

Whisker in Niederspannungsanlagen - ein oft übersehenes Problem.

Gesamtproblematik der Whisker mit realen Beispielen aus der Praxis

Dipl.-Ing. Jürgen Vogler, IBV Berlin

Kurzschlüsse oder Lichtbögen mit Kurzschlussfolgen sind immer wieder auftretende Ereignisse in elektrischen Geräten oder Anlagen mit teilweise erheblichen Personen- oder/und Sachschäden. Die Ursachen sind sehr vielfältig und nicht immer vermeidbar, da eine absolut sichere Technik nicht zur Verfügung steht. Wichtig aber ist, dass jede Lichtbogenstörung gründlich auf der Grundlage der physikalischen Gesetze und unabhängig von ökonomischen Interessen analysiert wird. Es darf und kann nicht sein, dass Untersuchungsergebnisse mit der heutigen technologisch hoch entwickelten Technik, mit dem Ergebnis abschließen, die Ursache der Lichtbogenstörung sei nicht ermittelbar.

Ein Blick in die allgemeinen statistischen Unterlagen zeigt aber, dass der handelnde Mensch häufig direkt aber auch indirekt als Verursacher der Störungen in Vordergrund steht. Direkt, wenn er, aus welchen Grund auch immer, an Geräten oder Anlagen in der Nähe von unter Spannung stehenden oder direkt an diesen Anlagen handelt, ohne die notwendigen Handlungsanweisungen oder Schutzmaßnahmen ordnungsgemäß zu berücksichtigen. Indirekt, wenn er Geräte oder Anlagen plant, baut und in Betrieb nimmt ohne die physikalischen Gesetze und geltende Normen und Vorschriften im sinnvollen Rahmen berücksichtigt. Eine hohe Zuverlässigkeit über die geplante Gesamtlebensdauer der Geräte und Anlagen unter Beachtung der ökonomischen und auch ökologischen Gesamtbilanz sollte stets Vorrang vor kurzfristigen ökonomischen Vorteilen haben. Rein technische Fehler treten relativ selten auf. Wenn ja, dann sind Einsatzbedingungen, Klima, Verschmutzung oder auch thermische Probleme häufig mit im Spiel. Ein besonderes Problem in den letzten 40 Jahren sind Lichtbogenereignisse die durch Whisker hervorgerufen, aber selten mit der Whiskerbildung in Verbindung gebracht wurden. Eine Konzentrierung auf das Whiskerproblem erfolgte in Verbindung mit erheblichen Ausfällen im Bereich der Raum- und Luftfahrt durch die NASA.

Was sind Whisker und wo entstehen sie? Whisker sind nadelförmige, metallische Einkristalle mit einem Durchmesser im Bereich von einigen Nanometer- bis hin zu dem Mikrometerbereich. Die beobachteten Längen liegen im zwischen Nanometern und Zentimetern. In den vergangenen Jahrhunderten sind diese Einkristalle im Bergbau als Haarsilber beobachtet und verwertet worden. Aus dem englischen wurde dann für die auch als Bart- oder Schnurrhaar bezeichneten Phänomene der Begriff Whisker geprägt, was aber nichts mit der Katzennahrung zu tun hat. Mit der Entwicklung der Technik wurden die Grundlagen der Einkristallbildung und mögliche Verwertung gefördert. Whisker in den elektrotechnischen Geräten und Anlagen entstehen überwiegend an galvanisch veredelten Bauteilen. Beobachtet wurde die Whiskerbildung in der galvanischen Kombination verschiedener Grundmaterialien mit den Metallen Zinn, Silber, Zink, Gold, Cadmium, Blei, und

Indium, sehr selten auch mit Wismut. Ein Schwerpunkt der Whisker-Problematik liegt im Bereich der Löttechnik der Mikroelektronik.

In der allgemeinen Starkstromtechnik wird im wesentlichen Kupfer und Aluminium als Leitermaterial verwendet. Zur Vermeidung von Korrosionen an Kontaktstellen werden die Kupfer- und Aluminiummaterialien galvanisch versilbert oder verzinkt. Häufig spielt auch eine vordergründige, aber technisch nicht notwendige Verbesserung der Ansichtsgüte durch Blankverzinnung eine Rolle. Da die Whiskerbildung mit verschiedenen Materialkombinationen sehr komplex ist, soll in diesem Beitrag an Hand der Verzinnung von Kupfer das grundsätzliche Problem dargelegt werden.

Soll ein Bauteil galvanisch verzinkt werden, muss es vorher gründlich gereinigt werden. Entweder erfolgt eine mechanische Reinigung durch die Bürstentechnologie oder es wird eine chemische Reinigung durchgeführt. Beide Verfahren erfolgen zeitlich getrennt vom Galvanisier-Prozess. Beim Eintauchen des Bauteiles in das chemisch aktive Galvanikbad entsteht im ersten Augenblick eine intermetallische Diffusionsschicht, da das Zinn nicht schlagartig auf das Kupferbauteil übertragen wird. In dieser Diffusionsschicht werden Restpartikel der Reinigung und Fremdpartikel des Galvanikbades eingebunden. Im Bild 1 wird an einer vergrößerten Schnittdarstellung eines verzinkten Kupferbauteiles die Diffusionsschicht dargestellt. Der Zinnauftrag liegt im Bereich von ca. 4 bis 8 µm.

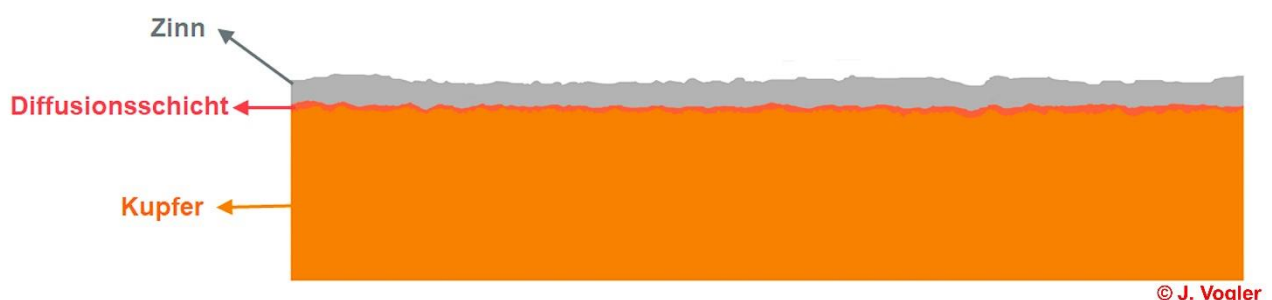


Bild 1: vergrößerte Schnittdarstellung eines verzinkten Kupferbauteils

Mit dem heutigen Stand der Untersuchungen lässt sich herleiten, dass in den galvanotechnisch erzeugten Zinnschichten auf Kupfermaterial in der Diffusionsschicht zwischen dem Kupfer und dem Zinnbelag Bronzen gebildet werden, die auf Grund ihres Kristallaufbaues mechanische Spannungen zwischen den Zinn- und Bronzekristallen hervorrufen. Eine besondere Rolle spielt hier die intermetallischen Kupfer-Zinn-Phase Cu_6Sn_5 . Im Bild 2 ist ein grobes Modell dieser Zinn-Whiskerbildung dargestellt. In Abhängigkeit vom Galvanikverfahren, dem Reinigungszustand des Kupfers, der Reinheit des Zinnmaterials oder der Zinnsubstanzen sowie der Zusammensetzung und Reinheit des Galvanikbades bilden sich im Bereich der Diffusionszone Inseln mit Kupfer-Zinn-Bronzen. Die inneren Materialspannungen in der Grenzschicht können noch durch Fremdmaterial, erzeugt durch Additive im Galvanikbad, verstärkt werden. Entscheidend für die Whiskerbildung ist auch die gewählte Korngröße der Zinnschicht. Bei einer Glanzverzinnung wird bewusst eine kleine Korngröße, gegenüber der Mattverzinnung mit einer großen Korngröße, angestrebt. Der innere

Kristalldruck erhöht sich bei der kleineren Korngröße erheblich, auch ist der Einfluss der additiven Fremdmaterialien größer.

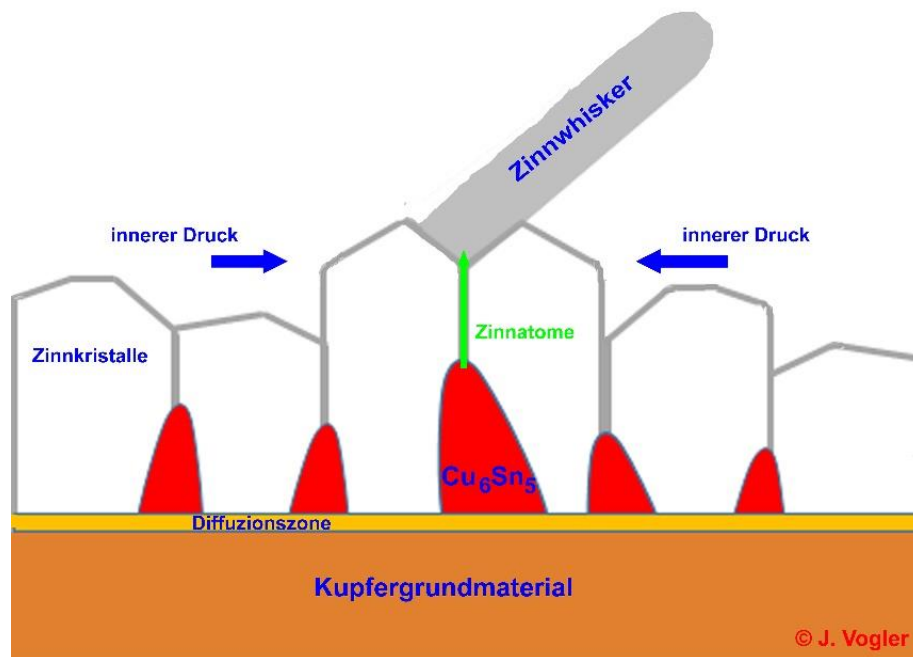


Bild 2: Modelldarstellung der Zinn-Whiskerbildung

In der Starkstromtechnik sind Whisker in dem Zeitraum ab 1950 vereinzelt festgestellt worden, ohne dass es dazu eine gründliche Analyse gab. Mit dem Bleiverbot (RoHS-Richtlinie, EG-Richtlinie 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten) traten aber Schäden an Elektroanlagen häufiger auf.

Erste eigene Beobachtungen ergaben sich 1969 bei der Auswertung der Langzeituntersuchungen an Kontakten von Transformatoren-Stufenschalter, die über einen Zeitraum von einem Jahr unter konstanter Öltemperatur Schaltzyklen unter Last durchführten. Bei Teilentladungsmessungen an Geräten der Spannungsebenen 10 kV bis 30 kV konnten bei Erstbeaufschlagung mit der Prüfspannung Teilentladungen beobachtet werden, die plötzlich verschwanden. Detailuntersuchungen zeigten bei Neugeräten Whisker und bei geprüften Geräten Reste abgeschmolzener Whisker.

In Niederspannungsanlagen konnten Whisker in Schaltgeräten, NH-Sicherungselementen, Schaltanlagen und an Kabelschuhen nachgewiesen werden (Bilder 3 bis 5). Whisker in elektrischen Bauteilen bedeuten eine grundsätzliche Verkürzung der durch Typprüfung oder Baumusternachweis nachgewiesenen Luft- und Kriechstrecken. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein einzelner Whiskerfaden nicht unbedingt zu einer Lichtbogenzündung führt. Die Stromtragfähigkeit eines Whiskers ist sehr gering. Erfolgt ein Spannungsdurchschlag zu diesem Whisker, schmilzt er ohne eine ausreichende Ionisierung der Luftstrecke zu erzeugen um einen Lichtbogen zu zünden. Aber,

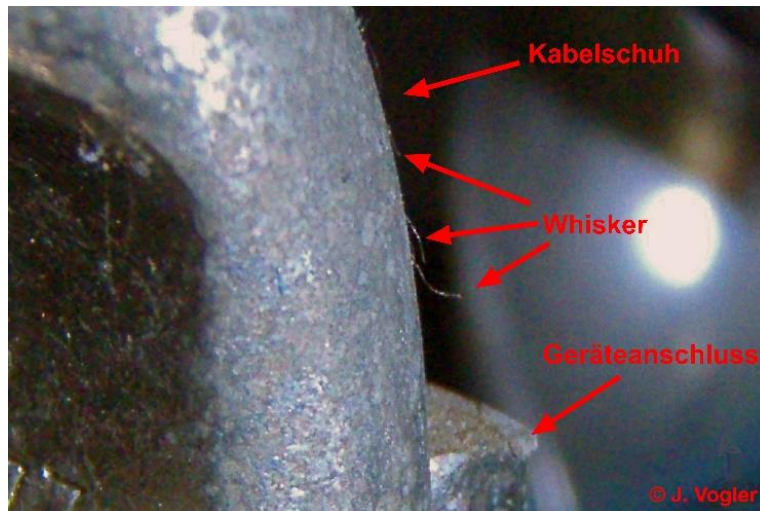


Bild 3: Whiskerbildung an einem Presskabelschuh

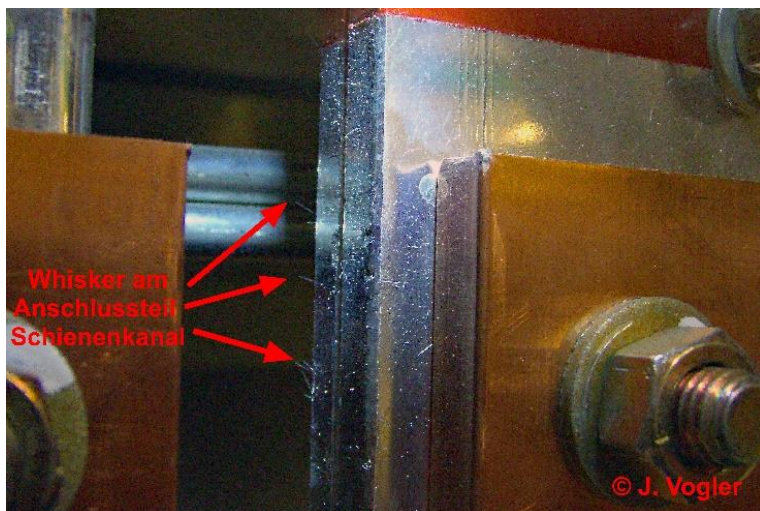


Bild 4: Whiskerbildung am Anschlussteil Schienenkanal

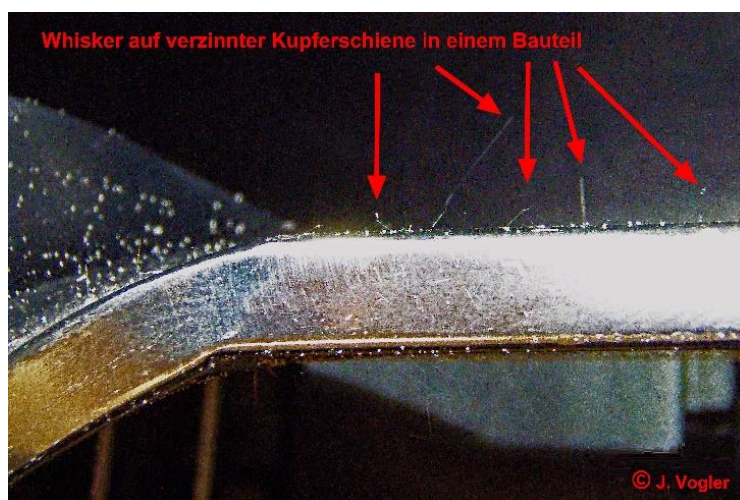


Bild 5: Whiskerbildung auf verzinnter Kupferschiene in einem Bauteil

ist die Anzahl der Whisker-Fäden auf einer Fläche ausreichend groß und der Leiter stromdurchflossen, wird durch das Eigenmagnetfeld des stromdurchflossenen Leiters die geringe

Ionisierung des ersten schmelzenden Whiskers in den inhomogenen Bereich des nächsten Whiskers transportiert mit der Folge eines erneuten Spannungsdurchschlags. Somit steigt mit den weiteren Durchschlägen die Ionisierung auf einen Wert, der einen Leistungslichtbogen ermöglicht. In den Bildern 6 und 7 wird dieser Vorgang gezeigt. Das Bild 6 ist ein Blick in einen Schienenkanal, in den bisher keine Lichtbogenzündung erfolgte. Das Bild 7 ist eine Bildmontage einer Störung an einem baugleichen Schienenkanal. Es zeigt den Zündort an den demontierten Schienen L1 und L2. Das unterschiedliche Bild der Lichtbogenfußpunkte ergibt sich aus der anodischen und kathodischen Polarität im Augenblick der Lichtbogenzündung. Die Einwirkzeit des Lichtbogens im Bereich der Teilbilder liegt bei < 2 ms.

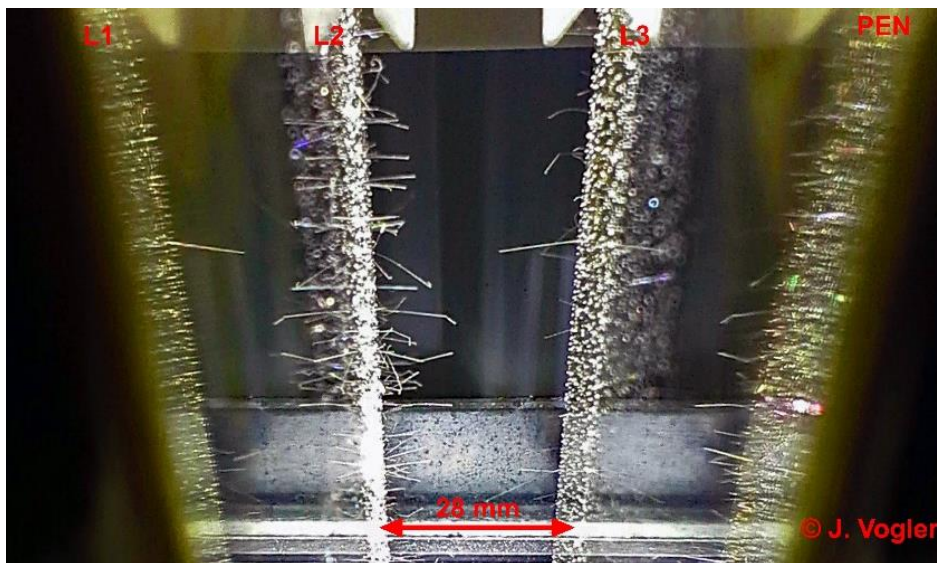


Bild 6: Schlüssellochblick in einen Schienenkanal



Bild 7: Ansicht einer Zündstelle in einem Schienenkanal

Schwierig ist der Nachweis von Whisker nach Lichtbogeneinwirkungen, da durch die thermischen Einwirkungen und Rußablagerungen Whiskerspuren zerstört oder verdeckt sind. Häufig trifft man bei der Ermittlung solcher Störungen auf eine Voreingenommenheit und Ignoranz, die auf Unwissenheit oder auch wirtschaftlichen Interessen beruht. Grundsätzlich muss man aber bei der galvanischen Verzinnung von Kupferflächen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit von Whiskerbildung ausgehen. Daraus ergibt sich die Frage der Notwendigkeit der Verzinnung von Kupferflächen. Aus der Sicht der thermischen Beanspruchung ist eine Zinnaufgabe, besonders der Blankverzinnung eher nachteilig, da die Wärmeabstrahlung gegenüber einem Kupferrohmaterial ungünstiger ist. Die Ansichtsgüte dürfte bei industriell gefertigte Baueinheiten ebenfalls keine Rolle spielen. Bleiben also unnötige Kosten und Umweltprobleme. Für Kontaktflächen muss beachtet werden, ob es einmalige, industriell gefertigte Verbindungen oder Wechselmöglichkeiten notwendig sind. Bei industriell gefertigten Verbindungen ist eine Verzinnung nicht notwendig, da eine sachgemäße Fertigung eine ausreichende Kontaktqualität liefert. Der praktische Nachweis ist in Anlagen, wo häufig Whisker auftraten und vom Auftraggeber zinnfreie Elemente geforderte und angewendet wurden, ohne Qualitätseinbußen erbracht.

Wo traten häufig Whisker auf? Die Frage ist nicht eindeutig zu beantworten. Auffällig ist, dass da, wo einmal eindeutig Whisker als Störursache ermittelt wurden, kritischer nachgesehen wird und weitere Whisker erkannt werden. Viele Störungen an gleichen Bauelementen an anderen Orten werden aber häufig als ungeklärt abgeschlossen, da die Whisker-Problematik relativ unbekannt ist oder ignoriert wird. Aus den bisher durchgeführten Störuntersuchungen lässt sich herleiten, dass in Anlagen mit konstanter Betriebstemperatur der Sammelschienen im Bereich von $> 60^{\circ}\text{C}$ und 24-Stundenbetrieb eine Häufung zu beobachten ist. Umwelteinflüsse sind nicht nachweisbar, aber mit Sicherheit nicht auszuschließen, da durch Poren in der Zinnschicht durchaus Fremdstoffe eindringen und die inneren Spannungen erhöht werden können. In der Literatur wird auch auf Stressbeanspruchung des Materials durch eine mechanische Bearbeitung (z.B. Biegung) nach dem verzinnen verwiesen. Aus den eigenen Störuntersuchungen lässt sich das nicht belegen, da die Häufung der Whiskerbildung überwiegend an nicht durch Biegung beanspruchten Flächen beobachtet wurde. Im Bild 8 wird ein Beispiel einer mechanisch beanspruchten verzinnten Fläche gezeigt. Deutlich sind an den nachträglich aufgebracht Kratzspuren auf der Zinnfläche Whisker unterschiedliche Entwicklung zu erkennen. Das Bild 9 zeigt eine verzinnte Aluminiumschiene ebenfalls mit deutlichen Kratzspuren und sich aus diesem heraus entwickelnden Whisker.

In den bisher gezeigten Bildern sind neben den fadenförmigen Whisker auch Anhäufungen von Krümelwhisker, oder auch Hillocks genannt, vorzufinden. Die Ursache dieser Whisker-Erscheinung ist die Struktur der Zinnkristalle. Im der Modelldarstellung der Whisker-Entwicklung (Bild 2) ist zu erkennen, dass die Zinnkristalle sehr unterschiedliche Größen und Lagen besitzen. Die Whisker

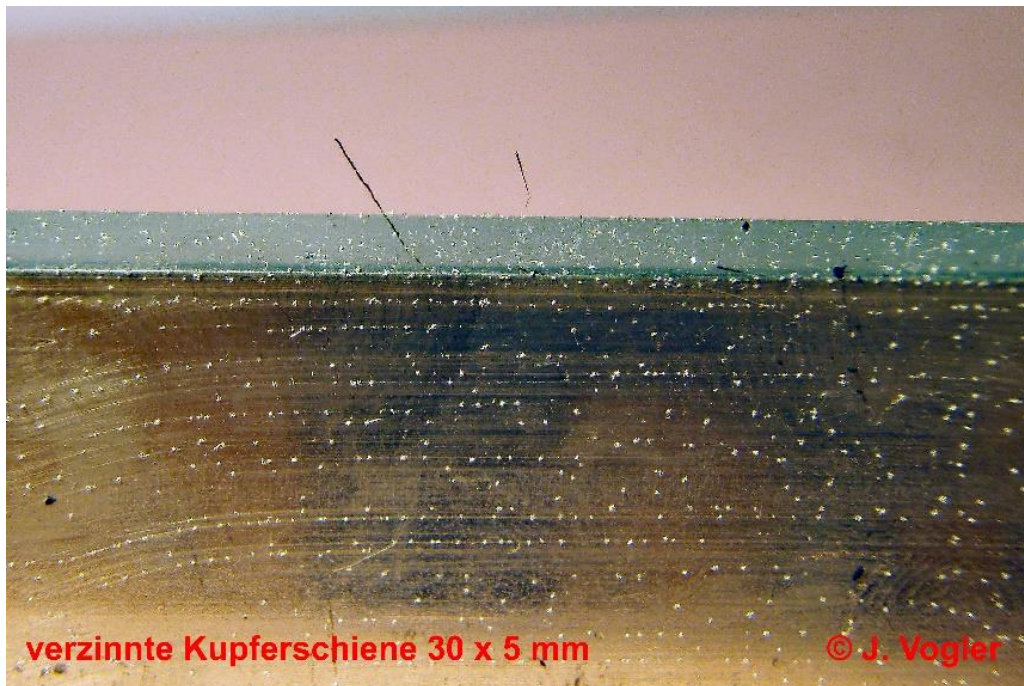


Bild 8: verzinnte Kupferschiene mit Kratzspuren

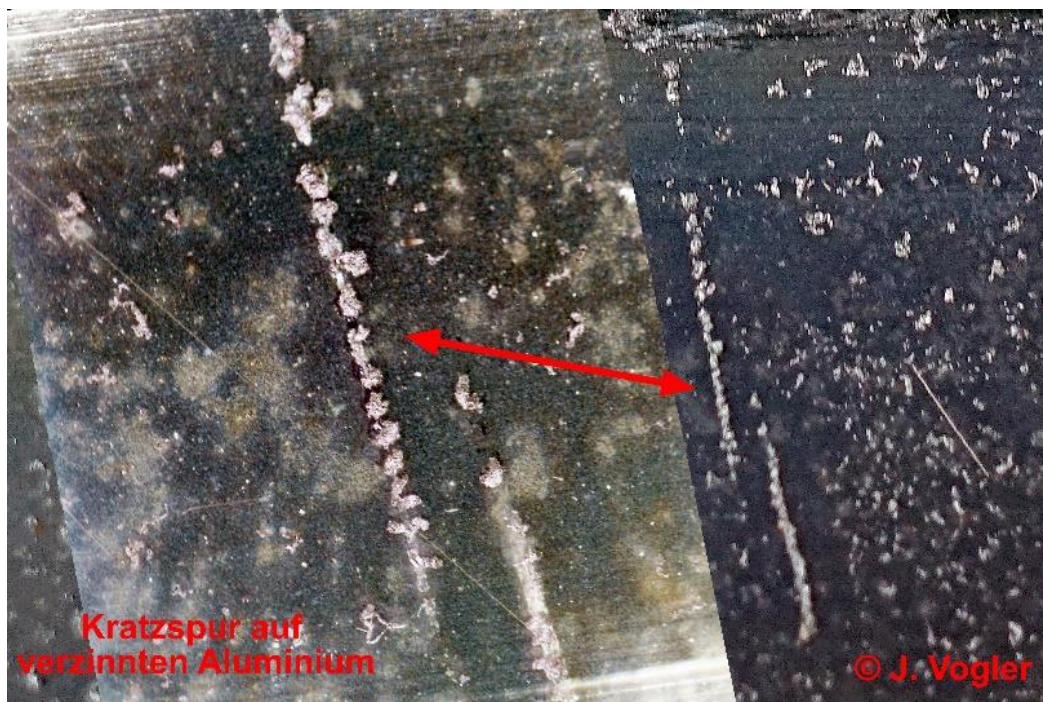


Bild 9: verzinnte Aluminiumschiene mit Kratzspuren und zusätzlicher Vergrößerung

können im Bereich von 0 bis 180 Grad, bezogen auf die Oberfläche austreten. Im Bereich kleiner Winkel zur Oberfläche ist die Ausbildung von Fäden, bedingt durch die raue Oberfläche, schwierig. Die austretenden Whisker stoßen auf Widerstand und zerbröseln. Die von innen nachstoßenden Zinnatomen drücken aber weiter, so dass ein Krümelhaufen entsteht. Aus den Krümelwhisker können sich auch Fadenwhisker entwickeln. In den Bildern 10 und 11 ist ein Beispiel der unterschiedlichen Whisker Ausbildung auf einer verzinnten Aluminiumschiene aus einem Schaltgerät dargestellt.

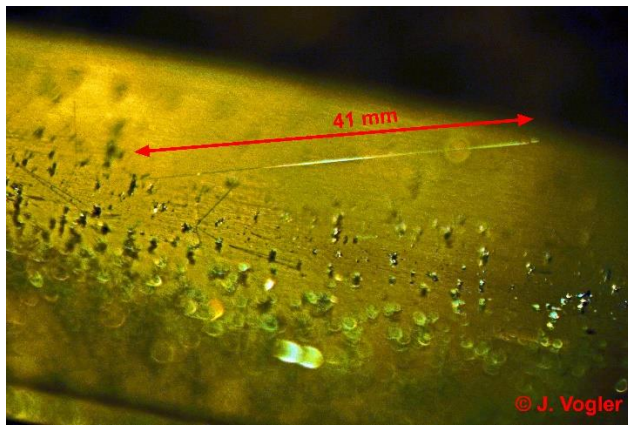


Bild 10 und 11 : Whisker auf verzinnter Aluminiumschiene eines Schaltgerätes

Wie erkenne ich Whisker und was kann man dagegen tun? Eindeutig Sichtbarkeit von Whisker, wie sie im Bild 6 dargestellt, sind nicht immer anzutreffen. Häufiger sind es Krümelwhisker, die sich als kleine weiße Punkte mit einer sehr rauen und scharfen Oberfläche zeigen. Im Bild 12 ist ein Beispiel an einem Leistungsschalter Anschluss wiedergegeben. Zu beachten sind an diesem Bild auch die von der Anschlusschiene abgefallenen und auf dem Leistungsschalter liegenden Whiskerkrümel. Hier liegt die verborgene und häufig übersehene Gefahr der Whisker vor. Die Krümel- und auch Fadenwhisker sind metallisch leitende Objekte. Fallen sie ab, können sie auf Isolationsstrecken fallen und Störungen einleiten. Besonders kritisch ist, wenn diese Metallpartikel in jeder Art von Schaltgeräten eindringen und die Funktion gefährden.



Bild 12: Ansicht eines Leistungsschalter Anschlusses in einem staubgeschützten Raum mit sehr viel Krümelwhisker

Erkennt man auf einem Bauteil in der Starkstromtechnik Krümelwhisker sollte das Bauteil zeitnah ausgetauscht werden. Auf keinem Fall Reinigungsarbeiten irgendeiner Art durchführen. Mit bloßen Auge sind Fadenwhisker unter Umständen nicht erkennbar und könne bei Reinigungsarbeiten übersehen und auf Isolationsstrecken fallen. Auch Herstellerangaben von Gefährdungsstufen in Abhängigkeit von den Abmessungen der Hillocks sind irrelevant und gefährlich, da bei dieser Betrachtung mögliche querliegende Fadenwhisker nicht berücksichtigt werden. Die Bilder 10 und 11 zeigen das sehr deutlich. Der Fadenwhisker mit einer Länge von 41 mm wurde erst unter dem Mikroskop erkannt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass die Bilder 10 und 11 von einem Schaltgerät herrühren, was in Reserve lag und noch nie im Betrieb war. Es wurde als Muster zu einem durch einen Lichtbogen zerstörten Schaltgerät untersucht. Vor der Anwendung von Fetten, Farben, Sprays und dergleichen muss dringen abgeraten werden, da die Aktivität der Whisker durch die tiefliegenden Inseln mit Kupfer-Zinn-Bronzen nicht unterbunden und unter Umständen sogar gefördert werden. Es fehlen grundsätzliche wissenschaftliche Untersuchungen zu den Problemen der Whiskerbildung in der Starkstromtechnik und es liegen keine sicheren Aussagen zu der zeitlichen Entwicklung von Whiskern vor. Untersuchungen aus dem Bereich der Mikroelektronik liegen umfangreich vor. Aber es gibt erhebliche Unterschiede in der Reinheit, Materialbeschaffenheit, Umweltbedingungen und mechanisch einwirkende Kräfte in den beiden Bereichen. Angaben von Hersteller, das mit einer zusätzlichen Nickelschicht zwischen Kupfer und Zinn Whisker vermieden werden, sind nicht im vollen Umfang richtig. Aus der Literatur ist zu entnehmen das eine Nickelschicht die Whiskerbildung stark reduziert aber nicht mit Sicherheit verhindert. Ferner wird durch diese Maßnahme die ökologische und ökonomische Gesamtbilanz nicht besser. Ein sicherer Schutz vor Whisker-Störungen ist der Verzicht auf galvanische „Veredlung“ der Leitergrundmaterialien.

In der Internetseite <https://whisker-videos.lichtbogen-live.de/#collections> sind Videos zum Verständnis der Whisker-Bewegungen wiedergegeben.

Der Beitrag zum Whiskerproblem ist auch in der Zeitschrift „de“ www.elektro.net Heft 13-14 2018 erschienen.

.