

# **Hochstromdurchkontaktierungen für die Hybridtechnik**

**Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation**

**von**

**Dipl.-Ing. (FH) Dominique Ortolino**

**aus**

**Sainte Lucie de Porto Vecchio**

**Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos**

**Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Müller**

**Tag der mündlichen Prüfung: 29.07.2015**

**Lehrstuhl für Funktionsmaterialien**

**Universität Bayreuth**

**2015**



Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen

Band 6

**Dominique Ortolino**

**Hochstromdurchkontaktierungen  
für die Hybridtechnik**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4089-0

ISSN 1866-5047

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*If our small minds, for some convenience, divide this glass of wine, this universe, into parts  
-- physics, biology, geology, astronomy, psychology, and so on --  
remember that nature does not know it.*

(Richard Feynman)



## **Vorwort der Herausgeber**

In der Dickschicht-Hybridtechnik werden elektrische Durchkontaktierungen genutzt, um Ströme von der Vorderseite von Keramiksubstraten auf deren Rückseite zu führen. Solche Durchkontaktierungen werden nach dem Stand der Technik im Siebdruckverfahren hergestellt und weisen eine wenige Mikrometer starke Innenmetallisierungsschicht auf. Um hohen Impulsströmen standhalten zu können, müssen entweder mehrere Durchkontaktierungen parallelgeschaltet werden oder man verwendet vollständig verfüllte Durchkontaktierungen. Dadurch wird entweder die Integrationsdichte herabgesetzt oder es werden aufgrund des erhöhten Bedarfs an edelmetallhaltigen Pasten die Kosten erhöht.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Ihr Ziel ist es im Wesentlichen, die Stromtragfähigkeit elektrischer Durchkontaktierungen unter Belastung mit kurzen Strompulsen zu erforschen. Dazu wird die Durchkontaktierung mit Hilfe eines Finite-Elemente-Verfahrens modelliert und das Modell anhand von Messungen an über 1500 Proben validiert. Modellgestützt werden Versagensmechanismen quantitativ beschrieben und aus dem Verständnis heraus Maßnahmen gefunden, damit die Durchkontaktierungen erst bei höheren Strömen ausfallen. Zusätzlich wird noch ein auf den erarbeiteten Erkenntnissen basierendes zerstörungsfreies Prüfverfahren entwickelt, um mit hoher Trennschärfe vorherzusagen, ob Durchkontaktierungen einer bestimmten Strombelastung standhalten werden.

Bayreuth im September 2015

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer



## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Dissertation war es, ein Verständnis der Vorgänge bei der Hochstromimpulsbelastung von elektrischen Durchkontaktierungen in Dickschichttechnik zu erlangen. Neben der messtechnischen Erfassung sollten die Vorgänge anhand eines Modells auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht werden. Insbesondere standen die Einflüsse der Geometrie und der elektrischen und thermischen Kenngrößen auf entstehende Temperaturen bei Hochstromimpulsbelastungen im Fokus der Untersuchungen.

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Hauptkapitel gegliedert: Messtechnische Erfassung, Entwicklung eines Basismodells, Bestimmung von modellrelevanten Kenngrößen, Verfeinerung des Basismodells anhand der gewonnenen Daten und abschließend die Entwicklung von Möglichkeiten zur Hochstromdurchkontaktierung.

Im ersten Schritt der Arbeit wurden Durchkontaktierungen aus der Serienproduktion messtechnisch erfasst. Zum Einen wurden Hochstrommessungen durchgeführt, um das Verhalten der Durchkontaktierungen bei Hochstrombelastung zu erfassen. Zum anderen wurden Querschliffe hergestellt und lichtmikroskopisch ausgewertet, anhand derer die Bestimmung der charakteristischen Abmessungen der Durchkontaktierungen erfolgte. So wurde ein Anhaltspunkt für die Entwicklung eines 2D-FEM-Basismodells geschaffen.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde im zweiten Schritt ein FEM-Basismodell entwickelt. Die weiteren Eingangsgrößen, insbesondere die Materialparameter wurden für das Basismodell der Literatur entnommen. Es wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, um die Sensitivität des Modells auf die einzelnen Eingangsparameter zu bestimmen. Dabei zeigte sich frühzeitig, dass die kalorischen Materialparameter gegenüber den geometrischen und elektrischen Parametern nur untergeordneten Einfluss auf die in der Durchkontaktierung auftretenden Temperaturen haben.

Im dritten Teil der Arbeit wurden die modellrelevanten Kenngrößen anhand weiterer Messungen bestimmt. Aus den Ergebnissen des Basismodells war bekannt, dass eine Änderung der kalorischen Parameter nur geringfügigen Einfluss auf die entstehenden Maximaltemperaturen hat. Deshalb wurde das Augenmerk auf

die weitere Bestimmung der geometrischen Abmessungen der Durchkontaktierungen und deren elektrischer Materialparameter gelegt. Zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen wurde eine große Anzahl von Querschliffen von Durchkontaktierungen angefertigt und die charakteristischen Kenngrößen gemessen. Zusätzlich wurden Schliffe senkrecht zur Bohrungsachse der Durchkontaktierungen angefertigt, um eine erweiterte Kenntnis über die Verteilung der Schichtdicke über den Umfang der Bohrungsmantelfläche zu erlangen. Zur Bestimmung der elektrischen Kenngrößen, also des spezifischen Widerstandes und dessen Temperaturkoeffizienten, wurden Messungen sowohl an siebgedruckten Leiterbahnen wie auch an Durchkontaktierungen aus der Serienproduktion bei definierten Temperaturprofilen durchgeführt.

Unter Verwendung der gewonnenen Ergebnisse wurde im vierten Schritt das Basismodell verfeinert. Eingangs wurden die geometrischen Parameter, die Materialparameter und die Randbedingungen in das Modell eingeführt. Der Vergleich mit dem Basismodell zeigt vergleichbare, geringfügig geringere Temperaturen. Anhand des Widerstandsverlaufes während der Impulsstrombelastung, gewonnen aus den Hochstrommessungen, wurde das verfeinerte Modell erfolgreich validiert und konnte für weitere Untersuchungen verwendet werden. Diese Untersuchungen waren: die Analyse des Einflusses der Systemanbindung der Durchkontaktierungen, also der Schritt von der Betrachtung der Durchkontaktierung als isoliert vorliegendes Bauteil hin zur Berücksichtigung der Peripherie. Mittels eines 3D-Modells wurde der Einfluss unterschiedlicher Kontaktierungsvarianten und asymmetrischer Fehlstellen auf lokal auftretende Temperaturmaxima untersucht. Außerdem konnte der Versagensmechanismus von Durchkontaktierungen bei Impulsstrombelastung phänomenologisch im Modell abgebildet werden.

Nachdem in den vorangehenden Kapiteln die Erwärmung von Durchkontaktierungen bei Impulsstrombelastung modellhaft eingehend untersucht wurde, die dominierenden Einflussgrößen identifiziert wurden und das Modell validiert wurde, befassen sich die letzte Kapitel mit den Möglichkeiten der Hochstromdurchkontaktierung.

Zum Ersten beinhaltet das die Entwicklung eines zerstörungsfreien Testverfahrens für elektrische Durchkontaktierungen, mit dem es möglich ist,

vorherzusagen, ob eine bestimmte Durchkontaktierung einer bestimmten Strombelastung standhalten kann. Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die relative Widerstandsänderung der Durchkontaktierungen, gleichbedeutend mit deren Erwärmung, zur aufgenommenen Energie ins Verhältnis gesetzt wurde. Mit einer geeigneten Auswertung lässt sich eine zuverlässige Aussage über die Belastungsgrenze einer Durchkontaktierung für konstante Strompulse mit einer festen Pulszeit ermitteln. Das Prüfverfahren erlaubt eine signifikante Unterscheidung zwischen potentiell guten und schlechten Durchkontaktierungen, die einer vorgegebenen Strombelastung standhalten würden oder nicht. Die Trennbarkeit zwischen kritischen und unkritischen Durchkontaktierungen ist dabei wesentlich besser als für die alleinige Betrachtung des Widerstandes bei Raumtemperatur. Infolgedessen kann beim Entwurf des Schaltungslayouts auf parallel ausgeführte Durchkontaktierungen weitgehend verzichtet werden, resultierend in einer höheren Integrationsdichte der gesamten Schaltung. Des Weiteren führt eine Einsparung an Durchkontaktierungen zu einer Reduktion des Edelmetallverbrauchs und damit zu einer Herabsetzung der Produktionskosten.

Zum Zweiten umfasste es die Konzeptionierung, Herstellung und Hochstrommessung von hochstromtauglichen Durchkontaktierungen. Aus den Ergebnissen der Parameterstudien war bekannt, dass die Verwendung von Materialien großer thermischer Masse nicht zielführend war, sondern die abfallende Leistung minimiert werden musste. Die Minimierung der generierten Wärmemenge und der daraus resultierenden Temperaturen kann nur durch die Anpassung des Widerstandes der Durchkontaktierungen erfolgreich umgesetzt werden. Das kann entweder durch die Änderung des durchströmten Leiterquerschnitts erfolgen oder durch die Einstellung des spezifischen Widerstandes der Metallisierung. Im Wesentlichen wurden zwei Wege verfolgt, die beide im ersten Schritt mittels des FEM-Modells untersucht wurden: Zum Einen wurde die Optimierung von herkömmlichen Durchkontaktierungen unter Verwendung von Materialien geringeren spezifischen Widerstandes untersucht. Zum Anderen wurden aufbauend auf herkömmlichen Durchkontaktierungen vollständig verfüllte Durchkontaktierungen mit variiertem spezifischen Widerstand der Füllung und unterschiedlichen Durchmessern konzeptioniert. Es wurden abschließend vereinfachte Demonstratoren dieser vollständig verfüllten Durchkontaktierungen

aufgebaut und Hochstromtests unterzogen. Die hergestellten Demonstratoren zeigten eine erheblich gesteigerte Hochstromtragfähigkeit.

Resümierend gelang in dieser Arbeit die messtechnische Erfassung von elektrischen Durchkontaktierungen in Dickschichttechnik und die Betrachtung der Durchkontaktierung mittels eines FEM-Modells als eigenständiges Bauteil, inklusive der Identifizierung von Schwachstellen. Dabei wurde die Anbindung des Bauteils an die Dickschichtschaltung berücksichtigt. Es wurde ein zerstörungsfreies Testverfahren entwickelt, mit dem die Strombelastbarkeit einer Durchkontaktierung bestimmt werden kann und es konnten erfolgreich Konzepte für hochstromtaugliche Durchkontaktierungen entwickelt und überprüft werden.

## Summary

In this thesis, the high current behaviour of electrical vias manufactured in thick-film technology was investigated. Main focus was the observation of the processes during short time high current pulses and the modelling of these processes using a finite element method model (FEM). The focus of the investigations was to determine the influences of the via geometry and the electrical and thermal properties of substrate and metallization.

At first, short time high current measurements of a high number of vias were carried out. They were taken from serial production and measured using a high current testing unit, which was designed and built for this study. The ampacity of the vias was quite high. Not a single via was destroyed below 23 A. Initially, three different behaviors concerning the resistance heating of vias during short time current pulses were assumed and confirmed by the measurement results. The cold resistance at a test current of 2 A and the relative resistance change at a test current of 20 A were correlated with the ampacity of the vias

The geometric dimensions of the vias were obtained by the evaluation of optical micrographs of grinded vias. Due to the laser drilling of the vias they are conically shaped and the metallization layer can be assumed to be constant, excluding via “entrance” and “exit”. The analysis of vias destroyed during the high current tests showed that the metallization layer melted near the via outlet.

In the second step, an extensive finite element method model was developed, with which the influence of the model inputs on the resulting maximum temperatures and the temperature distribution was determined. The analysis of varied geometrical and material properties and the boundary conditions revealed:

- The occurring temperatures during high current load of a via can only be reduced by preventing the heat generation. The caloric material properties play a minor role, since the heat is generated faster than it can diffuse into the sink (the substrate).
- The weak spot of vias is the bottleneck for the current due to their conical shape. In conjunction with the uneven bore exit, which also stems from the manufacturing process, a hot-spot temperature was always observed in this area.

A first comparison between the modelled and measured data from the high current tests showed a good agreement of the basic curve of  $R(t)$ . The location of the modelled temperature hot spot also agreed very well with the location of the missing metallization layer of vias destroyed in the high current test.

In order to refine the model, additional measurements for determining the electrical material parameters and the dimensions of the vias have been performed. EDX measurements helped to determine the composition of the metallizing layer. The value of the temperature coefficient of resistivity was determined directly at vias. The evaluation of additional cross sections for determining the dimensions showed that the bore angle and layer thickness had to be slightly adjusted. Also, a realistic film thickness distribution was obtained, based on micrographs of vias that were grind gradually from the upper side. This is especially important to deduce the shape and position of three-dimensional defects.

Using those determined geometrical and electrical parameters, the previously developed base model was refined. Based on the resistance profile during pulse current load, which was obtained from the high current measurements, the refined model was validated. In order to map voids (irregular coating thickness distributions over the surface), the radially symmetrical 2D model was transferred to a 3D model. The influence of irregular voids on the occurring maximum temperature was investigated based on asymmetric defects. The maximum temperature depends strongly on the available cross section area that is available for the current and the shape of the defect and its location. After the temperature increase of the vias has been studied extensively, as a last step failure of the via was implemented in the model. Due to the melting of the via metallization layer during destruction, it was assumed that regions in where the melting point was exceeded were not any longer available for current conduction. The remaining conductor path decreased and the higher current density led to higher heat generation and therefore to a faster temperatures increase and to more regions of the metallization layer that exceeded the melting point. Finally, the destruction of the via is extremely accelerated.

In the last step, two conclusions from the model-based considerations were followed.

At first, a method for non-destructive testing of high-current vias was developed on the basis of the high current measurements, with which it is possible to predict

whether a particular via can withstand a certain current pulse with a fixed pulse time. The vias were measured with pulses of a current, which is much lower than the maximum current allowed during conditions of use. Here, the absorbed energy in proportion to the relative change in resistance during current load, respectively the heating of the via metallization, was evaluated. The test method enables a significant distinction between potentially good and bad vias that would withstand a given current load or not. Critical and non-critical vias could be much better separated than for the analysis of just the resistance at room temperature. As a result, parallel vias can be avoided in the design of the circuit layout, resulting in a higher integration density of the entire circuit. This also reduces the noble metal consumption and thus leads to a reduction of the production cost.

In the second step, high-ampacity vias were developed. Conceptual design, manufacturing and high-current measurement were accomplished. Due to the modelling results, the use of high thermal mass materials was not assumed to be effective, but the heat generation had to be minimized. The minimization of the amount of heat generated and the resulting maximum temperature can be successfully achieved only by adjusting the resistance of the vias. Appropriate means are either to adjust the resistivity of the metallization or to increase the conductor cross-section, which is available for current conduction. Both approaches were examined by means of the FEM model. The first approach was to adjust the resistivity of the metallization of conventional vias using materials of lower specific resistance. In principle, this leads to a much higher ampacity, but practically adhesion between other pastes than silver-palladium and the alumina substrate is not sufficient. The second approach was to increase the available cross section area of the via by filling conventional vias completely. It is possible to develop high current vias with strongly increased ampacity by adjusting the resistivity of the filling and the via diameter. Finally, demonstrators with decreased noble metal content were prepared. For that purpose, commercial conductor pastes were mixed with alumina powder. The same high current test as used before was applied and the results confirmed the high ampacity of vias that are completely filled with metal-ceramic mixtures.

In summary, electrical vias in thick-film technology have been measured by means of resistance, high current behavior, geometrical dimensions and material

composition. The results from the developed FEM model confirmed the measurement results. A non-destructive test method to determine the ampacity of a particular via was established and high-ampacity vias have been developed, produced and tested.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Zusammenfassung</b>	<b>i</b>
<b>Summary</b>	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Dickschicht-Hybridtechnik	3
2.2 Elektrische Durchkontaktierungen in Hybridtechnik	7
2.3 Hochstromtaugliche Durchkontaktierungen	11
<b>3 Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>12</b>
3.1 Problemstellung	12
3.2 Zielsetzung	14
<b>4 Messtechnische Erfassung</b>	<b>16</b>
4.1 Hochstrommessungen	16
4.2 Mikroskopie	25
<b>5 Basismodell</b>	<b>28</b>
5.1 Einleitung	28
5.2 Übersicht	30
5.3 Basismodell	33
5.4 Durchgeführte Modellierungen	43
5.5 Parameterstudien	44

---

5.5.1 Anwendung	45
5.5.2 Geometrische Parameter	49
5.5.3 Kalorische Materialparameter	54
5.5.4 Elektrische Materialparameter	57
5.5.5 Randbedingungen	60
5.5.6 Fazit der Parameterstudien	61
5.6 Radialsymmetrische Fehlstellen	62
5.7 Fazit	64
<b>6 Vom Basismodell zum verfeinerten Modell</b>	<b>66</b>
6.1 Geometrie/Fehlstellen	66
6.2 Materialkennwerte	74
6.2.1 Spezifischer Widerstand	74
6.2.2 Temperaturkoeffizient des Widerstandes	83
6.2.3 Widerstandsabweichung und Streuung der <i>TKR</i> -Werte	87
6.3 Fazit	90
<b>7 Verfeinertes Modell</b>	<b>91</b>
7.1 Verfeinertes Basismodell	91
7.2 Validierung	94
7.3 Systemanbindung der Durchkontaktierung	96
7.4 Asymmetrische Fehlstellen	99
7.5 Versagensmechanismen	102
7.6 Fazit	111
<b>8 Testverfahren zur Bestimmung der Stromtragfähigkeit</b>	<b>112</b>
8.1 Grundgedanke des Messverfahrens	112
8.2 Ausführungsbeispiel	113
8.3 Bewertung des Testverfahrens	116

---

8.4 Fazit	119
<b>9 Hochstromtaugliche Durchkontaktierungen</b>	<b>120</b>
9.1 Durchkontaktierungsvarianten	120
9.1.1 Herkömmliche Durchkontaktierungen	120
9.1.2 Verfüllte Durchkontaktierungen	121
9.2 Herstellung von Demonstratoren	128
9.2.1 Materialien	129
9.2.2 Spezifischer Widerstand und <i>TKR</i>	130
9.2.3 Herstellung von Durchkontaktierungen	134
9.3 Hochstrommessungen	137
9.4 Fazit	140
<b>10 Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>142</b>
<b>Anhang</b>	<b>145</b>
A.1 Parameterstudien	145
A.2 Verfüllte Durchkontaktierungen	151
A.3 Bilder	153
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>155</b>
<b>Verzeichnis der Symbole</b>	<b>156</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>170</b>
<b>Danksagung</b>	<b>171</b>