

Spezielle Multilayer

Ein Buch für Designer, Hersteller und Anwender

Dr. Klaus Ritz

1. Auflage mit 136 Abbildungen
und 36 Tabellen



Fachverlag für

- Oberflächentechnik - Galvanotechnik
- Produktion von Leiterplatten und Systemen

Vorwort

Die Entwicklung der Elektronik in den letzten Jahren ist gekennzeichnet durch steigende Frequenzen bei gleichzeitigem immer schnellerem Übergang von der Analog- zur Digitaltechnik, was gleichermaßen die Größe der zu verarbeitenden Frequenzen weiter nach oben verschiebt. Die Zahl der Anschlüsse (I/Os) der Halbleiter hat zugenommen, was den Wechsel der Anschlüsse vom Umfang (z. B. DIL peripheral package) in die Fläche (area array package, z. B. BGA-package) erzwungen hat, um allzu feine Strukturen für die Leiterbahnen bei der Umfangsanordnung der Anschlüsse zu vermeiden. Die Verdrahtung und der Einsatz dieser Elemente ist oft nur möglich, wenn die Leiterplatte in SBU-Technik (SBU: Sequential Build Up) konzipiert ist.

Die Fläche des Halbleitermaterials (z. B. Si) hat zugenommen, was unterschiedliche Substratmaterialien (Keramik, spezielle Organiks) für die ICs erforderlich macht, um die Ausdehnung dieser Substrate an die des Halbleitermaterials anzupassen. Diese Substrate wiederum müssen auf die Leiterplatte gebracht werden. Die Kette der Ausdehnungskoeffizienten geht von ca. 1 ppm / °K für Si über 4-6 ppm / °K für Keramik bis zu ca. 16 ppm / °K für FR4 des Leiterplattenmaterials.

Die Reihenfolge der zu lösenden Probleme entsteht durch die steigende Zahl der Anschlüsse der einzelnen aktiven Komponenten, die steigenden Frequenzen, die steigende Wärmeerzeugung bewirken, die einerseits eine Kühlung und andererseits verlustarmes Material ($\tan\delta$) und Impedanzanpassung erfordert. Temperaturdifferenzen zwischen Materialien bewirken unterschiedliche Ausdehnungen, die teilweise durch Scherung in den Lötverbindungen sowie durch Wölbung der Substrate und der Leiterplatte aufgefangen werden. Die zyklischen thermischen Belastungen durch hohe Temperaturexkursionen beeinflussen die Zuverlässigkeit.

Die physikalischen Probleme werden in der geschilderten Reihenfolge behandelt um daraus Hinweise für Design und Aufbau der Multilayer zu gewinnen. Eine Untersuchung der Widerstandszunahme von Durchkontaktierungen bei Thermozyklen bildet den Abschluss.

Klaus Ritz
September 2013

1 Das Basismaterial

1.1 Starre Lamine: Herstellung, Aufbau und Eigenschaften

Zur Herstellung gedruckter Schaltungen werden starre Lamine benutzt. Bestandteile der meisten Basismaterialien – insbesondere des Typs FR4 – sind Glasgewebe, Harz und Cu-Folien. Diese drei Komponenten und ihre Verarbeitung zum Laminat bestimmen die Eigenschaften des Basismaterials und seine Verarbeitung. Das Basismaterial war früher ein reiner Bauteilträger mit Verdrahtungsfunktion. Durch die reine mechanische Größe der aktiven Komponenten mit steigender Anzahl der Ein- und Ausgänge (I/Os), steigenden Frequenzen mit zunehmender Wärmeentwicklung und die erhöhten Löt- bzw. Dauerbetriebstemperaturen kommt dem Einfluss des Basismaterials eine zunehmende Bedeutung zu. Dies betrifft die elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften mit Auswirkungen auf Herstellung, Verarbeitung und den Einsatz.

1.1.1 Bezeichnung

Die Anforderungen für Basismaterial finden sich in der IPC 4101B (Specification for Base Materials for Rigid and Multilayer Printed Boards). Die Standardqualität ist FR4 (FR5), hierin bedeutet FR (Flame Retardent (flammschützend)), die 4 steht für den Aufbau mit Glasgewebe und (eventuell modifiziertem) Epoxidharz. Die Bezeichnung weiterer Basismaterialtypen nach NEMA (National Electronic Manufacturers Association) ist in *Tabelle 1* dargestellt. Daneben existiert auch eine Bezeichnung nach MIL-Standard.

1.1.2 Herstellung

Harz und Typ des Glasgewebes bestimmen die grundlegenden Eigenschaften des Basismaterials. Zur Herstellung des Basismaterials (siehe *Abb. 1*) wird das Glasgewebe (Rolle mit Rollenbreite größer 1 m) durch eine Wanne mit flüssigem Epoxidharz gezogen (imprägniert, lackiert) und anschließend in einem Treater (hoher Turm) „getrocknet“, d. h. es findet eine teilweise Polymerisation des Harzes durch Strahlung und heiße Luft statt: das lackierte Glasgewebe wird zum Prepreg (Abkürzung von pre-impregnated). Das so getrocknete Prepreg wird anschließend geschnitten und mit Cu-Folien unter Temperatur zu Tafeln der Größe 1020 x 1220 mm² (!) gepresst. Bei dem Pressvorgang findet zunächst eine erneute Harzverflüssigung mit Benetzung der Treatmentseite der Cu-Folie (s. *Abb. 1*) und anschließende weitgehende Polymerisation statt. Der Pressvorgang (mit Harzaustritt in

Tab. 1: NEMA-Bezeichnung verschiedener Basismaterialien

Nema Typ	Beschreibung
XXP	Papier, Phenolharz, warm stanzbar
XXPC	Papier, Phenolharz, kalt stanzbar
G-10	Glasgewebe, Epoxidharz
G-11	Glasgewebe, Epoxidharz, erhöhte Temperaturbeständigkeit
FR-2	Papier, Phenolharz, flammhemmend
FR-3	Papier, Epoxidharz, flammhemmend
FR-4	Glasgewebe, Epoxidharz, flammhemmend
FR-5	Glasgewebe, Epoxidharz, flammhemmend, erhöhte Temperaturbeständigkeit
FR-6	Glasmatte, Polyesterharz, flammhemmend
CEM1	Glasgewebeoberfläche, Cellulosepapierkern Epoxidharz, flammhemmend
CEM3	Glasgewebeoberfläche, Glasfieskern, flammhemmend
GT	Glasgewebe, PTFE-Harz, definierte Dielektrizitätskonstante
GX	wie Type GT, aber engere Dielektrizitätskonstante

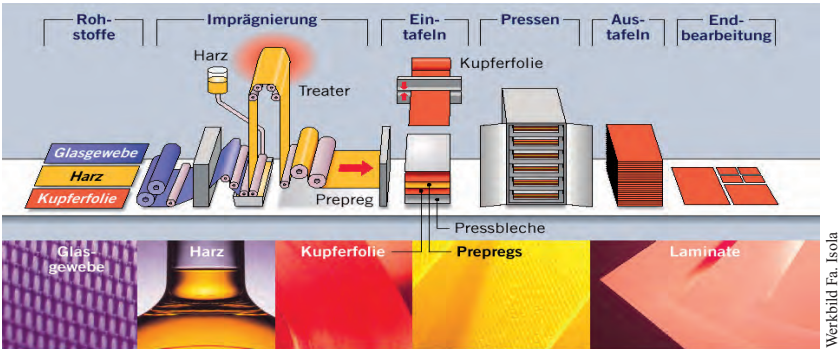


Abb. 1: Die Bestandteile von FR4 sind Glasgewebe, Epoxidharz und Cu-Folie

Tab. 2: Größen der Tafeln

Tafelgröße	Kette (mm)	Schuss (mm)
Euro-Format	1070	1165
US-Format	925	1225
Uni-Format	1070	1225

der Flüssigphase) beeinflusst die Schichtdicke und deren Verteilung auf den Tafeln, deren Größen nach Zuschchnitt (Entfernen des Harzaustrittes) in *Tabelle 2* angegeben sind.

1.1.3 Aufbau

Unterschiedliche Dicken werden durch das Pressen mehrerer Prepregs auch mit verschiedenen Glasgewebetypen erreicht. Aus diesem Grunde ergeben sich Lamine mit verschiedenen Glas/Harz Verhältnissen ($\rightarrow$ Dielektrizitätskonstante ϵ), Elastizitätsmoduli E ($\rightarrow$ Schrumpfen/Dehnung nach Ätzen von Multilayer-Innenlagen, Planarität im Multi-

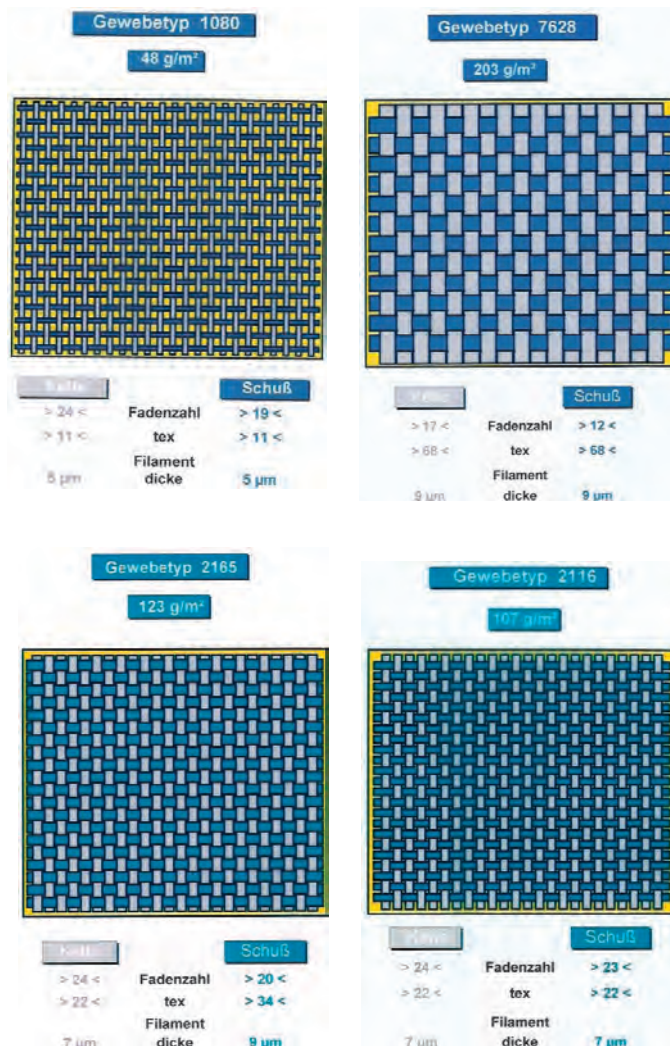


Abb. 2a: Aufbau häufig benutzter Glasgewebetypen

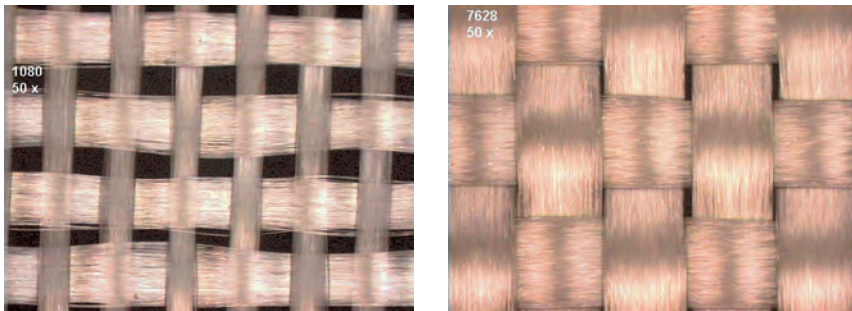


Abb. 2b: Aufbau häufig benutzter Glasgewebetypen

layer) und thermischer Ausdehnung α_z ($\rightarrow$ Verhalten bei Thermozyklen). Den Aufbau einiger häufig eingesetzter Glasgewebetypen zeigen *Abbildungen 2a* und *2b*.

Das Flächengewicht ergibt eine erste Einteilung der Gewebe: Typ 7628 ist das schwerste Gewebe mit 203 g/m², Typ 1080 mit 48 g/m² das leichteste Gewebe. Aus den *Abbildungen* ist zu ersehen, dass Typ 1080 ein lockeres und Typ 7628 ein dichtes Gewebe ist.

Die weiteren Kenngrößen sind die Zahl der Fäden/cm in Kett- und Schussrichtung, Tex ist das Gewicht des einzelnen Filamentes in Gramm/1000 m. Die Filamente mit Durchmessern zwischen 5 und 9 μm bilden die Fäden, aus denen die Gewebe gewebt werden. *Abbildung 3* zeigt den Aufbau weiterer Glasgewebe. In *Abbildung 3* bedeutet E = Elektroglass, C = Continuous d. h. endlos Filament, die Zahl nach C den Garndurchmesser,

Glasgewebe aus E-Glas mit Haftmittelfinish zur Herstellung von Basismaterialien für Leiterplatten
Glass Fabrics from E-glass with Finish for PCBs

International Style	Gewicht Weight g/m ²	Faden Kette Ends Warp cm	Faden Schuß Picks Weft cm	Garn Kette Yarn Warp tex	Garn Schuß Yarn Weft tex	Dicke Thickness mm
104	18,6	23,6	20,4	EC5-5,5	EC5-2,8	0,028
106	24,4	22,0	22,0	EC5-5,5	EC5-5,5	0,033
1065	37,3	22,0	22,0	EC5-5,5	EC5-11	0,053
1080	46,8	23,6	18,6	EC5-11	EC5-11	0,053
2112	69,0	15,8	15,4	EC7-22	EC7-22	0,081
2113	78,0	23,6	22,0	EC7-22	EC5-11	0,079
2313	81,4	23,6	25,2	EC7-22	EC5-11	0,084
2125	87,5	15,8	15,4	EC7-22	EC6-34	0,091
2114	90,9	22,0	18,8	EC7-22	EC7-22	0,084
1675	96,3	15,8	12,6	EC6-34	EC6-34	0,101
2116	103,8	23,6	22,8	EC7-22	EC7-22	0,094
2165	120,4	23,6	20,4	EC7-22	EC9-34	0,101
2157	148,0	23,6	14,8	EC7-22	EC9-68	0,130
7628	203,4	17,3	12,2	EC9-68	EC9-68	0,173
7628	205,0	17,3	12,5	EC9-68	EC9-68	0,180
7628	212,0	17,3	13,5	EC9-68	EC9-68	0,180
7637	230,0	17,3	8,2	EC9-68	EC9-136	0,230

Abb. 3: Aufbau verschiedener häufig benutzter Glasgewebe

2 Das Herstellungsverfahren

2.1 Von den ersten gedruckten Schaltungen zu HDI-Schaltungen in SBU-Technik

Fragt man nach dem Erfinder der Leiterplatte, so findet man verschiedene Antworten, je nach dem, was unter dem Begriff Leiterplatte gesehen wird. Liegt der Aspekt mehr auf der Eigenschaft „automatisierbare Verbindung“, so gelangt man zum Namen des Berliners Albert Parker Hanson, der im Telephoniebereich tätig war und 1903 in England ein Patent anmeldete. Gleichartige Verbindungen, die bei der Telephonieverbindung anfielen, wurden durch gestanzte Metallstreifen realisiert, die durch ein Dielektrikum aus paraffingetränktem Papier fixiert wurden [1]. Schon damals wurden zwei- und mehrlagige Strukturen beschrieben. 1925 beschrieb Charles Ducas die Herstellung von Verbindungen und Radiospulen mit galvanischen Methoden [1]. Weitere Entwicklungen sind in diesem Jahr mit den Namen F. Harmon, M. Parolini verbunden.

Versteht man unter Leiterplatte Strukturen, die ähnlich mit heutiger Methode hergestellt werden, so gelangt man zum Namen Paul Eisler. Er führte 1942 in einem Radio anstelle einer „fliegenden Verdrahtung“ für die Röhren eine Schaltung mit geätzten Cu-Leitbahnen ein, siehe *Abbildung 1*. 1943 entstand ein Patent zur Herstellung von gedruckten Schaltungen“ durch Ätzen von Cu-kaschierten Platten auf Phenolharzbasis. 2-lagige Schaltungen werden durch Einbringen von Lötösen vorgeschlagen.



Abb. 1: Röhrenverdrahtung eines Rundfunkempfängers 1942

Die neue Technik wurde in „Technology of Printed Circuits“ – erschienen bei Heywood London, 1959 – beschrieben. Die deutsche Übersetzung ist 1961 unter dem Titel „Gedruckte Schaltungen“ – Technologie der Folienätztechnik, bei C. Hanser erschienen.

Die Folienätztechnik bezieht sich auf das Ätzen von Cu-Folien, die auf Pressstoffplatten aufgeklebt sind. In diesem Buch wurde bereits die Herstellung von Schaltungen sowohl in Siebdrucktechnik als auch in Photoresisttechnik beschrieben. In beiden Methoden wird der auf die Cu-kaschierten Platten gedruckte Siebdrucklack bzw. der entwickelte Photoresist als Ätzresist (Cu-Schutz) in einem Ätzprozess benutzt: Lack bzw. entwickelter Photoresist schützt Cu, das die Leiterbahnen bildet. Freiliegendes Cu wird im Ätzprozess entfernt, die gedruckten Leiterbahnen entstehen. Der Ätzresist wird anschließend entfernt. Flexible Schaltungen und Mikrowellenschaltungen wurden ebenfalls schon beschrieben. 1961 setzte eine rasante Entwicklung mit der Einführung der galvanischen Durchkontaktierung und der Patentierung der Mehrebenenschaltung Multilayer durch die Firma Hazeltyn (USA) ein. Die Leiterplatte bekommt zunehmend feinere Strukturen, was sich mit dem Übergang von der Röhrentechnik zum Transistor und dem IC in den 70er Jahren korrelieren lässt.

Die IC-Technik brachte bzw. erforderte eine zunehmende Miniaturisierung. Der Übergang von der Durchstechmontage zur Oberflächenmontage (SMT-Technik) begann, auch auf flexiblen Schaltungen, wie ein Beispiel für eine Kamera von 1978 (Abb. 2) zeigt.

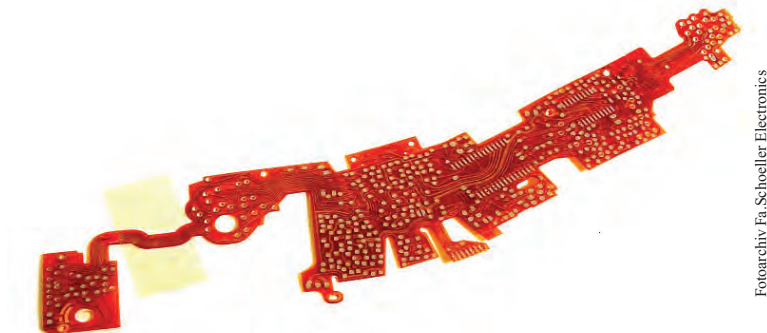


Abb. 2: Flexible Leiterplatte mit Verstärkungsleisten – SMD-Bestückung

Die Landeflächen für die damalige Handbestückung von SMD-Komponenten sind deutlich zu erkennen. Die Entwicklung setzt sich seitdem stetig fort, steigende Anzahl von Ein- und Ausgänge (I/Os) bei den ICs führen von den Umfangsanschlüssen (peripheral packaging z. B. DIP = Dual Inline Packaging) zu Anschlüssen unter den ICs (area array packaging, z. B. BGA = Ball Grid Array). Die steigende Verdrahtungsdichte einerseits und zunehmende Signalfrequenzen andererseits haben aus der ursprünglichen reinen Verdrahtung ein komplexes passives Bauelement gemacht, dessen mechanische und elektrische Eigenschaften im Hinblick auf die Herstellung und Verhalten im späteren Einsatz besondere Beachtung bei Design und Herstellung erfordern.

Der ursprünglich 4-lagige Multilayer wurde nach dem in *Tabelle 1* dargestellten prinzipiellen Verfahren (Arbeitsablauf) hergestellt:

Tab. 1: Prinzipielles Herstellungsverfahren für einen 4-lagigen Multilayer

Schritt	Beschreibung
1	Herstellung einer beidseitig geätzten ungebohrten Innenlage mit Leiterstrukturen und außen liegenden Passmarken
2	Verpressen dieser Innenlage(n) mittels Prepreg (Isolation, Klebmedium) und zwei Cu-Folien zu einem Laminat mit Innenleben. Zumindest eine Seite lässt die Passmarken sichtbar
3	Aufbohren der Passmarken zum Einrichten und Bohren der Durchgangsbohrungen zur Ankontaktierung der innenliegenden Lötflächen auf automatischen Bohrmaschinen
4	Bohrlochreinigung und galvanisches Durchkontaktieren der Bohrungen
5	Herstellung des Außenlagenbildes (Tenting- oder Metallresistverfahren)
6	Endbearbeitung: Lötstopmmaske, Konturbearbeitung, E-Test

Bei dem Tentingverfahren wird die Cu-Oberfläche der durchkontaktierten Arbeitsplatte mit Photoresist abgedeckt, der nach dem Entwickeln das Leiterbahnbild zeigt und die durchkontaktierten Bohrungen mit einem Ring (dem „Tent“) überspannt. Die Auflagefläche dieses Ringes (ca. 0,3 mm) und der Lochdurchmesser (max. 1,5 mm) bestimmen die Grenzen der Anwendbarkeit dieses Verfahrens, da der Tent dem Sprühdruk der Ätzflüssigkeit standhalten muß. Bricht ein Tent wird die Durchkontaktierung ausgeätzt.

Bei dem Metallresistverfahren zeigt der entwickelte Photoresist die Leiterbahnen und die durchkontaktierten Bohrungen als Cu-Oberflächen. Diese werden galvanisch mit PbSn oder Sn abgedeckt. Das Lösen des Photoresists legt Cu frei, das geätzt wird, PbSn bzw. Sn dient als Resist für die Leiterbahnen und Durchkontaktierungen. Die Galvanik setzt auch diesem Verfahren Grenzen. Bestimmend ist das Galvanoverhältnis aus Leiterplattendicke und Lochdurchmesser. Standardwert ist 4:1. Höhere Werte sind möglich.

Das Verfahren nach *Tabelle 1* heißt auch Masslam-Verfahren. Höherlagige Multilayer werden ähnlich hergestellt: Mehrere separat geätzte, dünne doppelseitige (aus beidseitig Cu-kaschiertem Material geätzten) Innenlagen werden durch Aufbohren von mitgeätzten außen liegenden Passmarken mit Registrierbohrungen versehen. Diese Innenlagen werden mit Prepregs (zur Verklebung bei gleichzeitiger Isolation) zusammen mit zwei äußeren Cu-Folien in metallischen Presslehren zu einem Laminat mit „Innenleben“ verpresst.

Dieses Laminat wird wie eine doppelseitige Schaltung weiterverarbeitet d.h. gebohrt, und durchkontaktiert. Nach dem Ätzen des Außenlagenbildes erfolgt die Endbehandlung (z. B. Lötstopmmaske, Heißverzinnung). Das Auffädeln in den Presslehren erfolgte manuell.

In einem neueren Verfahren wurden zunächst manuell in die Registrierbohrungen gesteckte Nieten zum Auffädeln und Laminieren benutzt. Später übernahmen automatisch arbeitende Nietmaschinen diesen Arbeitsschritt. Nach dem Laminieren müssen die Nieten durch Aufbohren entfernt werden.

Genereller Nachteil dieser Methoden ist, dass die Durchgangsbohrungen Platz auf den Innenlagen benötigen, der für die Leitungsführung (Entflechtung) nicht mehr zur Verfügung steht bzw. immer kleinere Leiterbreiten erzwingt. Einer Verkleinerung der Bohrdurchmesser bzw. einer Erhöhung der Lagenzahl sind durch das Galvanoverhältnis (Gesamtdicke/Bohrungsdurchmesser) für die galvanische Durchkontaktierung Grenzen gesetzt, 4:1 ist ein gängiger Wert für übliche Galvanikanlagen, d.h. in 1,2 mm dicke Schaltungen können Bohrungen mit 0,3 mm Durchmesser ohne Cu-Belegungsfehler sicher durchkontaktiert werden. Grund für diese Einschränkungen ist die mit abnehmendem Bohrdurchmesser abnehmende Elektrolytdurchströmung, d.h. Elektrolytverarmung durch mangelnden Ionen-austausch.

Eine Änderung im Design wurde durch die IC-Industrie mit der Einführung von Komponenten mit flächig verteilten Anschlüssen (BGA, Flip-Chip) eingeleitet. Die Dichte der Anschlüsse war so hoch geworden, dass nur wenige Kanäle für die Leiterführung mit handhabbaren Leiterbreiten (Bereich 75 - 100 μm) auf den Außenlagen zur Verfügung standen. Die Lösung bestand darin, Sacklöcher in die Anschlußpads einzubringen, die auf der ersten Innenlage enden. Wegen des noch schlechteren Elektrolytaustausches können aber nur Bohrungen mit Galvanoverhältnis 1:1 sicher galvanisiert werden.

Beträgt der Abstand zur Innenlage 100 μm , so muss der Bohrdurchmesser mindestens 100 μm betragen. Die Reduzierung des Bohrdurchmessers wird also durch die Galvanik beschränkt. Der Vorteil von Sacklöchern – und auch von separat durchkontaktierten Innenlagen – ist der Raumgewinn für die Verdrahtung sowohl auf der Außen- als auch auf den Innenlagen. Zur Herstellung von Sacklöchern werden vorzugsweise Laserbohrmaschinen eingesetzt. *Abbildung 3* zeigt Layout-Ausschnitte für eine BGA-Komponente mit der Schrittweite 0,5 mm (links Außenlage, rechts erste Innenlage).

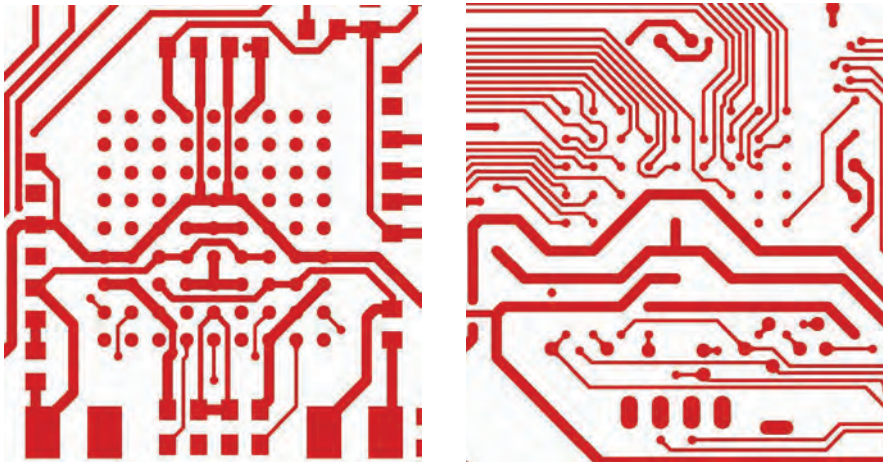


Abb. 3: BGA-Footprint außen, BGA-Auge außen 400 μm , Leiterbahnen 100 μm , Isolationsabstand außen 50 μm (links), Auge auf Ziellage 240 μm , Leiterbahnen innen 78 μm , Laserbohrungen außen $\varnothing$ 100 μm (rechts)