

Zinnwhisker auf Leiterplatten

Konsequenzen für Sicherheitsbauteile im Maschinenbau

1 Problemstellung

Sicherheitsbauteile zum Einsatz in der Sicherheitstechnik von Maschinen werden häufig durch den Einsatz von Elektronik und damit unter Verwendung von Leiterplatten realisiert. Kurzschlüsse auf diesen Leiterplatten – beispielsweise durch Zinnwhisker – können zum gefährlichen Ausfall von Sicherheitsfunktionen führen und müssen daher vermieden werden.

Zinnwhisker sind nadelähnliche Ausprägungen aus Zinn, die hauptsächlich auf Oberflächen mit einer bleifreien Zinnbeschichtung auftreten. Bild 1 zeigt die Aufnahme eines optischen Stereomikroskops bei 40-facher Vergrößerung. Zwei Anschlusspins eines Gehäuses einer integrierten Schaltung (IC) sind zu erkennen, am linken Anschluss hat sich ein 270 µm langer Zinnwhisker gebildet.

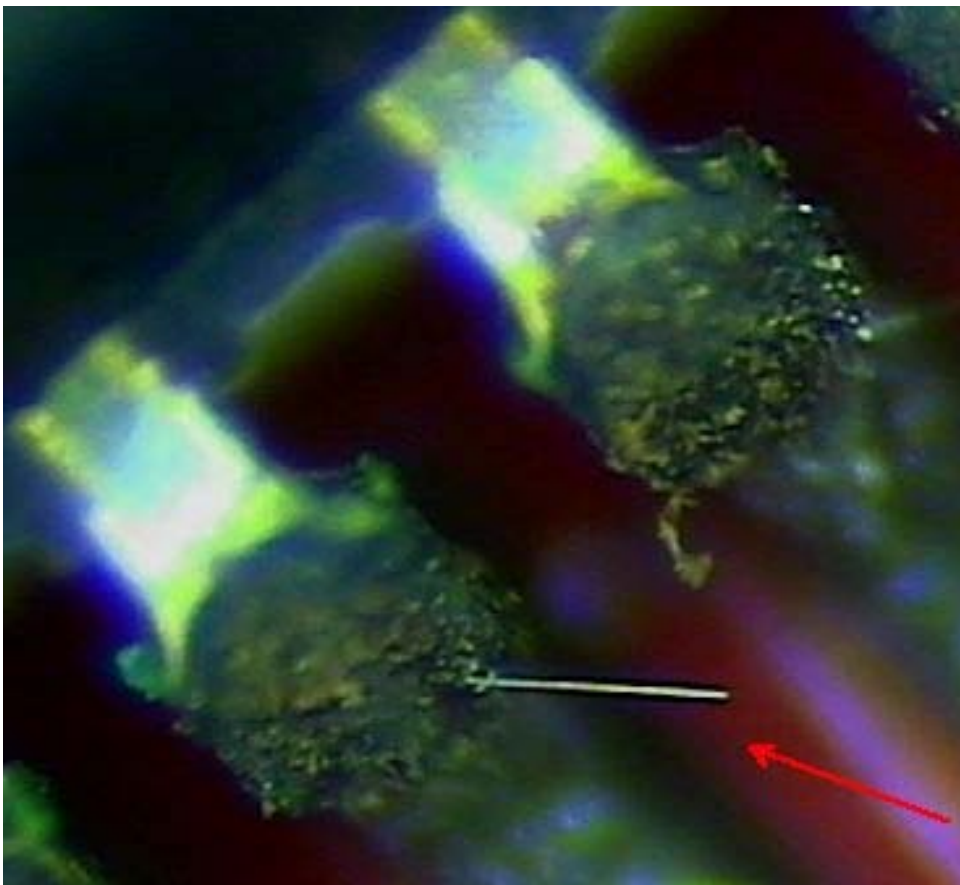


Bild 1: Zinnwhisker (270 µm) an IC-Anschluss, 40-fache Vergrößerung, Quelle: IFA

In Bild 2 sind mehrere Zinnwhisker unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) erkennbar.

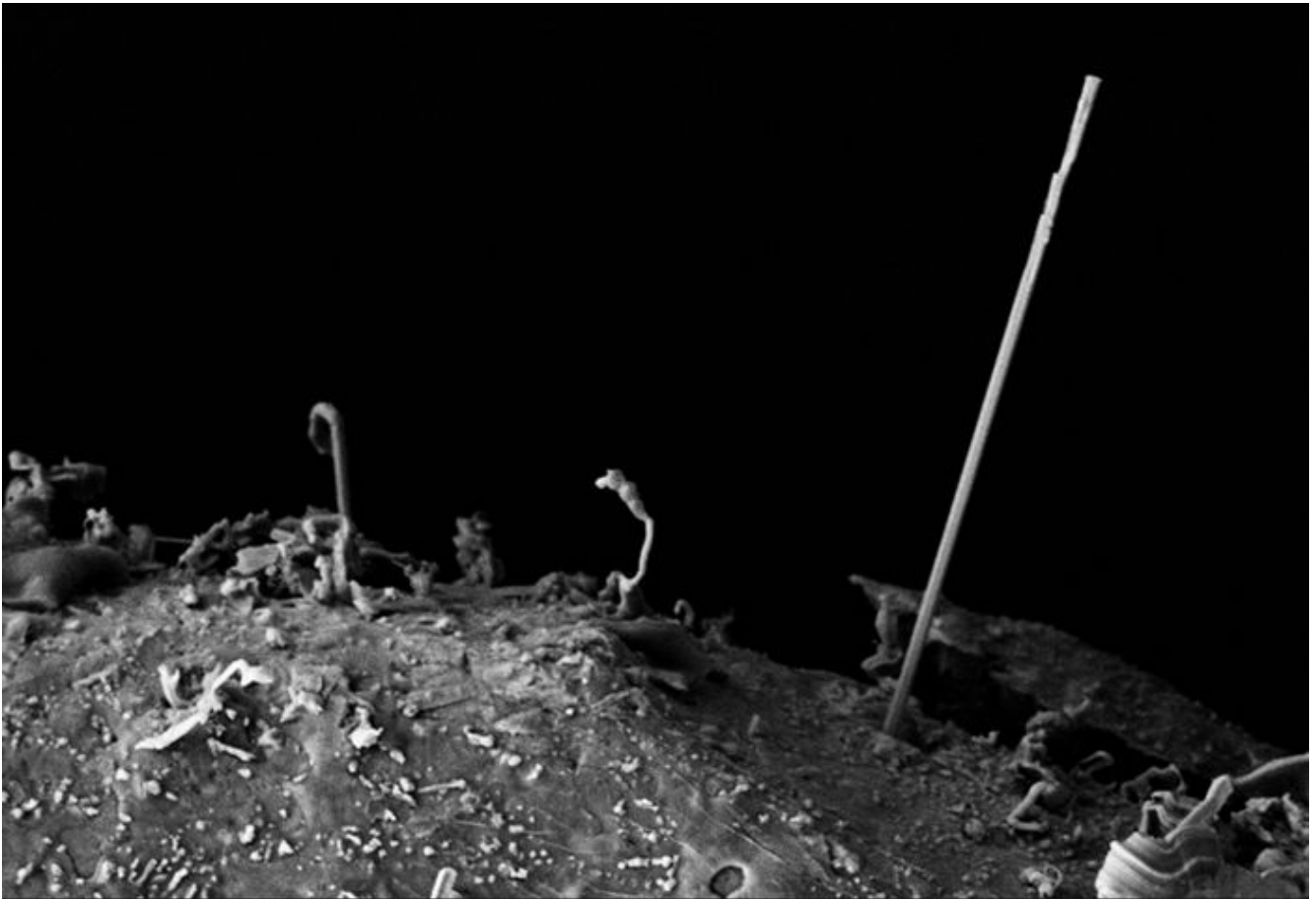


Bild 2: Zinnwhisker unter dem Rasterelektronenmikroskop

Zinnwhisker können entstehen durch

- Einwirkung mechanischer Spannungen
- innere mechanische Spannungen
 - in der Zinnschicht oder
 - der Anschlüsse, die sich dann wiederum auf die Zinnschicht übertragen
- hohe Temperaturen
- hohe Luftfeuchtigkeit.

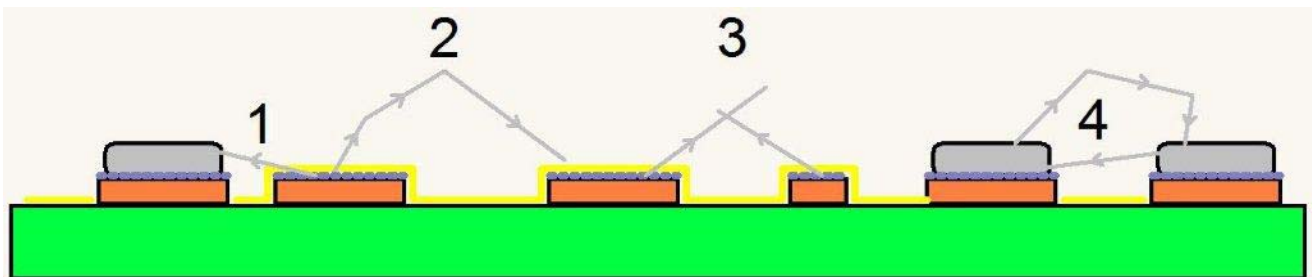
Zinnwhisker weisen eine Länge von bis zu 1 mm auf, in Extremfällen bis zu 2 mm. Sie sind leitfähig und können zu Kurzschlüssen auf bestückten Leiterplatten führen. Dabei kann durch einen Whisker ein Strom von 10 bis 50 mA fließen, bis bei einer maximal verträglichen Stromdichte der Whisker nicht schmilzt, sondern abbricht.

Durch die zunehmende Miniaturisierung sind die Abstände zwischen Bauteilanschlüssen auf wenige 100 µm gesunken, eine Distanz, die Zinnwhisker problemlos überbrücken können. Aufgrund des immer geringer werdenden Stromverbrauchs der elektronischen Schaltungen gibt es auch keinen „Selbstreinigungseffekt“ – Zinnwhisker werden durch den Stromfluss beim Kurzschluss in der Regel nicht zerstört.

Die Bildung von Zinnwhiskern auf Leiterplatten wurde bislang durch die Zugabe von Blei in den Loten unterdrückt. Durch die Einführung der ROHS-Richtlinie [1] verwenden die Hersteller für den Lötprozess anstelle bleihaltigen Lots jetzt bleifreies Lot. Dabei werden elektronische Bauteile bestückt, deren Anschlüsse für die bleifreie Lötung geeignet sind. Infolge dieser Umstellung wird die Bildung von Zinnwhiskern auf den bestückten Leiterplatten beobachtet. Hierdurch ergeben sich folgende Fehlermöglichkeiten:

- Ein aus einer verzinnten Leiterbahn herauswachsender Whisker kann den Lötstopplack (konserviert die Leiterbahnen gegen Schmutz und Feuchte) durchwachsen und mit einer benachbarten Lötstelle oder einem Bauteilanschluss einen Kurzschluss verursachen (Bild 3, Whisker 1).
- Ein Whisker kann aus einer Lackschicht herauswachsen, aber danach nicht wieder in eine Lackschicht eindringen, da er hierbei abbricht (Bild 3, Whisker 2).
- Dass zwei Whisker aus unterschiedlichen verzinnten Leiterbahnen herauswachsen und sich treffen (Bild 3, Whisker 3), ist sehr unwahrscheinlich.
- Das Kurzschlussrisiko ist am höchsten zwischen zwei benachbarten Lötstellen bzw. Bauteilanschlüssen (Bild 3, Whisker 4).
- Auch aus den Bauteilanschlüssen selbst können Whisker herauswachsen.

Befinden sich mehrere abgebrochene Whisker auf einer Leiterplatte, so können auch diese bei ungünstiger Lage einen Kurzschluss verursachen.



Grün = Leiterplatte, Bronze = Leiterbahn, Grau = Zinnschicht, Lötstelle, Gelb = Lötstopplack

Bild 3: Mögliche Kurzschlüsse auf einer Leiterplatte durch Whiskerwachstum

Die Bedingungen, unter denen sich Zinnwhisker bilden, werden derzeit kontrovers diskutiert. Es ist zudem nicht genau bekannt, welche Maßnahmen die Bildung von Zinnwhiskern bei bleifreier Lötung verhindern. Auch der Zeitpunkt der Entstehung kann nicht vorhergesagt werden. Veröffentlichungen bestätigen dies ebenso wie ein Projekt des IFA [2], in dem u. a. Zinnwhisker auf Leiterplatten gezüchtet werden konnten.

Die Hersteller von Sicherheitsbauteilen wenden bei der Gestaltung ihrer Leiterplatten Regeln an, die das Auftreten von Kurzschlüssen zwischen

- zwei Leiterbahnen
- Leiterbahn und Bauteilanschluss
- benachbarten Bauteilanschlüssen
- Anschlüssen verschiedener Bauteile

verhindern sollen. Diese Regeln sind in DIN EN ISO 13849-2:2013, Tabelle D.5 [3] und DIN EN 61800-5-2:2008, Tabelle D.2 [4] festgelegt. Aufgrund der bleifreien Lötung ist nun dieser Fehleraus-Zinnwhisker auf Leiterplatten(April 2013)

schluss infrage gestellt, da trotz der Anwendung der genannten Regeln Kurzschlüsse durch Zinnwhisker möglich sind. Die beiden Normen greifen dieses Thema bereits auf. Mangels konkreter Maßnahmen, die einen Fehlerausschluss erlauben könnten, wird jedoch nur rein informativ auf die Problematik hingewiesen.

Prinzipiell lassen sich Kurzschlüsse durch Zinnwhisker durch weitere konstruktive Maßnahmen verhindern, indem z. B. eine zusätzliche Schutzschicht auf die bestückte Leiterplatte einschließlich der Lötstellen und Bauteilanschlüsse aufgetragen wird. Dies hat jedoch fertigungstechnische Nachteile, die nur in seltenen Fällen akzeptiert werden.

Ein Verzicht auf den Fehlerausschluss von Kurzschlüssen auf Leiterplatten hätte enorme Auswirkungen auf deren sicherheitstechnische Bewertung. Bei einer Fehlerbetrachtung müssten Kurzschlüsse an allen möglichen benachbarten Stellen einer Leiterplatte angenommen werden. Diese Kurzschlüsse könnten zu einer ungewollten Veränderung der elektronischen Schaltung führen, deren Auswirkungen nicht einfach vorherzusagen sind. Auch die Erkennung von Kurzschlüssen durch evtl. vorhandene Diagnosemaßnahmen für Sicherheitsfunktionen ist nicht sichergestellt. Eine Fehleranalyse ist wegen des Aufwands und der Komplexität praktisch nicht möglich. Das IFA schlägt daher zur Behandlung der Whisker-Problematik eine andere Vorgehensweise vor, die hier beschrieben wird.

Hinweis: Bei Baumusterprüfungen wird diese Vorgehensweise zurzeit noch nicht angewendet.

2 Konzept zur Berücksichtigung von Zinnwhiskern

Auch ohne Kurzschlüsse durch Zinnwhisker können Bauteilfehler Auswirkungen auf das Verhalten von Sicherheitsfunktionen haben. Dies wird bereits bei der Validierung von Sicherheitsfunktionen berücksichtigt. Neu ist jedoch, dass nicht nur Fehler innerhalb eines Kanals einer Sicherheitsfunktion auftreten können, sondern dass auch zwei redundante, unabhängige Kanäle durch Zinnwhisker miteinander „verbunden“ werden können. Es reicht also für die zusätzliche Berücksichtigung von Fehlerfällen durch Zinnwhisker aus, nur die „Nahtstellen“ zwischen Kanälen zu betrachten. Durch geeignete Maßnahmen in diesen Bereichen ist es zwar nicht möglich, die Bildung von Zinnwhiskern zu verhindern, die Auswirkungen auf Sicherheitsfunktionen können damit aber beherrscht werden. Es ergibt sich ein Fehlermodell für Zinnwhisker auf Leiterplatten, das abhängig von der Architektur (Kategorie nach DIN EN ISO 13849-1) der Schaltung ist und bei entsprechenden Maßnahmen in bestimmten Bereichen der Leiterplatte Fehlerausschlüsse für Kurzschlüsse erlaubt.

In Anlehnung an das Whisker-Projekt des IFA [2] wird im Folgenden das Fehlermodell vorgestellt und begründet.

3 Konsequenzen für die Leiterplattengestaltung

Es muss unterstellt werden, dass sich Zinnwhisker prinzipiell an allen Stellen bilden können, die zinnhaltig und bleifrei sind.

3.1 Whiskerbildung reduzieren

Die Bildung von Whiskern kann reduziert, d. h. teilweise verhindert, werden. Für sicherheitsrelevante Leiterplatten sind folgende Basismaßnahmen sinnvoll:

Leiterplatte:

- Leiterbahnen nicht verzinnen (ohne Zinn keine Zinnwhisker), alternativ mit chemisch Nickel/Gold, chemisch Silber oder Nickel zusätzlich veredeln (Whiskerbarriere)

- Löt pads mit chemisch Nickel/Gold, chemisch Silber oder Nickel zusätzlich veredeln (Whiskerbarriere)

Bauteile:

- Möglichst IC-Gehäuse ohne gebogene Anschlüsse verwenden (z. B. Flat Pack), um mechanische Spannungen in den Anschlüssen zu vermeiden
- möglichst vernickelte, versilberte oder vergoldete Anschlüsse einsetzen (Whiskerbarriere).

Lötprozess:

- SnAgCu-Legierung als Lot verwenden (Whiskerbarriere)
- wenn Reinzinn als Lot verwendet wird, dann in der Ausführung matt und nicht glänzend (geringeres Whiskerwachstum)
- dem Lot Anti-Whisker-Additive zusetzen
- bestückte Leiterplatte sofort nach dem Lötprozess bei 150 °C eine Stunde tempern (nimmt innere Spannungen aus dem Zinn).

Umgebungsbedingungen der Leiterplatte im Betrieb:

- Mechanisch verspannten Einbau der Leiterplatte vermeiden
- schwere Bauteile abstützen, um mechanische Verspannungen zu vermeiden
- Bauteiltemperatur soll ≤ 70 °C betragen (Eigenerwärmung berücksichtigen)
- relative Luftfeuchte soll ≤ 80 % betragen
- Vibration möglichst vermeiden.

3.2 Zusätzliches Fehlermodell

Die Gestalt der Zinnwhisker ist nadelförmig, deren Länge kann in extremen Einzelfällen bis zu 2 mm betragen. Üblicherweise treten Whisker mit einer Länge von bis zu 1 mm auf. Bei einer Fehlerbeurteilung an einer bleifrei gelöteten Leiterplatte ist somit zu unterstellen, dass von jedem Löt pad und jedem Bauteilanschluss aus ein Whiskerwachstum innerhalb eines Kugelvolumens mit dem Radius 1 mm möglich ist. Dies wird in dem Fehlermodell für Leiterplatten in den Normen [3] und [4] bisher nicht berücksichtigt und muss ergänzt werden.

Kurzschlüsse durch Zinnwhisker auf Leiterplatten können Auswirkungen auf Sicherheitsfunktionen haben, z. B. einen gefährlichen Ausfall, bei dem trotz Anforderung die sicherheitsgerichtete Reaktion nicht mehr erfolgen kann. Dies trifft prinzipiell auf alle Fehler von Bauteilen zu, die an einer Sicherheitsfunktion beteiligt sind, nicht nur auf Kurzschlüsse auf Leiterplatten. Bei der Realisierung einer Sicherheitsfunktion nach DIN EN ISO 13849-1 wird bereits das Verhalten im Falle von Bauteilfehlern betrachtet. Je nachdem, in welcher Kategorie ein Schaltungsteil (Subsystem innerhalb einer Sicherheitsfunktion) realisiert werden muss, sind Bauteilfehler zu erkennen und/oder dürfen nicht zu einem gefährlichen Ausfall der Sicherheitsfunktion führen (Kategorien 2, 3 und 4). In Schaltungen der Kategorien B und 1 (beide einkanalig) darf die Sicherheitsfunktion durch Bauteilfehler gefährlich ausfallen, durch den zusätzlichen Fehlerfall „Kurzschluss durch Zinnwhisker“ ändert sich daran nichts. Allerdings werden in der Kategorie 1 „bewährte Bauteile“ eingesetzt, die teilweise nur dann als bewährt gelten, wenn aufgrund der Konstruktion des Bauteils Fehlerausschlüsse zulässig sind. Dies gilt beispielsweise für den elektromechanischen Positionsschalter mit zwangsöffnendem Kontakt (siehe Tabelle D.3 in [3]). Wenn jedoch ein Zinnwhisker die Anschlüsse des Positionsschalters auf einer Leiterplatte kurzgeschlossen oder eine Verbindung zur Versorgungsspannung hergestellt hat,

ist es trotz der Zwangsöffnung im Positionsschalter zu einem gefährlichen Ausfall der jeweiligen Sicherheitsfunktion gekommen, der Fehlerausschluss wurde also zunichte gemacht. Das zusätzliche Fehlermodell für Zinnwhisker auf Leiterplatten muss daher auch für Schaltungen der Kategorie 1 angewendet werden. Für Schaltungen der Kategorie B ist die Berücksichtigung von Zinnwhiskern nicht erforderlich.

3.2.1 Zinnwhisker bei zweikanaligen Sicherheitsfunktionen

Bei zweikanaligen Schaltungen (Kategorien 3 und 4) und bei einkanaligen Schaltungen mit zusätzlichem Testkanal (Kategorie 2) muss unterschieden werden, an welcher Stelle ein Kurzschluss vorliegt. Sofern ein Whisker-Kurzschluss nur einen Kanal betrifft, sind die Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion weitgehend identisch mit den Auswirkungen von anderen Bauteilfehlern, die auch ohne die Whiskerproblematik bei der Validierung der Sicherheitsfunktion bereits berücksichtigt werden müssen. Ein Whisker kann jedoch auch einen Kurzschluss **zwischen zwei Kanälen** bewirken. Das ist ein neuer Fehlerfall, denn die beiden Kanäle werden auf der Leiterplatte üblicherweise getrennt voneinander geführt und bei Anwendung des Fehlerausschlusses „Kurzschluss zwischen benachbarten Leiterbahnen/Kontaktstellen“ nach den Normen [3] und [4] kann kein Bauteilfehler zu einer Verbindung der beiden Kanäle führen. Zusätzlich darf z. B. die Signalverarbeitung zweier Kanäle niemals im selben IC erfolgen, denn bei einem Fehler innerhalb des IC könnten beide Kanäle gleichzeitig gefährlich ausfallen. Ausnahmen bestehen lediglich bei sicherheitsrelevanten ASIC (Anwendungsspezifische integrierte Schaltungen), für die aber besondere Anforderungen gelten.

Wenn nun ein Kurzschluss durch Zinnwhisker zwei Kanäle miteinander verbindet, entstehen völlig neue elektronische Schaltungen und die Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion sind nur mit hohem Aufwand zu bestimmen. Es kann z. B. die Einfehlersicherheit verloren gehen, die Erkennung von Bauteilfehlern unwirksam werden und es kann auch zu einem gefährlichen Ausfall der Sicherheitsfunktion kommen. Der Fehlerfall „Kurzschluss zwischen zwei Kanälen“ ist aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten praktisch nicht beherrschbar. Um dennoch Sicherheitsfunktionen der Kategorien 2, 3 und 4 realisieren zu können, müssen Maßnahmen gefunden werden, die ein Auftreten dieses Fehlers verhindern.

3.2.2 Fehlerausschluss „Kurzschluss durch Zinnwhisker“

Nach heutigem Kenntnisstand gibt es keine Möglichkeit, die Bildung von Zinnwhiskern bei bleifrei gelöteten Leiterplatten sicher zu verhindern. Man kann jedoch die daraus resultierenden Kurzschlüsse konstruktiv verhindern:

- Schutzschicht nach IEC 60664-3
Beschichtungen nach IEC 60664-3 [4] werden auf Leiterplatten aufgebracht, um vor Verschmutzung zu schützen. Ein Whisker kann aus der Schicht herauswachsen, jedoch nicht eindringen, da er dabei abbricht. Für die beschichteten Stellen (üblicherweise einschließlich der Bauteile) kann daher ein Kurzschluss ausgeschlossen werden.
- Ausreichende Abstände zwischen den Kanälen
Es wird davon ausgegangen, dass Whisker üblicherweise bis zu 1 mm lang werden können. Für alle Abstände > 1 mm kann daher ein Kurzschluss ausgeschlossen werden.

Aus den hier beschriebenen Überlegungen ist ein Vorschlag zur Erweiterung des Fehlermodells für Leiterplatten entwickelt worden, wie er in die Normen [3] und [4] übernommen werden könnte (siehe Tabelle).

Tabelle: Zusätzliches Fehlermodell für Leiterplatten

Fehlerannahme (zusätzlich zu DIN EN 13849-2:2013, Tabelle D.5 bzw. DIN EN 61800-5-2:2008, Tabelle D.2)	Fehlerausschluss	Bemerkungen
<p>Kurzschluss zwischen Leiterbahnen/Löt pads/ leitfähigen Flächen/Bauteilen durch einen Zinnwhisker in Kategorien 1, 2, 3 und 4 (siehe i)</p> <p>Weitere Hinweise in Bemerkungen 1 bis 3.</p>	<p>Kurzschluss durch Zinnwhisker kann ausgeschlossen werden, wenn</p> <p>a) die Leiterplatte bleihaltig ($\geq 5\%$ Blei) gelötet wurde</p> <p>oder</p> <p>b) Bauteile und Leiterplatte mit einer Schutzschicht nach IEC 60664-3 versehen wurden</p> <p>oder</p> <p>c) die Anwendung der Maßnahmen gegen Whiskerbildung entsprechend ii) erfolgt und der Abstand zwischen Leiterbahnen/Löt pads/ Kontaktstellen/Bauteilen ≥ 1 mm beträgt</p> <p>oder</p> <p>d) die Anwendung der Maßnahmen gegen Whiskerbildung entsprechend ii) erfolgt und Bauteilanschlüsse nicht gebogen sind (Gehäuseform „Flat No Lead“, z. B. DFN, TDFN, UTDFN, XDFN, QFN, TQFN) oder die Bauteile vernickelte, versilberte oder vergoldete Anschlüsse besitzen</p> <p>oder</p> <p>e) der Abstand zwischen Leiterbahnen/Löt pads/ leitfähigen Flächen/ Bauteilen ≥ 2 mm beträgt.</p>	<p>1) Zinnwhisker können auf bleifrei verzinneten Flächen (z. B. Löt pads, verzinneten Leiterbahnen) und Bauteilanschlüssen entstehen. Bei Anwendung der Maßnahmen gegen Whiskerbildung entsprechend ii) können die betroffenen Stellen auf gebogene, verzinnte Anschlüsse von Bauteilen begrenzt werden. Zinnwhisker sind nadelförmig und können gerade oder abgelenkte Form haben bei einer Gesamtlänge von bis zu 1 mm, in Extremfällen bis zu 2 mm.</p> <p>2) Von jeder verzinneten Stelle auf einer Leiterplatte einschließlich der bestückten Bauteile ist ein Whiskerwachstum innerhalb eines Kugelvolumens mit dem Radius 1 mm (mit Maßnahmen entsprechend ii) bzw. 2 mm (ohne Maßnahmen) möglich.</p> <p>3) Es ist sehr unwahrscheinlich, dass sich zwei Whisker treffen und dadurch einen Kurzschluss verursachen. Diese Möglichkeit muss daher nicht unterstellt werden.</p>

i) Es ist ausreichend, diesen Fehler nur in den folgenden Fällen anzunehmen:

- I. Kategorie 3 oder 4:
 - Kurzschluss durch Zinnwhisker zwischen zwei Funktionskanälen
 - Kurzschluss durch Zinnwhisker zwischen dem einzigen Funktionskanal (Einfehlersicherheit z. B. durch Fehlerausschlüsse realisiert) und Leiterbahnen/Lötpads/leitfähigen Flächen/Bauteilen in der Umgebung
- II. Kategorie 2
 - Kurzschluss durch Zinnwhisker zwischen Funktions- und Testkanal
- III. Kategorie 1
 - Kurzschluss durch Zinnwhisker zwischen Anschlüssen (bewährter) Bauteile und zwischen dem Funktionskanal und Leiterbahnen/Lötpads/leitfähigen Flächen/Bauteilen in der Umgebung

Begründung: In den Kategorien 2, 3 und 4 haben Kurzschlüsse innerhalb eines Kanals i. d. R. dieselben Auswirkungen auf eine Sicherheitsfunktion wie Bauteilfehler innerhalb eines Kanals und werden dadurch bereits berücksichtigt. Zusätzliche Fehlermöglichkeiten entstehen jedoch durch Kurzschlüsse zwischen Bauteilen unterschiedlicher Kanäle bzw. zwischen einem sicherheitsrelevanten Kanal und „unbeteiligten“ Bauteilen. In der Kategorie 1 können elektromechanische Kontakte durch Zinnwhisker an den Anschlussstellen auf der Leiterplatte überbrückt werden oder es kann ein Kurzschluss, z. B. zur Versorgungsspannung, auftreten. Der für die bewährten Bauteile in Kategorie 1 teilweise angewendete Fehlerausschluss für das Nichtöffnen von zwangsläufig betätigten Öffnerkontakten würde dadurch unwirksam werden.

ii) (Systematische) Maßnahmen zur Reduzierung von Zinnwhiskern für sicherheitsrelevante Leiterplatten

Leiterplatte:

- Leiterbahnen nicht verzinnen, alternativ mit chemisch Nickel/Gold, chemisch Silber oder Nickel zusätzlich veredeln
- Lötpads mit chemisch Nickel/Gold, chemisch Silber oder Nickel zusätzlich veredeln.

Steckverbinder, Anschlussstecker und Anschlussbuchsen:

- Werden hier redundante, sicherheitsrelevante Signale weitergeleitet, so dürfen diese nicht direkt nebeneinander oder übereinander angeordnet sein, hier ist eine ausreichende Trennung oder zusätzliche Isolation zwischen den Anschlüssen notwendig.

Lötprozess:

- SnAgCu-Legierung oder mattes Reinzinn als Lot verwenden oder
- Anti-Whisker-Additive zusetzen oder
- bestückte Leiterplatte bei 150 °C eine Stunde tempern (Eignung der Bauteile beachten).

Montage:

- Bauteile mechanisch spannungsfrei auf der Leiterplatte montieren
- Leiterplatte mechanisch spannungsfrei einbauen.

4 Zusätzliche Maßnahmen zur Erkennung von Zinnwhiskern

Um die Lötstellen von sicherheitsrelevanten Strompfaden können nicht isolierte Leiterbahnflächen angeordnet werden, die mit Pluspotential oder Minuspotential verbunden werden und so bei einem Kurzschluss den sicheren Zustand herbeiführen sollen. Diese Maßnahme deckt jedoch nur Kurzschlüsse zwischen Leiterbahnen auf und kann nicht den kompletten Strompfad einschließlich der Bauteilanschlüsse abdecken.

5 Berücksichtigung in der Quantifizierung

Für Sicherheitsfunktionen wird die Wahrscheinlichkeit für einen gefährlichen Ausfall pro Stunde (PFH bzw. SIL) berechnet. Hier geht die Wahrscheinlichkeit für einen gefährlichen Ausfall aller beteiligten Bauteile ein, einschließlich der Leiterplatte. Allerdings sind zurzeit keinerlei Zahlen verfügbar, die die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zinnwhiskern beschreiben. Es ist auch noch keine Methodik bekannt, wie die hohe Anzahl von möglichen Kurzschlüssen durch Whisker und die unterschiedlichen Auswirkungen auf die elektronische Schaltung der Sicherheitsfunktion mit vertretbarem Aufwand berücksichtigt werden können. Eine quantitative Berücksichtigung von gefährlichen Ausfällen von Sicherheitsfunktionen aufgrund von Zinnwhiskern kann daher noch nicht erfolgen.

6 Literatur

- [1] Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. ABl. EU (2011) Nr. L 174, S. 88-110
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:DE:PDF>
- [2] Bildung von Kurzschlüssen durch Whisker auf Leiterplatten sowie bei elektrischen Sicherungen, IFA-Projekt 5104. www.dguv.de/ifa, Webcode [d95939](#)
- [3] DIN EN ISO 13849-2: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung (02.13). Beuth, Berlin 2013
- [4] DIN EN IEC 61800-5-2 (VDE 0160-150-2): Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 5-2: Anforderungen an die Sicherheit – Funktionale Sicherheit (04.08). Beuth, Berlin 2008
- [5] DIN EN 60664-3: Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen – Teil 3: Anwendung von Beschichtungen, Eingießen oder Vergießen zum Schutz gegen Verschmutzung (03.03, akt. 10.10). Beuth, Berlin 2010