sich mit der Zeit, in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen, verändern kann. Diese Application Note gibt eine kurze Einführung, wie Würth Elektronik eiSos die Lebensdauer von Optokopplern testet, wie die zu erwartende Lebensdauer für eine Anwendung berechnet werden kann und gibt Ihnen Tipps, wie Sie die Optokoppler betreiben können, um ihre Lebensdauer zu erhöhen. Optokoppler werden heute vielfach in Stromversorgungen, Haushaltsgeräten, industriellen Steuerungen und in anderen elektronischen Schaltungen für Regelzwecke eingesetzt. Als Komponenten zur galvanischen Trennung wurden Optokoppler bereits 1963 von IBM [1] erfunden und haben sich in ihrer Technologie seit ihrem Ursprung, damals als einfache Glühbirnen in Verbindung mit einem Fotowiderstand, deutlich weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung der Halbleitertechnologie, insbesondere der LEDs, führte zu einer Miniaturisierung des Optokopplers und ermöglichte somit seine breite Anwendung in der Industrie. Heutzutage besteht ein Optokoppler typischerweise aus einer LED, die optisch mit einem einfachen Photo-Transistor, einem Photo-Darlington oder einem Photo-Triac gekoppelt ist. Seit der Erfindung des Optokopplers war stets die Lebensdauer der LEDs ein Thema und obwohl die Zuverlässigkeit der LEDs ständig erhöht wurde, lohnt es sich immer noch, das Thema Lebendsauer des Optokopplers zu betrachten.

Die Hauptursachen für LED-Ausfälle lassen sich in chipbonding- und gehäusebedingte Ausfälle unterteilen [2]. Gehäusebedingte Ausfälle, die als frühzeitige Ausfälle erscheinen, sind das Ergebnis von Herstellungsfehlern oder falscher Handhabung. Beispiele hierfür sind ein falsches Lötprofil, eine erhöhte Luftfeuchtigkeit während des Lötens oder temperaturbedingte Spannungen der Anschlüsse, z.B. thermomechanische Spannungen zwischen Bonddrähten und dem transparenten Epoxidharz, das die LED versiegelt [3]. Die Degradierung und Beschädigung des LED Chips spiegelt sich in der Lebensdauer wieder und ist abhängig von Umgebungstemperatur, Wärmeableitung und Nennstrom. Thermischer und elektrischer Stress in der Sperrschichtzone der LEDs verursachen Degradierungsmechanismen, wie die sogenannte Elektomigration, die eine Verringerung der internen Quanteneffizienz zur Folge haben. Dadurch verringert sich die Strahlungsleistung der LED und somit auch das Gleichstrom-Übertragungsverhältnis, also letztendlich die Effizienz des Optokopplers. [4]

Diese Application Note fokussiert sich nicht auf die herstellungs- oder handhabungsbedingten Ausfälle, sondern auf den zuletzt beschriebenen graduellen Funktionsverlust durch langfristigen Betrieb.

02. OPTOKOPPLER

2.1 Grundlegendes

Der einfachste Optokoppler besteht aus einer LED, die optisch mit einem Phototransistor gekoppelt, aber elektrisch von ihm isoliert ist. Wenn die LED eingeschaltet ist, wird Licht emittiert und der Phototransistor ist im leitenden Zustand. Ist die LED ausgeschalten, ist der Phototransistor im gesperrten Zustand. Eine wichtige Kenngröße des Optokopplers ist das Gleichstrom-Übertragungsverhältnis, besser als Current-Transfer – Ratio (CTR) bekannt. Das CTR ist definiert als das Verhältnis zwischen dem durch die LED fließenden Strom I_F und dem durch den Phototransistor fließenden Strom I_C:

$$CTR = \frac{I_C}{I_F} \cdot 100\ \% \qquad (1)$$

Im Optokoppler-Portfolio von Würth Elektronik hat der Kunde die Möglichkeit, zwischen CTR-Bereichen von 50 % bis zu 600 % zu wählen, die je nach Applikation in verschiedene Typen aufgeteilt sind.

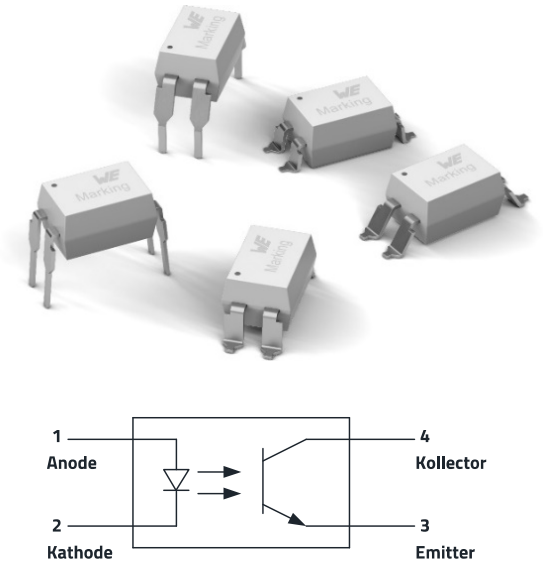


Abbildung 1: Würth Elektronik Optokoppler WL-OCPT mit zugehörigem Schaltbild

2.2 Eine Einführung zu Lebensdauertests

Die Lebensdauer von Optokopplern kann mehrere Jahrzehnte betragen, daher wird ein beschleunigter Belastungstest unter erhöhten Betriebsbedingungen durchgeführt. Bei Halbleitern gibt es viele verschiedene Degradationsmechanismen. Einige davon sind die Elektromigration [2], die Keimbildung und das Wachstum von Verwerfungen [3] und die Metall-Diffusion [2]. Diese Degradationsmechanismen können mit einem Parameter, der spezifischen Aktivierungsenergie EA beschrieben werden. Der Parameter kann als die Energie angesehen werden, die zur Aktivierung dieses Fehlermechanismus erforderlich ist. Abhängig vom spezifischen Fehler variiert diese Aktivierungsenergie zwischen E_A = -0,2 eV und E_A = 1,4 eV [4]. Bei LEDs führen eine hohe Stromdichte, sowie eine hohe Temperatur zur Diffusion von Atomen aus dem aktiven Bereich und hinterlassen lokale Defekte, sog. Point-defects [3]. Diese Fehler im Halbleiterchip der LED erhöhen die Anzahl der nicht-strahlenden Rekombinationszentren, wodurch die Quanteneffizienz der Lichterzeugung verringert wird. Durch die somit geringere Strahlungsleistung der LED wird damit das CTR Verhältnis des Optokopplers verringert. Dieser Mechanismus kann ähnlich wie die 1969 von J. Black publizierte Elektomigration von Al-Atomen beschrieben werden. In seiner Veröffentlichung beschrieb J. Black die mittlere Zeit bis zum Versagen eines Bauteils mit folgender Formel [2].

$$\frac{1}{MTF} = A \cdot J^2 \cdot e^{\frac{E_A}{k_B T}} \qquad (2)$$

MTF: Median time to failure.

(Die Zeit (Median) bis zum Versagen des Bauteils) [h]

A: Eine Konstante [5], die den Streuquerschnitt beinhaltet

J: Stromdichte $\left[\frac{A}{cm^2}\right]$

E_A: Aktivierungsenergie [eV]

k_B: Boltzmann Konstante $8.617 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$

T: Temperatur [K]

Für Lebensdauertests ist es von großem Interesse, die Testdauer zu verkürzen und trotzdem in der Lage zu sein, die resultierende Lebensdauer unter normalen Nutzungsbedingungen vorherzusagen. Nach Gleichung (2) nimmt die MTF mit steigender Stromdichte und zunehmender Temperatur ab. Beim Testen der Optokoppler mit erhöhter Temperatur und erhöhtem Strom laufen die Degradierungsmechanismen also viel schneller ab als unter Betriebsbedingungen mit geringerer Temperatur und geringerem Strom. Daher kann ein Beschleunigungsfaktor berechnet werden, indem man Gleichung (2) mit eingesetzten Stresstestbedingungen durch dieselbe Gleichung mit den normalen Betriebsbedingungen teilt. Daraus ergibt sich die sogenannte Blacksche Gleichung (3) [2]:

$$AF = \left(\frac{I_{test}}{I_{norm}}\right)^N \cdot e^{\frac{E_A}{k_B}\left(\frac{1}{T_{norm}} - \frac{1}{T_{test}}\right)} \qquad (3)$$

AF: Acceleration factor, oder Beschleunigungsfaktor

T_{test}: Im Stresstest verwendete Temperatur [K]

T_{norm}: Typische Betriebstemperatur [K]

I_{test}: Im Stresstest verwendeter Strom [A]

I_{norm}: Typischer Strom unter normalen Betriebsbedingungen [A]

E_A: Aktivierungsenergie [eV]

N: Exponent [5] N = 2

Wie bereits erwähnt, gibt es eine Abhängigkeit zwischen verschiedenen Fehlermechanismen und den entsprechenden Aktivierungsenergien. Die effektive Aktivierungsenergie kann als Fit-Parameter aus wiederholten Belastungstests bei verschiedenen Temperaturen gefunden werden. Um den Industriestandards zu entsprechen, wird jedoch für die Berechnung der MTF eine durchschnittliche Aktivierungsenergie von E_A = 0.7 eV als typischer Wert für diskrete Halbleiter verwendet [4].

Der Phototransistor ist weniger anfällig für Degradation als die LED [6]. Daher wird im Rahmen dieser Application Note

angenommen, dass die Änderung des CTR auf den Verlust der Strahlungsleistung der LED und nicht auf die Degradation des Phototransistors zurückzuführen ist.

Folgends wird die Berechnung der MTF beispielhaft für die Optokoppler 14081614xxx / 14081714xxx von Würth Elektronik dargestellt:

Die Parameter sind:

- Betriebsdauer: 1000 h
- Temperatur: T_{test} = 110 °C
- LED-Vorwärtsstrom: I_{test} = 30 mA

Wenn der Optokoppler mit einem Duty Cycle (Tastverhätlnis) von 100%, d.h. steigenden Gleichstrom, mit I_{norm} = 5 mA und bei Umgebungstemperatur T_{norm} = 80 °C betrieben wird, beträgt der Beschleunigungsfaktor AF = 218. Nach der Black-Formel (3) simuliert also der Beschleunigungs-Belastungstest von 1000 h eine normale Betriebsdauer von fast AF · 1000 h = 218 · 1000 h ≈ 25 Jahren.

Abbildung 2 zeigt die CTR-Reduzierung, die innerhalb dieser 25 Jahre zu erwarten ist. Sie zeigt für die Optokoppler von Würth Elektronik, dass im Durchschnitt eine Reduzierung des CTR-Wertes um lediglich 5 % zu erwarten ist.

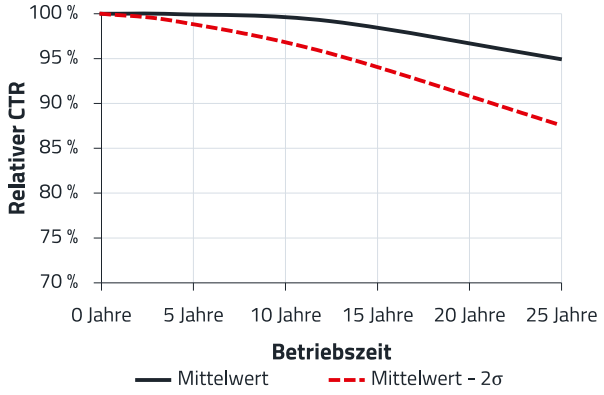


Abbildung 2: Erwartete CTR-Reduzierung im Laufe der Betriebszeit. Parameter im normalen Betrieb: 100% Tastverhältnis, 80 °C Umgebungstemperatur, 5 mA Vorwärtsstrom. Parameter während des Belastungstests: 1000 h Test, 110 °C Testtemperatur, 30 mA Vorwärtsstrom

Die CTR für die 2 σ -Durchschnittswerte sind in Abbildung 3 als gestrichelte Linie ebenfalls angegeben. 2 σ gibt den Betrag der statischen Verteilung als Varianz in den Daten an. Mit anderen Worten: etwa 68 % der relativen CTR-Werte liegen innerhalb der Entfernung von 1 σ vom Durchschnittswert. Ähnlich liegen 95 % der relativen CTR-Werte innerhalb des Vertrauensintervalls von 2 σ . Wird Abbildung 2 betrachtet, so zeigt die 2 σ -Kurve, dass der niedrigste zu erwartende relative CTR innerhalb von 25 Jahren minimal 87 % beträgt.

2.3 Parameter zur Verbesserung der Lebensdauer von Optokopplern

In Abbildung 3 ist die durchschnittliche Reduzierung des CTR- in Abhängigkeit von üblichen Betriebsströmen I_F bei einer Umgebugstemperatur von 80 °C dargestellt, Abbildung 4 zeigt die Kurve der CTR-Werte über die Zeit für drei verschiedene Umgebungstemperaturen bei einem LED-Vorwärtsstrom von 5mA.

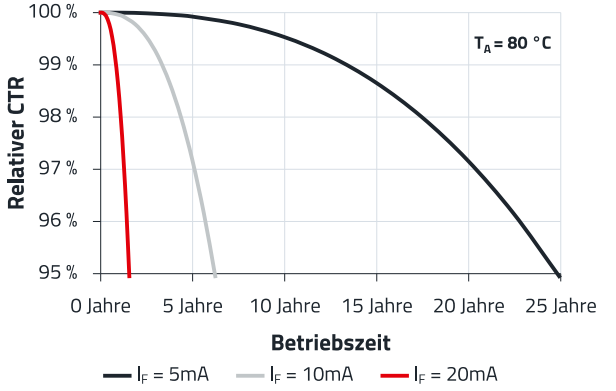


Abbildung 3: Durchschnittliche CTR-Werte über der Betriebszeit in Abhängigkeit vom Diodenstrom I_F bei konstanter Umgebungstemperatur. Parameter im normalen Betrieb: 100% Tastverhältnis (= DC-Strom), 80 °C Umgebungstemperatur, Dioden-Vorwärtsströme wie in der Grafik angegeben.

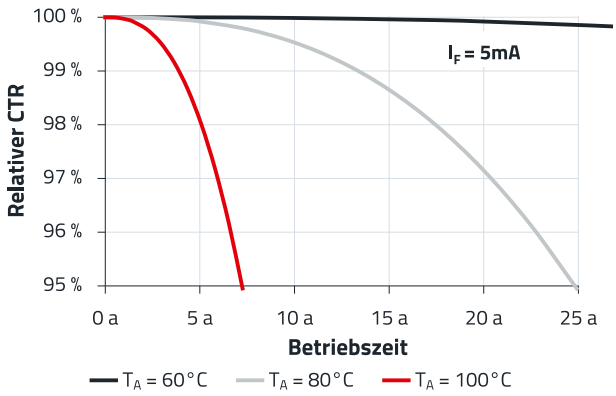


Abbildung 4: Durchschnittliche CTR-Werte Werte über der Betriebszeit in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bei konstentem Diodenstrom I_F = 5 mA. Parameter für den normalen Betrieb: 100% Tastgrad, 5 mA Vorwärtsstrom, Umgebungstemperaturen wie in der Grafik angegeben.

Hier zeigt sich, dass der CTR-Degradierung durch eine Verringerung der Umgebungs- und damit der Betriebstemperatur und durch einen niedrigeren Vorwärtsstroms der LED entgegengewirkt werden kann.

03. ZUSAMMENFASSUNG

Optokoppler, wie auch alle anderen Komponenten auf der elektronischen Platine, benötigen eine zuverlässige Leistung für viele Jahre in rauen Anwendungen, wie z.B. Industriesteuerungen und Stromversorgungen. Da die Verringerung der Leistung der LEDs einer der Mechanismen ist, die zu einer Verschlechterung des Stromübertragungsverhältnisses in Optokopplern führen, lohnt es sich, diesen Effekt zu beschreiben und zu verstehen. Würth Elektronik eiSos führt umfangreiche Qualitätstests durch, um Produkte mit herausragender Zuverlässigkeit zu liefern. Angesichts der bereitgestellten Zuverlässigkeitsdaten und der vorgestellten Gleichungen können wir einige Designverbesserungen vorschlagen, um die Lebensdauer von Optokopplern zu erhöhen:

1. Verringern Sie die effektive Betriebszeit des Optokopplers.
2. Verringern Sie den Betriebsdiodenstrom und ziehen Sie die Verlustleistung aus der LED durch größere Durchkontaktierungen und Pads im Layout
3. Vermeiden Sie transiente Spitzenströme durch die LED
4. Passen Sie das Tastverhältnis der LED an, um den durchschnittlichen Strom niedrig zu halten.

Zusätzlich kann bei zuverlässigkeitskritischen Produkten, wie z.B. Geräten mit medizinischer Anwendung die Zuverlässigkeit des Optokopplers durch ein Burn-In Verfahren erhöht werden. Dabei soll jedoch die Beschädigung der Bauteile vermieden werden, indem die Einbrennparameter unterhalb der absoluten Maximalwerte gehalten werden. Unter Berücksichtigung dieser Regeln kann der Entwickler über viele Jahre hinweg eine hohe Stabilität der Leistung von Würth Elektronik Optokopplern erwarten.

A Anhang

A.1 Literatur

[1] I. Akmenkalns et al., "Four Terminal Electro-Optical Logic". United States of America Patent 3417249, 17 December 1963.

[2] J. Black, ""Electromigration - A Brief Survey and Some Recent Results"," IEEE Transactions on Electron Devices, 1969.

[3] M.-H. Chang, D. Das, P. Varde and M. Pecht, "Light emitting diodes reliability review," Microelectronics Reliability, no. 52 , p. 762–782, 2012.

[4] Component Technical Committee, "Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Discrete Semiconductors in Automotive Applications," Automotive Electronics Council, 2013.

[5] J. R. Black, "Mass transport of aluminum by momentum exchange with conducting electrons," IEEE International Reliability Physics Symposium, 1967.

[6] J. B. H. Slama, H. Helali, A. Lahyani, K. Louati, P. Venet and G. Rojat, "Optocouplers Ageing Process: Study and Modeling," in International Conference on Electrical Engineering Design & Technologies, Hammamet Tunisia, 2007.

[7] T. Bajenesco, "CTR degradation and ageing problem of optocouplers," in Proceedings of 4th International Conference on Solid-State and IC Technology, Bejing, China, 1995.

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE" genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.
Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.
Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.
Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS

Application Notes
www.we-online.com/app-notes

REDEXPERT Design Plattform
www.we-online.com/redexpert

Toolbox
www.we-online.com/toolbox

Produkt Katalog
www.we-online.com/produkte

KONTAKTINFORMATION

appnotes@we-online.de
Tel. +49 7942 945 - 0

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg
Germany
www.we-online.com