

LEITERPLATTEN UNTER 1000 V SPANNUNG:  
EINFLUSS DES LÖTSTOPPLACKS AUF DAS UNTER  
FEUCHTE UND HOHEN ELEKTRISCHEN SPANNUNGEN  
AUFTRETENDE ANODISCHE MIGRATIONSPHÄNOMEN IN  
DER LEITERPLATTE

DISSERTATION  
ZUR  
ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES  
DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)  
DER FAKULTÄT FÜR INFORMATIK UND ELEKTROTECHNIK  
DER UNIVERSITÄT ROSTOCK

BETREUER: PROF. DR.-ING. HABIL. MATHIAS NOWOTNICK

EINRICHTUNG: UNIVERSITÄT ROSTOCK

BETREUER: DR. RER. NAT. LOTHAR HENNEKEN

EINRICHTUNG: ROBERT BOSCH GMBH

VORGELEGT VON

KERSTIN LUX | GEB. AM 27. JUNI 1989 IN REUTLINGEN

AUS INGOLSTADT

ROSTOCK | JUNI 2021

---

## Kurzfassung

---

Der weltweite Trend zur Elektromobilität führt dazu, dass in den letzten Jahren auch Neuentwicklungen im Bereich der Elektronik in den Fokus gerückt sind. Stand heute (Juni 2020) sind bereits 60 elektrisch angetriebene Fahrzeugmodelle deutscher Hersteller auf dem Markt [1].

Die Weiterentwicklung elektrischer Antriebe stellt Automobilhersteller und deren Zulieferer vor neue Herausforderungen.

Da diese Anwendungen höhere Spannungen - im Bereich von 470-1200V- als die aktuellen elektronischen Systeme in Kraftfahrzeugen benötigen, ist es von großer Wichtigkeit, das Verhalten der Komponenten unter diesen erhöhten Lasten weiter zu untersuchen.

Dem Verhalten von Leiterplatten (PCB) als mechanischem Träger und elektrischem Verbindungselement der elektronischen Bauelemente und ihren verschiedenen Materialien unter Hochspannung und Feuchtelast kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. Das Verhalten dieser PCB unter den erhöhten Lasten von ausgedehnter Betriebsdauer, Hochspannung und kritischem Feuchteklima ist derzeit Gegenstand intensiver Untersuchungen.

In diesem Zusammenhang werden in der vorliegenden Arbeit Materialuntersuchungen an Leiterplatten mit speziell entworfenen Testlayouts beschrieben und Wirkmodelle zu beobachteten Fehlermechanismen abgeleitet. Mit diesem Verständnis können Maßnahmen zur Zuverlässigkeitssteigerung ergriffen werden.

Der Fokus liegt auf dem Einfluss des Lötstopplacks auf die Hochspannungsfestigkeit der Leiterplatte und einem in dieser Arbeit aufgedeckten, neuartigen, leitfähigen anodischen Migrationsphänomen (AMP). Dieses kann sich unter hohen elektrischen Spannungen unter gleichzeitiger Feuchtelast hauptsächlich im Lötstopplack, aber auch im Basismaterial der Leiterplatte, zwischen gegenpolig geladenen Leiterbahnen ausbilden. Die potenziellen Folgen sind Kurzschlüsse und damit Ausfall der HV-Leiterplatte unter bestimmten Betriebsbedingungen. Diese Arbeit beinhaltet eine detaillierte Beschreibung des neuartigen Phänomens und zeigt Einflussgrößen auf, die die Ausprägung und Intensität des AMP beeinflussen. Sie leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Definition von Maßnahmen, die das Auftreten von AMP signifikant reduzieren und somit die Zuverlässigkeit der Schaltungen weiter erhöhen.

Zunächst werden einige wichtige Eigenschaften von Leiterplatten und Lötstopplack erläutert, die wesentlich sind für das spätere Verständnis des untersuchten Ausfallmechanismus. Die Durchführung von Lebensdauertests wird besprochen. Es wird ein kurzer Überblick über bereits aus der Literatur bekannte elektrochemische Migrationsphänomene, wie die klassische elektrochemische Migration (ECM) oder das Conductive Anodic Filament (CAF), gegeben. Im

---

Anschluss werden das neuartige AMP und weitere, im Rahmen der Hochspannungstests von Leiterplatten entdeckte Phänomene vorgestellt. Der experimentelle Grundlagenteil behandelt die in dieser Arbeit untersuchten Leiterplattenstrukturen, ihre Vorbehandlung und den Versuchsaufbau für die durchgeführten HV-SIR-Tests.

Im Ergebnisteil dieser Arbeit werden zunächst Analyseresultate am Lötstopplack vorgestellt. Die Glasübergangstemperatur und Feuchteaufnahme des Lötstopplacks werden ebenso wie dessen elektrische Alterung diskutiert. Simulationen der im Lötstopplack durch die Leiterbahngeometrie vorherrschenden elektrischen Feldstärken sowie Teilentladungsmessungen im Lötstopplack stellen die Grundlage für die weitere Analyse der Einflussfaktoren für die Ausbildung des AMP dar.

Als weiteres Ergebnis der Untersuchungen werden verschiedene Einflussfaktoren auf das AMP diskutiert und analysiert. Aus den chemischen Reaktionsmechanismen und der Materialzusammensetzung des AMP wird ein erstes grundlegendes Modell, das dessen Ausbildung beschreibt, abgeleitet.

Anschließend wird eine detaillierte Untersuchung der AMP in Abhängigkeit von Testzeit, elektrischer Spannung und Höhe des elektrischen Felds durchgeführt.

Aus den abgeleiteten Ergebnissen wird ein Lebensdauermodell für Leiterplatten, die hohen elektrischen Spannungen und Feuchte ausgesetzt sind, aufgestellt. Dieses erlaubt eine theoretische Vorhersage des Ausfallzeitpunkts einer Leiterplatte aufgrund von AMP.

Anhand von Analysen der Feuchteaufnahme, die am Lötstopplack durchgeführt wurden, kann der Einfluss der Lackdicke auf Intensität und Ausprägung des AMP gezeigt werden. Ebenso wird der Einfluss der Lackaushärtung, Temperaturwechselbelastung und Lötstopplackrezeptur auf das AMP besprochen. Auf Basis der Ergebnisse zur Variation der Lackinhaltsstoffe wird ein Wirkmodell aufgestellt, das den Einfluss der Lackinhaltsstoffe auf die Ausbildung des AMP beschreibt.

In einer Zusammenfassung werden aus den Untersuchungen konkrete Empfehlungen abgeleitet, wie die Zuverlässigkeit von Leiterplatten in modernen Anwendungsfällen der Elektromobilität weiter gesteigert werden kann.

---

**Abstract**

---

In recent years, new developments in the field of electronics have become more prominent due to the global trend towards electromobility. As of today (June 2020), 60 models of electrically powered vehicles produced by German manufacturers are already available [1].

The continuous development of electric drives brings new challenges for automotive manufacturers and their suppliers.

Such applications use voltages in the range of 470 V to 1200 V, higher than in the current electronic systems in motor vehicles, making a further investigation of the properties of the components used under these increased loads a priority. A topic of major importance are the properties of the PCB as mechanical carrier and electric interconnection of the components and of its various materials under high voltage and moisture load. Currently, the performance of PCBs under high voltage, critical humid climate conditions and with extended operating time is subject to intensive investigations.

In this context, the work at hand describes studies on PCB materials with specially designed test layouts and develops models for the observed failure mechanisms. The results can be used to derive measures for an increase of HV-PCB reliability.

This work focusses on the analysis of the influence of the solder resist on the high voltage strength of the PCBs and it investigates a conductive anodic migration phenomenon (AMP) which was discovered in the context of the investigations performed. An AMP forms under high electric voltage and simultaneous moisture load between oppositely charged conductive tracks. It is found mainly in the solder resist but also in the base material of the printed circuit board. Potential consequences are short circuits and in consequence failure of the HV printed circuit board. This work contains a detailed description of this new phenomenon and presents variables that influence the characteristics and intensity of the AMP. Therefore, it is an essential contribution to the definition of measures for a significant reduction of the occurrence of AMP and for the further improvement of electronic circuit reliability.

At first, some important properties of PCBs and solder resist essential for the subsequent understanding of the examined failure mechanism are explained. Lifetime tests are discussed. A brief overview of known electrochemical migration phenomena in literature like the classical electrochemical migration (ECM) or the conductive anodic filament (CAF) is given. Subsequently, the new AMP as well as other phenomena discovered during high voltage testing of printed circuit boards are presented. The basic experimental part covers the PCB structures investigated in this work, their pre-treatment and the experimental setup for the performed HV-SIR tests.

---

Analytical results obtained on the solder resist are presented. The glass transition temperature and moisture absorption of the solder resist as well as its electrical aging are discussed. Simulations of the electric field strengths in the solder resist due to the conductor path geometry as well as partial discharge measurements in the solder resist provide the basis for a further analysis of the factors influencing the formation of the AMP.

As an additional result of the examinations, various factors influencing the AMP are discussed and analyzed. A first basic model describing AMP formation is derived from the chemical reaction mechanisms and the material composition found.

Subsequently, the dependency of AMP formation on test time, electric voltage and electric field strength is investigated.

From the results derived, a lifetime model for printed circuit boards exposed to high electrical voltages and humidity is established. This allows a prediction of the time to failure of a PCB due to AMP.

The influence of resist thickness on the intensity and expression of the AMP is shown based on moisture absorption analyses of solder resist. Likewise, the influence of resist curing, thermal cycling and solder resist formulation on AMP is discussed. A model describing the influence of the resist ingredients on the formation of AMP is derived from the investigation of resist ingredient variations.

The summary describes, based on the investigations, concrete recommendations for a further increase of the reliability of printed circuit boards in modern electromobility application.