

1. Motivation und Zielsetzung

Durchkontaktierungen in mehrlagigen Leiterplatten, die im Automotive Bereich zum Einsatz kommen, werden im Feldeinsatz hohen thermischen Wechselbelastungen ausgesetzt. Diese führen aufgrund des unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Epoxidharz-Basismaterial in Dickenrichtung und der Kupferschicht in der Durchkontaktierung zu thermomechanischen Spannungen. Die Spannungen resultieren in Dehnungen, die zur Materialermüdung der abgeschiedenen Kupferschicht und damit zum elektrischen Ausfall der elektronischen Komponente führen können (Bild 1). Aufgrund der bislang nicht ausreichend genauen Vorhersagbarkeit der Lebensdauer von Durchkontaktierungen unter Temperaturbelastung sind erhöhte Sicherheitszuschläge notwendig, um einen zuverlässigen Betrieb der Fahrzeugkomponenten über die gesamte Fahrzeuglebensdauer von bis zu 15 Jahren zu gewährleisten. Dies führt unter anderem zum Einsatz hochgefüllter Basismaterialien, die preislich deutlich über den niedrig-, bzw. ungefüllten Systemen liegen. Einerseits sind stetig steigende Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit zu beobachten, die zunehmend eine Reduzierung dieser Sicherheitszuschläge fordern. Andererseits führen Entwicklungen wie die Hybridisierung und Elektromobilität aufgrund drastisch zunehmender Ströme und Spannungen zu immer höheren Beanspruchungen. Die Grenzen der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit rücken damit immer näher zusammen. Eine zuverlässige Beherrschung der grenzwertigen Auslegung verlangt ein besseres Verständnis des Ermüdungsverhaltens und daraus resultierend die Entwicklung verbesserter Lebensdauermodelle.

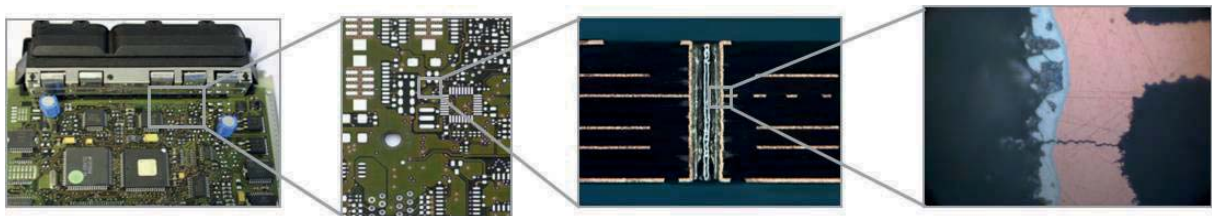


Bild 1: Ausfallursache für Motorsteuergerät: Riss in der Durchkontaktierung.

Das erste Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung optimierter Werkstoffmodelle. Hierbei spielt die Kenntnis der Werkstoffeigenschaften der elektrolytisch abgeschiedenen Kupferschicht in der Durchkontaktierung eine entscheidende Rolle. Die Werkstoffdaten der folienartigen Kupferschicht hängen direkt mit der Gefügestruktur zusammen und sind damit beeinflussbar durch diverse Parameter, wie Abscheideparameter oder der Kupferbad-



zusammensetzung. Nach bisherigem Stand der Technik ist es noch nicht gelungen lebensdauerrelevante Werkstoffdaten von Kupferschichten in Durchkontaktierungen zu generieren.

Für die Berechnung der lokalen Beanspruchung bietet sich die FE-Methode an, da sie die Berücksichtigung inelastischer Werkstoffmodelle ermöglicht. An die numerische Analyse sollen zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung die Anforderungen gestellt werden, dass die definierte lokale Schädigungsgröße eine gute Korrelation zu den Ausfalldaten zeigt und in der Lage ist den Schädigungsort treffsicher vorherzusagen.

Zur Ableitung der Lebensdauermodelle sind Ermüdungsversuche an Durchkontaktierungen durchzuführen. Bei der Entwicklung des Testverfahrens sind zwei Kriterien entscheidend. Zum einen muss das Verfahren eine Korrelation von Risswachstum zur gemessenen Messgröße aufweisen. Zum anderen ist ein geeignetes Ausfallkriterium festzulegen.

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen und den entwickelten Werkstoffmodellen sind Berechnungskonzepte zur Vorhersage der Lebensdauer von Durchkontaktierungen zu entwickeln. Die Modelle sind an Experimenten zu validieren, bei denen die wesentlichen Geometrie-, Werkstoff- und Prozessparameter wie die Kupferdicke, der thermische Ausdehnungskoeffizient des Basismaterials oder die Bohrlochrauheit [1] variiert wurden.

2. Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Leiterplattenaufbau und Herstellung

Der Weg für die Leiterplatte als Verdrahtungsträger für elektronische Komponenten ist seit ihrer Erfindung in den 40er Jahren von der funktionell relativ anspruchslosen Einlagen- bis zu heute funktionell hoch spezifizierten Mehrlagen-Leiterplatten (ML, engl. Multilayer) gekennzeichnet [2]. Während die ersten Leiterplatten aus kupferkaschiertem Phenolharz-Hartpapier hergestellt wurden, werden sie heute als komplexe Verbundwerkstoffe aufgebaut, die den steigenden Anforderungen nach technischer Leistungsfähigkeit und Betriebszuverlässigkeit genügen müssen. Die Phenolharz-Hartpapier Leiterplatten werden noch für billige Massenprodukte verwendet.

2.1.1 Aufbau Basismaterial FR4

Die als Lamine aufgebauten Leiterplatten bestehen im Wesentlichen aus drei Materialklassen: Bindemittel (Harze), Trägermaterial und Metallfolien. Bei dem am häufigsten eingesetzten Basismaterial FR4 („Flame Retardant class 4“ Bezeichnung nach NEMA-Norm), wird Glasgewebe (E-Glas) als Trägermaterial und Epoxidharz als Bindemittel verwendet. Das Epoxidharz wird durch Zugabe von Härtern polymerisiert und vernetzt dabei duroplastisch. Als Metallfolien kommen elektrolytisch abgeschiedene Kupferfolien mit einem Reinheitsgrad von über 99,97 % zum Einsatz. Imprägniertes Glasgewebe ohne Kupferfolie mit Harz im B-Zustand¹ wird als Prepreg bezeichnet. Hinzu kommen weitere anorganische oder organische Additive wie Flammhämmer zur Vermeidung der Brennbarkeit² und Füllstoffe zur Reduktion des thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Leiterplattendickenrichtung. Je nach Füllgrad wird zwischen niedrig-, mittel- und hochgefüllten Basismaterialien unterschieden. Die thermomechanischen Materialeigenschaften des Basismaterials werden hauptsächlich bestimmt von [2, 3, 4]:

¹ Harz ist nicht vollständig ausgehärtet

² Brennbarkeitsstufe V-0, d.h. selbstlöschend

- den Eigenschaften des Epoxidharzes (*Einfluss auf T_g , E-Modul und $\alpha(T)$ in Leiterplattendickenrichtung*)
- den Eigenschaften des Glasfasergewebes (*Einfluss auf E-Modul und $\alpha(T)$ in Längs- und Querrichtung*)
- dem Harz- und Füllstoffgehalt (*Einfluss auf E-Modul und $\alpha(T)$ in Leiterplattendickenrichtung*)
- der Orientierung des Glasfasergewebes (*verantwortlich für orthotropes³ Materialverhalten*)

2.1.2 Herstellprozess einer Leiterplatte

Im folgenden Abschnitt werden die zwei gängigen Leiterplatten-Herstellprozesse, das Pattern-Plating und das Panel-Plating, in kurzer Form beschrieben. Beide Verfahren gehören zu der sogenannten Subtraktivtechnik, bei der das Leiterbild durch Ätzverfahren auf kupferkaschiertem Basismaterial aufgebracht wird. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf Fachliteratur [2] [3] [4] [5] verwiesen.

Pattern-Plating-Verfahren

In Bild 2 ist die Prozessabfolge für die Herstellung einer zweilagigen Leiterplatte nach dem Pattern-Plating-Verfahren schematisch dargestellt. Das Verfahren ermöglicht dank der Tenting-Technik die simultane Herstellung von nicht durchmetallisierten Löchern auf durchkontaktierten Leiterplatten. Zunächst wird das Lochbild gebohrt und auf die kupferfreien Bereiche, wie die Bohrwandungen, wird eine leitfähige Schicht (z. B. Polymerschicht) oder Paladiumkeime zur Aktivierung aufgebracht. Im zweiten Fall wird die Leitschicht durch Aufbringen einer außenstromlosen Cu-Schicht (ca. 3-5 μm) realisiert (siehe 2.1.3). Anschließend wird das Leiterbild mittels eines Fotoresists in einem fotolithographischen Prozess übertragen. Auf den vom Fotoresist freigesparten Kupferflächen wird eine ca. 30 μm dicke Kupferschicht galvanisch abgeschieden. Dieses Verfahren wird als Tenting-Technik bezeichnet. Der Schichtabscheidungsprozess hat entscheidende Auswirkungen auf die thermomechanischen Eigenschaften der Kupferschicht in der Durchkontaktierung und wird daher in

³ Richtungsabhängig (Spezialfall der Anisotropie)

Abschnitt 2.1.3 gesondert beschrieben. Für den darauffolgenden Ätzprozess wird die Kupferschicht mit einer ebenfalls galvanisch abgeschiedenen dünnen Zinnschicht (ca. 4 µm) geschützt. Nach dem Entfernen des Galvanoresists werden die freiliegenden Kupferflächen weggeätzt und die Lötstopmmaske fototechnisch aufgebracht. Um eine Oxidation des Kupfers zu verhindern wird im letzten Schritt eine Oberflächenpassivierung, beispielsweise in Form einer Heißverzinnung, durchgeführt [6].

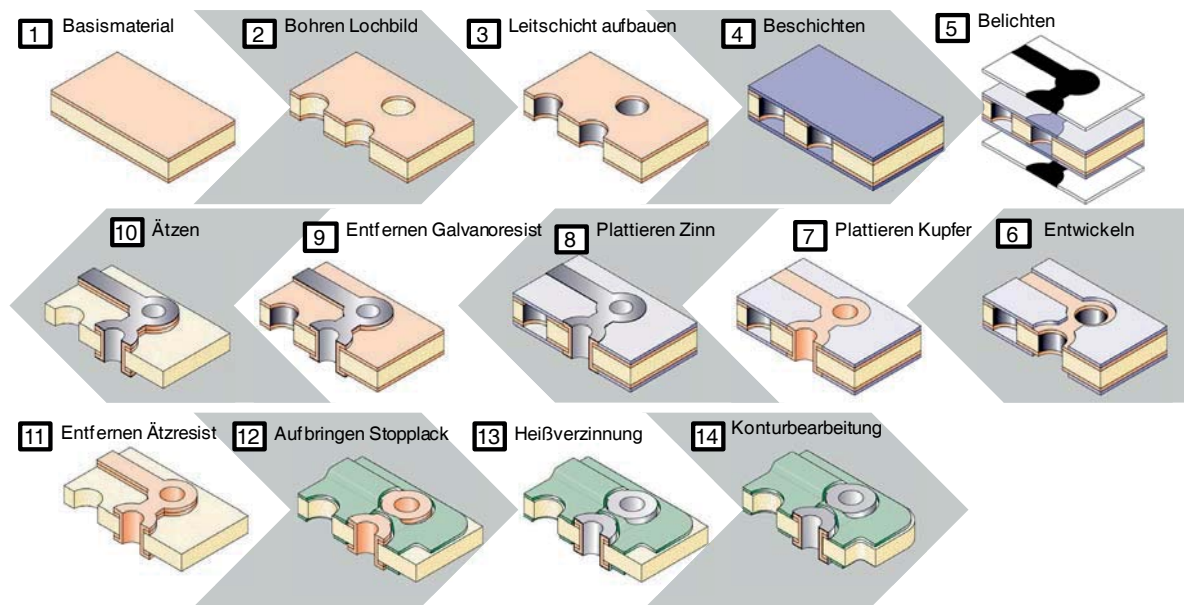


Bild 2: Herstellprozess einer Leiterplatte im Pattern-Plating-Verfahren [6].

Panel-Plating-Verfahren

Bei der Panel-Plating-Technik (Flächengalvanisierung) erfolgt die galvanische Kupferabscheidung nach dem Bohren und Aufbringen der Leitschicht auf der gesamten Nutzenoberfläche. Erst danach wird das Leiterbild mit Hilfe des Galvanoresists erstellt. Die weitere Verarbeitung erfolgt analog zu den Prozessschritten 11 bis 14 aus Bild 2 des Pattern-Plating-Verfahrens. Der große Vorteil des Verfahrens ist die relativ gleichmäßige Kupferabscheidung auf der gesamten Nutzenoberfläche.

Multilayeraufbau

Multilayer sind Leiterplatten mit mehr als zwei Kupferlagen. Die nach Pattern-Plating bzw. Panel-Plating vorgefertigten Innenlagen werden genau zueinander ausgerichtet und mit Prepregs und Kupferfolien für die Außenlagen unter Druck und Wärmezufuhr verpresst (Bild



3). Dabei findet eine Polymerisation der Prepregs statt. Für einen interlaminaren Haftverbund ist eine Vorbehandlung der Kupferoberflächen notwendig. Hierfür wird die Oberflächenstruktur des Kupfers mit Hilfe stark oxidierender Chemikalien aufgeraut (Braunätzen [7]). Für das Erstellen des Leiterbilds auf den Außenlagen und der Durchkontaktierungen kommt hauptsächlich die Pattern-Plating-Technik zum Einsatz.

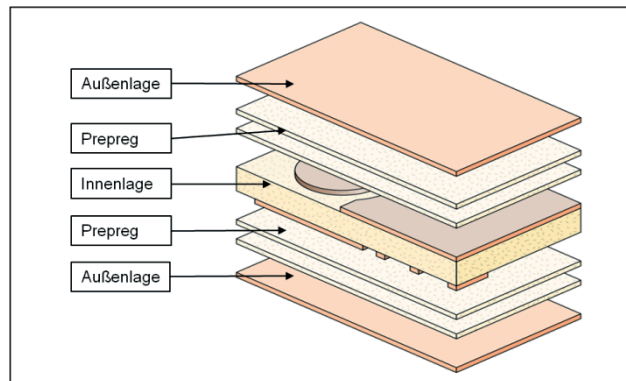


Bild 3: Aufbau eines Multilayers [6].

Neben der höheren Packungsdichte und der Reduktion des Gewichts sowie der Abmessungen bietet die Multilayertechnologie weitere Vorteile wie flexiblere Leiterführungen und erweiterte elektrische Eigenschaften [8] [6].

2.1.3 Grundlagen der Galvanotechnik in der Leiterplattenfertigung

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel angedeutet, hat der Schichtabscheidungsprozess signifikante Auswirkungen auf die Materialeigenschaften der Kupferschicht in der Durchkontaktierung. In diesem Abschnitt soll daher eine Einführung über die verschiedenen Abscheidungsverfahren und die Zusammensetzung der Galvanikbäder gegeben werden.

Außenstromlos-chemische Metallabscheidung

Das besondere Merkmal der außenstromlos-chemischen Metallabscheidung ist, dass die Elektronen, die zur Entladung der Cu-Ionen benötigt werden, nicht durch eine äußere Spannungsquelle geliefert werden. Das Verfahren wird daher auch als „außenstromlose Metallabscheidung“ bezeichnet. Es gibt drei Verfahren der außenstromlosen Metallabscheidung: die Tauchabscheidung, die Kontaktabscheidung und die Reduktionsabscheidung. Wobei im Folgenden nur auf das Reduktionsverfahren eingegangen werden soll, da dieses Verfahren für die Abscheidung der Kupferschicht in der Durchkontaktierung der Leiterplatte verwendet wird.

Damit eine Abscheidung auf dem nicht leitenden Epoxidharzbasismaterial erfolgen kann, muss die Oberfläche vorher aktiviert werden. Dies geschieht beispielsweise durch eine Vorbehandlung mit einer $\text{SnCl}_2/\text{PdCl}_2$ -Lösung. Dadurch bilden sich auf der nicht leitenden Oberfläche der Bohrung Paladiumkeime, die bei der Abscheidung der Kupferschicht als Kristallisationszentren bzw. Katalysator agieren.

Die Vorgänge bei der Reduktionsabscheidung können, wie in (2.1) dargestellt, formal durch eine Redoxreaktion beschrieben werden. Das Reduktionsmittel R^{n+} wird durch die Abgabe von z Elektronen zu $R^{(n+z)+}$ oxidiert. Die dabei freiwerdenden Elektronen (e^-) reduzieren die Kationen Me^{z+} des abzuscheidenden Metalls zu elektrisch neutralen Metallatomen Me , welche sich wiederum als metallische Schicht auf der Substratoberfläche niederschlagen, wobei der Elektronenaustausch durch den Katalysator initiiert wird.



Elektrochemische Metallabscheidung

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben wurden mit der elektrochemischen Metallabscheidung hergestellt. Daher soll an dieser Stelle das Verfahren anhand der Kupferabscheidung erläutert werden.

Der wesentliche Unterschied zur chemischen Metallabscheidung ist die Art der zur Metallabscheidung notwendigen Elektronenzufuhr. Diese erfolgt nicht, wie beim erstgenannten Verfahren, von einem Reduktionsmittel, sondern über eine externe Spannungsquelle (galvanische Metallabscheidung). Je nach Art der Stromquelle wird zwischen Gleichstrom- und Pulsstrom-Verfahren unterschieden.

Gleichstromverfahren (DC)

Liegt zwischen den beiden Elektroden eine elektrische Verbindung über eine äußere Spannungsquelle vor, spricht man von einer Gleichstrom-Elektrolyse. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den beiden Elektroden entsteht ein Elektronenfluss, der über äußere Verbindungen über eine äußere Stromquelle von der Anode zur Kathode fließt. Dabei geht die Anode in Lösung und die entstandenen Kationen wandern zur Kathode. Umgekehrt



wandern die in der Elektrolytlösung vorhandenen Anionen in Richtung der Anode. Bei der Kupferabscheidung wird als Anodenmaterial typischerweise Kupfer (lösliche Anode) verwendet. Dies liegt meist in Form von Kugeln vor, welche in Drahtkörben in das Elektrolysebad eingetaucht werden. Die Kupferkugeln liefern die Kupfermenge, die aus dem Elektrolyten auf das Substrat abgeschieden wird, in gleichem Maße nach. Das Ergebnis der abgeschiedenen Kupferschicht wird maßgeblich durch die Qualität und den Reinheitsgrad der löslichen Anode bestimmt. Weitere Einflussgrößen sind pH-Wert, Elektrolyttemperatur, Stromdichte und Zusammensetzung des Elektrolyten. Besteht die Anode aus einem im Elektrolyten unlöslichen Material (z.B. Pt), ist eine kontinuierliche Zugabe neuer Kupfersalze zu gewährleisten [3] [9] [10].

Ein Nachteil der Gleichstromelektrolyse ist die Abhängigkeit der örtlichen Schichtdicke von der Stromlinienverteilung zwischen Kathode und Anode. Der Verlauf der Stromlinien wird durch Anordnung der beiden Elektroden und geometrischen Faktoren wie Form und Größe bestimmt. Bei der Durchkontaktierung ist die Stromliniendichte an den Ecken größer als in der Mitte, was zu dem sogenannten Dogbone-Effekt führen kann (siehe Bild 4). Gegenmaßnahmen hierzu sind der Einsatz von Hilfsanoden oder die Zugabe von Badzusätzen.

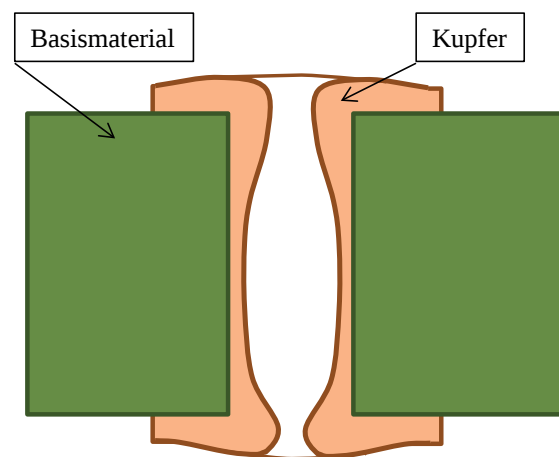


Bild 4: Die hohe Stromdichte an den Ecken kann beim DC-Verfahren zu einer ungleichmäßigen Kupferschichtdicke in der Durchkontaktierung führen (Dogbone-Effekt).

Pulsstromverfahren

Bei dem Pulsstromverfahren, auch als Pulse-Plating bezeichnet, wird ein sich zeitlich ändernder Gleichstrom angelegt. Sehr häufig wird ein rechteckförmiger Pulsstrom als Strom-Zeit-

Funktion verwendet (siehe Bild 5). Dabei wird zwischen unipolaren und bipolaren Strompulsen unterschieden. Erstere bestehen aus einfachen oder einem Gleichstrom überlagerten Rechteckpulsen, die rein kathodisch geschaltet werden. Bipolare Strompulse dagegen werden sowohl kathodisch als auch anodisch geschaltet. Während in der kathodischen Schaltphase ein Schichtaufbau stattfindet, bewirkt der anodische Strompuls eine teilweise Auflösung der Schicht. Im Fall der Durchkontaktierung wird so ein temporäres Rücklösen des Kupfers an den Bohrlochkanten ermöglicht, was im Allgemeinen zu gleichmäßigeren Schichtdicken in den Durchkontaktierungen führt. Zu den im vorhergehenden Abschnitt genannten Einflussgrößen kommen die Strompulsparameter wie kathodische und anodische Stromdichte und die Pulszeiten hinzu.

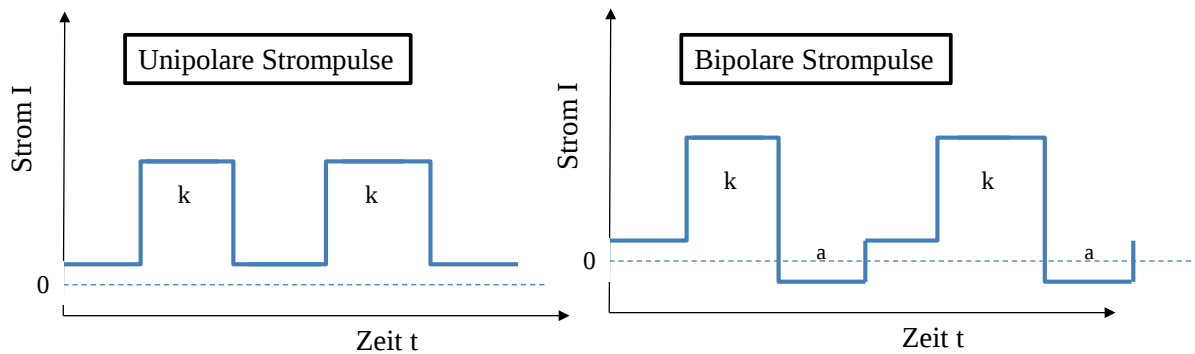


Bild 5: Stromverlauf beim Pulse-Plating: Unipolare Strompulse (links) und Bipolare Strompulse (rechts).

Schwefelsaure Kupferelektrolyte

Für die galvanische Kupferabscheidung in der Leiterplattenherstellung werden schwefelsaure Kupferelektrolyte mit den folgenden Hauptbestandteilen verwendet:

- Kupfer(II)-Sulfat-Pentahydrat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Schwefelsäure
- Chlorid

Hierbei dient das Kupfersulfat als Lieferant der Kupfer(II)-Ionen. Die Schwefelsäure dient zur Steuerung der Kristallbildung und ermöglicht die Abscheidung feinkristalliner, duktiler und kompakter Schichten. Üblicherweise werden noch weitere Elektrolytzusätze zugegeben wie beispielsweise Glanzbildner, für deren optimale Arbeitsweise das zugegebene Chlorid ver-



antwortlich ist. Die Abscheidetemperaturen der Kupfersulfatelektrolyte liegt bei 20°C - 45°C [9].

Elektrolyteigenschaften und Elektrolytzusätze

Neben Zusätzen wie organische und anorganische Leitsalze, die für eine verbesserte elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten sorgen, werden weitere Zusätze beigegeben, welche die Arbeitsweise des Elektrolyten beeinflussen und für eine Optimierung der elektrischen und thermomechanischen Eigenschaften der abgeschiedenen Kupferschichten in den Durchkontaktierungen sorgen.

Glanzbildner

Glanzbildner sorgen für die Abscheidung glänzender, feinkristalliner Schichten (Kristallitgröße $\approx 0,3 \mu\text{m}$). Durch die Glanzbilder entsteht ein gestreuter und gehemmter Kristallisationsvorgang. Während der Primärkristallisation, wo sich zahlreiche Kristallkeime auf der Substratoberfläche bilden und sich zu Körnern entwickeln, werden die Glanzbildner an den Rauheitsspitzen der Substratoberfläche adsorbiert und inhibieren die Metallabscheidung an diesen aktiven Stellen. Die Folge davon ist, dass sich vermehrt Kristallkeime in den Rautiefen bilden und dadurch zu einem Ausgleich der Unebenheiten führen.

Es wird zwischen primären Glanzmitteln, die eine Kohlenstoff-Schwefel-Bindung besitzen und sekundären Glanzmitteln, wie Thioharnstoff oder Disulfide, unterschieden. Der Einsatz von primären Glanzmitteln erhöht die Wirksamkeit der sekundären Glanzmittel und kann allerdings zu einer relativ hohen Schwefelkonzentration in der abgeschiedenen Metallschicht führen. Schon eine sehr niedrige Konzentration von sekundären Glanzmitteln sorgt für ausgesprochen hochglänzende Schichten, die allerdings äußerst spröde sein können und hohe Eigenspannungen aufweisen. Erst durch Kombination der beiden Glanzmittel erhält man feinkristalline Schichten mit einer guten Duktilität.

Einebner

Das Einebnungsvermögen eines Elektrolyten wird definiert als die Fähigkeit eines Abscheidungselektrolyten eine metallische Schicht abzuscheiden, deren Oberfläche glatter ist als die des Substrats. Wenn in den Kerben der Substratoberfläche mehr Material abgeschieden wird