

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis



zur Fördermaßnahme „KMU-innovativ: Elektronik und autonomes Fahren, High Performance Computing“

## **„SelfÜ – Neuartige Fügeverbindungen von Komponenten der Hochleistungselektronik“**

### **“Teilprojekt: *Bereitstellung hybrider Leiterplatten mit integrierter selektiver temperaturfester Fügetechnologie für den Einsatz neuartiger Verbindungstechnologien*“**

Antragsteller: G&W Leiterplatte Dresden GmbH & Co KG,  
Heidelberger Straße 16, 01189 Dresden

Verbundprojektnummer.: EEE-672-030  
Projektstart: 01.01.2022  
Laufzeit: 42 Monate

**G&W Leiterplatten Dresden GmbH & Co. KG**  
**Heidelberger Straße 16**  
**01189 Dresden**

**Roland Kuntzsch**

## **2. Eingehende Darstellung**

### **2.1. Planung und Verlauf des Vorhabens**

### **2.2. Konzepterstellung Messsystem – Technologieauswahl**

#### **2.3. D1PK/D2PK**

- 2.3.1. Einpressung Inlay
- 2.3.2. Einpressung Inlay mit Heatsinkbohrungen

#### **2.4. PT100**

- 2.4.1. PT100 Material DE 104
- 2.4.2. PT 100 Material 370 HR
- 2.4.3. PT 100 Material 370 HR mit Inlay
- 2.4.4. PT 100 Material 370 HR mit Inlay und Abdecklack
- 2.4.5. PT 100 Material 370 HR mit Inlay und Wärmeleitpregreg IS 550H R2400
- 2.4.6. PT 100 Material 370 HR mit kupferkaschiertem Inlay aus Molybdän
- 2.4.7. PT 100 Auswertungsübersicht

### **2.5. TV02 – Materialtest MCL-E-679FG**

### **2.6. LF0200 (Laminat 25µm)**

#### **2.7. ZVT - Zuverlässigkeitstechnologieboard**

- 2.7.1. ZVT – Tiefenfräsen / Verankerung (Feder/Nut)
- 2.7.2. ZVT – Inlayherstellung durch Tiefenätzung
- 2.7.3. Fertigung ZVT\_V04

#### **2.8. Funktionsbaugruppe**

- 2.8.1. Presspolster
- 2.8.2. Materialien
- 2.8.3. Funktionsbaugruppe\_V1
- 2.8.4. Funktionsbaugruppe final Dickkupfer (technologischer Vergleich)
- 2.8.5. Funktionsbaugruppe final

#### **2.9. Projektergebnisse**

- 2.9.1. Kupferinlay (3-D-Technologie)
- 2.9.2. Wärmeleitpregreg
- 2.9.3. Designe Rule
- 2.9.4. Eignung der Fügetechnologieverfahren

## Eingehende Darstellung

### 2.1 Planung und Verlauf des Vorhabens (AP1.1; AP1.3; AP1.5)

An der Erarbeitung der Anforderungen der Fügetechnologien für Diffusionslöt- und Sinterverfahren war G&W zunächst indirekt beteiligt. Durch die Projektpartner erfolgten hier Untersuchungen an Hand von Probekörpern, an denen die Zuverlässigkeit der Fügungen zerstörend geprüft wurde. Verschiedene Aufbauvarianten wurden auch unter Verwendung von Lotformteilen / Preform getestet.

Als Anforderung für die Fertigung der angestrebten Funktionsbaugruppe wurde die Oberflächenkombination Kupfer – Kupfer festgelegt. Dies war der Ausgangspunkt zur Fertigung von Probekörpern auf Basis der Leiterplattenfertigung. Um Aussagen zur Wärmeabführung und Zuverlässigkeit der Fügungen ableiten zu können, wurden diese in Varianten gefertigt. (**D1PK/D2PK**).



Abbildung 1: D1PK

Zur konkreteren Untersuchung der Wärmeabführung erfolgte die Erstellung und Fertigung einer Testschaltung (**PT100**) in dessen Layout eine Messstruktur integriert wurde. Neben der Wärmeabführung erfolgte an Hand dieser Testschaltung die Erprobung verschiedener Presstechnologien um Aussagen für die angestrebte Funktionsbaugruppe ableiten zu können.

Für die Aufnahme und Auswertung von Messwerten benötigt, die als (**MuxA**) gefertigt, bestückt und in einer Messkampagne integriert wurden. Dieses Messsystem wurde nicht nur für PT100, sondern auch für einen **Zuverlässigkeitstechnologieträger (ZVT)** genutzt. Mit Erstellung des Layouts für den ZVT, wurde das erarbeitete Messsystem komplettiert. Das Messsystem ermöglicht die Auswertung erfasster Messwerte und führt zur Vergleichbarkeit gefertigter Varianten von Testschaltungen.

Die Erkenntnisse aus dem aufeinander aufbauenden Konzept flossen in die Layoutgestaltung der Funktionsbaugruppe ein, welche den Abschluss der Projektarbeit bildete.

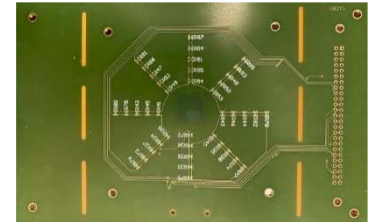


Abbildung 2: PT100

Fertigung der

wurden Platinen

### 2.2 Konzepterstellung Messsystem – Technologieauswahl (AP3.5)

Das im Projektteam erarbeitete Messkonzept hatte zum Ziel, durch Erzeugung von Temperaturwechseln Auswirkungen auf die umliegenden Bereiche der Platine zu simulieren. Hierzu wurden Platinen benötigt, welche die dazu benötigten Zyklen steuern und welche die Möglichkeit bieten diese rechenstechnisch auszuwerten (MuxA). Der Entwurf erfolgte durch die Projektpartner, mit einem Layoutprogramm, bei dem Probleme in Bezug auf Kompatibilität bekannt sind. Trotz Konvertierung der Daten mit anschließendem Datenvergleich wurde eine Charge dieser Mess- und Steuerplatinen fehlerhaft produziert. Nach erfolgter Korrektur konnten diese Platinen bereitgestellt werden. Komplettiert wurde das Messsystem durch die Technologieträger (ZVT).

### 2.3 D1PK/D2PK (AP2.1; AP2.2; AP2.3)

In zwei unterschiedlichen Varianten wurde eine Vielzahl von Prüfkörpern bereitgestellt, an denen die Möglichkeiten der Wärmeableitung innerhalb der Leiterplatten untersucht werden sollte. Beide Varianten beinhalten zu fräsende Kupferinlays und die Anforderung diese in einem Leiterplattenaufbau zu integrieren.

#### 2.3.1 Einpressung Inlay

Inhaltlich wurde bei der ersten Variante dieser Testbaugruppe Kupferinlays beidseitig oberflächlich in den FR4 Aufbau eingebettet. Benötigte Materialeigenschaften des FR4 – Aufbaus wurden den thermischen Anforderungen entsprechend mit einem Hoch Tg Material von 180° Tg (370 HR) gefertigt. Der Verbund wurde mittels zweier Laminaten und dazwischen angeordnetem Prepreg hergestellt. In vorher ausgefräste Bereiche wurden die Kupferinlays eingelegt und der Aufbau unter Temperatur, Druck und Vacuum verpresst. Das Harz des zwischen den Laminaten befindlichen Prepregmatten steigt beim Pressprozess in den Frässpalten beidseitig bis zu den Frässpalten auf und verklebt das Kupferinlay mit dem FR4 – Aufbau. Beim Pressprozess sind pressunterstützende Hilfsmaterialien notwendig um einen Austritt des Harzes auf die Basiskupferoberfläche zu verhindern. Nachfolgend sollte durch einen galvanischen Prozess nachgewiesen werden, dass eine elektrische Verbindung des Inlays mit der umliegenden Kupferfläche herstellbar ist.

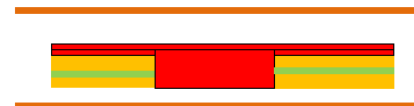


Abbildung 3: D1PK (Aufbau)

Als unbefriedigend erwies sich die Haltekraft des Inlays im FR4 – Verbund. Bei nicht zu verhindernden mechanischen Einwirkungen kam es zu Delaminierungen der Inlays.

Erkenntnisse:

- Pressunterstützende Hilfsmaterialien sind generell in der Lage einen Harzaustritt zu vermeiden.
- Über einen galvanischen Prozess ist es möglich ein oberflächlich eingepresstes Kupferinlay an umliegend angeordnetes Basiskupfer anzuschließen..
- Das alleinige Verkleben des Inlays durch Harzaufstieg entlang der Fräskontur des Inlays reicht nicht aus um einen stabilen Verbund herzustellen.

### 2.3.2. Einpressung Inlay mit Heatsinkbohrungen

Bei diesen Testsubstraten wurde der Lagenaufbau verändert.

Um die Haltekraft des eingefügten Inlays zu verbessern, erfolgte die einseitige Anordnung eines weiteren Prepregs.

Damit wird das Inlay nur einseitig oberflächlich eingefügt. Die

Wärmeableitung auf der abgedeckten Seite erfolgte über Blind-Via

Bohrungen, die durch eine Vielzahl von Kupferhülsenverbindungen die Wärme des Inlays auf die Oberfläche weiterleiten (Heatsinkbohrungen). Pressunterstützende Hilfsmaterialien sind in diesem Fall nur einseitig angeordnet einzusetzen um einen Harzaustritt auf die Oberfläche zu verhindern. Die Wirksamkeit zur Verhinderung des Harzaustritts wird erhöht, weil das zusätzliche Prepreg geringe Höhendifferenzen ausgleichen kann. Eine direkte Wärmeableitung über das Inlay ist aber nicht mehr möglich.

Erkenntnisse:

- geringere Wärmeableitung, da einseitig nur Ableitung über Heatsinkbohrungen
- geringerer Aufwand bei pressunterstützenden Hilfsmaterialien
- höhere Stabilität des hybriden Aufbaus Platine – Inlay
- bessere Einbettungsmöglichkeit des Inlays in den Aufbau der Platine

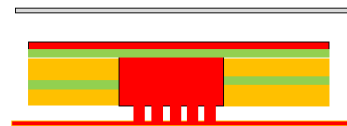


Abbildung 4: D2PK

### 2.4 PT 100 (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Bei der Konzepterstellung des Messsystems war die Erfassung und Auswertung des Temperaturverhaltens zur Beurteilung der Zuverlässigkeit einer derartigen Schaltung von zentraler Bedeutung.

Die Schaltung ist so aufgebaut, dass durch Stromzufuhr eine Erwärmung des in der Mitte angeordneten Bipolartransistors erfolgt. Über Wärmebildkameras, sowie über die Erfassung von Widerständen, die um dieses Bauelement angeordnet sind, lässt sich eine Auswertung der Belastung, sowie der Ausbreitung der entstehenden Temperatur durchführen. Diese Testschaltung wurde in unterschiedlichen Aufbauten hergestellt so dass an Hand des Aufbaus vergleichende Messungen durchgeführt werden konnten. Die Wärmebelastung ermöglicht die Bewertung des Einflusses auf umliegende Bauelemente. Design-Rule für die Platzierung von Bauelementen wurden ableitbar.

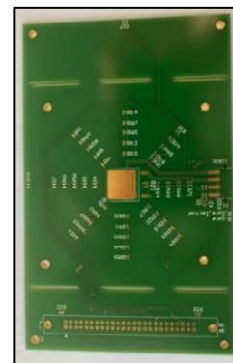


Abbildung 5: PT100

#### 2.4.1 PT100 Material DE 104 (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Bei dem Material DE 104 handelt es sich um ein Standardbasismaterial welches allgemein bei nicht stark temperaturbelasteten Schaltungen bis zu 2 Kupferebenen eingesetzt werden kann. Es hat einen Tg von 140 °C und kann bis zu einer Betriebstemperatur von ca. 100 – 110°C zum Einsatz kommen.

Für höhere Temperaturen ist dieses Material nicht geeignet, weil die Z-Achsenausdehnung zu der Gefahr von Hülsenbrüchen bzw. – abrissen, also Schädigung der Schaltung führen kann.

Als Ausgangspunkt der Untersuchungen und zur Testung der Schaltung wurde dieses Material für die Untersuchung bereitgestellt.

Erkenntnisse:

- Die aufgebaute Schaltung eignet sich um Wärmeableitungen simulieren zu können.

#### 2.4.2. PT100 Material 370 HR (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Für vergleichende Messungen wurde der Aufbau zunächst mit einem Material weitergeführt, dessen Materialeigenschaften eine erhöhte Temperaturbeständigkeit von 180°Tg (370HR, ISOLA) aufweist. Dieses wurde ausgewählt, weil es sich für Hybridbauten (Lamination unterschiedlicher Materialarten) sehr gut eignet und eine erhöhte Betriebstemperatur von ca. 140 – 150°C ermöglicht. Mit diesem Materialwechsel konnte keine signifikant erhöhte Wärmeabführung nachgewiesen werden.

Diese ist notwendig um das Material und umliegend angeordnete Bauelemente durch die Wärmebelastung der angestrebten Fügeverfahren nicht zu überlasten. Die Wärmeleitfähigkeit beider Varianten ist in Datenblättern der Hersteller enthalten. (DE 104 - 0,36 W/mK; 370 HR -0,4 W/mK).

Erkenntnisse:

- Die Kapazität erzielter Wärmeableitung zur ursprünglichen Aufbauvarianten konnte verbessert werden
- Es wird eingeschätzt, dass diese Ableitung von Wärme nicht ausreichend ist, um eine Schädigung von Bauelementen beim Fügeprozess, welche in der Nähe der Fügestellen platziert und bereits bestückt sind, zu vermeiden (Design Rule).

### 2.4.3 PT 100 Material 370 HR mit Inlay (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Als wesentliche Weiterentwicklung in der Untersuchung nach Wärmeableitungsmöglichkeiten betrachtet das Projektteam die Integration eines Kupferinlays im Bereich der zu untersuchenden Fügeverfahren. Das Inlay wurde zu diesem Projektzeitraum beidseitig oberflächlich eingefügt. Das Inlay ist sich an einer Stelle mit Verbindung an das umliegende Layout angeordnet.

Dies stellte eine Herausforderung an die Integration des Inlays, sowie an die Layoutgestaltung dieses Bereiches dar. Berücksichtigt werden muss die Möglichkeit zum Harzaustritt an die Oberfläche der



Abbildung 7: Inlay mit Harzaustritt

Schaltung. In diesen Bereichen führt ein Harzaustritt zu verminderter Möglichkeit einer galvanischen Verstärkung, was die Anbindung an die

Schaltung erschwert bzw. mangelhaft werden lässt. Hiervon abgeleitet wurden Designe Rule Regeln. Bei dieser wird das Kupferpad umlaufend um das Inlay vergrößert. Der Harzaustritt, welcher in der Regel nicht vollumfänglich um das Inlay auftritt, verhindert dadurch nicht die galvanisch verstärkte Anbindung an das umliegende Layout.

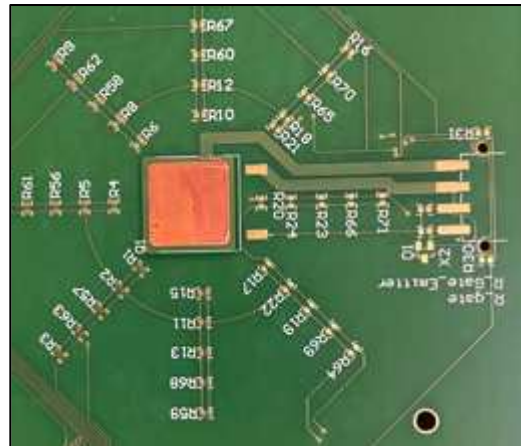


Abbildung 6: PT 100 mit Inlay

Erkenntnisse:

- Die verstärkte Wärmeableitung durch Kupferinlays konnte vergleichend mit den parallelen Aufbauvarianten eindrucksvoll nachgewiesen werden.
- Wie auch bei den Testsubstraten DAPK war ein mangelhafter Verbund zwischen Inlay und Platine festzustellen.
- Aus diesem Aufbau konnten Designe Rules für die Integration von elektrisch angebotenen Fügeflächen abgeleitet werden (Pad-Größe umlaufend 300µm größer als Inlaydimension).

### 2.4.4 PT 100 Material 370 HR mit Inlay und Abdecklack (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Bei dieser Aufbauvariante wurde einer weiteren Forderung der zu untersuchenden Fügeverfahren Rechnung getragen. Diese besteht darin, dass die optimale Verbindung dieser Verbindungen in der Materialkombination Kupfer – Kupfer gefordert ist.

Hintergrund hierbei sind intermetallische Phasen, welche zu einem erschwerten Fügeprozess führen. Entgegen dieser Forderung nach einer reinen Kupferoberfläche in den Fügebereichen, besteht in der Leiterplattenfertigung generell die Anforderung nach Schutz von Lötstellen gegen Korrosion des Kupfers um die Lötprozesse über einen Zeitraum von bis zu einem Jahr zu garantieren. Abdecklack bietet hierbei die

technische Möglichkeit beide Anforderungen zu erfüllen. Hierbei wird vor der Veredlung von Lötflächen der Abdecklack in noch nicht vollständig ausgehärteter Form aufgebracht und verhindert die Oberflächenveredlung im abgedeckten Bereich. Die Abdeckung des Kupfers verhindert auch die Korrosion der Kupferoberfläche bis zum Fügeprozess. Durch den Wärmeeintrag bei Lötprozessen versprödet zwar der Abdecklack, lässt sich aber nach der Bestückung trotzdem noch

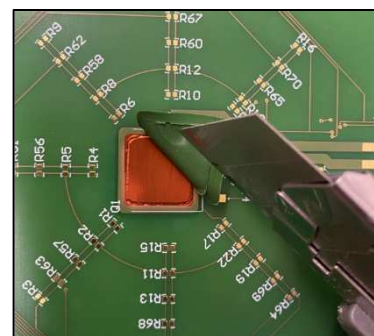


Abbildung 8: Inlay mit Abdecklack

rückstandsfrei ablösen. Ein Aktivierungsprozess der Oberfläche ist trotzdem vor dem Fügen zu empfehlen.

Erkenntnisse:

- Durch Aufbringung von Abdecklack kann eine partielle, gegen Korrosion geschützte Oberfläche der Fugestellen bereitgestellt werden.
- Eine selektive Lötbarkeit bleibt erhalten. Ein Aktivierungsprozess vor dem Fügen ist zu empfehlen.

### 2.4.5 PT 100 Material 370 HR mit Inlay und Wärmeleitpregreg IS 550H R2400 (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Die beidseitig oberflächige Integration der Inlays führte zu dem Nachteil eines unzureichenden Verbundes mit der Platine mit dem Einlegeteil. Dies wurde nach dem Substrataufbau von D1PK bei diesem Fertigungstest nochmals bestätigt. Diese Variante ist nur dann anwendbar, wenn dieser Verbund nicht explizit als Kontakt für die elektrische Schaltung benötigt wird, und das Inlay konstruktiv nach der Fertigstellung der Platine eingelegt und / oder durch andere Varianten dort fixiert wird (Heatsink / Gehäuse etc.). Für den Anspruch des Projektes, bei dem eine elektrische Anbindung an das Layout angestrebt wird, reicht dies nicht aus.

Deshalb wurde als weiterer Aufbau die Fixierung des Inlays durch flächige Anordnung von Wärmeleitpregreg gefertigt. Dem Namen entsprechend leitet dieses Wärmeleitpregreg die Wärme des Inlays auf die Unterseite der Leiterplatte ab. Zwei verschiedene Materialarten wurden hierbei prozessiert. Bei dem Material IS550H handelt es sich um ein Pregreg, welches sich analog zu dem vorgesehenen Material 370HR mit gleichem Pressprogramm laminieren lässt. Dies ist dagegen bei R2400 (Panasonic) nicht möglich, weil es sich um ein gewebebefreies Folienmaterial mit beidseitiger Folienbeschichtung handelt, welches einen geteilten Laminierprozess erfordert. Bei erster Fertigung wurde dies nicht beachtet, was zu einem Fertigungsausfall durch Delaminierung führte. Der zusätzliche Laminierprozess, beeinflusst die

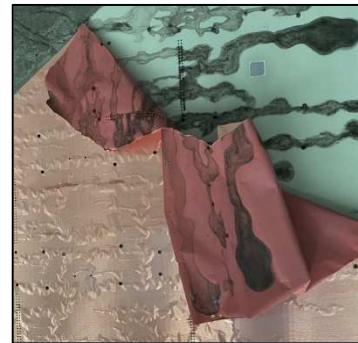


Abbildung 9: R2400 mit Delamination

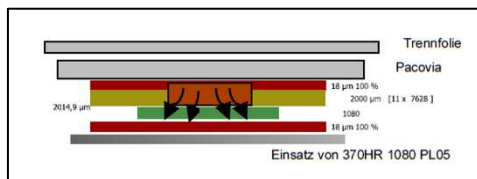


Abbildung 10: Anordnung Wärmeleitpregreg

Herstellkosten negativ. Welches Wärmeleitpregreg für die Funktionsbaugruppe zum Einsatz kommen sollte, wurden durch die Untersuchung zur Wärmeableitungskapazität entschieden.

Erkenntnisse:

- Durch den Einsatz von Wärmeleitpregreg bzw. gewebefreiem Folienmaterial lässt sich ein stabiler Verbund der Platine mit dem Inlay fertigen.
- Die Wärmeableitung wird durch spezifische Eigenschaften dieser Materialien unterstützt – die Wärme wird auf die Unterseite abgeleitet.
- Die Strukturierung der Oberseite mit einem galvanischen Anschluss an das Inlay wird ohne größeren Harzaustritt realisiert.

### 2.4.6 PT 100 Material 370 HR mit kupferkaschiertem Inlay aus Molybdän (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Großen Einfluss auf die Qualität der zu untersuchenden Fügeprozesse, sowie auf den Verbund zwischen Leiterplatte und Inlay haben die Wärmeausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialarten. Im System von Leiterplatten mit den Materialkombinationen Glasfasern, Harz und Kupfer bildet Kupfer durch Duktilität den Ausgleich um Hülsenabriss durch Z-Achsenausdehnung zu verhindern. Die Schichtstärke der Kupferhülle ist hierbei für die Stabilität dieses Systems qualitativ bestimmend. Dem gegenüber benötigen die Fügeprozesse aber eine geringere Z-Achsenausdehnung, was im Testaufbau eines mit galvanischer Oberfläche beschichtetem Molybdäninlays prozessiert werden sollte. Hierbei sind Spannungen zu erwarten, welche bei den TWT Untersuchungen zu vorzeitigem Ausfall durch Hülsenabriss im Verbund Platine – Inlay führten würden.

Da das Fügeverfahren Sintern als unempfindlicher gegenüber der

Angebot 22537791																	
12	Material 1301112 30 376 14,00 € / Stk																
13	Material 1402112 1 076 1,204,00 € / Stk																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Stk</th> <th>Preis</th> <th>Summe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12</td> <td>30</td> <td>14,00 €</td> <td>420,00 €</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>1</td> <td>1,204,00 €</td> <td>1,204,00 €</td> </tr> <tr> <td><b>Gesamt</b></td> <td></td> <td></td> <td><b>1,624,00 €</b></td> </tr> </tbody> </table>		Material	Stk	Preis	Summe	12	30	14,00 €	420,00 €	13	1	1,204,00 €	1,204,00 €	<b>Gesamt</b>			<b>1,624,00 €</b>
Material	Stk	Preis	Summe														
12	30	14,00 €	420,00 €														
13	1	1,204,00 €	1,204,00 €														
<b>Gesamt</b>			<b>1,624,00 €</b>														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Stk</th> <th>Preis</th> <th>Summe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12</td> <td>30</td> <td>14,00 €</td> <td>420,00 €</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>1</td> <td>1,204,00 €</td> <td>1,204,00 €</td> </tr> <tr> <td><b>Gesamt</b></td> <td></td> <td></td> <td><b>1,624,00 €</b></td> </tr> </tbody> </table>		Material	Stk	Preis	Summe	12	30	14,00 €	420,00 €	13	1	1,204,00 €	1,204,00 €	<b>Gesamt</b>			<b>1,624,00 €</b>
Material	Stk	Preis	Summe														
12	30	14,00 €	420,00 €														
13	1	1,204,00 €	1,204,00 €														
<b>Gesamt</b>			<b>1,624,00 €</b>														

Abbildung 11: Kosten Kupferkaschiertes Molybdäninlay

Z-Achsenausdehnung beurteilt wird, ist aus diesem Ergebnis heraus dieses Fügeverfahren zu favorisieren.

Ein weiterer Aspekt, welcher diese Aussage bekräftigt sind die Kosten für derartige Arten von Inlays und dessen Bearbeitung zum 3-D-Inlay. Die Höhe der Kosten liegt bei ca. 800€/dm<sup>2</sup>. Die Bearbeitung an sich, sowie die Technologie zur Umarbeitung zum 3-D-Teil sind hierbei nicht gelöst und somit nicht mit einberechnet.

Diese Erkenntnis bildet einen Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen außerhalb dieses Projektes um Aufbauvarianten zu entwickeln, welche einen Verbund von heterogenem Platinen Basismaterial und kupferbeschichteten Inlays mit geringeren Z-Achsenausdehnungen ermöglicht.

Erkenntnisse:

- Aus Sicht der Leiterplattenherstellung ist das Fügeverfahren Sintern gegenüber dem Diffusionslöten zu bevorzugen.
- Aus kostentechnischen Gründen wird die weitere Untersuchung mit kupferkaschiertem Molybdän abgebrochen.

#### 2.4.7 PT 100 Auswertungsübersicht (AP2.4; AP 3.1; AP3.5; AP4.5; AP 5.2; AP 5.7)

Die bei den Projektpartnern durchgeführten Untersuchungen zur Wärmeableitung brachten folgende Ergebnisse.

PT100 DE104	PT100 370HR	PT100 370HR Inlay	PT100 370 HR Inlay IS 550H	PT 100 370HR Inlay R2400
----------------	----------------	-------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------

Abbildung 12: Übersicht Wärmeableitung von PT 100 Wärmeableitungen

#### 2.5 TV02 – Materialtest MCL-E-679FG (AP1.3; AP 3.1; AP 3.5)

Alternativ zu 370HR wurde ein weiteres Material in seiner Verarbeitungsfähigkeit getestet. Es handelt sich hierbei um ein halogenfreies Material mit gleichartigen Temperatureigenschaften. Prägend ist die geringe z-Achsenausdehnung. Eine Aussage zur Fähigkeit von Wärmeableitung ist bisher im Datasheet dieses Hitachi Materials nicht enthalten. Dieses Material lässt sich analog zu bekannten FR4 - Materialien problemlos verarbeiten und erbringt den Beweis, dass für die angestrebte Funktionsbaugruppe der Einsatz von halogenfreiem Material möglich ist.

Erkenntnisse:

- Für derartige Anwendungen ist der Einsatz von halogenfreien Materialien möglich.
- Ein Ansatz zu umweltbewussterer Fertigung ist hierdurch gegeben.
- Die nicht vorhandene Angabe der Wärmeleitfähigkeit ist kein direkter Nachteil, weil der Aufbau zur Wärmeabführung über Inlay und Wärmeleitpregel konzipiert ist.

#### 2.6 LF0200 (Laminat 25µm) (AP1.3; AP 3.1; AP 3.5)

Basismaterial und Prepreg auf FR4 Basis hat eine Dickenabstufung, welche auf Grund der Dicke des Glasfasergewebes in der Regel 50µm nicht unterschreiten. Bei der angestrebten Funktionsbaugruppe ist ein genauer Dickenabgleich für die Vermeidung von Harzaustritt aber von entscheidender Bedeutung. Das hierbei zum Einsatz gebrachte pressunterstützende Hilfsmittel - Pacovia hat nur eine begrenzte Möglichkeit derartige Dickenschwankungen durch abquetschen von Bohrungen bzw. Frässpalten auszugleichen. Deshalb wurde ein Material in einem gesonderten Fertigungstest durchgeführt, welcher eine geringere Einstellung im 25µm Dickenbereich denkbar macht. Verpresst wurde hierbei ein Material, welches vorwiegend bei Starrflex- Applikationen zum Verkleben von PI-Materialien zum Einsatz kommt. Der Testaufbau sah vor dieses Material sowohl mit Kupferfolie als auch ohne separat zu verpressen. Es wurde der Nachweis erbracht, dass unter



Abbildung 13: Verarbeitung LF0200

Verwendung von pressunterstützenden Hilfsstoffen ein Material zum Dickenausgleich hergestellt werden kann. Bei Multilayer Aufbauten werden Bohrungswandungen vor einem galvanischen Abscheidungsprozess von organischen Bestandteilen gereinigt. Dabei werden Harz und Klebematerial unterschiedlich beansprucht, was bei derartigen Materialkombination zu einer Verlängerung eines auszubildenden Leitpfades der zu galvanisierenden Bohrungswandung führt. Die Ausbildung der galvanischen Kupferhülse wird dadurch erschwert.

Erkenntnisse:

- Es ist möglich gewebe freies Folienmaterial von 25µm Dicke herzustellen.
- Diese Klebefolien erfordert einen geeilten Laminationsprozess in der Herstellung
- Bei Fertigung der Funktionsbaugruppe kann dieses hergestellte Material zum Dickenausgleich und zur Verhinderung von Harzaustritt auf die Oberfläche Verwendung finden.
- Erfahrungsgemäß wird aber durch das materialfremde Klebematerial die Möglichkeit zur Ausbildung einer Durchkontaktierung erschwert

## 2.7 ZVT – Zuverlässigkeitstechnologieboard

(AP1.3; AP1.5; AP 2.1; AP2.2; AP 2.3; AP 2.4; AP 3.1; AP 3.5; AP 4.5; AP5.2; AP 5.7)

Die Testreihen des ZVT Boards basieren auf den gewonnenen Erfahrungen der vorherigen Fertigungstests und nahmen einen großen Umfang im Projektablauf ein. Die Verankerung des Inlays im Verbund der Platine wurden ebenso variiert, wie die Herstellung der 3-D Kupferinlays.

Layoutveränderungen zur Anpassung an die aufgebaute Messkampanie wurden durchgeführt. Durch parallel geführte Entwicklungsvariationen wurden Fehlerursachen ermittelt, wodurch Einfluss auf deren Beseitigung genommen wurde.

### 2.7.1 ZVT – Tiefenfräsen / Verankerung (Feder/Nut)

(AP1.3; AP1.5; AP 2.1; AP2.2; AP 2.3; AP 2.4; AP 3.1; AP 3.5; AP 4.5; AP5.2; AP 5.7)

Das für diesen Durchlauf benötigte 3-D- Inlay wurde durch Fräsbearbeitung gefertigt. Dabei wurde das Ziel verfolgt den mechanischen Verbund zwischen dem Multilayer Aufbau und dem Inlay zu verbessern. Es wurde mittig, angelehnt an den Verbund bei Holzbrettern, eine Nut-Feder-Konstruktion angestrebt. Da auf der Unterseite auch noch bestimmte Bereiche bis zur Außenebene geführt werden sollten, wurde die Herstellung dieses 3-D-Inlays sehr anspruchsvoll. Diese Verankerung des Inlays im mittleren Lagenaufbau führte zu einer Erhöhung der Lagenanzahl. In Summe ergaben sich für das Inlay aus Kupfer, die Prepregs und die Lamine neun verschiedene Fräsprogramme, welche unter einander angepasst werden mussten. Auf Grund der unterschiedlich benötigten Tiefen, der Anforderung zur Anpassung an Laminatstärken und der Aufbauten ergaben sich enge

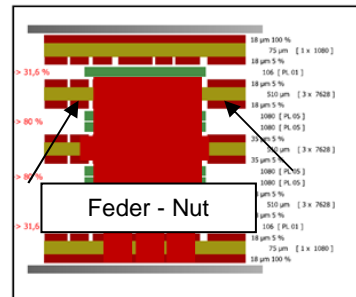


Abbildung 14: Lagenaufbau ZVT (Feder Nut)



Abbildung 15: Harzmangel und Delaminierungen ZVT

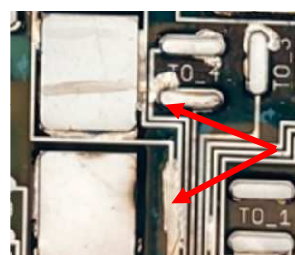


Abbildung 17: Resistunterwanderung mit Kurzschlussbildung

Toleranzen, deren Einhaltung sich schwierig gestaltete. Grund hierfür waren Schwankungen in den Tiefeneinstellungen sowie Gratbildung am Inlay. Weitere Bearbeitungsprobleme ergaben sich aus den Materialeigenschaften des Kupfers. Auch auf Grund von Wärmeentwicklung des relativ weichen Materials war Gratbildung am Inlay, sowie Verschmierungen des Werkzeugs zu verzeichnen. Beide Fehlerbilder sind mit den zur Verfügung stehenden Maschinen für Konturbearbeitung für die Leiterplattenfertigung unvermeidbar, da bei dieser Maschinenteknik eine Kühlung bzw. Schmierung

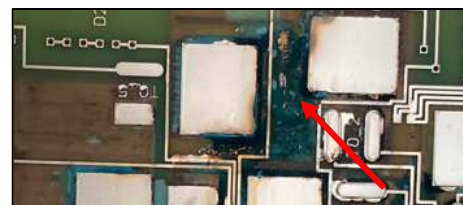


Abbildung 16: Chemieeintrag ZVT

nicht zur Verfügung steht. Die Summe der Unsauberkeiten führte zu Spannungen beim Multilayer Pressprozess. Um Ableitung von Aussagen zu Design Rule Regeln zu erhalten, wurde die Anzahl von Bereichen, welche bis zu den Außenebenen geführt wurden erhöht. Dadurch verringerten sich die Abstände und Fehler wurden provoziert. Nach Fertigung des 3-D Inlays erfolgte der Fügeprozess unter Anwendung von pressunterstützenden Hilfsstoffen. Bereits in diesem Fertigungszustand wurden Stellen erkennbar, bei denen es sich um Harzmangelerscheinungen oder sogar Delaminationen im Materialverbund

handelte. Herausstehender Grat des Inlays führte zu einem mangelhaften Verbund in einzelnen Bereichen. Diese unsauberen Bereiche der Verpressung führten bei nachfolgender galvanischer Verkupferung zu Chemieeinträgen. Als weitere Folge von partiellen Unebenheiten nach dem Laminierprozess waren Resistunterwanderungen zu verzeichnen. Der Resist konnte in solchen Bereichen Höhenunterschiede nicht mehr ausgleichen, wodurch galvanische Abscheidungen zu Kurzschlussbildung auf dem Layout führte. Weiterhin führten die Höhenunterschiede im Laminataufbau zu Delaminierungen im Multilayer- Verbund. Wegen der Erhöhung der Lagenanzahl, sowie der komplizierten Kupfer-Inlaystruktur erhöhten sich die Herstellkosten für die Applikation so, dass ein wirtschaftlicher Fertigungsprozess nicht mehr abbildbar war. Trotz der aufgetretenen Fehlerbilder wurden die Platinen so weit prozessiert, dass damit Fertigungstests mit den zu untersuchenden Füge-technologien durchgeführt werden konnten. Im Ergebnis liegt eine Funktionsbaugruppe vor, welche ein optimiertes Wärmemanagement für die Fügeprozesse Sintern und Diffusionslötens beinhaltet.

Erkenntnisse

- Die Fertigungstechnologie mit Verankerung des Inlays im inneren des Lagenaufbaus führt zu einer Erhöhung der Anzahl von Laminaten und somit zu Herstellkostensteigerung
- Die Verankerung des Inlays im inneren des Lagenaufbaus erfordert geringe, schwer zu beherrschende Toleranzen in den Tiefenschwankungen um einen sauberen Verbund herstellen zu können
- Pressunterstützende Hilfsmittel konnten Höhenunterschiede nicht ausgleichen
- Zu enge Abstände zwischen Bereichen, welche auf die Oberfläche des Verbundes geführt wurden führten zu Fehlern im Verbund
- Aufgetretene Höhenunterschiede konnten durch Resist nicht ausgeglichen werden.
- Tiefenfräsungen waren ungleichmäßig, Gratbildung bei Fräsungen des Kupferinlays waren zu verzeichnen
- Die Technologie zur Herstellung des Inlays mittels mechanischer Fräsbearbeitung wurde verworfen
- Der Ansatz zur Verankerung des Inlays im Multilayeraufbau wurde verworfen

## 2.7.2 ZVT – Inlayherstellung durch Tiefenätzung

(AP1.3; AP1.5; AP 2.1; AP2.2; AP 2.3; AP 2.4; AP 3.1; AP 3.5; AP 4.5; AP5.2; AP 5.7)

Als Erkenntnis aus 2.7.1 wurde erkennbar, dass sich ein 3-D-Inlay nicht sauber durch Tiefenfräsungen herstellen lässt. Als alternative Möglichkeit wurde untersucht, ob die 3-D Struktur des Inlays über eine Kombination verschiedener Arbeitsgänge mit Hilfe eines Tiefenätzprozesses gefertigt werden kann. Bei dieser Überlegung wurde auf Erfahrungen zur Fertigung von Leiterplatten mit Dickkupfer  $\geq 100\mu\text{m}$  aufgebaut. Die Strukturierung von Kupferebenen mit solchen Dickschichten lässt sich nicht über den Einsatz von fototechnischem Resist als Ätzresist fertigen. Der Grund ist die Beständigkeit des Resists gegenüber dem Ätzmedium. Deshalb erfolgt die Strukturierung bei derartigen Applikationen in abgeänderter Art. Der fototechnische Resist wird mit geänderter Polarität aufgebracht. Die Belichtung erfolgt in den Bereichen, die später zu ätzen sind. Nach dem Belichtungsprozess, in dem nicht zu ätzende Kupferbereiche vom Resist freigestellt sind, erfolgt ein galvanischer Prozess zur Abscheidung von Zinn auf diesen Flächen. Mit dem nachfolgenden Arbeitsschritt Resist stripping werden die Ätzbereiche freigelegt. Das aufgebraute Sn fungiert nun als Resist gegenüber dem Ätzmedium und die dicken Kupferschichten können nun geätzt werden. Nach dem Ätzprozess wird das Zinn wieder entfernt, die Struktur der Dickkupferebenen liegt vor. Die weitere Verarbeitung kann nun im Standard-Fertigungsprozess bearbeitet werden. Nach Anwendung

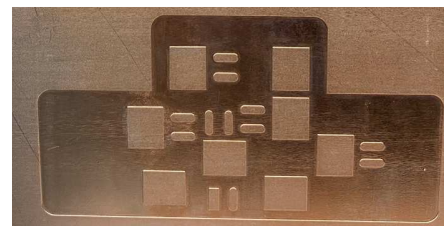


Abbildung 18: Tiefenätzung ZVT

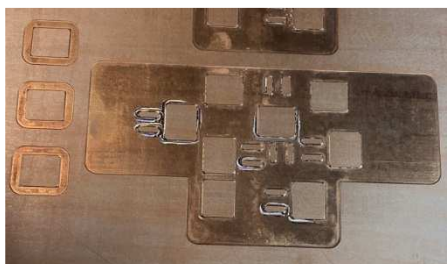


Abbildung 19: Fräsen Ätzkeil ZVT

dieser Arbeitsgangfolge für die Herstellung der 3-D-Struktur der Inlays wurde ein sauberes Ätzbild in einer Tiefe von  $200\mu\text{m}$  erzeugt. Eine typische Erscheinung von Ätzprozessen ist die Ausbildung eines Ätzkeils in einem Winkel von ca.  $30^\circ$ . Dieser entsteht, weil mit zunehmender Ätztiefe der Ätzprozess auch auf die Ätzkanten wirkt. Bei dieser Fertigungsvariante wurde ein nachfolgendes mechanisches Schliffen mittels Fräsen vorgesehen um den Ätzkeil zu entfernen. Das Ausfräsen der Inlays aus dem Kupferblech ist unvermeidbar. Zur Verbesserung des Verbunds beim Laminierprozess erfolgt zwischen der Beseitigung des

Ätzkeils und dem Ausfräsen der Inlays aus dem Kupferblech ein Braunoxidierungsprozess, der im ausgefrästen Zustand auf Grund der Größe der Teile nicht mehr möglich wäre. Eine Nacharbeit des sich durch den Fräsarbeitsgang auftretendem Grat wurde notwendig und war zu optimieren. Zur Ableitung von Design Rules für herausstehende Kupferbereiche, wurden bewusst mehr Flächen bis zur Oberfläche geführt, als dies im Layout vorgesehen war. Beabsichtigt wurde damit die Minimierung der Abstände zwischen herausstehenden Kupferbereichen um Fehler zu provozieren und eine Aussage zu Vorgaben für die Erstellung neuer Layouts zu erhalten. Um die Tiefeneinstellung für die Entfernung des Ätzkeils einstellen zu können, wurden Probeflächen in dem Kupferblech positioniert. Die Korrekturen am Fertigungsprozess für die ZVT Schaltung führten zu einer Minimierung von Fehlerbildern. Harzaustritt war zu verzeichnen. Dieser trat vorwiegend an gleichartigen Stellen auf.

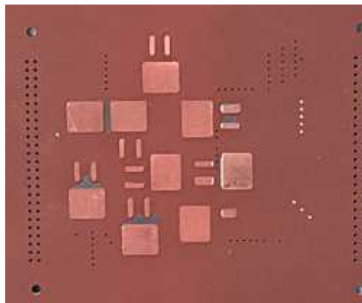


Abbildung 20: Harzaustritt ZVT

Eine Ableitung zur Festlegung von Design Rule Einstellungen, wie beabsichtigt wurde möglich. Die Gleichartigkeit des Harzaustritts weist aber auch auf Höhenunterschiede im Laminierungsprozess hin, die durch das pressunterstützende Hilfsmittel Pacovia nicht ausgeglichen werden konnte. Abzuleiten ist hier eine Überprüfung bzw. Korrektur des Lagenaufbaus vor dem Laminierprozess. Im weiteren Prozessverlauf wurde untersucht in wie weit sich herausgetretenes Harz durch den Standardarbeitsgänge beseitigen lässt. Einzuschätzen ist, dass diese Art der Harzbeseitigung durch Plasmaätzen oder Bürsten als ungeeignet einzuschätzen ist. Es entstanden theoretische Überlegungen, wie man heraustretendem Harz entgegenwirken kann. Ein derartiger Abtragungsprozess erfolgt beim Verschluss von durchkontaktierten Bohrungen mittels Plugging.

Hierbei wird nach Aushärtung des Harzes, der zur Verfüllung von Bohrungen eingebracht wird überschüssiges Harz durch Schleifen entfernt. Zu beachten ist, dass bei einem mehrfachen Schleifprozess das Kupfer im Übergang zwischen Löttauge und Hülse einer durchkontaktierten Bohrung nicht beschädigt werden darf. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig, wenn dieser Fertigungsprozess notwendig werden sollte.

Ein weiteres Fehlerbild wurde auf der Unterseite nach dem Laminierprozess festgestellt. Es erschienen punktförmige Erhebungen, die als untypisch deklariert wurden und deren Ursache in Verunreinigungen beim Stapeln vor dem Laminierprozess zu suchen ist. Dieses Fehlerbild wurde dokumentiert, eine Veränderung der Fertigung wurde hieraus nicht abgeleitet, aber weiter beobachtet. Erkenntnisse:

- Design Rule: Der Abstand von zwei herauszuführenden Kupferbereichen an die Oberfläche unter 2 mm ist kritisch und kann derzeit zu vermehrtem Harzaustritt führen
- Zur Minimierung von Höhenunterschieden ist der Lagenaufbau zu korrigieren. Dieses Erkenntnis wurde rechnerisch bestätigt
- Bei Anwendung eines Schleifprozesses analog Plugging ist das Basiskupfer auf den Außenlagen zu erhöhen, dadurch soll die Gefahr zum Durchschleifen des Übergangs Löttauge – Hülse verringert werden. Der Schleifprozess ist an die erforderliche Endkupferstärke anzupassen.
- Eventuell ist zum Schutz vor Beschädigung des Übergangs von Löttauge zu Bohrhülse ein Zwischenarbeitsgang einzufügen um Ausfälle durch den Schleifprozess zu vermeiden

### 2.7.3 Fertigung ZVT\_V04

(AP1.3; AP1.5; AP 2.1; AP2.2; AP 2.3; AP 2.4; AP 3.1; AP 3.5; AP 4.5; AP5.2; AP 5.7)

Unter Berücksichtigung aller bisher gewonnenen Erkenntnisse erfolgte die Fertigung der ZVT Boards. In Folge der durchgeführten Korrekturen und Änderungen konnten weitere



Abbildung 21: Ätzkeil gefräst ZVT

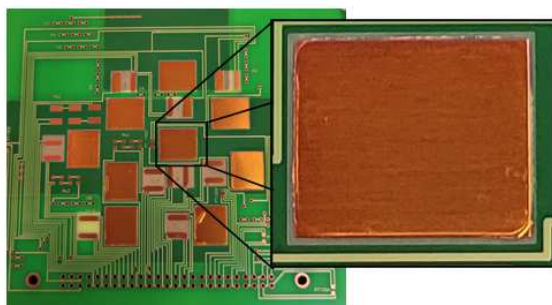


Abbildung 22: Inlay - Anbindungsbereich ans Layout

Verbesserung der Qualität verzeichnet werden. Die Herstellung der Inlays durch Tiefenätzung führte zu saubereren 3-D-Einlegeteilen. Die Beseitigung des Ätzkeils durch nachträgliche Entfernung mittels Fräsen wurde durchgeführt. Hierbei ist bei der Fertigung des Demonstrators noch festzulegen, ob dieser Arbeitsgang, welcher

als Schwachstelle für Gratbildung angesehen wird, überhaupt notwendig ist. Heraustretendes Harz, sowie Harzmangelercheinungen bzw. Delaminationen waren weitestgehend nicht vorhanden. Im Übergang zwischen Inlay und umlaufenden Layout der Schaltung sind Unebenheiten sichtbar, welche nicht als qualitativer Nachteil betrachtet wird, da dieser die Anbindung an das Layout der Außenlagen umlaufend um das Inlay garantiert. Wie beschrieben, könnte der Wegfall des Arbeitsgangs, Fräsen Ätzkeil, hier zu einer Verbesserung des Übergangs führen. Ausfälle bei der Fertigung dieser ZVT-Variante gab es nicht.



Abbildung 23: Unebenheit ZVT

Teilweise wurde Nacharbeit erforderlich, weil es durch galvanische Abscheidung, im Bereich zwischen Kupferinlay und Layoutbestandteilen mit unterschiedlichem Potential, zu einzelner Kurzschlussbildung kam. Dieses Fehlerbild weist erneut auf Hinweise für die Erstellung weiterer Layouts hin, scheint aber im Zusammenhang mit der nachträglichen Entfernung des Ätzkeils durch mechanische Fräsung und der beschriebenen Gratbildung in Zusammenhang zu stehen. Auch dieses Fehlerbild ist minimierbar, wenn der Ätzkeil nicht entfernt wird. Eine Dimensionsanpassung des Prepregs bei Wegfall der Bearbeitung des Ätzkeils ist bei der Fertigung des Demonstrators zu berücksichtigen. Um Auswirkungen von Gratbildung weiter zu minimieren wurde festgelegt, dass nach der Tiefenätzung bereits eine Teilausfräsung der Inlays erfolgt. Diese verbleiben im Fertigungspanel nur noch mit Steganbindungen verbunden. Mit einem nachträglichen Ätzprozess kann die dabei entstehende Grandbildung beseitigt werden. Außerdem ist es dadurch möglich den vorgelagerten Braunoxidationsprozess (Aufräuhung der Oberfläche vor Verpressung) auch an der Kante der Inlays durchzuführen. Somit erhöht sich die Qualität des Verbundes Inlay und Multilayer beim Laminierprozess.

Erkenntnisse:

- Die Entfernung des Ätzkeils durch nachträgliches Fräsen nach dem Tiefenätzprozess ist auf dessen Notwendigkeit hin zu prüfen – Tendenz vernachlässigbar.
- Design Rule Vorgaben wurden abzuleiten – nach diesem Stand ist ein Abstand zwischen Layout mit anderem Potential zum Inlay von 0,4mm bei einer Endkupferstärke von 35µm nicht zu unterschreiten. Diese Abstände sind bei anderen Endkupferstärken im Verhältnis zu interpolieren.
- Um die Haftfestigkeit des Inlays im Laminierprozess, sowie die Gratbildung durch Fräsen weiter zu minimieren, wird nach dem Tiefenätzprozess eine teilweise Ausfräsung der Inlays durchgeführt. Die Inlays sind im Panel nur noch über Steganbindungen angebunden. Ein nachträglicher Ätzarbeitsgang vor der Oberflächenbehandlung Braunoxidation minimiert die Gratbildung zusätzlich.

## 2.8 Funktionsbaugruppe

### 2.8.1 Presspolster (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Aus den Untersuchungen wurde ersichtlich, dass die Integration von Inlays nur mit Hilfe von pressunterstützenden Hilfsmitteln möglich ist. Diese Untersuchungen zu Presspolsteraufbauten wurden über den gesamten Projektzeitraum durchgeführt und angepasst.

Hierbei wurden Dauerpresspolster (Yamauchi TB 317K), sowie Einmalpresspolster (Pacothan Pacopad / Pacoplus) sowie Folien zur Verhinderung von Harzaustritt an die Oberfläche (Pacothan Pacovia) getestet.

Im Ergebnis sind Pacopad und Pacoplus als Kombination im Laminierprozess dafür geeignet

Druckverhältnisse bei unterschiedlichen Dicken im PCB-Aufbau auszugleichen. Das Presspolster TB 317K kann zwar mehrfach Verwendung finden, dessen Fähigkeit zum Druckausgleich ist aber deutlich geringer und für die Projektanwendung ungeeignet. Unbedingt zum Einsatz gebracht werden muss das pressunterstützende Material Pacovia. Dieses verhindert im klassischen Fall den Harzaustritt von Bohrungen. Im Projekt handelt es sich aber um die Rückhaltung von Harz entlang der Kante des Inlays und entspricht demzufolge höheren Anforderungen. Um die Wirksamkeit von Pacovia entfalten zu können, ist eine genaue Abstimmung des Lagenaufbaus, des einzusetzenden Prepregs unter Berücksichtigung des bereitgestellten Harzdepots, zur Verfüllung des Spaltes zwischen Inlay und Leiterplatte zu beachten. Nachvollziehbar wird diese Schwierigkeit durch die Stärke des äußeren Laminats, in der Dicke von 75µm.

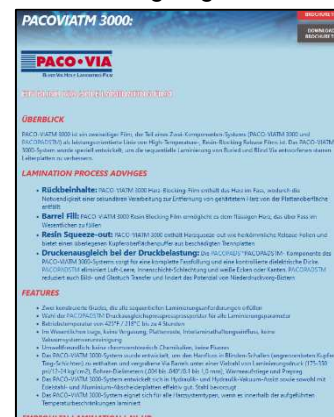


Abbildung 24: Paco-via FBG

Erkenntnisse:

- pressunterstützende Hilfsmittel sind einseitig mit einer Anordnung von Pacopad und Pacoplus anzuwenden um eine gleichmäßige Pressdruckverteilung zu erreichen
- zur Verhinderung eines Hammerschlageffektes wird auf der Seite auf der die Presspolster angeordnet sind ein dünnes Alublech zwischen Presspolster und Pressling angeordnet
- Auf der Seite mit herausstehenden Bereichen der Inlays erfolgt die Anordnung von Pacovia um ein Herausretren von Harz auf das Inlay oder die Platine zu verhindern.
- Entscheidend für den Erfolg ist ein abgestimmter Lagenaufbau unter Vermeidung von Höhenunterschieden zwischen Inlay und Platine, sowie unter Beachtung eines ausgewogenen Harz-depots, welches den Spalt zwischen Inlay und Platine verfüllt, aber nicht heraustreten kann.

### 2.8.2 Materialien (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Applikationen mit hohen Anforderungen an Strombelastbarkeit, sowie an hohe thermische Belastungen beim Bestückungsprozess mussten bei der Materialauswahl für die Funktionsbaugruppe berücksichtigt werden. Die Materialkosten sind hierbei in gleicher Art zu betrachten um ein marktwirtschaftlich sinnvolles Ergebnis zu erhalten. Verschiedene Materialuntersuchungen wurden in der Versuchsreihe PT 100 durchgeführt. Im Ergebnis wurde entschieden, dass ein Material mit einem TG von 180°C zum Einsatz kommen soll. Dessen Dauerbetriebstemperatur liegt bei 150°C, wodurch die Betriebstemperaturen der Bauteile die Belastung durch mehrfache Lötprozesse, sowie der Fügeverfahren Sintern und Diffusionslöten, abgesichert sind. In diesem Materialspektrum bietet sich wegen Preis, Verfügbarkeit sowie wegen Freigaben aus Automobil- und Luftfahrtanwendungen das Material 370 HR (ISOLA) an. Im

Abbildung 25: Data Sheet 370HR

Materialdatenblatt des Herstellers ist die Beständigkeit des Materials gegenüber Temperaturbelastung von 288°C (typische Löttemperatur für bleifreie Prozesse) mit 30 min angegeben.

Für eine Verstärkung der Wärmeabführung sind Anwendungen mit Alu-, sowie mit Kupfer Heatsink bekannt. Anwendungen mit gleichartigen Metallkombinationen finden sich auch in IMS Platinen oder in Materialkombinationen mit diesen Materialien. Verarbeitungsfähig in einem Leiterplattenaufbau sind auch Materialien, welche eine Kupferoberfläche aufweisen, da Kupfer in den Arbeitsgängen der Leiterplattentechnologie ausschließlich Anwendung finden. Darüber hinaus sind Integrationen von andersartigen Metallen in der Leiterplattenindustrie ausgeschlossen. Der Grund sind Chemieverschleppungen bzw. Badverunreinigungen, welche die laufende Produktion gefährden würden. In Folge der Anwendungsanforderung nach Materialien mit geringer Z-Achsenausdehnung wurde untersucht, was es bedeutet, wenn kupferbeschichtete Inlays aus Molybdän zum Einsatz kommen würden. Hierbei stellte sich heraus, dass sich der reine Materialpreis bei Anwendung derartiger Inlays um das 38-fache erhöhen würde. Der Ansatz wurde verworfen.

### Funktionsbaugruppe\_V1 (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Parallel zu der Prozessierung von PT 100 und ZVT wurde die Fertigung eines Entwurfes der Funktionsbaugruppe getestet. Hierbei ging es vorrangig darum ein 3-D-Kupferinlay herzustellen und über einen Laminierprozess im Layout zu integrieren. Herkömmliche Programme zur Layouterstellung bzw. zur Fertigung von Platinen sehen die Anwendung von Inlays nicht vor, weshalb ein enger Abstimmungsprozess zur Layoutbereitstellung im Vorfeld mit dem Projektpartner IMG durchgeführt werden musste. Laufend eingeflossen sind die Erfahrungen der Testreihe ZVT. Getestet wurde bei dieser Funktionsbaugruppe der technologische Ablauf für dessen Herstellung. Bei der

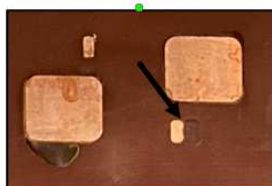


Abbildung 27: FBG Layoutfehler

Funktionsbaugruppe handelt es sich um eine Anwendung mit 3 verschiedenen Kupferinlays (hellgrün), welche an verschiedenen Stellen (dunkelgrün) bis zur Oberfläche geführt werden. Auf der Oberfläche sind die herausstehenden Inlayteile teilweise mit dem Layout dieser Ebene galvanisch anzubinden. Mehrere Vorbereitungsfehler führten zu Ausfällen durch fehlerhafte Tiefenätzung, in dessen Folge Harzmangel, Delaminierung und Chemieeintrag in die Schaltung auftraten. Ein Layoutfehler führte zu Versatz

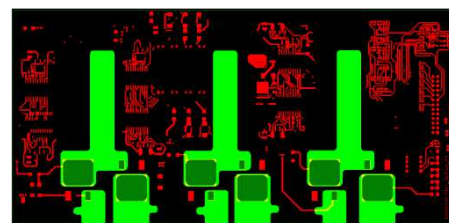


Abbildung 26: FBG\_V1

in der Passgenauigkeit der Schaltung. Zusätzlich führte ein Vorbereitungsfehler zu einer spiegelverkehrten Anordnung der Ebenen im 1. Durchlauf. Das Kupferblech blieb innerhalb der Ätzkammer hängen. Dadurch erhöhte sich die Abtragung von angestrebten 200µm auf 600µm. Die

Prozessierung der Schaltung wurde nach Anpassung des Lagenaufbaus weitergeführt. Vor dem Laminierprozess wurde festgestellt, dass die Ätzung auch noch von der falschen Seite ausgeführt wurde. Deshalb kam es zu einer spiegelverkehrten

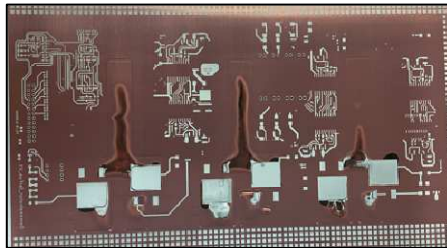


Abbildung 28: FBG spiegelverkehrt

Anordnung der Lagen. Auch hier erfolgte die weitere Prozessierung der Platinen. Ebenfalls vor dem Laminierungsprozess wurde eine unterschiedliche Positionierung herausstehender Bereiche zum Inlay festgestellt. Dies führte zu Nacharbeit und zu Unsauberkeit im Laminierungsprozess. Der erste Durchlauf wurde nach Strukturierung der Außenlagen abgebrochen, weil in Folge der Fehler Chemieeintrag, sowie Harzmangel bzw. Delaminierungen vorlagen.

Da die Inlayfertigung für einen weiteren Durchlauf bereits vorlag, konnte bei einem nachfolgenden Fertigungsdurchlauf nur der Fehler des gespiegelten Aufbaus beseitigt werden.

Nicht zu verhindern waren der Versatz bei den Inlays, sowie der Chemieeintrag, der auf die notwendige Korrektur des Lagenaufbaus zurückzuführen war. Trotzdem konnte dieser nachfolgende Fertigungsdurchlauf bis zum Ende des Ablaufs durchgeführt werden. Beide Testdurchläufe wurden zu internen Auswertungen benutzt und den Projektpartnern für Fügeversuche zur Verfügung gestellt. Diese Fertigungsdurchläufe dienten der Festlegung des technischen Fertigungsablaufs.

### 2.8.4 Funktionsbaugruppe final Dickkupfer (technologischer Vergleich) (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Nach Layoutkorrektur durch Abstimmungsprozess im Projektteam wurde festgelegt, dass parallel zu der finalen Funktionsbaugruppe die endgültige Schaltung (Funktionsbaugruppe) mit gleichem Layout in einer Dickkupfertechnologie aufzubauen ist. Um hier vergleichbare Schaltungen in Bezug auf Stand der Technik für Dickkupfer zu fertigen wurde die Lagenanzahl von 4 auf 6-Lagen, wobei das Layout

GTL-Endkupfer	70 µm 100 %	370 HR ML
	2116 [ P1, 05 ]	370 HR ML
	2116 [ P1, 05 ]	370 HR ML
G1	360,3 µm	370 HR ML
	70 µm 55 %	370 HR ML
G1	354 µm	360 µm [ 2 x 7628 ]
	70 µm 55 %	370 HR ML
	2116 [ P1, 05 ]	370 HR ML
G2	328,8 µm	370 HR ML
	70 µm 55 %	370 HR ML
G2	314 µm	360 µm [ 2 x 7628 ]
	70 µm 55 %	370 HR ML
	2116 [ P1, 05 ]	370 HR ML
	2116 [ P1, 05 ]	370 HR ML
GBL-Endkupfer	359,6 µm	370 HR ML
	70 µm 100 %	370 HR ML

der Innenlagen doppelt eingebracht wurde. Die Kupferschicht auf den Innenlagen wurde von 35µm auf 105µm erhöht. Auf allen Layern wurde das Inlay komplett als Fläche integriert. Die Definition der freistehenden Pads in diesen Bereichen erfolgt über die



Abbildung 30: FBG Dickkupfer

Abbildung 29: FBG Dickkupfer Lagenaufbau

Stopplackstrukturierung.

Nach Fertigstellung der Schaltungen kann entschieden werden in welcher Art ein Vergleich mit der finalen Fertigungsbaugruppe erfolgen soll und ob mit Anwendung der neuen Fügeverfahren funktionsfähige Schaltungen fertigbar sind und wie sich die Wärmeableitung in Bezug auf benachbarte Bauelemente auswirkt.

### 2.8.5 Funktionsbaugruppe final (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

In der Funktionsbaugruppe wurden alle im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse berücksichtigt. So wurden weiterentwickelte Presspolsteraufbauten angewendet um eine möglichst saubere Laminierung von 3-D-Kupferinlays zu fertigen. Für deren Herstellung wurde auf Basis der fertigungstechnischen Möglichkeiten der Leiterplattenindustrie, über mehrere Entwicklungsstufen, eine Technologie erarbeitet. Qualitätsrelevant war hierbei die Umstellung von mechanischer Bearbeitung zu einem kombinierten Galvanik Tiefenätzprozess. Dabei wird mittels eines Ätzprozesses die Tiefenätzung ausgeführt. Als Ätzresist kommt hierbei eine galvanische Zinnschicht zum Einsatz um später herausstehende Bereiche vor dem Ätzmedium zu schützen. Nachfolgend wird ein Zwischenfräsen ausgeführt, bei dem die Kontur der Inlays bis auf Steganbindungen gefräst wird. Ein zusätzlicher Ätzprozess, welcher die Gratbildung im Konturbereich der Inlays beseitigt, folgt nach



Abbildung 31: FBG Inlay mit Steganbindung

dem Zinnstrippen. Abschließend werden erneut durch Fräsen die Stege entfernt, wodurch die Bearbeitung der Inlayteile abgeschlossen wird. Der zwischenzeitlich bei der Entwicklung ausgeführte Fräsarbeitsgang zur Entfernung des Ätzkeils wurde nicht mehr ausgeführt, da hierbei Schwankungen in diesen Tiefenfräsbereichen zu eher negativen Auswirkungen auf die Qualität der Inlayteile geführt haben. Die 3-D-Inlayteile lagen danach in ausgefräster Form für die Laminierung im Leiterplattenaufbau vor. Als wesentlichen Vorteil betrachtet G&W, dass diese Technologie dazu führt, dass die 3-D-Kupferteile mit den vorhandenen Anlagen hergestellt werden können. Die damit verbundene Unabhängigkeit von Dienstleistungen erhöht die terminliche und kostenseitige Planungssicherheit bei der Fertigung derartiger Anwendungen. Mit dieser Technologie wird auch die Flexibilität zur Herstellung unterschiedlichster 3-D-Inlays ermöglicht. Die erarbeitete Technologie ist für eine externe Dienstleistungen bei 3-D-Kupferteilen denkbar. Als Erfahrung bisher prozessierter Baugruppen wurde die Herstellung der Ausfräsungen in den einzelnen zu fräsenden Laminaten und Prepregs erst nach Fertigstellung der 3-D-Kupferinlays vorgenommen. Hierbei ist das Ziel die Inlayteile nahezu spaltfrei in die unterschiedlichen Laminataufbauten einzupassen. Die Fräsprogramme werden somit dem Inlay angepasst. Verwendet werden dafür Korrekturfaktoren in den Fräsprogrammen. Der anschließende Laminierprozess unter Verwendung der



Abbildung 32: FBG Inlay nach Fertigstellung

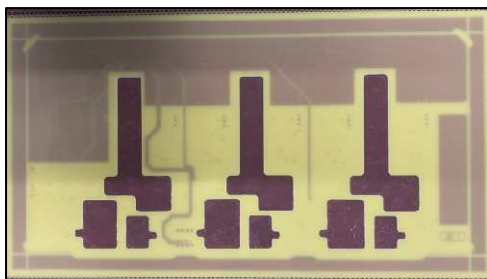


Abbildung 33: FBG Inlayintegration

Pressspolsteraufbauten bildet nun einen weiteren Schwerpunkt bei der Herstellung der Platine mit integriertem Inlayteil. In der Funktionsbaugruppe steht das Inlay einseitig bis zur Oberfläche heraus. Die untere Seite wird durch Prepreg nach außen abgeschirmt. Der Einsatz von Wärmeleitprepreg wurde in vorherigen PT100 Testreihen als technisch möglich bewiesen. Für die Funktionsbaugruppe wurde der Wärmeleiteneffekt dieser

Materialien, welcher in

den Testreihen PT100 untersucht wurde, gegenüber der Erhöhung der Herstellkosten abgewogen. Im Projektverbund wurde entschieden hierbei auf Wärmeleitprepregs zu verzichten. Dieser Entscheidung ging die Überlegung voraus, mit der Anwendung eine möglichst breite Anwendungsmöglichkeit aufzuzeigen. Somit wurde die Entwicklung bewusst an die Anwendung von Standardarbeitsgängen der Leiterplatte gekoppelt. Nach dem Laminierungsprozess erfolgt die Fertigstellung der Funktionsbaugruppe im Standardprozess der Leiterplattenherstellung.

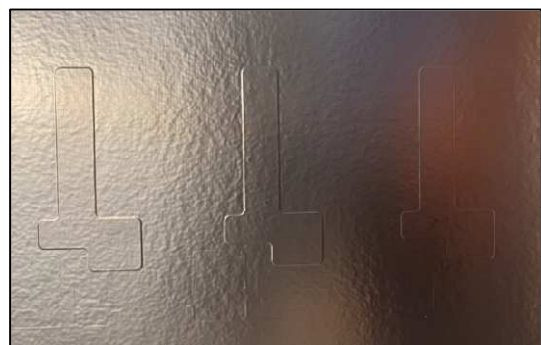


Abbildung 34: verpresste Inlays - FBG

Schwierigkeiten bereitete die Einarbeitung von Bohrungen des Durchmessers 6,0mm, welche im Bereich des Inlays angeordnet sind. Hierbei war eine Gratbildung nur dadurch zu vermeiden, in dem diese in gefräster Ausführung gefertigt wurden. Der weitere Fertigungsverlauf entsprach dem

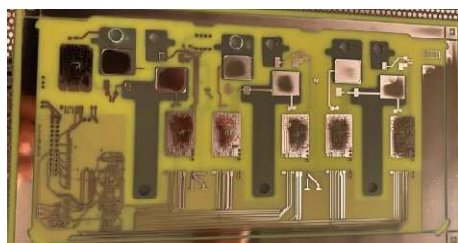


Abbildung 35: FBG geätzt

Standardprozess der Leiterplattenfertigung und führte zu keinen weiteren Schwierigkeiten. Die Bereiche in denen die neuen

Fügetechnologien vorgesehen sind, wurden mit Abdecklack gegen die Veredelung der Kupferoberflächen geschützt (siehe



Abbildung 36: FBG

Abbildung 8, Seite 7).

Die Funktionsbaugruppen wurden fertig prozessiert und den Projektpartnern zur Bestückung unter Anwendung der neuen Fügetechnologien Sintern und Diffusionslötten bereitgestellt.

## 2.9 Projektergebnisse (AP 6.1; AP 6.2)

Im Projekt war die Integration von Fügeverfahren Sintern und Diffusionslöten für die Bestückung von Leiterplatten das Ziel des Projektes. Dabei konzentrierte sich das Projektteam vorrangig auf den Einfluss der Wärmeausbreitung der Fügeverfahren auf umliegende Bauelemente und auf die Art des für die Fügeverfahren notwendigen Materialanforderungen. Als Leistungen, die durch G&W erbracht werden mussten, sind die Herstellung von 3-D-Inlays, dessen Integration in einen Platinenaufbau, sowie daraus abzuleitende Layoutvorgaben zu benennen. Weiterhin wurden Materialuntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit durchgeführt, welche bei G&W zu einer Materialfreigabe für Wärmeleitprepregs führten.

### 2.9.1 Kupferinlay (3-D-Technologie) (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Die Herstellung von Leiterplatten basiert standardmäßig auf Kupferbasis. Aus diesem Grund ist die Integration von Inlays aus Kupfer naheliegend.

Alternativ wären Inlayteile mit Kupferoberflächen denkbar. Als Anforderung bestand die Aufgabe die zu integrierenden Inlayteile in einer partiellen Dickenreduzierung als 3-D-Teil zu integrieren. Grund hierfür ist eine möglichst große Wärmeverteilung unter Bereitstellung von Flächen für die Layoutgestaltung und somit Schaffung von komplexerer Layoutgestaltung der Schaltungen. Der Bezug von Kupferinlays dieser Art durch externe Dienstleistung führte wegen zu hoher Initial- und Herstellungskosten zu keinem Erfolg. Großen Einfluss hatte hierbei die geringe Stückzahl benötigter Inlays.

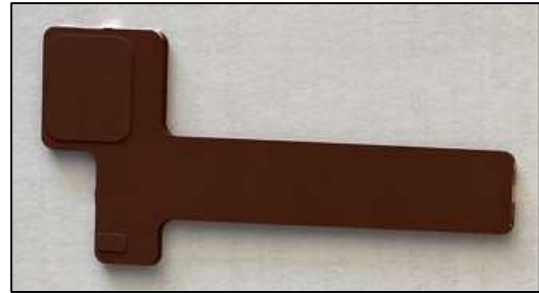


Abbildung 37: 3-D-Kupferinlay FBG

Die Fertigung der Inlayteile wurde daher in der mechanischen Bearbeitung innerhalb des Unternehmens angestrebt. Hierbei sind die Materialeigenschaften des relativ weichen Kupfers, welches unter Wärme zu Werkzeugverschmierungen mit der Folge verstärkter Gratbildung führt, eine besondere Schwierigkeit, weil auf Grund der technologischen Anforderungen in der Leiterplattentechnologie der Einsatz eines Kühlmittels nicht möglich ist. Außerdem führt die notwendige flächige Tiefenfräsung zu Frässpurenunsauberkeiten in derartigen Bereichen. Die Summe dieser Unsauberkeiten konnten im Laminierprozess nicht mehr ausgeglichen werden, so dass Ausfälle durch Harzmangelercheinungen, Delaminierungen und sogar Chemieverschleppung im Laminataufbau auftraten.

Das mechanische Verfahren wurde durch eine Kombination von fototechnischen, galvanischen und Ätzverfahren weitestgehend abgelöst. Hierbei konnte eine hohe Qualität der Inlayteile durch gezielte Ätzung erreicht werden. Diese Technologie ist letztlich aus mehreren Gründen zielführend.

#### Ergebnisse:

- externe kostenintensive und terminlich längerfristige externe Dienstleistung ist für Bezug von Inlayteilen nicht notwendig,
- die angewendete Technologie ist äußerst flexibel und deshalb kostengünstig herstellbar
- Die Datenverarbeitung ist in dem Prozess der Herstellung der Betriebsmittel für die Fertigung der Leiterplatte integriert, wodurch Fehlerursachen wesentlich reduziert werden konnten
- Da ausschließlich Standardarbeitsgänge der Platinenfertigung angewendet werden, führt die Bereitstellung der benötigten Inlays zu keiner größeren terminlichen Verzögerung
- Der erarbeitete Stand ist in seiner qualitativen Reife so weit, dass G&W eine externe Dienstleistung hierzu anbieten könnte.

### 2.9.2 Wärmeleitprepregs (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Die Anforderungen der zu untersuchenden Füge Technologien erfordern ein umfangreiches Wärmemanagement, um Schädigungen durch Wärmeableitung der Füge Technologien an umliegenden Bauteilen zu vermeiden. Die beste Wärmeableitung sind bei einer beidseitig oberflächigen Verpressung eines Kupferinlays zu erwarten. Dies stellt für den Aufbau aus Laminat und Prepreg eine große Herausforderung in der Dickenabstimmung dar, da für den weiteren Prozessdurchlauf eine Dickentoleranz von 20µm, zwischen Inlay und Laminataufbau nach der Verpressung, nicht überschritten werden darf. Die Folge wären Resistunterwanderungen mit Kurzschlussbildung, welche zu Ausfall oder erhöhter Nacharbeit führen würden. Außerdem wären Maßnahmen zu ergreifen, welche die Verankerung des Inlays im Laminataufbau gewährleisten. Die Integration der Inlays bei der Funktionsbaugruppe wurde deshalb nur einseitig auf die Oberfläche geführt, wobei durch einen entsprechenden Presspolsteraufbau ein Verbund im notwendigen Toleranzbereich kleiner 20µm erzielt werden konnte. Um trotzdem eine optimale Wärmeabführung auf die Unterseite der Platine nachzuweisen, wurden Untersuchungen zum Einsatz von Wärmeleitprepreg und eines speziellen wärmeableitenden Füllstoffs mit Harz getestet. Mit dieser

abschließenden Isolationsschicht wurde ein optimales Wärmemanagement für derartige Platinen erzielt. Die entsprechende Aussage lässt sich durch die vergleichenden Testaufbauten von PT 100 ableiten. Außerdem kann mit dieser flächigen Verbundvariante die Festigkeit der Integration des Inlays qualitativ hoch erfolgen. Die abschließende Unterseite des Platinenaufbaus kann für die Layoutgestaltung genutzt werden, was den Bestrebungen an die Miniaturisierung von Schaltungsbildern entgegenkommt. Für die Funktionsbaugruppe wurde nach Festlegung im Projektteam kein Wärmeleitprepreg zum Einsatz gebracht. Damit beabsichtigt das Projektteam eine höhere Akzeptanz bei derartigen Anwendungen, weil ein homogener Aufbau eines Standard Hoch Tg Materials vorliegt.

### 2.9.3 Design-Rules (AP5.2; AP 5.7; AP 6.1; AP 6.2)

Bei der Integration von Inlays aus Kupfer in eine Schaltung sind folgende Design-Rules zu beachten:

- Herausstehendes Inlay ist elektrisch an das Layout dieser Lage anzubinden:  
Die Fläche von Pads, in der das herausgeführte Inlay platziert ist, ist umlaufend 0,3mm größer als die Fläche der Inlays auszuführen. Die elektrische Anbindung erfolgt dann über eine galvanische Kupferabscheidung. Die umlaufende Anbindungsmöglichkeit erhöht die Sicherheit des Anschlusses an die Schaltung.
- Frässpalt zwischen herausgeführten Flächen von Inlays und dem Laminat:  
Der Frässpalt darf 40µm nicht überschreiten. Ggf. ist durch Verwendung eines kleinen Fräsdurchmessers bei der Herstellung der Ausfräsungen im Laminat und Prepreg die Frästoleranz zu minimieren
- Die Ausfräsungen von Prepreg und Laminaten sind erst nach Fertigstellung der Inlays auszuführen um eine hohe Passgenauigkeit zu erreichen. Anwendung finden hierbei Kompensationsfaktoren zur Anpassung der einzelnen Programme.
- Gestaltung der Ecken von herauszuführenden Flächen:  
Die Ecken der herausgeführten Flächen von Inlays sind dem zu verwendenden Fräsdurchmessers anzugleichen. Sie sind in jedem Fall mit Radien auszuführen.  $R \geq 1,0\text{mm}$  wird empfohlen
- Abstände zwischen herausgeführten Flächen von Inlays zu Layoutbereichen mit anderem Potential: Dieser Abstand wird im Wesentlichen durch die in der Leiterplattenfertigung bekannten Layoutdesignregeln der entsprechenden Kupferschichtstärken der Layer bestimmt. Um die Sicherheit für die Strukturierung dieser Layer zu gewährleisten ist dieser Mindestisolationsabstand mit Faktor 2 zu berücksichtigen  
Grund hierfür sind eventuelle Höhenunterschiede zwischen Inlay und Laminataufbau, welcher zu Schwierigkeiten bei der Strukturierung der entsprechenden Layoutseite führen könnte.
- Heatsinkbohrungen:  
Die Einarbeitung von Heatsinkbohrungen auf der isolierten Unterseite des Inlays sind als Blind via Bohrungen nach Standardtechnologien möglich. Bei hybriden Inlaymaterialien mit Oberfläche Kupfer kann die Ausführung derartiger Bohrungen nur in Lasertechnologie ausgeführt werden.
- Um die Fügetechnologien, welche die Verbindung Kupfer – Kupfer als metallreines Gefüge zum Ziel haben, sind die Fügeflächen durch Abdecklack gegen übliche Oberflächenveredlung zu schützen. Ist diese Anforderung zum Aufbringen erforderlich, ist bei der Platzierung benachbarter Lötflächen, der technologisch bedingte Versatz durch Siebdruck zu berücksichtigen. Er sollte umlaufend 0,4mm größer als die abzudeckende Fläche nicht unterschreiten
- Einzuhalten ist ein Abstand zu übrigen Bestückungsflächen von weiteren 0,2mm um eine saubere Oberflächenbeschichtung mit einer lötfähigen Oberfläche zu gewährleisten.
- Eine 3-D-Gestaltung beim Einsatz von hybriden Inlays mit Kupferoberfläche ist bisher ungelöst.

### 2.9.4 Eignung der Fügetechnologieverfahren (AP 6.1; AP 6.2)

Die Fügetechnologien Sintern und Diffusionslöten stellen unterschiedliche Anforderungen an die zu fügenden Materialien. In Bezug auf Temperatur erfordern beide erhöhte Anforderungen. Bei der Materialauswahl war dies zu berücksichtigen. Es wird empfohlen ein Material mit min. 180°Tg einzusetzen. Die Zeit, welche das Material mit erhöhten Temperaturen belastet wird ist durch Einsatz von Materialien mit höherem Tg abgesichert. Da dies nur partiell erfolgt, hat dies geringen Einfluss auf die Lötbarkeit der Schaltung an sich. Eine Verringerung der möglichen Lötanzahlen ist dadurch nicht zu erwarten. Das Fügeverfahren Sintern erfolgt unter Anwendung von hohem Druck. Dabei bestimmt die Starrheit der zu fügenden Materialien die Qualität des Verbundes. Die Einarbeitung von Inlaymaterialien mit geringer Z-Achsenausdehnung wurde deshalb untersucht. Es erwies sich, dass ein Material Molybdän mit oberflächiger Kupferbelegung diese Anforderungen erfüllen würde. Allerdings führt der starre Verbund zu Spannungen bei den zu erwartenden Temperaturwechseln während des Einsatzes. Die Folge können sich in Form von Hülsenriss bzw. Delaminierung im Verbund auswirken. Die Duktilität des Kupfers kann dies nicht mehr ausgleichen.

Im Preisvergleich ist dieses Verbundmaterial im Verhältnis von ca. 1:280 teurer als reines Kupfer. Die damit verbundenen erhöhten Materialkosten lassen sich nur bei speziellen Anwendungen abbilden. Für

eine breite Anwendung als Lösung für ein neues Fügeverfahren ist dies ein entscheidender Nachteil. Die bei Kupfer entwickelte 3-D- Inlay Fertigung ist bei dem Verbundwerkstoff nicht umsetzbar. Somit kann bei der Miniaturisierung von Schaltungen durch die Schaffung einer dritten Ebene nicht wirksam werden. Aus Sicht der Leiterplattenfertigung ist das Verfahren Diffusionslöten dem Verfahren Sintern als neuartiges Fügeverfahren vorzuziehen.