

Referat 148: Carbon-Leitlacke - Einsatzgebiete, Rationalisierungs- und Kosten- einsparungspotentiale

Autoren: Dipl.-Ing. Rüdiger Dietrich, Dipl.-Ing. Johannes Tekath

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	2
Allgemeine Grundlagen.....	2
Einsatz von Carbon-Leitlacken.....	5
Carbon-Leitlacke für Folien-Tastaturen.....	5
Carbon-Leitlacke als Kontaktwerkstoff, Substitution von Gold	5
Carbon-Leitlacke für Schleifkontakte, Regler.....	6
Tippkontakte ohne Metallunterlage.....	6
Carbon-Leitlacke als Bauelemente	6
Carbon-Leitlacke als Ätzresist.....	7
Carbon-Leitlacke zur Herstellung kreuzender Leiter.....	7
Carbon-Leitlacke als Migrationsschutz	7
Herstellung von Heizelementen mit Carbon-Leitlacken.....	8
Konstruktionshinweise für den Einsatz von Carbon-Leitlacken	8
Einsatz als Kontaktwerkstoff (Substitution von Gold)	8
Überdrucken von Kupfertippkontakten.....	8
Drucken von Schleifkontakten	8
Überdrucken von Steckerleisten	9
Tippkontakte ohne Metallunterlage.....	9
Kreuzende Leiter	9
Allgemeine Konstruktionshinweise für den Einsatz von Carbon-Leitlacken	11
Einsatz von Carbon-Leitlacken als passive Bauelemente	12
Einstellen von Widerständen durch Lasertrimmen	12
Verarbeitung.....	13
Applikation von Carbon-Leitlacken im Siebdruckverfahren	13
Schichtdicke von Carbon-Leitlacken.....	13
Verdünnen von Carbon-Leitlacken.....	13
Widerstandsänderung durch Abmischen mit Isolierpaste.....	14
Trocknen von Carbon-Leitlacken	14
Trocknung im Trockenofen	14
IR-Trocknung	15
Überdrucken von Carbon-Leitlacken.....	16
Kostenvergleich	16
Schlussbetrachtung.....	17
Literatur	17

Einleitung

Carbon-Leitlacke können als Leiter und Widerstände kostengünstig auf unterschiedlichste Kunststoffe, Polyester-/Polyimidfolien, klassisches Basismaterial, Keramik u. a. im Siebdruckverfahren aufgetragen werden.

Carbon-Leitlacke werden zur Substitution von Gold, zur Herstellung von Widerständen, kreuzenden Leitern, Abschirmflächen und als Ersatz diskreter Widerstände etc. eingesetzt. Auf teure Edelmetallaufgaben kann vielfach verzichtet werden und darüber hinaus ist es möglich, doppelseitige, durchkontaktierte Schaltungen durch einseitige Leiterplatten zu ersetzen.

Diese Lacksysteme ermöglichen somit deutliche Kosteneinsparungen und alternative Konzeptionen in der Leiterplattenherstellung.

In der Leiterplattenindustrie besteht, wie in der gesamten Industrie, die Notwendigkeit der permanenten Kosteneinsparung bei gleichzeitiger Sicherstellung der erreichten Qualitätsstandards. Bei Leiterplatten, die in mittleren und großen Serien hergestellt werden, schlägt eine Kosteneinsparung besonders zu Buche. Diese Serien, hauptsächlich für die sogenannten „Consumer electronics“, stehen unter dem größten Preisdruck. Kosteneinsparungen im Produktionsprozess sind wesentliche Faktoren für die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Endproduktes.

Eine Kostenreduzierung kann durch Austausch von teuren Rohstoffen gegen günstigere sowie durch einen wirtschaftlicheren Produktionsprozess erzielt werden. Der Einsatz von Carbon-Leitlacken in der Leiterplattenfertigung steht sowohl für die Verwendung von preisgünstigen Materialien als auch für die Vereinfachung bzw. Rationalisierung des Produktionsprozesses.

Bei der Substitution von Gold durch Carbon-Leitlack an Kontaktstellen wird nicht nur der hochpreisige Rohstoff Gold ersetzt, sondern es entfällt auch der aufwendige Galvanik-Prozess.

Wenn zweiseitige, durchkontaktierte Leiterplatten durch einseitige Leiterplatten mit kreuzenden Carbonleitern ersetzt werden, dann sind die Einsparungseffekte noch größer, denn es entfällt neben den Kosten für den Nassprozess bei der Durchkontaktierung auch die getrennte Bearbeitung der beiden Leiterplattenseiten. Außerdem kann anstelle des zweiseitigen, kupferkaschierten Basismaterials einseitiges Basismaterial verarbeitet werden. Zusätzlich zu dieser erheblichen Kosteneinsparung und der Vereinfachung der Produktionsschritte wird durch den Einsatz von Carbon-Leitlacken der Produktionsprozess sicherer gestaltet.

Werden Widerstände mit Carbon-Leitlack direkt auf das Basismaterial gedruckt, wird der Bestückungsaufwand reduziert und es können bei Multilayern ggf. Lagen eingespart werden.

Im Folgenden sollen der grundsätzliche Charakter von Carbon-Leitlacken beschrieben und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Lacksysteme aufgezeigt werden. Die aus Labor- und Praxiserfahrung zusammengestellten Hinweise ermöglichen eine problemlose Einführung von Carbon-Leitlacken für die beschriebenen Anwendungsgebiete. Eine beispielhafte Kostenrechnung, bezogen auf einen Anwenderbetrieb, zeigt die Größenordnung der möglichen Kostenersparnisse auf.

Allgemeine Grundlagen

Siebdrucklacke, ebenso auch Carbon-Leitlacke bestehen im Wesentlichen aus einem oder mehreren Lackbindemitteln (Polymeren), Lösemitteln und Füllstoffen bzw. Pigmenten. Bei der Lackherstellung werden die festen Bestandteile in die flüssigen Bestandteile dispergiert, d. h. fein und gleichmäßig verteilt. Bei der Herstellung eines Carbon-Leitlackes werden in das System zusätzlich leitende Substanzen rezeptiert.

Nach der Applikation des Lackes verdunsten die Lösemittel und nach einem von Lacksystem zu Lacksystem unterschiedlichen Härtungsmechanismus verbleibt auf dem Substrat ein Polymerfilm, in dem die Feststoffe homogen eingebettet sind. Dieser Lackfilm ist im Falle des Carbon-Leitlacks wegen der rezeptierten leitenden Substanzen elektrisch leitend. Ohne diese leitenden Substanzen ist der Lackfilm ein Isolator, da die normalerweise verwendeten Füllstoffe und Pigmente nicht leitend sind und Polymere mit einem Durchgangswiderstand von $>10^{10}$ Ohm \times cm isolierende Eigenschaften haben.

Die Konzentration der leitenden Substanzen in einem Carbon-Leitlack muss so groß sein, dass durch eine Berührung der einzelnen Partikel, bzw. durch einen Abstand zueinander von < 10 Nanometern im Lacksystem ein Stromfluss möglich wird. Den Konzentrationsbereich, in dem ein deutlicher Abfall des Widerstandes auftritt, nennt man auch Perkolationsbereich.

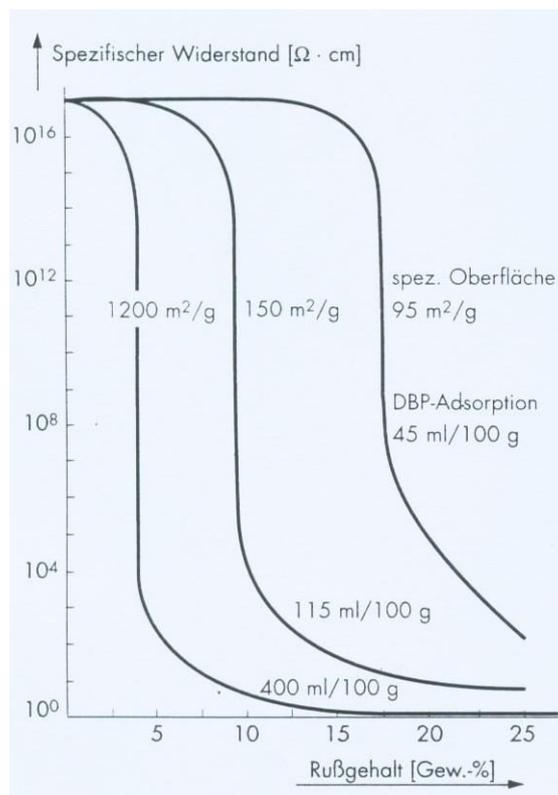


Bild 1: Spezifischer Widerstand bei Einflüssen von spezifischer Oberfläche und Struktur verschiedener Leitfähigkeitsruße in Propylen als Funktion des Rußgehaltes

Die maximale Konzentration der leitenden Partikel ist hauptsächlich von deren Struktur und der spezifischen Oberfläche abhängig. Es können dem Lack nur so viele leitfähige Feststoffe zugegeben werden, wie vom Polymer homogen eingebettet werden können. Nur so ist ein fest haftender, porendichter und geschlossener Lackfilm zu erzielen.

Als leitende Substanzen können grundsätzlich nur Leiter erster Klasse, wie Metall- bzw. Edelmetallpulver und Kohlenstoffpulver verwendet werden. Durch den Einsatz von Metall- bzw. Edelmetallpulvern können im Vergleich zu Kohlenstoffpulvern Leitwerte erreicht werden, die um rund drei Zehnerpotenzen höher sind. Dies liegt hauptsächlich an der höheren spezifischen Leitfähigkeit von Metallen, jedoch auch an der geringeren spezifischen Oberfläche von Metallpulvern, so dass höhere Konzentrationen im Lack möglich sind.

Dafür stellen sich beim Einsatz von Metall- bzw. Edelmetallpulvern unter anderem die Probleme der Oxidation/Korrosion und der Migration beim Einsatz des häufig verwendeten Silbers. Außerdem wird die Kostenrechnung durch den hohen Materialpreis bei Edelmetallpulvern ungünstig beeinflusst. Es würde den Rahmen dieses Referates sprengen, alle Vor- und Nachteile der einzelnen Leitlacktypen zu diskutieren. Deshalb soll nur der Kohlenstoff als leitende Substanz näher betrachtet werden.

Kohlenstoff kommt in freier Form als monokristalliner Diamant oder in Schichtebenen kristallisiert als Graphit vor. Durch Zersetzung von organischen Stoffen unter Luftabschluss oder durch unvollständige Verbrennung entsteht Kohlenstoff in einer dritten amorphen Form, entweder in groben Massen als Kohle oder in feinsten Verteilung als Ruß.

Der individuelle Charakter von Rußen wird besonders durch die spezifische Oberfläche und die Struktur geprägt. Die spezifische Oberfläche von 80 bis 1.200 m²/g entscheidet über die prozentual einzusetzende Menge des Rußes. Die Struktur wird durch das Zusammenwachsen der Primärteilchen beim Herstellungsprozess bestimmt und ist mit ausschlaggebend für die notwendige Packungsdichte im Lackfilm.

Da Ruße synthetisch hergestellt werden, können Struktur und spezifische Oberfläche während des Herstellungsprozesses gut gesteuert werden. Aus der zur Verfügung stehenden großen Auswahl an unterschiedlichen Rußtypen müssen die zur Herstellung von Leitlacken bezüglich ihrer Struktur und spezifischen Oberfläche geeigneten Ruße ausgewählt werden.

Allein mit Rußen ist jedoch aufgrund der mehr amorphen Struktur keine genügende Packungsdichte zu erzielen, so dass zusätzlich Graphite mit einer mehr schichtförmigen Struktur eingesetzt werden. Durch diese Kombination erhält man Leitlacke, die die oben angeführten Bedingungen, also möglichst direkte Berührung der leitenden Teilchen, im ausgehärteten Lackfilm erfüllen.

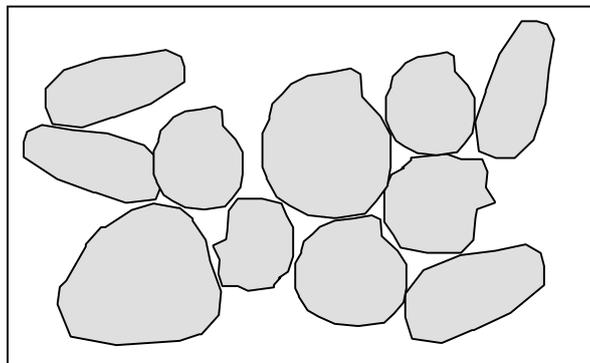


Bild 2: Packungsdichte von Ruß- und Graphitteilchen in Carbon-Leitlack

Generell ist zu sagen, dass mit Carbon-Leitlacken Widerstandswerte von 14 Ohm/□ bei einer Schichtdicke von 25 µm erreichbar sind.

Durch Auswahl geeigneter Polymere können die folgenden Punkte erfüllt werden:

- leichte Verarbeitung (möglichst durch 1-Komponenten-Systeme)
- gute Haftfestigkeit auf verschiedensten Substraten
- hohe mechanische und chemische Beständigkeit
- nahezu keine Änderung des Widerstandes nach Lötprozessen bzw. nach dem Hot-Air-Levelling
- günstige Aushärtebedingungen, d. h. möglichst niedrige Aushärtetemperaturen und kurze Aushärtezeiten

Einsatz von Carbon-Leitlacken

Carbon-Leitlacke werden außer in der Leiterplattentechnik auch in anderen Bereichen der Elektronik/Elektrotechnik eingesetzt. Es kann mit Carbon-Leitlacken statische Elektrizität von Kunststoffteilen und anderen Isolatoren wie z. B. Lackfilmen abgeleitet werden. Diese Anwendung wird hauptsächlich in der Gehäuseindustrie (Fernseh- und Computergehäuse) genutzt, wobei die Lacke relativ dünnflüssig sind und flächig im Sprühverfahren appliziert werden.

Carbon-Leitlacke für Folien-Tastaturen

Als konstruktionstechnisches Merkmal werden Carbon-Leitlacke zur Herstellung von Folientastaturen verwendet. Hier werden die gesamte Leiterführung und die Kontaktflächen mit Carbon-Leitlacken auf Kunststofffolien, wie z. B. Polyester oder Polyimid, gedruckt. Hierbei handelt es sich entweder um zwei getrennte Folien oder um eine Folie, deren zwei Teilstücke zusammengefaltet werden. Zwischen den beiden Folien befindet sich eine isolierende Distanzfolie, und die gesamte Folientastatur wird durch eine bedruckte Deckfolie abgedeckt.

Der Schaltkontakt wird durch Fingerdruck auf vorher festgelegte Bereiche der Folie hergestellt, an der die Distanzfolie ausgespart ist. Durch Berühren der oberen mit der unteren Folie ist der Kontakt hergestellt und wird wieder unterbrochen, sobald der Druck weggenommen wird. Eine Lebensdauer von bis zu 25.000.000 Schaltbetätigungen wurde in Laborversuchen schon festgestellt. Dieser Anwendungsbereich bezieht sich hauptsächlich auf Tastaturen für Rechner und Steuergeräte sowie elektronische Spiele.

Besonderes Augenmerk bei der Auswahl von geeigneten Carbon-Leitlacken für diesen Anwendungsbereich muss auf die gute Haftung auf den verwendeten Substraten, eine genügende Elastizität sowie hohe Abriebfestigkeit gelegt werden.

In der Leiterplattentechnik können Carbon-Leitlacke für verschiedene Anwendungsgebiete eingesetzt werden:

Carbon-Leitlacke als Kontaktwerkstoff, Substitution von Gold

Eine partielle Vergoldung wird auf Leiterplatten hauptsächlich zum Schutz von Kontaktstellen wie Steckerleisten, Tippkontakten und Schleifer gegen mechanische und chemische Einflüsse vorgenommen, um eine hohe Lebensdauer zu erreichen. Durch den Einsatz von Carbon-Leitlack kann auf eine Vergoldung verzichtet werden.

Das bedeutet eine erhebliche Kosteneinsparung, denn folgende Arbeitsschritte sind bei einer partiellen Vergoldung vorzusehen:

- Abdecken der nicht zu vergoldenden Flächen
- Galvanisches Abscheiden von Nickel
- Galvanisches Abscheiden von Gold
- Strippen des Galvano-Resists (meist in Lösemitteln)
- Abdecken der nicht vergoldeten Flächen mit Lötstopplack bei späteren Lötprozessen

Werden die gleichen Kontakte mit Carbon-Leitlack hergestellt, genügt es, die Kontaktflächen mit Carbon-Leitlack zu überdrucken und die restliche Leiterplatte mit Lötstopplack zu schützen. Die Kostenersparnis ergibt sich somit nicht nur aus der Einsparung von Gold, sondern hauptsächlich durch den kurzen und wirtschaftlichen Fertigungsprozess.

Die mit Carbon-Leitlack hergestellten Kontakte sind sicher vor Umwelteinflüssen und Korrosion geschützt und gewährleisten eine sichere Kontaktierung. Von der Deutschen Bundespost wird eine Belastung für Tippkontakte von 1 000 000 Kontaktierungen spezifiziert. Langzeittests haben ergeben, dass Carbon-Tipp-Kontakte über 25 000 000 Kontaktierungen zulassen, was einer Lebenserwartung von über 100 Jahren entspricht.

Carbon-Leitlacke für Schleifkontakte, Regler

Mit zunehmender Abriebfestigkeit erschlossen sich die Carbon-Leitlacke ein weiteres großes Einsatzgebiet als Schleifkontakt, z. B. für automotivische Anwendungen. Auch hier werden im Zuge der notwendigen Kostenreduzierung teure Goldkontakte durch gedruckte Schleifkontakte aus Carbon-Leitlack ersetzt. Bei optimalen Prozessparametern werden bis zu 125 000 Schaltzyklen realisiert.

Tippkontakte ohne Metallunterlage

Bei dem oben beschriebenen Verfahren muss gewährleistet sein, dass die als Tippkontakt vorgesehene Metallfläche vollständig mit Carbon-Leitlack abgedeckt ist, um Korrosion und somit Kontaktierungsprobleme dieser Bereiche zu verhindern. Das setzt eine relativ hohe Präzision beim Siebdruck voraus. Dieser Produktionsschritt kann noch wesentlich vereinfacht werden, wenn die Kontaktfläche nur mit Carbon-Leitlack auf das Basismaterial gedruckt wird.

Bei der Layout-Gestaltung führt man den Leiter nur bis in die Nähe des Kontaktes in einen Bereich, der später noch mit Lötstopplack abgedeckt wird. Von hier aus wird der Leiter als Carbon-Leitlack-Druck weitergeführt und der Kontakt ebenfalls mit Carbon-Leitlack gedruckt.

Durch dieses Verfahren wird die Produktion vereinfacht und somit sicherer gemacht, da gegenüber dem Abdecken von Kupfer-Kontakten eine nicht so hohe Präzision im Siebdruck geleistet werden muss und die Anschlussflächen sicher unter einer Lötstopplackisolation liegen.

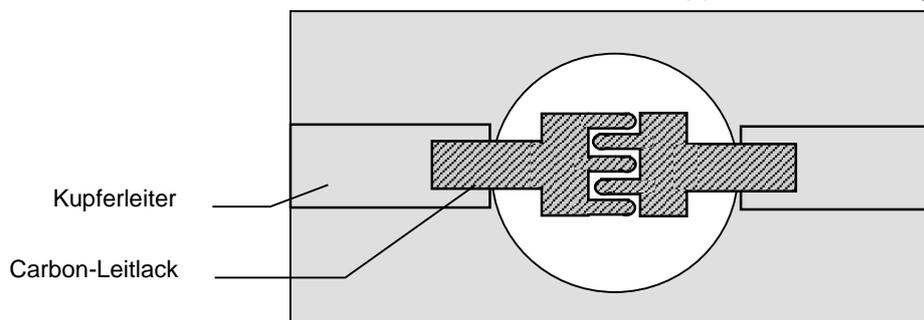


Bild 3: Tippkontakte ohne Metallunterlage

Carbon-Leitlacke als Bauelemente

Durch den Einsatz als Bauelemente können Carbon-Leitlacke erheblich zur Miniaturisierung der Leiterplatte beitragen.

Carbon-Leitlacke können als Widerstand auf Außen- und Innenlagen gedruckt werden. Weiterhin können sie die Aufgaben eines Potentiometers übernehmen oder sind bedingt als Abschirmung einsetzbar.

Weitere Vorteile sind:

- verbesserte Layoutgestaltung
- einseitige Bestückung, somit einmaliges Reflowlöten
- geringe Induktivitäten durch kurze Netzwerkverbindungen
- alle benötigten Widerstände werden gleichzeitig hergestellt.

Carbon-Leitlacke als Ätzwiderstand

Eine Alternative zu den vorher beschriebenen Verfahren ist die Verwendung von Carbon-Leitlack als Ätzwiderstand. Hierzu druckt man das gesamte Leiterbild inklusive Kontaktflächen mit Carbon-Leitlack auf kupferkaschiertes Basismaterial. Das nicht bedruckte Kupfer wird abgeätzt und die fertige Schaltung mit durch Carbon-Leitlack geschützten Leitern und Kontaktflächen liegt vor.

Neben der sorgfältigen Abstimmung der Ätzbäder auf den verwendeten Leitlack sind bei diesem Verfahren Patentrechte zu beachten.

Carbon-Leitlacke zur Herstellung kreuzender Leiter

Das technisch interessanteste Anwendungsgebiet von Carbon-Leitlack, das zugleich die größte Kosteneinsparung ermöglicht, ist das Herstellen von kreuzenden Leitern. Dies auch CCP (**C**rossover **C**onductive **P**aint) genannte Verfahren ermöglicht es, eine doppelseitige, durchkontaktierte Leiterplatte mit Goldkontakten durch eine einseitige Leiterplatte mit Carbonkontakten zu ersetzen. Eine solche Leiterplatte wird wie folgt aufgebaut:

Zuerst wird eine einseitige Kupferleiterplatte erstellt. Statt Bohrung und Durchkontaktierung wird an den Verknüpfungspunkten zur nächsten Ebene eine Kontaktierungsfläche vorgesehen. Jetzt wird die Leiterplatte bis auf die Tippkontakte und die Kontaktierungsflächen mit einem als Isolationslack (z. B. Lötstopplack) geeigneten Lack isoliert. Es ist darauf zu achten, dass der Isolationsdruck absolut porenfrei ist und die Flanken der Kupferleiter abgedeckt werden. Je nach Leiterkonfiguration und -abstand muss der Lötstopplack eventuell zweimal mit einer Zwischentrocknung gedruckt werden. Um eine sichere Flankenabdeckung zu erreichen, wird in der Regel für diese Technik 17,5 µm Basismaterial verwendet, da hierbei der Flankenschutz leichter zu erreichen ist.

Im nächsten Arbeitsgang wird der Carbon-Leitlack zwischen den entsprechenden Kontaktierungsflächen auf den Lötstopplack gedruckt. Gleichzeitig werden auch die Tippkontakte durch den Druck dargestellt. Nun folgt ein erneuter Isolationsdruck über die kreuzenden Carbonleiter und die Kontaktierungsflächen. Als letzten Arbeitsgang können die Tippkontakte mit einem abziehbaren Lötstopplack geschützt werden.

Konstruktionstechnisch ist zu beachten, dass der Leitwert von Carbon-Leitlack nicht so hoch ist wie der von Kupferleitern. Somit ist die Leiterlänge durch den entstehenden Widerstand begrenzt. Wie nachfolgend beschrieben wird, gibt es jedoch auch hier noch Möglichkeiten, deutlich längere Leiter herzustellen.

Carbon-Leitlacke als Migrationsschutz

Die zuvor beschriebenen kreuzenden Leiter können statt mit Carbon-Leitlack auch mit Silberleitlack hergestellt werden. Aufgrund des deutlich geringeren elektrischen Widerstands von Silberleitlacken können im Vergleich zum Carbon-Leitlack deutlich längere Leiter bei gleichem Gesamtwiderstand gedruckt werden. Beim Einsatz von Silberleitlack stellt sich jedoch das Problem der Silbermigration; d. h. bei angelegter Spannung und erhöhter Luftfeuchtigkeit kommt es zu einer Silberwanderung, die zu Kurzschlüssen führen kann. Dieses Problem ist jedoch durch folgendes Verfahren zu lösen:

Der Silberleitlack wird als kreuzender Leiter über den Isolationslack gedruckt. Im Gegensatz zum vorher beschriebenen Verfahren mit Carbon-Leitlack wird der Silberleiter nicht bis auf die Kontaktierungsfläche geführt, sondern der Leiter endet kurz vor der Kontaktierungsstelle. Jetzt druckt man einen breiteren Carbonleiter über den Silberleiter und über die Kontaktierungsfläche. Dadurch werden folgende Effekte erzielt:

- der kreuzende Leiter kann aufgrund des geringeren Widerstands des Silberleitlackes länger gewählt werden
- durch die komplette Abdeckung des Silberleiters durch Carbon-Leitlack kann es zu keiner Silbermigration kommen
- der höhere Widerstand des Carbon-Leitlackes muss konstruktiv nur für die Flächen zwischen Silberleitlack und Kontaktierungsfläche beachtet werden

Herstellung von Heizelementen mit Carbon-Leitlacken

Für Anwendungen, wie z. B. Spiegelbeheizung in der Kfz-Elektronik, ist es möglich, auf diesen Teilen eine Carbon-Leitlackfläche zu drucken, die sich bei Anlegen von Spannung erwärmt. Durch diese Technik ist beispielsweise eine kostengünstige Rückspiegel-Beheizung möglich. Bei der Auswahl der Carbon-Leitlacke ist allerdings darauf zu achten, dass sich der Widerstand mit fortschreitender Anzahl von Aufheizphasen nicht so verändert, dass keine Heizwirkung mehr eintritt. Hier sollten durch künstliche Alterung (Temperung bei vorgesehener Betriebstemperatur) Vorversuche durchgeführt werden.

Konstruktionshinweise für den Einsatz von Carbon-Leitlacken

Einsatz als Kontaktwerkstoff (Substitution von Gold)

Dieses Einsatzgebiet von Carbon-Leitlack kann als das problemloseste und einfachste angesehen werden. Die folgenden Hinweise dienen der Erhöhung der Prozesssicherheit.

Überdrucken von Kupfertippkontakten

Um eine Korrosion des Kupfers zu verhindern, muss die Kontaktfläche vollständig mit Carbon-Leitlack abgedeckt werden. Es sollte möglichst vermieden werden, die Kontaktstellen als Mäander auszubilden, da ein Überdrucken dieser Flächen zu hohe Anforderungen an die Präzision im Siebdruck stellen würde. Bewährt haben sich halbkreisförmige Tippkontaktstellen, die sicher überdruckbar sind. Der Carbon-Leitlackdruck sollte auf jeden Fall vor dem Lötstopplackdruck erfolgen, so dass die Übergangsstelle unbedrucktes Kupfer – mit Carbon-Leitlack überdrucktes Kupfer – unter dem Lötstopplack liegt.

Drucken von Schleifkontakten

Aufgrund des hohen Graphitgehaltes besitzen Carbon-Leitlacke gute Gleiteigenschaften. Trotzdem müssen einige Punkte beachtet werden, damit der Carbon-Leitlack die Forderung nach mehreren Millionen Schaltzyklen erfüllen kann:

- Das Material darf nicht abrasiv und der Schleifer nicht scharfkantig sein.
- Wird der Schleifer über Carbon-leitlackfreie Stellen geführt, kann es zu Beschädigungen an den Kanten des Carbon-Leitlackes kommen. Diese lassen sich vermeiden, wenn man zum Ausgleich des Höhenunterschiedes von Lötstopplack zum Carbon-Leitlack ein geeignetes Dielektrikum in die Zwischenräume drückt. Folgende Schemazeichnung zeigt die Umsetzung dieser Lösung:

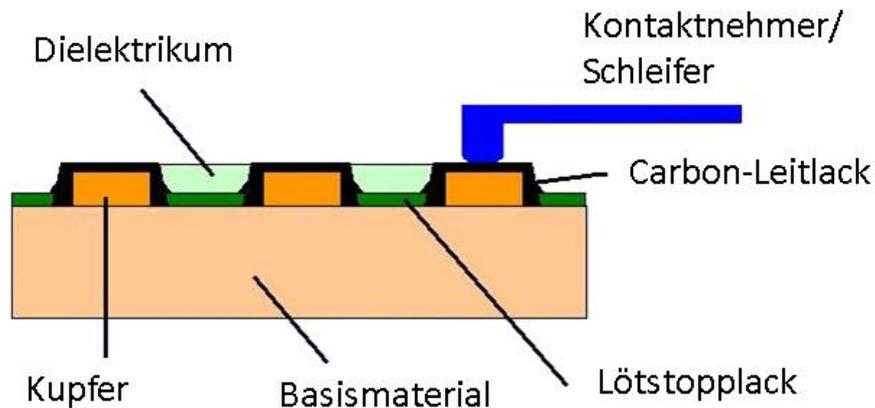


Bild 4: Drucken von Schleifkontakten mit Carbon-Leitlacken

Der Druckprozess des Carbon-Leitlacks ist soweit zu optimieren, dass eine Schichtdickentoleranz von $\pm 5 \mu\text{m}$ nicht überschritten wird.

Überdrucken von Steckerleisten

Beim Einsatz von Carbon-Leitlacken als Kontaktstoff für Steckerleisten ist zu beachten, dass nur beschränkte Steckzyklen realisierbar sind. In Abhängigkeit von den verwendeten Federkontakten sind aber im Allgemeinen ca. 20 Zyklen möglich.

Tippkontakte ohne Metallunterlage

Bei diesem Verfahren sind hauptsächlich zwei Punkte zu beachten:

- Die Übergangsstelle des Kupferleiters zum Carbonleiter muss sicher unter einer Lötstopplackisolation liegen.
- Die Carbonfläche muss den Kupferleiter deutlich überlappen, so dass auch bei evtl. eintretendem Druckversatz der Kupferleiter sicher kontaktiert wird. In der Praxis hat sich ein Überlappungsbereich von 1,5 mm bewährt.

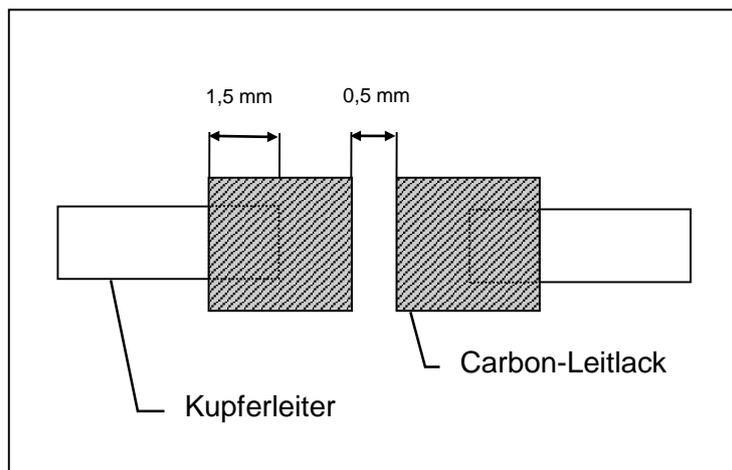


Bild 5: Tippkontakt ohne Metallunterlage

Kreuzende Leiter

Bei der Herstellung von kreuzenden Leitern ist besonders der Leitwert des Carbon-Leitlacks von Bedeutung. Der maximal zulässige Widerstand eines Leiters und der spezifische Widerstand des Carbon-Leitlacks entscheiden über die mögliche Leiterlänge. Wenn der Leitwert des Carbon-Leitlacks für die gewünschte Leiterlänge nicht ausreicht, kann man, wie schon zuvor beschrieben,

unter dem Carbon-Leitlack noch einen Silberleitlack drucken und somit den Gesamtwiderstand des Leiters minimieren bzw. einen längeren kreuzenden Leiter herstellen.

Die grundsätzlichen Überlegungen sind für beide Möglichkeiten gleich:

Zunächst muss der Widerstand für den Carbon-Leitlack spezifiziert werden. Es wurde eingangs schon erwähnt, dass mit Carbon-Leitlacken Widerstände von 14 Ohm/□ zu erzielen sind. Dieser Wert ist jedoch von der Schichtdicke und den Verarbeitungsparametern, wie z. B. der Trocknung, abhängig. Der genannte Widerstand bezieht sich auf eine Schichtdicke von ca. 25 µm. Da die Schichtdicke beim Überdrucken der isolierten Kupferleiter schwanken kann und Verarbeitungsparameter ebenfalls den Widerstand beeinflussen, sollte man bei der Konstruktion von einem Widerstand ausgehen, der höher als die erwähnten 14 Ohm/□ liegt.

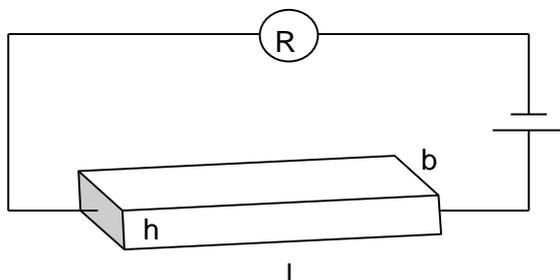
Gemessen wird der Widerstand üblicherweise über die Diagonale einer 1 cm² großen Fläche. Da zurzeit keine genormte Messmethode für die Widerstandsmessung von Leitlacken bekannt ist, sollte man die oben beschriebene Messmethode abwandeln und den Widerstand parallel an der 1 cm² großen Fläche messen.

Dadurch ergibt sich für die Konstruktion die Möglichkeit, durch Teilen der Fläche den Widerstand für die vorgesehene Leiterbreite und somit die Leiterlänge annähernd zu berechnen.

Die Messung von Widerständen mit quadratischen Grundflächen (Widerstand/Quadrat) – der Schichtwiderstand:

Der Widerstand ist definiert als:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$



ρ = spezifischer Widerstand [$\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}}$]

l = Länge des Widerstandes [cm]

R = Widerstand [Ω]

A = Durchgangsfläche [cm²]

b = Breite des Widerstandes [cm]

h = Höhe des Widerstandes [cm]

mit:

$$A = b \cdot h$$

somit gilt:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{b \cdot h}$$

Bei einer quadratischen Grundfläche des Widerstandes gilt:

$$b = l, \text{ das heißt, } \frac{l}{b} = 1.$$

Es ergibt sich:

$$R = \rho \cdot \frac{1}{h}$$

Bei quadratischen Grundflächen ist der Widerstand des Carbon-Leitlackes – bei gegebener Schichtdicke (i. d. R. ca. 25 µm) – eine Stoffkonstante.

Diese Größe wird Schichtwiderstand genannt und hat die Einheit Ω/\square oder $\Omega/\text{Quadrat}$ (Ω/square).

Bei einfachen nicht quadratischen Geometrien lässt sich der Schichtwiderstand dann über ein entsprechendes Vielfaches (z. B. 3-Quadrat etc.) ausdrücken und beschreiben.

Damit während der Produktion eine laufende Kontrolle des Leitlackdruckes möglich ist, sollte im Randbereich der Leiterplatte grundsätzlich eine Messstrecke vorgesehen werden. Hier sind im Layout entsprechende Maßnahmen zu treffen. Wie die Messstrecke konzipiert ist, ist im Prinzip nicht von Bedeutung, es muss nur für diese Messstrecke ein Sollwiderstand mit akzeptablen Toleranzen festgelegt werden. Durch diese Maßnahme ist es möglich, stichpunktartige Messungen des Leitwertes während der Produktion durchzuführen und sehr schnell korrigierend eingreifen zu können.

Da die Herstellung von kreuzenden Leitern mit Carbon-Leitlack hauptsächlich in der Großserienfertigung angewendet wird, sollte besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, die Leiterplatte von der Konstruktion her schon so zu konzipieren, dass eine sichere Produktion möglich ist. Um diese Sicherheit zu erreichen, hat ein namhafter Hersteller solcher Leiterplatten u. a. folgende hausinterne Konstruktionsrichtlinien erarbeitet:

Allgemeine Konstruktionshinweise für den Einsatz von Carbon-Leitlacken

- Carbonleiterbreite mindestens 1,0 mm
- Abstand der Leitlackleiter parallel zueinander: 0,5 mm
- Abstand der Leitlackleiter zu gestanzten Konturen: 1,0 mm, bei reinen Carbonleitern
- Abstand der Leitlackleiter zu gestanzten Konturen: 1,0 mm, wenn isolierte Kupferleiter mit Carbon-Leitlack überdruckt wurden
- Abstand zu perforierten Konturen: 1,6 mm, bei reinen Carbonleitern
- Abstand zu perforierten Konturen: 2,1 mm, wenn isolierte Kupferleiter mit Carbon-Leitlack überdruckt wurden
- Anbindung der Polymerpaste umlaufend > 0,3 mm

Wie schon im Kapitel „Carbon-Leitlacke als Migrationsschutz“ erwähnt, kann ein Carbon-Leitlack auch als Migrationsschutz von Silberleitlack eingesetzt werden. Bei diesem Anwendungsgebiet ist besonders darauf zu achten, dass die Silberleiter komplett mit Carbon-Leitlack abgedeckt werden. Bei der Konstruktion der Leiterplatte muss diesem Punkt besondere Beachtung geschenkt werden.

Die folgende schematische Darstellung zeigt den Aufbau einer solchen Schaltung:

- Isolationsabstand umlaufend > 0,3 mm
- auf geringe Höhenunterschiede achten (dünne Kupferstärken und Aufbauten)

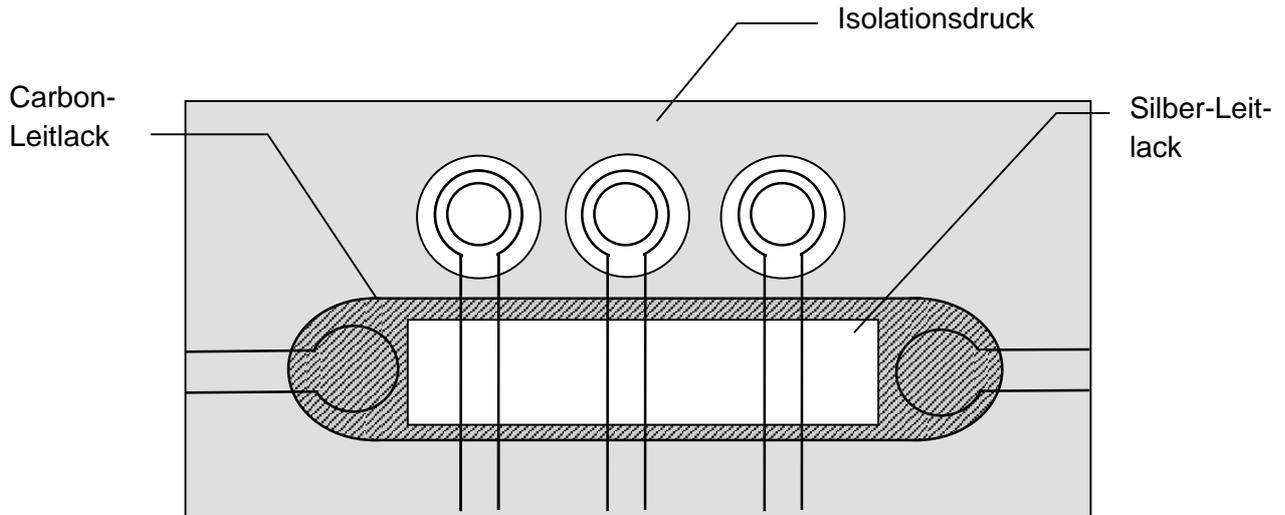


Bild 6: Überdrucken von gekreuzten Leitern

Einsatz von Carbon-Leitlacken als passive Bauelemente

Widerstandspasten sind im Bauelement von $14 \Omega/\square$ bis zu $1 \text{ M}\Omega/\square$ verfügbar. Die einzelnen Widerstände sind durch Abmischen von Carbon-Leitlacken mit speziellen Isolierlacken einstellbar.

Bei der Layoutgestaltung sollten folgende Konstruktionsmerkmale beachtet werden:

- Die Cu-Landeflächen sollten mindestens $500 \times 400 \mu\text{m}$ groß sein.
- Die Breite des Carbon-Leitlackes sollte mindestens $450 \mu\text{m}$ betragen, da sonst die Kantenunschärfe des Siebdruckes in die Toleranz eingeht.
- Der Abstand Cu-Pad – Cu-Pad sollte mindestens 1 mm betragen.

Zur Berechnung der Fläche finden Sie Angaben im Kapitel „Kreuzende Leiter“.

Einstellen von Widerständen durch Lasertrimmen

Werden sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Widerstände gestellt, kann durch Verkleinerung des Leiterquerschnittes der Widerstandswert nach oben korrigiert werden. Dieses geschieht durch das sogenannte Lasertrimmen.

Durch seitliches Einschneiden und Abtragen des bereits ausgehärteten Carbon-Leitlackes wird die Stromlaufbahn verengt und der Widerstandswert erhöht.

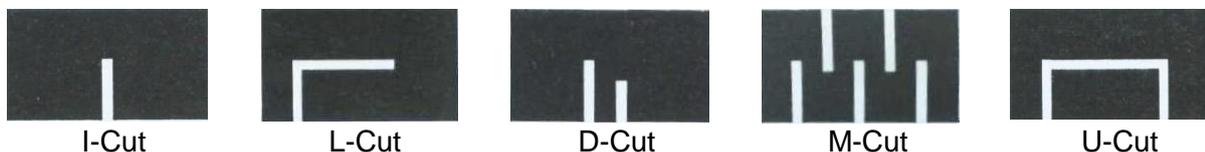


Bild 7: Beispiele für Lasertrimmschnitte

Es gibt verschiedene Trimmschnitte, die sich in der Trimmgenauigkeit, Abgleichdauer und in der Änderung des Stromrauschens unterscheiden, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Verarbeitung

Bei der Verarbeitung von Carbon-Leitlacken müssen einige Parameter besonders beachtet werden, damit die von der Konstruktion vorgegebenen Widerstände der Carbonflächen bzw. -Leiter erzielt werden.

Applikation von Carbon-Leitlacken im Siebdruckverfahren

Bei Carbon-Leitlacken handelt es sich in der Regel um hochthixotrope Lacksysteme. Um die erforderliche Verarbeitungsviskosität zu erzielen, sind diese Lacke vor der Applikation sorgfältig aufzurühren. Nach dem Aufrühren ist eine deutliche Viskositätsreduzierung festzustellen, die eine leichte Verdruckbarkeit sicherstellt. Bei Lagerung baut sich die Thixotropie dann wieder auf, weshalb es sich empfiehlt, die Lackgebilde nach längeren Arbeitspausen erneut aufzurühren.

Hinsichtlich der anzuwendenden Siebdruckparameter sind selbstverständlich die von den einzelnen Lackherstellern spezifischen Empfehlungen einzuhalten. Grundsätzlich hat sich jedoch gezeigt, dass mit Polyesterweben 43-80 bis 55-65 (43-55 T nach alter Nomenklatur) bzw. korrespondierenden Stahlgeweben mit einer Siebspannung von mindestens 18 N die meisten Anwendungen abgedeckt werden können. Bewährt haben sich im allgemeinen Rakel von 75 bis 90 Shore-A-Härte mit Winkelschliff, wobei unter einem Rakelwinkel von etwa 75 bis 80° gearbeitet werden sollte.

Schichtdicke von Carbon-Leitlacken

Die Leitfähigkeit eines Carbon-Leitlackes ist immer vom Gesamtquerschnitt des Leiters (Breite x Höhe) abhängig. Aus diesem Grunde wird in den technischen Merkblättern außer dem spezifischen Widerstand des Lackes auch die Schichtdicke angegeben, auf die sich dieser Wert bezieht. In der Regel bezieht sich der spezifische Widerstand auf eine Lackfilmschichtdicke von 25–30 µm. In der Praxis muss nun oft ein Kompromiss zwischen Lackfilmschichtdicke und gewünschter Konturenschärfe gefunden werden, denn je feiner das Siebgewebe gewählt wird, desto besser sind die Konturenschärfe und die Ausbildung von Details; die Lackfilmschichtdicke nimmt jedoch ab.

Auf welche Kompromisslösung man sich einigt, muss von Anwendungsfall zu Anwendungsfall entschieden werden. Grundsätzlich sollte jedoch immer so grobmaschig wie möglich gedruckt werden, denn je dicker der Lackfilm, umso geringer der Widerstand und umso geschlossener und dichter ist der Film.

Verdünnen von Carbon-Leitlacken

Außer von den Siebweben hängt der Leitwert eines Carbon-Leitlackes auch von dessen Festkörpergehalt ab. Der Festkörpergehalt gibt an, wieviel Gewichtsprozent des Lackes nach dem Trocknen auf der Leiterplatte verbleiben. Dieser Wert ist ausschlaggebend für die spezifischen Eigenschaften des Carbon-Leitlackes, da sich der angegebene Leitwert im Merkblatt auf den getrockneten Lackfilm bezieht.

Der Festkörpergehalt des Lackes kann jedoch vom Anwender durch Zugabe von Verdünnung verändert werden. Je mehr Verdünnung zugegeben wird, desto geringer werden der Festkörpergehalt und somit auch die Schichtdicke des getrockneten Lackes. Dadurch erhöht sich der Widerstand. Es gibt zwei Gründe, um in der Produktion den Lack zu verdünnen:

- Wenn von einem gröberen auf ein feineres Siebgewebe gewechselt wird, muss in der Regel der Lack etwas verdünnt werden, um ein gleich gutes Ausdrucken von Details zu ermöglichen. In diesem Fall ist zu bedenken, dass nicht nur durch das feinere Gewebe, sondern auch durch die Zugabe von Verdünnung eine dünnere Lackschicht und somit ein höherer Widerstand erzielt wird. Es muss also auf jeden Fall der Sollwiderstand mit dem erzielten Widerstand verglichen werden.

- Vielfach muss ein Siebdrucklack im Laufe des Produktionsprozesses verdünnt werden, da durch das Verdunsten von Lösemitteln auf dem Sieb die Viskosität angestiegen ist. Dieses Verdünnen ist normalerweise unproblematisch, da ja nur die verdunstete Menge Lösemittel wieder hinzugegeben wird. Auf keinen Fall sollte die Verdünnung „nach Gefühl“ nachdosiert werden, sondern die Verdünnung sollte unter Kontrolle mit einem Viskositätsmessgerät bis zum Erreichen eines definierten Sollwertes zugegeben werden.

Widerstandsänderung durch Abmischen mit Isolierpaste

Um höhere Widerstandswerte zu erzielen, können einige Carbon-Leitlacke mit abgestimmten Isolierpasten eingestellt werden. Solche Abmischungen sind in jedem Verhältnis möglich, so dass durch entsprechende Zugabemenge die gewünschte Widerstandserhöhung eingestellt werden kann.

Das nachstehend abgebildete Diagramm gibt die Änderung der Widerstandswerte durch Abmischen von Carbon-Leitlack mit Isolierpaste beispielhaft wieder:

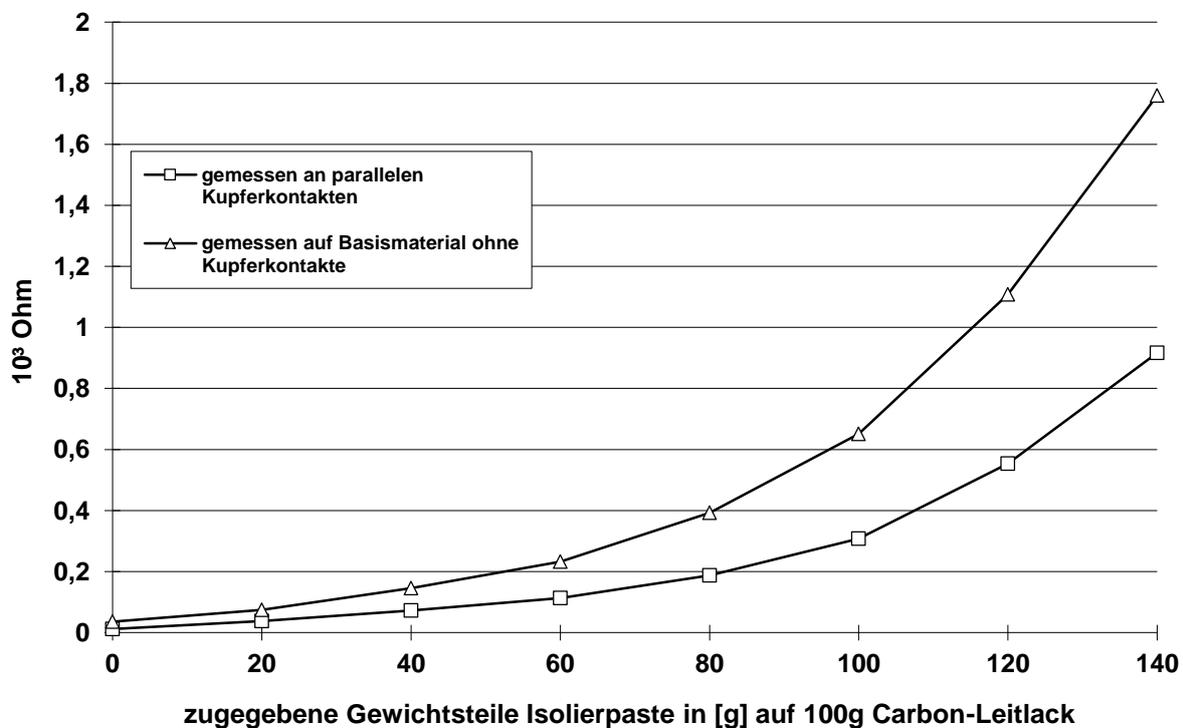


Bild 8: Änderung des Widerstandswertes eines Carbon-Leitlacks durch Abmischen mit Isolierpaste

Trocknen von Carbon-Leitlacken

Die meisten Carbon-Leitlacke werden thermisch getrocknet. Da die angegebenen Widerstände auf einen vollständig ausgehärteten Lackfilm bezogen sind, müssen die Trocknungsbedingungen sowohl von der Temperatur als auch von der Trocknungszeit unbedingt eingehalten werden.

Trocknung im Trockenofen

In vielen Leiterplattenfertigungen werden die Leiterplatten zuerst in Hordenwagen abgelegt und dann gemeinsam eingebrannt. Bei dieser Vorgehensweise ist zu beachten, dass die Temperatur des Trockenofens zunächst stark sinkt und zusätzlich die eingebrachte kalte Masse aufgeheizt werden muss. Da sich die Einbrennzeit auf die Einbrenntemperatur bezieht, muss die Aufheizdauer des Ofens hinzugerechnet werden. Man kann erfahrungsgemäß davon ausgehen, dass der Einbrennofen ca. 10 Minuten nach Einbringen des kalten Hordenwagens die Solltemperatur wieder erreicht hat.

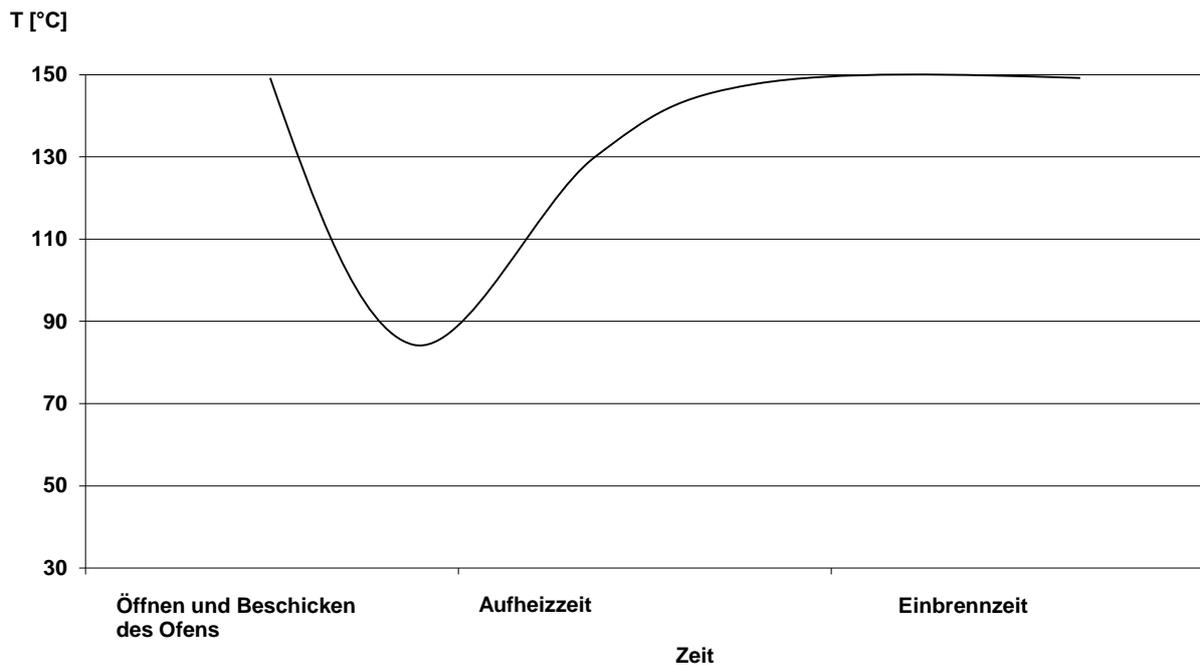


Bild 9: Temperaturverlauf im Trockenofen nach Beschickung

IR-Trocknung

Spezielle Lösemittelkombinationen in einigen Carbon-Leitlacken ermöglichen eine Härtung durch Infrarotstrahlung. Vorteile im Vergleich zum Umluftofen sind die deutlich schnellere Härtung und die damit erzielten verkürzten Prozesszeiten sowie eine erhöhte Prozesssicherheit gegenüber einem Batchprozess. Insbesondere die Abhängigkeit des resultierenden Widerstandes von der Aushärtetemperatur führt aufgrund unterschiedlicher Temperaturen im Ofen zu schwankenden Werten.

Die Prozesssicherheit bei der IR-Trocknung liegt bei $< 2 \Omega/\square$ resultierender Widerstand.

Das Härtungsergebnis ist stark von der eingesetzten IR-Trockenstrecke bzw. deren Strahler abhängig. Daher sollte in Vorversuchen das optimale Temperaturprofil der Anlage ermittelt werden.

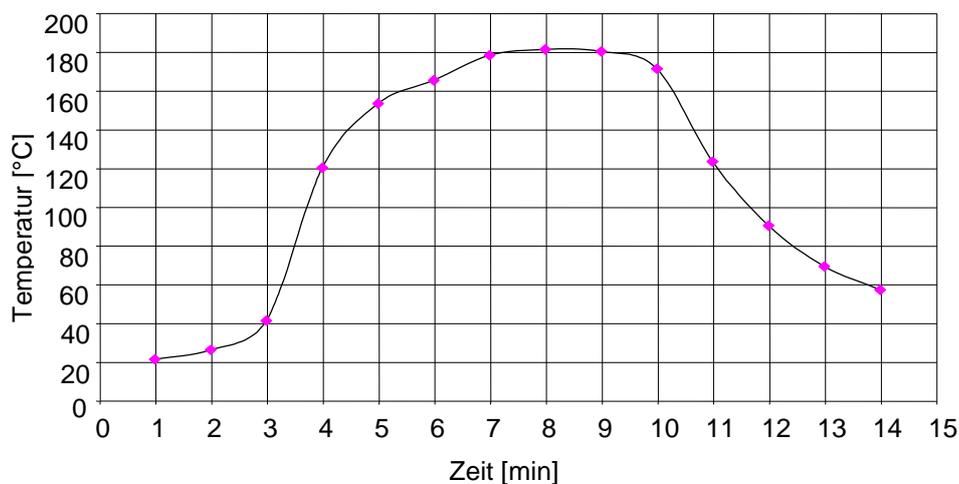


Bild 10: Beispielhaftes IR-Temperaturprofil für einen Carbon-Leitlack

Außerdem ist bei der Aushärtung von Carbon-Leitlacken zu beachten, dass diese nicht gemeinsam mit 2-Komponenten-Epoxidharzlacken (Lötstopplacken) in einem Ofen getrocknet werden. Bei dem Aushärteprozess können aus den Epoxidharzlacken Spaltprodukte austreten, die eine Aushärtung des Carbon-Leitlackes verzögern bzw. eine Widerstandsveränderung bewirken.

Überdrucken von Carbon-Leitlacken

Die meisten Carbon-Leitlacke weisen neben guten mechanischen Eigenschaften auch sehr gute chemische Beständigkeit auf. Diese gute chemische Beständigkeit ist jedoch bei der Überlegung, ob die Carbon-Leitlackflächen bzw. Leiter noch mit einer zusätzlichen Lackschicht geschützt werden sollen, nicht allein ausschlaggebend. Selbst wenn die Chemikalien den Leitlackfilm nicht angreifen oder zerstören, können jedoch Stoffe in den Leitlack eindiffundieren und den Widerstand erhöhen.

Aus diesem Grunde sollte geprüft werden, ob die Carbon-Leitlacke mit einem Lötstopplack vor Umwelteinflüssen oder ggf. mit einem abziehbaren Lötstopplack vor den Flussmitteln beim Lötprozess geschützt werden müssen.

Diese als „Schutzlacke“ eingesetzten abziehbaren Lötstopplacke müssen jedoch auch besonders für den Einsatz auf Carbon-Leitlacken geeignet sein, damit nicht durch eine Wechselwirkung zwischen Schutzlack und Carbon-Leitlack eine Widerstandserhöhung stattfindet.

Als Lötstopplacke eignen sich besonders spezielle UV- oder UV-sensible 2-Komponenten-Lacke. Als abziehbare Lötstopplacke können nur speziell für diesen Anwendungsfall entwickelte Lacke eingesetzt werden.

Kostenvergleich

Der Einsatz von Carbon-Leitlacken zur Herstellung von Tippkontakten und kreuzenden Leitern vereinfacht die Produktion von Leiterplatten, da hierdurch sonst notwendige Nassprozesse (Galvanik) eingespart werden. Darüber hinaus ist eine höhere Automatisierung der Produktion möglich. Aus diesen Gründen ergeben sich insgesamt erhebliche Kosteneinsparungen.

Eine Kostenrechnung ist natürlich von Produktionsbetrieb zu Produktionsbetrieb unterschiedlich. Der hier genannte Kostenvergleich basiert auf der Fertigungskostenkalkulation eines großen deutschen Leiterplattenherstellers. Eine einfache Leiterplatte in „print and etch-Technologie“ mit Lötstopplackdruck wird als Faktor 1 gesetzt. Durch eine zusätzliche selektive Vergoldung erhöhen sich die Kosten beispielsweise auf den Faktor 2,6.

Beispiel 1:

Leiterplatte mit selektiver Vergoldung:	ca. Faktor 2,6
Leiterplatte mit Carbontippkontakten:	ca. Faktor 1,2

Einsparung	ca. 54 %
------------	----------

Beispiel 2:

Doppelseitige, durchkontaktierte Leiterplatte mit selektiver Vergoldung:	ca. Faktor 3,2
Einseitige Leiterplatte mit kreuzenden Leitern und Carbontippkontakten:	ca. Faktor 1,4

Einsparung	ca. 56 %
------------	----------

Es zeigt sich anhand dieses Kostenvergleiches, dass die Herstellkosten durch den Einsatz von Carbon-Leitlacken um mehr als die Hälfte reduziert werden können.

Schlussbetrachtung

Der Einsatz von Carbon-Leitlacken für die beschriebenen Anwendungsgebiete hat sich in den letzten Jahrzehnten in der Leiterplattenindustrie mehr und mehr durchgesetzt bzw. wird für einzelne neuere Anwendungen stark steigen. Bei der Verwendung von Carbon-Leitlacken sind die beschriebenen Punkte bei der Layout-Gestaltung und der Produktion zu beachten. Werden diese Empfehlungen verwertet, ist ein problemloser Einsatz von Carbon-Leitlacken möglich und damit eine hohe Kosteneinsparung zu realisieren.

Literatur

- /1/ Werner Jillek, Gustl Keller: Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 4 unter Mitarbeit von 31 Mitautoren, u. a. von Werner Peters, Rüdiger Dietrich, Michael Müller und Dr. Manfred Suppa (sämtlich Mitarbeiter unseres Hauses), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003, ISBN 3-87480-184-5
- /2/ Karl-Heinz Näser: Physikalische Chemie, 18. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- /3/ VDE 0111: (DIN 57.111) Isolationskoordination für Betriebsmittel
- /4/ EPP 2/97 Boards in Carbontechnik, Hubert Beck, Metalex
- /5/ SMT 8/96 Entwicklungstrends bei modernen Leiterplatten, Heinz Bleiweiß, Siemens AG, Karlsruhe
- /6/ Horst Ferch: Pigmentruße, aus der Reihe „Die Technologie des Beschichtens“, Vincentz Verlag, Hannover, 1995, ISBN 3-87870-426-2
- /7/ Lackwerke Peters GmbH & Co. KG: Technische Merkblätter zu Carbon-Leitlacken

Lackwerke Peters GmbH & Co. KG
Hooghe Weg 13, 47906 Kempen, Deutschland

Internet: www.peters.de
E-Mail: peters@peters.de

Telefon +49 2152 2009-0
Telefax +49 2152 2009-70

peters
Coating Innovations
for Electronics