

# **Leiterplattenbasiertes Packaging zur Systemintegration mittels Film-Assisted Transfer Molding**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte  
Abhandlung**

**Vorgelegt von**

**Dipl.-Ing. Daniel Hera**

**aus Eisenmarkt**

**Hauptberichter: Prof. Dr. André Zimmermann  
Mitberichter: Prof. Dr. Joachim N. Burghartz**

**Tag der mündlichen Prüfung: 27.04.2018**

**Institut für Mikrointegration der Universität Stuttgart**

**2018**



Diese Abhandlung widme ich meiner Frau Anne-Kathrin,  
denn nur durch ihren Rückhalt ist es gelungen  
diese Ausarbeitung anzufertigen.



## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	7
Zusammenfassung.....	9
Abstract.....	10
1. Einleitung .....	11
2. Grundlagen.....	13
2.1 Epoxy Molding Compound .....	13
2.2 Leiterplattenherstellung .....	17
2.3 Transfer Molding .....	21
2.4 Film-Assisted Transfer Molding (FAM) .....	24
2.4.1 Anwendungsgebiete .....	25
2.4.2 Freistellungen auf Sensoroberflächen.....	26
2.4.3 Leadframe-basierte Packages .....	28
2.4.4 Leiterplattenbasierte Packages.....	28
2.5 Werkzeugbau für das Film-Assisted Molding.....	29
2.5.1 Fertigung eines FAM-Werkzeugs .....	33
2.5.2 Oberflächen im Hinblick auf Film-Assisted Transfer Molding .....	34
3. Hypothese .....	35
4. Konzeption leiterplattenbasiertes Packaging .....	40
4.1 Konzeption eines Leiterplattennutzens für das FAM.....	41
4.2 Toleranzbetrachtung Leiterplatte .....	47
4.3 Konzeption und Fertigung eines FAM-Werkzeugs.....	55
4.3.1 Werkzeug für Standard-Packages .....	55
4.3.2 Werkzeug für Sensoren mit Medienzugang .....	57
5. FAM-Prozessführung.....	63
5.1 FAM-Prozess für Standardpackages .....	64
5.1.1 Auswirkung FAM-Prozesstemperaturen auf den Leiterplattennutzen (LN) .....	64
5.1.2 Verarbeitung der bestückten QFN-FlexPac-LN.....	67
5.2 FAM-Prozess für Packages mit Medienzugang .....	68
5.2.1 AVT-Prozess zur präzisen Montage der Bildsensoren auf den LN .....	68
5.2.2 Verarbeitung der bestückten Bildsensor-FlexPac-LN.....	70
5.3 FAM-Prozess für MEMS-Packages am Beispiel eines Inertialsensors.....	74
5.3.1 Voruntersuchung zum MEMS-Packaging .....	76
5.3.2 Hauptuntersuchung zum MEMS-Packaging.....	80
5.4 Vereinzeln der Leiterplattennutzen .....	86

6	Charakterisierung und Zuverlässigkeit der FlexPac .....	89
6.1	Charakterisierung der QFN- und Bildsensor-FlexPac .....	89
6.1.1	Optische Charakterisierung QFN-FlexPac .....	89
6.1.2	Elektrische Charakterisierung der QFN-FlexPac.....	96
6.1.3	Verzugscharakterisierung des QFN-FlexPac .....	97
6.1.4	Optische Charakterisierung Bildsensor-FlexPac .....	99
6.1.5	Elektrische Charakterisierung Bildsensor-FlexPac.....	103
6.2	Prüfmethoden Umwelttests .....	104
6.2.1	Zuverlässigkeit eines QFN-FlexPac.....	106
6.2.2	Zuverlässigkeit eines Bildsensor-FlexPac.....	113
7.	Hafffestigkeit eines EMC auf verschiedenen Oberflächen .....	116
7.1	Prüfmethodik.....	116
7.2	Haftung auf verschiedenen Werkzeugbeschichtungen .....	122
7.3	Haftung auf den Leiterplattenoberflächen.....	125
7.3.1	Einfluss des Angusses auf die Hafffestigkeit des Prüfkörpers.....	126
7.3.2	Einfluss des Aushärte drucks $p_c$ und der Plasmavorbehandlung auf die Hafffestigkeit .....	129
7.3.3	Einfluss der Pd-Barriere und des Halogenanteils im FR4 auf die Hafffestigkeit.....	133
7.3.4	Einfluss des Entformungshilfeanteils im EMC auf die Hafffestigkeit .....	139
8.	Neuartige Integrationstechnologien für System-In-Package .....	142
8.1	Elektrische Integration.....	143
8.1.1	Federkontakte.....	143
8.1.2	FAM-Vias.....	148
8.1.3	Antennenstruktur als Anwendungsbeispiel.....	154
8.2	Optische Integration .....	157
8.2.1	FAM transparenter EMC .....	158
8.2.2	Mehrkomponenten-FAM .....	160
8.3	Mikrofluidische Integration.....	161
9.	Zusammenfassung .....	167
	Literatur .....	170
	Danksagung .....	173
	Lebenslauf.....	174

## Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit (anwendungsspezifische integrierte Schaltung)
Au	Gold
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BN	Bornitrid
C	Kapazität
COB	Chip on Board
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
Cu	Kupfer
def.	definiert
DLC	Diamond Like Carbon
EMC	Epoxy Molding Compound
FAM	Film-Assisted Transfer Molding
FlexPac	flexibles leiterplattenbasiertes Package
FW	Feuchtwärmelagerung
IC	Integrated Circuit (Integrierter Schaltkreis)
ICA	isotrop leitender Klebstoff
K	Kelvin
LSA	Low Stress Additive
MEMS	Micro-Electronic-Mechanical System
MHD	Mindesthaltbarkeitsdatum
MLL	Mehrlagenleiterplatte
N	Newton
NCA	nicht leitender Klebstoff
Ni	Nickel
opt.	Optisch
$p_a$	Auflagedruck
$p_c$	Cure Pressure, Aushärtedruck
PCB	Printed Circuit Board, Leiterplatte
Pd	Palladium
$p_k$	Klemmdruck

ppm	parts per million
PTFE	Polytetrafluorethylen
<i>R</i>	Widerstand
Si	Silizium
SIP	System-In-Package
SMD	Surface Mounted Device
SR	Soak Reflow
TL	Temperaturlagerung
$T_g$	Glasübergangstemperatur
TM	Transfer Molding
TW	Temperaturwechseltest
WEP	Wareneingangsprüfung
WZE	Werkzeugeinsatz
z.B.	zum Beispiel
ZVT	Zuverlässigkeitstest



## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Klärung der Hypothese, dass komplexe Systemintegration auf standardgefertigten Leiterplattenträgern mittels Film-Assisted Molding (FAM) für Serienprozesse möglich sind. Um die Fragestellung zu beantworten, wurde die Systemintegration von mikroelektronischen Bauteilen in leiterplattenbasierten Packages mittels FAM erfolgreich anhand eines QFN-, Bildsensor- und Inertialsensor-FlexPac (flexible leiterplattenbasierte Packages) sowie einiger System-in-Package-Anwendungen (SIP) demonstriert. Dabei wurde eine Prozesskette zur Herstellung von FlexPac entwickelt und deren Umsetzung exemplarisch demonstriert. Die entwickelte Prozesskette stellt sich wie folgt dar: 1. Konzeption eines PCB-Layouts (Printed Circuit Board), 2. Fertigung des PCB, 3. Konzeption und Fertigung eines FAM-Werkzeugs, 4. Aufbau- und Verbindungstechnik der mikroelektronischen Komponenten auf dem PCB, 5. FAM-Prozess, 6. Temper-Prozess, 7. Vereinzelung in diskrete FlexPac, 8. Charakterisierung. Eine Toleranzbetrachtung der Leiterplattentechnologie (PCB) hat gezeigt, dass die Toleranzen der PCB für präzise Bestückungsanforderungen ungeeignet sind. Daher wurde ein Bestückungsverfahren entwickelt, das die Toleranzen in der x/y-Ebene kompensiert. Anhand des QFN-FlexPac wurde die Grundlage für die Erzeugung von leiterplattenbasierten Packages geschaffen und deren Gleichwertigkeit zu leadframe-basierten QFN-Packages aufgezeigt. Mit dem erfolgreich umgesetzten Bildsensor- sowie Inertialsensor-FlexPac wurde das große Potential der FlexPac-Technologie gegenüber herkömmlichen Packages nachgewiesen. Die als Sonderlösung vorgestellten FlexPac haben dabei demonstriert, wie unkompliziert zuverlässige Packages, die keinem Standardgehäuse entsprechen, mittels PCB und FAM hergestellt werden können, um den Anforderungen von kleinen und mittleren Unternehmen flexibel entgegen zu kommen und dabei Kosten einzusparen. Es wurden neuartige Integrationstechnologien für die Herstellung von leiterplattenbasierten SIP besprochen. Die Integrationstechnologien wurden dabei in elektrische, optische und mikrofluidische Integration unterteilt. Des Weiteren wurde eine Prüfmethode zur Bestimmung der Haftfestigkeit eines EMC (Epoxy Molding Compound) auf diversen Oberflächen entwickelt. In der dargestellten Untersuchung wurde gezeigt, dass die Haftwirkung des EMC auf unbehandelten und beschichteten Werkzeugoberflächen hervorragend ist. Nur eine dispersive PTFE-Beschichtung verhindert das Anhaften des EMC am Werkzeug. Weiterhin wurde eine ausführliche Untersuchung zur Haftung eines EMC auf fünf verschiedenen PCB-Oberflächen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss von Oberflächenaktivierung mittels Plasmabehandlung untersucht. Es stellte sich heraus, dass die beste Haftung eines EMC auf der Basismaterialoberfläche der PCB erzielt wird und dass eine Plasmaaktivierung der Polymeroberflächen die Haftfestigkeit häufig verbessert. Zudem hat sich gezeigt, dass die Art des Goldfinishes einen signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit des EMC ausübt.

## Abstract

This thesis deals with the hypothesis that complex system integration is possible for serial processes by using standard PCB (printed circuit board) with the FAM (film-assisted molding) technology. To address this hypothesis the system integration of microelectronic parts in PCB (printed circuit board) based packages such as QFN-, image sensor- and inertia sensor-FlexPac as well as some SIP (system-in-package) applications were demonstrated. Thereby, a process chain for manufacturing of the FlexPac (flexible PCB based packages) was developed and demonstrated. The developed process chain is as follows: 1. PCB layout design, 2. PCB manufacturing, 3. design and interconnection of the FAM tool, 4. assembly and interconnection technology for the microelectronic parts on the PCB, 5. FAM process, 6. tempering process, 7. separation in discreet FlexPac, 8. characterization. The investigation of the PCB tolerances has shown PCB are not suitable for a precise placement process. Therefore, a new placement procedure to compensate the x/y PCB tolerances was developed. With the QFN-FlexPac the basis for the production of a PCB based package was established and the equivalence to lead frame-based packages was proven. Via the successful application of the process for packaging of image and inertia sensor-FlexPac, the enormous potential of the FlexPac technology compared with conventional packages was shown. FlexPac were presented as special solutions and it was demonstrated how uncomplicated such packages could be reliably produced by means of the PCB and FAM technology to fit the requirements for small and medium-size enterprises for flexible packaging solution and to reduce the production costs. Furthermore, new integration technologies for the manufacturing of PCB based SIP were discussed. The integration technologies were divided in approached for electrical, optical and microfluidic integration. Also, a test method for determining the adhesion strength of EMC (epoxy molding compounds) on various surfaces was developed. In the described investigation it was shown that the adhesion of the EMC on untreated and coated tool surfaces were strong. Only a dispersive PTFE coating prevented the EMC of sticking on the tool. Furthermore, a detailed investigation on the adhesion of an EMC on five different PCB surfaces was carried out. Thereby, surface treatments by means of plasma treatment were evaluated. It turned out that the best adhesion of an EMC on the PCB was achieved on the PCB basis material and that a plasma treatment improved mostly the adhesion strength on the polymer surfaces. In addition it was shown that the type of gold finish has a significant influence on the adhesion strength of an EMC on the gold finish.

## 1. Einleitung

Eine immer wichtigere Rolle in der Mikrosystemtechnik spielt die Herstellung von Systemgehäusen, dem sogenannten Packaging [1]. Elektronische Komponenten wie ASIC, IC, MEMS und andere Sensoren sind sensible Bauteile, die meist vor äußeren Einflüssen wie z.B. Feuchte, Atmosphärgasen und von außen wirkenden mechanischen Kräften geschützt werden müssen. Daher ist ein ganzer Markt entstanden, der sich mit der Herstellung von Packages von elektronischen Komponenten auseinandersetzt. Dieser Markt ist überwiegend in Fernost angesiedelt, da sich dort ein Großteil des Mikroelektronikmarkts befindet [2]. Die Art der Gehäuse reicht vom einfachen Vergießen eines Harzes über die auf einem Schaltungsträger montierten und elektrisch mittels Draht-Bond- oder Flip-Chip-Technik kontaktierten Nackchips bis zu robusten Gehäusen aus Kunststoff, Keramik und Metall. Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf den robusten Kunststoffgehäusen, da diese im Vergleich zu Metall- und Keramikgehäusen kostengünstig sind und daher von der Industrie stärker nachgefragt werden. Unter den Verfahren zur Herstellung der Kunststoffgehäuse wird überwiegend das Transfer Molding (Transferpressen, TM) eingesetzt [3]. Dabei werden Epoxy Molding Compounds (EMC) verarbeitet, die einen Rundumschutz der elektrischen Bauelemente darstellen. Da deren Matrix ein Duroplast ist, lässt sich das EMC nur einmal flüssig verarbeiten und ist danach nicht mehr aufschmelzbar. Nach der Verarbeitung verhält es sich durch eine hohe Kettenvernetzungsichte, mitunter ein Vernetzungsknoten auf jedes zehnte Kettenglied, spröde [4]. Deshalb können einmal mittels Duroplasten verkapselte elektronische Komponenten nicht wieder zerstörungsfrei aus dem Gehäuse entnommen und so gewährleistet werden, dass deren Komponenten rundum vor Umwelt- und mechanischen Einflüssen geschützt sind und ein Trennen der Komponenten aus dem EMC nur über Zerstörungsprozesse gelingt. Ein Kopieren des Packages durch Dritte wird daher erschwert.

Dass EMC basierte Packages nicht einfach kopiert werden können, ist für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) attraktiv und lukrativ, da sie damit ihr eigenes Know-how sichern und auf dem Elektronikmarkt bestehen können. Jedoch fehlt den KMU in Europa zumeist der kostengünstig herstellende Industriepartner. Für Standardkunststoffpackages können sie sich an die Industrie in Fernost wenden. Damit überhaupt gefertigt wird, müssen die KMU dafür eine hohe Stückzahl beauftragen. KMU benötigen jedoch häufig nur geringe Stückzahlen, sodass sie gezwungen sind, eine Sammelbestellung mit anderen KMU in Fernost zu tätigen. Damit gehen mitunter lange Wartezeiten einher und, da elektronische Baugruppen zur Einhausung nach Fernost gesendet werden, kann ein Verlust des eigenen Know-hows nicht ausgeschlossen werden [2].

Sonderlösungen, also von Standardkunststoffpackages abweichende Packages, werden nicht angeboten, da sich die Werkzeugkosten durch Entwicklung, Konstruktion und Fertigung für die benötigte, geringe Stückzahl für den Packagedienstleister in

Fernost nicht rentieren. Deshalb ist für KMU ein Bedarf an solchen Dienstleistern in Europa entstanden, die kostengünstig kleine bis mittlere Stückzahlen fertigen können und dabei flexibel sind, was die Art des Packages angeht. Dazu soll diese Arbeit einen Beitrag leisten.

Sonderlösungen benötigen meist komplexe Schaltungen, sodass Leadframes nicht als Schaltungsträger in dieser Arbeit dienen, da diese in ihren Verdrahtungsmöglichkeiten limitiert sind und lange Lieferzeiten bei Sonderfertigungen anfallen können. Hingegen stellt die PCB-Technologie (printed circuit board) die ideale Voraussetzung zur Herstellung von Sonderlösungen dar, denn diese Schaltungsträger können komplexe Schaltungen platzsparend über diverse Verdrahtungsebenen im laminaren Aufbau der PCB führen. Damit kann diese Technologie flexibel auf die kundenspezifischen Anforderungen eingehen und Schaltungen realisieren, die mit Leadframes unmöglich sind. Das bekannteste Material in der PCB-Technologie ist die FR4 (flame retardant 4), welche schnell verfügbar und Standard in der Elektronikbranche ist. So kann die PCB-Industrie in wenigen Tagen kundenspezifische PCB zu moderaten Preisen herstellen und liefern.

Mit der Kombination der TM- und PCB-Technologie können flexible leiterplattenbasierte Packaginglösungen kostengünstig auch in geringen Stückzahlen hergestellt werden. Hierfür wird in Kapitel 2 zunächst der Stand der Technologien erfasst und dann in Kapitel 3 eine Hypothese diskutiert, welche die Motivation dieser Arbeit herausstellt. Darauf folgend wird in Kapitel 4 ein Konzept und eine Prozesskette zur Herstellung leiterplattenbasierter Packages vorgestellt und in Kapitel 5 anhand eines leiterplattenbasierten QFN-, Bildsensor- sowie Inertialsensorpackage die Plausibilität der Prozesskette überprüft. In Kapitel 6 werden das leiterplattenbasierte QFN- und Bildsensorpackage charakterisiert und deren Zuverlässigkeit mittels Klima-, Temperaturlagerungs-, Temperaturwechsel- sowie Soak Reflow-Test nachgewiesen. Die Zuverlässigkeit der Materialpaarungen EMC/PCB und EMC/Werkzeugoberfläche wird in Kapitel 7 mittels einer in dieser Arbeit entwickelten Haftprüfung untersucht. Anschließend werden in Kapitel 8 einige Anwendungen für komplexe Systemintegration diskutiert und erläutert.

## 2. Grundlagen

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik dargestellt, der zum Verständnis der hier diskutierten Ergebnisse erforderlich ist. Im ersten Teil werden zum einen Materialien, welche beim Kunststoffverkapseln elektronischer Komponenten verwendet werden, umrissen. Dabei liegen die Schwerpunkte auf dem Verkapselungsmaterial EMC und dem PCB. Zum anderen wird das Transfer Molding als Verfahren zum Verkapseln von elektrischen Komponenten zu Standardpackages besprochen. Dabei wird zwischen leadframe- und leiterplattenbasierten Systemen unterschieden und die Besonderheiten dieser Trägermaterialien werden diskutiert. Nachfolgend wird das Film-Assisted Transfer Molding (FAM) als Weiterentwicklung des konventionellen TM vorgestellt. Betrachtet werden dabei die Anwendungsgebiete dieser Technologie. Anschließend wird der Werkzeugbau für das Film-Assisted Transfer Molding betrachtet. Hierbei werden die Anforderungen an die Werkzeuge sowie die Design Rules diskutiert.

### 2.1 Epoxy Molding Compound

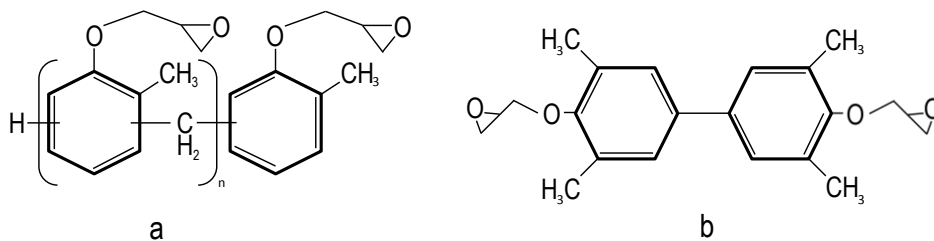


Abb.2.1-1: Strukturformel von a) Kresolnovolac Epoxid und b) Biphenyl-Struktur [5].

Das Verkapseln von Nacktchips (Halbleiter mit integrierter elektrischer Schaltung) ist notwendig, da diese zumeist sensiblen Bauelemente vor den äußeren physikalischen und chemischen Einflussfaktoren wie Druck und Erschütterungen sowie Feuchte, UV-Strahlung und Hitze geschützt werden müssen, da sonst deren Funktionalität gefährdet ist. Zudem soll das Package die verkapselten Nacktchips elektrisch isolieren und eine einfache Lösung bieten, diese auf einen Schaltungsträger zu montieren [5]. So sind in den letzten Jahren eine Vielzahl an Standardpackages entwickelt worden. Diese Packages sind in JEDEC Standards gelistet [6] und daher leicht in Schaltungen auf Leiterplatten integrierbar. Bei den kunststoffbasierten Standardpackages sind Vertreter wie QFN (Quad Flat No Leads Package), SOP (Small Outline Package), BGA (Ball Grid Array) und CSP (Chip Scale Package) zu finden. Die Nacktchips werden häufig auf einem Leadframe montiert und z.B. mittels Draht-Bonds elektrisch kontaktiert wodurch eine elektrische Baugruppe entsteht. Anschließend wird diese mit einem Epoxy Molding Compound (EMC) verkapselt. Mittels Transfer Molding wird die Verkapselung durchgeführt. Diese Technologie wird in Kapitel 2.3 erklärt.

Epoxy Molding Compounds werden aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften zur Herstellung von Kunststoffpackages verwendet. Es handelt sich dabei um hochgefüllte Verbundwerkstoffe, die grundsätzlich aus Epoxidharz als Matrix, sphärischem Siliziumoxid (amorph.  $\text{SiO}_2$ ), Härter, Flammhemmer und verschiedenen Additiven bestehen (Tab.2.1-1). Als Matrix wird üblicherweise Kresolnovolak Epoxid verwendet, das bei der Verarbeitung sehr niederviskos ist. In Abb.2.1-1a ist die Strukturformel des Kresolnovolak Epoxid gezeigt. Abhängig vom Polymerisationsgrad zur Zeit der Verarbeitung erreicht das Kresolnovolak Epoxid beim Aufschmelzen eine Viskosität in der Größenordnung von  $5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  [7]. Dieses ist für Füllgrade von bis zu 80 Gew.-% einsetzbar. Um den Füllgrad zu steigern und die niedrige Viskosität beizubehalten, wird ein kristallines und niederviskoses Epoxidharz mit Biphenyl-Struktur (Abb.2.1-1b) eingesetzt [5].  $\text{SiO}_2$  als Füllstoff hat die Funktion, den CTE (Wärmeausdehnungskoeffizient) des Epoxidharzes herab zu senken, damit er besser zu den anderen am Package beteiligten Materialien passt. Damit soll ein spannungsarmes Package mit geringem Verzug realisiert werden können.

Tab. 2.1-1: Zusammensetzung eines Epoxy Molding Compounds für ein Elektronikpackage [5], [7].

Bestandteil	Funktion/Eigenschaft	Gewichtsanteil [Gew.-%]	Typische Zusätze
Füllstoffe	Füller, senkt den CTE des Epoxids herab	70-90	sphärisches $\text{SiO}_2$ (überwiegend), $\text{Al}_2\text{O}_3$
Harz	Matrix	5-10	Kresolnovolac, Dicyclopentadienolacepoxid, Multifunktionales Epoxid, Bisphenyl-A-Epoxid
Härter	Komponente für lineare Vernetzungspolymerisation	5	Amine, Phenole und Säureanhydride
Flammhemmer	hemmt die Entflammbarkeit	1-5	bromierte Epoxide, Antimontrioxid
Entformungshilfe	verhindert das Anhaften an der Werkzeugkavität	Spuren	Hydrocarbonwachse, Fluorcarbonate, Silikone, anorganische Salze von organischen Säuren
Haftvermittler	sorgt für die Anhaftung an den Oberflächen der elektrischen Baugruppe	Spuren	Silane, Titanate
Ionenfänger	bindet die $\text{Na}^+$ und $\text{Cl}^-$ Ionen während der Polymerisation an sich	Spuren	Komplexbildner
Farbstoff	zur Farbgebung	Spuren	Ruß
LSA (Low Stress Additive)	Additiv zur Stressminderung	Spuren	silikon- oder kautschukbasierende synthetische Zusätze
Beschleuniger	Katalysator der die Polymerisationsrate steigert	Spuren	Amine, Imidazole, Organophosphine, Urease, Lewisäuren und deren organische Salze

Der Härter, der meist aus Aminen, Phenolen und Säureanhydriden besteht, wird eingebracht, damit durch ihn die lineare Vernetzungspolymerisation startet. Da der Härter im EMC auch bei niedrigen Temperaturen die lineare Vernetzungspolymerisation beginnt, sind die EMC durch den Hersteller mit einem Mindesthaltbarkeitsdatum

(MHD) in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur versehen. Üblicherweise gelten die in Tab.2.1-2 dargestellten MHD. Dennoch gibt es Ausnahmen, die längere oder kürzere MHD aufweisen.

Tab.2.1-2 Beispiel für die üblichen Mindesthaltbarkeitsdaten von kommerziellen EMC.

T [°C]	Zeitraum
5	6 Monate
22	2 Tage
35	12 Stunden

Der Zusatz von Flammhemmern, in Form von bromierten Epoxiden oder Antimontrioxid, soll im Brandfall das Entflammen des Package verhindern. Zudem muss sichergestellt werden, dass das Material der UL94 V-0 (UL = Underwrites Laboratories) entspricht. Diese Vorschrift 94 beinhaltet Tests zur Brennbarkeit von Kunststoffen für Teile in Geräten und Anwendungen. Der Bezeichnungszusatz V-0 entspricht dem Verlöschen eines vertikal eingespannten Kunststoffprüfkörpers innerhalb von 10 s ohne Abtropfen von brennender Kunststoffschmelze und mit einer Nachglimmzeit von max. 30 s. Halogen- und antimonhaltige Flammhemmer erzeugen im Brandfall mitunter einen toxischen Dampf, sodass alternative flammhemmende Mechanismen untersucht wurden [8]–[10]. Eine neue Klasse von EMC ist dabei entwickelt worden, die selbstlöschend ist. Die Epoxidharze, die dafür verwendet werden, besitzen einen hohen Anteil an Aromaringen und sind aufgrund dessen langkettiger vernetzt, da die Anzahl an möglichen Vernetzungsknoten abnimmt. Die Aromatringe steigern den Sauerstoffindex und damit wird der Verbrennungswiderstand gesteigert [5]. Ein solches EMC verkohlt. Aufgrund des höheren Anteils an Aromaringen wird die Vernetzungsdichte des Epoxidharzes herabgesenkt, sodass dieses gering elastisch wird [9], da dadurch die Beweglichkeit der Molekülketten steigt und der Elastizitätsmodul abnimmt. Aufgrund der geringeren Vernetzungsdichte entsteht bei der Verbrennung eine Schaumschicht, die flüchtige Verbrennungsgase wie CO oder CO<sub>2</sub> in sich birgt und so selbstlöschend wirkt.

Um das Anhaften des EMC an den Werkzeugoberflächen zu verhindern, werden Entformungshilfen beigemischt. Diese sind in Spuren (< 1 Gew.-%) enthalten und üblicherweise Hydrocarbonatwachse, Fluorcarbonate oder Silikone. Bei der Verarbeitung des EMC gelangen diese an die Oberfläche und verringern dort die Anhaftung. Aber auch Haftvermittler werden eingebracht, die das Anhaften an den Oberflächen der elektrischen Baugruppe steigern sollen. Dafür werden üblicherweise Silane und Titanate verwendet.

Als ein farbgebendes Additiv wird Ruß in Spuren beigemischt. Deshalb ist die übliche Farbe eines Package schwarz. Weiterhin werden in Spuren Beschleuniger wie Amine oder Organophosphine beigemischt, damit die Reaktionszeit kürzer wird, sowie Spu-

ren von LSA (Low Stress Additive), die den Stress nach der Verarbeitung minimieren sollen. Letzteres sind silikon- oder kautschukbasierte synthetische Zusätze.

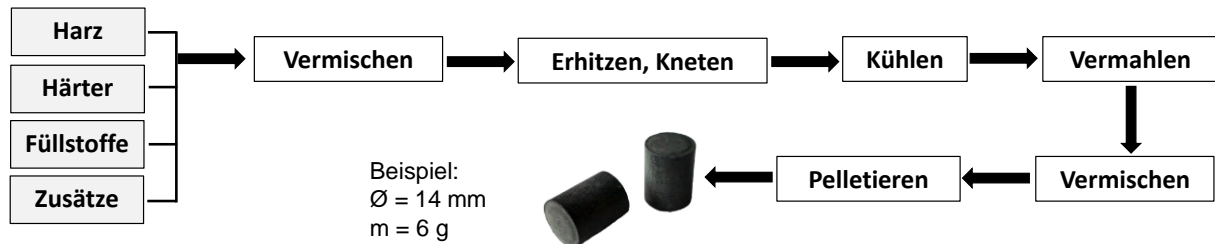


Abb.2.1-2: Darstellung der Prozesskette zur Herstellung eines EMC in Form eines Pellets. Zudem ist ein Beispiel für die Verarbeitungsangaben Durchmesser und Gewicht aufgeführt [5].

Damit die Zuverlässigkeit des Package gewährleistet ist und Luftfeuchte keinen Weg in das Package findet, müssen die EMC nahezu ionenrein sein. Ionen entstehen in der Regel als Reaktionsrest bei der Herstellung des verwendeten Epoxidharzes. Diese müssen nach der Herstellung gereinigt werden. Dennoch verbleibt ein geringer Anteil an Ionen, vorwiegend  $Na^+$ - und  $Cl^-$ -Ionen, im EMC. Aufgrund dessen wird in Spuren auch ein Ionenfänger beigemischt. Dies ist ein Komplexbildner, der die freien  $Na^+$ - und  $Cl^-$ -Ionen chemisch bindet und damit als Ladungsträger neutralisiert.

Nachdem die Bestandteile des EMC diskutiert wurden, wird nun die Herstellung beschrieben. Da das Transfer Molding die führende Technologie zur Herstellung von IC-Packages ist und dafür das EMC in der Regel in Pelletform (zylindrisch mit def. Durchmesser/Gewicht, auch Tablette) benötigt wird, ergibt sich die in Abb.2.1-2 dargestellte Prozesskette zur Herstellung.

Die Herstellung beginnt mit der sogenannten Formulierung. Dabei werden alle Rohstoffe und Additive zur Herstellung eines EMC zusammengestellt und deren Gewichtsanteile festgelegt. Anschließend werden die Bestandteile vermischt, erhitzt und geknetet, danach abgekühlt und nachfolgend vermahlen. Eine erneute Vermischung der gemahlene Masse erfolgt darauf. Zum Schluss wird das Gemisch pelletiert, indem es mittels Kaltpressen zu Pellets verdichtet wird. Die fertigen Pellets werden kühl gelagert.

Während der Verarbeitung der Pellets laufen zwei sich beeinflussende Mechanismen ab. Zum einen schmilzt das Pellet auf und wird dadurch niederviskos. Zum anderen startet mit der eingebrachten Wärme die Vernetzungsreaktion, was die Viskosität wieder erhöht. Trägt man den Einfluss der Vernetzung und des Erwärmens in ein Viskositäts-Zeit-Diagramm auf, so zeigt sich, dass die beiden Prozesse gegenläufig sind (Abb.2.1-3). Am Anfang der Verarbeitung ist die Viskosität des Pellets hoch und es kann nicht fließen. Der Vernetzungsgrad ist zu diesem Zeitpunkt sehr niedrig. Mit der Heizphase fängt das Pellet an zu schmelzen und die Viskosität sinkt. Parallel dazu startet die Vernetzung des Epoxidharzanteils. Nach der Heizphase beginnt die Fließphase, in der das aufgeschmolzene Pellet eine fließfähige Viskosität aufweist. In



dieser Phase kann begonnen werden, die EMC-Schmelze zu verarbeiten. Der Vernetzungsprozess wirkt am Anfang der Fließphase nur bedingt auf die Viskosität, so dass sie weiterhin sinkt. Etwa bei der Hälfte der Zeit der Fließphase erreicht die EMC-Schmelze ihr Viskositätsminimum. An diesem Punkt wechselt die Dominanz der Mechanismen, indem der Vernetzungs- stärker als der Erwärmungseinfluss auf die Viskosität wirkt. Die Fließphase endet mit Erreichen des Gelpunkts des Epoxidharzes. Der Gelpunkt beschreibt den Übergang eines flüssigen Mediums in ein Gel. Bei diesem materialcharakteristischen Übergang wird ein hochviskoses Materialverhalten beobachtet. Ab diesem Zeitpunkt ist die Viskosität wieder so hoch, dass nichts mehr fließt und die Phase des Härtens beginnt. In dieser Phase dominiert der Vernetzungsprozess die Viskosität. Die Härtung ist eine zeitintensive Phase und kann mitunter mehrere Stunden oder Tage benötigen. Die Härtephase schließt mit dem Zustand der vollständigen Vernetzung ab, in dem die vollen mechanischen Eigenschaften des EMC erreicht werden.

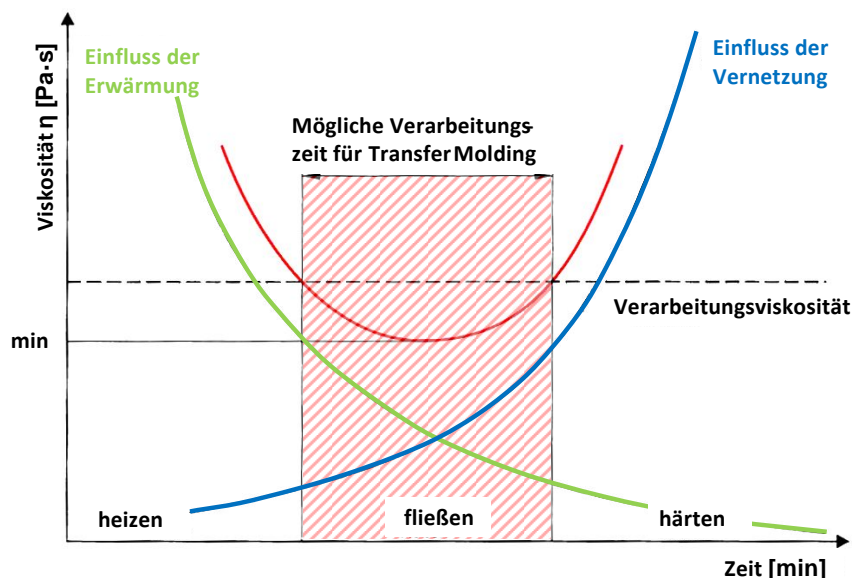


Abb.2.1-3: Die Grafik stellt das Verarbeitungsverhalten des EMC dar. Dabei senkt die Erwärmung des Pellets dessen Viskosität, aber startet auch die Vernetzungsreaktion, sodass sich ein definierter Verarbeitungszeitraum ergibt, in dem sich das EMC z.B. mit einer Transfer Molding-Maschine verarbeiten lässt [11].

Das im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommende EMC ist überwiegend das EME-G770H Type CD der Firma Sumitomo Bakelite Co. LTD. Es ist geeignet für das leiterplattenbasierte Packaging.

## 2.2 Leiterplattenherstellung

Leiterplatten, auch als Printed Circuit Board (PCB) bezeichnet, sind in der modernen Elektronik unverzichtbar und mittlerweile in nahezu jeder Steuerelektronik integriert. PCB stellen den Standard für elektrische Schaltungen dar. Aufgrund ihres Lagerauf-

baus können über ihre Verwendung sehr komplexe Schaltungen auf einem sehr geringen Raum realisiert werden. Ein Überblick zu den konventionellen PCB-Arten wird in Tab.2.2-1 gegeben.

Tab.2.2-1: PCB-Arten und ihre jeweilige Besonderheit [12].

PCB-Art	Besonderheit
Einebenenleiterplatte	die Verdrahtung befindet sich auf einer Ebene der Leiterplatte
Nichtdurchkontaktierte Zweiebenenleiterplatte	unabhängige Verdrahtung auf zwei Ebenen, für Sonderanwendungen
Leiterplatte mit tiefgelegtem Leiterbild	Verdrahtung ist bündig ins Basismaterial versenkt
Einebenenleiterplatte mit Brückendruck	Brückendruck erzeugt durch Siebdruck auf Isolations-schicht, um Durchkontaktierungen auf gleicher Ebene zu realisieren
Durchkontaktierte Zweiebenenleiterplatte	Verbindung der beiden Ebenen mittels Durchkontaktierung
Mehrlagenleiterplatten	Verbund zwischen zwei oder mehrseitig oder zweiseitig verdrahteten Basismaterialien, kupferfreien Zwischenlagen und Leiterbildern aus Kupferfolie
Mehrschichtleiterplatten	keine Bestückungslöcher aufgrund von zylinderförmigen, lochfüllenden Durchkontaktierungselementen, höhere Verdrahtungsdichte als Mehrlagenplatten
Flexible Leiterplatten	Realisierung einer Ein- oder Zweiebenenleiterplatte auf Polyester- oder Polyimidfolie zur Verdrahtung dreidimensional angeordneter Baugruppen
Starr-flexible Leiterplatten	Verbindung von starren Mehrlagenleiterplatten mit flexiblen Leiterplatten
Metallkernleiterplatte	Basismaterial wird durch Metallkern ersetzt zur Dimensionsstabilisierung, besseren Wärmeleitung und Verringerung der Basismaterialkosten
Formleiterplatten	nicht- oder durchkontaktierte starre Leiterplatte, die durch partielles Abwinkeln eine dreidimensionale Bauteilaufnahme und –verdrahtung ermöglicht
Dreidimensional gespritzte Leiterplatte	Hochtemperaturbeständiger Thermoplast, der durch Spritzgießen zu einer 3D-Form überführt und auf dem ein Leiterbild semi- oder volladditiv aufgebracht wird

In dieser Arbeit wird speziell die Mehrlagenleiterplatte (MLL), im speziellen die FR4 (Flame Retardant 4) betrachtet. Deshalb wird im Folgenden deren Zusammensetzung, Aufbau und Herstellung betrachtet.

Üblicherweise bestehen MLL aus Basismaterial, Prepregs, Metallfolien und Lötstopplack (LL). Das Basismaterial besteht aus einem Verbundsystem aus Aluminium-Boro-Silikatglasfasern die zu einer Matte zusammengewebt sind, Cu-Folie und Epoxidharz [12]. Zur Herstellung des Basismaterials wird die Glasfasermatte durch eine Epoxidharzlösung in einer Imprägnierwanne gezogen, wobei diese vollständig mit Epoxid getränkt wird. Anschließend wird dieser Verbund unter Temperatureinwirkung getrocknet, sodass sich eine Vorvernetzung des Epoxids ergibt. Anschließend wird mittels einer Schneideinrichtung das halbfertige Basismaterial in Stücke genormter Größe geschnitten. Dieses Stadium wird als Prepreg bezeichnet. Aufgrund der nur teilweisen Vernetzung der Prepregs kann der Zweikomponentenverbund mit einer Cu-Folie verbunden werden. Dafür wird das Prepreg zwischen die Cu-Folien gelegt

und mittels Heißpressverfahren unter Temperatur und Druck zum finalen Basismaterial weiterverarbeitet. Dieses Basismaterial wird für Ein- und Zweiebenenleiterplatten weiterverarbeitet, indem Verdrähtungen und Löcher eingebracht werden. Bei den MLL stellt dies das Kernmaterial dar.

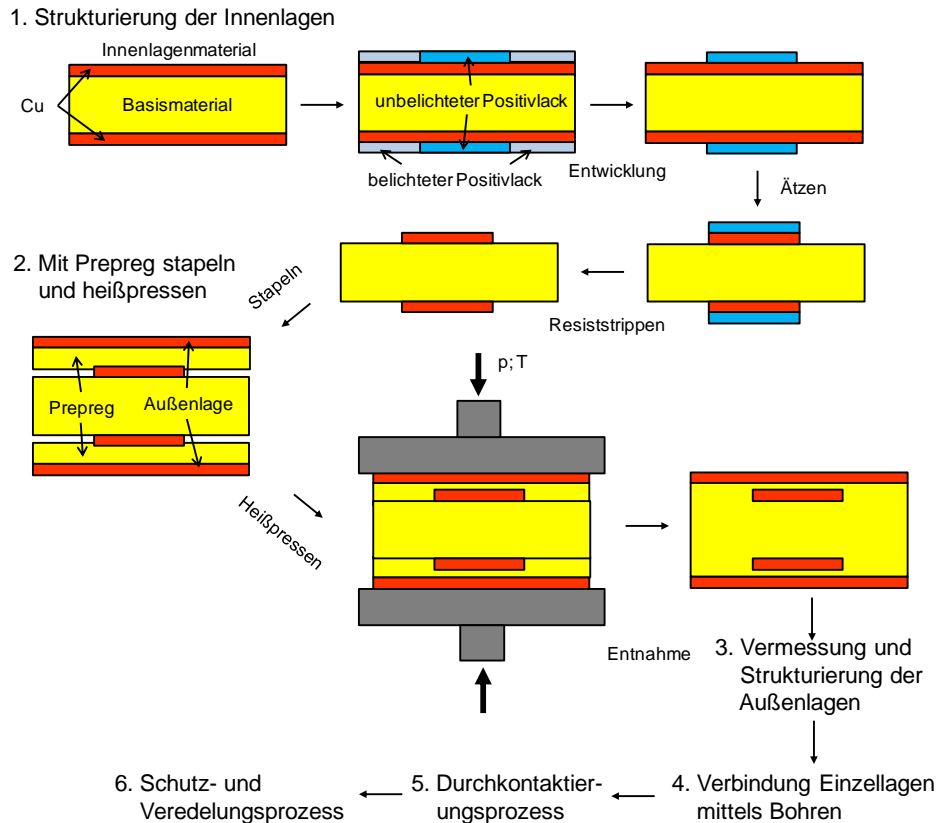


Abb.2.2-1: Herstellungsprozess einer Vierlagen-PCB schematisch gezeigt.

Beim Basismaterial ist das Epoxid vollständig ausgehärtet. Es stellt zumeist eine Isolationsschicht zwischen den Leiterbahnen dar und kann auch ohne Cu-Folie aus einem Prepreg hergestellt werden.

Das Prepreg wird für die MLL als Zwischen- bzw. Endsicht benötigt, da es als nur teilvernetzter Glasfaserverbund eine gute Haftwirkung besitzt und die Grundlage für den Mehrlagenaufbau darstellt.

Metallfolien werden zur Erzeugung von Leiterschichten im Gesamtverbundsystem verwendet. Sie werden zwar vollflächig auf das Prepreg aufgelegt und mittels Heißpressen laminiert, jedoch werden in der weiteren Verarbeitung mittels Ätztechnik die Leiterstrukturen erzeugt.

LL wird als eine Maske auf der MLL-Oberfläche aufgebracht. Dieser hat die Funktion, das Fehlbenetzen eines Lots auf den Leiterbahnen des MLL zu verhindern, dadurch Kurzschlüsse zu vermeiden und die von diesem abgedeckten Leiterbahnen zu schützen.

Um eine MLL herzustellen, wird zuerst ein Layout mittels einer Software wie Eagle von CadSoft erstellt. Damit lassen sich alle Lagen definieren und gestalten. Danach wird das Layout dem Fertiger übergeben, der die MLL herstellt. Der Herstellungsprozess für eine Vierlagen-PCB wird in Abb.2.2-1 schematisch gezeigt.

Der erste Prozessschritt zur Herstellung einer Vierlagen-PCB besteht darin, die Innenlage zu strukturieren. Dabei wird ein Photoresist (Positivlack) auf das mit Cu kaschierte Basismaterial aufgetragen. Der Positivlack besteht aus einem Polymer, dessen Löslichkeit im Entwickler durch Belichtung mit UV-Licht zunimmt. Nach dem Auftragen eines solchen Positivlacks auf die Cu-Folie des Basismaterials folgt ein Trocknungsschritt. Mit Hilfe einer Maske werden anschließend die Bereiche auf dem Photoresist abgedeckt, die die spätere Leiterstruktur abbilden. Diese Stellen verbleiben nach der Entwicklung auf der Cu-Oberfläche. Anschließend werden mittels Ätztechnik die freien Kupferflächen entfernt, sodass der Kern des Verbunds freigelegt wird. Nach dem Ätzvorgang wird der Photoresist wieder entfernt. Dieser Vorgang heißt Resiststrippen.

Mit dem zweiten Prozessschritt wird das Basismaterial zwischen zwei Prepregs und Cu-Folien für die Leiterstrukturierung auf der Top- wie Bottom-Lage gestapelt und mittels Heißpressen unter Temperatur  $T$  und Druck  $p$  zusammengepresst und nach einer definierten Aushärtezeit entnommen. Anschließend erfolgt eine Oberflächenvermessung, um die Dicke des Laminats zu überprüfen. Wird dabei festgestellt, dass die Zieldicke nicht der Toleranzvorgabe entspricht, wird der Heißpressvorgang wiederholt. Befindet sich das Laminat innerhalb der Zieltoleranz, erfolgt ein Strukturierungsprozess der Außenlagen genau wie bei der Innenlage (dritter Prozessschritt). Dabei werden die definierten Leiterstrukturen auf der Oberfläche abgebildet.

Anhand des vierten Prozessschritts werden die Lagen mittels eines Bohrprozesses miteinander verbunden. Dabei können auch Sacklöcher in der Innenlage erzeugt werden, um eine Umverdrahtung in der Innenlage zu realisieren, wenn eine Durchgangsbohrung für die spätere Funktion der PCB kritisch ist. Nach dem Bohrprozess findet eine chemische Bekeimung der Bohrlochflanken mit Palladium (Pd) statt. In einem außenstromlosen Metallisierungsprozess (fünfter Prozessschritt) scheidet sich auf den Oberflächen Cu ab und erzeugt so die elektrischen Kontakte zwischen den Lagen.

Als sechster Prozessschritt wird die Cu-Struktur auf der Oberfläche chemisch veredelt. Je nach späterer Anwendung kann die Veredelung durch die chemische Abscheidung von unter anderem Nickel (Ni), Palladium (Pd), Zinn (Sn) oder Gold (Au) geschehen. Eine Ni/Au-Schicht würde die spätere Anwendung des Aluminium(Al)-Draht-Bonding ermöglichen. Eine Sn-Veredelung würde die Lötbarkeit der Leiterstruktur begünstigen und ein Ni/Pd/Au-Finish (Endschicht) würde Flip-Chip- und Au-Draht-Bonding-Prozesse ermöglichen. Des Weiteren sorgt die Veredelungsmaß-

nahme für den Schutz des Cu-Leiters vor Oxidation. Nach der Veredelung wird zum Schutz der Leiterstrukturen eine LL-Maske aufgebracht.

Üblicherweise werden Leiterplatten in definierten Los-Größen hergestellt. Das heißt, auf einem Los befindet sich eine definierte Anzahl an PCB. Aus diesem Grund schließt der Fertigungsprozess der PCB mit der Trennung des Loses mittels Sägen oder Konturfräsen und anschließendem Verpacken.

Aufgrund des geschilderten Herstellungsverfahrens sind die Toleranzen der PCB nach der Fertigung für präzise Bestückungsprozesse grob. Welche Auswirkungen dies für die Herstellung eines leiterplattenbasierten Packaging hat, wird in Kapitel 4.2 handelt.

### 2.3 Transfer Molding

Das Transfer Molding (TM) ist das Standardverfahren für das leadframe-basierte Packaging von Standardkunststoffgehäusen [3]. Es ist ein Verfahren zur Massenfertigung und wird heute überwiegend in Fernost angeboten. Nur einzelne Großunternehmen und Dienstleister in Europa verfügen über eigene Transfer Molding-Anlagen. Die Großunternehmen verwenden diese zu Forschungs- und Entwicklungszwecken, aber auch teilweise zur eigenen Produktion, um eigenes Know-how nicht nach Asien zu geben.

Im Wesentlichen verfügt eine Transfer Molding-Anlage über zwei Werkzeughälften, das Top- und Bottom-Werkzeug, einen Plunger (Stempel zur Verdrängung der EMC-Schmelze), eine Pelletwanne, in der die Pellets aufgenommen werden, Auswerferstifte, Anguss, Heizpatronen, die die Werkzeugtemperatur herstellen, und eine Kavität (Abb.2.3-1). Letztere stellt einen Raum dar, in dem bestückte Schaltungsträger, elektrische Nutzen sowie Systeme eingebracht werden.

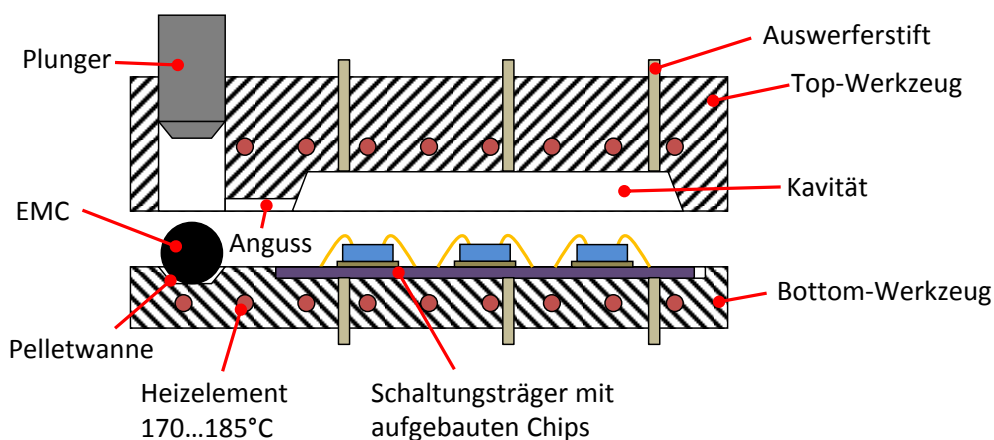


Abb.2.3-1: Prinzipskizze zum Transfer Molding-Werkzeug.

In Abb.2.3-2 a-c ist die Prozesskette nach der Bestückung der Transfer Molding-Maschine dargestellt. Die Werkzeughälften werden geschlossen (Abb.2.3-2a). Es

erfolgt eine Aufheizphase, in der das EMC und der Schaltungsträger auf Werkzeugtemperatur erwärmt werden. Die Werkzeugtemperatur liegt dabei in der Regel zwischen 170 °C und 185 °C, je nach Vorgaben des EMC. Während dieser Phase schmilzt das EMC auf und wird nach einer definierten Aufheizzeit durch den Plunger über den Anguss in die Kavität verdrängt. Der Plunger fährt dabei in einer vorgegebenen Geschwindigkeit zur Pelletwanne. Dieser Prozess wird als Transferprozess bezeichnet und endet mit einer Füllung der Kavität um 90 %-95 %. Ist dieser Punkt erreicht, wird der Aushärteprozess gestartet (Abb.2.3-2b). Dabei drückt der Plunger mit einem definierten Aushärte-Druck ( $p_c$ ) auf die EMC-Schmelze, sodass ein Druckgradient erzeugt wird. Dies führt zu zwei möglichen Mechanismen. Zum einen wird die verbleibende Luft aus der Kavität z.B. über Überläufe aus der Schmelzfront herausgedrückt. Je nach Vernetzungsstatus der Schmelze können dabei auch Luftbläschen aus der Schmelze vertrieben werden. Zum anderen werden Lufteinschlüsse komprimiert und damit das EMC verdichtet. Damit die EMC-Schmelze in der Kavität verbleibt, während der Druck  $p_c$  auf diese wirkt, muss der Klemmdruck  $p_k$ , der die Werkzeughälften zusammendrückt, größer als  $p_c$  sein, sodass gilt:

$$p_k \geq p_c. \quad \text{Gl.2.3-1}$$

Andernfalls kann die Schmelze aus der Kavität in das Werkzeug fließen und dieses durch Aushärten verschmutzen.

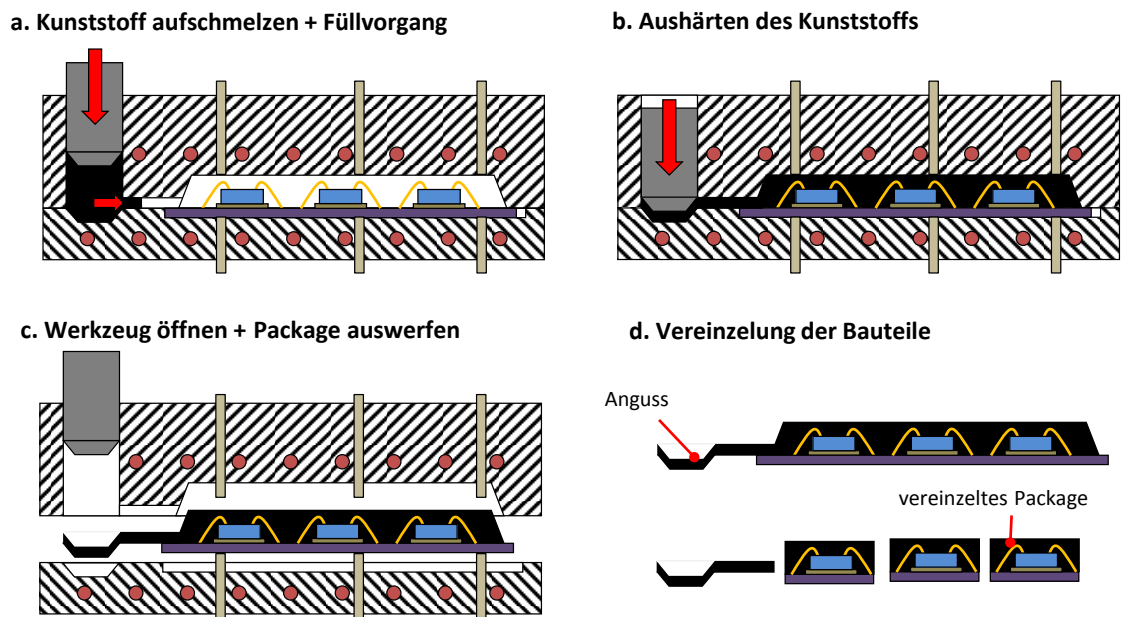


Abb.2.3-2: Prinzipskizze vom Herstellungsprozess eines Elektronikpackages. Dabei stellt a) den Aufschmelz- und Füllvorgang, b) den Aushärtevorgang des EMC, c) den Werkzeugöffnungs- und Auswerfprozess und d) das entnommene Package sowie die Vereinzelung dar.

Sobald der Gelpunkt der EMC-Schmelze erreicht ist, kann der Plunger für den Rest der Aushärtezeit entspannt werden, da keine Fließbewegung der EMC-Schmelze möglich ist. Nach dem Aushärten öffnen sich die Werkzeuge und über die Auswer-

ferstifte wird das Elektronikpackage ausgeworfen (Abb.2.3-2c). Danach wird der Anguss entfernt und der verkapselte Träger wird mit einer definierten Zeit und Temperatur, meist der Verarbeitungstemperatur, getempert. Dieser Temperprozess ist notwendig, da nach dem Verarbeitungsprozess mittels TM das EMC einen Aushärtegrad zw. 90 % und 95 % erreicht. Das EMC wird daher im Tempersschritt weiter ausgehärtet, denn damit erhält das EMC die finalen mechanischen Eigenschaften und durch den TM-Prozess eingebrachte Spannungen können abgebaut werden. Eine vollständige Aushärtung wird bei diesem Prozess nicht erreicht, da der Aushärtevorgang ein zeitintensiver Prozess ist, dessen Kosten in der Industrie minimiert werden. Dennoch erreicht das EMC nach dem Tempern einen Aushärtegrad von nahezu 99 %. Je nach Anwendungsgebiet der Packages härtet das EMC über den Anwendungszeitraum vollständig aus. Nach dem Temperprozess werden die verkapselten, elektrischen Nutzen zu einzelnen Packages vereinzelt.

Die Vorteile des TM gegenüber anderen Packagingverfahren wie Spritzgießen oder Formpressen sind die geringen Fülldrücke, die während der Verarbeitung aufgebracht werden, damit die geringe Belastung auf z.B. Bonddrähte beim Verkapseln und eine gute Eignung des Verfahrens für die Massenfertigung von elektrischen Packages.

Als Nachteile gegenüber den anderen Packagingverfahren sind

- der hohe Abfallanteil (bis zu 50 % des Pellets), der durch den Anguss verbleibt und nicht wiederverwendbar ist,
- die höheren Investitionskosten für die TM-Maschine,
- eine sehr hohe Werkzeugpräzision zur Werkzeugabdichtung aufgrund der sehr niedrigen Viskosität des EMC bei der Verarbeitung, sowie
- eine mitunter niedrige Standzeit des Werkzeugs aufgrund von Verschleiß

zu benennen. Der Werkzeugverschleiß kommt daher zustande, dass trotz der Zugabe von Entformungshilfen (Kapitel 2.1) Reste vom ausgehärteten EMC in der Werkzeugkavität verbleiben können und dadurch einen Reinigungsschritt erforderlich machen. Durch die Reinigung werden zwar die EMC-Reste entfernt, doch es lässt sich beobachten, dass sich bei der nächsten Reinigung der Anteil der EMC-Reste in der Kavität vergrößert hat und von der im vorhergehenden Reinigungsschritt gereinigten Stelle ausgeht. Der Reinigungsschritt wird zwar mit weichen Werkzeugen aus Messing oder Kupfer durchgeführt, dennoch rauhen diese die Oberfläche mit der Zeit auf. Zudem kann die niederviskose EMC-Schmelze in Spalten der Auswerfer oder der Kavität fließen. Diese werden dadurch zugesetzt und verstopft, sodass die Funktion beeinträchtigt wird und im schlimmsten Fall versagt. Des Weiteren können Füllstoffe in der EMC-Schmelze nach dem Anhaften bei der Reinigung sowie der Bewegung der Auswerfer wie Schleifpartikel wirken und die Spalten durch Abrasionsprozesse vergrößern, sodass beim nächsten Prozesslauf noch mehr EMC-Schmelze einlaufen kann. Um das zu verhindern, muss ein TM-Werkzeug hoch-präzise gefertigt und die

einzelnen Werkzeugkomponenten aus einem harten Stahl, wie es bei Sinterstählen der Fall ist, hergestellt werden.

Trotz der genannten Nachteile, hat sich das TM als Packaging-Technologie für Standardpackages in der Mikroelektronik durchgesetzt.

## 2.4 Film-Assisted Transfer Molding (FAM)

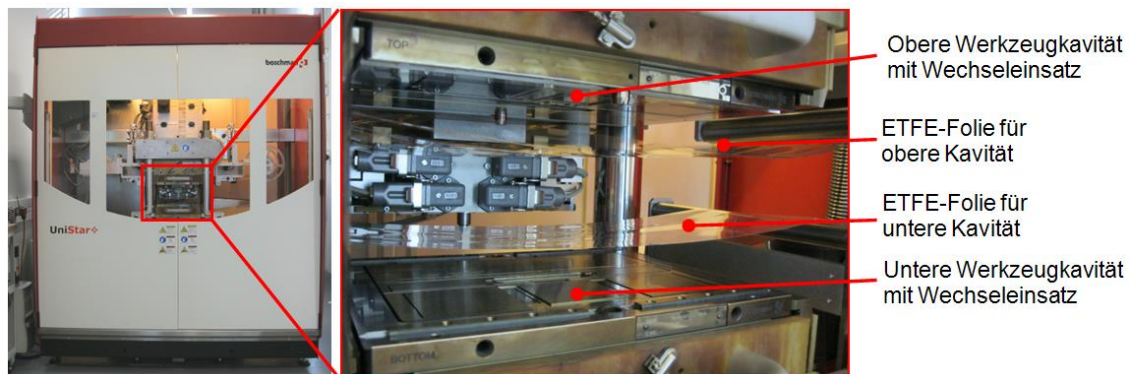


Abb.2.4-1: UniStar Molding System-Anlage der Firma Boschman Technologies B.V.

Als Weiterentwicklung der Packaging-Technologie Transfer Molding ist das Film-Assisted Transfer Molding (FAM) entwickelt worden. Es ist ein Verfahren, das von dem Unternehmen Boschman Technologies B.V. entwickelt wurde. Das Modell UniStar Molding System wird in dieser Arbeit verwendet (Abb.2.4-1). Eine solche Anlage besitzt dieselbe Funktion wie konventionelle Transfer Molding-Maschinen. Zusätzlich verfügt eine FAM-Anlage über ein Folienfördersystem, über das üblicherweise eine auf Teflon basierende Folie (Ethylentetrafluorethylen, ETFE) transportiert wird. Das geschieht jeweils für die obere (Top-) und untere (Bottom-) Werkzeughälfte.

Der Vorteil dabei ist, dass die hervorragenden Antihafteigenschaften des Teflons die Adhäsion der EMC-Schmelze beim Verarbeitungsprozess verhindert. Damit wird der Werkzeugverschleiß reduziert, die Werkzeugstandzeit erhöht und ein Verchromungsschritt der Werkzeuge zur Verschleißminimierung eingespart [13]–[15]. Zudem wird der Reinigungsschritt eingespart, da das geschmolzene EMC keinen Werkzeugkontakt hat. Der Einsatz der ETFE-Folien sorgt für eine gute Abdichtung des Werkzeugs, sodass die Werkzeugpräzision gemindert werden kann und die Werkzeugfertigung günstiger wird. Des Weiteren übernimmt die Folie die Funktion der Auswerfer und es wird kein Auswerferpaket für das Werkzeug benötigt. Außerdem reduziert die ETFE-Folie die auf den Schaltungsträger wirkende Klemmkraft, da sie sich pressen lässt. Damit wird die aufgebrachte Spannung beim Werkzeugkontakt mit der elektrischen Baugruppe im Vergleich zum konventionellen Transfer Molding verringert. Aufgrund dessen lassen sich mittels der FAM-Technologie zerstörungsfrei Freistellungen auf Nacktchips erzeugen.



Eine Prinzipskizze des FAM ist in Abb.2.4-2 gezeigt. Der Unterschied bei der Werkzeuggestaltung im Vergleich zum konventionellen Transfer Molding ist das Einbringen von Vakuum-Kanälen und Ventings sowie der Verzicht auf Auswerfer. Die Vakuum-Kanäle haben zum einen die Funktion, nach dem Anlegen der ETFE-Folie an das Werkzeug die verbleibende Luft abzusaugen, und zum anderen die ETFE-Folie ans Werkzeug zu fixieren. Die Ventings werden in Kapitel 2.5 näher erklärt. Deren Funktion ist es, Luft aus der Kavität entweichen zu lassen.

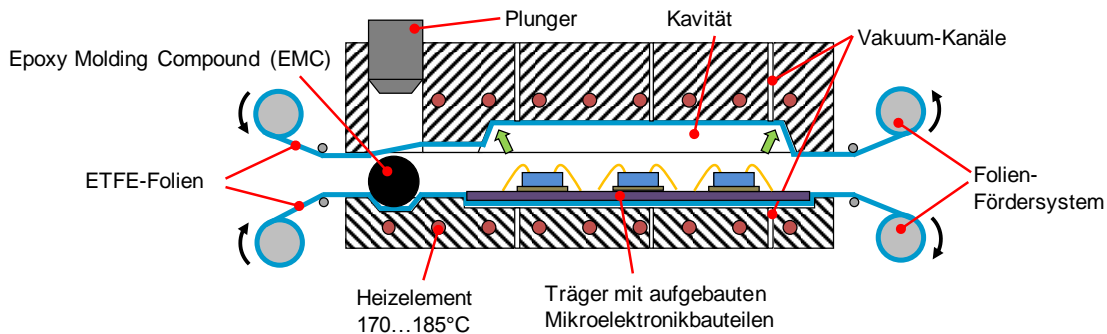


Abb.2.4-2: Prinzipskizze des Film-Assisted Transfer Moldings.

Der FAM-Prozess unterscheidet sich wie folgt vom Transfer Molding-Prozess. Über ein Top- und Bottom-Walzenfördersystem wird die ETFE-Folie zwischen den Werkzeugeinsätzen geführt und transportiert. Anschließend wird die Folie an das Top- und Bottom-Werkzeug über eine entsprechende Walzenbewegung nach oben oder unten angelegt. Daraufhin erfolgt ein Evakuierungsvorgang, in dem die Luft unter der Folie über die Vakuum-Kanäle abgesaugt wird. Dann werden die Prozessschritte wie in Kapitel 2.3 beim konventionellen Transfer Molding durchgeführt. Dazu zählen Bestückung der FAM-Anlage mit Pellets und elektrischer Baugruppe, Schließen des Werkzeugs, Aufschmelzen der Pellets und Verdrängung mittels Plunger in die sowie Aushärten in der Kavität. Nachdem sich das Werkzeug geöffnet hat, wird die verkapselte elektrische Baugruppe durch Abheben der Top- und Bottom-ETFE-Folie von der Werkzeugoberfläche aus der Kavität entformt und mittels Folientransport aus dem Prozessbereich geführt. Mit diesem Prozessschritt wird unbenutzte ETFE-Folie über der Kavität positioniert, sodass der nächste Herstellungszyklus beginnen kann. Die verbrauchte ETFE-Folie wird aufgerollt und ist ein zusätzliches Abfallprodukt des Transfer Molding-Prozesses.

### 2.4.1 Anwendungsgebiete

Das FAM wird wie auch das Transfer Molding für die Herstellung von überwiegend leadframe-basierten Packages verwendet. Aufgrund des ETFE-Folieneinsatzes eignet es sich besonders für die Herstellung von Freistellungen auf Nacktchip sowie sonstigen sensiblen Oberflächen. Dabei erzeugt die ETFE-Folie einen „Soft Touch“, also einen Kontaktdämpfer auf der freizustellenden Oberfläche. Deshalb liegt die

Hauptanwendung des FAM bei der Herstellung von Packages mit Freistellungen. Für alle anderen Anwendungen kann auch das Transfer Molding verwendet werden.

Die Werkzeugkosten, der minimale Werkzeugverschleiß und die damit erhöhte Werkzeugstandzeit machen das FAM-Verfahren zudem attraktiv für die Standardanwendungen. Jedoch müssen dabei die Kosten für ETFE-Folie gegengerechnet werden.

### 2.4.2 Freistellungen auf Sensoroberflächen

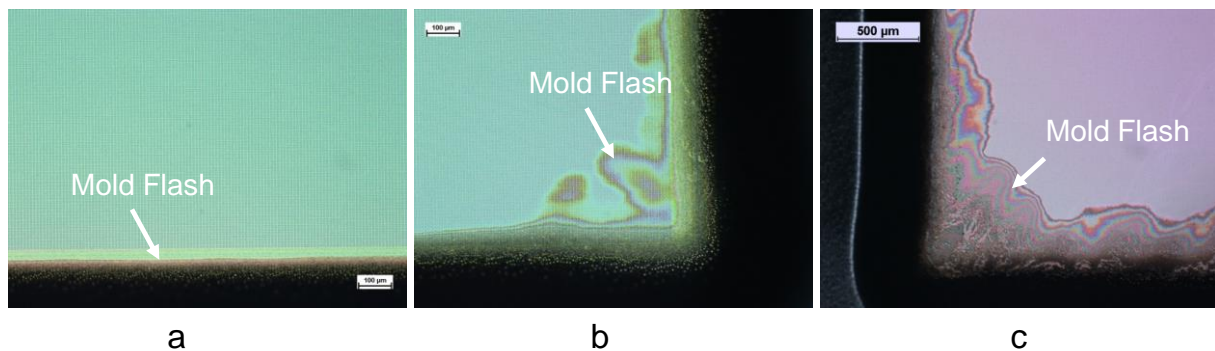


Abb.2.4.2-1: a) zeigt die ideale Form des Mold Flashes, die beim FAM-Prozess auftreten kann, b) veranschaulicht einen weitläufigen klaren Mold Flash und c) stellt einen Mold Flash mit einem Übergang vom gemischten zum entmischten Zustand dar.

Freistellungen auf Sensoroberflächen stellen Medienzugänge dar. Diese ermöglichen dem Sensor, mit der Umgebung zu interagieren. Ob dabei eine optische, mechanische oder chemische Wechselwirkung erfolgt, spielt dabei eine nebensächliche Rolle, solange die sensiblen Elektronikkomponenten des Sensors im EMC verkapselt sind. Um Freistellungen zu realisieren, muss die freizustellende Fläche mit einem Element in der Kavität so abgedeckt werden, dass die EMC-Schmelze keinen Zugang zu dieser Fläche hat. Dann muss dieses Element mit einem Auflagedruck  $p_a$  auf die Oberfläche drücken, welcher größer ist als der von der Transfer Molding-Anlage aufgebrachte Aushärtedruck  $p_c$ , der während der Aushärtung auf die EMC-Schmelze drückt, sodass folgendes gilt:

$$p_a \geq p_c. \quad \text{Gl.2.4.2-1}$$

Andernfalls fließt beim Aufbringen des Drucks  $p_c$  die EMC-Schmelze unter das Element und damit auf die freizustellende Fläche. Aus dem Verhältnis in Gl.2.4.2-1 und Gl.2.3-1 aus Kapitel 2.3 folgt:

$$p_k \geq p_a \geq p_c. \quad \text{Gl.2.4.2-2}$$

Das bedeutet,  $p_a$  kann höchstens gleich  $p_k$  sein. Bei einer idealen Montage der Sensoren auf dem Schaltungsträger könnte das Freistellungselement der blanke Werkzeugstahl sein, da die gesamte Freistellfläche des Sensors konstant belastet wird und dadurch kaum Spannungsspitzen auftreten. Die reale Sensormontage ist mit

einem Sensoraufbau konfrontiert, der mit einer Reihe von Toleranzen behaftet ist. Die Dimension des Klebespalts unter dem Sensor variiert, der Schaltungsträger schwankt bezgl. seiner Dicke und das Freistellungselement besitzt Höhentoleranzen. Je nach Art der Fertigung und dem Hersteller der Ausgangsressourcen würde der Sensor während der Verarbeitung entweder zerstört oder, statt freigestellt, verkapselt werden. Zudem entstehen durch eine nicht plane Auflage des Werkzeugs auf der Sensorfläche Spannungsspitzen, die den Bruch des Sensors zur Folge haben können. Deshalb muss das Freistellungselement so modifiziert werden, dass es bei der Auflage auf der Sensoroberfläche Höhenunterschiede sowie Sensorverkippung kompensieren und den Auflagekontakt auf dem Sensor abfedern kann.

Der Einsatz einer Folie als Trennschicht zwischen Freistellungselement und Sensoroberfläche kann, je nach Stärke, Unebenheiten wie Verkippungen oder Höhenvariationen kompensieren. Aufgrund der Kompressibilität der Folie kann die auf den Sensor wirkende Druckspannung des Freistellungselements gedämpft und damit Spannungsspitzen entschärft werden. Dies gelingt jedoch nur solange, bis die Folie den Zustand der Inkompessibilität erreicht. Ab diesem Zustand kann die Sensoroberfläche wieder zerstört werden.

Das Arbeiten mit einer Folie zur Freistellung von Sensoroberflächen lässt nach dem Molding-Prozess einen am Rand der Freistellung entlanglaufenden Mold Flash zurück. Damit ist ein dünner Kunststoffilm gemeint, der aus überwiegend entmischtem EMC besteht. In Abb.2.4.2-1 sind ein paar Beispiele für Mold Fflash gezeigt. Dieser entsteht dadurch, dass zum einen die Folie aufgrund der Kompression eine weichere Materialanhäufung entlang der Kante des Freistellungselements aufwirft und damit mit Einsetzen des Drucks  $p_c$  flüssiges Epoxid unter diese fließt. Dabei ist der Spalt so eng, dass die Füllstoffe und einige Additive nicht mitfließen können. Daher kommt es zur lokalen Entmischung. Zum anderen müssen alle Kanten in der Kavität abgerundet sein, damit sie keine Scherwirkung auf die Folie haben (Kapitel 2.5). Deshalb kriecht die EMC-Schmelze bis zum Ansatz des Freistellungselements.

Mold Flash tritt nicht nur in folienbasierten Transfer Molding-Anlagen auf, sondern überall dort, wo sich Spalten im Prozessbereich des Werkzeugs eröffnen. Daher ist darauf zu achten, dass der Prozessraum gut abgedichtet wird. Ansonsten sucht sich die EMC-Schmelze während der Verarbeitung ihren Weg ins Werkzeug. Gerade in der FAM-Anwendung ist dies zu vermeiden, da meist die Luftabsaugungen von dem flüssigen EMC gefüllt werden, das darin aushärtet und ohne Säuberungsprozess diese verstopft.

Das Auftreten von exzessivem Mold Flash ist ein Zeichen dafür, dass das FAM-Werkzeug nicht auf den Prozess abgestimmt ist und, wenn möglich, nachjustiert werden muss. Dies kann im besten Fall eine Nachjustage der Klemmkraft und im schlechtesten Fall eine Zerlegung des Werkzeugs bedeuten.

### 2.4.3 Leadframe-basierte Packages

Leadframe-basierte Packages für das First Level Packaging haben sich in den letzten Jahrzehnten am Markt etabliert. First Level Packaging ist das Packaging von Nacktchips. Aus keiner Elektronik sind diese Packages heutzutage wegzudenken, sodass sich eine Vielzahl an Standard IC-Packages ergeben hat, wie QFN (Quad Flat No Lead), DIP (Dual In-Line Package), TO (Transistor Single Outline), TSOP (Thin Small Outline Package), LQFP (Low Profile Quad Flat Pack) und TFP (Triple Flat Pack).

Für diese Standardpackages befindet sich der Markt überwiegend in Fernost [16]. Für die Standardpackages ist dies ein guter Weg, da diese so günstig angeboten werden können. Dabei zeigt sich ein Trend zu Leadless Packaging-Formen wie beim QFN, um so den Flächenbedarf des Package zu minimieren. Der Weg der Miniaturisierung hat damit auch die Standardpackages erreicht.

### 2.4.4 Leiterplattenbasierte Packages

Das leiterplattenbasierte Packaging ist ein Verfahren, das vorwiegend im Second Level Packaging seine Anwendung findet. Dabei werden ganze PCB, die mit First Level Packages und anderen elektrischen Komponenten bestückt sind, mittels EMC verkapselt. Dies geschieht zum einen, um die Elektronik zu schützen, und zum anderen, um eine geometrische Form vorzugeben, die das Einpassen des Packages in die Zielbaugruppe erleichtert. Das EMC welches dafür verwendet wird, ist aufgrund einer geringeren Ionenreinheit und Füllstoffzusammensetzung aus Glasfasern, Sägemehl und diversen Silikaten qualitativ schlechter als das für das First Level Packaging. Als Verfahren kommt neben dem TM das Duroplastspritzgießen zum Einsatz.

Aufgrund der immer weiteren Miniaturisierung der elektrischen Geräte mit dabei zunehmender Anzahl an Funktionen wird die PCB-Technologie immer interessanter für die Herstellung von System-in-Packages und First Level Packages. Der Vorteil der PCB als Trägersubstrate ist dabei die, aufgrund der verschiedenen Verdrahtungsebenen, im Vergleich zu Leadframes viel höhere Integrationsdichte von Systemen. Damit können die Mikrosysteme im Nutzen hergestellt werden. Dazu werden die Systemelemente auf einer PCB montiert und mittels des Film-Assisted Molding-Prozesses gehaust. Danach können die Systeme im Nutzen getestet und anschließend vereinzelt werden. So wird die Vielfalt der Integrationsmöglichkeiten der Leiterplatte mit den Vorteilen des EMC kombiniert. Dabei können die Chips in Draht-Bond- oder Flip-Chip-Technik aufgebaut werden und die Kontakte des Package können als flache Pads oder als Balls ausgeführt werden. Dieser technologische Ansatz hat auch die grundsätzliche Eignung für zuverlässige Packages, wie in Kapitel 6 gezeigt wird. So stellt u. a. die Firma Amkor Technology in Asien bereits Standardpackages

wie z.B. PBGA (Plastic Ball Grid Array) oder FCmBGA (Flip-Chip Molded Ball Grid Array) mit Fenster mit leiterplattenbasierten Substraten in Großserie her [17].

Die Stärken der Technologie zeigen sich insbesondere bei kleinen Stückzahlen und Sonderlösungen, da hier die Vorteile der Technologie die Nachteile der wirtschaftlichen Kosten relativieren. Gerade der Einsatz in dem Entwicklungsfeld Sonderlösung konnte an unterschiedlichen Anwendungen erfolgreich gezeigt werden, wobei diese Forschungsergebnisse auf den in dieser Arbeit entwickelten Methoden beruhen [18]–[25].

## 2.5 Werkzeugbau für das Film-Assisted Molding

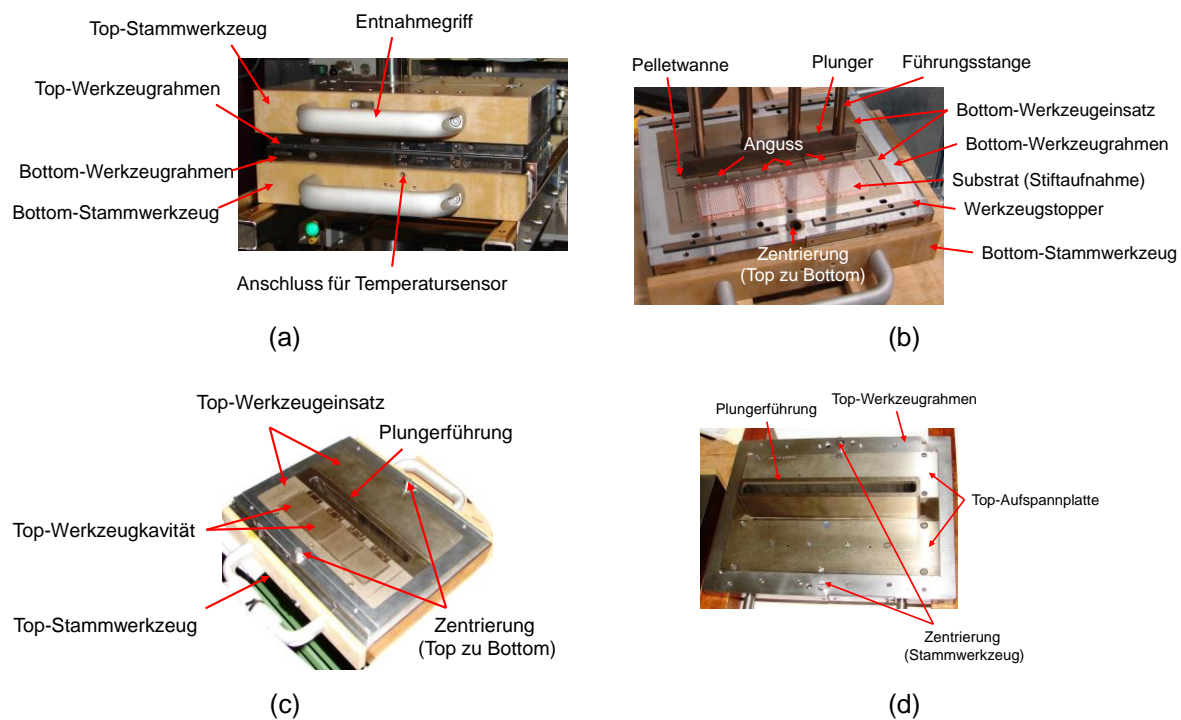


Abb.2.5-1: Beschriftete Darstellung von (a) dem zusammengebauten Werkzeug bestehend aus Stammwerkzeug und Werkzeugrahmen, (b) der Detailansicht des auf dem Bottom-Stammwerkzeug montierten Bottom-Werkzeugrahmens, (c) der Detailansicht des auf dem Top-Stammwerkzeug montierten Top-Werkzeugrahmens und (d) der Rückansicht des Top-Werkzeugrahmens.

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, beinhaltet eine FAM-Maschine eine obere (Top-) und eine untere (Bottom-) Werkzeughälfte. Beide Werkzeughälften nehmen ein Stammwerkzeug auf, welches an das Vakuumsystem der FAM-Anlage angeschlossen wird. Des Weiteren wird auf das Stammwerkzeug ein Top- wie Bottom-Rahmen montiert. In diesen Rahmen sind je drei Werkzeugkomponenten integriert. Dabei sind die schmaleren Komponenten im Bottom-Rahmen die Pelletwanne und im Top-Rahmen die Plungerführung. Bei den anderen Werkzeugkomponenten können diverse Werkzeugeinsätze (WZE) integriert werden. In die WZE können weitere Inserts, das sind

weitere kleine und funktionalisierte Werkzeugeinsätze, integriert werden. Somit können mehrere Kavitäten zur Massenproduktion oder eine Kavität für Prototypenfertigung eingebracht werden. Diese Aufteilung in Werkzeugkomponenten hat den Vorteil eines modularen Werkzeugbaus. Damit können einzelne Komponenten ausgetauscht oder ersetzt werden, sodass die Werkzeugfertigungskosten niedrig gehalten werden können. Die Montage der einzelnen Werkzeugkomponenten in den jeweiligen Werkzeugrahmen ist durch sogenannte Aufspannplatten möglich. Diese Platten werden mit den WZE verschraubt und überlappen diese in der Länge, damit sie nicht durch den Werkzeugrahmen durchfallen können. Hierfür ist eine Nut im Werkzeugrahmen vorgesehen. In Abb.2.5-1 ist ein Beispiel für ein aufgebautes FAM-Werkzeug dargestellt.

Durch den Einsatz der ETFE-Folie müssen einige „Design Rules“ (Konstruktionsregeln) eingehalten werden. Diese werden von dem Maschinenhersteller Boschman Technologies an die Anwender weitervermittelt. Die wichtigsten werden in diesem Kapitel diskutiert (Tab.2.5-1, Abb.2.5-2 und Abb.2.5-3).

Tab.2.5-1: Zur Konstruktion eines FAM-Werkzeugs wichtige Konstruktionsregeln.

Konstruktion	Regel
Kanten mit direktem Folienkontakt	min. R 2 mm
Werkzeugflanken Kavität bis 2 mm Tiefe	min. 8° Entformschräge
Werkzeugflanken ab 2 mm Tiefe	min. 15° Entformschräge
Luftabzugsspalt in der Kavität	max. 0,1 mm
Luftabzugskanal außerhalb der Kavität	Tiefe: 0,8 mm; Breite: 1,7 mm
Durchmesser Luftabzugskanalbohrung 1	Durchmesser: max. 1 mm; Tiefe: ca. 3,3 mm
Durchmesser Luftabzugskanalbohrung 2	Durchmesser: 2,5 mm
Venting (KavitätSENTLÜFTUNGEN)	Tiefe: 0,06 mm
Angusspalt Top-Werkzeug	min. 0,45 mm
Dichtfläche	min. 1 mm breit

Da beim FAM-Prozess mit einer Folie gearbeitet wird, ist die Grundlage eines Werkzeugs die Verwendung abgerundeter Kanten und Ecken, damit die Folie nicht beschädigt wird. Ein Radius von 2 mm an allen Kanten und Ecken verhindert die Scherwirkung des Werkzeugs auf die Folie. Andernfalls würde der Schnitt in der Folie gerade in der Kavität dazu führen, dass EMC-Schmelze durchbricht und in alle Spalten des Werkzeugs fließt. Daraus folgt ein aufwendiger Reinigungsschritt, da die neuerliche Fixierung der Folie, aufgrund der mit ausgehärtetem EMC verstopften Luftabzugsspalten im Werkzeug, nicht möglich ist.

Für die Fixierung der Folie außerhalb der Kavität werden üblicherweise Luftabzugskanäle eingebracht (Abb.2.5-2). Diese sind mit einem äußeren Vakuumpfad angeschlossen, der separat zum inneren, in der Kavität wirkenden, Vakuumpfad angesteuert werden kann. Dies erlaubt eine Vorfixierung der Folie, bevor die Luft in der Kavität abgezogen wird, oder eine Nachfixierung, falls es für den Prozess wichtig wäre, zunächst die Luft in der Kavität zu evakuieren. Der letzte Fall wäre denkbar,

wenn die Folie besonders tief in die Kavität gezogen werden muss. Dadurch wird die Zugspannung, die beim Tiefziehen auf die Folie wirkt, durch außerhalb liegende Folie kompensiert, sodass deren Zugfestigkeit nicht überschritten wird.

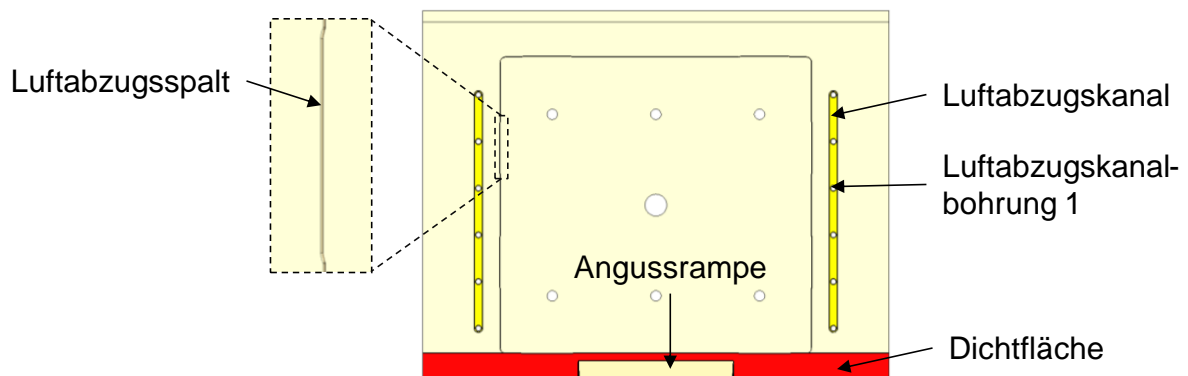


Abb.2.5-2: CAD-Darstellung eines Bottom-Werkzeugeinsatzes mit den wesentlichen Merkmalen für den Werkzeugbau.

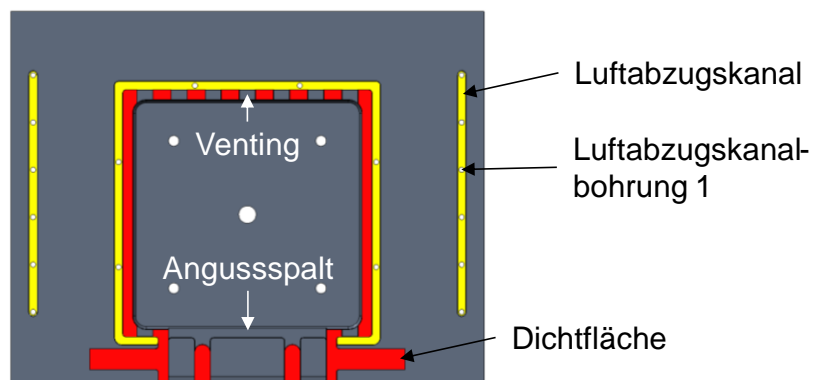


Abb.2.5-3: CAD-Darstellung eines Top-Werkzeugeinsatzes mit den wesentlichen Merkmalen für den Werkzeugbau.

Damit die Folie an das Werkzeug mittels des Luftabzugskanals fixiert werden kann, werden in diesen in regelmäßigen Abständen Luftabzugsbohrungen integriert. Direkt am Kanal liegt die Luftabzugsbohrung 1 und diese mündet in die Luftabzugsbohrung 2. Die Unterscheidung dieser beiden Typen ist in der Fertigung und dem EMC-Verarbeitungsprozess begründet. Zum einen könnte es passieren, dass EMC-Schmelze den äußeren Luftabzugskanal erreicht und dort in die Luftabzugsbohrungen fließt. Dann begünstigt ein kleiner Durchmesser den Fließwiderstand, den die EMC-Schmelze überwinden muss, um ins Werkzeug zu fließen. Daher wird das Befüllen des Werkzeugs verlangsamt. Zum anderen können dünne Bohrungen nur begrenzt tief (wenige Millimeter) in den Werkzeugeinsatz eingebracht werden. Aus diesem Grund wird auf der Prozessseite des Werkzeugs eine kleinere Bohrung (Luftabzugskanalbohrung 1) und auf der Rückseite eine größere Bohrung (Luftabzugskanalbohrung 2) eingebracht. Diese treffen sich im Werkzeugeinsatz und schließen damit den Luftabzugskanal an das Vakuumsystem an.

Um die Folie im Kavitätsbereich zu fixieren, werden Luftabzugsspalten in die Kavitäts- oder Insert-Wandung integriert und damit an den inneren Vakuumkreis ange-

schlossen. Die Abmaße dieser Luftabzugsspalten sind maximal 0,1 mm breit und bis zu 10 mm lang. Beim Tiefziehen der Folie in die Kavität verschließt diese den Luftabzugsspalt und verengt ihn. Dadurch bricht keine EMC-Schmelze während des FAM-Prozesses an der Stelle durch die Folie. Es ist aber möglich, die einzelnen Luftabzugsspalten nach dem FAM-Prozess im ausgehärteten EMC zu lokalisieren, da sie sich an der Konturkante abformen.

Damit die Folie während des FAM-Prozesses nicht durch das Werkzeug geschädigt wird, müssen alle Kanten im Prozessbereich mit einem Radius von mindestens 2 mm abgerundet sein. Andernfalls kann die Folie beim Tiefziehen oder Schließen des Werkzeugs geschnitten werden und die Kontamination des Werkzeugstahls mit der EMC-Schmelze ist sehr wahrscheinlich.

Beim Tiefziehen der Folie wird diese stark gezogen. Daher müssen Entformungsschrägen in die Kavität eingebracht werden. Bei einer Kavitätstiefe von bis zu 2 mm ist ein Winkel für die Entformungsschräge von mindestens 8° zu verwenden. Kleinere Winkel erschweren das Entformen trotz Folie erheblich, sodass die Folie bricht und das Package in der Kavitätsform zurückbleibt. Ab einer Tiefe von 2 mm ist es notwendig den Winkel größer 15° zu wählen, damit die Folie beim Tiefziehen, entlang der Entformschräge geführt wird. Das beugt der Bildung von Luftblasen unter der Folie, entlang der inneren Kavitätskanten vor. Kavitäten ab 3,5 mm sollten einen Winkel der Entformungsschräge von mindestens 45° haben, da sonst ein Bruch der Folie beobachtet werden kann und damit die EMC-Schmelze während des FAM-Prozesses durchbricht. Beim Tiefziehen einer z.B. 100 µm dicken Folie in eine Tiefe von 4 mm verjüngt sich diese so stark, dass das Risiko des Foliensversagens während des FAM-Prozesses steigt. Zudem legt sich die Folie an steil geführten Kanten dabei nicht an diese an, sodass ein Hohlraum zwischen Folie und Kavität verbleibt, der während des FAM-Prozesses der einfließenden EMC-Schmelze keinen ausreichenden Widerstand bieten kann und daher einen Foliensbruch verursacht. Aus diesem Grund muss die Folie entlang einer großzügig angelegten Entformungsschräge geführt werden.

Das Auslegen eines Angusses ist der Schlüssel für einen gelingenden FAM-Prozess. Da die FAM-Technik mit geringen Drücken (kleiner 5 bar) während des Transfers der EMC-Schmelze von der Pelletwanne in die Kavität arbeitet, können großzügige Filmangüsse eingebracht werden (Abb.2.5-3). Indem der Plunger in einer definierten Geschwindigkeit, je nach Anforderung, die EMC-Schmelze in die Kavität vertreibt, steigt der Transferdruck  $p_t$  von dem Zeitpunkt, bei dem die Schmelze den kleinsten Spalt des ausgelegten Angusses erreicht hat, an. Um einen Freistrahle, das ist ein durch immensen Druck verursachter, strahlförmiger Eintritt der Schmelze in die Kavität, zu vermeiden, sollte ein solcher Filmangusspalt größer gleich 450 µm betragen. Schmalere Angusspalt erhöhen das Risiko eines freistrahlarartigen Eindringens der EMC-Schmelze in die Kavität und begünstigen damit ein inhomogenes Füllverhalten,



indem Lufteinschlüsse zurückbleiben oder Draht-Bonds beschädigt werden können. Für den Fall, dass nur auf einer Seite eines mit elektrischen Baugruppen bestückten Schaltungsträgers verkapselt werden soll, sind im Anguss Niederhalter vorgesehen. Diese haben die Funktion, flexible Substratträger während des FAM-Prozesses nieder zu halten, damit die EMC-Schmelze nicht unter diesen fließen kann.

Die Dichtflächen in den Werkzeugeinsätzen sind die Flächen, die während des FAM-Prozesses mit der Folie das zu verarbeitende Substrat oder ihr Gegenstück berühren und damit die Kavität abdichten. In Abb.2.5-3 werden sie rot dargestellt. Wie an diesem Beispiel gezeigt, sind sie in der Fläche begrenzt, sodass sich die gesamte Schließkraft der FAM-Anlage auf diese Fläche konzentriert. Damit die Folie dadurch nicht geschädigt wird, gibt es zwei vorbeugende Maßnahmen. Zum einen muss die Fläche mindestens 1 mm breit und an den Kanten abgerundet sein und zum anderen kann mittels Werkzeugstoppfern (vgl. Abb.2.5-1b) die über die Dichtfläche wirkende Last abgefangen werden. Letzteres kann während der Prozesseinrichtung umgesetzt werden, indem unterschiedlich dicke Werkzeugstopper eingebracht werden. Ohne diese Maßnahmen würde die Folie während des FAM-Prozesses beim Zusammenfahren der Werkzeuge gestanzt werden und EMC-Schmelze würde an den Werkzeugstahl gelangen.

Um die von der EMC-Schmelzfront verdrängte Luft aus der Kavität zu vertreiben, werden Ventings als Unterbrechungen der Dichtfläche eingebracht (vgl. Abb.2.5-3). Üblicherweise werden diese am Fließwegende der Kavität und im Fließschatten eingebracht. Ventings erzeugen beim geschlossenen Werkzeug einen ca. 0,06 mm Spalt zwischen der Dichtfläche und werden entweder in den Top- oder Bottom-WZE eingebracht, je nachdem, welcher WZE die Kavität begrenzt. Für den Fall, dass beide WZE die Kavität begrenzen, werden dennoch nur in einem WZE die Ventings eingebracht. Sie werden in einem regelmäßigen Abstand zueinander in der jeweiligen Dichtfläche ausgespart. Es ist möglich, Ventings umlaufend zur Dichtfläche in diese einzubringen, da damit die Entlüftung der Kavität während des Füllvorgangs verbessert und der Verbleib von Lunkern nach dem FAM-Prozess reduziert wird. Sollten Ventings zur Entlüftung der Kavität und der in der Schmelzfront verbleibenden Luft nicht ausreichen sein, dann können zusätzlich Überläufe eingebracht werden.

### **2.5.1 Fertigung eines FAM-Werkzeugs**

Das Herstellen eines FAM-Werkzeugs kann über konventionelle Frästechnik oder Erodieren durchgeführt werden. Für die Prototypenherstellung ist es kostengünstiger mit der Frästechnik zu arbeiten, denn dann können weichere Stähle für das Werkzeug verwendet werden, die leicht durch die Schneidwerkzeuge der CNC-Fräsmaschinen bearbeitet werden können. Die so hergestellten WZE sind für eine geringe Standzeit formstabil. Sie verlieren jedoch mit zunehmender Verwendung

durch Relaxationsprozesse unter Temperatureinfluss ihre Formgenauigkeit. Deshalb sind solche WZE ausschließlich für die Prototypen- sowie Null- bis Kleinserienherstellung zu verwenden.

Für WZE, deren Formgenauigkeit für das resultierende Package bestehen bleiben soll, werden Sinterhartmetallstähle verwendet. Diese werden in der Massenproduktion von z.B. Sensorpackages, die Medienzugänge benötigen, verwendet, denn die Freistellungs-elemente im WZE müssen über dessen Standzeit auf Position bleiben. Sinterhartmetallstähle sind besonders harte und spröde Stähle. Um den Sinterhartmetallstahl zu bearbeiten, muss er drahterodiert oder senkerodiert werden, da Fräs-werkzeuge, die selbst aus einem Sinterhartmetall hergestellt werden, bei deren Bearbeitung schnell verschlissen werden. Neben der Formtreue des Sinterhartmetalls über Langzeittemperatureinwirkung verfügt dieser über eine gute Verschleißfestigkeit.

### **2.5.2 Oberflächen im Hinblick auf Film-Assisted Transfer Molding**

Durch den Einsatz der ETFE-Folie können auch weiche Werkzeugstähle verwendet werden, da die Folie als Trennschicht zwischen EMC-Schmelze und Werkzeug während des FAM-Prozesses fungiert. Dennoch kann es im Prozess dazu kommen, dass die Folie von der Schmelze durchstoßen wird. Für diesen Fall ist es möglich, dass der WZE durch den Reinigungsschritt, der nötig ist, um diesen von dem stark adhäsiven, ausgehärteten EMC zu reinigen, beschädigt wird. Deshalb sollte bei der Herstellung des WZE darauf geachtet werden, dass in der Kavität keine rauen Oberflächen im Stahl sind. Daher sollte ein  $R_z$  von kleiner  $5 \mu m$  nach dem Herstellungsprozess bestehen, da sich dann die EMC-Schmelze schlechter an der WZE-Oberfläche verankern und von dieser besser entfernt werden kann.

Besitzt die Oberfläche der Kavitätswand eine Struktur, bildet sich diese trotz Folie zu 62,5 % ab. Eine solche Struktur kann als Negativ im ausgehärteten EMC beobachtet werden. Da dies keine Auswirkung auf die Funktionalität, sondern auf die Ästhetik des Packages hat, kann bei Bedarf ein Polierschritt nach der Fertigung des WZE erfolgen, um die Struktur zu beseitigen.

Bei WZE, die für das Prototypenpackaging verwendet werden, wo nicht abgeschätzt werden kann, dass die Folie während der Versuche schadensfrei bleibt, kann mittels einer dispergieren PTFE-Beschichtung eine Antihafschicht aufgebracht werden. Damit kann der Werkzeugverschleiß über die Untersuchung minimiert werden. Die Schichtdicke beträgt dabei zw.  $1 \mu m$  bis  $20 \mu m$  [26]. In Kapitel 7.2 wird die Haftwirkung des EMC auf einer solchen Beschichtung untersucht.

### 3. Hypothese

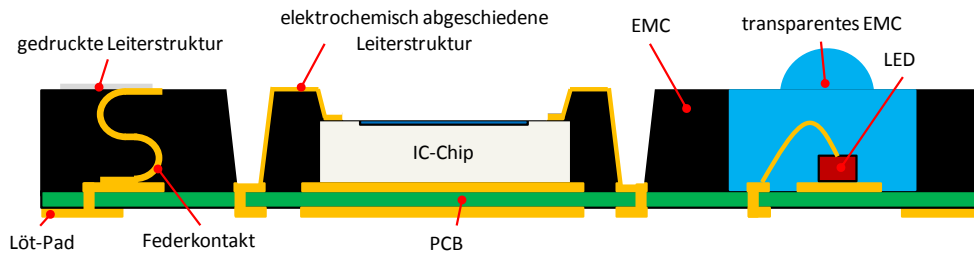


Abb.3-1: Schematische Darstellung einer komplexen Systemintegration.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Beantwortung der Hypothese, ob komplexe Systemintegration auf standardgefertigten Leiterplattenträgern mittels Film-Assisted Molding für Serienprozesse möglich ist. Daher wird in diesem Kapitel diese Hypothese analysiert, diskutiert sowie die Konzeption zum Gelingen der Behauptung vorgelegt.

Um die Aussage „komplexe Systemintegration“ zu verdeutlichen, ist in Abb.3-1 ein Schema einer solchen Integration gezeigt. Dabei handelt es sich um ein Beispiel, wie zukünftige System-in-Packages (SIP) auf Grundlage der COB (Chip on Board)-Technologie aufgebaut und funktionalisiert werden können. So entsteht ein hochintegriertes Package, das mit einer Vielzahl von Funktionen aufgebaut sein kann. Die zukünftige Komplexität eines SIP wird in Abb.3-1 durch eine LED, einen IC-Chip mit einer optischen Fläche und einen s-förmigen Federkontakt dargestellt, die zum Teil in unterschiedlichen EMC verkapselt sind.

Der s-förmige Federkontakt dient in diesem Schaubild als elektrische Verbindung zwischen PCB und EMC-Oberfläche. Damit könnte auf der Substratoberfläche mittels Drucktechnik eine weitere Verdrahtungsebene im Package integriert werden. Des Weiteren lassen sich so platzsparend passive Bauelemente wie Spulen, Widerstände, Kondensatoren sowie Antennenstrukturen integrieren. Letzteres wird in Kapitel 8.1.2 und 3 untersucht.

Die LED wird in diesem Schema in einem ersten Schritt in einem transparenten EMC verkapselt. In dem transparenten EMC könnte zudem eine Linse abgeformt sein, damit das Licht der LED beim Austritt gebündelt und damit fokussiert wird. Eine solche Integration macht eine optische Interaktion des Gesamtsystems möglich, die in modernen Roboteranwendungen zu finden sind. In Kapitel 8.2 werden die Grundlagen dieser Aufbauvariante untersucht.

Des Weiteren verdeutlicht das Schema aus Abb.3-1 durch den IC-Chip, dass in einem komplexen Systempackage Funktionsbauteile wie MEMS (Micro-Electronic-Mechanical System), IC (integrierte Schaltung) und ASIC (anwendungsspezifische integrierte Schaltung) funktional integriert werden und so das Gesamtpackage vervollständigen. Der IC-Chip kann wie im Schema angedeutet eine optische Fläche besitzen, die im Packaging-Prozess mittels FAM-Technologie freigestellt wird (Kapitel 5.2). So können Signale, wie z.B. das Licht der LED, durch die optische Fläche

aufgenommen und mittels ASIC und weiterer Auswerteelektronik, die ebenfalls zu dem Gesamtsystem gehören, verarbeitet werden.

Falls aus Platzgründen Draht-Bonds zur elektrischen Kontaktierung des IC nicht eingesetzt werden können, kann mittels eines MID-(Molded Interconnect Device)-Prozess für EMC der elektrische Kontakt hergestellt werden. Die MID-Herstellung ist eine etablierte Technologie, die vor allem in der Thermoplastverarbeitung gründet. Dabei wird die geometrische Freizügigkeit des Thermoplastspritzgießens mit einem definierten Laserstrukturierungsprozess kombiniert, sodass auf thermoplastischen 3D-Bauteilen Leiterstrukturen mittels Laserbestrahlung erzeugt werden. Anschließend werden diese strukturierten Bauteile in ein Elektrolytbad gegeben und durch einen elektrochemischen Prozess scheidet sich auf den Strukturen ein Metall, überwiegend Kupfer (Cu), als Startschicht ab. In weiteren Prozessschritten lassen sich auch andere Metalle wie Nickel (Ni) und Gold (Au) auf die Startschicht aufbringen. Weiterführende Informationen zu der MID-Technologie können in der Literatur gefunden werden [27]. Nachdem das Anwendungsfeld für thermoplastische MID gut erschlossen und eine Industrie entstanden ist, liegt der Fokus der Forschung auf EMC-MID [28], [29], denn hochgefüllte Duroplaste als Verbundwerkstoff sind von den Materialeigenschaften, wie niedriger CTE, Formbeständigkeit bei hohen Temperaturen, Verarbeitungseigenschaften und vieles mehr, ideal für die Anwendung als Schaltungsträger geeignet. Vor allem das EMC für First Level Packaging-Anwendungen kann, durch dessen hohen Füllgrad an sphärischen SiO<sub>2</sub>-Partikeln, einen CTE von *7 ppm/K* haben, der damit nah am Silizium-Chip CTE eingestellt ist [30].

Die Funktionskette des Schemas aus Abb.3-1 könnte wie folgt sein: Die LED leuchtet während des Betriebs des SIP und das von ihr ausgehende Licht wird in der Linse fokussiert. Dann könnte der IC-Chip ein Bildsensor sein, der ein Foto aufnimmt. Dieses würde in den weiteren Package-Komponenten verarbeitet und drahtlos mittels einer auf der EMC-Oberfläche gedruckten Antenne, die mittels Federkontakt mit der PCB verbunden ist, an eine Zentraleinheit versandt.

Ein solches SIP wäre von den Bauteilabmessungen sehr platzsparend, da alles auf First Level Packaging-Basis aufgebaut werden könnte. Das heißt alle Chips nackt und elektrisch kontaktiert, via Draht-Bonding oder Flip-Chip, und anschließend mittels Transfer Molding (TM) schonend verkapselt. Die Stellen an denen vorher keine elektrischen Kontaktierungen gesetzt werden können, könnten im Nachhinein mittels MID- oder Drucktechnik elektrisch kontaktiert werden. Die Prozessschritte könnten so in der Anzahl verringert und damit die Kosten der Herstellung gesenkt werden.

Für den Fall, dass der Aufbau des SIP noch stärker vor den äußeren Umwelteinflüssen geschützt werden muss, kann ein zweiter FAM-Schritt, ähnlich dem Second-Level Packaging, durchgeführt und ein Fenster für den Schutz vor Kontamination der freiliegenden Sensorfläche aufgebracht werden (Abb.3-2). Das Resultat ist dann ein hochintegriertes SIP mit einer komplexen Systemintegration.

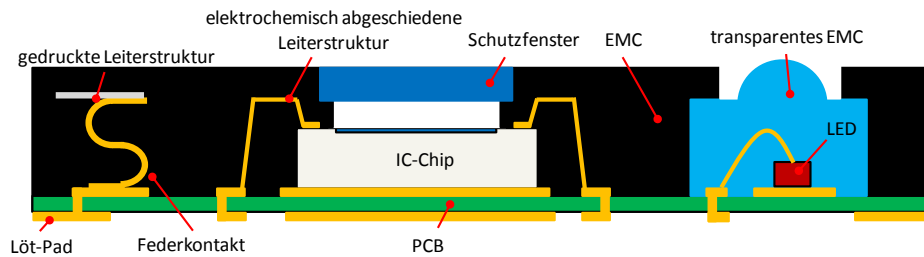


Abb.3-2: Schematische Darstellung einer komplexen Systemintegration nach einem Second-Level Packaging-Prozess.

Um die Herstellungskosten eines solchen Package niedrig zu halten, müssen Ressourcen verwendet werden, die leicht verfügbar und kostengünstig sind. Ideal hierfür wären „standardgefertigte Leiterplattenträger“. Diese würden nicht durch Sonderanforderungen im Aufbau verkompliziert werden und könnten so einfach verwendet werden. Für eine komplexe Systemintegration ist jedoch die Anforderung an die Genauigkeit eines Leiterplattenträgers sehr hoch und deshalb widmet sich Kapitel 4.2 im Detail diesem Thema. Da die Herstellerangaben zu den Toleranzen sehr großzügig gehalten sind (Tab.4.2-1), müssen geeignete Maßnahmen bei dem Aufbau- und Verbindungstechnikprozess getroffen werden, diese Toleranzen zu kompensieren. Dennoch steckt aufgrund der guten Eigenschaften von PCB (Kapitel 2.2) ein großes Potential in Bezug auf die Anwendung im Packaging. So können in miniaturisierten und mit einer hohen Verdrahtungsdichte ausgestatteten Packages ganze Systeme mit komplexen Funktionen eingebracht werden, sodass mehr Anwendungen in einem diskreten Bauraum integriert werden können. So kann in allen Industriesparten Innovation mit smarter Integration erreicht werden.

Das „Film-Assisted Molding“ als Basistechnologie für die Umsetzung eines solchen SIP ist sehr zu empfehlen, denn Innovation hängt von der Flexibilität der Fertigungsverfahren ab. Durch den Einsatz der ETFE-Folie auf beiden Werkzeughälften können so leicht modulare Werkzeugkonzepte umgesetzt werden. Solche Werkzeuge können für Kleinserien und den Prototypenbau aus weichen Werkzeugstählen gefertigt und kostengünstig modular aufgebaut werden.

Für einen „Serienprozess“ ist es wichtig, dass alle damit zusammenhängenden Prozesse reproduzierbar in Qualität, Preis, Herstellung und Zuverlässigkeit sind. Dafür muss eine funktionierende Prozesskette existieren, in der Abnahmekriterien, Qualitätsstandards und Prozesszeiten definiert werden. Ein grundlegender Teil dieser Arbeit ist es, eine solche Prozesskette zu entwickeln. Grundsätzlich kann eine Prozesskette, welche die Hypothese belegt, wie in Abb.3-3 gezeigt aussehen. Sie wird in den Kapiteln 4, 5, 6 und 7 überprüft, mit dem Ziel, dieses Prozesskettenkonzept zu bestätigen. Das Wort „Beauftragung“ im Schaubild meint, dass ein gewünschtes Packaging-Design und dazu die passenden IC, MEMS sowie ASIC vorliegen. Deshalb startet die Prozesskette mit dem Erstellen eines PCB-Layouts.

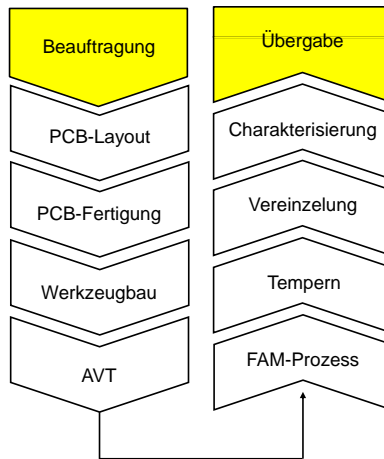


Abb.3.3: Prozesskette für die Serienherstellung eines kundenspezifischen System-in-Package.

Da der Schwerpunkt auf der PCB-Technologie liegt, müssen in einem ersten Schritt die Standards für das PCB-Design festgelegt werden, die den späteren FAM-Prozess unterstützen. Um die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses darzustellen, muss eine PCB auch im Nutzen gefertigt und für alle nachfolgenden Prozessschritte geeignet sein. Dies wird in Kapitel 4.1 dargestellt.

Des Weiteren ist es für Positionierprozesse notwendig, die Toleranzen der PCB-Technologie, im Speziellen am FR4-Standard, zu betrachten. Das geschieht in Kapitel 4.2. Der Schwerpunkt der Untersuchung ist es, zu ermitteln, wie stark FR4-basierte PCB durch die herstellungsbedingten Toleranzen voneinander abweichen, im Hinblick auf eine  $50\ \mu\text{m}$  genaue Positionierung der IC, MEMS sowie ASIC relativ zum FAM-Werkzeug. Bei einer großen Abweichung wird ein Konzept aufgezeigt, das die AVT ergänzen kann, wenn es auf eine präzise Positionierung in der erarbeiteten Prozesskette ankommt.

Die erfolgreiche Produktion eines leiterplattenbasierten Package ist abhängig vom Werkzeugkonzept. Daher wird in Kapitel 4.3 ein Werkzeugkonzept für leiterplattenbasierte Packages dargestellt, die an Standardpackages angelehnt sein können, und ein Werkzeugkonzept, das den Einsatz der Technologie für Sonderlösungen aufgezeigt. Als Referenz für Standardbauteile wird ein QFN 48 auf Leadframe verwendet, welches in eine Leiterplattennutzenvariante überführt wird. Für die Sonderlösung dient als Referenzbauteil ein Keramikpackage, in dem ein Bildsensor integriert ist. Auch dieses soll in eine leiterplattenbasierte Packagingvariante überführt werden, die, im Gegensatz zum Keramikpackage, nur die Sensorfläche freistellt. Dabei wird in den Kapiteln 4.3.2 und 5.2 das AVT-Konzept für eine präzise Positionierung der Bildsensoren auf dem Leiterplattennutzen relativ zum FAM-Werkzeug dargestellt und getestet. Da der AVT-Prozess für Standardpackages trivial ist, wird er nicht im Einzelnen in dieser Arbeit diskutiert. Bei bestehendem Interesse an diesem Thema wird der Leser auf die Referenzen [31]–[33] verwiesen.

Der FAM-Prozess wird im Kapitel 5 behandelt. Dabei wird diskutiert, welche Effekte während des Herstellens eines leiterplattenbasierten Packaging auftreten und wie diese den Herstellungsprozess beeinflussen können. Zudem wird das Freistellen von Sensorelementen am Beispiel eines Bildsensors diskutiert. Des Weiteren wird anhand eines Inertialsensorpackages demonstriert, dass das FAM eine schonende Verkapselung ermöglicht und damit auch für das Packaging von MEMS geeignet ist.

Nach dem FAM-Prozess erfolgt üblicherweise ein Temperprozess. Dieser dient dazu, das EMC durch eine Lagerung bei der Verarbeitungstemperatur für mehrere Stunden weiter auszuhärten. Erst danach verfügt dieses über seine vollen mechanischen Eigenschaften. Beim Temper-Prozess werden zudem Spannungen im EMC abgebaut.

Auf den Temperprozess folgt das Trennen des Packages vom Leiterplattennutzen (LN) mittels Wafersägen. Dies wird in Kapitel 5.4 thematisiert. Anschließend werden die vereinzelt Packages stichprobenartig elektrisch geprüft. Der Erfolg der in Abb.3-3 dargestellten Prozesskette hängt von der Herstellung zuverlässiger Packages ab. Deshalb widmet sich Kapitel 6 dem Thema Charakterisierung und Zuverlässigkeit. Hierfür werden die in Kapitel 5.1 und 5.2 betrachteten Packages der Untersuchung zu Grunde gelegt. Die Charakterisierung erfolgt optisch und elektrisch. Beschleunigte Umwelttests sollen beweisen, dass die leiterplattenbasierten Packages konkurrenzfähig zu den Referenzpackages sind.

Mit den Kapiteln 4, 5 und 6 dieser Arbeit wird die Prozesskette aus Abb.3-3 und damit die Serientauglichkeit belegt. Das leiterplattenbasierte Package wird im Fortlaufenden als FlexPac bezeichnet. Damit soll zum Ausdruck kommen, dass aufgrund der PCB-Technologie als Schaltungsträger eine flexible Schaltungsgrundlage für das Package existiert, die an die Anforderungen von Sonderlösungen angepasst ist und platzsparend aufgebaut werden kann.

Mit Kapitel 7 wird grundlegend die Haftfestigkeit des EMC auf den diversen Werkzeug- sowie PCB-Oberflächen untersucht. Hierfür wird eine Testmethode entwickelt und diskutiert. Der Anspruch dieses Kapitels ist, zu belegen, dass die Haftung zwischen EMC und den verschiedenen PCB-Oberflächen so gut ist, dass die Zuverlässigkeit eines FlexPac gewährleistet werden kann. Die Werkzeugoberflächen werden betrachtet, da es beim FAM zu Folienbrüchen kommen kann und dies dazu führt, dass die EMC-Schmelze die Werkzeugoberfläche benetzt. Dabei ist der Schwerpunkt, geeignete Oberflächenbeschichtungen zu identifizieren, die ein Anhaften der EMC-Schmelze verhindern, damit kein Reinigungsaufwand besteht.

Kapitel 8 widmet sich dem Thema komplexe Systemintegration und zeigt erste Umsetzungen im SIP. Dabei wird gezeigt, wie Teile aus Abb.3-1 und 3-2 umgesetzt werden. Es wird exemplarisch dargestellt, welche Möglichkeiten zur komplexen Systemintegration bestehen, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu haben.

#### 4. Konzeption leiterplattenbasiertes Packaging

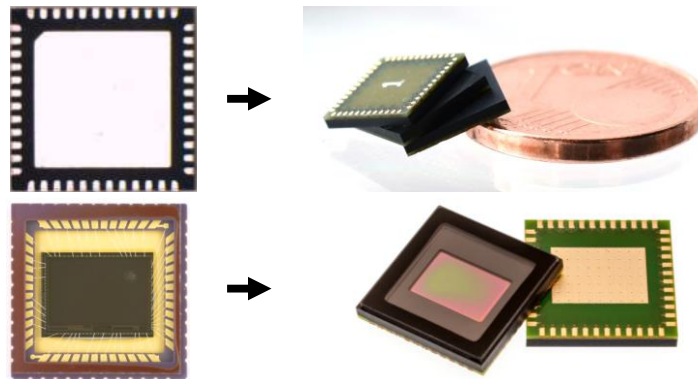


Abb.4-1: Oben: (links) leadframe-basiertes QFN 48 7x7 als Vorlage für (rechts) die leiterplattenbasierte Variante als QFN-FlexPac, unten: (links) ein HDRC®-G2 Bildsensor in LCC48-Gehäuse (Kyocera PB-CB0239) und (rechts) die leiterplattenbasierte Variante eines Bildsensor-FlexPac.

Im IGF-Vorhaben „FlexPacFAM“ (kurz für: Flexibles leiterplattenbasiertes Packaging) wurde die Leiterplattentechnologie mit der FAM-Technologie kombiniert, um einen flexiblen leiterplattenbasierten Package-Aufbau zu ermöglichen [18]. Grundlage dieser Untersuchung war es, eine innovative Packaging-Technologie zu entwickeln. Durch den Anspruch des Elektronikmarktes, schnell verfügbare, kostengünstige und smarte Packages aufzubauen, müssen gerade in der IC- wie MEMS-Verpackungsindustrie neue Umsetzungsvarianten erarbeitet werden. Denn durch die rasante Entwicklung im Consumer-, Automotive-, Medizintechnikbereich sowie der übrigen Industrie werden flexible auf den Einsatzort angepasste Packaging-Lösungen von unterschiedlichsten Sensoren und Mikrochips entwickelt werden.

Das leadframe-basierte Packaging stellt die Technologie für Standardpackages dar, da Leadframes feinere Toleranzen als PCB aufweisen und sich in den letzten Jahrzehnten im Kunststoffpackaging bewährt haben. Dennoch sind Leadframes in den Verdrahtungsmöglichkeiten limitiert und besitzen eine lange Lieferzeit. Des Weiteren ist deren Herstellungsprozess an die Konzeption eines Stanzwerkzeugs gebunden, was die Kosten für Sonderanfertigungen erhöht. Da Leadframes überwiegend aus gewalztem Metall bestehen, können sie preislich nicht mit PCB mithalten. Aus diesen Gründen ist die PCB-Etablierung in der Packaging-Industrie auf dem Vormarsch. Chip-Gehäuse müssen immer kleiner, flacher und hochfunktional werden. Diese Anforderungen sind nahezu ideal für PCB, da diese aufgrund des Lagenaufbaus platzsparend verdrahtet und daher kleiner werden können.

In diesem und Teilen des nächsten Kapitel wird an zwei FlexPac, dem QFN- (Quad Flat No-lead) und Bildsensor-FlexPac, die Komplettlösung eines leiterplattenbasierten Packaging demonstriert. In Abb.4-1 sind beide FlexPac mit dem jeweiligem Referenzbauteil auf Basis herkömmlicher Gehäuse dargestellt. Das QFN-FlexPac soll als leiterplattenbasierte Variante des leadframe-basierten QFN 48 7x7 und das Bildsensor-FlexPac als leiterplattenbasierte Variante des HDRC®-G2 Bildsensor in LCC48-Gehäuse (Kyocera PB-CB0239) aufgebaut und im FAM-Prozess gehaust werden.



Anhand der Referenzbauteile (Vorbildbauteile für die FlexPac) werden die Ergebnisse der FlexPac-Herstellung bewertet. Ziel dieses Kapitels ist es, die generelle Umsetzung einer Prozesskette zur Serienherstellung von FlexPac zu diskutieren und dabei die Vorteile herauszuarbeiten.

#### 4.1 Konzeption eines Leiterplattennutzens für das FAM

Für das leiterplattenbasierte QFN-FlexPac ist der Leiterplattennutzen (LN) wie in Tab.4.1-1 spezifiziert (Abb.4.1-1). Um das Leiterplattenlayout zu erstellen, müssen die Anforderungen der einzelnen Prozessschritte wie Chipbestückung, FAM-Prozess, Vereinzelung und Funktionstests berücksichtigt werden.

Tab.4.1-1: Spezifikation für den LN des QFN-FlexPac in Anlehnung an ein Standard QFN48 7x7 Package.

Spezifikation	Eigenschaften
Platinengröße	55 x 55 mm <sup>2</sup>
Moldingfenster	42,5 x 42,5 mm <sup>2</sup>
Angussfläche	29,8 x 6,2 mm <sup>2</sup>
Montageflächen	5 x 5 mm <sup>2</sup>
Chipmontagefläche	5,2 x 5,2 mm <sup>2</sup>
Sägebahnbreite	0,32 mm
Bondpad- bzw. Kontaktfläche	0,30 x 0,25 mm <sup>2</sup>
Lagenanzahl	4
Dicke	0,3 mm
Via-Durchmesser	0,3 mm
T <sub>g</sub>	> 150°C
Metallisierung	ENEPIG
Kupferschicht	35 µm
Lötstopplack	Nur Bottomlage

Die Spezifikationen in Tab.4.1-1 zeigen grundlegende Forderungen an einen LN, die erfüllt werden müssen, um mit einem leadframe-basierten QFN-Package qualitativ gleichwertig bzw. besser zu sein. Ein LN muss daher vergleichbar plan wie ein Leadframenutzen sein. Damit der Verzug des LN nach der Fertigung minimal wird, sollte ein gleichgroßer Metallanteil auf der Top- und Bottom-Lage vorliegen. Durch Innenlagenmetallisierungen kann der LN zusätzlich stabilisiert werden. Das Verhindern eines Verzugs des LN ist im PCB-Design zu berücksichtigen, da sonst die Chip- und Draht-Bonding-Prozesse durch einen Verzug des LN nicht oder nur erschwert möglich sind.

Die Vias (Abb.4.1-2a) in der Leiterplatte werden aufgrund der niederviskosen EMC-Schmelze während des FAM-Prozesses gefüllt. Lötpads können dadurch verunreinigt werden oder das ausgehärtete EMC im Via kann eine Schwachstelle des Package darstellen, denn dies könnte bei Temperaturwechsel durch ständiges Ausdehnen und Zusammenziehen brechen und delaminieren. Feuchte kann in das Package gelangen und dort Kurzschlüsse erzeugen und Korrosionsprozesse auslösen. In Kapitel 6 wird dies bei den durchgeführten Zuverlässigkeitsuntersuchungen diskutiert.

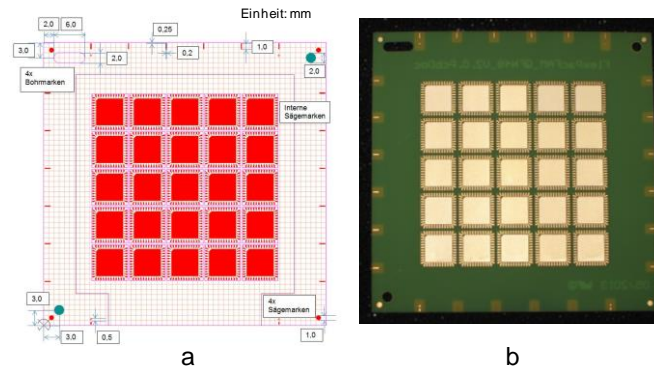


Abb.4.1-1: a) Zeigt das Top-Layout des QFN48 7x7 LN-Design mit 25 Montageflächen und b) zeigt die Top-Lage des gefertigten QFN48 7x7 LN.

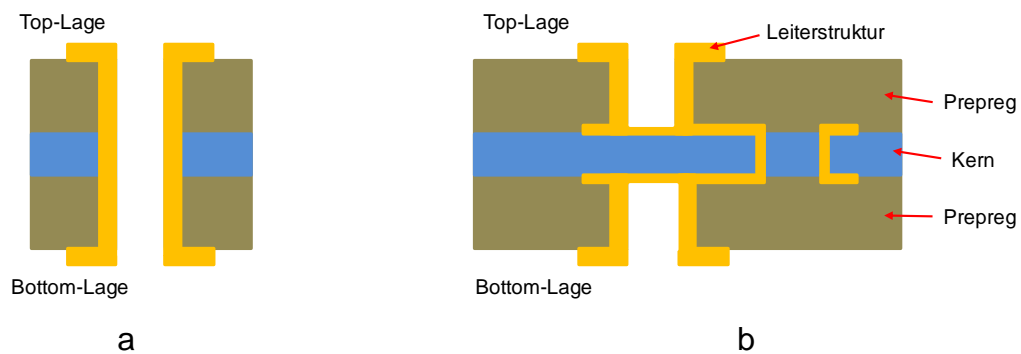


Abb.4.1-2: Visualisierung a) eines Standard-Vias und b) eines über zwei Innenlagen geführten Vias.

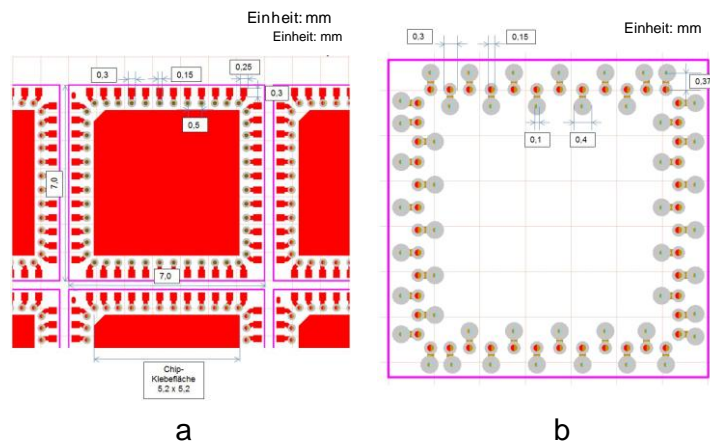


Abb.4.1-3: a) QFN LN-Ausschnitt: Montagefläche mit Vias und b) Darstellung der ersten Innenlage einer Montagefläche mit vergrabenen Vias.

Eine Alternative zu den durchgebohrten Vias ist eine Umverdrahtung von der Top- zur Bottom-Lage über zwei Innenlagen (Abb.4.1-2b). Diese Aufbauvariante verschließt die Vias durch die Innenlage, sodass keine Schmelze über die Top- zur Bottom-Lage gelangen kann. Jedoch könnten Luft einschließen in der Senke des Vias verbleiben. Auch dies würde zu Effekten führen, die die Zuverlässigkeit des FlexPac beeinträchtigen könnten.

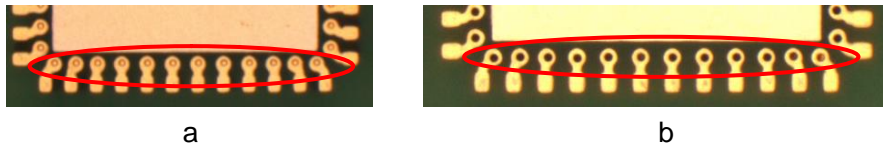


Abb.4.1-4: Montagefläche des QFN-LN mit a) über die Innenlagen geführten und b) durchgängigen Vias.

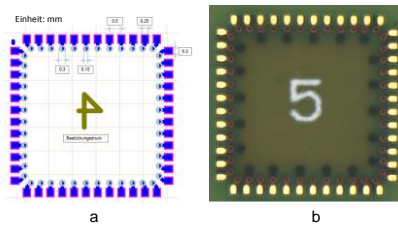


Abb.4.1-5: a) Zeigt das LN-Design mit eckigen Löt pads und b) den gefertigten LN mit herstellungsbedingt abgerundeten Ecken. Zudem kann in b) die Umverdrahtung der Vias beobachtet werden. Die Zahlen dienen nur der Markierung der einzelnen Aufbauten, um in den Zuverlässigkeitstests nachverfolgt zu werden.

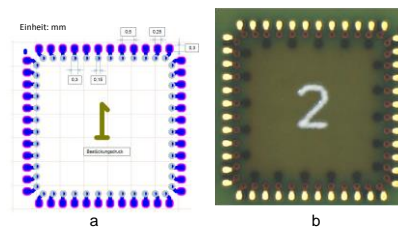


Abb.4.1-6: a) Zeigt das LN-Design mit runden Löt pads und b) den gefertigten LN. Zudem kann in b) die Umverdrahtung der Vias beobachtet werden.

Eine Designmöglichkeit für die Umverdrahtung der Vias über die Innenlage für einen QFN-LN ist in Abb.4.1-3 gezeigt. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen und aufgrund von Platzmangel werden die Vias in der Innenlage alternierend nach innen und außen geführt. In Abb.4.1-4 sind beide hier diskutierten Umsetzungen für Vias gegenübergestellt. Die umverdrahteten Vias zeigen einen Metallglanz am Via-Boden in der Innenlage und die herkömmlichen Vias sind dunkel.

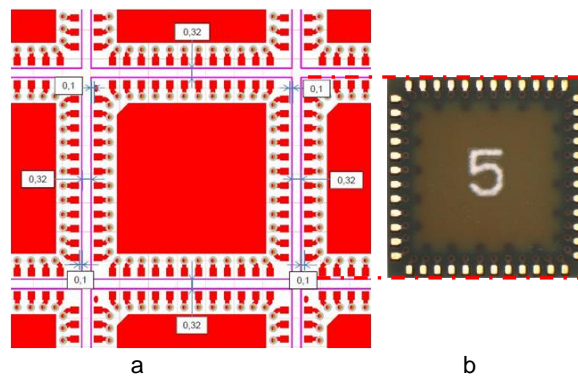


Abb.4.1-7: a) Zeigt einen Designausschnitt des LN für das QFN-FlexPac mit bemaßten Sägegraben und b) ein mittels Wafersäge vereinzelt QFN-FlexPac.

Da das QFN-FlexPac in der späteren Montage während einer SMD-Bestückung (Surface Mounted Device) gelötet werden soll, müssen die Löt pads ausreichend dimensioniert werden. PCB besitzen größere Toleranzen als Leadframes. Deshalb müssen die vom Hersteller angegebenen Toleranzen auf die Dimension der Fläche des Löt pads berücksichtigt werden, damit mögliche Verschiebungen des Leiterbilds für einen Testsockel ohne Auswirkung bleiben. Aufgrund der lithografischen Herstellung des Leiterbilds werden Ecken überwiegend abgerundete hergestellt, sodass darauf bei der Auslegung der Löt pads geachtet werden muss. In Abb.4.1-5 und Abb.4.1-6 sind die Unterschiede zwischen eckigen und runden Löt pads eines LN dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die eckig ausgelegten Löt pads nach der Fertigung stark abgerundet sind. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Lötbarkeit eines FlexPac, sondern könnte sich, bei unzureichender Dimensionierung, als nicht integrierbar in einen elektrischen Testsockel für die Qualitätsprüfung nach der Packagingherstellung erweisen.

Die Bemaßung des Sägegrabens für das Vereinzeln der FlexPac aus dem LN ist abhängig von der Dicke des verwendeten Sägeblatts und von der Schnitttoleranz der Sägemaschine. Beispielsweise kann ein  $0,3\text{ mm}$  dickes, mit Diamanten besetztes Sägeblatt verwendet werden. Die Löt pads sowie alle Metallagen sollten einen Mindestabstand von  $0,1\text{ mm}$  zum Sägegraben nicht unterschreiten. Sonst könnte der LN an der Schnittkante delaminieren, da der Verbund zwischen Prepreg und Metallage der schwächste im laminierten PCB-System ist (Kapitel 6.2.1). Weiterhin könnte es zum Trennen einzelner Leiterstrukturen kommen. Dann würde Kupfer offen gelegt werden und korrodieren. In Abb.4.1-7 ist das Design des Sägegrabens anhand des QFN-FlexPac-LN gezeigt.

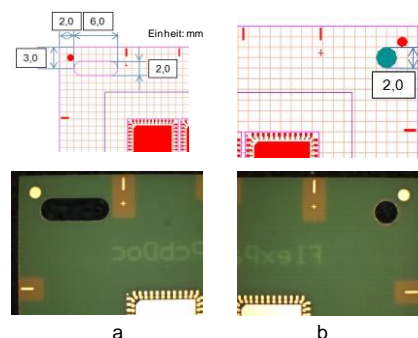


Abb.4.1-8: LN-Design und Umsetzung im LN bzgl. der Aufnahmebohrungen, der a) Langlochbohrung und b) Bohrung.

Damit der LN in einem FAM-Prozess verarbeitet werden kann, müssen entsprechende Aufnahmekonzepte für die Integration ins Werkzeug vorgesehen werden. Beim leadframe-basierten Packaging hat sich ein Lochpaar bestehend aus einem Langloch sowie einer Bohrung auf der gleichen Achse liegend bewährt. Die Bohrung ist für die Zentrierung des LN im FAM-Werkzeug notwendig. Das Langloch hingegen kompensiert die thermische Ausdehnung des LN, indem dieser sich während der Aufheizphase entlang der Achse ausdehnen kann. Dieses Konzept wird auch für das

leiterplattenbasierte Packaging verwendet. In Abb.4.1-8 ist die Umsetzung dieser Aufnahmebohrungen im QFN-FlexPac-LN gezeigt.

Tab.4.1-2: Spezifikationen des LN für den Bildsensor-FlexPac.

Spezifikation	Abmaße
LN-Abmaße	55 x 55 x 0,51 mm <sup>3</sup>
FAM-Kavität	47,3 x 47,3 mm <sup>2</sup>
9 Montageflächen mit 48 Pins	14,22 x 14,22 mm <sup>2</sup>
Chipmontagefläche	9,17 x 6,8 mm <sup>2</sup>
Draht-Bond-Pad	0,51 x 1,02 mm <sup>2</sup>
Draht-Bond-Pad-Pitch	1,02 mm
Castellation-Bohrtiefe	170 µm
Castellation-Bohrdurchmesser	0,51mm
Sägebahnbreite	320 µm

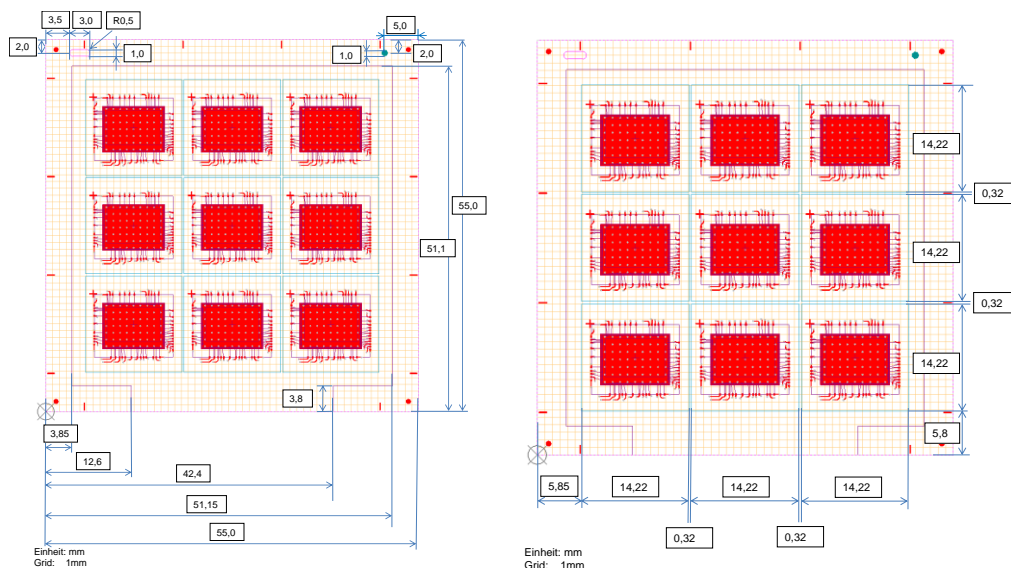


Abb.4.1-9: Abmaße des Bildsensor-FlexPac-LN als Design.

Des Langloch für den FAM-Prozess sollte durch eine einzige Fräsbewegung hergestellt werden. Wird es stattdessen mittels mehrerer nebeneinander liegender Bohrungen, dem sogenannten Nippeln, hergestellt, entsteht eine wellig gezackte Langlochkante, die zu einem unsymmetrischen und nicht geometrietreuen Langloch führt. Dadurch entsteht eine hohe Abweichung zur Stiftaufnahme und der LN lässt sich nicht der Spezifikation gemäß in das Werkzeug integrieren. Um die Bohrungen zu fertigen, können zwei Herstellungsvarianten beim Hersteller beauftragt werden. Variante 1 ist die Standardfertigung und verursacht eine Toleranz der "Bohrung zum Leiterbild" von  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Dabei wird innerhalb der Fertigungsanlage, wo alle vorherigen Prozesse durchlaufen, gebohrt. Variante 2 stellt einen Sonderfertigungsschritt dar, bei dem das PCB-Los in einer Fräsmaschine, außerhalb der üblichen Fertigungskette, gebohrt wird. Auf diese Weise kann der Hersteller eine Feinst-Toleranz der "Bohrungen zum Leiterbild" von  $\pm 0,05 \text{ mm}$  realisieren. In Kapitel 4.2 ist eine ausführliche Toleranzbetrachtung diskutiert.

Im Folgenden werden die Spezifikationen eines LN diskutiert, der für das Packaging von Sensoren, die einen Medienzugang benötigen, hergestellt wird. Als Beispiel dient der LN des Bildsensor-FlexPac. In Tab.4.1-2 sind die Spezifikationen und in Abb.1-9 die Abmaße des Bildsensor-FlexPac-LN dargestellt. Der wesentliche Unterschied zu dem QFN-FlexPac ist, dass das Referenzpackage nicht leadframe-basiert, sondern ein Keramikpackage ist. Deshalb ist die Überführung dieser Vorlage in ein leiterplattenbasiertes Package anspruchsvoller. Der Footprint des Bildsensor-FlexPac-LN zeigt die gleichen Anschlüsse wie das LCC48-Keramikgehäuse.

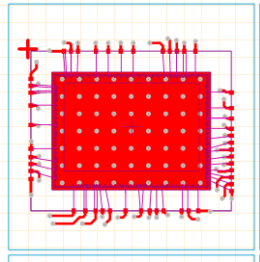


Abb.4.1-10: Design der Bildsensor-Montagefläche.

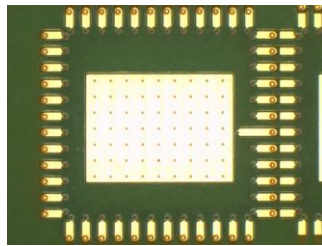


Abb.4.1-11: Leiterplattenanschlüsse mit Castellations-Sacklöchern und ohne (benachbarte Position rechts) sowie Via-Matrix auf der Montagefläche.

Da sich der Bildsensor während des Betriebs erwärmt, wird ein Entwärmungskonzept vorgesehen. Eine gute thermische Ankopplung des Bildsensors an das Package wird dadurch ermöglicht, dass die Montagefläche in allen Lagen des LN konzipiert wird (Abb.4.1-10). Die Metallflächen in den Innenlagen werden durch mehrere Vias mit der Montagefläche auf der Top- und Bottom-Lage verbunden. Damit wird eine gute Ableitung der Wärme während des Betriebs erzeugt. Die Vias können dabei durchgehend sein oder über die Innenlagen geführt werden. Letzteres würde das Durchfließen des ICA (isotropic-conductiv adhesive) oder NCA (non-conductive adhesive) verhindern. Des Weiteren kann die Feuchte nicht durch die Metallagen zum Sensor gelangen, was die Zuverlässigkeit des Sensors steigert.

Aufgrund besserer Lötbarkeit, verfügt ein LCC48-Keramikpackage über Anschlüsse an den Seiten, sogenannte Castellations. Diese dienen zudem als Kontakte für einen elektrischen Funktionstest nach dem Packaging. Die Umsetzung der Castellations des Referenzpackages wird mittels Sacklöcher umgesetzt. Dabei handelt es sich um Vias, die nur eine begrenzte Anzahl an Metallagen durchlaufen. Die Sacklöcher besitzen einen Radius von  $300 \mu\text{m}$  und werden bis zur zweiten Metalllage (etwa  $180 \mu\text{m}$ ) gebohrt. Dies entspricht nicht der originalen Castellationshöhe von  $1,08 \text{ mm}$ ,

ist jedoch für die Anforderungen ausreichend. Die Castellations entstehen durch den Sägeprozess, der sie als Halbrundungen an der Schnittkante freilegt.

In Abb.4.1-11 ist die Umsetzung der Vias auf der Montagefläche wie auch die Castellations auf dem LN zu sehen. Für einen Funktionsvergleich sind auf dem LN vier Montageflächen vorgesehen, bei denen keine Castellations geplant sind.

Die aus diesem Kapitel ableitbaren allgemeingültigen Leitlinien für die Konzeption eines LN für ein beliebiges FlexPac sind in Tab.4.1-3 aufgeführt. Abmaße, Leiterbild und Lagenaufbau sind spezielle und für jede Anwendung individuelle Anforderungen; deshalb werden diese Punkte nicht aufgeführt.

Tab.4.1-3: Leitlinien zur Konzeption eines LN für ein beliebiges FlexPac.

Leitlinien	
Planarität des LN	<ul style="list-style-type: none"> <li>gleiche Metallanteile in Top- und Bottom-Lage</li> </ul>
Via	<ul style="list-style-type: none"> <li>in Zwischenlage verdrahtet, damit kein EMC auf Bottom-Lage gelangt</li> </ul>
Lötspad	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimension der Lötspadfläche abhängig von PCB-Toleranzen</li> </ul>
Sägegraben	<ul style="list-style-type: none"> <li>durch Sägeblattstärke und Schnitttoleranz vorgegeben</li> <li>100 <math>\mu\text{m}</math> Mindestabstand von Lötspads zur Schnittkante</li> </ul>
Aufnahmebohrungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Langloch und Bohrung auf einer Achse liegend</li> <li>Langlochbohrung in einem Frässchritt und nicht "genippelt" herstellen</li> </ul>
Entwärmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wärmeabtransport über in regelmäßigen Abständen angeordnete Vias, die von der Montagefläche zum Bottom-Pad geführt werden</li> </ul>

## 4.2 Toleranzbetrachtung Leiterplatte

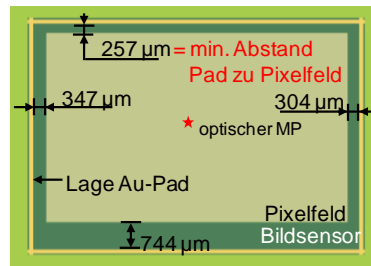


Abb.4.2-1: Schematische Darstellung der Bildsensoroberfläche mit integrierten Abmessungen Pixelfeld zu Au-Draht-Bond-Pad sowie der Lage der optischen Mitte.

Um einen Serienprozess mit einem leiterplattenbasierten Packaging zu entwickeln, muss die Toleranzkette der gesamten Herstellungskette überprüft werden. Durch das Ergebnis der Überprüfung werden Maßnahmen abgeleitet die einen reproduzierbaren Prozess gewährleisten. Gerade für Sensoren, die einen Medienzugang benötigen, ist eine Toleranzbetrachtung erforderlich, denn beim Erzeugen von Medienzugängen und Freistellungen muss präzise gearbeitet werden. Die Toleranzbetrachtung wird am Beispiel des Bildsensor-FlexPac veranschaulicht. Diese Betrachtung wurde im IGF-Vorhaben FlexPacFAM durchgeführt [18]. Das Pixelfeld des Bildsensors befindet sich nicht symmetrisch auf dem Bildsensor. Damit ist der opti-

sche Mittelpunkt nicht der Bauteilmittelpunkt (Abb.4.2-1). Der Abstand von  $257 \mu\text{m}$  des Pixelfelds zum Au-Draht-Bond-Pad ist eine Herausforderung für die Freistellung im FAM-Prozess und damit die maßgebende Dimension für die Zieltoleranz.

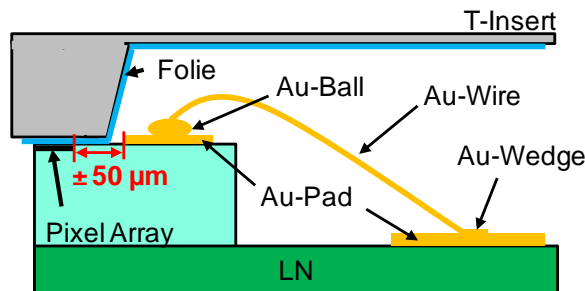


Abb.4.2-2: Schematische Betrachtung der Herausforderung für die Herstellung eines Bildsensor-FlexPac. Mit Pixel Array ist das Pixelfeld gemeint.

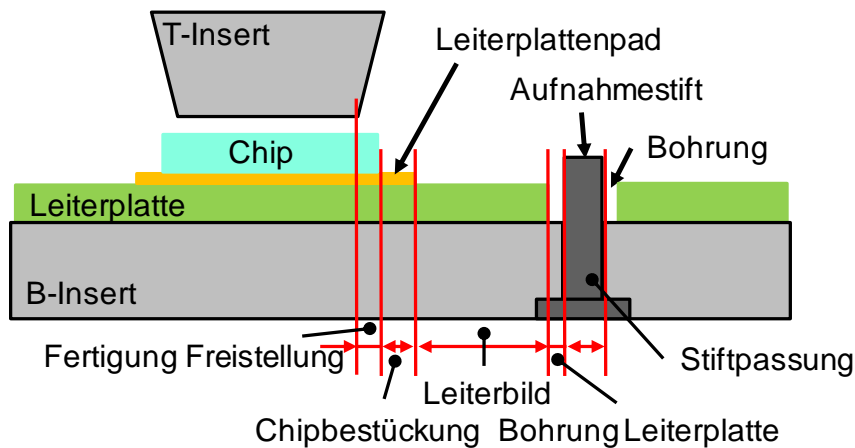


Abb.4.2-3: Schematische Darstellung der für die Positionierung des Bildsensors identifizierten Toleranzen.



Abb.4.2-4: Schematische Zusammenhänge der Toleranzkette für die Zieltoleranz.

Um das Pixelfeld gut abzudecken, muss dieses vom Werkzeug mit mindestens  $100 \mu\text{m}$  überlappend freigestellt werden. Das Werkzeug muss mindestens  $100 \mu\text{m}$  vom Au-Draht-Bond-Pad entfernt sein. Damit bleiben an der kritischsten Stelle  $57 \mu\text{m}$  Überstand für ein zerstörungsfreies FAM-Ergebnis. In Abb.4.2-2 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. Durch den Einsatz der ETFE-Folie, die  $50 \mu\text{m}$  bzw.  $100 \mu\text{m}$  dick sein kann, ist der Abstand zum Au-Draht-Bond-Pad (Au-Pad) zusätzlich verringert und es kann zur Kollision mit dem Au-Draht-Ball (Au-Ball) kommen. So muss der Überstand des Werkzeugs über das Pixel Array auf  $60 \mu\text{m}$  verringert werden. Bei einer Positioniergenauigkeit von  $\pm 50 \mu\text{m}$  würde im schlimmsten Fall beim Einsatz einer  $50 \mu\text{m}$  dicken Folie der Abstand zum Au-Ball auf dem Bildsensor  $97 \mu\text{m}$  oder der Überstand des Werkzeugs über das Pixelfeld  $60 \mu\text{m}$  betragen. Da sich die Folie durch den FAM-Prozess komprimiert und ein  $0,1 \text{ mm}$  Kantenradius je-



de Kante im Werkzeugeinsatz entschärfen soll, könnte im schlimmsten Fall die EMC-Schmelze bis zur Grenze des Pixelfeldes fließen, dieses aber nicht berühren.

Die Positionierungstoleranz wird daher mit  $\pm 50 \mu\text{m}$  für die Position des Bildsensors relativ zum Werkzeug festgelegt. Die Toleranzbetrachtung wird im Zusammenhang mit allen einwirkenden Prozessen durchgeführt. In Abb.4.2-3 ist die Toleranzkette schematisch dargestellt. Sie hängt von der Aufnahme der PCB im Werkzeug, der Position des Freistellungs elements relativ zum montierten Chip und der Positionierung des Chips relativ zur PCB ab. Für die Erstellung der Gesamttoleranz sind drei Schlüssel toleranzen zu berücksichtigen: PCB, Bestückungsautomat und Werkzeugfertigung (Abb.4.2-4).

Tab.4.2-1: Toleranzangaben der Geräte- wie Leiterplattenhersteller [34]–[37].

Verfahren	Toleranzen	$\pm$ Wert
<b>Leiterplattenherstellung</b>	Leiterbild zur Kontur	0,3 mm
	Leiterbild zur Bohrung	0,1 mm
	Leiterplattendicke	10 %
	Bohrung zur Bohrung	0,05 mm
	Bohrungsdurchmesser	0,05 mm
	Sonderfertigung Leiterbild zur Bohrung	0,05 mm
<b>fab<sup>1</sup> Die-Bonder</b>	Platzierung	0,015 mm
	Rotation	0,5°
<b>PFM 24 CC Fräsmaschine</b>	Positioniergenauigkeit	0,0029 mm

In Tab.4.2-1 sind die von den Herstellern der Geräte und der PCB angegebenen Toleranzen zusammengefasst. Die Standardtoleranzen der PCB-Fertigung sind sehr grob und die angegebenen Toleranzen der Hersteller der Fräsmaschine und des Die-Bonders sind in Summe kleiner als die geforderte Positionierungstoleranz von  $\pm 50 \mu\text{m}$ .

Um die Fertigungstoleranzen der PCB zu überprüfen, werden vier Untersuchungen vorgenommen:

- Überprüfung der Toleranz "Leiterbild zu Bohrung",
- Überprüfung der Toleranz "Bohrung zu Bohrung",
- Positionierungsgenauigkeit der LN im Werkzeug und
- Überprüfung der z-Toleranz der LN.

Als PCB werden für die ersten drei Untersuchungen LN verwendet, die für die QFN-FlexPac genutzt werden. Damit wird vor allem die Geometrieabweichung in x- und y-Richtung untersucht. Diese LN wurden in zwei Fertigungsarten, Standardfertigung und Sonderfertigung hergestellt (Kapitel 4.1). Die vierte Untersuchung misst die Abweichung von Bildsensor-LN in z-Richtung.

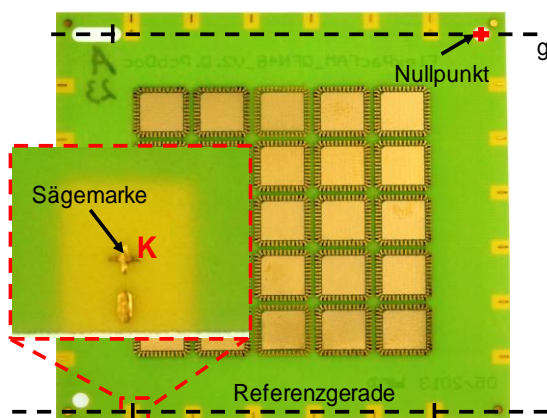


Abb.4.2-5: Darstellung des Vorgehens bei der Überprüfung der Fertigungstoleranzen der LN.

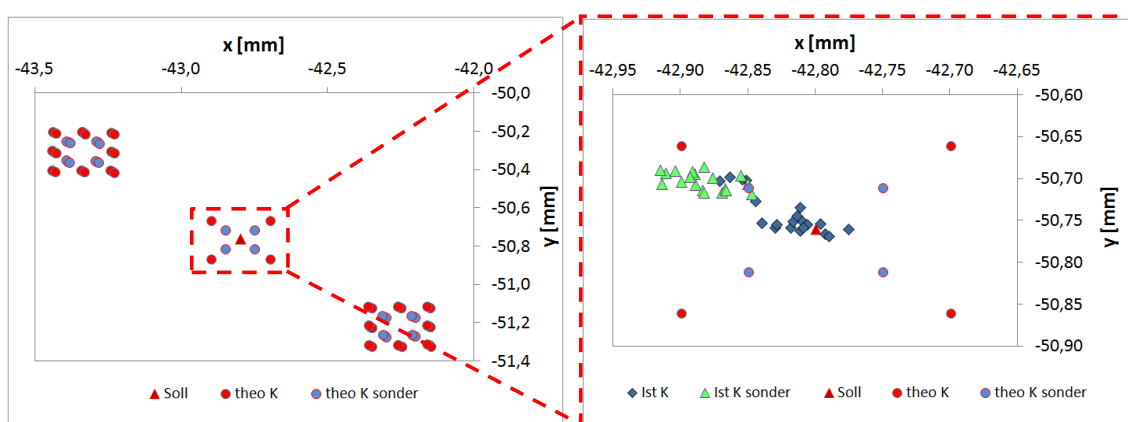


Abb.4.2-6: Theoretische (theo) und reale (Ist) Abweichung der Lage der am weitesten entfernten Sägemarken zum Bohrungsmittelpunkt (Soll).

Tab.4.2-2: Messergebnisse der ersten Untersuchung zur Überprüfung der Toleranzen "Leiterbild zu Bohrung" und "Bohrung zu Bohrung". Weiterhin ist der Vergleich dieser Ergebnisse mit der Zieltoleranz in x- und y-Richtung sowie der analytisch bestimmten Toleranzverhältnisse dargestellt.

	max. $ \varphi $ [°]	x  [mm]	y  [mm]	Mittelwert [mm]		$\Delta x$ vom MW [mm]	$\Delta y$ vom MW [mm]
				x	y		
<b>Ziel</b>	-	0,050	0,050	-	-	-	-
<b>Theorie</b>	0,610	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	0	0	0,6	0,6
<b>Standard</b>	0,103	0,08	0,06	0,02	0,02	0,05	0,04
<b>Sonder</b>	0,096	0,11	0,07	0,08	0,06	0,03	0,01

Der Vergleich der Fertigungstoleranzen der Leiterplattenhersteller zeigt, dass bei einer genauen Positionierung der Sensoren beim Bestückungsvorgang nicht auf die LN-Kontur referenziert werden darf.  $300 \mu\text{m}$  Ungenauigkeit zum Leiterbild hätte zur Folge, dass der FAM-Prozess überwiegend zufällig funktionale Teile herstellt. Vielmehr ist die Toleranz "Bohrung zum Leiterbild" besser für die Prozessanforderung geeignet. Deshalb wird in dieser Toleranzbetrachtung die Fertigung der Aufnahmebohrungen betrachtet. Die Toleranz "Bohrung zu Bohrung" ist mit  $\pm 50 \mu\text{m}$  kritisch, denn dadurch kann eine Abweichung aufgrund von Rotation mit einem Rotationswinkel auftreten. Deshalb ist es Gegenstand der ersten Untersuchung, die Toleranzen

"Bohrung zu Bohrung" und "Bohrung zu Leiterbild" zu überprüfen. Hierzu werden je 20 LN der Standard- und der Sonderfertigungslinie in einer Werth-Koordinatenmessmaschine vermessen.

In Abb.4.2-5 ist der Messzusammenhang auf dem QFN-LN zu sehen. Die zwei Sägemarken, die zu der Bohrung am weitesten entfernt positioniert sind, dienen zur Definition einer Referenzgerade, um das Leiterbild auszurichten. Anhand der Referenzgeraden wird das Koordinatensystem definiert. Der Nullpunkt liegt hierbei im Mittelpunkt der Bohrung, die auf einer Achse mit der Langlochbohrung liegt. Die Mittelpunkte der Bohrung und Langlochbohrung werden für eine weitere Gerade verbunden (Mittelpunktgerade). Anschließend wird die Parallelität der Referenz- und Mittelpunktgerade überprüft. Falls sie nicht parallel zueinander sind, wird ein Winkel  $\varphi$  bestimmt, der die Rotationsabweichung darstellt.

Auf den LN wird die Lage der in Abb.4.2-5 hervorgehobenen Sägemarke zum Nullpunkt theoretisch und messtechnisch bestimmt und dies miteinander verglichen. Bei der theoretischen Betrachtung werden die Toleranzen "Bohrung zu Leiterbild" und "Bohrung zu Bohrungen" als Grundlage verwendet. Die Messergebnisse werden gemittelt und als mittlere Abweichung angegeben. Abb.4.2-6 stellt die Ergebnisse beider Methoden dar.

Die Messpunkte der standardgefertigten LN liegen weiter auseinander als die der sondergefertigten LN, jedoch befinden sie sich näher an der Soll-Lage. Daher zeigt die Standardfertigung eine bessere Genauigkeit. Die Sonderfertigung der LN zeigt eine bessere Präzision der Messwerte untereinander, da die Messpunkte näher zusammen liegen. Die Entfernung der Messpunkte zur Soll-Lage wird durch den Sonderfertigungsschritt verursacht. Tab.4.2-2 zeigt die entsprechenden Werte. Die Zieltoleranz ist in Abhängigkeit zur x- bzw. y-Richtung dargestellt. Die x- und y-Toleranz ergibt sich aus der Toleranzkettenbetrachtung, wie bereits diskutiert. Das Toleranzfeld, das die Hersteller vorgeben, ist so grob, dass sich die gemessenen Verhältnisse darin befinden. Die maximale x- und y-Abweichung (Betrag von x und y) befindet sich für beide Herstellungsvarianten außerhalb der Zieltoleranzen. Der Mittelwert der Standardfertigung ist in der Zieltoleranz. Wird der Mittelwert mit dem Deltawert verglichen, dann relativiert sich diese Beobachtung. Die Deltawerte ergeben sich durch die Differenz vom maximal und minimal Messwert. Ein passender Deltawert für die Zieltoleranz müsste in diesem Fall unter  $0,03 \text{ mm}$  betragen. Die hohen Deltawerte zeigen, dass das Toleranzfeld weit aufgespannt ist. Die Mittelwerte der Sonderfertigung sind größer als die Zieltoleranz. Ihre Deltawerte sind jedoch kleiner und bestätigen damit, dass die Sonderfertigung die Bohrungen präziser herstellt. Wenn dies reproduzierbar über alle Herstellungszyklen wäre, würde ein solches Toleranzfeld für die Positionierung der Bildsensoren ausreichen. Jedoch müsste dafür bei jedem Herstellungszyklus der Sonderfertigung das Toleranzfeld in demselben Toleranzbereich

sein und dies ist aufgrund der Fräsmaschinentoleranz unwahrscheinlich. Zudem sorgt der Sonderfertigungsschritt für einen höheren Beschaffungspreis.

Tab.4.2-3: Messergebnisse zur zweiten Untersuchung der 20-maligen Aufnahme desselben LN auf die Aufnahmestifte im Werkzeug.

LPN		x [mm]	y [mm]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]	$\varphi$ [°]	$\Delta\varphi$ [°]
Standard	min.	-42,868	-50,692	0,054	0,045	-0,175	0,067
	max.	-42,815	-50,648			-0,108	
Sonder	min.	-42,852	-50,681	0,034	0,031	-0,124	0,042
	max.	-42,818	-50,650			-0,082	

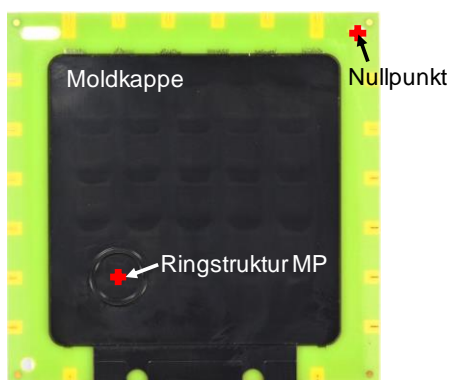


Abb.4.2-7: Mit Dummy-Chips bestückter und verkapselter LN, auf dem eine Ringstruktur im EMC abgeformt wird, um zu überprüfen, ob der Abkühlvorgang reproduzierbar ist oder variiert.

Tab. 4.2-4: Ergebnisse der dritten Untersuchung zur Überprüfung der Lage der im FAM abgeformten Ringstruktur zum Nullpunkt. Mit MW ist der Mittelwert gemeint.

LPN	MW x [mm]	MW y [mm]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]
Standard	0,01	0,01	0,04	0,03
Sonder	0,04	0,03	0,05	0,04

In der zweiten Untersuchung wird die Einlegegenauigkeit des LN auf die Aufnahmestifte untersucht. Dabei wird derselbe Standard- wie Sonder-LN 20 mal auf die Aufnahmestifte integriert und auf die gleiche Art wie in der ersten Untersuchung vermessen. Die maximale und minimale Abweichung wird bestimmt und zu einem Deltawert überführt, der wieder die Ausdehnung des Toleranzfeldes darstellt. Selbiges wird mit dem Rotationswinkel durchgeführt. Das Toleranzfeld ist im Betrag beim Sonder-LN kleiner als beim Standard-LN (Tab.4.2-3), dennoch befinden sich beide in der Zieltoleranz, weshalb der Standard-LN für diese Zielanwendung ausreichend ist. Die Auswirkung des Rotationswinkels hingegen ist nicht vernachlässigbar, da die Gesamttrotation in der dargestellten Dimension zu einer fehlerhaften Freistellung führen kann.

In der dritten Untersuchung wird überprüft, ob die Lage einer im EMC abgeformten Struktur in Bezug auf den Bohrungsmittelpunkt durch den Abkühlvorgang variiert oder reproduzierbar in Dimension und Vorzeichen ist. Abb.4.2-7 zeigt einen der 20 LN

mit denen die Messung durchgeführt wird. Dieser wurde mit Dummy-Chips bestückt, um reale Verhältnisse zu untersuchen. Es werden je zehn LN pro Fertigungsverfahren im FAM-Prozess hergestellt. Eine Ringstruktur wird im EMC abgeformt und die Lage von deren Mittelpunkt zum Nullpunkt vermessen. Die Messung zeigt lediglich einen Trend, da ein Messfehler beim Bestimmen des Ringmittelpunkts, aufgrund der abgerundeten Kante in der EMC-Abformung, auftreten kann. Die Messunsicherheit, die dabei entsteht, wird mit  $10 \mu\text{m}$  abgeschätzt.

Das Ergebnis ist in Tab. 4.2-4 zu sehen. Die Mittelwerte der standardgefertigten LN sind kleiner als die der Sonderfertigung. Die Lage des Ringmittelpunkts auf dem ausgehärteten EMC variiert. Vermutlich wird dieses Verhalten durch den Bauteilverzug nach der Abkühlung verursacht. Dieser kann aufgrund der Dickenschwankung des LN variieren. Ein gekrümmter Ring auf der EMC-Oberfläche nimmt eine elliptische Form an. Der Mittelpunkt dieser Form wäre damit nicht derselbe. Dies wäre ein weiterer Messfehler, der durch den CTE-Mismatch (Ungleichheit) der Materialien verursacht wird. Die durch den FAM-Prozess abgeformten Strukturen weisen somit eine Lagertoleranz auf. Diese kann auf das thermische Verhalten der beteiligten Materialien zurückgeführt werden. Für die Lage der Freistellung kann dies vernachlässigt werden, da während des FAM-Prozesses kein Verzug vorhanden sein sollte.

In der vierten Untersuchung wird die Dickentoleranz (z-Höhenabweichung) überprüft. Dabei wird der Bildsensor-LN verwendet, dessen Solldicke  $510 \mu\text{m}$  beträgt. Die daraus resultierende z-Höhenabweichung kann max.  $\pm 51 \mu\text{m}$  betragen. Damit könnte die zerstörungsfreie wie funktionale Verkapselung der Bildsensoren gefährdet werden. Die z-Höhenabweichung von  $10 \%$  resultiert aus dem thermischen Pressungsschritt des Prepreg- und Kernmaterials bei der LN-Herstellung. So kann eine Topographie auf der LN-Oberfläche entstehen, die über verjüngte sowie erhabene Stellen verfügt. Zudem tragen die eingebrachten Leiterstrukturen zur Verstärkung dieses Effekts bei. Deshalb wird nach dem Pressvorgang die z-Höhe überprüft und bei zu starker Abweichung der Prepreg/Kern-Lagenaufbau erneut gepresst.

Mit Hilfe eines kalibrierten Höhenmessgeräts DIGIMAR 817 CLM von MAHR wird die Höhenabweichung gemessen. Dabei fährt eine Messspitze auf die Oberfläche des LN und nimmt eine Punktmessung auf. Fünf Positionen werden so vermessen (Abb.4.2-8). Vier Messpunkte liegen direkt auf dem Leiterplattenanteil ohne Metallschicht und einer auf dem mittleren Au-Montage-Pad. Da der LN einen Eigenverzug besitzt, wird dieser mittels eines Rundprofils aus Edelstahl während der Messung niedergehalten.

Der Messpunkt auf dem Au-Montage-Pad ist um etwa  $70 \mu\text{m}$  größer als die anderen Messpunkte (Abb.4.2-8). Da das Werkzeug im FAM-Prozess direkt auf dem Leiterplattenmaterial abdichtet, muss dies für die Werkzeugeinstellung berücksichtigt werden. Das Dickensollmaß wird durch alle Schichten des LN definiert. In diesem Fall ist es auf dem Top-Layer durch das Au-Montage-Pad und auf dem Bottom-Layer durch

die Lötstopplack (LL)-Schicht definiert. Die Dickentoleranz von  $51 \mu\text{m}$  wird voll ausgeschöpft, da der maximale Messwert  $560 \mu\text{m}$  beträgt (Tab.4.2-5). Die Dickentoleranz innerhalb eines LN beträgt  $17 \mu\text{m}$ . Dies kann vernachlässigt werden, da die ETE-Folie beim FAM-Prozess eine solche Abweichung kompensieren kann.

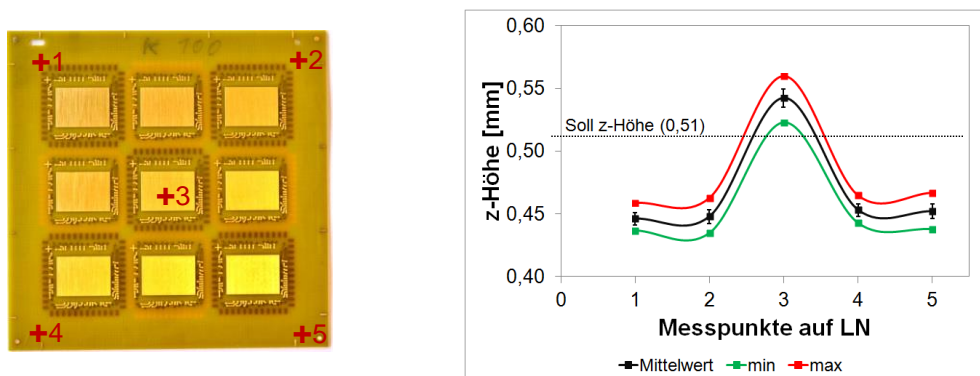


Abb.4.2-8: Definierte Punktmessung auf dem Bildsensor-LN (links) und Messdiagramm aus 40 gemessenen LN (rechts). Dabei sind die grünen Messpunkte die minimalen, die schwarzen Messpunkte die gemittelten und die roten Messpunkte die maximalen Messwerte.

Tab.4.2-5: Übersicht der Ergebnisse der Messung 4.

Messpunkt	1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]
min	0,437	0,435	0,523	0,443	0,438
max	0,459	0,463	0,56	0,465	0,467
Mittelwert	0,446	0,448	0,542	0,453	0,452
Stabw.	0,005	0,006	0,007	0,005	0,006

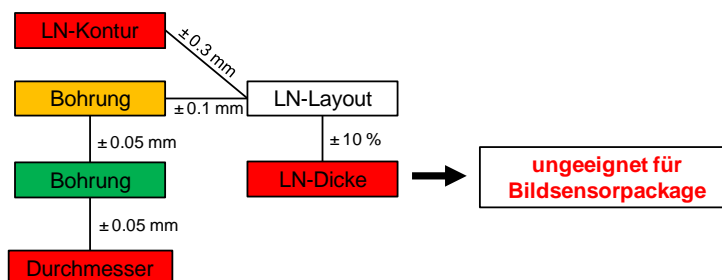


Abb.4.2-9: Ergebnisdarstellung der in diesem Kapitel diskutierten Toleranzüberprüfung der LN [34], [35].

Das Fazit der vier Untersuchungen ist, dass zum Bestücken der Bildsensoren das Referenzieren auf die Bohrungen sowie Kontur des LN ungeeignet ist (Abb.4.2-9). Damit eine PCB für eine komplexe Systemintegration verwendet werden kann, muss jegliche x- und y-Toleranz kompensiert werden. Dies kann geschehen, indem beim Bestückungsvorgang der Systemelemente auf Referenzmarken außerhalb des LN referenziert wird. Abgebildete Referenzstrukturen auf dem LN sind aufgrund der zuvor dargestellten Untersuchung zu ungenau. In Kapitel 5.2 wird die Umsetzung dieses Fazits beispielhaft gezeigt.

### 4.3 Konzeption und Fertigung eines FAM-Werkzeugs

Anhand der angeführten QFN- und Bildsensor-FlexPac wird in diesem Kapitel die Konzeption und Fertigung geeigneter Werkzeuge besprochen. Damit soll gezeigt werden, welche Fertigungsregeln für Standard- sowie für Sonderpackages gelten. Die dargestellten Ergebnisse wurden im IGF-Vorhaben "FlexPacFAM" erarbeitet und werden an dieser Stelle detaillierter als im Schlussbericht [18] ausgewertet.

#### 4.3.1 Werkzeug für Standard-Packages

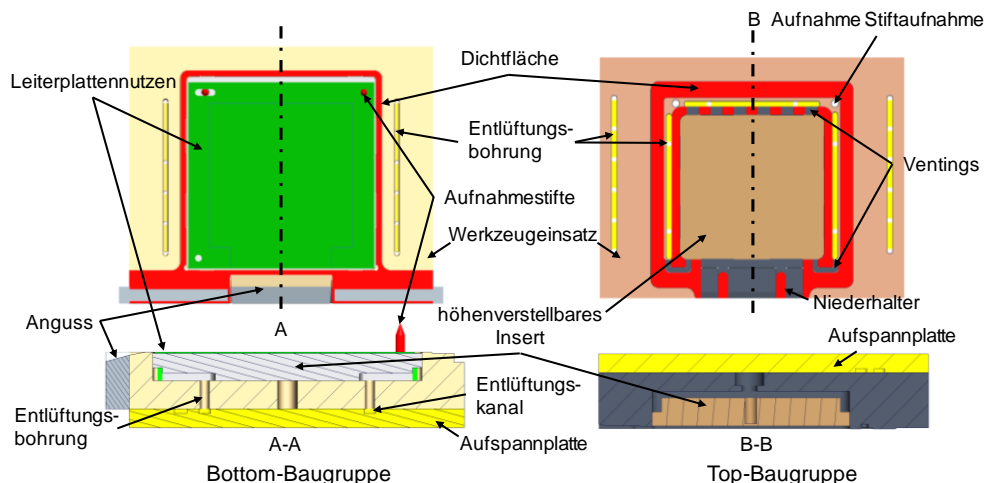


Abb.4.3.1-1: CAD-Zeichnung der Top- und Bottom-Baugruppe zur Erzeugung von leiterplattenbasierten QFN-Packages.

Das QFN-FAM-Werkzeug wird mittels PTC ProEngineer Wildfire 5.0 konstruiert und ausgelegt. Das Werkzeug besteht aus vier Teilen. Es besitzt einen Top- und einen Bottom-Werkzeugeinsatz, in dem jeweils ein Top- wie ein Bottom-Insert eingebaut wird. Die durch das Zusammenschließen beider Werkzeugeinsätze entstandene Kavität hat ein Volumen von  $42,5 \times 42,5 \times 0,6 \text{ mm}^3$ . Mit der LN-Dicke von  $0,3 \text{ mm}$  ergibt dies eine Bauteilhöhe des QFN-FlexPac von  $0,9 \text{ mm}$ , die damit dem Referenz-QFN auf Leadframebasis gleicht. In Abb.4.3.1-1 sind die einzelnen Komponenten als CAD-Zeichnungen dargestellt. Die rot gekennzeichnete Dichtfläche im Bottom-Werkzeugeinsatz ist aufgrund der Toleranz "Kontur zum Leiterbild" von  $\pm 0,3 \text{ mm}$  vorgesehen. Im Worst Case würde im Angussbereich ein Spalt von  $0,3 \text{ mm}$  entstehen. Dieser ergibt während des FAM-Prozesses einen Kanal, in dem die EMC-Schmelze abfließen kann. Mit dem Konzept der Dichtfläche im Bottom- und der äußeren Dichtfläche im Top-Werkzeugeinsatz kann die EMC-Schmelze nur entlang der Kontur fließen. Die eigentliche Kavität wird durch die innere Dichtfläche im Top-Insert begrenzt. In diese sind die Ventings eingebracht (Kapitel 2.5), um die Luft aus der Schmelzfront aus der Kavität zu vertreiben.

Die beiden Inserts besitzen eine plan geschliffene Funktionsfläche und sind so gestaltet, dass unterschiedlich dicke LN verarbeitet sowie bis zu  $3 \text{ mm}$  tiefe Kavitäten

erzeugt werden können. Das Top-Insert besitzt eine Gewindebohrung, damit es am Werkzeugeinsatz durch eine Schraube fixiert wird.

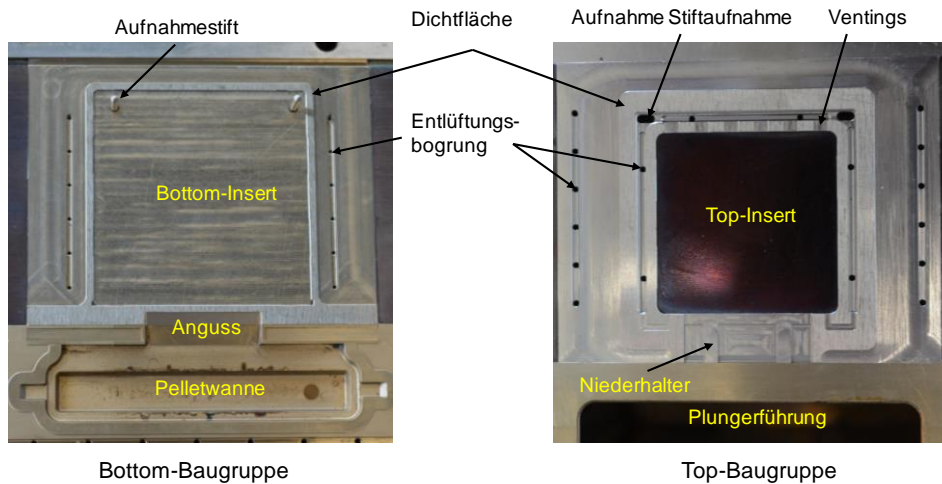


Abb.4.3.1-2: Gefertigte, zusammengebaute und im Werkzeug integrierte Bottom- sowie Top-Baugruppe.

Tab.4.3.1-1: Leitlinien zur Konstruktion und Fertigung der Werkzeugeinsätze zur Herstellung beliebiger Standard-Packages als FlexPac.

Bottom-Werkzeug	Leitlinien
Dichtfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• umlaufend um den Insert</li> <li>• Aufmaß zur Leiterplatte um deren Konturtoleranz</li> </ul>
Werkzeugeinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aussparung für Insert vorsehen</li> <li>• Anschluss ans Vakuumsystem über Bohrungen, die sich mit Vakuumkanälen in Aufspannplatte überschneiden</li> <li>• zwei Aufnahmestifte integrieren</li> </ul>
Insert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plan schleifen</li> <li>• Bohrung für Aufnahmestifte einbringen und Phase auf der Prozessseite, damit durchstoßene Folie einsinkt</li> </ul>
Top-Werkzeug	Leitlinien
Dichtfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• äußere Dichtfläche zur Abdichtung beider Einsätze</li> <li>• innere Dichtfläche zur Abdichtung der Kavität</li> <li>• innere Dichtfläche am Fließwegende mit Ventings vorsehen</li> </ul>
Werkzeugeinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aussparung für Insert vorsehen</li> <li>• Anschluss ans Vakuumsystem über Bohrungen, die sich mit Vakuumkanälen in Aufspannplatte überschneiden</li> <li>• zwei Bohrungen für die Aufnahmestifte integrieren</li> </ul>
Insert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plan schleifen</li> <li>• Gewindebohrung zum Verschrauben mit Werkzeugeinsatz einbringen</li> </ul>

Beide Werkzeugeinsätze besitzen eine Aussparung, in die das jeweilige Insert eingelegt wird. Der Boden der Aussparung verfügt über einige Entlüftungsbohrungen. Diese sind mit den Entlüftungskanälen der Bottom- sowie Top-Aufspannplatten verbunden. Die Werkzeugeinsätze werden zur Montage im Werkzeugrahmen mit den Aufspannplatten verschraubt. Im Bottom-Werkzeugeinsatz sind zwei Aufnahmestifte zur Aufnahme des LN integriert. Diese besitzen einen Durchmesser von 2 mm und werden durch eine Presspassung im Werkzeugeinsatz fixiert. Die Aufnahmestifte sind spitz zulaufend, um die Folie im FAM-Prozess zu durchstoßen. Das Bottom-Insert



besitzt zwei Bohrungen mit einem Durchmesser von  $2,5\text{ mm}$ , durch die die Aufnahmestifte geführt werden. Diese Bohrungen besitzen eine Phase, damit die durchstoßene Folie darin versinken kann. Des Weiteren sind zwei Niederhalter im Top-Werkzeugeinsatz ausgelegt. Diese sollen den LN während des FAM-Prozesses im Angussbereich niederhalten. Die gefertigten, zusammengebauten und im Werkzeug integrierten Baugruppen sind in Abb.4.3.1-2 zu sehen.

In der Tab.4.3.1-1 sind die abgeleiteten Leitlinien für die Bottom- und Top-Werkzeugeinsätze zusammengefasst. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Fertigung von Standard-Packages.

### 4.3.2 Werkzeug für Sensoren mit Medienzugang

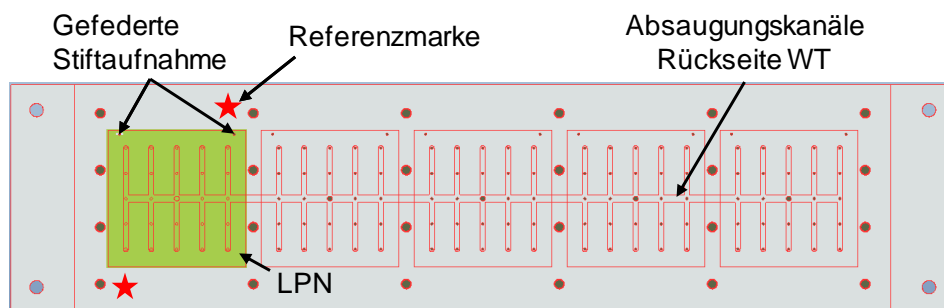


Abb.4.3.2-1: CAD-Bild des konstruierten Werkstückträgers (WT) und Konzeptdarstellung der Lage der Referenzmarken.

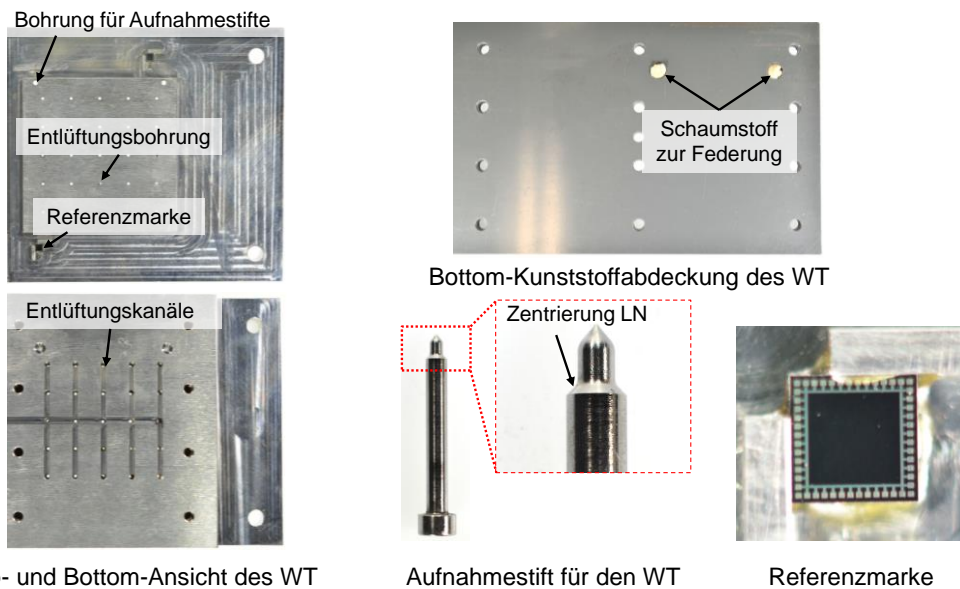
Wie in Kapitel 4.2 dargestellt, müssen die Toleranzen der Leiterplatte soweit kompensiert werden, dass ein reproduzierbarer FAM-Prozess gewährleistet werden kann. Andernfalls besteht das Risiko, dass die Freistellungselemente des FAM-Werkzeugs nicht alles freistellen, was frei sein soll, und sogar die Draht-Bonds beschädigen können. Eine Bestückungstoleranz von  $\pm 50\ \mu\text{m}$  ist durch die Fertigungstoleranzen der PCB nicht möglich. Die Bestückungstoleranz ergibt sich durch die asymmetrische Lage des Pixelfeldes des Bildsensors (Abb.4.2-1). Daraus folgend wird mit der Auslegung eines FAM-Werkzeugs auch ein alternatives Bestückungskonzept entwickelt, das die Leiterplattentoleranzen gänzlich kompensiert und ausschließlich die koordinatentreue Platzierung des Sensors auf dem LN ermöglicht. Zugleich muss damit sichergestellt werden, dass alle Sensoren reproduzierbar positioniert werden.

Die Kompensation der x- und y-Toleranz des LN wird durch einen Werkstückträger (WT), auf dem die Referenzmarken außerhalb des Bestückungsbereichs positioniert sind, erreicht (Abb.4.3.2-1). Der WT verfügt über ein Vakuumsystem, das den LN fixiert. Des Weiteren verfügt dieser über zwei Zentrierstifte, die den LN ähnlich wie im Werkzeugeinsatz aufnehmen. Diese Zentrierstifte müssen so ausgelegt sein, dass sie die Bohrtoleranz der LN von  $\pm 0,05\text{ mm}$  kompensieren. Deshalb werden sie mit einem Untermaß hergestellt und mit einem Konus auf das Übermaß angepasst. Im

WT werden sie federnd und in einer Gleitpassung gelagert, sodass sie sich beim Anlegen des Vakuums durch das Anziehen des LN nach unten bewegen können. Zudem zentriert der Konus den LN. Um das Einbringen des LN zu vereinfachen, wird ein Anspitzen des Zentrierstifts empfohlen. In Abb.4.3.2-2 ist ein in einem CAD-Programm konstruierter Funktionsausschnitt gezeigt.



Abb.4.3.2-2: Funktionsausschnitte eines Zentrierstifts zum Aufnehmen des LN für den WT.



Top- und Bottom-Ansicht des WT

Aufnahmestift für den WT

Referenzmarke

Abb.4.3.2-3: Darstellung der gefertigten Elemente des WT.

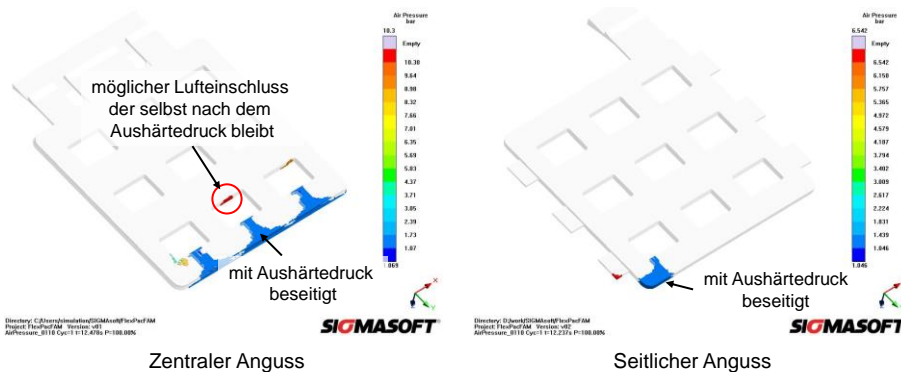


Abb.4.3.2-4: Simulationsergebnis zentraler (links) und seitlicher Anguss (rechts) mit Augenmerk auf den Verbleib von Lufteinschlüssen nach dem Füllvorgang der EMC-Schmelze am Beispiel eines Bildsensor-FlexPac-LN.

In Abb.4.3.2-3 ist der gefertigte WT dargestellt. Um das Ansaugen des LN zu gewährleisten, sind 25 Entlüftungsbohrungen implementiert. Eine Aufspannplatte aus

Kunststoff wird mit 20 Schrauben am WT fixiert. In der Aufspannplatte sind zwei Sacklochbohrungen eingebracht und mit Schaumstoff gefüllt, um die gefederte Lagerung der Zentrierstifte zu realisieren. Die Zentrierstifte werden aus Auswerferstiften hergestellt und die Referenzmarken sind Dummy-Chips mit quadratischen lithographischen Strukturen. Um diese hinreichend zu positionieren, befinden sich Winkelstrukturen auf dem WT. Die Referenzmarken werden mittels Kleben fixiert.

Die Auslegung der Werkzeugeinsätze wird mittels einer Simulation unterstützt. Für die Werkzeugeinsätze zur Herstellung der Bildsensor-FlexPac wird die Simulationssoftware Sigmasoft verwendet. Mit einer Füllsimulation wird die geeignete Angussvariante ermittelt, denn das Werkzeug mit seinen Freistellungselementen und den Sensoren auf dem LN bildet säulenähnliche Gebilde in der Kavität. Die EMC-Schmelze muss um diese Säulen herum fließen. Eine falsche Auslegung des Angusses ist ein Risiko für Lunkerbildung und Fehlfüllungen im Package. Abb.4.3.2-4 zeigt am Beispiel eines Bildsensor-FlexPac-LN zwei simulierte Varianten mit einem zentralen und seitlichen Anguss. Der zentrale Filmanguss würde den Verbleib von Luft einschließen, da die Fließfront hinter der Sensor/Werkzeug-Säule Luftblasen einschließt. Der seitliche Anguss zeigt hingegen einen überwiegend luftfreien Zustand nach dem Befüllen mit EMC-Schmelze, da sich die Fließfront v-förmig hinter jeder Sensor/Werkzeug-Säule schließt. Nur am Fließwegende verbleibt die vorangetriebene Luft. Diese wird durch Einsetzen des Aushärte drucks  $p_c$  über die Ventings aus der Kavität gedrückt.

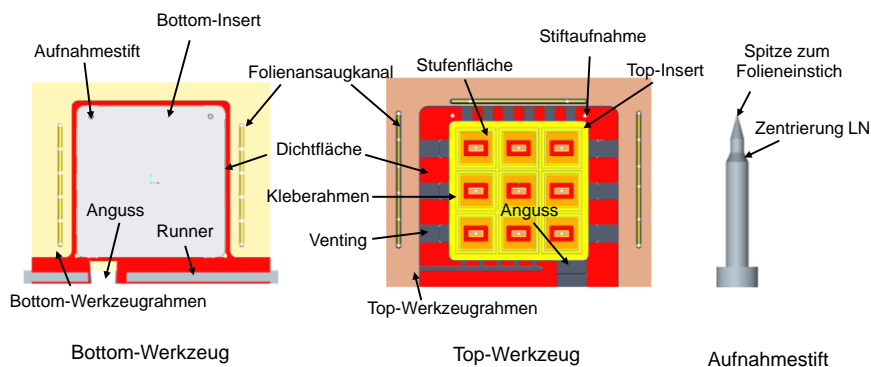


Abb.4.3.2-5: CAD-Darstellung des zusammengebauten Bottom- und Top-Werkzeugeinsatzes.

Nachfolgend wird ein geeignetes Werkzeugkonzept zur Realisierung von Medienzügen im Package vorgestellt. Es unterscheidet sich insofern vom QFN-Werkzeug, als dass im Werkzeugeinsatz Durchbrüche integriert sind, durch die der Insert geführt werden kann. Damit ist die Integration in und die Entnahme des Inserts aus dem Werkzeugeinsatz (WZE) einfacher. Ein seitlicher Anguss mit einer Öffnung von  $10\text{ mm}$  ist in den WZE eingebracht. Damit die Inserts immer gleich in die entsprechenden WZE integriert werden können, verfügen diese über zwei unterschiedlich große, seitlich platzierte Ausbuchtungen, die als Verdrehschutz gedacht sind. Zudem benötigt dieser Werkzeugaufbau Abstandsplättchen, welche die Soll-Tiefe der beiden

Inserts realisieren. Die Kavität für das Bildsensor-FlexPac besitzt eine Fläche von  $47,3 \times 47,3 \text{ mm}^2$ . Die Aufnahmestifte sind identisch wie die Zentrierstifte des WT ausgelegt. Sie unterscheiden sich darin, dass sie spitzer angespitzt sind, damit sie die Folie leichter durchstoßen können. In Abb.4.3.2-5 ist die CAD-Darstellung der Komponenten gezeigt.

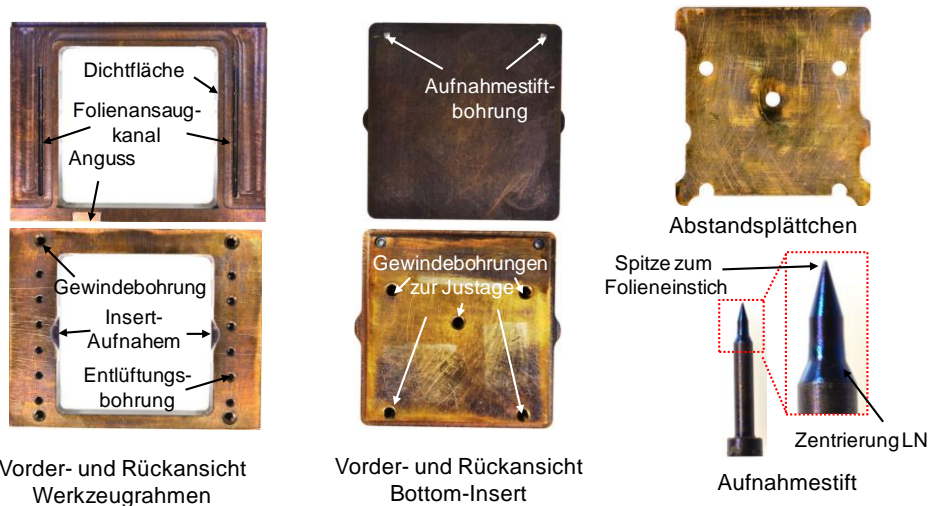


Abb.4.3.2-6: Bottom-Werkzeugelemente vereinzelt dargestellt.

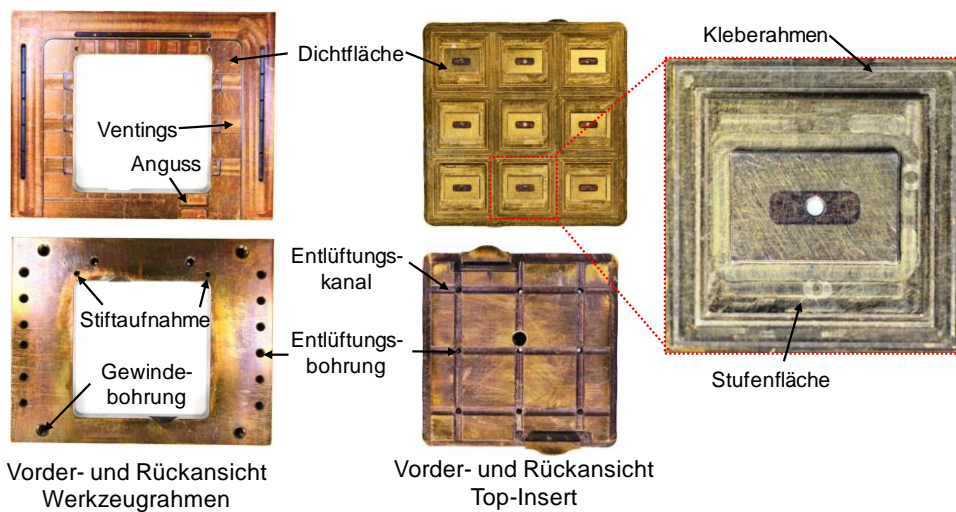


Abb.4.3.2-7: Top-Werkzeugelemente vereinzelt dargestellt.



Abb.4.3.2-8: Zusammengebaute Bottom- und Top-Werkzeugeinsätze.

Im Top-Insert befinden sich neun Freistellungs-elemente. Die Freistellungs-elemente verfügen über eine Dichtfläche mit den Abmaßen  $7,96 \times 5,23 \text{ mm}^2$ , die direkt auf der

Bildsensoroberfläche abschließt. Die ETFE-Folie befindet sich während des FAM-Prozesses dazwischen und dämpft die Auflage des Werkzeugs ("soft touch"). Zudem ist in jedem Freistellungs-element eine Entlüftungsbohrung vorgesehen. Des Weiteren verfügen die Freistellungs-elemente über zwei Stufen. Die erste Stufe dient dazu, einen Plateaubereich im EMC abzuformen, damit das einfallende Licht von den Freistellungskanten nicht auf das Pixelfeld reflektiert wird und damit Störsignale im Bild verhindert werden sollen. Bei der Auslegung einer solchen Stufe muss beachtet werden, dass mindestens  $100\ \mu\text{m}$  Platz zwischen Draht-Bondloop und Stufenfläche vorgesehen wird. Ansonsten kann eindringende Feuchte den Draht-Bond korrodieren oder Kurzschlüsse zwischen benachbarten Draht-Bonds verursachen. Im schlimmsten Fall liegen die Draht-Bonds offen auf der Moldkappe. Mit der zweiten Stufenfläche liegt das Freistellungs-element auf der Sensoroberfläche auf. Umlaufend um das Freistellungs-element sind zwei quadratisch geführte  $30\ \mu\text{m}$  hohe und  $200\ \mu\text{m}$  breite Strukturen in einem Abstand von  $850\ \mu\text{m}$  zueinander vorgesehen. Diese formen Gräben im ausgehärteten EMC aus. In diese kann der Klebstoff bei der Glaslidmontage fließen. Deshalb werden sie als Kleberahmen bezeichnet.

Die Ventings im Top-Werkzeugeinsatz sind umlaufend und breit konstruiert, damit die Luft in der Kavität schon während des Transfervorgangs entweichen kann. Zudem sind vor den seitlichen Ventings Überläufe vorgesehen. Das sind  $300\ \mu\text{m}$  tiefe Vertiefungen, in denen die luftgefüllte EMC-Schmelzfront fließen soll. In das Bottom-Insert sind die Aufnahmestifte durch eine Übergangspassung eingebracht.

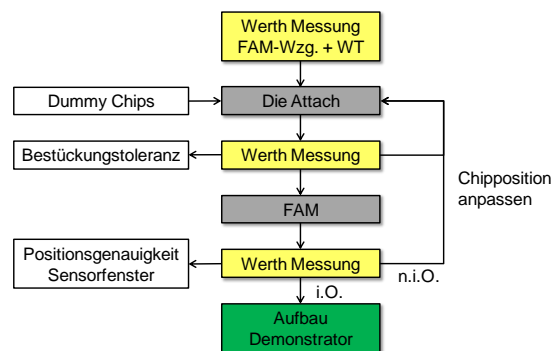


Abb.4.3.2-9: Modell zum iterativen Bestimmen eines Offsets für den Bestückungsautomaten, damit die Sensoren optimal zu den FAM-Werkzeugfreistellungs-elementen positioniert werden.

Der Bottom-Werkzeugeinsatz besitzt eine umlaufende Dichtfläche. Der abgebildete „Runner“ ist ein Wechselbauteil, welches den Anguss definiert und vor die Pelletwanne gesetzt wird. In den Abb.4.3.2-6, 4.3.2-7 und 4.3.2-8 sind die gefertigten Werkzeugelemente einzeln und zusammengebaut dargestellt.

Bevor der gefertigte WT und die Werkzeugeinsätze zum Einsatz kommen, werden diese vermessen, beispielsweise mittels einer Koordinatenmessmaschine der Firma Werth Messtechnik GmbH. Dabei wird die Lage der Zentrier-/Aufnahmestifte und Referenzmarken bestimmt und diese für den Bestückungsprozess berücksichtigt.

Abb.4.3.2-9 zeigt die Vorgehensweise zur präzisen Bildsensorbestückung, um im FAM-Prozess funktionale Bildsensor-FlexPac zu erzeugen. Die Darstellung beschreibt die systematische Bestimmung des Offsets, der in die Positionskoordinaten des Bestückungsautomaten eingebracht wird, sodass die Bildsensorbestückung präzise zu den Freistellungselementen im Werkzeugeinsatz erfolgt. Die dargestellten Iterationsschleifen sollten solange durchlaufen werden, bis der ermittelte Offset für den Bestückungsprozess stabil ist.

In der Tab.4.3.2-1 sind die abgeleiteten Leitlinien für den Werkstückträger zur Unterstützung des AVT-Prozesses sowie die Bottom- und Top-Werkzeugeinsätze zusammengefasst. Dabei werden die Erkenntnisse aus Tab.4.3.1-1 vorausgesetzt.

Tab.4.3.2-1: Leitlinien zur Konstruktion und Fertigung der Werkzeugeinsätze zur Herstellung von Sensor-FlexPac mit Medienzugängen.

<b>Bottom-Werkzeug</b>	<b>Leitlinien</b>
Werkzeugeinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchbruch und Führungselemente für Insert vorsehen, um Verdrehen zu vermeiden</li> </ul>
Insert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eine definierte Anzahl an Gewindebohrungen vorsehen, um mit Aufspannplatte zu verschrauben</li> </ul>
Anguss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mittels Füllsimulation die Position des Angusses auslegen</li> </ul>
<b>Top-Werkzeug</b>	
Dichtfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mit Ventings umlaufend vorsehen</li> </ul>
Werkzeugeinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchbruch und Führungselemente für Insert vorsehen, um Verdrehen zu vermeiden</li> </ul>
Insert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eine definierte Anzahl an Gewindebohrungen vorsehen, um mit Aufspannplatte zu verschrauben</li> <li>• Freistellungselemente mit plan geschliffener Fläche herstellen</li> <li>• Freistellungselemente an Vakuumsystem anschließen</li> </ul>
<b>Werkstückträger</b>	
Aufnahmestifte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gleiche Geometrie wie im Bottom-Werkzeugeinsatz</li> <li>• konischer Übergang, um Bohrtoleranz im LN zu kompensieren</li> <li>• federnd gelagert, um beim Fixieren des LN nachzugeben</li> </ul>
Vakuumsystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zum Fixieren des LN an den Werkstückträger</li> </ul>
Referenzmarken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• außerhalb des Prozessbereichs, um x-/y-Toleranz des LN zu kompensieren</li> <li>• präzise ausmessen, um Positionierung der Sensoren zu gewährleisten</li> </ul>
Bestückungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>• benötigt einen stabilen Bestückungsoffset</li> </ul>

## 5. FAM-Prozessführung

In diesem Kapitel wird der FAM-Prozess zur erfolgreichen Herstellung von FlexPac besprochen. Die ersten beiden Unterkapitel zeigen, welche Packagingergebnisse mit den gefertigten Werkzeugen aus Kapitel 4.3 erzielt werden können. Das nächste Unterkapitel stellt dar, dass sich das FAM nicht nur für Standard- sowie Sonderlösungen von IC-Packages eignet, sondern auch für MEMS-Packages. MEMS sind aufgrund ihrer mechanischen Komponente besonders sensitiv auf Spannungen, die sich durch Druck oder Verzug auf den Sensor auswirken können. Dessen Funktion kann durch das Packaging mittels EMC gefährdet werden. Aus diesem Grund werden MEMS häufig in Metall- oder Keramikgehäuse verpackt. Der Vorteil eines MEMS-FlexPac wäre, dass die Herstellungskosten gegenüber Metall- und Keramikgehäusen um ein Vielfaches reduziert werden könnten. Um die Eignung des FAM-Prozesses zum Packaging von MEMS zu belegen, wird dies anhand eines Inertialsensors gezeigt. Dabei wird sich das FAM als schonendes Packagingverfahren herausstellen. Im letzten Unterkapitel wird der Vereinzelnprozess mittels einer Wafersäge betrachtet. Damit schließt sich die in Kapitel 4 begonnene Prozesskette.

Um die Herausforderung bei der FAM-Prozessführung zu verstehen, muss zunächst das thermische Verhalten der PCB verstanden werden. Da das PCB-Material ein Verbundwerkstoff mit polymerer Matrix ist, verfügt es über eine Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ). Für Standard-PCB des Typs FR4 wird ein  $T_g$  von ca.  $130^\circ\text{C}$  verwendet. Dieser Parameter stellt unter anderem einen Umschaltzeitpunkt im Wärmeausdehnungsverhalten des Kunststoffes dar. Beim Erwärmen des Kunststoffes dehnt sich dieser aus, was als Wärmeausdehnung bekannt ist. Die Wärmeausdehnung ist mit

$$\varepsilon_{th} = \frac{\Delta L_T}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad \text{Gl.5-1}$$

definiert, wobei  $\varepsilon_{th}$  die thermische Ausdehnung,  $\Delta L_T$  die Längenänderung über Temperatur,  $L_0$  die Ausgangslänge,  $\alpha$  den Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) und  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz beschreibt. Bei kristallinen Werkstoffen wie Metallen und Keramiken gibt es einen CTE, der über einen großen Temperaturbereich das Maß der Wärmeausdehnung des jeweiligen Festkörpers in Relation zu den Abmaßen und der Temperaturdifferenz von Ausgangs- bis Endtemperatur ist. Für Kunststoffe existieren üblicherweise zwei CTE, die als  $\alpha_1 / \alpha_2$  bezeichnet werden. Unterhalb des  $T_g$  bestimmt  $\alpha_1$  und oberhalb des  $T_g$  bestimmt  $\alpha_2$  das Maß der Wärmeausdehnung. Das liegt daran, dass ab dem  $T_g$  die Beweglichkeit der Molekülketten zunimmt und damit die Molekülketten ein größeres Volumen zur Verfügung haben, auch freies Volumen genannt. Durch dieses freie Volumen können sich die Molekülketten des Polymers bewegen, damit relaxieren und sich entschlafen. Im Fall des EMC wird dieser Mechanismus durch den hohen Vernetzungsgrad der Molekülketten signifikant gebremst. Dies ist der Grund für die Formstabilität des EMC über Temperatureinwirkung.

Für ein anisotropes Material ist der CTE richtungsabhängig. Im Fall der PCB, deren Verhalten in x- und y-Richtung hauptsächlich von der Glasfasermatte bestimmt wird, befinden sich  $\alpha_1 / \alpha_2$  bei etwa  $11...15 \text{ ppm/K} / 11...15 \text{ ppm/K}$  [38]. Das heißt, der CTE der Glasfasermatte ist ausschlaggebend für die Wärmeausdehnung. Der starke Einfluss des Epoxid wird in z-Richtung sichtbar, denn  $\alpha_1 / \alpha_2$  befinden sich bei etwa  $30...50 \text{ ppm/K} / 200...230 \text{ ppm/K}$  [39]. Am Beispiel des QFN-FlexPac-LN (Abmaß:  $55 \times 55 \times 0,3 \text{ mm}^3$ ) beträgt die Wärmeausdehnung von Raum- auf eine Prozesstemperatur zwischen  $175...185^\circ\text{C}$  ca.  $128...136 \mu\text{m}$ . In z-Richtung würde sich der QFN-FlexPac-LN bei einem  $T_g$  von  $130^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  und  $170^\circ\text{C}$  beim FAM-Prozess um etwa  $4,7...5,4 \mu\text{m}$ ,  $3,7...4,3 \mu\text{m}$  und  $2,6...3,3 \mu\text{m}$  ausdehnen. Diese in z-Richtung wirkende Ausdehnungen sind vernachlässigbar für den FAM-Prozess. Jedoch muss bei dickeren PCB diese Aussage neu bewertet werden.

## 5.1 FAM-Prozess für Standardpackages

### 5.1.1 Auswirkung FAM-Prozesstemperaturen auf den Leiterplattennutzen (LN)

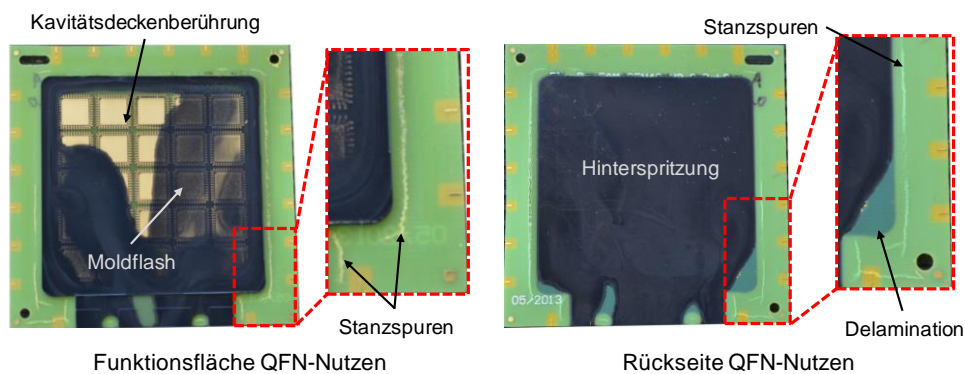


Abb.5.1.1-1: Mögliche Effekte, die während des FAM-Prozess aufgrund von thermischer Ausdehnung des LN bei dessen gleichzeitiger Fixierung im Werkzeug mittels hoher Klemmkräfte auftreten können.

Beim Verarbeiten des  $300 \mu\text{m}$  dicken LN im FAM-Prozess kann es zu Effekten kommen, die in Abb.5.1.1-1 dargestellt sind. Das Zusammenspiel zwischen der Wärmeausdehnung, der Fixierung des LN im Werkzeug und dem verwendeten  $T_g$  des LN kann Schäden und Auffälligkeiten nach dem FAM-Prozess hervorrufen. Dabei zeugt das Stanzen des LN durch das Werkzeug von einer zu starken Pressung der Werkzeugdichtflächen auf dem LN, die zusätzlich Delaminationen verursachen könnte. Damit einhergehend kann sich der LN nicht ausdehnen und wölbt sich an den nicht fixierten Kanten, sodass EMC-Schmelze auf die Bottom-Lage gelangt. Dieser Effekt wird als Hinterspritzung bezeichnet. Zur Hinterspritzung neigen vor allem Standard-LN mit einem  $T_g$  von  $130^\circ\text{C}$ , denn der Erweichungsprozess ab  $130^\circ\text{C}$  schreitet bis zur Prozesstemperatur voran. Der LN gibt der Wärmeausdehnung nach, wölbt sich und ist damit nicht temperaturstabil. Aufgrund dessen sind beim FAM-Prozess PCB mit einem  $T_g$  von  $130^\circ\text{C}$  ungeeignet.





der Werkzeugstopper (Nullposition)  $4,09\text{ mm}$ . Das Anpassen der Werkzeugstopper ist ein Einrichtungsschritt für den FAM-Prozess.

Ein QFN-FlexPac-LN mit einem  $T_g$  von  $170^\circ\text{C}$  ist temperaturstabil und gut für den FAM-Prozess geeignet, da die Erweichung der PCB während des FAM gering wäre. Jedoch müsste bei der Einrichtung des Werkzeugs die wirkende Kraft  $F_{clem}$  auf den LN mittels der Werkzeugstopper verringert werden.

Um die Überlegung, welchen  $T_g$  der LN haben sollte, abzuschließen, ist noch anzuführen, dass diese charakteristische Eigenschaft auch den Beginn eines Erweichens des Kunststoffes darstellt [4]. Duroplaste erweichen aufgrund ihres hohen Vernetzungsgrads nicht so stark wie Thermoplaste. Trotzdem wird dadurch ein Relaxierungsprozess der Molekülketten aktiviert, sodass sich der LN flexibler und weicher verhält. Bei einer Standard-PCB weicht das Leiterplattenmaterial stark auf, da die Temperaturdifferenz zwischen dem  $T_g$  und der Prozesstemperatur groß ist und das Matrixmaterial damit erweichen kann. Daher kann das Hinterspritzen und die Beschädigung des LN bei Standard-PCB schwer verhindert werden.

Die Erhöhung der Werkzeugstopper aufgrund der z-Höhentoleranz des LN von  $10\%$  birgt ein Risiko. Wird zum FAM-Prozesseinrichten ein LN verwendet, der im Mittel dicker ist als die LN, die im späteren FAM-Prozess verwendet werden, kann dies zum Abdichtungsversagen des Werkzeugs auf der LN-Oberfläche führen. Ein häufiges Auftreten einer Überspritzung, d.h. ein Austreten der EMC-Schmelze aus dem Kavitätsbereich (Abb.5.1.1-4a) wäre die Folge. Überspritzungen können auch aus einer Verkippung des Bottom-Inserts resultieren. Überspritzungen müssen vermieden werden, da sie bei der Werkzeugauslegung nicht berücksichtigt werden. Treten sie dennoch auf, so werden Evakuierungsbohrungen und -kanäle mit EMC-Schmelze gefüllt und nach dem FAM-Prozess verstopft. Damit versagt die Funktion des Vakuumsystems und ein erheblicher Reinigungsaufwand ist die Folge. Bei der Reinigung kann das Werkzeug mitunter verschlissen werden, da die Haftung des EMCs im Werkzeug sehr gut ist (Kapitel 7.2).

Tab.5.1.1-1: Leitlinien zur Verarbeitung dünner und flexibler LN.

<b>Leitlinien</b>	
$T_g$ des LN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>150^\circ\text{C}</math> und höher</li> </ul>
Werkzeugstopper	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in Höhe variieren, um Flächenlast der Dichtfläche auf LN zu reduzieren</li> </ul>
Klemmkraft $F_{clem}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in Stärke variieren, um Flächenlast der Dichtfläche auf LN zu reduzieren</li> <li>• sollte jedoch nicht so klein eingestellt werden, dass der Klemmdruck kleiner wird als der Aushärtedruck, da sonst das Werkzeug nicht geschlossen bleibt</li> </ul>

Für den Fall, dass der Einricht-LN dünner als die im Prozess verwendeten LN ist, könnte nach dem FAM-Prozess eine Hinterspritzung zu beobachten sein. Die diskutierten Risiken lassen sich vermeiden, indem ein Einricht-LN verwendet wird, dessen

z-Höhe dem Mittelwert der verwendeten LN entspricht. Um aber die Hinterspritzung in jedem Fall zu vermeiden, sollte der LN auf Werkzeugtemperatur vorgeheizt werden, sodass die thermische Ausdehnung während des FAM-Prozesses vernachlässigt werden kann.

Die abgeleiteten Leitlinien zur Verarbeitung dünner und flexibler LN sind in Tab.5.1.1-1 zusammengefasst.

### 5.1.2 Verarbeitung der bestückten QFN-FlexPac-LN

Die bestückten LN werden vor dem FAM-Prozess bei  $100\text{ °C}$  für  $3\text{ h}$  getrocknet, denn Feuchte würde während des FAM-Prozesses ausdampfen und Lunker im EMC erzeugen. Die Anhaftung des EMC an der Leiterplattenoberfläche wäre zudem verschlechtert und Delaminationen zwischen EMC und LN-Oberfläche könnten beobachtet werden. Wie in Abb.5.1-4b und c zu sehen ist, können Überspritzungen in verschiedener Stärke auch während des Produktionsprozesses auftreten. Aus dieser Beobachtung resultiert, dass bei einem leiterplattenbasierten Aufbau die erforderliche FAM-Prozesseinrichtung sehr komplex ist und bereits kleinste Abweichungen im Material und dessen Toleranz eine Auswirkung auf das Verkapselungsergebnis haben. Eine Kompensation der z-Höhenabweichung durch das Werkzeug kann eine Lösung sein. Hierzu kann das Insert, auf welchem der LN im Werkzeug aufgelegt wird, gefedert sein. Ist die Höhentoleranz nicht bei der Konzeption des Werkzeugs berücksichtigt, so kann eine dickenabhängige Vorsortierung der LN durchgeführt werden. Damit könnte der Einfluss der z-Toleranz eingedämmt werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, einen Metallrahmen im Leiterplattendesign vorzusehen, der in allen vier Lagen vorhanden ist und auf dem das Werkzeug abdichten kann. Dieses Design ist in Abb.5.1.2-1 dargestellt.

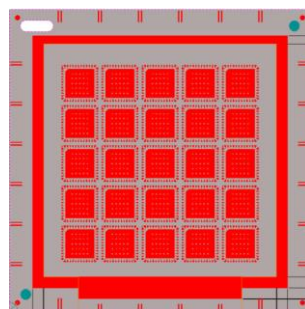


Abb.5.1.2-1: Design der Top-Lage eines QFN-FlexPac-LN mit einem Metallrahmen, auf dem im FAM-Prozess die Dichtflächen des Werkzeugeinsatzes aufliegen.

Beim bestückten QFN-FlexPac-LN zeigt sich nach dem FAM-Prozess auf der Moldkappenoberfläche (Oberfläche des ausgehärteten EMC) ein Karomuster (Abb.5.1.1-4b). Dieses wird durch matte Stellen auf dem schwarzglänzenden EMC sichtbar. Dieses Muster entsteht vermutlich durch das Entmischen des Entformungshilfeanteils

aus dem EMC. Der Entformungshilfeanteil sammelt sich in den Bereichen, wo keine ASIC sind, sodass davon auszugehen ist, dass dort die Scherung der Schmelze schwächer als direkt über den ASIC ist.

Nach dem FAM-Prozess werden die LN getempert (Abb.5.1.1-4c). Dieser Schritt wird „Post Mold Cure“ (PMC) genannt und erfolgt bei Prozesstemperatur für eine vom Hersteller empfohlene Zeit. Dabei kann eine Vergilbung des Leiterplattenmaterials beobachtet werden. Dies könnten erste Anzeichen einer Degeneration des Leiterplattenepoxidharzes sein oder eine unter Temperatureinwirkung und Luft gebildete oxidierte Schicht. Letzteres würde durch die chemische Reaktion von O<sub>2</sub>-Molekülen aus der Ofenatmosphäre mit den ungesättigten Verbindungen im Leiterplattenepoxidharz entstehen. Die Ausbildung einer Oxidationsschicht ist plausibler als der Beginn von Degenerationsprozessen, da das Epoxidharz der FR4 erst ab einer Temperatur von 330°C degeneriert [39].

Die abgeleiteten Leitlinien zur Verarbeitung bestückter LN sind in Tab.5.1.2-1 zusammengefasst.

Tab.5.1.2-1: Leitlinien zur Verarbeitung dünner und flexibler LN.

Leitlinien	
Trocknung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 h bei 100°C</li> </ul>
Abdichtung LN im FAM-Prozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metallrahmen im LN-Layout vorsehen, um Dichtfläche des Werkzeugeinsatzes zu unterstützen</li> </ul>
Post Mold Cure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• x h bei Verarbeitungstemperatur, je nach EMC-Hersteller</li> </ul>

## 5.2 FAM-Prozess für Packages mit Medienzugang

Da es sich bei Packages mit einem Medienzugang häufig um eine Sonderlösung handelt, wird in diesem Abschnitt die Vorbereitung und Durchführung des FAM-Prozesses anhand der Ergebnisse für den Bildsensor-FlexPac diskutiert.

### 5.2.1 AVT-Prozess zur präzisen Montage der Bildsensoren auf den LN

Um die Genauigkeitsanforderungen an die Montage der Bildsensoren einzuhalten, wird ein fab<sup>1</sup> Bestückungsautomat des Unternehmens AMADYNE GMBH eingesetzt. Dieser bestückt mit einer Positioniergenauigkeit von  $\pm 0.015 \text{ mm}$  und hat für die visuelle Koordinatenbestimmung eine Abweichung von  $\pm 0,003 \text{ mm}$  [37]. Der Werkstückträger (WT, Kapitel 4.3.2) wird im Bestückungsautomat integriert und der LN über die Zentrierstifte auf diesen platziert. Anschließend wird der LN über das Vakuumsystem an den WT fixiert. Über die auf dem WT montierten Referenzmarken werden die Koordinaten für die Platzierung der Bildsensoren festgelegt. Dabei wird die erste Sensorposition angefahren und von dieser aus in der entsprechenden Montagematrix die weiteren Sensoren platziert (Abb.5.2.1-1). Die Sensorposition stellt dabei den Sensormittelpunkt dar. Dieser wird anhand von drei auf dem Sensor befindlichen Tech-

nologiemarken ermittelt (Abb.5.2.1-2). Der Sensormittelpunkt wird auf die Sollkoordinate auf der Montagefläche platziert. Der Koordinatenursprung befindet sich im Mittelpunkt der Zentrierstiftbohrung, die die LN-Bohrung aufnimmt. Der SOLL/IST-Koordinatenvergleich der platzierten Bildsensoren zeigt in der finalen Bestückungseinrichtung einen durchschnittlichen Positionierungsversatz von  $+0,007\text{ mm}$  auf der x-Achse und von  $+0,003\text{ mm}$  auf der y-Achse. Dieser Versatz befindet sich unterhalb der für den Herstellungsprozess ermittelten Platzierungstoleranz von  $\pm 0,05\text{ mm}$  (Kapitel 4.2) und ist daher unkritisch. Die Korrektur der Chiprotation wird mit der Erfassung von zwei Technologiemarken (oben links und unten rechts, blaue Kreise) durchgeführt.

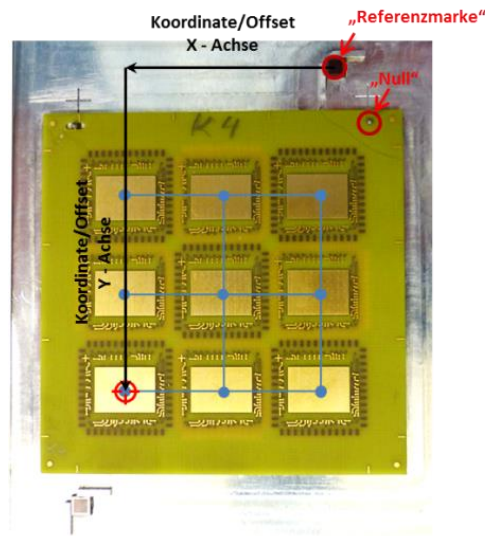


Abb.5.2.1-1: Montagematrize auf einen im WT montierten Bildsensor-FlexPac-LN. Unten links befindet sich die erste Sensorposition, von der aus alle anderen Sensoren montiert werden. Die Referenzmarke auf dem WT ermöglicht das bestimmen der Sollposition des ersten Sensors.

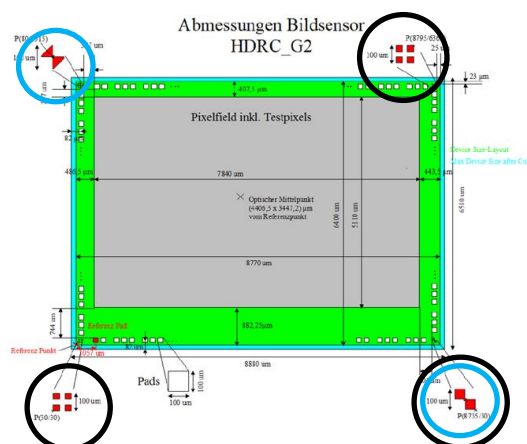


Abb.5.2.1-2: Darstellung der benötigten Technologiemarken für die Chipmontage.

Aufgrund dieser Bestückungsstrategie wird der Bildsensor nicht in der Mitte der Montagefläche positioniert, sondern auf dieser Verschoben (Abb.5.2.1-3). Deshalb muss die Montagefläche so ausgelegt werden, dass sie die Toleranz "Leiterbild zu Boh-

rung" sowie "Bohrung zu Bohrung" kompensiert wird. Im Fall des Bildsensor-FlexPac ist die Montagefläche + 100  $\mu\text{m}$  größer ausgelegt.

Die abgeleiteten Leitlinien zum AVT-Prozess von Sensoren, die präzise auf einem LN positioniert werden sollen, sind in Tab.5.2.1-1 zusammengefasst.

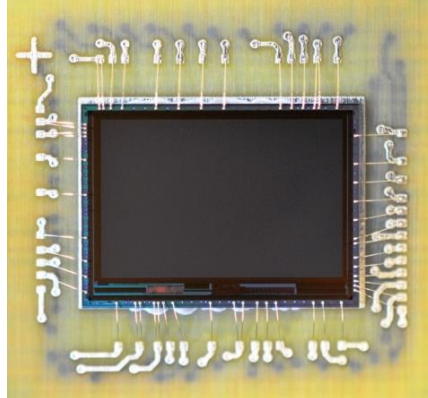


Abb.5.2.1-3: Au-Drahtgebondeter Bildsensor, der aufgrund der Bestückungsstrategie nicht im Mittelpunkt der Montagefläche des LN positioniert ist.

Tab.5.2.1-1: Leitlinien zur Montage von Sensoren, die einen Medienzugang benötigen, über einen Werkstückträger.

Leitlinien	
Referenzmarke WT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• außerhalb des Prozessbereichs</li> <li>• soll genaue geometrische Strukturen aufweisen</li> <li>• referenziert die Montagematrix</li> </ul>
Montagefläche LN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• so auslegen, dass LN-Toleranzen kompensiert werden</li> </ul>
Sensorlayout	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologiemarken für den Pick and Place-Prozess vorsehen</li> </ul>

## 5.2.2 Verarbeitung der bestückten Bildsensor-FlexPac-LN

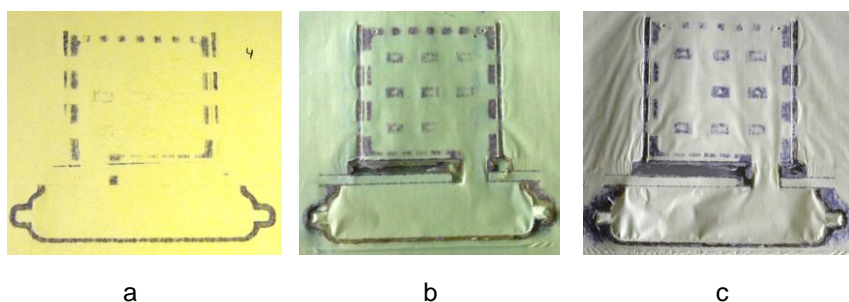


Abb.5.2.2-1: Druckbilder von der finalen FAM-Maschineneinstellung für die drei verschiedene FAM-Iterationen.

Die Einrichtung des FAM-Prozesses für die Bildsensor-FlexPac ist aufgrund des modularen Werkzeugkonzepts komplex, denn das Bottom- sowie Top-Insert muss für die hohen Toleranzanforderungen der Bildsensor-FlexPac plan eingesetzt werden. Nachdem die Werkzeugeinsätze in die FAM-Anlage integriert werden, wird ein unbestückter Einricht-LN zur Überprüfung der Kavitätsabdichtung verwendet. Stimmt die Abdichtung der Kavität, wird als nächstes ein bestückter Einricht-LN zur Prüfung der

Abdichtung der Freistellungselemente auf der Sensoroberfläche verwendet. Die Überprüfung der Dichtflächen wird anhand eines Druckpapiers durchgeführt. Dieses färbt sich an den Berührungsflächen des Werkzeugs mit den Substratoberflächen grau (Abb.5.2.2-1). In Abb.5.2.2-1a ist ein Druckpapierbild zu sehen, das mit einer  $50\ \mu\text{m}$  dicken ETFE-Folie hergestellt wurde. Die Abdrücke sind blass und gleichmäßig. Die so erzeugte Freistellung auf der Sensoroberfläche weist in den Randbereichen und vorwiegend in den Freistellungsecken einen unterschiedlich starken Mold Flash auf. Dass der Mold Flash unterschiedlich stark auf der Sensoroberfläche abgebildet wird, liegt vermutlich daran, dass die Bildsensoren innerhalb des LN in der Höhe variierten. Dies hängt mit der Dickentoleranz zusammen (Kapitel 4.2). Zusätzlich könnte ein inhomogener Klebespalt zwischen Bildsensoren und Montagefläche diese Höhenvarianz verstärken. So könnte durch eine ETFE-Folie mit einer Dicke von  $50\ \mu\text{m}$  eine Höhenabweichung ab  $15\ \mu\text{m}$  nicht mehr ausreichend abdichten, was das Auftreten von Mold Flash begünstigen würde (Abb.5.2.2-2 links). Wenn die im FAM-Prozess verwendeten LN dünner sind als die verwendeten Einricht-LN ist Mold Flash in der Regel unvermeidbar. Aus diesem Grund sollen zur FAM-Prozesseinrichtung nur LN verwendet werden, die ähnlich dick wie die LN mit den funktional bestückten Bauteilen, jedoch von diesen die Dünnsen sind. So kann das Auftreten von Mold Flash eingedämmt werden.

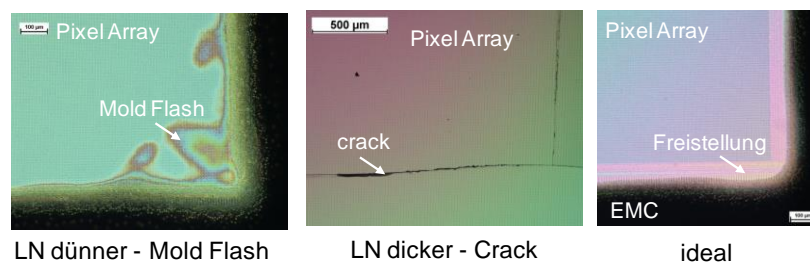


Abb.5.2.2-2: Mold Flash bei LN die dünner sind als die Einricht-LN (links), Cracks, die bei LN auftreten, die dicker sind als die Einricht-LN (Mitte) und ideales Freistellungsergebnis aufgrund gleich dicker LN (rechts).

In der ersten Herstellungssiteration der Bildsensor-FlexPac zeigt sich, dass bei den Freistellungselementen im Top-Insert die Ecken zu spitz ausgeführt sind. Nach dem FAM-Prozess wird an den Ecken der Sensorflächenfreistellung Mold Flash beobachtet. Deshalb werden die Ecken der Freistellungselemente für die zweite Herstellungssiteration verrundet und damit für eine  $100\ \mu\text{m}$  dicken ETFE-Folie angepasst. So kann ein optimales Freistellungsergebnis erreicht werden (Abb.5.2.2-2 rechts). Die dickere ETFE-Folie erzeugt eine bessere Abdichtung auf der Bildsensoroberfläche (Abb.5.2.2-1b und c). Der abgebildete Druckkontrast ist inhomogen und zeigt in beiden Bildern, dass der angussnahe Bildsensor kaum und der diagonal dazu entfernte gut abgedichtet wird. Da hierbei unterschiedliche Einricht-LN verwendet werden, ist es wahrscheinlich, dass die Top- und Bottom-Insert nicht plan zueinander sind. Diese Orientierung der Werkzeugeinsätze kann durch die  $100\ \mu\text{m}$  dicke ETFE-Folie kompensiert werden.

In Abb.5.2.2-1c fehlt in dem Druckbild einer der mittleren Bildsensoren. Das fehlende Bauteil zeigt bei einer Messung nach dem Bestückungsprozess einen Höhenunterschied von  $+ 50 \mu\text{m}$  im Vergleich zu den übrigen Bildsensoren auf dem LN. Während des Einrichtprozesses ist dieser durch das Freistellungselement zersplittert. Hieran zeigt sich, dass in z-Richtung eine hochpräzise Bestückung gefordert ist. Falls diese Höhenunterschiede nicht kompensiert werden, können die in Abb.5.2.2-2 links und Mitte dargestellten Effekte auftreten. Dabei sind Mold Flash und Cracks Herstellungsfehler, die die Funktion der Sensoren beeinträchtigen bis zerstören. Bei einem hierbei demonstrierten starren Werkzeugaufbau muss als Spezifikation für die Bestückung der LN ein präziser Dispensprozess und eine gleiche LN-Dicke gefordert werden. Weiterhin müssen die Werkzeugeinsätze optimal plan aufeinander ausgerichtet werden. Die ETFE-Folie soll während des FAM-Prozesses nur eine geringe Höhenabweichung der Bildsensoren, die aus den Bestückungstoleranzen und PCB-Toleranzen resultiert, ausgleichen. Eine weitere Möglichkeit, die Freistellungen reproduzierbar zu erzeugen, bietet ein gefedertes Werkzeugkonzept [15], [40], [41]. Dabei werden die Freistellungselemente als Steckensätze für den Top-Insert gefertigt und federnd gelagert. Dadurch können Höhenunterschiede der Bildsensoren über den begrenzten Federweg ausgeglichen und abgedichtet werden. Der Bottom-Insert wird ebenfalls mit Federelementen versehen, um Höhenschwankungen im LN zu kompensieren.

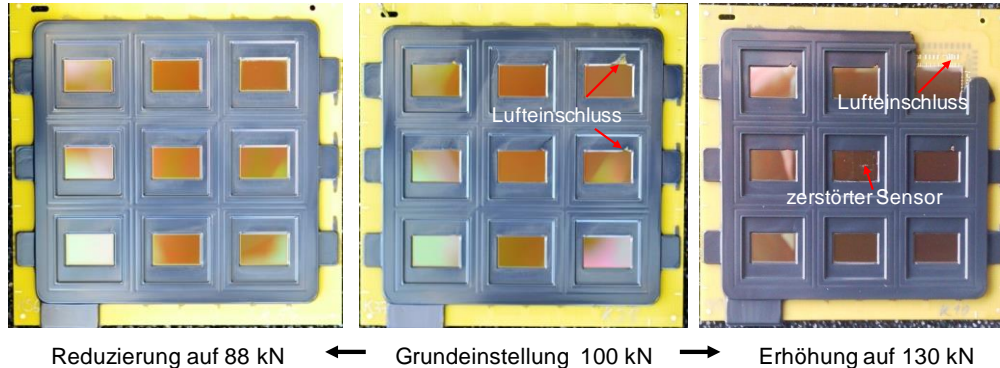
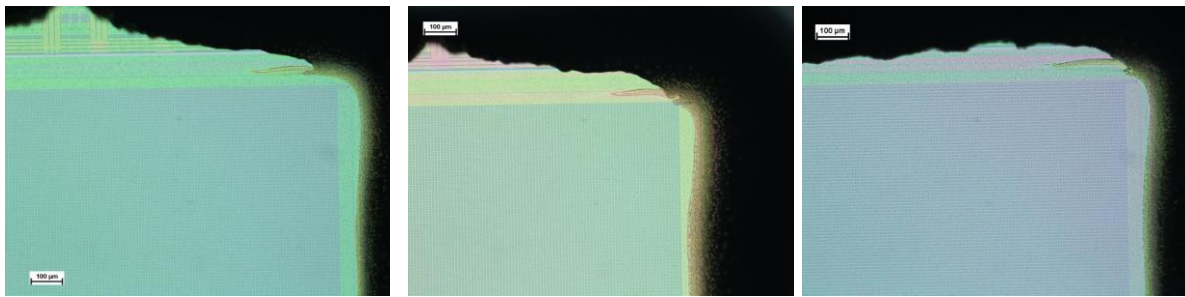


Abb.5.2.2-3: Auswirkung der Variationen der Klemmkraft auf das Verkapselungsergebnis des Bildsensor-LN.

Während der zweiten Herstellungsiteration wird der Einfluss der Klemmkraft  $F_{clem}$  und des Aushärtdrucks  $p_c$  untersucht.  $F_{clem}$  soll einen Klemmdruck erzeugen der größer als der Aushärtdruck  $p_c$  ist. Anderenfalls kann der Druck  $p_c$  während des FAM-Prozesses die hydrostatisch wirkende EMC-Schmelze verwenden, um das Werkzeug um einige hundertstel Millimeter zu öffnen. Mold Flash oder eine vollflächig mit EMC-Schmelze kontaminierte Sensoroberfläche wäre die Folge. Aus diesem Grund wird der Aushärtdruck  $p_c$  kleiner als der durch  $F_{clem}$  entstehende Klemmdruck eingestellt. Bei dieser Herstellungsiteration können Lufteinschlüsse am Fließwegende beobachtet werden, für den Fall, dass die Kraft  $F_{clem}$   $100 \text{ kN}$  und der Druck  $p_c$   $30 \text{ bar}$  beträgt (Abb.5.2.2-3 Mitte). Wird  $F_{clem}$  und  $p_c$  auf  $130 \text{ kN}$  und  $40 \text{ bar}$  angehoben - als Ver-



such, die Luft aus der Kavität zu treiben - resultiert daraus ein unvollständiges Packagingergebnis, da stattdessen die Luft in der Kavität eingeschlossen wird (Abb.5.2.2-3 rechts). Das belegen die Abdrücke der Ventings im nachgebenden LN. Zudem können aufgrund des hohen Klemmdrucks der Freistellungs-elemente einzelne Sensoren brechen. Wird  $F_{clem}$  und  $p_c$  auf  $88\text{ kN}$  und  $25\text{ bar}$  reduziert, ist kein Lufteinschluss nach dem FAM-Prozess zu beobachten. Jedoch kann teilweise das Auftreten von Mold Flash beobachtet werden, da der reduzierte Klemmdruck eine schlechte Abdichtung auf der Sensoroberfläche verursachen kann. Dieser Effekt wird durch das Zusammenspiel des Höhenunterschieds der LN mit der Höhenvarianz der montierten Bildsensoren sowie mit der nicht planen Werkzeugeinstellung verstärkt. Schlussfolgernd zeigt sich, dass  $F_{clem}$  und  $p_c$  für die Qualität der Packages und den Verbleib von Lufteinschlüssen signifikante Faktoren sind.



Grundeinstellung 22 bar      →      Erhöhung 24 bar      →      Erhöhung auf 27 bar

Abb.5.2.2-4: Auswirkung der Erhöhung des Aushärtdrucks  $p_c$  auf die Komprimierung von Lufteinschlüssen welche überwiegend bei den angussfernten Bildsensoren beobachtet werden konnten.

Das in Abb.5.2-1c gezeigte Druckbild bildet die Werkzeugeinstellung für die dritte FAM-Iteration ab. Diese wird durchgeführt, um die Bildung von Lufteinschlüssen zu untersuchen. Eine Ursache für Lufteinschlüsse kann sein, dass der Spalt zwischen Sensoroberfläche und der Oberfläche der ersten Freistellungs-elementstufe aufgrund der  $100\ \mu\text{m}$  dicken ETFE-Folie während des FAM-Prozesses verengt wird. Da der Plunger den Aushärtdruck  $p_c$  aufbringt, wirkt ein Druckgradient auf die EMC-Schmelze. Dieser wird zusätzlich vom Vernetzungsgradienten, der sich am Ende des Transferprozesses in der EMC-Schmelze befindet, beeinflusst. Dabei nimmt die Vernetzung vom Fließwegende zum Fließweganfang ab, da sich die älteste Schmelze in der Fließfront befindet. Daher wirkt der Druck  $p_c$  nicht an allen Stellen der Kavität gleich stark auf die Schmelze und wird vermutlich über die Kavitätslänge abgedämpft. Deshalb wird versucht, die Luft an diesen Stellen bei einem konstanten  $F_{clem}$  ( $88\text{ kN}$ ) mit der schrittweisen Anhebung des Aushärtdrucks ( $22\text{ bar}$ ;  $24\text{ bar}$ ;  $27\text{ bar}$ ) zu beseitigen. Abb.5.2.2-4 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Der Lufteinschluss wird durch die Anhebung von  $p_c$  komprimiert, aber nicht vollständig verhindert. Der Top-Insert sollte daher optimiert werden, indem die erste Freistellungs-elementstufe

um  $100\ \mu\text{m}$  verkleinert wird. Damit sollte die Ansammlung von Luft an dem Freistellungsrand im Package verhindert werden.

Die Leitlinien zur Herstellung eines FlexPac, das über einen Medienzugang verfügt, sind in Tab.5.2.2-1 zusammengefasst.

Tab.5.2.2-1: Leitlinien zur Herstellung von FlexPac, die über einen Medienzugang verfügen.

Leitlinien	
Werkzeugeinstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inserts müssen plan zueinander ausgerichtet sein</li> <li>• Ecken im Freistellungs-element entschärfen</li> <li>• mit gefederten Freistellungs-elementen arbeiten</li> </ul>
Prozesseinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einricht-LN sollen ähnliche Dicke wie Prozess-LN aufweisen</li> <li>• Klebspalt der Bildsensoren kontrolliert einstellen</li> <li>• mit <math>F_{clem}</math> und <math>p_c</math> den Auflagedruck der Freistellungs-elemente auf die Oberfläche justieren</li> </ul>
Werkzeugkonzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftreten enger Spalten in der Kavität am Fließwegende vermeiden</li> </ul>

### 5.3 FAM-Prozess für MEMS-Packages am Beispiel eines Inertialsensors

Nachdem der FAM-Prozess hinsichtlich des QFN-FlexPac und Bildsensor-FlexPac besprochen wurde, beschäftigt sich dieses Unterkapitel mit dem Herstellen von Inertialsensor-FlexPac. Die bereits vorgestellten FlexPac sind Beispiele für IC- sowie ASIC-Packaging. Der Inertialsensor hingegen ist ein MEMS-Sensor und wird in der hier zum Einsatz kommenden Version von der Fa. AMAC GmbH vertrieben. Da er neben der elektrischen auch eine mechanische Komponente besitzt, soll an diesem Beispiel exemplarisch gezeigt werden, dass mittels FAM eine zerstörungsfreie und funktionale Kunststoffverkapselung möglich ist. Damit soll zudem demonstriert werden, wie schonend mittels des FAM-Prozesses ein Kunststoffpackage hergestellt werden kann. Des Weiteren wird gezeigt, dass für komplexe Systeme, wie es beim Inertialsensor der Fall ist, eine gute Voraussetzung für die Integration auf einem LN besteht.

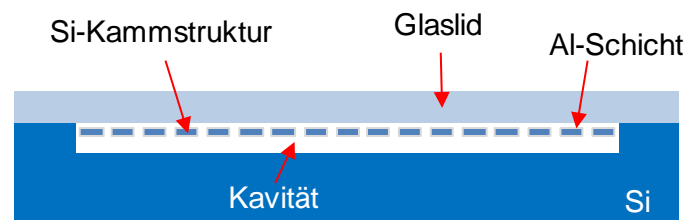


Abb.5.3.1.1: Schematischer Aufbau des Inertialsensors [42].

Die Herausforderung beim Verkapseln des Inertialsensors besteht darin, dass dieser, aufgrund seines Aufbaus, ein druck- sowie spannungssensitiver Sensor ist. Er besitzt eine Kammstruktur, die aus Silizium (Si) besteht. Die Kammstruktur wird durch ein Ätzverfahren in den Si-Wafer geätzt und ist mit dem Wafer verankert (Abb.5.3.1-1). Durch das Aufbringen einer dünnen Schicht, bestehend aus Aluminium (Al), wird die

Kammstruktur elektrisch leitend. Zwischen den einzelnen Kammzähnen kann eine kapazitive Ladung aufgebaut und gemessen werden. Diese Ladung verändert sich mit der Neigung des Sensors und damit kann auf den Neigungswinkel des Sensors rückgeschlossen werden. Geschützt wird die Kammstruktur durch ein Glaslid, welches nach der Fertigung des MEMS-Wafer auf diesen montiert wird. Die Kavität, in der sich die Si-Kammstruktur befindet, besitzt üblicherweise eine Schutzgasatmosphäre oder ist von Gasen evakuiert. Dies ist abhängig vom Montageprozess des Glaslids.



Abb.5.3.1-2: In Keramikgehäuse gehauster Inertialsensoraufbau, so von der AMAC GmbH vertrieben.

Der Inertialsensor wird üblicherweise in einem Keramikgehäuse montiert und gedeckelt (Abb.5.3.1-1). Der Vorteil dieser Packaging-Variante ist, dass kein größerer Druck als der Atmosphärendruck und keine größere Spannung als die, die durch den auf dem Inertialsensor aufgeklebten ASIC verursacht wird, auf den Inertialsensor einwirkt. Der Nachteil daran sind die hohen Kosten, die für diese Packaging-Lösung anfallen. Diese könnten durch ein leiterplattenbasiertes Inertialsensor-Package signifikant sinken, da Leiterplatten und EMC kostengünstig verfügbar sind.

Der Versuch, den Inertialsensor mittels Spritzgießen zu hausen, führt bei Fülldrücken größer  $8\text{ bar}$  zum Versagen des Glaslids und somit des Sensors. Hohe Drücke beim Verkapselungsverfahren können das Glaslid mechanisch beeinflussen, sodass es mit der darunter liegenden Kammstruktur wechselwirkt. Dabei kann es zu einer Änderung der Kapazität beim Winkel  $0^\circ$  kommen, was eine Offsetkapazität auf das Messsignal verursacht. Weiterhin kann die Al-Schicht auf der Kammstruktur durch die Berührung mit dem Glaslid beschädigt werden, sodass die elektrische Leitung der Al-Schicht unterbrochen wird. Dieser Effekt würde zu einem Ausfall des Sensors führen. Daher ist es wichtig, beim Hausen des MEMS-Chips ein Verfahren zu verwenden, bei dem die Kunststoffschmelze den Inertialsensor möglichst drucklos umschließt. Das schließt das Spritzgießen mit Thermoplasten aufgrund der hohen Fülldrücke und Viskosität aus. EMC, welche beim Duroplastspritzgießen Anwendung finden, sind aufgrund der hohen Ionenverunreinigung noch nicht geeignet für das First Level Packaging und werden deshalb bislang dafür nicht verwendet.

Das Transfer Molding (TM) hingegen wird überwiegend für das First Level Packaging verwendet und die EMC sind dafür formuliert. Durch die Erweiterung des TM zum FAM wird der bestückte Substratträger durch den Folieneinsatz schonender im Werkzeug aufgenommen. Im Vergleich zum Spritzgießen ist das FAM ein schonenderes Verfahren, bei dem in einer guten Prozessführung lediglich der Atmosphärendruck in der Kavität von der EMC-Schmelze beim Transfervorgang (Füllvorgang) verdrängt wird. Die angestrebten Untersuchungen sollen die Eignung für MEMS-Packaging belegen.

Nachfolgend werden zwei Untersuchungen, unterteilt in Vor- und Hauptuntersuchung, diskutiert. In der Voruntersuchung wird die Eignung des FAM zum MEMS-Packaging untersucht. Dabei werden teilweise defekte Inertialsensoren verwendet, die auf einem für diese Untersuchung hergestellten Test-LN aufgebaut und verdrahtet sind. Die elektrischen Funktionstests dienen hierbei nur der Kontrolle, ob nach dem FAM eine elektrische Funktion vorhanden ist. Nach dem erfolgreichen Verpackeln der teilweise defekten Inertialsensoren mittels des FAM-Prozesses wird in der Hauptuntersuchung der Inertialsensor wie im ursprünglichen Keramikpackage auf einem LN aufgebaut. Dabei wird der MEMS-Chip zunächst mittels eines Klebeprozesses auf den LN montiert und anschließend wird der ASIC auf das Glaslid des Inertialsensors geklebt. Bei dieser Montage kann es aufgrund mechanischer Belastung des Glaslids zu einer Funktionsstörung des Inertialsensors kommen. Aus diesem Grund werden alle montierten Aufbauten vor dem FAM-Prozess elektrisch getestet.

Die elektrischen Funktionstests werden alle mittels eines CVC2-Testboard (Kapazität zu Spannung Wandler mit zwei Kanälen) durchgeführt.

### 5.3.1 Voruntersuchung zum MEMS-Packaging

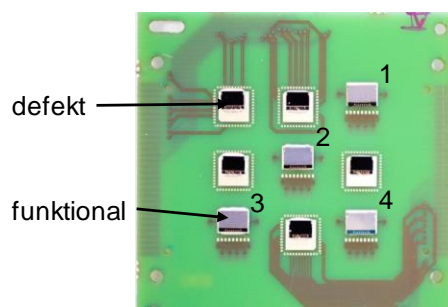


Abb.5.3.1-1: Bestückte PCB für die Voruntersuchung zum funktionalen Packaging von Inertialsensoren [42]. Dabei sind vier funktionale (nummeriert von eins bis vier) und für die thermische Stabilität fünf Dummy-Inertialsensoren bestückt.

Für die Voruntersuchung werden teilweise funktionale Inertialsensoren auf einen Test-LN aufgebracht und im FAM-Prozess mit verschiedenen hohen Aushärtedrücker  $p_c$  verpackelt. Die Variation des Parameters  $p_c$  wird aufgrund der Annahme durchge-

führt, dass dieser die Hauptursache für das Versagen des Inertialsensors nach dem FAM-Prozess ist. Das LN-Layout für diese Untersuchung sieht aus ressourcenschonenden Gründen vor, dass vier Inertialsensoren auf diesem platziert werden und die restlichen fünf Montageflächen mit nicht funktionalen Dummies aufgebaut werden. Dies geschieht aufgrund der Erzeugung einer thermischen Symmetrie und Stabilität auf dem Test-LN, sodass dieser nach dem FAM-Prozess ein geringes inhomogenes Verzugs- und damit Spannungsverhalten zeigt. Die Montageflächen der Dummies sind größer als die der funktionalen Inertialsensoren. Grund dafür ist, dass das LN-Layout für weitere Anwendungen konzipiert wird, die aber für diese Untersuchung keine Rolle spielen.

Der AVT-Prozess für die Inertialsensoren wird mittels HÄCKER Bestückungsautomaten und einer Au-Draht-Bonding-Maschine von DELVOTEK durchgeführt. Der bestückte LN ist in Abb.5.3.1-1 gezeigt. Die teilweise funktionalen Inertialsensoren sind Sensoren, die auf der x-Achse elektrische Funktion zeigen und auf der y-Achse beschädigt sind. Im Rahmen dieser Voruntersuchung ist dies ausreichend, da die Feststellung der Funktion nach dem FAM im Fokus der Betrachtung steht. Die Dummies sind Defektteile. Die teilweise funktionalen Inertialsensoren werden mit je neun Au-Draht-Bonds mit dem Test-LN elektrisch kontaktiert. Es werden zehn Test-LN aufgebaut und ein Test-LN wird als Referenz einbehalten. Dieser durchläuft den FAM-Prozess, ohne von EMC verkapselt zu werden. Diese Vorgehensweise dient dem Zweck, dass die Inertialsensoren dasselbe Temperaturprofil erfahren wie die gehäuseten.

Zunächst werden vier Test-LN mittels  $O_2$ -Plasma vorbehandelt, um die Oberfläche zu reinigen und die Haftung des EMC zu verbessern (vgl. Kapitel 7.3). Als EMC wird das EME-G770H Type CD von Sumitomo Bakelite Co. Ltd. verwendet. Bei diesem FAM-Prozess wird der modulare Werkzeugeinsatz eingesetzt, der in Kapitel 4.3.1 beschrieben wird. Dabei wird die Kavitätsdecke auf eine Höhe von  $1,3\text{ mm}$  und der Kavitätsboden, aufgrund der PCB-Dicke von  $0,8\text{ mm}$ , auf selbiges Maß eingestellt. Im FAM-Prozess wird je Platine der Druck  $p_c$  mit der Einstellung von  $10\text{ bar}$ ,  $20\text{ bar}$ ,  $30\text{ bar}$  und  $40\text{ bar}$  variiert. Jeweils ein Test-LN wird für einen Wert von  $p_c$  verwendet. Nach dem FAM-Prozess werden alle fünf Test-LN elektrisch vermessen.

Durch die Variation von  $p_c$  wird überprüft, wie sich die Funktionalität der Inertialsensoren über die Wahl von  $p_c$  verändert. Die restlichen Test-LN werden für den Fall einer feineren Untersuchung der Einwirkung von  $p_c$  zwischen zwei  $p_c$ -Einstellungen zurückbehalten, denn die  $10\text{ bar}$ -Abstände könnten zu grob gewählt sein.

In dieser Untersuchung sieht das äußerliche Ergebnis der EMC-Packages, die durch den FAM-Prozess erreicht werden, über die verwendeten  $p_c$  gleich gut aus (Abb.5.3.1-2). Das lässt den Schluss zu, dass ein Aushärte-Druck  $p_c$  von  $10\text{ bar}$  ausreicht für ein gutes Packaging dieser Test-LN. Jedoch kann mittels einer Röntgen-

durchstrahlanalyse festgestellt werden, dass mit einem  $p_c$  von *10 bar* das EMC nicht ausreichend verdichtet wird, da Lunker am Fließfrontende beobachtet werden können, wohingegen sich ab *20 bar* eine gute Verdichtung des EMC einstellt (Abb.5.3.1-3).

Die Konturen, die sich in Abb.5.3.1-2 auf der EMC-Oberfläche abbilden, zeigen die Lage der aufgebauten Inertialsensoren und kommen vermutlich durch Strömungseffekte beim Umfließen der aufgebauten Inertialsensoren durch die EMC-Schmelze zustande. Dabei verteilt sich die Entformungshilfe des EMC unsymmetrisch auf der Oberfläche. Da sich zwischen Sensor und EMC-Oberfläche ein Abstand von etwa  $600\ \mu\text{m}$  befindet, sind keine Ausbrüche der Inertialsensorkanten aus der EMC-Oberfläche festzustellen. Des Weiteren kann die Oberflächenstruktur nur durch einen entsprechenden Lichteinfall beobachtet werden und ist für die Funktion des Package unerheblich.

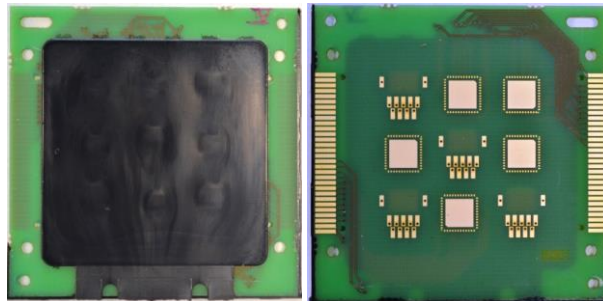


Abb.5.3.1-2: Top- (links) und Bottom-Ansicht (rechts) des mittels eines FAM-Prozesses verkapselten Test-LN.

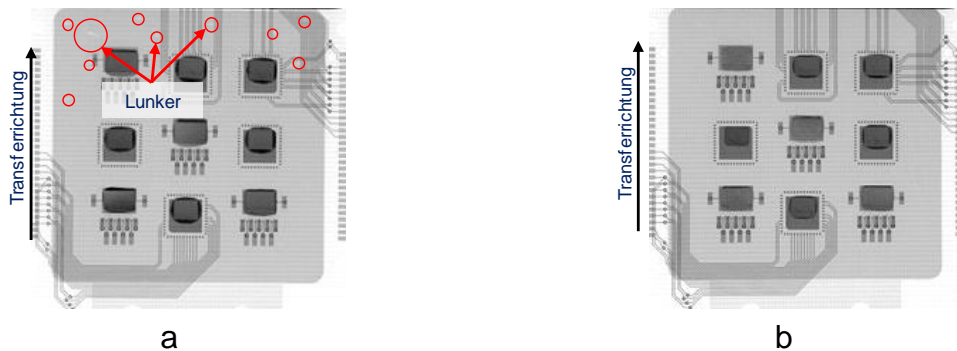


Abb.5.3.1-3: Überprüfung der Verdichtung des ausgehärteten EMC nach einem Aushärtedruck  $p_c$  von a) *10 bar* und b) *20 bar* [42].

Tab.5.3.1-1: Messergebnis des statischen elektrischen Funktionstests der verkapselten Inertialsensoren auf den Test-LN zur Überprüfung der elektrischen Leitfähigkeit.

P	10 bar	20 bar	30 bar	40 bar	Ref.
1	ok	ok	ok	ok	ok
2	ok	ok	ok	ok	ok
3	ok	ok	ok	ok	ok
4	ok	ok	ok	ok	ok

Das Messergebnis in Tab.5.3.1-1 stellt den statischen elektrischen Funktionstest dar. Dabei wird die elektrische Leitfähigkeit des Inertialsensors überprüft. Nach dem FAM-Prozess zeigen sowohl die verkapselten als auch die Referenzbauteile, dass alle Sensoren elektrisch funktional sind.

In Tab.5.3.1-2 wird das Ergebnis der dynamischen elektrischen Funktionsmessung bei einem Neigungswinkel von  $30^\circ$  gezeigt. Hierbei wird die Empfindlichkeit des Inertialsensors kapazitiv gemessen. Die mit "fail" markierten Positionen zeigen eine geringe bis keine Empfindlichkeit des Messsignals. Sowohl bei dem Referenz- als auch bei den gehausten Test-LN werden Ausfälle gemessen. Alle Aufbauten zeigen funktionale Inertialsensoren, sodass keiner der gewählten  $p_c$  ausgeschlossen werden kann. Grund hierfür könnte sein, dass beim Transferprozess die EMC-Schmelze den Inertialsensor umhüllt, ohne dabei mechanische Spannungen zu bewirken. Deshalb kann dieser Füllprozess der Kavität als schonend für die Bauteile betrachtet werden. Wenn der Aushärte-Druck  $p_c$  einsetzt, ist die Kavität bereits zu etwa 90 % mit EMC-Schmelze ausgefüllt. Daher verteilt sich der Druck auf die gesamte Oberfläche des Inertialsensors. Somit wird die Drucklast von der gesamten Fläche aufgenommen und die Kammstruktur unter dem Glaslid durch dieses nicht zerstört. Ausschlaggebend dafür kann sein, dass der Aushärte-Druck  $p_c$  vom Plunger aufgebracht wird und aufgrund des unterschiedlichen Vernetzungsstadiums des EMC ein Druckgradient erzeugt, der bis zum Fließwegende an Wirkung abnimmt.

Tab.5.3.1-2: Messergebnis des dynamischen elektrischen Funktionstests der verkapselten Inertialsensoren auf den Test-LN zur Überprüfung von deren Empfindlichkeit bei einem Neigungswinkel von  $30^\circ$  [42].

P	10 bar	20 bar	30 bar	40 bar	Ref.
1	ok	fail	fail	ok	ok
2	fail	fail	ok	ok	ok
3	ok	ok	ok	fail	ok
4	fail	fail	ok	fail	fail

Dass auf allen LN beim dynamischen elektrischen Funktionstest Ausfälle zu beobachten sind, legt nahe, dass diese nicht hauptsächlich mit dem FAM-Prozess korrelieren. Andernfalls müsste ein Muster für die Ausfälle zu beobachten sein und dies ist nicht der Fall. Da auf der Referenz auch ein Ausfall gemessen werden kann, kann der Montageprozess als weitere Ursache für die beobachteten Ausfälle der verkapselten Inertialsensoren nicht ausgeschlossen werden. Bei einem unzureichenden Handling durch das Pick and Place-Werkzeug des Bestückungsautomaten kann das Glaslid geschädigt oder mechanisch beansprucht werden, sodass die Si-Kammstruktur vorgeschädigt wird. Daher ist der hier beobachtete Ausfall der Inertialsensoren vermutlich ein Zusammenspiel der Herstellungsprozesse.

Das erzielte Ergebnis der Voruntersuchung ist dennoch insgesamt positiv und rechtfertigt die Hauptuntersuchung zum Nachweis des schonenden Packaging von Sen-

soren mittels FAM. Zudem zeigt das Ergebnis, dass ein MEMS-Package mittels FAM-Prozess prinzipiell umsetzbar ist. In Tab.5.3.1-3 sind die Leitlinien, die sich aus dieser Untersuchung ergeben, zusammengefasst.

Tab.5.3.1-3: Leitlinien zur Herstellung von drucksensitiven MEMS-FlexPac.

Leitlinien	
Aushärtedruck $p_c$	<ul style="list-style-type: none"> <li>für das Luftaustreiben <math>&gt;20 \text{ bar}</math></li> </ul>

### 5.3.2 Hauptuntersuchung zum MEMS-Packaging

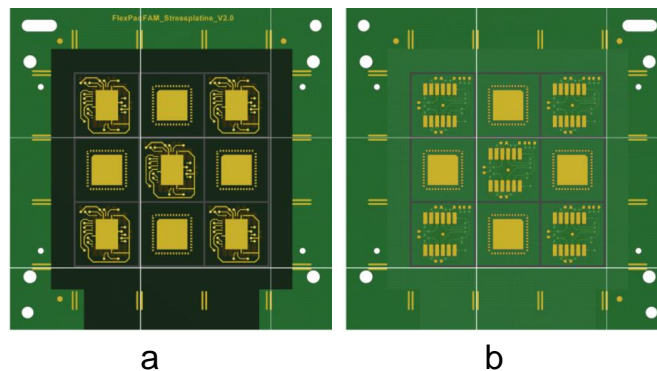


Abb.5.3.2-1: a) Top- und b) Bottom-Layer des LN zur Herstellung des Inertialsensor-FlexPac.

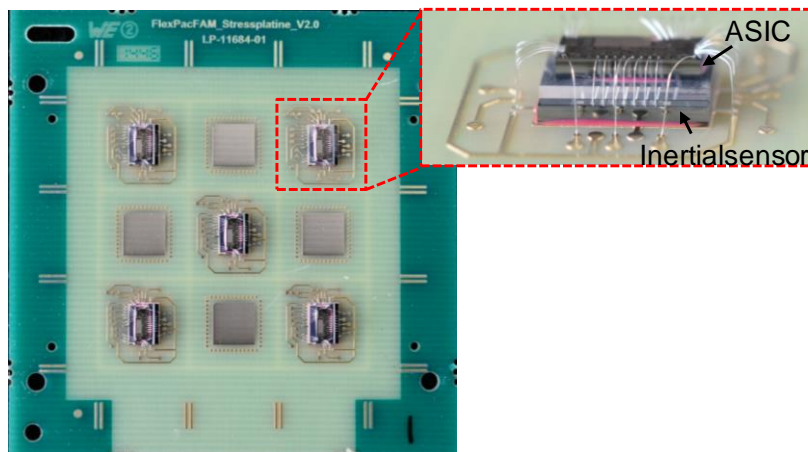


Abb.5.3.2-2: Bestückter Inertialsensor-LN mit gestacktem ASIC auf Inertialsensor.

Für die Hauptuntersuchung wird ein LN-Layout ähnlich dem Test-LN hergestellt und gefertigt (Abb.5.3.2-1). Auf fünf LN werden je fünf Inertialsensoren aufgebaut. Dabei wird ein ASIC, der die Signale des Inertialsensors verarbeitet, auf dem Glaslid des Inertialsensors montiert (Stack). In Abb.5.3.2-2 sind die montierten Stack-Aufbauten zu sehen. Das Draht-Bonding wird vom ASIC auf den LN und den Inertialsensor mit Al-Draht durchgeführt.

Die Untersuchungsstrategie sieht vier elektrische Funktionsmessungen der Aufbauten vor. Anhand dieser wird die Wirkung des FAM-Prozesses auf die Funktionalität des Inertialsensors überwacht. Nach dem AVT-Prozess wird die erste Funktionsmes-



sung durchgeführt, um zu ermitteln, welche Voraussetzung vor dem FAM-Prozess herrscht. Die zweite Messung wird nach dem FAM durchgeführt, um die Auswirkung des FAM-Prozesses auf das Sensorsignal zu überprüfen. Danach werden die LN getempert und anschließend zum dritten Mal elektrisch vermessen, damit die Wirkung des Temperschritts auf das Sensorsignal bewertet werden kann. Die letzte Messung wird an den vereinzelt Inertialsensor-FlexPac durchgeführt, um zu klären, welchen Effekt die Vereinzelung auf das Sensorsignal besitzt. Um die Nachverfolgung der einzelnen Inertialsensoren zu gewährleisten, werden die LN von eins bis fünf nummeriert und die Positionen, an denen sich der Stack-Aufbau befindet, mit einer Zahl von eins bis fünf bezeichnet (Abb.5.3.2-3a).

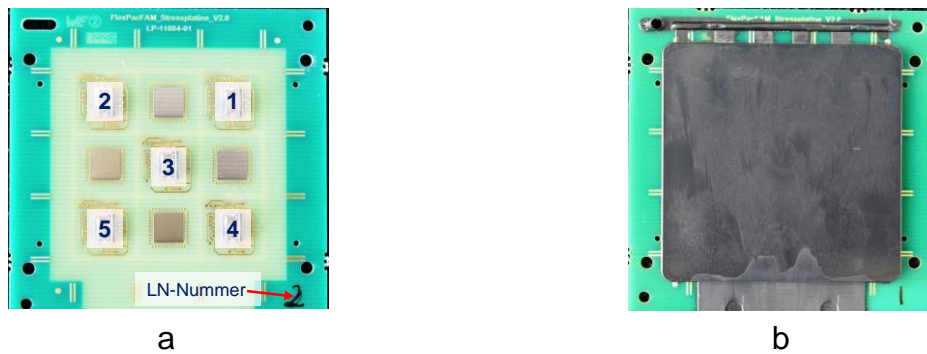


Abb.5.3.2-3: a) Darstellung der Nachverfolgung der einzelnen Positionen sowie LN. b) Repräsentatives Packaging-Ergebnis des LN.

Tab.5.3.2-1: Ergebnis der ersten elektrischen Funktionsmessung nach dem AVT-Prozess der Stack-Aufbauten. Dabei steht "grün" für ein einwandfreies, "gelb" für ein gering empfindliches und "grau" für kein Messsignal. Die Offsets des Messsignals sind als Zahlen hinterlegt.

Kanal	Offset LN 1		Offset LN 2		Offset LN 3		Offset LN 4		Offset LN 5	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-0,1	grau	-0,1	0	-0,1	0,1	-0,1	0	-0,1	0
2	1,2	1,5	0	0	-1,2	0	0	0	0	0
3	-1,2	1,3	0	0	0	0,1	0	0	-0,1	0,1
4	grau	grau	0	0	grau	grau	0,6	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	grau	grau	0	0

Das Messergebnis der elektrischen Funktionsmessung nach dem AVT-Prozess von allen fünf bestückten LN ist in Tab.5.3.2-1 dargestellt. Aus der ersten Messung geht hervor, dass vier defekte und weitere zwei auffällige Stack-Aufbauten vorliegen. Diese befinden sich auf den LN 1, 3 und 4. Daran wird deutlich, dass entweder eine große Fehlerrate bei der Herstellung der MEMS existiert oder eine Störung des Sensors erst durch den AVT-Prozess, möglicherweise beim Pick and Place-Prozess, verursacht wird. Die Werte in der Tabelle stellen die Offsetkapazitäten der Einzelmessungen dar. Für die jeweiligen x- und y-Kanäle der Inertialsensoren zeigen diese bis auf einige Ausnahmen einen Wert von null. Dies stellt den Zustand der Stack-

Aufbauten bei Atmosphärenumgebung dar. Eine von null abweichende Offsetkapazität, wie sie in Tab.5.3.2-1 auch zu sehen ist, zeigen Stack-Aufbauten, bei denen das Messsignal entweder instabil ist oder einen geringen Verlust in der Empfindlichkeit auf Längenänderungen durch Neigung aufweist. Solange das Feedback des Stack-Aufbaus eine gute Performance zeigt wird dies in der Tabelle "grün" dargestellt. Eine Toleranz im Messsignal kommt daher zustande, dass die Empfindlichkeit auf Längenänderungen durch Neigung des Stack-Aufbaus um 50 % bis 70 % vom Soll abnimmt und daraus eine geringe Empfindlichkeit resultiert. Diese Ergebnisse aus der elektrischen Messung werden "gelb dargestellt.

Tab.5.3.2-2: Ergebnis der zweiten elektrischen Funktionsmessung nach dem FAM-Prozess der Stack-Aufbauten. Dabei steht "grün" für ein einwandfreies, "gelb" für ein gering empfindliches, "grau" für kein Messsignal und "rot" für keine Empfindlichkeit des Messsignals. Die Offsets des Messsignals sind als Zahlen hinterlegt und mit "\*" wird eine Veränderung im Vergleich zur vorhergehenden Messung markiert.

Kanal	Offset LN 1		Offset LN 2		Offset LN 3		Offset LN 4		Offset LN 5	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	1,5		-1,1*	0	0*	-1,2*	0,2*	1,2*	0,3*	1,2*
2	1,2	1,5	-1,0*	0,3*	-1,2	0	0,1*	0,1*	0,2*	0,1*
3	-1,2	1,3	0,2*	0,1	0,3	0,1	0,2*	0	0,3*	1,5*
4			0,2*	0*			-1,5*	0	-0,2*	0,2*
5	0,3*	0	0,2*	-0,2*	0,2	-0,1*			0,1*	0,1*

Für den FAM-Prozess wird das gleiche Werkzeug wie bei der Voruntersuchung verwendet. Der Kavitätboden wird um  $0,8\text{ mm}$  im Bottom-Werkzeugeinsatz versenkt. Die Kavitätsdecke wird aufgrund des Stack-Aufbaus mit einer Gesamthöhe von  $1,85\text{ mm}$  auf  $2,1\text{ mm}$  Abstand zur Dichtfläche des Top-Werkzeugeinsatzes eingestellt.

Beim Einrichten des FAM-Prozesses mit dem gleichen EMC der Voruntersuchung wird zunächst der Druck  $p_c$  gesucht, bei dem die Kavität vollständig gefüllt und eine gute Verdichtung der EMC-Schmelze realisiert werden kann. Dabei kristallisiert sich  $21\text{ bar}$  als kleinster Wert von  $p_c$  für diese Anwendung heraus. Des Weiteren wird eine  $\text{O}_2$ -Plasmavorbehandlung der fünf bestückten LN durchgeführt. Das Packaging-Ergebnis eines LN ist repräsentativ in Abb.5.3.2-3b dargestellt.

In Tab.5.3.2-2 ist die elektrische Funktionsmessung nach dem FAM-Prozess dargestellt. Hier werden neue Baugruppen "rot" markiert, die keine Empfindlichkeit auf Längenänderungen durch Neigung zeigen. Eine Veränderung des Offset-Wertes zur vorhergehenden Messung wird mit einem "\*" angegeben. Alle auf dem LN 1 auffälligen Bauteile sind in der zweiten Messung ausgefallen. Dieses Messergebnis zeigt, dass der FAM-Prozess bei den meisten Stack-Aufbauten einen Offset verursacht, der in dessen Höhe über alle Inertialsensoren schwankt. Jedoch kann ein Trend beo-

bachtet werden. Die angussfernsten Positionen (1 und 2) zeigen nach dem FAM-Prozess einen höheren Offset als die angussnahen Positionen der Stacks. Dies könnte damit zusammenhängen, dass der Vernetzungsgrad der EMC-Schmelze am Fließwegende höher ist, als am Fließweganfang. Der Druck  $p_c$  bewirkt, dass die stärker vernetzten Anteile des EMC am Fließwegende aufgrund der Anhaftung an dem Inertialsensor einen Spannungseintrag in das Glaslid einbringen, was wiederum die Si-Kammstruktur beeinflusst und sich in einem höheren Offset widerspiegelt. Dieser Mechanismus könnte generell für die Vergrößerung des Offsets bei den Inertialsensoren verantwortlich sein, denn nach dem Aushärten der EMC-Schmelze und Entnahme aus dem Werkzeug kommt es beim Abkühlen auf Raumtemperatur, aufgrund des CTE-Mismatches der beteiligten Materialien, zu einer Verspannung des LN-Package. Diese Verspannung ist nach dem FAM-Prozess als Verzug bereits ohne Hilfsmittel sichtbar. Der Bauteilverzug ist auch ein möglicher Verursacher für den Anstieg der Offsetkapazität.

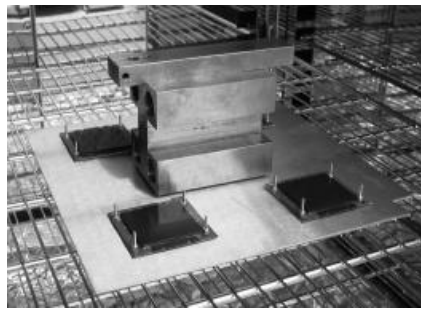


Abb.5.3.2-4: LN im Ofen zum Tempern. LN 5 wird dabei durch Auflage eines 2,25 kg schweren Gewichts belastet.

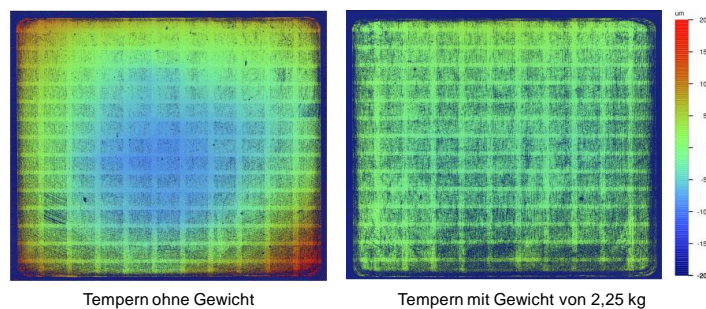


Abb.5.3.2-5: Weißlichtinterferometermessung auf der EMC-Oberfläche der LN nach dem Temperprozess ohne (LN 2 links) und mit Gewicht (LN 5 rechts) [42].

Nach dem FAM-Prozess und dem elektrischen Vermessen der LN werden diese in einem Ofen bei  $180^{\circ}\text{C}$  für  $4\text{ h}$  getempert. Dabei wird versucht, beim LN 5 mittels Beschweren mit  $2,25\text{ kg}$  den Verzug wieder zu verringern (Abb.5.3.2-4). Die Vermutung dabei ist, dass bei der Temperatur im Ofen, die der Verarbeitungstemperatur gleicht, alle LN wieder einen spannungsfreien Zustand erreichen. Neben dem weiteren Aushärten des EMC finden Relaxationsprozesse statt, auch wenn diese Prozesse durch den hohen Vernetzungsgrad gehemmt werden. Nach dem Temperprozess sorgt die Last auf LN 5 dafür, dass ein erneuter Verzug beim Abkühlen gebremst und damit der Spannungseintrag auf das Glaslid verringert wird. Dementsprechend sollte eine

Minimierung des Verzugs eine positive Auswirkung auf das elektrische Funktionsverhalten des Inertialsensors haben.

In einem Weißlichtinterferometer wird diese Vermutung an zwei LN überprüft. Dieses Messverfahren eignet sich dazu, ganze Topographien von diversen Oberflächen zu scannen und so die Oberflächengestalt sichtbar zu machen. Für diese Untersuchung werden die LN 2 und LN 5 vermessen. In Abb.5.3.2-5 ist die Weißlichtinterferometermessung dargestellt. Beim Vergleich der Messung stellt sich heraus, dass der LN 2 einen konkaven Verzug von etwa  $250 \mu\text{m}$  aufweist, wohingegen die Auflage des  $2,25 \text{ kg}$  schweren Gewichts den Bauteilverzug beim LN 5 auf etwa  $40 \mu\text{m}$  reduziert. Damit bestätigt sich die angeführte Vermutung, dass der Verzug mit der Gewichtsbelastung während des Abkühlens verringert wird.

Tab.5.3.2-3: Ergebnis der dritten elektrischen Funktionsmessung nach dem Temperprozess der Stack-Aufbauten. Dabei steht "grün" für ein einwandfreies, "gelb" für ein gering empfindliches, "grau" für kein Messsignal und "rot" für keine Empfindlichkeit des Messsignals. Die Offsets des Messsignals sind als Zahlen hinterlegt und mit "\*" wird eine Veränderung im Vergleich zur vorhergehenden Messung markiert. Dabei werden fettgedruckte Offsetwerte als Signalverbesserung dargestellt.

Kanal	Offset LN 1		Offset LN 2		Offset LN 3		Offset LN 4		Offset LN 5	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-0,8*		-1,0*	-0,1	0,3*	-1,2	0 *	1,4*	0,2*	1,3*
2	-0,8*	1,5	-0,9*	0,3	-1,1*	-1,5*	0,1	0,2*	0,2	0,1*
3	-1,0*	1,5*	0,2	0,1	0,2*	0,1	0,1*	0,1*	0,2*	1,5
4			0,4*	0,2*			-1,5*	0	0,1*	0*
5	0,2*	0	0,1*	0,1*	0,1*	0*			0,1	0,1*

Der konkave Verzug von LN 2 könnte bedeuten, dass in der Mitte eine Druckbelastung auf dem Stack-Aufbau 3 wirkt und an den Ecken des LN eine Zugbelastung. Somit würden die anderen Aufbauten zur LN-Mitte hin mit einer Druck- und zu den LN-Ecken hin mit einer Zugspannung belegt, was sich vermutlich in der Variation des Offsets widerspiegelt.

Die Ergebnisse der elektrischen Funktionsmessung nach dem Temperprozess sind in Tab.5.3.2-3 zu sehen. Es zeigt sich, dass sich ein Bauteil auf LN 1 nach dem Tempern erholt und die x-Kanäle der Position 1 bis 3 ein Messsignal in der Toleranz aufweisen. Des Weiteren kann anhand der Offsets beobachtet werden, dass sich auf dem x-Kanal bei den meisten Inertialsensoren eine Signalverbesserung und auf dem y-Kanal eine Signalverschlechterung einstellt. Daraus kann geschlossen werden, dass es beim Temperprozess der LN richtungsabhängige Auswirkungen auf die mechanische Beanspruchung gibt. Die asymmetrische Aufbauform der einzelnen Stacks kann dieses Verhalten verursachen. Es könnte aber auch sein, dass dieses Verhalten auf einem vollbesetzten LN nicht mehr beobachtet wird, da die Volumenbereiche,

in denen sich nur EMC befindet, mit Stack-Aufbauten verringert werden und dadurch ein anderes Spannungsverhalten zu erwarten wäre.

Die Gewichtsaufgabe bei LN 5 bewirkt eine Signalverbesserung, was am Offset abgelesen werden kann. Der y-Kanal des Inertialsensors auf Position 3 behält seinen großen Offset bei. Vermutlich bleibt dieser durch die Relaxationsprozesse während des Temperns aufgrund des asymmetrischen Aufbaus unbeeinflusst. Es wäre auch denkbar, dass durch die Gewichtsaufgabe beim Temperprozess eine Spannungsverlagerung in die LN-Mitte bewirkt wird. Jedoch müsste dazu der Offset auf beiden Kanälen gleich bleiben oder schlechter werden.

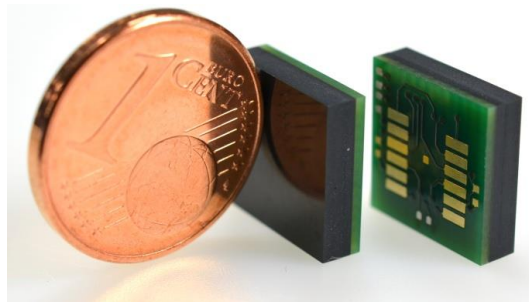


Abb.5.3.2-6: Das vereinzelte Inertialsensor-FlexPac in Relation zu einer Cent-Münze.

Tab.5.3.2-4: Ergebnis der vierten elektrischen Funktionsmessung nach der Vereinzelung der Stack-Aufbauten in diskrete Packages. Dabei steht "grün" für ein einwandfreies, "gelb" für ein gering empfindliches, "grau" für kein Messsignal und "rot" für keine Empfindlichkeit des Messsignals. Die Offsets des Messsignals sind als Zahlen hinterlegt und mit "\*" wird eine Veränderung im Vergleich zur vorhergehenden Messung markiert. Dabei werden fettgedruckte Offsetwerte als Signalverbesserung dargestellt.

	Offset LN 2		Offset LN 5	
Kanal	x	y	x	y
1	-1,3*	0*	0,2	1,5*
2	-1,1*	0,1*	0,2	0,1
3	0,1*	0,1	0,2	1,5
4	0,3*	-0,1*	0*	0
5	0,1	0*	0,1	0,1

Nach diesen Untersuchungen werden die LN mittels einer Wafersäge getrennt. In Abb.5.3.2-6 ist das vereinzelte Inertialsensor-FlexPac zu sehen. Für die elektrische Funktionsmessung werden die getrennten Inertialsensor-FlexPac von den LN 2 und 5 verwendet. Diese Entscheidung gründet darauf, dass diese beiden LN mit durchweg funktionalen Stack-Aufbauten besetzt sind und diese Untersuchung als Kontrolle für die Einwirkung des Trennprozesses dient. Wie in Tab.5.3.2-4 gezeigt wird, bewirkt die Vereinzelung bei LN 2 eine Signalverbesserung auf dem y-Kanal. Die schon bei der vorhergehenden elektrischen Funktionsmessung auffälligen x-Kanäle der Stack-Aufbauten der Positionen 1 und 2 zeigen eine Signalverschlechterung. Dennoch

wirkt sich die Vereinzelung des LN überwiegend positiv auf das Messsignal der einzelnen Inertialsensor-FlexPac aus.

Beim LN 5 ist der y-Kanal des Stack-Aufbaus auf Position 3 ausgefallen. In der vorhergehenden elektrischen Messung zeigte dieser Kanal, dass die Empfindlichkeit des Messsignals auf Längenänderung durch Neigung im Toleranzbereich war. Nach dem Vereinzeln ist keine Empfindlichkeit auf diesem Kanal messbar. Der eine Ausfall kann zum einen durch beim Sägen erzeugte Vibrationen und zum anderen auch durch weitere Spannungs-Entspannungsprozesse nach dem Trennen verursacht sein. Ansonsten gibt es kaum eine Veränderung der Messsignale.

Das Fazit dieser hier geführten Hauptuntersuchung ist, dass MEMS mit Hilfe des FAM-Prozesses verkapselt werden können. Es wurde demonstrativ an einem Inertialsensor gezeigt, wie ein spannungs- und drucksensitiver MEMS-Chip erfolgreich mittels eines EMC gehaust wird und dabei funktional bleibt. Des Weiteren wurde dargestellt, dass der Nachdruck ( $p_c$ ) nicht die maßgebliche Variable des Schädigungsvorgangs ist. Der gesamte Herstellungsprozess eines Inertialsensor-FlexPac führt zu einem Offset, der sich weitgehend im Rahmen der Toleranz befindet. Die Leitlinien zur Herstellung eines MEMS-FlexPac sind in Tab.5.3.2-5 zusammengefasst.

Tab.5.3.2-5: Leitlinien zur Herstellung von MEMS-FlexPac.

Leitlinien	
Prozesseinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>kleinstmöglichen <math>p_c</math> beim Einrichten einstellen, der noch Lufteinschlüsse verhindert</li> </ul>
Tempern	<ul style="list-style-type: none"> <li>mit Hilfe eines Gewichts <math>&gt;2,5 \text{ kg}</math>, um Verzug einzudämmen</li> </ul>

#### 5.4 Vereinzeln der Leiterplattennutzen

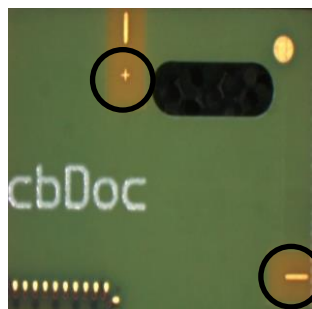


Abb.5.4-1: Sägemarken am Rand des LN durch Kreise hervorgehoben.

Das Trennen eines Package aus dem LN kann mittels einer Wafersäge durchgeführt werden. Dabei wird der LN auf ein Klebetape in einem Sägerahmen fixiert. Zum Vereinzeln der FlexPac kann ein  $300 \mu\text{m}$  dickes Diamantsägeblatt verwendet werden. Zur Einrichtung des Sägeprozesses werden die Sägemarken auf dem LN verwendet (Abb.5.4-1). Nach dem Vereinzeln werden die FlexPac auf der Klebefolie mittels einer Hochdruckreinigung gereinigt und so Schnittreste entfernt. Durch eine optische Inspektion wird der Vereinzelnprozess überprüft. Wie in Abb.5.4-2 gezeigt, sind

dabei gerade und absplitterungsfreie Sägekanten sowie freie Sägegräben das Abnahmekriterium.

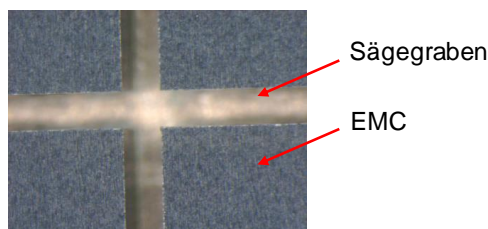


Abb.5.4-2: Aufsicht nach dem Vereinzeln der QFN-FlexPac, um die Schnittqualität sowie den Sägegraben nach dem Entnehmen aus der Säge zu bewerten.

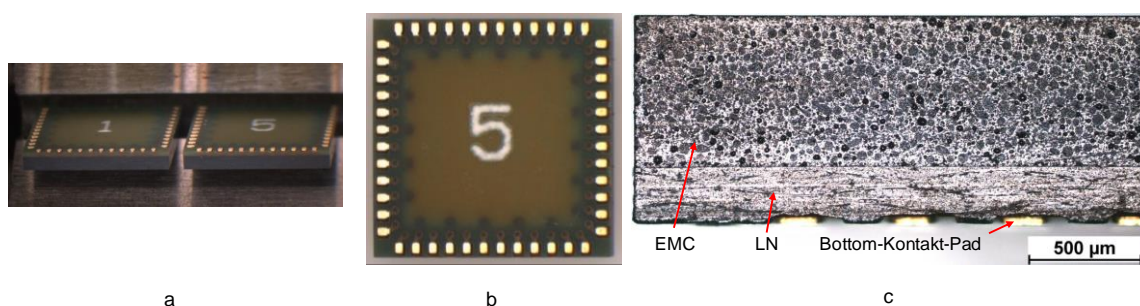


Abb.5.4-3: Beispiel QFN-FlexPac a) Schnittkante Bottom-Seite oben b) Bottom-Ansicht vereinzelter QFN-FlexPac und c) Schnittkante des vereinzelter QFN-FlexPac.

Die Trennqualität ist am Beispiel des QFN-FlexPac in Abb.5.4-3 dargestellt. Weder Risse im ausgehärteten EMC noch Delaminationen an den Grenzflächen zwischen Leiterplatte und EMC sind zu sehen. Die Schnittkanten sind gerade und sauber. Die Löt-Pads (Bottom-Kontakt-Pads) sind freigestellt. Der Verzug des LN nach dem FAM-Prozess und Tempern (Kapitel 6.1.3) zeigt keinen Einfluss auf die Trennqualität. Daher sind alle vereinzelter QFN-FlexPac von sehr guter optischer Qualität.

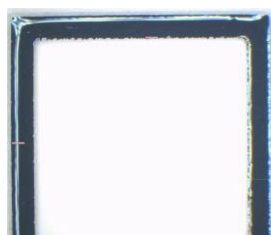


Abb.5.4-4: Glaslid mit Klebstoffraupe.

Der Vereinzlungsprozess der FlexPac mit Medienzugang beinhaltet neben dem Sägen das Aufbringen eines Glaslids zum Schutz der Sensorfläche. Im Fall des Bildsensor-FlexPac ist das ein Glaslid vom Typ KO-LIO 102153. Das Glaslid für das Bildsensor-FlexPac besitzt eine vordispensierte Klebstoffraupe vom Typ NCO-150SB. Die Breite der Klebstoffraupe beträgt  $1300\ \mu\text{m}$  (Abb.5.4-4).

Da der Klebstoff auf dem Glaslid nicht gut auf dem EMC haftet, ist eine Oberflächenbehandlung des Packages notwendig. Vermutlich ist das schlechte Klebeverhalten des Klebstoffes auf dem EMC auf die an der Oberfläche befindliche Entformungshilfe

zurückzuführen. Diese Entformungshilfeschicht wird mit einem Reinigungsvorgang mittels Ozon-Plasma (UVOX-Reinigung) entfernt. Der Reinigungsprozess benötigt *40 min* und entfernt dazu Verschmutzungen auf der Sensoroberfläche, wie es der Vorher-Nachher-Vergleich zeigt (Abb.5.4-5). Nachdem die Oberfläche gereinigt wurde, haftet der Klebstoff auf dem Glaslid fest auf dem EMC.



Abb.5.4-5: Vergleich der EMC- und Sensoroberfläche vor und nach der UVOX-Reinigung bei einem Einrichtbauteil für den FAM-Prozess.

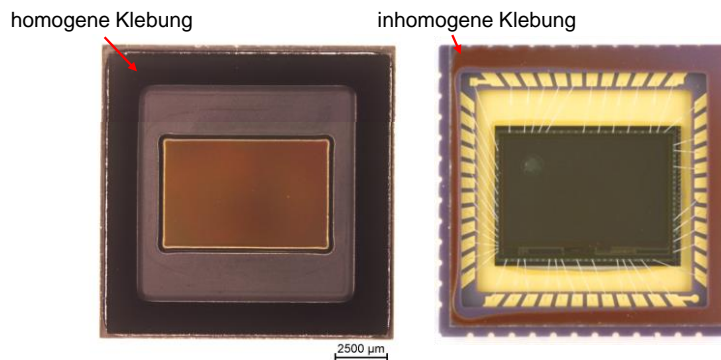


Abb.5.4-6: Gegenüberstellung der Klebung des Glaslids beim bestückten Bildsensor-FlexPac homogen (links) und beim HDRC®-G2 Bildsensor in LCC48-Gehäuse (Kyocera PB-CB0239) inhomogen (rechts).

Des Weiteren trägt die UVOX-Reinigung dazu bei, dass der Klebstoff das EMC gut benetzt, sodass die Klebstoffverteilung auf der EMC-Oberfläche homogen aussieht (Abb.5.4-6). Zudem ist der Vorteil des Bildsensor-FlexPac gegenüber des Referenzbauteils in Abb.5.4-6 zu sehen. Nur das Pixelfeld wird freigestellt, sodass darauf kein Streulicht von reflektierenden Oberflächen einfallen und damit Störsignale verursachen kann.

Die Leitlinien zur Vereinzelung der FlexPac sind in Tab.5.4-1 zusammengefasst.

Tab.5.4-1: Leitlinien zur Vereinzelung der FlexPac.

Leitlinien	
Sägeblatt	<ul style="list-style-type: none"> <li>diamantbesetzt</li> <li>300 µm dick</li> </ul>
Abnahmekriterium	<ul style="list-style-type: none"> <li>gerade, ungesplittete, glatte Schnittkanten</li> </ul>
Montage eins Glaslids	<ul style="list-style-type: none"> <li>zuvor Oberfläche mittels Plasmabehandlung reinigen</li> </ul>



## 6 Charakterisierung und Zuverlässigkeit der FlexPac

Dieses Kapitel soll zeigen, dass die in Kapitel 4 und 5 diskutierten FlexPac über eine gute Zuverlässigkeit verfügen und damit ihren Referenzbauteilen in nichts nachstehen. Um die leiterplattenbasierten Packages für die Serienfertigung als tauglich einzustufen, müssen sie bezüglich Funktionsweise und Gestaltung gut charakterisiert sein und über eine zu den Referenzpackages gleichwertige oder bessere Zuverlässigkeit verfügen. Hierfür werden das QFN- und Bildsensor-FlexPac zunächst optisch sowie elektrisch charakterisiert. Beim QFN-FlexPac wird auch der Einfluss des Verzugs auf das Packagingergebnis betrachtet. Danach widmet sich dieses Kapitel dem Thema Umwelttests an den FlexPac, um deren Zuverlässigkeit während der Alterung zu überprüfen und herauszustellen, wie gut sich diese in Bezug auf die Referenzbauteile behaupten.

### 6.1 Charakterisierung der QFN- und Bildsensor-FlexPac

#### 6.1.1 Optische Charakterisierung QFN-FlexPac

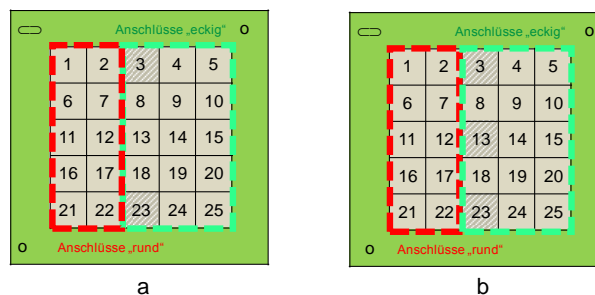


Abb.6.1.1-1: QFN-FlexPac-LN mit den durchnummerierten Positionen von a) der ersten LN-Generation A und b) der zweiten LN-Generation F. Die schraffierten Flächen stellen die Positionen mit durchgebohrten und die nicht schraffierten Flächen die in den Zwischenlagen umverdrahteten Vias dar. Grün gestrichelt umrahmt sind die Positionen mit eckigen und rot gestrichelt umrahmt die Positionen mit runden Kontaktpads.



Abb.6.1.1-2: Verzogener Leiterplattennutzen der ersten Generation Typ A.

Zur Nachverfolgung werden die LN aus dem gleichen Los und mit demselben  $T_g$  mit einem Großbuchstaben und einer laufenden Nummer bezeichnet (Abb.6.1.1-1). Bei den QFN-FlexPac werden die einzelnen FlexPac von 1 bis 25 durchnummeriert. Die Charakterisierung der QFN-FlexPac wird mittels zwei LN-Generationen diskutiert. Die erste LN-Generation, mit einem A gekennzeichnet und durch einen  $T_g$  von  $150^\circ\text{C}$  charakterisiert, besitzt zwei Montageflächen, bei denen die umliegenden Vias durchgebohrt sind, und 23 Montageflächen, bei denen diese in den Metalllagen umverdrahtet sind. Des Weiteren sind um zehn Montageflächen runde und um die 15 ande-

ren eckige Löt-Pads platziert (Abb.6.1.1-1a). Die zweite LN-Generation, mit einem F gekennzeichnet und durch einen  $T_g$  von  $170^\circ\text{C}$  charakterisiert, stellt ein Redesign der ersten Generation dar (Abb.6.1.1-1b). Die Kontaktpads sind um  $50\ \mu\text{m}$  in Richtung der Schnittkante verlängert und um  $25\ \mu\text{m}$  breiter als im Vorgängerdesign, damit beim elektrischen Funktionstest die Testkontakte des Testers keine Kontaktierungsfehler wie bei der ersten LN-Generation aufweisen. Es wurde eine weitere Montagefläche mit umgebenden durchgebohrten Vias integriert und zur Verzugsverbeugung des LN befindet sich in der Bottom-Lage der gleiche Metallanteil wie auf der Top-Lage.

Mittels Röntgendurchstrahlanalyse kann das Package durchstrahlt und so der Zustand der einzelnen Au-Draht-Bond-Verbindungen überprüft werden. Im unvereinigten QFN-FlexPac-LN befinden sich 25 Bauteile und diese werden für die Untersuchung vor dem FAM-Prozess fotografiert. In der ersten LN-Generation werden die 15 Bauteile, die mit eckigen Kontaktpads umrahmt sind, mit 55 Au-Draht-Bonds elektrisch mit dem LN kontaktiert. Auf den anderen Montageflächen werden aufgrund der thermischen Stabilität Dummies aufgebaut. Der Grund für dieses Vorgehen ist zum einen der LN-Verzug (Abb.6.1.1-2), der den AVT-Prozess erschwert und zum anderen zeigt sich in einer Voruntersuchung, dass die runden Kontaktpads im Testsockel für die elektrischen Funktionstests nicht kontaktiert werden können. Deren Flächengröße ist möglicherweise durch die Rundung zu gering. In der zweiten LN-Generation werden die 25 Bauteile mit 55 Au-Draht-Bonds ebenfalls elektrisch mit dem LN kontaktiert.

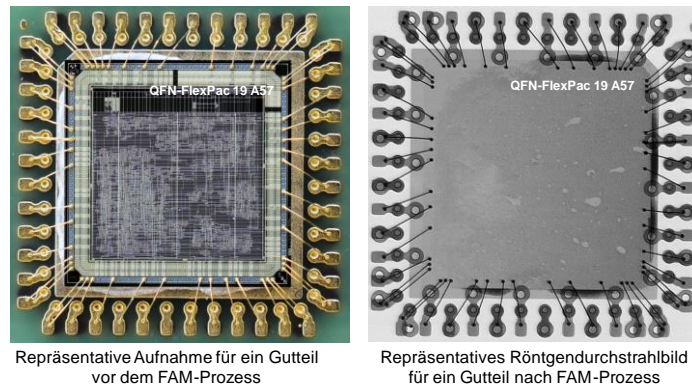


Abb.6.1.1-3: Repräsentative Darstellung der Auswertung des Zustands der Au-Draht-Bonds vor dem FAM-Prozess mittels Fotografie und danach mittels Röntgendurchstrahlaufnahme

Nach dem FAM-Prozess werden vom QFN-FlexPac-LN mittels einer Röntgenanlage (HMXST 160) Durchstrahlungen gemacht. Mit diesem Vergleich (Abb.6.1.1-3) kann der Effekt der fließenden EMC-Schmelze auf die einzelnen Au-Draht-Bonds bewertet werden. So können Verwehungen sowie Abrisse der Draht-Bonds detektiert werden, die die Funktionsweise stören können. Der Vergleich zeigt zudem, was eine durch die Strömung verursachte Verwehung und was eine durch den Draht-Bonding-Prozess verursachte Verkrümmung des Au-Draht-Bonds ist (Abb.6.1.1-4). Als ver-

weht bezeichnet man die Draht-Bonds, welche durch die EMC-Schmelze mechanisch verformt, aber nicht abgerissen wurden. Dies kann durch unterschiedliche Faktoren verursacht werden. Zum einen können nicht-sphärische Füllpartikel, die im Schmelzfluss an den Draht-Bonds hängenbleiben, durch nachkommende EMC-Schmelze in Fließrichtung gegen diesen gedrückt werden. Zum anderen kann eine noch zu viskose Schmelzfront auftreten, die aus noch ungeschmolzenen und nur aufgeweichten EMC-Anteilen besteht. Des Weiteren kann ein Freistrahle der EMC-Schmelze der Verursacher sein oder ein hoher Transferdruck, der die EMC-Schmelze in die Kavität verdrängt.

Es zeigt sich, dass der Draht-Bonding-Prozess nicht immer gleiche Bonding-Ergebnisse liefert. Solche Abweichungen der Au-Draht-Bond-Geometrie können dadurch zustande kommen, dass der LN während des Prozesses nachgibt oder sich bewegt, wenn die Halterung, auf der er fixiert ist, Schwachstellen besitzt. Daher ist eine optische Überprüfung des Draht-Bonding-Prozesses stichprobenartig notwendig. Zudem kann anhand der Röntgendurchstrahlungsaufnahme des LN-Packages die unveränderte Au-Draht-Bond-Geometrie erkannt werden (Abb.6.1.1-4a).

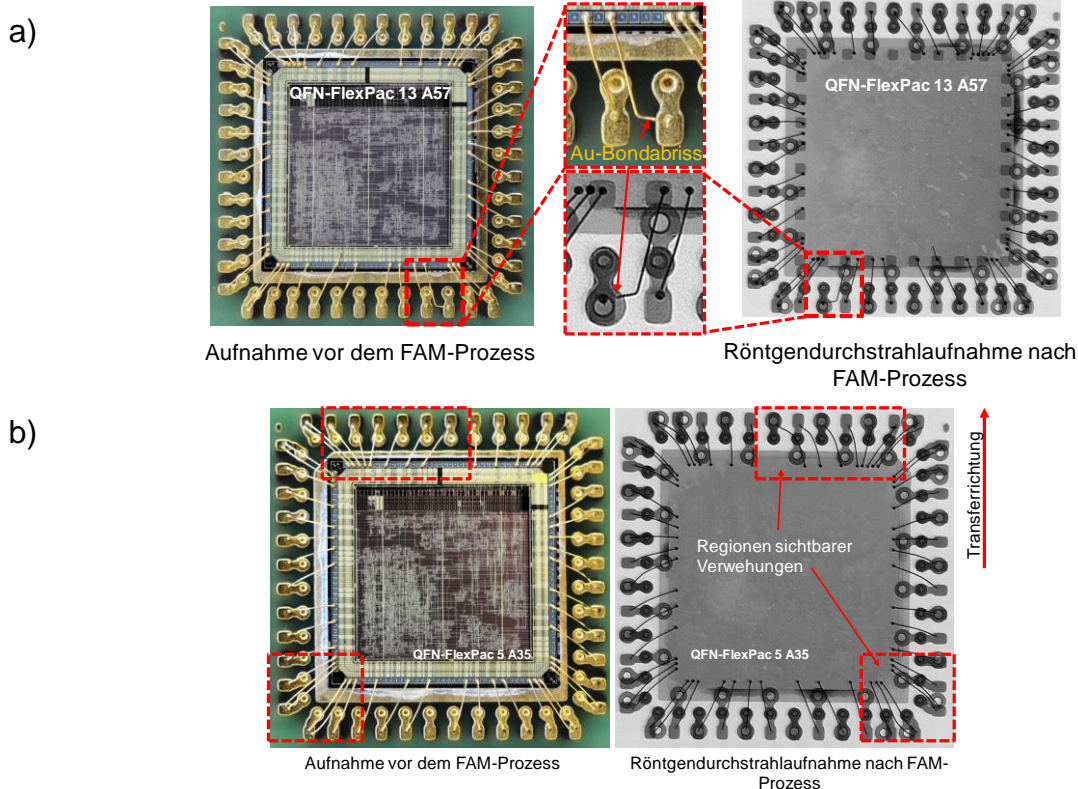


Abb.6.1.1-4: Vergleich der Bonddrähte vor und nach dem FAM-Prozess. a) Zeigt dabei den detektierten Au-Draht-Bondabriss vor und b) zeigt die detektierten Verwehungen der Au-Draht-Bonds nach dem FAM-Prozess.

Wenn beim FAM-Prozess Draht-Bond-Verwehungen beobachtet werden (Abb.6.1.1-4b), dann befinden sie sich hauptsächlich bei den Bauteilen, die nahe an der Kavitätswand angeordnet sind. Möglicherweise werden diese durch die Wirbelströmungen verursacht, die durch die Scherung der EMC-Schmelze an den Kavitätswänden

und der Leiterplattenoberfläche entstehen oder durch Anlegen des Aushärte druck  $p_c$ , wobei höherviskose Schmelze am Fließwegende bewegt wird und die Draht-Bonds deformiert.

In Tab.6.1.1-1 ist die Auswertung zu allen aufgebauten und verkapselten LN Typ A für die QFN-FlexPac aufgelistet. "Grün" markierte Positionen definieren Bauteile, bei denen keine Auffälligkeiten detektiert werden konnten. "Grau"-Markierung repräsentiert Bauteile, die Draht-Bond-Abrisse bei der fotografischen Aufnahme vor dem FAM zeigen, und "Rot"-Markierung zeigen diejenigen Bauteile, die erst in der Röntgen-durchstrahlungsanalyse mindestens einen Draht-Bond-Abriss aufwiesen. Durch die überwiegend grünen Felder zeigt sich, dass der FAM-Prozess zur Herstellung von FlexPac geeignet ist.

Des Weiteren werden in Tab.6.1.1-1 durch den fett-schwarz gezogenen Rahmen (A52 bis A57) die LN markiert, welche nach einem dreistündigen Trocknungsprozess ohne eine Niederdruckplasmabehandlung in Sauerstoffatmosphäre ( $O_2$ -Plasma) den AVT- und FAM-Prozess durchlaufen. Die LN A34 bis A38 erhalten vor dem AVT-Prozess eine  $O_2$ -Plasmavorbehandlung. Der LN A58 wird vor dem FAM-Prozess mittels  $O_2$ -Plasma behandelt. Zum einen soll die Auswirkung des  $O_2$ -Plasmas auf den AVT-Prozess bestimmt werden und zum anderen soll überprüft werden, ob das  $O_2$ -Plasma auf dem ASIC zu Funktionsstörungen führt. Die Wirkungsweise des Niederdruckplasmas wird in Kapitel 7.3 erläutert.

Tab.6.1.1-1: Zusammenstellung der Auswertungsergebnisse aus der Analyse der vor und nach dem FAM-Prozess erstellten Aufnahmen. "Grün" bedeutet "keine Auffälligkeiten"; "grau" bedeutet "schon vor dem FAM-Prozess geschädigt" und "rot" bedeutet "erst nach dem FAM-Prozess ist mindestens ein Bondabriss detektiert worden".

LN	A52	A53	A54	A55	A56	A57	A34	A35	A38	A58
FlexPac	3	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	4	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Grün
	5	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	8	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Grün	Grün
	9	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	10	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	13	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	14	Grün	Grau	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	15	Grün	Grün	Grau	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	18	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	19	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
	20	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Grün	Grün	Grau
	23	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Rot	Grün	Grün	Grün
	24	Grün	Grün	Grün	Grün	Grau	Grün	Grün	Grün	Grün
	25	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün

Die  $O_2$ -Plasmavorbehandlung vor dem AVT-Prozess hat zur Folge, dass kein optimaler Parametersatz während des Draht-Bond-Prozesses gefunden werden kann. Da die Oberflächenbehandlung mittels eines  $O_2$ -Plasma einen temporären Effekt auf die

Oberflächeneigenschaft der prozessierten Oberfläche besitzt, kann es sein, dass sich die Oberflächenqualität mit der Zeit verändert, sodass die Prozesseinrichtung durch die temporär variierenden Oberflächeneigenschaften erschwert wird. Das heißt, ein fähiger Parametersatz gilt nur für wenige Stunden und muss danach erneut bestimmt werden. Dieser Effekt basiert vermutlich darauf, dass die Sauerstoffionen im  $O_2$ -Plasma mit den oberflächennahen Goldatomen eine lichtempfindliche und thermisch instabile Au(III)Oxidschicht bilden und die ursprünglichen Oberflächeneigenschaften verändern [43]. Diese Oxidschicht zerfällt mit der Zeit aufgrund der Lichteinstrahlung oder durch Temperatureinwirkung während des AVT-Prozesses und aufgrund dieses Zerfalls verändern sich die Oberflächeneigenschaften zeitlich. Zudem können Oxidschichten die Haftung des Au-Draht-Bond beim Draht-Bonding verhindern. Jedoch zeigt das Ergebnis des optischen Vergleichs vor und nach dem FAM-Prozess keine Auffälligkeit für die LN 34, 35 und 38. Die Bonddrahtverbindungen sehen überwiegend unauffällig aus und haben damit den FAM-Prozessschritt erfolgreich durchlaufen.

Die vier rot markierten Bauteile in Tab.6.1.1-1 können als Ausreißer betrachtet werden, da es sich hierbei jeweils um einen einzigen Draht-Bond-Abriss handelt und es aufgrund der elf "grau" markierten Positionen sein kann, dass diese durch den Draht-Bond-Prozess vorgeschädigt wurden.

Im Folgenden werden die geometrischen Vermessungs- und Mikroskopieuntersuchungen der QFN-FlexPac an anderen LN des Typ A diskutiert. Nach dem FAM-Prozess wird die Packagedicke direkt auf dem LN mit Hilfe einer Bügelmessschraube an fünf Stellen des LN gemessen (Abb.6.1.1-5). Dabei ergibt sich eine Dicke von etwa  $928 \mu\text{m}$ . Die Soll-Dicke beträgt  $900 \mu\text{m}$ , also ist das QFN-FlexPac etwa  $30 \mu\text{m}$  dicker als erwartet.

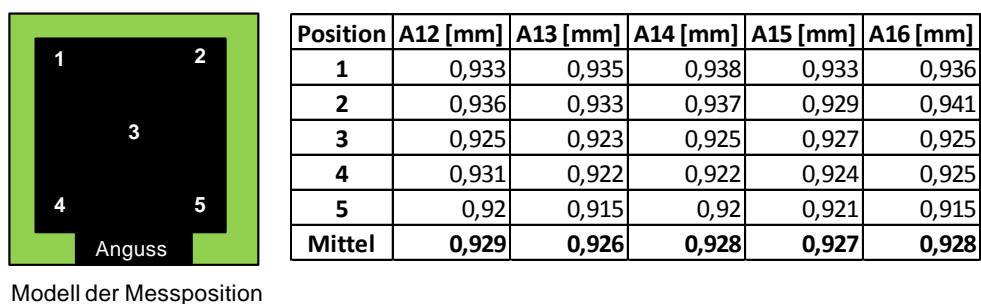


Abb.6.1.1-5: Messung der Bauteildicke am LN nach dem FAM-Prozess mittels einer Bügelmessschraube.

Nach der Vereinzelung werden die Schnittkanten mittels Lichtmikroskopie bewertet (Abb.6.1.1-6a). Hierbei werden die vereinzelt QFN-FlexPac hochkant unter das 5x Objektiv gestellt und eine Messserie zur Bauteildicke, bestehend aus 73 Einzelmessungen, durchgeführt. Die daraus gemittelte QFN-FlexPac-Bauteildicke beträgt  $921 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m}$ . Alle Schnittkanten zeigen keine Auffälligkeiten und bestätigen damit,

dass das Vereinzeln mittels Wafersäge mit einem  $300\ \mu\text{m}$  starken Diamant-Sägeblatt eine geeignete Methode für leiterplattenbasiertes Packaging ist.

In Abb.6.1.1-6b ist eine weitere Messung gezeigt. Hier werden die Schnittkanten auf der Bottom-Lage des QFN-FlexPac mit dem 20x Objektiv inspiziert und der Abstand vom Kontaktpad zur Schnittkante in einer Messserie von 52 Einzelmessungen optisch ausgemessen und gemittelt. Das Layout-Design gibt einen minimalen Pad-Abstand von  $100\ \mu\text{m}$  zur Schnittkante vor. Der Sägegraben ist mit  $320\ \mu\text{m}$  konzipiert. So sollte im Idealfall ein Kontaktpad-Abstand zur Schnittkante von  $110\ \mu\text{m}$  verbleiben, da das Sägeblatt  $300\ \mu\text{m}$  dick ist. Gemessen wurde ein Kontaktpad-Abstand von  $123\ \mu\text{m} \pm 10\ \mu\text{m}$  zur Schnittkante. Dieses Messergebnis zeigt, dass die geforderten  $100\ \mu\text{m}$  eingehalten werden.

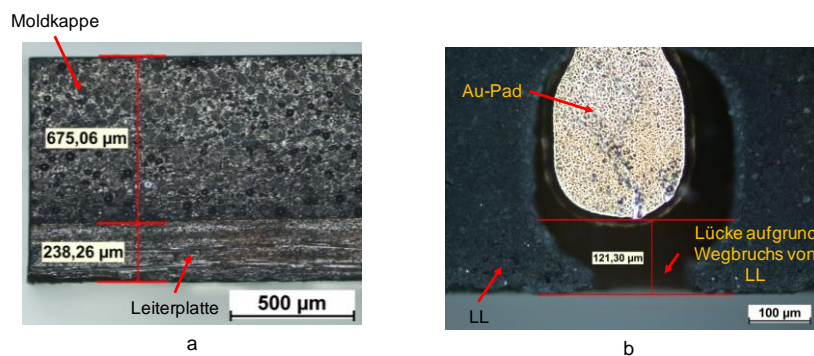


Abb.6.1.1-6: a) Messung der Bauteildicke am vereinzelt Bauteil und b) Messung der Entfernung Kontaktpad zur Sägekante mittels Lichtmikroskopie.

Der Ausbruch von Lötstopplack (LL) an der Schnittkante kann in Abb.6.1.1-6b bei einem Großteil der untersuchten Schnittkanten beobachtet werden. Aus diesem Grund wird für die zweite LN-Generation an diesen Stellen kein LL vorgesehen. Dies ist nur eine ästhetische Veränderung, die die Funktion des QFN-FlexPac nicht beeinflusst.

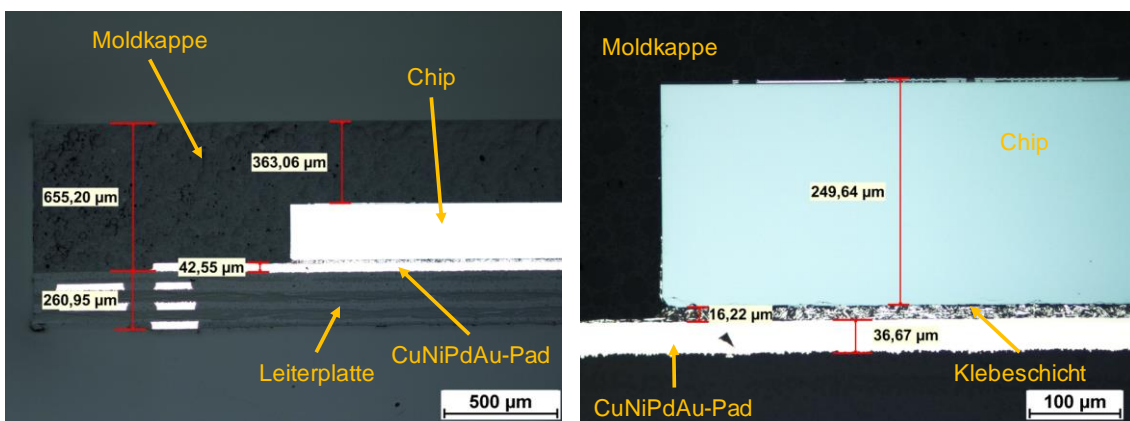


Abb.6.1.1-7: Analyse der Dickenverhältnisse im QFN-FlexPac anhand von Schliffen.

Anhand von Querschliffen der QFN-FlexPac kann deren Innenleben untersucht werden. Dabei werden einzelne FlexPac in ein Harz eingebettet und anschließend wird mittels einer Schleif- und Poliermaschine Material abgetragen, bis der verpackte

ASIC zu sehen ist. Mittels Lichtmikroskopie werden die Package-, ASIC-, Metall-, Klebespalt-, Leiterplatten- und EMC-Dicke ausgemessen (Abb.6.1.1-7). Daran anschließend wird eine Tendenzmessung durchgeführt. Der Teil des LN, auf dem das Werkzeug abdichtet, ist etwa  $40\ \mu\text{m}$  dünner als die Soll-LN-Dicke von  $300\ \mu\text{m}$ . Aus diesem Grund ist das ausgehärtete EMC an dieser Stelle dicker als  $600\ \mu\text{m}$ . Der EMC-Anteil oberhalb des ASIC muss größer als  $300\ \mu\text{m}$  sein, damit die Au-Draht-Bonds mit deren Loop einen Abstand von größer  $100\ \mu\text{m}$  zur Packageoberfläche haben und damit nicht nach dem FAM-Prozess aus dem Package herausragen können. Des Weiteren könnte es zu Zuverlässigkeitsproblemen der Draht-Bonds kommen, wenn diese näher als  $100\ \mu\text{m}$  zur Oberfläche liegen, da die Feuchte bis zu  $50\ \mu\text{m}$  in das EMC eindringen kann [44]. Die Abstandsmessungen in den Mikroskopiebildern der Querschliffe zeigen, dass diese Forderung eingehalten wird. Der Klebespalt ist mit einer Schichtdicke von etwa  $20\ \mu\text{m}$  konzipiert und liegt tendenziell in diesem Bereich. Der ASIC besitzt eine Solldicke von  $250\ \mu\text{m}$  durch einen Rückdünnungsprozess mittels Schleifen des Wafers. Die Messung im Querschliff bestätigt dies. Die Dicke der Metallschichten beträgt  $40\ \mu\text{m}$ , sodass die resultierende LN-Dicke von LL auf der Bottom-Lage zu Montagepad auf der Top-Lage  $300\ \mu\text{m}$  erreicht (Abb.6.1.1-8).

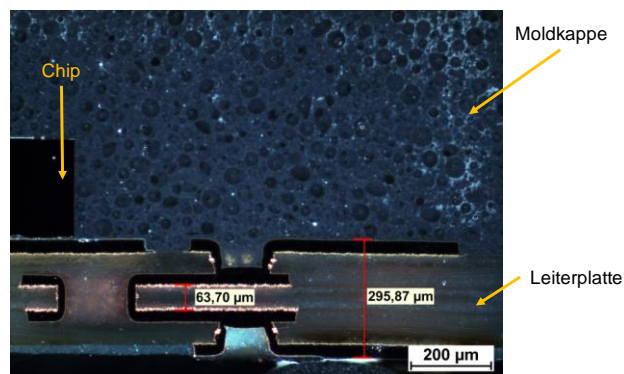


Abb.6.1.1-8: Realisierung der 4-Lagen-Kontaktierung im LN.

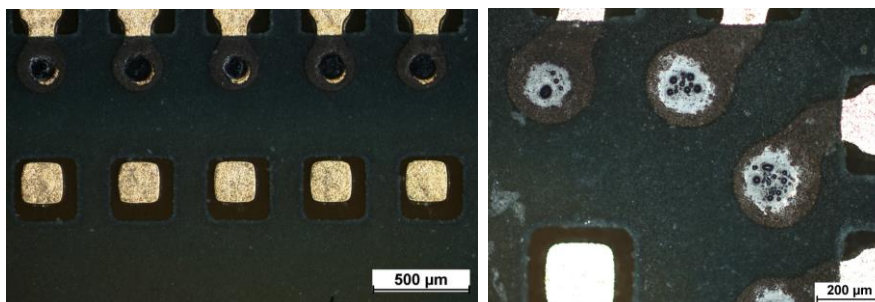


Abb.6.1.1-9: Mit EMC gefüllte Vias im LN. Diese sind meist gut ausgefüllt.

In Abb.6.1.1-8 ist die Umverdrahtung der Vias in den Zwischenlagen des LN im Querschliff gezeigt. Es ist kein Lufteinschluss in der Via-Senkung sondern eine gute Ausfüllung mit EMC zu erkennen. Damit ist an dieser Stelle keine Schwachstelle im Packaging vorhanden, denn die EMC-Schmelze füllt diese im FAM-Prozess aus.

Abb.6.1.1-9 zeigt im Vergleich dazu die Füllung der durchgebohrten Vias. Diese sind teilweise vollständig, aber überwiegend bis zur Via-Metallisierung auf der Bottom-Seite des LN gefüllt. Es zeigt sich kein Überlaufen oder Hinterspritzen dieser Seite des LN aufgrund der Vias. In Bezug auf diese Beobachtung folgt, dass die Umverdrahtung der Vias für diese Anwendung nicht notwendig ist. In Kapitel 6.2 wird die Zuverlässigkeit beider Via-Varianten diskutiert.

### 6.1.2 Elektrische Charakterisierung der QFN-FlexPac

Für die elektrischen Funktionstests werden die QFN-FlexPac in einen Testsockel integriert und mittels des Testsystems Advantest 93000 Mixed Signal SOC (System On Chip) vermessen. Die elektrischen Eigenschaften der ASIC sind bekannt, da der gleiche ASIC wie im leadframebasierten Referenzpackage verwendet wurde. Auf das dafür qualifizierte Testprogramm kann zurückgegriffen werden. Die elektrischen Tests beinhalteten die Messung sowohl analoger als auch digitaler Funktionalität.

Tab.6.1.2-1: Ergebnisse des elektrischen Funktionstests der QFN-FlexPac-LN Typ A. (Legende: Grün - bestanden; rot - nicht bestanden, orange - Analogfehler und x = auffällig schon bei der Röntgendurchstrahlanalyse)

LN	A52	A53	A54	A55	A56	A57	A34	A35	A38	A58
FlexPac	3					C x	C	C		
	4							C	x	
	5					C x	C	I		
	8					C x		C x		
	9									
	10							F		
	13						F x			
	14		x						C	
	15	F		C x				F		
	18									
	19							F		F
	20							C		C x
	23						x	I		C x
	24					x	x			
	25								F	

Die Ergebnisse des elektrischen Funktionstests für den LN Typ A sind in Tab.6.1.2-1 zusammengefasst. Die mit einem x versehenen Felder markieren die in der Röntgendurchstrahlanalyse auffälligen QFN-FlexPac (Tab.6.1.2-1). Grün markierte QFN-FlexPac bestehen den Mixed-Signal-Test und rot markierte Bauteile sind defekt. Bei den Defekten wird zwischen Kontaktfehler im Testsockel (C), Stromfehler (I) und Funktionalfehler (F) der montierten Schaltung differenziert. Orange markierte QFN-FlexPac fallen durch einen Analogfehler aus, welcher nicht im Zusammenhang mit dem FAM-Prozess betrachtet wird, da der Analogtest beim Funktionstest der ASIC auf Waferlevel nicht durchgeführt und schon bei der Chipherstellung vorhanden sein



kann. Die defekten QFN-FlexPac zeigen häufig einen Kontaktfehler mit dem Testsockel, weshalb ein Redesign durchgeführt wird, um die Kontaktpads zu vergrößern.

Es zeigt sich, dass einige von den x-markierten den elektrischen Funktionstest bestehen. Der Grund dafür ist, dass es sich bei den detektierten Draht-Bond-Abrissen um Draht-Bonds handelt, die mit einem weiteren Draht-Bond auf demselben Kontaktpad aufgebracht werden und dieser nach dem FAM-Prozess unversehrt ist. Die Funktions- und Stromfehler müssen nicht mit dem FAM-Prozess zusammenhängen, da evtl. im Testsockel einzelne Messspitzen keinen optimalen Kontakt zum Kontaktpad haben oder der ASIC selbst durch den AVT-Prozess oder Herstellungsprozess in seiner Funktionalität gestört ist. Dies kann an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden. Auffällig ist, dass die meisten Ausfälle bei den QFN-FlexPac zu sehen sind, die vor dem AVT-Prozess mit O<sub>2</sub>-Plasma behandelt wurden. Daraus folgt, dass ein solcher Prozessschritt nicht für die Serienfertigung zu empfehlen ist. Eine O<sub>2</sub>-Plasmavorbereitung direkt vor dem FAM-Prozess zeigt keinen nennenswerten Effekt.

Tab.6.1.2-2: Ergebnisse des elektrischen Funktionstests der QFN-FlexPac-LN Typ F. (Legende: Grün - bestanden; rot - nicht bestanden, orange - Analogfehler und x = auffällig schon bei der Röntgendurchstrahlungsanalyse)

FlexPac	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
LN	F4	x	x																						
	F6							F																	

In Tab.6.1.2-2 sind die elektrischen Funktionstestergebnisse der QFN-FlexPac mit LN Typ F nach dem Redesign gezeigt. Es ist zu sehen, dass der Test von allen Bauteilen bis auf eine Ausnahme bestanden wird. Die Vergrößerung der Kontaktpads macht auch das Kontaktieren runder Kontaktpads möglich, sodass der gesamte LN verwendet werden kann. Auch hier wurden QFN-FlexPac, die in der optischen Charakterisierung auffällig waren, getestet. Dieses Ergebnis bestätigt, dass durch leiterplattenbasiertes FAM erfolgreich funktionale FlexPac hergestellt werden können.

### 6.1.3 Verzugscharakterisierung des QFN-FlexPac

Für die Lötbarkeit des QFN-FlexPac wird nach dem Vereinzeln der LN eine Tastschnittmessung durchgeführt, um den diagonalen Verzug zu bestimmen. Dabei wird eine Messnadel mit einer 2 µm Spitze über die FlexPac-Oberfläche geführt und dabei die Topographie der Oberfläche aufgenommen. In Abb.6.1.3-1 ist eine qualitative Messkurve zu sehen. Die Bauteile sind nahezu plan, was für den Lötprozess oder den elektrischen Funktionstest optimal ist. Der aus zehn Tastschnittmessungen gemittelte Verzug beträgt  $6,3 \mu\text{m} \pm 0,9 \mu\text{m}$ . Beim Betrachten des Messkurvenverlaufs können zwei Maxima und ein Minimum beobachtet werden. Da die Maxima etwa 7 mm auseinander liegen, handelt es sich dabei wahrscheinlich um die Abformung

des ASIC. Ist dies der Fall, so ist der sich ergebende Verzug durch die Abformung des ASIC verfälscht. Aus diesem Grund wird eine konfokale Oberflächenmessung mittels eines FRT-Messgerät (FRT) durchgeführt. Hierbei werden alle 25 vereinzelt QFN-FlexPac in einem Rastermuster, ähnlich dem des LN, angeordnet und optisch vermessen. Der Vorteil an der FRT-Messung ist, dass die gesamte Oberfläche des vereinzelt QFN-FlexPac betrachtet und somit im Gegensatz zur Tastschnittmessung die Verzugsorientierung sowie deren Auswirkung auf die Lage auf dem Nutzen analysiert werden kann.

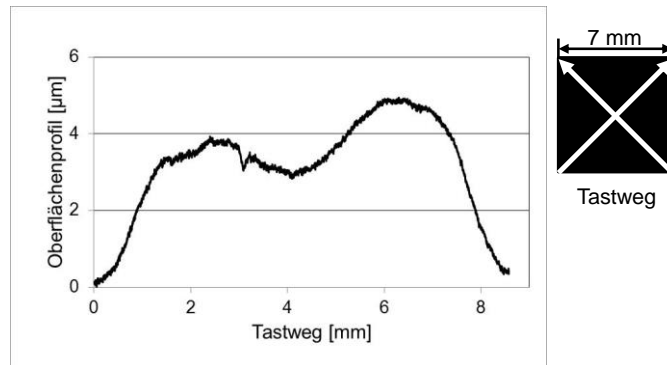


Abb.6.1.3-1: Qualitative Tastschnittmessung über die QFN-FlexPac-Diagonale.

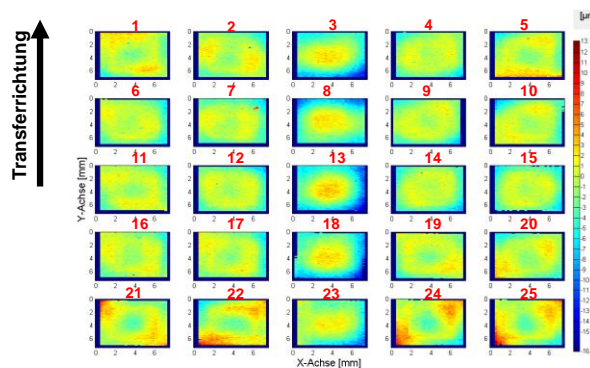


Abb.6.1.3-2: FRT-Messung des QFN-FlexPac-Bauteilverzugs im LN-Raster dargestellt. Dunkelblauer Rahmen um die Einzelmessung definiert den Bereich außerhalb des Package.

In Abb.6.1.3-2 ist die FRT-Messung gezeigt. Es werden pro Bauteil 1960 Messpunkte aufgenommen. In x-Richtung wird alle  $100 \mu\text{m}$  und in y-Richtung alle  $250 \mu\text{m}$  ein Messpixel gemessen. Aufgrund dieses Verhältnisses zeigen die Messergebnisse keine Würfel Flächen. Der Ebenen-Fit wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Damit erhalten die Messwerte eine Bezugsebene, welche die Nullebene darstellt. Mit Hilfe einer Falschfarbendarstellung wird der Abstand jedes einzelnen Messwertes zur Nullebene abgebildet. Alle gemessenen Oberflächen weisen ein ähnliches Farbmuster auf, einen gelben, annähernd quadratischen Rahmen, der in seiner Mitte meist eine andere Farbe trägt. Dies bestätigt die Vermutung aus der Tastschnittmessung, dass sich die Konturen der ASIC-Oberfläche an der QFN-FlexPac-Oberfläche abzeichnen. Vermutlich ist dies auf die unterschiedlichen Wär-

meausdehnungskoeffizienten (CTE) der Materialpaarungen zurückzuführen. In den Regionen des QFN-FlexPac, in denen die Materialpaarung LN, ICA, ASIC und EMC das CTE-Verhalten beeinflusst, kann das Bauteil nicht so stark schrumpfen wie in den Regionen, in denen die Materialpaarung LN / EMC vorherrscht. So ergeben sich Randbereiche, die etwa  $3 \mu\text{m}$  unterhalb der Messebene ( $0 \mu\text{m}$ ), und Innenbereiche, die oberhalb von  $3 \mu\text{m}$  zur Messebene liegen. Eine konvexe Oberflächenausformung des EMC nach dem FAM bildet sich beim Einzel-QFN-FlexPac ab, was die Tastschnittmessung in der Größenordnung von  $6 \mu\text{m}$  bestätigt. Das QFN-FlexPac 13, welches in der Mitte des LN liegt, weist ein homogenes Verzugsverhalten auf. Die in Transferrichtung gleich positionierten QFN-FlexPac (23; 18; 8; 3) folgen diesem Beispiel, wobei das QFN-FlexPac 23, das das angussnächste Bauteil ist, ein inhomogeneres Verzugsverhalten zeigt. Die angussnahen QFN-FlexPac 21, 22, 24 wie 25 zeigen ein inhomogenes sowie unsymmetrisches Verzugsverhalten. Dies könnte mit der Einwirkung des Aushärtedrucks  $p_c$  zusammenhängen. Die EMC-Schmelze am Anguss ist die zeitlich jüngste und damit niederviskoser als die am Fließwegende. Mit Aufbringen des Drucks  $p_c$  wird weitere EMC-Schmelze in die Kavität gepresst. Diese könnte sich durch den Viskositätsgradienten in der schon vorhandenen EMC-Schmelze nur noch in angussnahe Bereiche verdrängen lassen. Dadurch würde sich ein minimaler, jedoch ausschlaggebender Dichteunterschied im EMC zu den angussentfernteren Regionen im Bauteil ergeben oder es würden dadurch bereits ausgehärtete Bereiche des EMC zusätzlich mechanisch verspannt. Diese Möglichkeiten könnten einen inhomogenen wie asymmetrischen Bauteilverzug verursachen. Da der Verzug eines Bauteils potentielle Regionen einer Verspannung des Bauteils zeigt, kann geschlussfolgert werden, dass sich diese in den angussnahen Bereichen asymmetrisch und stärker auswirkt als in den angussfernen Bereichen.

#### 6.1.4 Optische Charakterisierung Bildsensor-FlexPac

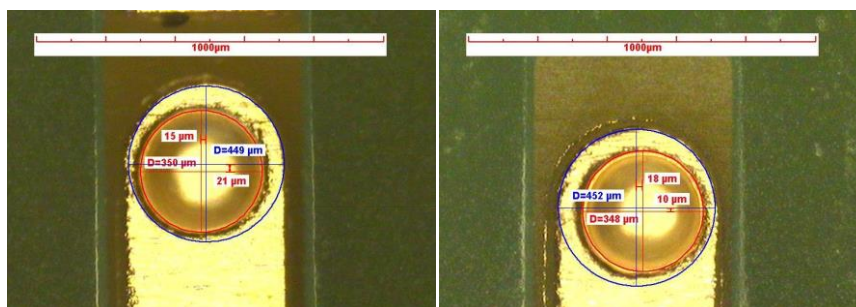


Abb.6.1.4-1: Unscharfe Platzierung der Sacklochbohrungen für die Castellations.

Nachfolgend wird die Charakterisierung der Bildsensor-FlexPac diskutiert. Die optische Durchsicht der LN ergibt eine ungenaue Platzierung der Sacklochbohrungen, die als Castellations verwendet werden sollen (Abb.6.1.4-1). Die Versetzung ist jedoch innerhalb der Toleranz "Bohrung zu Leiterbild". Nach dem Sägen wären die Castellations verschieden in deren Flächenanteil und damit wäre die Vergleichbarkeit

der Ergebnisse gefährdet. Aus diesem Grund werden alle Charakterisierungsschritte an den Bildsensor-FlexPac ohne Castellations diskutiert.

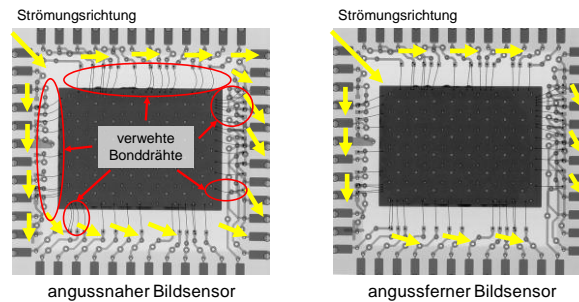


Abb.6.1.4-2: Röntgendurchstrahlungen von den Bildsensor-FlexPac, dabei handelt es sich links um eine repräsentative Aufnahme von einem Bildsensor-FlexPac das direkt am Anguss, sowie rechts um eine Aufnahme eines Bildsensor-FlexPac, das angussfern positioniert war.

Wie bei den QFN-FlexPac wird zunächst das FAM-Ergebnis bewertet. Dabei wird eine Inspektion der Draht-Bonds vor und nach dem FAM-Prozess vorgenommen. Da alle Draht-Bonds vor dem FAM-Prozess unauffällig sind, werden nur die Röntgendurchstrahlungen diskutiert (Abb.6.1.4-2). Dabei können an den angussnahen Bildsensor-FlexPac Draht-Bond-Verwehungen festgestellt werden. Die übrigen Bildsensor-FlexPac zeigen keine Auffälligkeiten. Da der Anguss seitlich und schmaler ist als der Filmanguss bei den QFN-FlexPac, kann die EMC-Schmelze mit einem höheren Fließdruck in die Kavität strömen. Dabei trifft sie auf die Bildsensor-Freistellungssäule und verformt die Draht-Bonds. Es ist zu erkennen, dass die Draht-Bonds an den ersten Berührungskanten stärker verweht werden, als es beim Umschließen der Fall ist. Anhand der gelben Pfeile ist die angenommene Strömungsrichtung dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Verwehung in Strömungsrichtung auftritt. Die Strömung der EMC-Schmelze wird beim weiteren Füllen der Kavität sanfter, da sie mehr Platz zum Fließen hat. Aus diesem Grund werden bei den angussfernen Bildsensoren keine Verwehungen beobachtet. Weiterhin könnte diese Beobachtung auch daher kommen, dass EMC-Schmelze beim direkten Eintreten in die Kavität noch höherviskose Bereiche aufweisen kann, die während des Fließens aufschmelzen und dann zum niederviskosen Verhalten der Schmelzfront beitragen. Deshalb werden im weiteren Fließverlauf keine Verwehungen beobachtet.

Im Folgenden wird das FAM-Ergebnis der einzelnen Herstellungsiterationen diskutiert. Dabei wird auf die Schnittkante, den Mold Flash, Lufteinschlüsse nach dem FAM-Prozess und Sensorschäden geachtet (Abb.6.1.4-3). Die vereinzelt Bildsensor-FlexPac sind repräsentativ für die drei Herstellungsiterationen in Abb.6.1.4-4 zu sehen. Es zeigt sich bei allen Bauteilen ein gut abgeformter Kleberahmen und auf der EMC-Oberfläche ist es möglich, mit bloßem Auge die feinen abgeformten Frässtrukturen zu sehen. Diese Beobachtung ist für die Funktion des Bildsensor-FlexPac nicht kritisch.

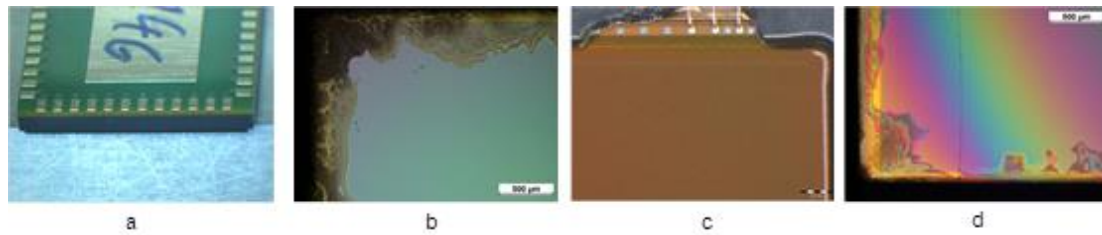


Abb.6.1.4-3: Bewertungskriterien des Bildsensor-FlexPac nach a) Schnittkante, b) Mold Flash, c) Lufteinschlüssen nach dem FAM-Prozess und d) Sensorschäden, dabei ist ein durch den Einrichtprozess gebrochener Bildsensor gezeigt.

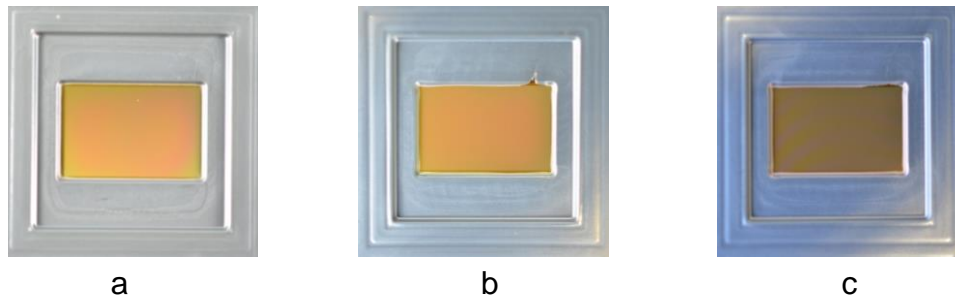


Abb.6.1.4-4: Vereinzelte Bildsensor-FlexPac repräsentativ zu den drei Herstellungssituationen.

In der ersten Herstellungssituation zeigt sich bei allen FlexPac Mold Flash in den Ecken und eine ansonsten gute Freistellung des Pixelfeldes (Abb.6.1.4-5a). Das hängt mit der  $50\ \mu\text{m}$  starken ETFE-Folie und den rechtwinkligen Ecken des Freistellungselements zusammen. Da die Folie über die Ecke gezogen wird, verjüngt sich diese stärker als über den Kanten und öffnet damit der EMC-Schmelze einen Spalt für den Mold Flash. Zudem kompensiert die  $50\ \mu\text{m}$  starke ETFE-Folie die z-Höhenabweichung nicht ausreichend, sodass auch nicht klarer Mold Flash beobachtet wird. Deshalb wird das Freistellungselement im Insert nachgebessert, indem abgerundete Ecken eingebracht und für den Einsatz der  $100\ \mu\text{m}$  starken ETFE-Folie um  $50\ \mu\text{m}$  verjüngt werden.

Bei der zweiten Herstellungssituation kann beobachtet werden, dass die EMC-Freistellung nach der Top-Insert-Überarbeitung das Pixel Array nicht immer vollständig frei stellt, sodass das EMC ganze Pixelzeilen/-spalten überdeckt. Möglicherweise ist die  $50\ \mu\text{m}$  umlaufende Verjüngung des Freistellungselements im Top-Insert zu viel, sodass die Auflagefläche auf dem Pixelfeld zu klein ist. Die  $100\ \mu\text{m}$  starke ETFE-Folie sollte diese Verjüngung kompensieren. Jedoch lässt sich die ETFE-Folie bis auf  $20\ \mu\text{m}$  durch den Aushärteindruck  $p_c$  komprimieren, sodass ein Untermaß von  $-60\ \mu\text{m}$  im FAM-Prozess entsteht. Daher rückt die EMC-Schmelze näher an das Pixelfeld und zusammen mit der z-Höhenabweichung und der Bestückungstoleranz werden einige Pixelfelder mit EMC überdehnt. Beim Vergleich der Bilder der Abb.6.1.4-5b miteinander, welche vom selben Bildsensor stammen und unterschiedliche Aufnahmepositionen zeigen, kann erkannt werden, dass der Bildsensor nach links oben versetzt positioniert ist, denn das Pixelfeld ist im unteren Bild von Abb.6.1.4-5b, wel-

ches die linke untere Ecke des FlexPac zeigt, um mehr als  $100 \mu\text{m}$  vom ausgehärteten EMC entfernt. Das obere Bild von Abb.6.1.4-5b, welches die rechte obere Ecke des FlexPac abbildet, zeigt hingegen einen Überlappungsbereich des ausgehärteten EMC über dem Pixelfeld.

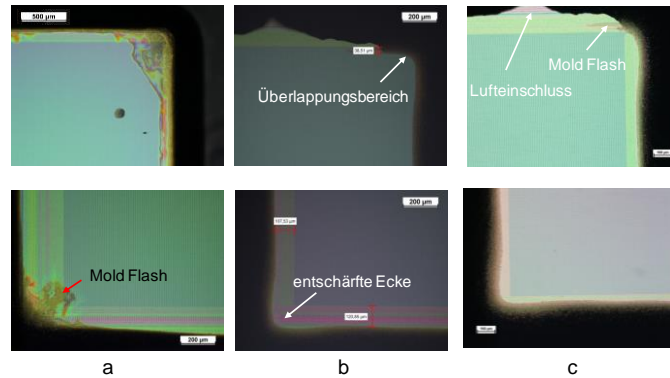


Abb.6.1.4-5: Vergleich der bei den drei Herstellungssiterationen realisierten Pixelfeldfreistellungen in Bezug auf Abformfehler. Dafür wird von jeder Iteration ein repräsentatives Freistellungsbild Ecke rechts oben und Ecke links unten dargestellt.

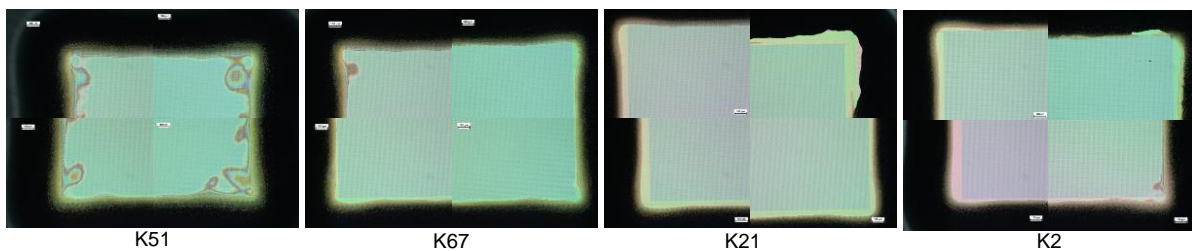
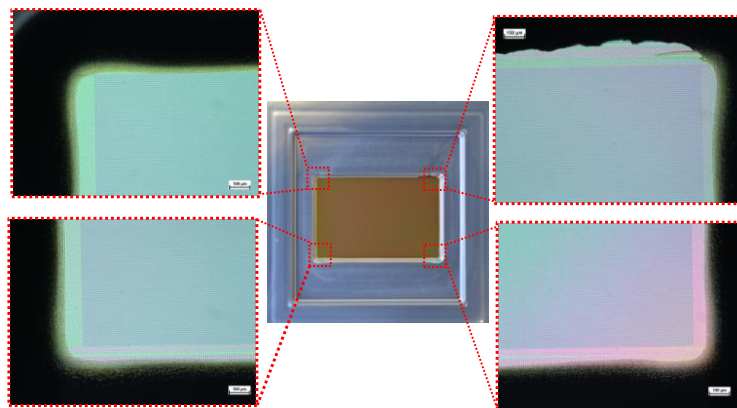


Abb.6.1.4-6: Vergleich der gleichen Bildsensorposition auf verschiedenen LN hinsichtlich der Größe und Form der Freistellung.



Gute Freistellung des Pixelfeldes bei LN K21 Package 5

Abb.6.1.4-7: Ideal freigestelltes Bildsensor-FlexPac.

Zum anderen könnte die z-Höhenabweichung, die aus der LN-Dicke und Klebespaltbreite resultieren kann, das Freistellungsfenster vergrößern oder verkleinern. Letzteres würde geschehen, wenn der Bildsensor tiefer liegt als die Einricht-Höhe. Vergrößern würde sich der Freistellungsbereich, wenn der Bildsensor höher liegt als die Einricht-Höhe. Dabei würde er auch stärker an die Freistellungsstruktur gepresst,

sodass Lufteinschlüsse verbleiben können und der Sensor brechen kann. In Abb.6.1.4-6 ist dieses Verhalten dargestellt. Die LN-Kennzeichnung für die Bildsensor-FlexPac ist mit dem Buchstaben K und einer fortlaufenden Nummer bezeichnet. Die Nummerierung in Abb.6.1.4-6 beruht auf einer Vorsortierung der LN nach deren Dicke. In dieser Abbildung werden Bildsensor-FlexPac der gleichen LN-Position miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass auch der in diesem Abschnitt diskutierte Ansatz zutrifft, da die Freistellung in Größe und Form variiert.

Generell spielen sicherlich beide diskutierten Ansätze eine Rolle für die Qualität der Freistellung, wobei die z-Höhenabweichung die bedeutendste Ursache für die unterschiedliche Abformung darstellt. Mit einem gefederten Freistellungs-element wird die z-Toleranz des Gesamtaufbaus hinreichend kompensiert [15], [40], [41]. Um in einem Serienprozess Bildsensor-FlexPac herzustellen, ist es notwendig, einen gefederten Werkzeugeinsatz zu verwenden. Dennoch zeigen die hier dargestellten Ergebnisse, dass es grundsätzlich möglich ist, Medienzugänge schadensfrei mittel FAM auf Sensoren zu fertigen (Abb.6.1.4-5c). Dies wird auch durch Abb.6.1.4-7 gezeigt, in der alle Ecken des Bildsensor-FlexPac aus der dritten Herstellungsiteration in einer Mikroskopieaufnahme dargestellt werden.

### **6.1.5 Elektrische Charakterisierung Bildsensor-FlexPac**

Der elektrische Funktionstest erfolgt zum einen mittels des SOC-Mixed-Signal VLSI-Testsystems Advantest 93000 und zum anderen auf einer Evaluierungsplattform, wobei die einzelnen Bildsensor-FlexPac Bilder aufnehmen und diese analysiert werden. Der Bildsensor-FlexPac wird im Testlauf auf der Evaluierungsplattform mit verschiedenen Registersätzen geladen und die dazugehörige Funktionalität, wie verschiedene Bildfenstergrößen und Bildpositionen, überprüft. Des Weiteren werden bei unterschiedlichen Beleuchtungen mit einer Phlox-Platte, das ist eine LED-Lampe mit Diffusorscheibe, gleichförmige Bilder aufgenommen. Der dazugehörige Beleuchtungswert wird mit einem Radiometer gemessen und die Bilddaten auf Rauschwert und Konformität untersucht. Eine starke Spreizung der Bilddaten kann dabei Verschmutzungen und Mold Flash auf dem Pixelfeld detektieren und bewerten (Abb.6.1.5-1a). Zusätzlich wird im Labor noch ein ISO-Testchart aufgenommen und die Bildqualität subjektiv bewertet (Abb.6.1.5-1b).

Die Bildsensor-FlexPac bestehen alle den elektrischen Funktionstest und daher bestätigt sich die Untersuchung der Draht-Bonds im FlexPac. Bei den Aufnahmen auf der Evaluierungsplattform und vom ISO-Testchart zeigen die Bildsensor-FlexPac unauffällige Bilder (Abb.6.1.5-2). Der klare Mold Flash auf dem Pixelfeld ist nur durch das Aufspreizen des Bildes auf der Phlox-Platte sichtbar, ansonsten beeinflusst dieser nicht die Bildqualität. Dies kann sich vermutlich mit der Zeit ändern, da Epoxid-

harze zur Vergilbung neigen, was eine Trübung bedeuten würde. Deshalb ist es notwendig, den Mold Flash auf dem Pixelfeld zu vermeiden.

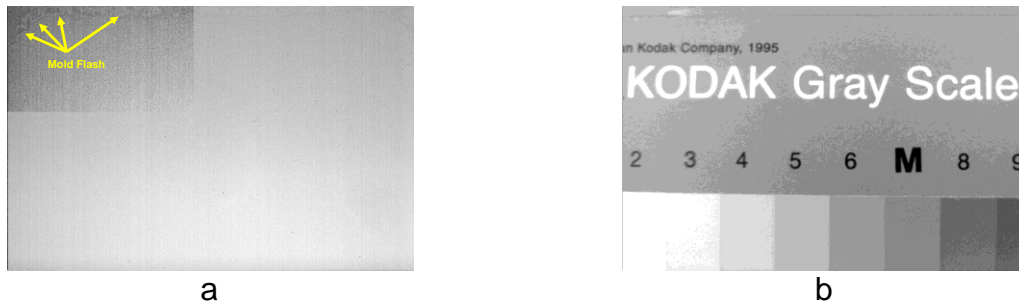


Abb.6.1.5-1: a) Zeigt ein gleichförmig beleuchtetes Bild mit einer starken Spreizung der Bilddaten (Funktion Histogramm-Angleichung). Dabei kann mit einer Kontrastanhebung Mold Flash sichtbar gemacht werden. b) Stellt eine ISO-Testchart Bildaufnahme dar. Beide Bilder werden mit einem Bildsensor-FlexPac aufgenommen.



Abb.6.1.5-2: Testaufnahme auf der Evaluierungsplattform eines Bildsensor-FlexPac [19].

Durch die Funktionstests wird gezeigt, dass die Bildsensoren durch den FAM-Prozess nicht beeinflusst werden. Zudem ist die ETFE-Folie als Trenn- und Dämmschicht zwischen Pixelfeld und Werkzeugstahl ideal, um einen „Soft Touch“ zu erzeugen und den Sensor zu schützen.

## 6.2 Prüfmethode Umwelttests

Die hier vorgestellten Umwelttests sind während des IGF-Vorhabens FlexPacFAM erarbeitet worden [18]. Diese Tests sind wichtig zur Qualifizierung der aufgebauten FlexPac und zeigen, wie Alterung deren Zuverlässigkeit beeinträchtigt. Dafür werden folgende Zuverlässigkeitstests (ZVT), gemäß der Normen MIL-STD [45] und JEDEC [46], durchgeführt. Eine Feuchtwärmetest (FW), eine Temperaturlagerung (TL) sowie ein Temperaturwechseltest (TW) werden gemäß MIL-STD 883 ausgeführt. Dieser Standard beschäftigt sich mit Testmethoden für mikroelektronische Schaltungen. Um die Lötbarkeit der FlexPac nachzuweisen, wird ein Soak/Reflow Level 3 (SR) nach JEDEC J-STD-020C angesetzt. Dieser Standard beschäftigt sich mit der Verarbeitbarkeit feuchteempfindlicher Bauelemente bei der Oberflächenmontage unter Erhalt der Gehäuseintegrität beim Reflow-Lötvorgang. Parallel dazu wird die Lötbarkeit mittels eines Standard Reflow-Prozesses mit anschließendem elektrischen Funk-



tionstest und optischer Inspektion mittels Röntgendurchstrahlanalyse durchgeführt. Alle QFN-FlexPac werden vor den ZVT in einem Ofen getrocknet.

Tab.6.2-1: Überblick Zuverlässigkeitstests mit entsprechenden Konditionen (ZVT - Zuverlässigkeitstest, FW - Feuchtwärmetest, TL - Temperaturlagerung, TW - Temperaturwechseltest, SR - Soak Reflow Test).

ZVT	FW	TL	TW	SR
<b>Prüfbedingung</b>	1000 h 85 °C / 85 %RH	1000 h 150 °C	1000 Zyklen 150 °C / -65 °C	192 h 30 °C / 60 %RH
<b>Ausfälle/min. Anzahl Prüfkörper</b>	0/10	0/10	0/10	0/10

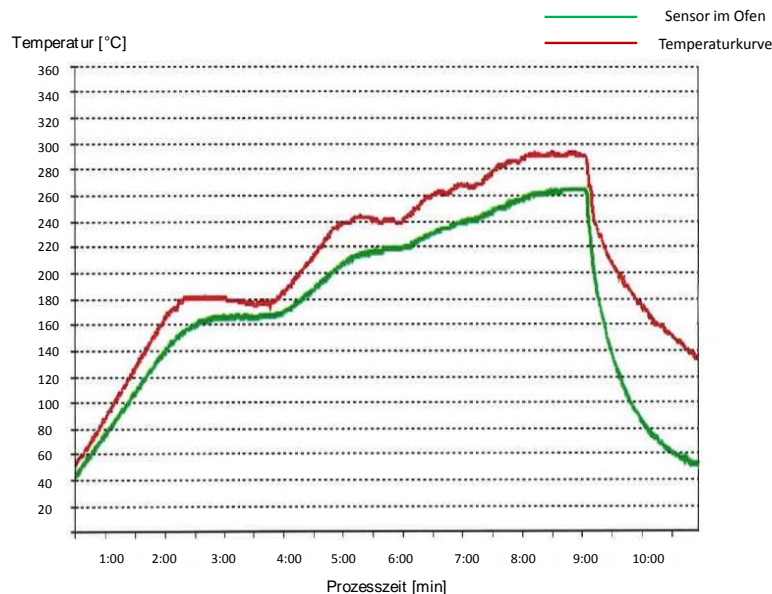


Abb.6.2-1: Temperaturprofil der Reflow-Lötprozess-Simulation. Maximaltemperatur: 292 °C und maximale Temperatur Fühler: 267 °C.

Es werden sowohl für das QFN-FlexPac (je 10 pro ZVT) als auch für das Bildsensor-FlexPac (je 1 pro ZVT) Referenzbauteile mitgeführt. Weiterhin werden für jede Untersuchung mindestens 10 FlexPac bereitgestellt. Bei den FW- und TL-Test werden nach 7 d und zum Abschluss ein initialer elektrischer Funktionstest durchgeführt, um die Ausfälle zeitlich einzuordnen. Dabei wird eine optische Inspektion zum Zustand des FlexPac unternommen. Stichprobenartig wird eine Röntgendurchstrahlanalyse sowie eine Sonic Acoustic Microscope (SAM) Untersuchung an den gestressten FlexPac durchgeführt.

In Tab.6.2-1 sind die Prüf- sowie die Ausfallbedingung der ZVT für die jeweilige Qualifizierung gezeigt. Für den SR-Test werden die FlexPac zunächst in einer Klimakammer unter den Bedingungen aus Tab.6.2-1 gelagert. Anschließend folgt eine „Reflow Simulation“. Das bedeutet, die FlexPac werden über ein für einen Reflow-Lötprozess typisches Temperaturprofil in einem Ofen aufgeheizt (Abb.6.2-1). Dies geschieht drei Mal. Dabei wird nach jedem Zyklus eine optische Inspektion und ein elektrischer Funktionstest der Bauteile durchgeführt.

### 6.2.1 Zuverlässigkeit eines QFN-FlexPac

Tab.6.2.1-1: Zusammenstellung der Einteilung der erzeugten QFN-FlexPac für die jeweiligen ZVT. Grün bedeutet Gutteil; rot steht für defekt und orange für einen Analogfehler.

LN	A52	A53	A54	A55	A56	A57	A34	A35	A38	A58	
FlexPac	3	K3	K3	K3	K3	K3			K3	R	
	4	TL1	K1	TW1			TW2		R	TL2	
	5	SR1	TL1	K1		TW1			K2	TL2	
	8		SR1	TL1	K1		TW2		K2	TL2	
	9			SR1	TL1	K1	TW1	TW2	SR2	K2	K4
	10				SR1	TL1	K1	TW2		K2	K4
	13				TW1	K1		TW2	SR2	K2	K4
	14			TW1	K1	SR1	TL1	TW2	SR2		TW4
	15		TW1			TL1	SR1	TW2		K2	TW4
	18	TW1	K1		TL1	SR1		TW2	SR2		TW4
	19	K1	TW1	TL1	SR1				SR2	K2	
	20	SR1	TL1	TW1				TW2		K2	
	23	TW3	TW3	TW3	TW3	TW3	R			TW3	
	24	R	K1		TW1			TW2	SR2	K2	TW4
	25		SR1							K2	R

Tab.6.2.1-2: Anzahl der QFN-FlexPac je Kategorie.

Kategorie	K1	K2	K3	K4	TL1	TL2	TW1	TW2	TW3	TW4	SR1	SR2	R
Anzahl	10	10	6	3	10	10	10	10	6	4	10	6	5

Die in Kapitel 6.1 diskutierten QFN-FlexPac basieren auf unterschiedliche LN-Designs, wie Vias, die über die zwei Innenlagen geführt werden, oder durchgebohrte Vias sowie einer Plasmavorbehandlung vor der AVT oder vor dem FAM-Prozess. Aus diesem Grund werden die erstellten FlexPac in Kategorien K1 (Innenlagen-Via, ohne Plasma), K2 (Innenlagen-Via, mit Plasma vor AVT), K3 (Durchgangs-Via) sowie K4 (Innenlagen-Via, mit Plasma vor FAM) für die Feuchtwärmelagerung, TL1 (Innenlagen-Via, ohne Plasma) sowie TL2 (Innenlagen-Via, mit Plasma vor FAM) für die Temperaturlagerung, TW1 (Innenlagen-Via, ohne Plasma), TW2 (Innenlagen-Via, mit Plasma vor AVT), TW3 (Durchgangs-Via) sowie TW4 (Innenlagen-Via, mit Plasma vor FAM) für die Temperaturwechseltests und SR1 (Innenlagen-Via, ohne Plasma) sowie SR2 (Innenlagen-Via, mit Plasma vor AVT) für die Soak Reflow-Tests unterteilt. Die Zuordnung zu den Kategorien zu den jeweiligen Bauteilen ist in Tab.6.2.1-1 im Vorbild von Tab.6.1.1-1 aufgelistet. Die FlexPac wurden statistisch entnommen. Die fettschwarze Umrahmung klassifiziert dabei die FlexPac, die vor dem AVT-Prozess nicht mit O<sub>2</sub>-Plasma vorbehandelt werden, und A58 stellt den einzigen LN-FlexPac dar, bei dem direkt vor dem FAM-Prozess eine O<sub>2</sub>-Plasmavorbehandlung durchgeführt wird (fettblau umrahmt). Die übrigen werden vor dem AVT-Prozess mittels O<sub>2</sub>-Plasma vorbehandelt. Mit einem R sind die beim ZVT mitlaufenden Referenzen bezeichnet. Diese werden nicht in den jeweiligen ZVT prozessiert, sondern jedes Mal beim elektrischen Funktionstest mitgemessen.

Tab.6.2.1-3: Ergebnis des ZVT der A-LN. Grün steht für bestanden. In Klammern wird die tatsächlich geprüfte QFN-FlexPac-Anzahl gezeigt (ZVT - Zuverlässigkeitstest, FW - Feuchtewärmetest, TL - Temperaturlagerung, TW - Temperaturwechseltest, SR - Soak Reflow Test). In Klammern steht die tatsächlich getestete Probenzahl.

ZVT	FW	TL	TW	SR
<b>Prüfbedingung</b>	1000 h 85 °C / 85 %RH	1000 h 150 °C	1000 Zyklen 150 °C / -65 °C	192 h 30 °C / 60 %RH
<b>Ausfälle/min. Anzahl Prüfkörper</b>	0/10 (29) K1/K2/K3/K4	0/10 (13) TL1/TL2	0/10 (30) TW1/TW2/TW3/TW4	0/10 (16) SR1/SR2

Die Anzahl der QFN-FlexPac der jeweiligen Kategorie wird in Tab.6.2.1-2 aufgelistet. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der QFN-FlexPac, je Design-Variante und Prozessierung, werden nicht immer die geforderten 10 QFN-FlexPac pro Kategorie erreicht. Deshalb werden die damit erzielten Ergebnisse nur als Tendenz gewertet. Da die durchgebohrten Vias auf dem A-Design mit zwei Positionen (3 und 23) eingearbeitet sind, werden je sechs QFN-FlexPac unabhängig von den anderen Kriterien den FW-Test (K3) und TW-Test (TW3) unterzogen, da davon auszugehen ist, dass dies die härtesten Bedingungen für diese Via-Variante sind. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt Tab.6.2.1-3. Wie zu sehen ist, haben alle Bauteile die ZVT bestanden und damit ist der Herstellungsprozess als erfolgreich zu bewerten. Eine Ursache für dieses Ergebnis sind die in Kapitel 7.3 diskutierten hervorragenden Haftfestigkeiten von G770H auf FR4.

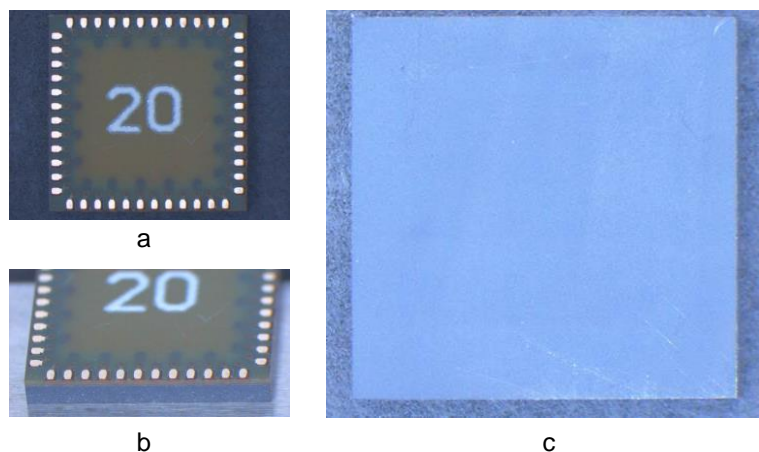


Abb.6.2.1-1: Repräsentatives Ergebnis der optische Inspektion von QFN-FlexPac A52/20 mittels Mikroskopie von der a) Bottom-, b) Kanten- und c) Top-Ansicht.

Die elektrischen Funktionstests zeigen keine Auffälligkeiten und jedes Bauteil besteht die optische Inspektion unter dem Mikroskop (Abb.6.2.1-1). Die EMC-Oberfläche wird über die Entnahmezyklen zum elektrischen Funktionstest zunehmend mit Kratzern versehen. Diese entstehen bei der Montage der QFN-FlexPac in den Testsockel. Die Kratzer beeinflussen jedoch nicht das Ergebnis. Die Röntgendurchstrahlungsanalyse, die stichprobenartig durchgeführt wird, zeigt keine Auffälligkeiten, sodass die Aufnahmen wie in Abb.6.1.1-3 rechts aussehen. Die durchgehenden Vias stellen demzufolge keine Schwachstellen dar, da die Feuchte in das ausgehärtete EMC nur bis zu 50  $\mu\text{m}$

eindringen kann [44]. Somit kann Feuchte nur über Delamination des EMC entlang der Via-Wandung eindringen. Da das EMC das Via ausfüllt und eine, wie in Kapitel 7.3 diskutiert, ausreichende Haftung auf dem Goldfinish besitzt, kann keine solche Delamination beobachtet werden.

Alle Kategorien der Stresstests wurden von jeweils 10 leadframebasierten Referenzbauteilen aus einer laufenden Produktion begleitet. Diese haben die ZVT genauso erfolgreich abgeschlossen.

Tab.6.2.1-4: Einteilung der QFN-FlexPac, die mit einem Redesign QFN-FlexPac-LN hergestellt wurden, in die verschiedenen Kategorien für die ZVT und Lötbarkeitsuntersuchung.

FlexPac		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
LN	F4	TL	R	K	R	TW	K	SR	LÖ	LÖ	TL	TW	SR	TL	K	TW
	F6	TW	SR	TL	K	SR	TL	K	LÖ	TW	SR	K	LÖ	TW	SR	TL
FlexPac		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
LN	F4	K	TL	SR	LÖ	SR	TW	SR	TW	K	TL					
	F6	TL	TW	LÖ	K	LÖ	SR	LÖ	K	TL	TW					

Tab.6.2.1-5: Ergebnis des ZVT des Redesigns. Grün steht für bestanden und rot für nicht bestanden (ZVT - Zuverlässigkeitstest, FW - Feuchtwärmetest, TL - Temperaturlagerung, TW - Temperaturwechseltest, SR - Soak Reflow Test).

ZVT	FW	TL	TW	SR
<b>Prüfbedingung</b>	1000 h 85 °C / 85 %RH	1500 h 125 °C	1000 Zyklen 150 °C / -65 °C	192 h 30 °C / 60 %RH
<b>Ausfälle/min. Anzahl Prüfkörper</b>	0/10	0/10	0/10	4/10

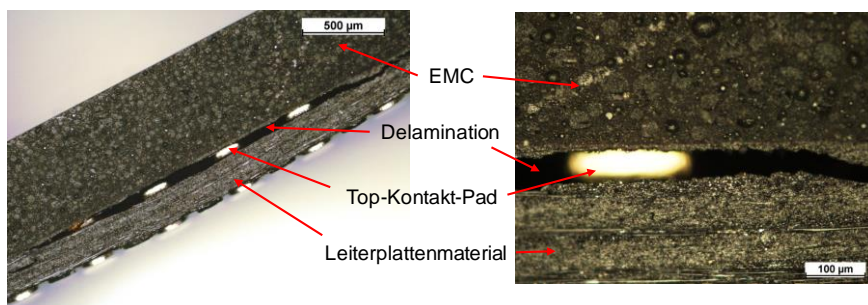


Abb.6.2.1-2: Delamination im Leiterplattenmaterial, die in der optischen Inspektion bei den ZVT Run 2 nach dem SR-Test bei LN Typ F4 QFN-FlexPac 22 auftrat.

Für die mit dem Redesign der QFN-LN hergestellten QFN-FlexPac werden die gleichen ZVT durchgeführt. Dafür werden die erzeugten QFN-FlexPac in die entsprechenden Kategorien der bereits diskutierten ZVT unterteilt. Zudem wird an ihnen die Reflow-Lötbarkeit des QFN-FlexPac untersucht. Deshalb wird eine neue Kategorie für die Reflow-Lötbarkeit (LÖ) eingeführt. In Tab.6.2.1-4 ist diese Einteilung zu sehen. Die QFN-FlexPac, die auf Basis des Redesigns der QFN-LN hergestellt werden, werden zur Nachverfolgung mit dem Buchstaben F gekennzeichnet.

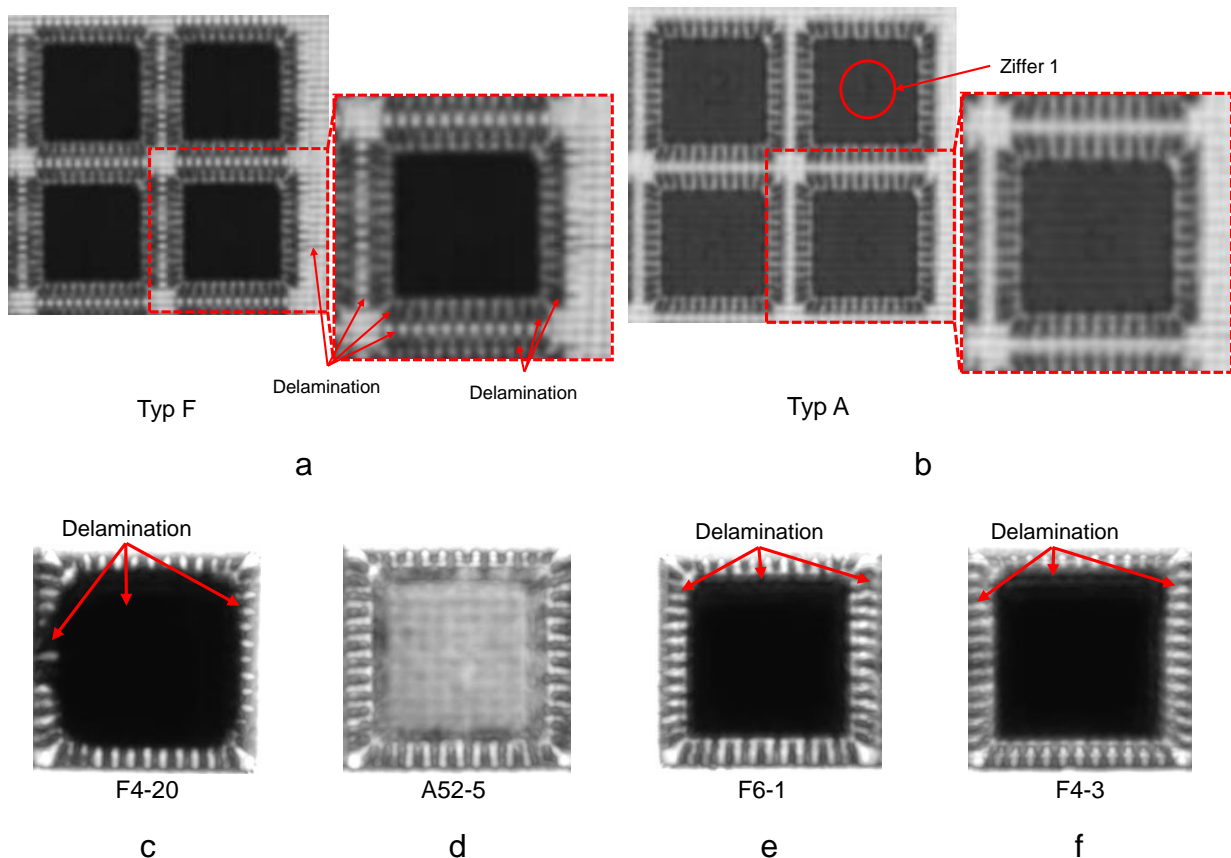


Abb.6.2.1-3: SAM-Aufnahme die a) einen Ausschnitt vom QFN-FlexPac-LN Typ F unbestückt, b) einen Referenzausschnitt vom QFN-FlexPac-LN Typ F unbestückt, c) das durch SR defekte QFN-FlexPac mit LN Typ F, d) ein Referenz QFN-FlexPac Typ A nach SR, e) ein QFN-FlexPac mit LN Typ F nach TW und f) ein QFN-FlexPac mit LN Typ F nach FW zeigt.

Es sind für die ZVT je zehn QFN-FlexPac zugeordnet und sieben werden beim LÖ-Test untersucht. Zwei Referenz-QFN-FlexPac laufen wieder neben den ZVT mit. Das Ergebnis dieser Tests ist in Tab.6.2.1-5 gezeigt. Diese FlexPac zeigen in den ZVT FW, TL und TW keine Auffälligkeiten und bestehen diese auch in der optischen Inspektion sowie in den elektrischen Funktionstests. Beim SR-Test zeigt sich ein neues Bild. Vier QFN-FlexPac bestehen aufgrund von Delamination in der Leiterplatte diesen ZVT nicht (Abb.6.2.1-2). Zwei der FlexPac fallen zudem durch den elektrischen Funktionstest. Zwei mögliche Ursachen könnten diesen Effekt erklären. Zum einen wäre es möglich, dass die Kontakt-Pads, aufgrund der Vergrößerung durch das Redesign, zu nah am Sägegraben positioniert sind. Durch die unterschiedlichen CTE des LN und der EMC delaminiert die Leiterplattenlage auf der Top-Seite von der Kern-Lage, um dem Stress des SR-ZVT nachzugeben, da dies, wie in Kapitel 7.3 diskutiert, der schwächere Verbundpartner in diesem Verbundsystem ist. Wenn dies zutrifft, würde eine Abstandsvergrößerung der Kontakt-Pads zur Schnittkante auf der Top-Seite genügen, um diesen Effekt zu vermeiden. Zum anderen könnte es sein, dass bei der LN-Fertigung schon Vorschädigungen existiert haben. Diese können

beim Verpressen des Prepregs mit dem FR4-Kernmaterial entstehen, bei dem lokale Stellen ohne Verbund zwischen den beiden Materialien existieren. Diese werden durch den funktionierenden Verbund von Prepreg und FR4-Kernmaterial zusammen gehalten, sodass sie bei der optischen Inspektion der vereinzelt QFN-FlexPac nicht auffallen. Durch die Feuchtwärmelagerung bei SR kann die Feuchte entlang dieser Verbundfehler in die Leiterplatte ziehen. Im Reflow-Ofen wird durch das Aufheizen auf eine Temperatur von etwa  $290^{\circ}\text{C}$  die eingezogene Feuchte zu Dampf und der Druck in den Verbundfehlern wächst stark an, da der Dampf nicht so schnell über den gleichen Weg entweichen kann, wie die Feuchte in den LN gezogen ist. Deshalb wird meist ein Aufpoppen der Bauteile, die durch den SR fallen, beobachtet. Im Fall der QFN-FlexPac äußert sich dies in Form einer Delamination in der Leiterplatte.

Um den Herstellungsfehler der QFN-FlexPac-LN des Redesigns zu belegen, werden Sonic Acoustic Microscope (SAM) Untersuchungen durchgeführt. In Abb.6.2.1-3a ist dies in Form einer Aufnahme zu sehen. Dabei wird ein Through Scan durchgeführt. Dieser funktioniert über einen Sender- (ST) und Empfänger-Transducer (ET). Der ST sendet den Ultraschall mit  $15\text{ MHz}$  und einer Fokusslänge von  $5,9\text{ mm}$  durch den unbestückten und unverarbeiteten QFN-FlexPac-LN zum ET. Dieser fängt das Signal auf und wandelt es in ein Grauwertbild um. Dabei berücksichtigt der ET die Intensität des eintreffenden Ultraschalls und belegt damit Grauwerte. Die Intensität nimmt mit zunehmender Streureflexion des ST-Schalls im Material ab und die Aufnahme wird dunkler. Bei schwarzen Stellen in der Aufnahme kommt kein Ultraschall beim ET an, denn der Schall wird total reflektiert. Eine Totalreflexion des Ultraschalls wird beim Auftreffen des Schalls auf eine Gasschicht im Bauteil ausgelöst. Dort kann der Ultraschall nicht weiter transmittiert werden, da die Moleküle des Gases zu weit auseinander liegen, um ihn zu übertragen. Daher wird er zurückgeworfen. Aufgrund dieser Gegebenheit ist in Abb.6.2.1-3a zu erkennen, dass die Montagepads schwarz dargestellt sind. Das kann ein Anzeichen für eine globale Delamination in den Zwischenlagen des LN oder für stark verminderte Intensität des Ultraschalls aufgrund von Streureflexion an den vier Metalllagen sein. Die Referenzaufnahme des QFN-FlexPac-LN Typ A in Abb.6.2.1-3b zeigt keine schwarzen Montagepads. Jedoch muss der Ultraschall bei LN Typ A nur durch zwei und nicht wie bei LN Typ F durch vier Metalllagen transmittieren, sodass ein Vergleich zwischen den Designs unverhältnismäßig ist. Vergleichbar sind jedoch die Zwischenräume, in denen der Sägegraben verläuft. Während bei der Referenz alle Zwischenräume den gleichen Graftonverlauf zeigen, wobei die gewebte Struktur der Glasfasermatte erkannt werden kann, zeigt der QFN-FlexPac-LN Typ F lauter dunkle Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Montageflächen. Aufgrund ihrer geringen Größe und der wahrscheinlichen Lage hinter dem Fokus des ST werden diese Stellen nicht schwarz, sondern als dunkle Schatten beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Delamination im LN handelt. Diese ist weitverzweigt und führt sogar zur LN-Kante. Daher kann Feuchte bis zu den Montagepads gelangen.

In Abb.6.2.1-3c ist eine SAM-Aufnahme von einem defekten QFN-FlexPac Typ F aus dem SR und in Abb.6.2.1-3d ist die Referenz dazu aus dem im SR-Test untersuchten QFN-FlexPac Typ A zu sehen. Hierbei bestätigt sich, dass eine Delamination bei dem FlexPac Typ F zu sehen ist und die Referenz zeigt hingegen keine Auffälligkeit. In Abb.6.2.1-3e und f sind je eine SAM-Aufnahme des QFN-FlexPac Typ F nach TW- und FW-Test dargestellt. Dabei ist das gleiche Bild zu beobachten wie in der SAM-Aufnahme nach dem SR-Test, jedoch kann keine randseitige Delamination beobachtet werden. Aufgrund dessen haben sie ein unauffälliges ZVT-Ergebnis gezeigt. Es kann jedoch geschlossen werden, dass bei einem Reflow-Lötprozess mit dem QFN-FlexPac Typ F, aufgrund der delaminierten PCB, einige Ausfälle zu erwarten wären.

Mit diesem Ergebnis könnte der Einsatz eines FlexPac für Serienprozesse gefährdet sein. Deshalb sind Maßnahmen zu ergreifen, um die Qualität der FlexPac-LN zu sichern und Ausfälle zu vermeiden. Eine solche Maßnahme stellt eine Wareneingangsprüfung (WEP) dar, die wie folgt aussehen kann. Zunächst wird eine Stichprobe aus den LN entnommen und in einem Ofen für  $1\text{ h}$  bei  $130^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Die Stichprobe hängt von der Anzahl an LN ab. Pro PCB-Los, das ist ein großer Vielfachnutzen auf dem die einzelnen LN gefertigt und von dem diese nach der Herstellung getrennt werden, können das zwei Proben sein, da davon auszugehen ist, dass, wenn eine Delamination vorhanden ist, diese sich auf dem gesamten PCB-Los befindet. Nach der Temperaturlagerung werden diese entnommen und optisch inspiziert und mit unbehandelten LN der Bestellung verglichen. Lassen sich dabei farbliche, geometrische oder mechanische Unterschiede feststellen, kann das ein Anzeichen für ein schlechtes PCB-Los sein. Deshalb sollte die Bestellung reklamiert werden.

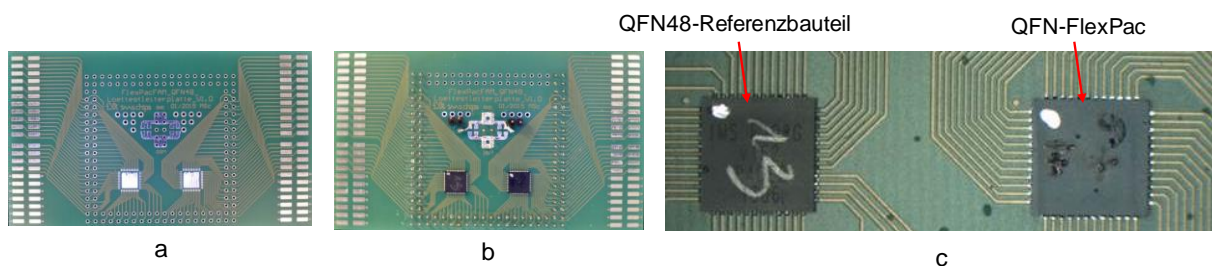


Abb.6.2.1-4: Testplatine für die Reflow-Lötbarkeitsuntersuchung der QFN-FlexPac. Dabei zeigt a) die unbestückte, b) die bestückte und c) die bestückte Testplatine im Detail.

Für den Fall, dass kein Unterschied auszumachen ist, erfolgt an der Stichprobe eine weitere WEP mittels SAM Through Scan, um das Auftreten von Delamination zu prüfen. Falls kein SAM zur Verfügung steht, kann alternativ eine Wasserlagerung der Stichproben für  $24\text{ h}$  vorgenommen werden. Danach werden die LN auf eine Heizplatte mit einer Temperatur von  $180^\circ\text{C}$  für min.  $3\text{ min}$  gelegt. Anschließend werden sie entnommen und optisch auf Verwölbungen der Oberfläche oder transluzente Stellen im LN überprüft. Letzteres lässt sich bei vollständiger Metallisierung des LN nicht beobachten. Tritt einer der beiden Effekte oder beide auf, so ist der Rück-

schluss auf Delamination der Leiterplattenlagen möglich und eine Reklamation ist angebracht. Ansonsten ist davon auszugehen, dass die Qualität der LN im Hinblick auf die genannten Kriterien gut ist.

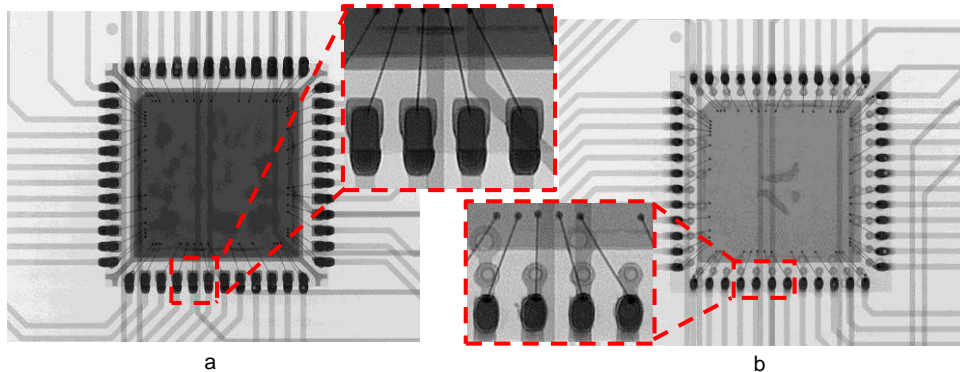


Abb.6.2.1-5: a) QFN48 Referenzbauteil sowie b) LN F6 QFN-FlexPac 20.

Die LÖ-Tests werden auf einer dafür ausgelegten Testplatine durchgeführt (Abb.6.2.1-4a). Diese besitzt zwei verzinnnte Montageflächen mit 48 Löt-Pads. Auf jeder Testplatine werden ein leadframebasiertes Referenzbauteil und ein QFN-FlexPac montiert (Abb.6.2.1-4b und c). Der markierte Punkt an einer Ecke soll die Ausrichtung der QFNs für den Lötprozess bestimmen. Um die Funktionalität der Reflow-gelöteten QFN-FlexPac elektrisch zu messen, befinden sich an zwei entgegengesetzten Kanten der Testplatine Mess-Pads für Messspitzen.

Alle sieben Aufbauten zeigen bei der initialen elektrischen Funktionsmessung keine Auffälligkeiten. Deshalb ist diese Reflow-Lötbarkeitsuntersuchung als Erfolg zu werten und beweist damit die Weiterverwendbarkeit der aufgebauten FlexPac.

Zu dieser Reflow-Lötbarkeitsuntersuchung wird anhand von Röntgendurchstrahlungsbildern eine Einschätzung der Lotverteilung auf den Kontaktpads unternommen (Abb.6.2.1-5). Die Aufnahmen zeigen, dass die Benetzung des Lotes auf dem leadframebasierten Referenzbauteil großflächiger ist als bei den QFN-FlexPac. Dies liegt daran, dass sich die Kontakt-Pads bei dem QFN-FlexPac nur auf der Bottom-Seite befinden. Bei den leadframebasierten Referenzbauteilen sind die Kontakt-Pads an der Schnittkante freiliegend und deshalb gelangt das Lot an die Bauteilseite.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zuverlässigkeitstest TL, TW und FW für beide LN Typen A und F erfolgreich, elektrisch wie optisch, sind. Der Zuverlässigkeitstest SR ist nur für LN Typ A erfolgreich. Aufgrund des Versagens von LN Typ F beim SR ist eine WEP abgeleitet worden, die die Qualität der LN vor den Prozessschritten sichern soll, damit ein Serienprozess nicht gefährdet wird. Weiterhin zeigt sich, dass QFN-FlexPac mit durchgebohrten Vias die Zuverlässigkeitsuntersuchungen ebenso erfolgreich durchlaufen, wie QFN-FlexPac mit den in der Zwischenlage umverdrahteten Vias. Die Reflow-Lötbarkeit der QFN-FlexPac konnte nachgewiesen werden.



## 6.2.2 Zuverlässigkeit eines Bildsensor-FlexPac

Tab.6.2.1-5: Ergebnis des ZVT des Redesigns. Grün steht für bestanden. Mit \* ist gemeint, dass sich bei einer der Messiterationen eine Auffälligkeit zeigt (ZVT - Zuverlässigkeitstest, FW - Feuchtwärmetest, TL - Temperaturlagerung, TW - Temperaturwechseltest, SR - Soak Reflow Test).

ZVT	FW	TL	TW	SR
Prüfbedingung	1000 h 85 °C / 85 %RH	1000 h 150 °C	1000 Zyklen 150 °C / -65 °C	192 h 30 °C / 60 %RH
Ausfälle/min. Anzahl Prüfkörper	0/10	0*/10	0/10	0/10

Die ZVT für die Kategorien TL, FW, TW werden an Bildsensor-FlexPac aus der ersten Herstellungsiteration durchgeführt. Bildsensor-FlexPac der zweiten Herstellungsiteration werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da mitunter verschiedene Typen von Bildsensoren verarbeitet worden sind. Daher werden für den SR-Test Bildsensor-FlexPac aus der dritten Herstellungsiteration verwendet. Für TL und FW werden Standard-LCC48-gehauste Bildsensoren als Referenzen mitgeführt. Damit eventuell auftretende Abweichungen der Messwerte bewertet werden können, werden bei allen ZVT-Schritten weitere nicht mitprozessierte Referenzchips mitgemessen. Die Ergebnisse der ZVT sind in Tab.6.2.2-1 zu sehen.

Es haben alle Bildsensoren die ZVT bestanden. Im Nachfolgenden wird zu jeder Kategorie eine kurze Diskussion der Besonderheiten geführt.

Für den TL-Test werden nach *168 h*, *512 h* und *1000 h* die Bildsensor-FlexPac und das Referenzbauteil elektrisch vermessen. Parallel zu diesen Messungen werden drei Referenzelemente ohne Temperaturbelastung getestet, um das Testsetup abzugleichen.

Bei einem Bildsensor-FlexPac tritt bei der Messung nach *168 h* ein Analogfehler auf, der durch eine Nichtlinearität des integrierten A/D-Wandlers erzeugt wird. Da sich dieser empfindliche Wert in den darauffolgenden Messungen als konstant erweist, kann ein Zusammenhang mit der Qualität des FlexPac ausgeschlossen werden. Vermutlich handelt es sich bei diesem Analogfehler um einen Frühausfall aufgrund der künstlichen Alterung des Bildsensorchips selbst. Nach dem ZVT funktionieren alle Bildsensor-FlexPac ohne Einschränkung und Verlust der Bildqualität.

Die optische Inspektion der FlexPac zeigt ein Abdunkeln des Lötstopplacks (LL) der Leiterplatte. Dies könnte auf anfängliche Degradationsprozesse des LL zurückzuführen sein. Generell sollte ein solches Verhalten des LL bei höheren Temperaturen zu beobachten sein und spricht hier für eine schlechte Qualität des LL. Die Grenzfläche zwischen FR4 und EMC, die Kontaktflächen auf der Bottom-Lage sowie die Fügestellen mit dem Glaslid zeigen keine Auffälligkeit (Abb.6.2.2-1).

Für die FW-Tests wird dasselbe Vorgehen wie bei den TL-Tests durchgeführt. Alle Bildsensor-FlexPac zeigen während der Zwischenmessungen und nach *1000 h* eine

volle Funktionalität und der Vergleich von Aufnahmen zeigt keinen signifikanten Unterschied im Hinblick auf die Bildqualität.

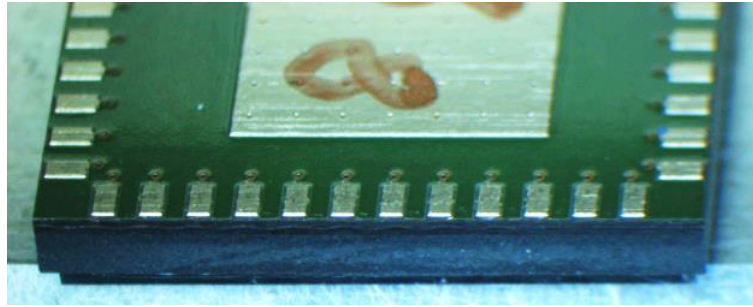


Abb.6.2.2-1: Mikroskopieaufnahme zur optischen Inspektion eines Bildsensor-FlexPac nach TL.

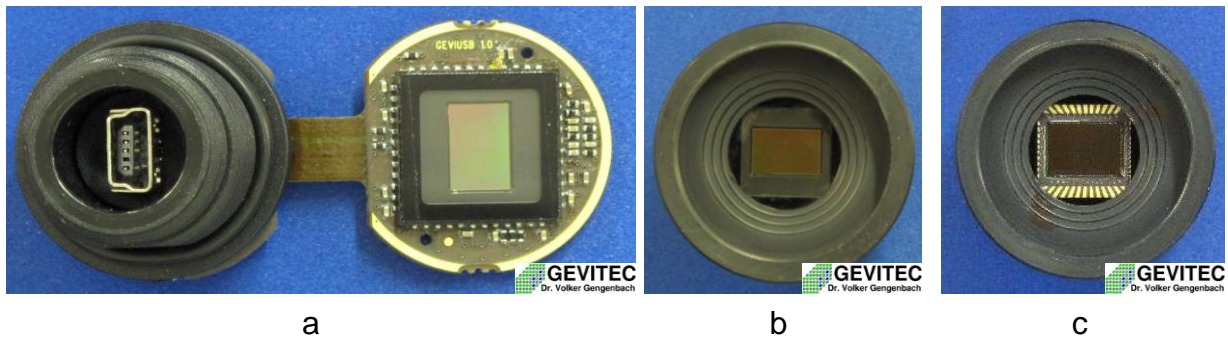


Abb.6.2.2-2: a) Auf einer PCB der Prototypenkamera GEVIUSB aufgelöteter Bildsensor-FlexPac, b) Blick durchs Objektiv auf das Bildsensor-FlexPac und c) Blick durchs Objektiv auf das LCC48-Package des Bildsensors.

Bei der optischen Inspektion zeigt sich nach dem FW-Test eine Delamination an den Grenzflächen EMC zu FR4 und EMC zu Glaslidklebstoff. Das Glaslid zeigt bei der Entnahme aus dem Klimaschrank einen Beschlag, der durch Feuchtigkeit verursacht wird. Dieser ist ausgeprägter als beim LCC48-Referenzbauteil. Es dauert beim Bildsensor-FlexPac auch länger, bis sich der Beschlag auflöst. Da es aber bei beiden Package-Arten zu beobachten ist, zeigt das, dass das Glaslid das Bildsensor-Package nicht hermetisch abdichtet. Daher kann die Feuchte beim FW-Test in den Sensorraum durch den Glaslid-Klebstoff diffundieren und einen Beschlag auf dem Glaslid erzeugen. Die Feuchte diffundiert anschließend nach der Entnahme über den gleichen Weg nach draußen. Dies dauert aufgrund der homogenen Breite der Glaslid-Klebeverbindung beim Bildsensor-FlexPac länger als bei der inhomogenen Breite der Glaslid-Klebeverbindung beim Standard LCC48-Package. Dieses Verhalten kann möglicherweise durch ein Versenken des Glaslids im EMC oder mit einem mit Schichtsilikat gefüllten Klebstoff auf dem Glaslid verhindert werden.

Bei den TW- und SR-Tests werden keine Auffälligkeiten beobachtet. Nach den jeweiligen ZVT bleiben alle Bildsensor-FlexPac in ihrer elektrischen Funktion sowie bezüglich des optischen Aussehens unauffällig.

Zusammenfassend kann das Bildsensor-FlexPac als erfolgreich umgesetzt bewertet werden. Die Machbarkeit eines Bildsensor-FlexPac ist mit dieser Untersuchung bewiesen.

Auf Basis der hervorragenden Untersuchungsergebnisse der diskutierten FlexPac wären weitere Entwicklungen bezüglich System-In-Packages mit einem höheren AVT-Level möglich. Dabei könnten ganze Systemkomponenten, wie Steckverbindungen, Objektivhalterung, gepresste Objektive oder eine höhere Funktionsintegration, in das FlexPac integriert werden. Mit der Funktionsintegration beschäftigt sich Kapitel 8.

## 7. Haftfestigkeit eines EMC auf verschiedenen Oberflächen

Eine wichtige Fragestellung für die Zuverlässigkeit eines mikroelektronischen Package ist die Haftung des EMC an allen Grenzschichten, mit denen es beim Transfer Molding in Berührung kommt. Zu Beginn des Kapitels wird die Haftung des EMC auf diversen Oberflächen diskutiert. Hierfür wird eine Prüfmethode vorgestellt. Anschließend wird die Haftung des EMC auf verschiedenen Werkzeugstahloberflächen untersucht. Zwar schützt beim FAM-Prozess die ETFE-Folie den Werkzeugstahl vor dem Kontakt mit der EMC-Schmelze, dennoch kann es vorkommen, dass die Folie im Prozess versagt und ein Anhaften des EMC am Werkzeugstahl verursacht. In einem solchen Fall wird die Entfernung des ausgehärteten EMC den Verschleiß des Werkzeugs heraufsetzen, da der Reinigungsprozess mechanisch durchgeführt wird. Wenn das Vakuumsystem des Werkzeugs betroffen ist, muss beim Reinigen sogar gebohrt werden. Deshalb sollen verschiedene Oberflächenbeschichtungen überprüft und für den Einsatz im Werkzeugstahl geprüft werden. Diese Untersuchung soll zeigen, mit welchen Oberflächen beim Werkzeug gearbeitet werden soll, um den Reinigungsaufwand so gering wie möglich zu halten.

Der zweite Schwerpunkt dieses Kapitel ist es, die Anhaftung des EMC auf den Leiterplattenoberflächen Lötstopplack, FR4-Basismaterial und Goldfinish zu untersuchen. Ist die Haftung zwischen dem EMC und der Baugruppe ungenügend, kann es zu Schäden an der Elektronik kommen. Dies äußert sich zunächst durch Delamination an der Grenzschicht. Damit ist eine spaltartige Öffnung zwischen den Grenzschichten EMC und z.B. Lötstopplack gemeint, die direkt am Packagerand aber auch mitten im Package auftreten kann. Eine solche Delamination gefährdet die gesamte elektronische Baugruppe, da Feuchte eindringen oder es zu einer Ausbreitung der Delamination durch den Betrieb des FlexPac kommen kann. Kurzschlüsse oder Abriss empfindlicher Bauteile wären die Folge. Die Untersuchung der Haftung des EMC auf allen leiterplattenbasierten Grenzflächen soll zeigen, dass die Haftfestigkeit größer als  $5 \text{ MPa}$  ist. Dieser Grenzwert ist ein Erfahrungswert für eine zuverlässige Haftung eines EMC auf einer Oberfläche im mikroelektronischen Packaging der Robert Bosch GmbH und stellt die untere Schranke für die hier angeführte Untersuchung dar.

Final wird der Einfluss des Entformungshilfeanteils im EMC auf Haftung des EMC auf den drei benannten PCB-Oberflächen untersucht.

### 7.1 Prüfmethodik

Einen Standard zur Bestimmung der Haftfestigkeit eines EMC auf verschiedenen Oberflächen gibt es nicht. Es gibt einen SEMI International Standard (G69-0996), den sogenannten „Button Shear Test“ (BST), der für die Haftfestigkeitsprüfung von EMC auf Kupferleadframes entwickelt wurde [47]. Der BST wird in der Literatur

überwiegend für Anwendungen auf Kupferleadframes diskutiert [48]–[51]. Dabei wird auf einem Kupferleadframe ein knopfförmiger, mittels Transfer Molding hergestellter Prüfkörper aufgebracht. Während der Prüfung wird dieser Prüfkörper mittels eines Schermeißels abgeschert und dabei die maximale Scherkraft ermittelt (Abb.7.1-1). Die Scherkraft wird auf die Fläche normiert und damit als Scherspannung ausgegeben. So bleibt das Prüfergebn vergleichbar mit Angaben aus der Literatur sowie abgleichbar mit den Anforderungen an das Systemgehäuse. Nachfolgend werden einzelne Ergebnisse aus der Literatur besprochen, um die Eignung des BST zur Prüfung der Haftfestigkeit auf verschiedenen Oberflächen (Werkzeugstahl, Leiterplattenmaterialien) zu diskutieren.

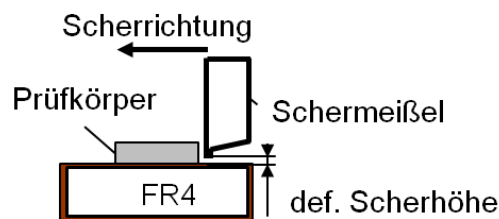


Abb.7.1-1: Schematische Darstellung der Haftfestigkeitsprüfung zur Ermittlung der Scherspannung.

Kim et. al. vergleichen den BST mit dem Pull- und Peel-Test (nach ASTM D-3330), um festzustellen, welche Prüfmethode die empfindlichsten Ergebnisse für die Haftfestigkeit liefert [48]. Dafür untersuchen sie die Haftung von fünf unterschiedlichen EMC auf, je nach Prüfanforderung, verschieden dicken Kupferleadframematerialien. Dabei stellen sie fest, dass der Peel-Test sehr empfindliche und damit stärkere Unterschiede zwischen den Haftungsergebnissen liefert und der Pull-Test hingegen kaum einen Unterschied zeigt. Der BST liegt zwischen den beiden anderen Verfahren. Dennoch hat sich der Button Shear Test als SEMI Standard und damit als Prüfmethode für die Haftung von EMC auf Kupferleadframes seit 1996 durchgesetzt [47], [50]. Grund dafür ist, dass der BST eine für die Unternehmen einfach zu realisierende Prüfmethode ist [52]. Das liegt daran, dass lediglich eine Schertestmaschine wie von Dage benötigt wird und viele Unternehmen mit eigenen AVT-Anlagen eine solche Maschine besitzen. Die Herstellung der Prüfkörper können diverse Dienstleister übernehmen. Der Prüfkörper als Button ist sehr einfach gehalten und muss nicht weiter präpariert werden. Daher ist der Aufwand zur Herstellung des Prüfkörpers einfacher als beim Peel- oder Pulltest.

Des Weiteren hat eine Arbeit von Szeto et. al. erarbeitet, dass beim BST die Scherhöhe einen Einfluss auf den Spannungszustand hat [49]. Die Spannung setzt sich anteilig aus Zug- und Scherspannung zusammen. Wird das Scherwerkzeug oberhalb der Hälfte der Prüfkörperhöhe angesetzt, wirkt hauptsächlich auf der Belastungsseite des Prüfkörpers Zugspannung. Für den im Nachfolgenden beschriebenen Schertest zur Ermittlung der Haftung des EMC auf diversen Oberflächen wird das Scherwerk-

zeug unterhalb der halben Prüfkörperhöhe angesetzt, sodass der Anteil der Scherspannung die Hauptbelastung ausmacht. Dennoch können die Zugspannungsanteile nicht unberücksichtigt bleiben, da der Substratträger mit der Scherbewegung nachgeben kann, was eine Zugwirkung an der Belastungsseite zur Folge hat. Aus diesem Grund kann der resultierende Haftfestigkeitswert nicht als spezifischer Materialparameter betrachtet werden, sondern er liefert lediglich einen Richtwert [51]. Die Methodik ist jedoch hinreichend, um eine gute Aussage zur Haftfestigkeit eines EMC auf einer spezifischen Materialoberfläche zu treffen.

In Anlehnung zum in der Literatur beschriebenen BST wird die hier vorgestellte Haftfestigkeitsprüfung entwickelt. Dabei wird die Haftfestigkeit über die Scherkraft auf einen zylindrischen Prüfkörper gemessen und als Scherspannung ausgegeben. In Abb.7.1-1 ist in einem Schema die Prüfung dargestellt. Ein Schermeißel fährt mit einer Höhe von  $50 \mu\text{m}$  bis  $500 \mu\text{m}$  und einer Schergeschwindigkeit von  $50 \mu\text{m/s}$  bis  $100 \mu\text{m/s}$  gegen den Prüfkörper, bis dieser versagt und von der Oberfläche wegbricht. Mit Hilfe der dabei gemessenen maximalen Kraft  $F$  wird nach Gl.7.1-1 die Scherspannung  $\tau$  bestimmt. Die Scherfläche  $A$  hat einen Radius  $r$  von  $2,5 \text{ mm}$  und der Prüfkörper eine Höhe  $h$  von  $2 \text{ mm}$ .

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi r^2} \quad \text{Gl.7.1-1}$$

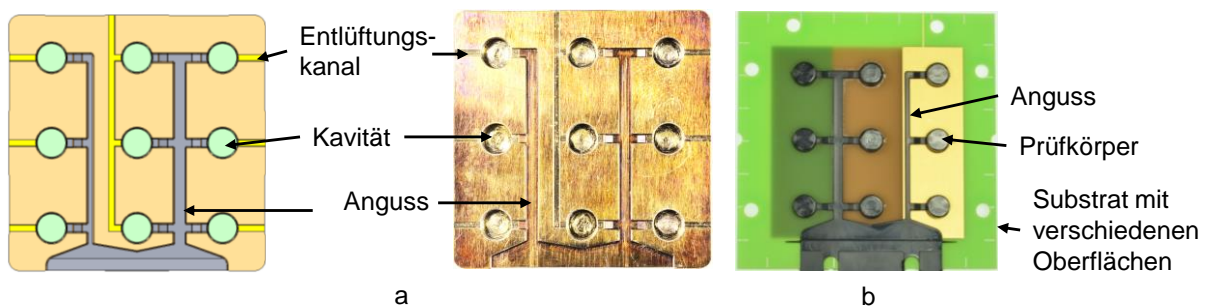


Abb.7.1-2: a) Draufsicht Top-Insert zur Herstellung der Prüfkörper, links als CAD sowie rechts als gefertigtes und verwendetes Bauteil und b) abgeformte Prüfkörper auf einem Leiterplattensubstrat.

Für die Erzeugung der Prüfkörper auf einem Testsubstrat wird ein Top-Insert konstruiert und gefertigt. Dieses besitzt neun Kavitäten zur Abformung der Prüfkörper. Über zwei Angussstränge kann die EMC-Schmelze im FAM-Prozess in die Kavitäten fließen. Damit Lufteinschlüsse zwischen den Grenzflächen vermieden werden, wird über  $60 \mu\text{m}$  tiefe Ventings die Luft aus der Kavität durch die einfließende Schmelze verdrängt, sodass die fertigen Prüfkörper gut ausgeformt werden und vollflächig an der Substratoberfläche haften. Als Gegenstück zum Top-Insert entsprechend Abb.7.1-2 wird ein unstrukturiertes Bottom-Insert verwendet, welches höhenverstellbar sein kann, damit unterschiedlich dicke Prüfsubstrate eingesetzt sowie die Dickentoleranz einer Substratart kompensiert werden kann. In Abb.7.1-2a ist das Top-Insert als CAD-Modell und nach der Fertigung dargestellt. Nach dem FAM-Prozess verbleiben

die Prüfkörper sowie der Angusskanal auf der Substratoberfläche (Abb.7.1-2b). Bei der Herstellung der Prüfkörper mittels Film Assisted Molding können einige fehlerhaft abgeformte Prüfkörper auftreten. Im Folgenden werden deshalb einige Fehler demonstriert und diskutiert.

Tab.7.1-1: Darstellung fünf möglicher Fehlerbilder, die bei der Herstellung der Prüfkörper auf dem Substrat auftreten können.

Fehlerbild	Beschreibung	Bild
1	unvollständiger Prüfkörper	
2	Delamination des Prüfkörpers, Lufteinschluss auf der Haftfläche	
3	unvollständiger Füllvorgang	
4	kein Prüfkörper auf dem Substrat nach FAM	
5	Abformungsfehler durch Foliensfalte	

Fehlerbild 1 (Tab.7.1-1) zeigt einen nicht vollständig abgeformten Prüfkörper. Die häufigste Ursache für diesen Abformungsfehler ist das Foliensversagen während des FAM-Prozesses. Die Ursache dafür ist das Verbleiben von Luft zwischen Folie und Werkzeug. Beim FAM-Prozess bildet dieser Lufteinschluss eine Blase, die durch die in die Kavität einströmende EMC-Schmelze in die Kavitätskanten verdrängt wird. Kann die Luft nicht mehr weiter verdrängt werden, wirkt eine undefinierte Druck- und Zugbelastung auf die Folie bis sie versagt. Dabei fließt ein Teil der EMC-Schmelze durch den Foliendefekt zwischen Folie und Kavität und härtet dort aus. Nach dem Öffnen des FAM-Werkzeugs verbleibt dieser ausgehärtete EMC-Rest in der Kavität

und muss anschließend mechanisch entfernt werden, da dieser EMC-Rest sonst zu Abformungsfehlern führt. Dieser Fall tritt nur dann auf, wenn ein großes Luftvolumen unter der Folie verbleibt. Das Verbleiben von Luft zwischen der Kavität und der ETFE-Folie ist abhängig von der aufgetragenen Vorspannung der ETFE-Folie. In der FAM-Anlage wird die Vorspannung der Folie über eine Kraft, die durch das Walzensystem aufgebracht wird, realisiert. Durch eine mit einer Kraft  $>50\text{ N}$  gespannte Folie wird der Verbleib von Luft unter der Folie bei kleinen Kavitätsstrukturen, wie sie für die Herstellung der Prüfkörper für den BST benötigt werden, begünstigt. Bei einer solchen Vorspannung kann die ETFE-Folie beim Einsetzen des inneren Vakuumkreislaufs nicht ausreichend in die Kavität gezogen werden und dort die Luft verdrängen. Die Luft kann nur solange aus der Kavität entweichen, bis die ETFE-Folie um alle Entlüftungskanäle abdichtet. Danach herrscht unter der Folie ein Unterdruck, weshalb sie sich in die Kavität einsenkt. Das Fehlerbild 1 kann durch zwei Maßnahmen behoben werden. Zum einen werden im Top-Insert auch in den einzelnen Kavitäten Entlüftungen eingebracht und zum anderen wird mit einer reduzierten ETFE-Folienspannung von ca.  $15\text{...}25\text{ N}$  gearbeitet. Bei reduzierter Folienspannung liegt die Folie nur schwach an, sodass sie sich beim Aufbringen des Vakuums an die Kavität anlegt. Daher verbleibt wenig Luft unter der Folie, die während des FAM-Prozesses um die Kavitätskante verteilt vorliegt und die Prüfkörperkante an den Stellen abrundet. Eine weitere Entstehungsmöglichkeit für Fehlerbild 1 ist auf eine zu starke Abdichtung des Werkzeugs auf der Substratoberfläche zurückzuführen. Dabei reißt die Folie beim Einströmen der EMC-Schmelze am Ansatz der Abdichtung, da diese aufgrund der Verklemmung früher ihre Streckgrenze erreicht. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Klemmkraft des FAM-Werkzeugs zu hoch eingestellt ist oder die Höheneinstellung des Top- und Bottom-Inserts nicht aneinander angepasst ist. Mit der Reduzierung der Klemmkraft oder dem Justieren der Werkzeug-Stopper kann dieser Ursache für Fehlerbild 1 entgegengewirkt werden.

Fehlerbild 2 zeigt einen gut abgeformten Prüfkörper, der an der Grenzfläche zwischen Substratoberfläche und Prüfkörper einen Spalt und damit eine Delamination aufweist. Dies zeigt sich überwiegend am Fließwegende. Der Fehler tritt in der Regel auf, wenn der vorgesehene Entlüftungskanal am Ende des Fließweges verschlossen ist. Ursachen dafür können zum einen ein Eindringen der Kavitätskontur in nachgiebige Substratoberflächen, wie Lacke oder Leiterplattensubstrate, aufgrund einer zu hohen Klemmkraft  $F_{clem}$  oder zum anderen die Verstopfung der Entlüftungskanäle mittels der stark deformierten ETFE-Folie sein. Letzteres ist ebenso bedingt durch eine zu starke Klemmung der Werkzeugeinsätze mittels der FAM-Anlage. Zudem tritt dieser Fehler auf, falls eine dickere ETFE-Folie verwendet wird als im Werkzeugkonzept vorgesehen ist.

Das Fehlerbild 3 äußert sich darin, dass die Kavität beim FAM-Prozess nicht oder gering gefüllt wird. Grund dafür kann eine ETFE-Folienfalte über dem Angusskanal



oder eine schon zu Prozessbeginn zu stark vernetzte EMC-Schmelze sein. Der erste Fall kann durch die optische Überprüfung der angelegten ETFE-Folie vermieden werden. Falls die Faltenbildung ausgeschlossen werden kann, dann ist das EMC entweder zu stark gealtert oder für den FAM-Prozess ungeeignet, da es zu hochviskos ist oder schon während des Füllvorganges seinen Gelpunkt erreicht. Weiterhin könnte die Angussauslegung im Top-Insert ungeeignet sein und müsste evtl. vergrößert werden.

Fehlerbild 4 ergibt sich, wenn im FAM-Prozess zwar alle Prüfkörper hergestellt worden sind, aber nicht alle Prüfkörper auf dem Substrat anhaften (erkennbar an den Prüfkörperspuren auf der Substratoberfläche). Das kann verschiedene Ursachen haben. Die häufigste Ursache ist, dass die zu testende Oberfläche keine Adhäsion mit der EMC-Schmelze eingeht. Falls dies der Fall ist, dann könnte der Anteil an Entformungshilfe im EMC zu hoch formuliert sein, sodass eine Haftung der EMC-Schmelze unterbunden wird. Weiterhin könnten die Entformungsschrägen in der Kavität zu gering ausgelegt sein, sodass der Prüfkörper nach dem FAM-Prozess beim Entformen abgerissen wird. Des Weiteren könnte der Verbleib von Luft als Trennschicht zwischen den Grenzflächen wirken. Dies könnte durch ein für den Prozess nicht geeignetes Ventingsystem entstehen. Wenn Fehlerbild 4 auftritt, dann sollten die hier beschriebenen Möglichkeiten überprüft werden.

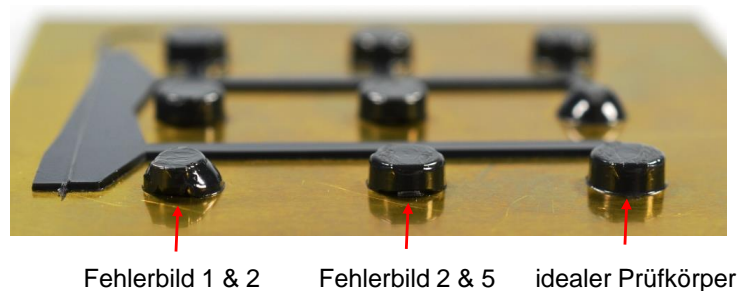


Abb.7.1-3: Fehlerbilder, die sich nach dem FAM-Prozess an den Prüfkörpern zeigen können, und deren Ursachen.

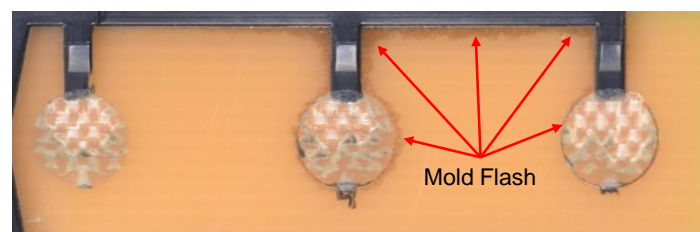


Abb.7.1-4: Mold Flash, der nach der Scherung der Prüfkörper auf der Substratoberfläche kreisrund zurückbleibt.

Das Fehlerbild 5 zeigt einen aufgrund einer Folienfalte deformierten Prüfkörper. Eine solche Falte kann durch eine zu geringe Vorspannung der ETFE-Folie beim Anlegen und Vakuumieren des Werkzeugs in die Kavität gezogen werden. Dort bildet sie sich im EMC ab oder wird von der EMC-Schmelze teilweise umschlossen und nach dem

FAM-Prozess während der Entnahme herausgerissen oder abgelöst. Um diesen Fehler zu verhindern, ist eine optische Inspektion der angelegten Folie notwendig oder eine Erhöhung der Spannkraft, letzteres in Kombination mit einem Entlüftungssystem in den Einzelkavitäten, ansonsten kann Fehlerbild 2 auftreten.

Die diskutierten Fehlerbilder können kombiniert auftreten (Abb.7.1-3). Das geschieht dadurch, dass die Bottom- und Top-Inserts beim Einbau ins Werkzeug nicht parallel zueinander stehen. Aufgrund dessen wird beim Einbauen der Inserts in die Werkzeugeinsätze mittels einer Höhenmessung die Parallelität überprüft. Zeigt ein Prüfkörper eines der angesprochenen Fehlerbilder oder Kombinationen daraus, so ist er für die Haftprüfung nicht zugelassen. Deshalb erfolgt vor dem Prüfverfahren eine optische Inspektion der Grenzflächen und der Prüfkörpergeometrie, um die nicht zugelassenen Prüfkörper zu markieren. Die Prüfkörper, die eines der angesprochenen Fehlerbilder zeigen, sind für die Prüfung ungeeignet, da sie das Ergebnis verfälschen können.

Nach dem FAM-Prozess weisen die gut ausgeformten Haftprüfkörper häufig einen klaren und umlaufenden Mold Flash auf. Das Entstehen eines Mold Flashs wurde bereits in Kapitel 2.4.2 diskutiert. Dieser dünne Epoxidfilm vergrößert die Haftfläche unkontrolliert. Nach der Haftprüfung zeigt sich, dass der Mold Flash auf dem Substrat kreisrund zurückbleibt (Abb.7.1-4). Zwar sollte sich dieser dünne, zumeist entmischte Duroplastfilm auf die Kraft beim Abriss des Prüfkörpers auswirken, jedoch wird dieser Einfluss als vernachlässigbar gering eingestuft, was im direkten Vergleich der Messergebnisse belegt werden konnte.

## **7.2 Haftung auf verschiedenen Werkzeugbeschichtungen**

In diesem Teilkapitel liegt der Schwerpunkt der Diskussion darauf, wie die Anhaftung des EMC am Werkzeug verhindert werden kann, falls die Folie im FAM-Prozess reißt. Die Motivation dieser Untersuchung besteht darin, dass beim Prototypenbau eines Werkzeugs Folierversagen im Werkzeugdesign nicht an allen Stellen vorhersehbar ist und aus diesem Grund eine geeignete Präventionsmaßnahme untersucht werden soll.

Zur Untersuchung werden Stahlplättchen der Abmessung  $55 \times 55 \times 1,5 \text{ mm}^3$  aus dem Werkstoff St 1.2379 eingesetzt. Dieser Werkzeugstahl wird in den duroplastverarbeitenden Unternehmen im Duroplastspritzguss als grundlegender Werkstoff verwendet, da er besonders hart ist, einen hohen Chromgehalt besitzt und von HRC 24 auf einen Wert von bis zu HRC 64 gehärtet werden kann [53], [54]. Das Arbeiten mit harten Werkzeugstählen empfiehlt sich, weil dadurch der Verschleiß beim Werkzeug säubern minimiert wird. Dazu werden fünf Beschichtungsmöglichkeiten untersucht. Zum einen wird Chromnitrid ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ) eingesetzt, welches über Hochleistungskathodenzerstäuben (Magnetron-Sputtern) auf das Plättchen beidseitig aufgebracht wird.

Dabei werden meist Argon-Ionen aus einem Plasma auf das Target an der Kathode beschleunigt und durch die Kollision einzelne Targetatome herausgeschlagen. Diese werden zur Anode hin beschleunigt, treffen auf der Substratoberfläche auf und bilden dort eine Schicht. Eine  $\text{Cr}_2\text{N}$ -Schicht härtet die Werkzeugoberfläche und mittels des Stickstoffs wird die Oberflächenpolarität herabgesetzt. Das Verchromen soll den Werkzeugverschleiß minimieren [13].

Zwei weitere Beschichtungen die über ein Dispersionsverfahren aufgebracht werden sind eine PTFE- (Polytetrafluorethylen) und Bornitrid(BN)-Beschichtung. Dabei wird auf das Stahlplättchen eine Nickelstartschicht gesputtert und dieses anschließend in ein Elektrolytbad für die jeweilige Beschichtung getaucht. So entsteht eine relativ dünne ( $1 \dots 20 \mu\text{m}$ ) Schicht auf der Metalloberfläche. Der Vorteil an PTFE und BN soll eine gute Schmier- und Gleitwirkung sein. PTFE als Beschichtung sollte eine ähnliche Wirkung wie die ETFE-Folie auf das EMC ausüben. Daher ist keine Haftung zu erwarten.

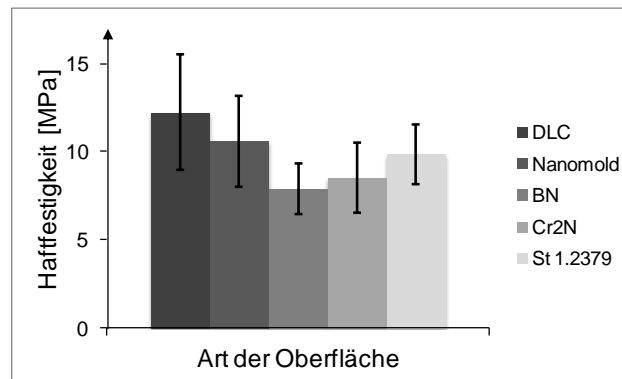


Abb.7.2-1: Ergebnis der Haftfestigkeitsuntersuchung auf DLC-, Nanomold behandelte, BN-,  $\text{Cr}_2\text{N}$ -, PTFE- und St 1.2379-Oberfläche. Das EMC zeigte keine Haftung auf der PTFE-Oberfläche.

Tab.7.2-1: Mittelwerte und Standardabweichung zu den Haftfestigkeitsuntersuchungen auf DLC-, Nanomold behandelte, BN-,  $\text{Cr}_2\text{N}$ - und St 1.2379-Oberfläche.

Oberfläche	DLC	Nanomold	BN	$\text{Cr}_2\text{N}$	St 1.2379
<b>Mittelwert [MPa]</b>	12,24	10,59	7,89	8,51	9,86
<b>Standardabweichung [MPa]</b>	3,30	2,58	1,45	1,96	1,69
<b>Anzahl</b>	39	39	34	39	36

Als weitere Beschichtung wird ein Stahlplättchen mit einer DLC-Schicht (Diamond Like Carbon) beschichtet. Dies geschieht in einer Plasma Activated Chemical Vapor Deposition (PACVD). Dabei wird eine diamantähnliche Kohlenstoffschicht auf der Oberfläche chemisch erzeugt.

Die letzte Beschichtungsvariante ist Nanomold, was als Release Agent (Entformungshilfe/Antihaftbeschichtung) für den Spritzguss eingesetzt werden kann. Dieses

liegt als Suspension vor, wird dünn auf das Stahlplättchen aufgetragen und mittels Heißluftpistole getrocknet.

Als EMC wird das EME-G770H Type CD (G770H) der Firma Sumitomo Bakelite Co. Ltd. verwendet. Das G770H ist laut Herstellerangaben ein Standard-EMC für die Verkapselung von mikroelektronischen Bauelementen auf PCB. Dessen CTE liegt unterhalb des  $T_g$   $7 \cdot ppm/K$  [30] und zeigt damit eine gute Annäherung an den Silizium-nacktchip, dessen CTE in der Literatur mit  $2,49 \dots 4,44 ppm/K$  angegeben wird [55]. Daher eignen sich diese EMC für das Packaging von Nacktchips.

Für diese Untersuchung werden auf jeder Oberfläche  $6 \times 9$  Prüfkörper (je Oberfläche drei Herstellungszyklen, da je zwei Stahlplättchen verwendet werden) mittels FAM aufgebracht. Die Prüfkörper werden optisch nach den Fehlerbildern aus Tab.7.1-1 inspiziert und entsprechend bei Bedarf aussortiert. Dann werden die gültigen Prüfkörper abgeschert und dabei wird die maximale Kraft ermittelt und in Gl. 7.1-1 eingesetzt, um die Scherspannung zu ermitteln. In Abb.7.2-1 ist das Ergebnis dieser Untersuchung in einem Säulendiagramm und in Tab.7.2-1 anhand der die aus den jeweiligen Einzelmessungen gemittelten Werte gezeigt. Zudem wird die Gesamtanzahl der gescherten Prüfkörper aufgelistet. Anhand der Anzahl ist zu sehen, dass bis zu 20 Prüfkörper je Oberfläche ausgeschlossen werden mussten. Das zeigt die Komplexität bei der Herstellung von gültigen Prüfkörpern mittels FAM. Dennoch sind die Haftfestigkeitsuntersuchungen aussagekräftig.

Es stellt sich heraus, dass, bis auf PTFE, auf allen untersuchten Oberflächen eine gute Haftung des EMC erzielt wird. Zudem liegen alle Werte oberhalb von  $5 MPa$ . Dieses Ergebnis zeigt, dass bei diesen Oberflächen ein Versagen der Folie ein starkes Anhaften des EMC im Werkzeug zur Folge hätte.

Die einzelnen Mittelwerte zeigen, dass die Haftfestigkeit des EMC auf Nanomold und DLC gegenüber Stahl höher ist. Eine solche Verbesserung könnte mit der Steigerung des Benetzungsverhaltens der EMC-Schmelze auf der Nanomold- und DLC-Oberfläche zusammenhängen. Jedoch konnte im Rahmen dieser Arbeit keine Überprüfung des Benetzungsverhaltens durchgeführt werden. Des Weiteren verringert sich die Haftung des EMC auf BN und  $Cr_2N$ . Der Stickstoff in diesen Verbindungen beeinflusst vermutlich das Benetzungsverhalten der EMC-Schmelze negativ.

Die Standardabweichung der Haftfestigkeit bei allen geprüften Oberflächen liegt oberhalb von  $10 \%$ . Deshalb zeigen diese Werte lediglich einen Trend. Um die Standardabweichung zu verkleinern, müssen noch mehr Messwerte erzeugt oder die Prüfmethode verbessert werden. Des Weiteren können keine Aussagen zu Lufteinschlüssen an den Grenzflächen, die durch eine äußere Betrachtung des Prüfkörpers nicht zu sehen sind, getroffen werden. Diese könnten durch eine Verringerung des tatsächlichen Flächeninhalts der Haftfläche zu einem Messfehler führen. Daher ist

eine Untersuchung mit einem Ultraschallmikroskop (SAM) vor dem BST zu empfehlen. Im Rahmen dieser Untersuchung stand kein SAM zur Verfügung.

Weiterhin könnten mechanische Prozesse diese Schwankungen mitbegründen. Zu den mechanischen Prozessen zählen das Relaxieren des Stahlplättchens aufgrund eines möglichen Verzugs nach dem FAM-Prozess oder ein Anhaften der Prüfkörper nach dem FAM-Prozess in der Kavität, sodass der Substraträger beim Öffnen des Werkzeugs im Top-Insert hängen bleibt. Im letztgenannten Fall würde beim Entformen der Substraträger auf das Bottom-Werkzeug fallen, was zu einer weiteren mechanischen Vorschädigung der Verbindung führen kann. Ein Messfehler kann auch aufgrund der Bewegung des Stahlplättchens auf dem Messtisch des Schergerätes entstehen. Dies wäre bei verzogenen Substraträgern möglich, da sie trotz fester randseitiger Einspannung während des Scherprozesses nachgeben können.

Auf den Stahlplättchen mit der PTFE-Beschichtung bleibt nach dem FAM-Prozess kein Prüfkörper haften, sondern die Prüfkörper fallen mit dem Anguss ab. Deshalb kann keine Haftfestigkeit für diese Oberflächenbeschichtung gemessen werden.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchung sind, dass, bis auf die PTFE-Beschichtung, keine der hier geprüften Beschichtungsmethoden das Anhaften der EMC-Schmelze an den Substraträger verhindert. Die PTFE-Beschichtung ist daher die einzige Antihaftbeschichtung und sollte im Prototypenwerkzeugbau Anwendung finden.

### 7.3 Haftung auf den Leiterplattenoberflächen

In diesem Abschnitt wird die Haftfestigkeit von zwei EMC untersucht. Zum einen wird, wie schon im vorherigen Kapitel, das Material G770H und zum anderen EP-105 der Raschig GmbH mit unterschiedlichen Anteilen an Entformungshilfe verwendet, um den Einfluss der Entformungshilfe auf die Haftung des EMC auf den unterschiedlichen PCB-Oberflächen zu untersuchen. Als PCB stehen zwei verschiedene Typen von FR4-Leiterplatten zur Verfügung, zum einen ein FR4 mit einem  $T_g$  von  $135^\circ\text{C}$  (PCB 1) und zum anderen ein FR4 mit einem  $T_g$  von  $150^\circ\text{C}$  (PCB 2). Beide PCB besitzen dasselbe Layout mit drei leiterplattentypischen Oberflächen wie Lötstopplack (LL), FR4-Basismaterial (FR4) und Goldfinish (Abb.7.1-2b). Das Goldfinish bei PCB 1 ist dabei galvanisch Au, was auch als Softgold (S-Au) bezeichnet wird. Die Schichtdicken betragen dabei  $35\ \mu\text{m}$  Cu,  $>4\ \mu\text{m}$  Ni und für die Au-Draht-Bonding-Fähigkeit  $0,2\dots0,5\ \mu\text{m}$  Au als Finish [56]. Die Oberflächen FR4 und LL sind bei dieser PCB-Variante halogenhaltig. PCB 1 wird für die Untersuchungen zum Einfluss des Angusses, des Aushärtedrucks  $p_c$ , der Plasmavorbehandlung sowie des Entformungshilfeanteils auf die Haftfestigkeit der EMC auf den verschiedenen PCB-Oberflächen verwendet. PCB 2 unterscheidet sich von PCB 1 nicht nur bezüglich des  $T_g$ , sondern auch im Goldfinish sowie dem Halogenanteil in der FR4-Oberfläche, diese ist halogenarm. Das Goldfinish ist ENEPIG. Chemisch besteht diese Metallisierung aus Kupfer-

fer (Cu), Nickel (Ni), Palladium (Pd) und Gold (Au). Die Schichtdicken sind dabei  $35 \mu\text{m}$  Cu,  $3...7 \mu\text{m}$  Ni,  $0,05...0,3 \mu\text{m}$  Pd und  $0,04...0,1 \mu\text{m}$  Au [56]. Der Pd-Anteil ist eine Barrierschicht zwischen Ni und Au und verhindert, dass oxidiertes Ni an die Au-Oberfläche gelangen kann. Damit wird die Au-Draht-Bondbarkeit der Oberfläche gewährleistet. Im Vergleich zum S-Au ist dieses Finish ressourcenschonend, was sich vor allem in der dünneren Au-Schicht äußert. PCB 2 wird für die Untersuchungen zum Einfluss der Plasmavorbehandlung sowie anderer Arten der Oberflächenaktivierung auf die Haftfestigkeit der EMC auf den verschiedenen PCB-Oberflächen verwendet. Dabei wird auch der Einfluss der Abweichung des Goldfinish sowie des Halogenanteils im FR4 bewertet.

### 7.3.1 Einfluss des Angusses auf die Haftfestigkeit des Prüfkörpers

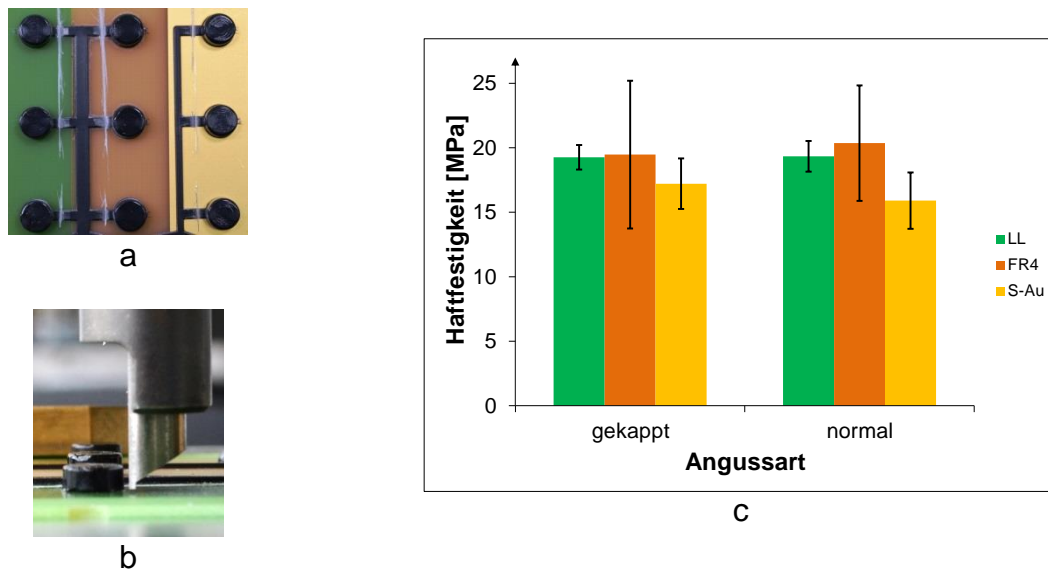


Abb.7.3.1-1: Untersuchung zum Einfluss des Angusses auf die Ergebnisse der Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au. Dabei zeigt a) die mittels einer Feile gekappten Angüsse zu den Prüfkörpern, b) den senkrecht zum Anguss angesetzten Schermeißel und c) die Ergebnisse in einem Säulendiagramm.

Tab.7.3.1-1: Mittelwerte und Standardabweichung der Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au für normale und gekappte Angüsse.

Angussart	LL	FR4	S-Au	
gekappt	19,3	19,5	17,2	Mittelwert [MPa]
	1,0	5,7	2,0	Standardabweichung [MPa]
normal	19,3	20,4	15,9	Mittelwert [MPa]
	1,2	4,5	2,2	Standardabweichung [MPa]

Zunächst wird der Einfluss des Angusses auf das Messergebnis der Haftfestigkeit des EMC-Prüfkörpers auf verschiedenen Oberflächen überprüft. Dabei werden auf sechs Mustern von PCB 1 Prüfkörper mittels FAM aufgebracht. Vier davon werden nach dem FAM-Prozess präpariert, indem der Anguss mittels einer Feile vom Prüf-

körper getrennt wird (Abb.7.3.1-1a). Die Präparation wird etwas entfernt vom Prüfkörper durchgeführt, damit durch das Präparieren mittels einer Feile keine mechanische Vorschädigung am Prüfkörper eingebracht wird. Zwei der PCB 1-Muster werden zum Vergleich unverändert beibehalten. Als Scherrichtung wird der Schermeißel senkrecht zum Anguss an den Prüfkörper angesetzt (Abb.7.3.1-1b). Die Scherhöhe beträgt dabei  $450\ \mu\text{m}$  und die Schergeschwindigkeit  $50\ \mu\text{m/s}$ . Zur Reinigung der Oberfläche wird  $\text{O}_2$ -Plasma verwendet. Die Ergebnisse sind in Abb.7.3.1-1c in einem Säulendiagramm dargestellt. Die gemittelten Ergebnisse mit der dazugehörigen Standardabweichung zeigt Tab.7.3.1-1. Anhand eines T-Tests wurde die Signifikanz des dargestellten Ergebnisses überprüft. Das Trennen des Angusses besitzt demnach keine Signifikanz auf den Wert der Haftfestigkeit. Bei der Überprüfung der Angussbruchfläche mittels Mikroskopie wird deutlich, dass der Prüfkörper am Anguss häufig undefiniert bricht und dass der Anguss trotz Präparation auch nach der Scherung des Prüfkörpers haften bleibt (Abb.7.3.1-2).

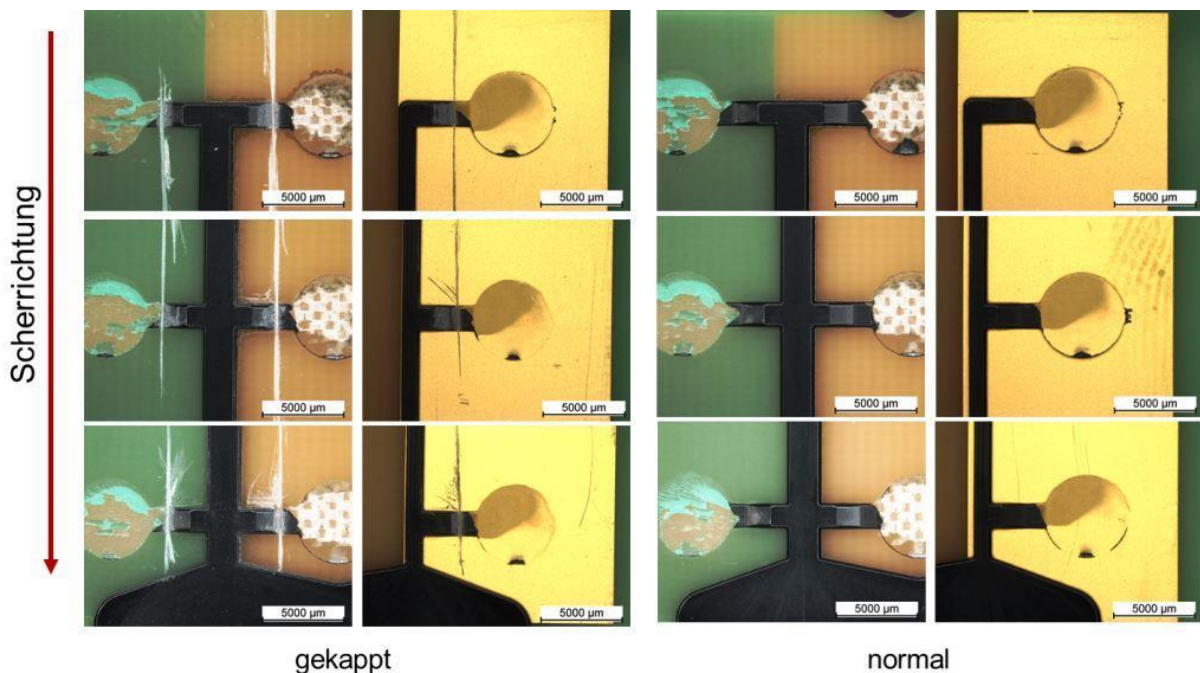


Abb.7.3.1-2: Vergleich der Angussbruchfläche bei der Untersuchung zum Einfluss des Angusses auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au.

Aus dieser Untersuchung wird ersichtlich, dass der Anguss eine Fehlerquelle für den ermittelten Spannungswert darstellt, da er zum Teil mit dem Prüfkörper abgeschert wird und eine Bruchfläche zurückbleibt oder nach dem Schertest stehen bleibt. Dieser Fehler wird jedoch als gering eingestuft, da die Flächenvergrößerung durch diesen nicht einstellbaren Anteil in Relation zur gesamten Bruchfläche minimal ist. Deshalb wird dieser Effekt in den folgenden Untersuchungen vernachlässigt.

Bei der Analyse der einzelnen Bruchflächen (Abb.7.3.1-3) fällt auf, dass sich der LL nach der Abscherung der Prüfkörper größtenteils ablöst und in unterschiedlichen Anteilen am Prüfkörper oder am FR4 verbleibt bzw. teilweise abblättert. Zudem zeigt

sich am Ansatz der Scherwirkung eine leicht aufgehellte LL-Schicht, die dann in ein milchiges Grün übergeht (abgeblätterter LL). Daran wird ersichtlich, dass der Prüfkörper durch den Schermeißel eine Zugbelastung erfährt, die einen Bruchspalt öffnet und sich zunächst mit der Wucht der einwirkenden Scherkraft der LL vom FR4 löst, bis dieser durch Risse soweit geschädigt wird, dass er ab einer kritischen Bruchaufweitung am EMC verbleibt und sich stattdessen vom FR4 ablöst. Damit ist die Bruchfläche als Mischbruch zu bewerten und möglicherweise ist hierbei die Grenze der Haftfestigkeit des LL auf dem FR4 fast erreicht.

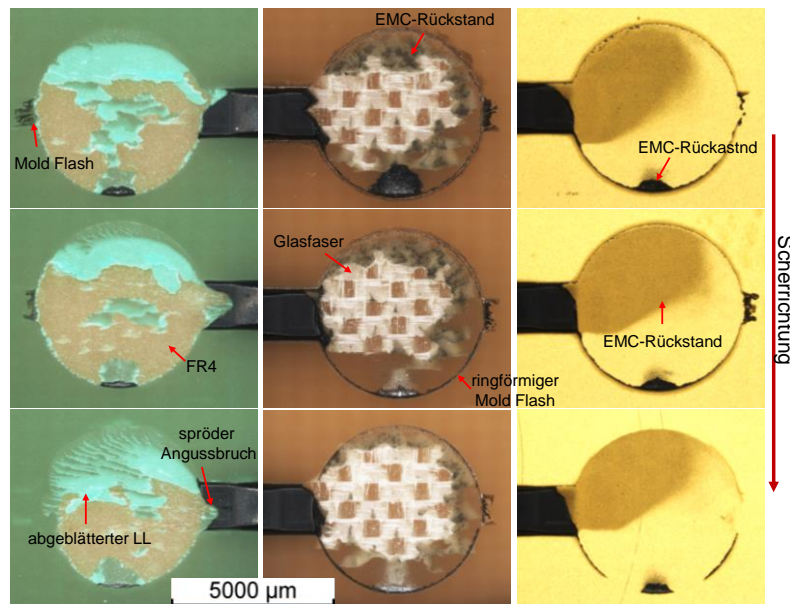


Abb.7.3.1-3: Überprüfung der Bruchflächen der Untersuchung zum Einfluss des Angusses auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au.

Auf dem FR4 kann ein ähnliches Bruchverhalten beobachtet werden, wobei sich der Harzanteil aus dem FR4 von der Glasfasermatte des Prepregs löst und diese offen auf der Bruchfläche zu sehen ist. Beim S-Au tritt ein Mischbruch auf, da ein EMC-Rückstand auf der Metalloberfläche beobachtet werden kann und ein Teil der Bruchfläche aus blankem S-Au besteht. Hierbei ist der Bruchmechanismus vermutlich ähnlich dem des LL, nur dass sich der am S-Au anhaftende Epoxidanteil des EMC mit Einsetzen der Scherkraft vom EMC löst und auf der Grenzfläche zurückbleibt, bis der Bruchspalt zu einem kritischen Maß geöffnet wird, sodass ab diesem Punkt die einwirkende Scherkraft die Adhäsion des EMC übersteigt und sich der Prüfkörper von S-Au vollständig ablöst.

Eine weitere Auffälligkeit bei der Analyse der Bruchfläche ist, dass nach der Abscherung der Prüfkörper ein EMC-Rest auf der Bruchfläche verbleibt, der sich immer an der Stelle befindet, die dem Schermeißel gegenüberliegt. Möglicherweise ist dies durch die an dieser Stelle wirkende Druckspannung auf den Prüfkörper beim Schervorgang begründet. Dieser Rest könnte zu geringfügigen Messfehlern führen. Ansonsten zeigt sich ein gut ausgebildeter ringförmiger Mold Flash, der um die Bruchfläche verläuft. Gut zu erkennen sind Anteile des Mold Flash an den Positionen der



Ventings, was ein Indiz für die luftabschlussfreie Grenzfläche zwischen dem Prüfkörper und den jeweiligen Oberflächen darstellt.

### 7.3.2 Einfluss des Aushärte drucks $p_c$ und der Plasmavorbehandlung auf die Haftfestigkeit

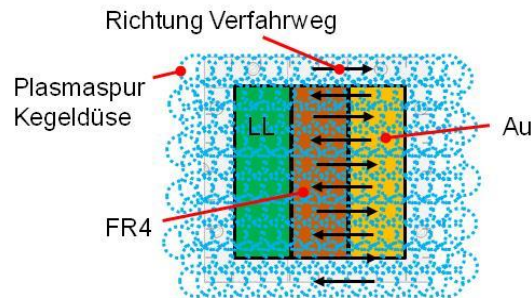


Abb.7.3.2-1: Schematische Darstellung des Verfahrensweges der Kegeldüse der  $N_2/O_2$ -Plasmaanlage über die Substratoberfläche.

Tab.7.3.2-1: Verwendete Plasmaparameter zur Oberflächenaktivierung des Substrats.

Plasmaanlage	Betriebsgas	Stufe	Vorschub	Bahnabstand	Höhe	Einwirkzeit
Plasmatreat 210251	$N_2/O_2$	--	100 mm/s	10 mm	8 / 4 mm	--
diener Femto	$O_2$	5	--	--	--	1 min

Nachfolgend sollen die möglichen Oberflächenaktivierungsmaßnahmen zur Steigerung der Haftung auf den drei PCB-Oberflächen untersucht werden. Dazu stehen als Vorbehandlungsmethoden ein Sauerstoff-Niederdruckplasma ( $O_2$ -Plasma) und ein Atmosphärenplasma ( $N_2/O_2$ -Plasma) zur Verfügung. Ein Plasma kann auf zwei Arten wirken: Zum einen werden organische Verunreinigungen von der Oberfläche entfernt und zum anderen werden unpolare Kunststoffoberflächen durch Anlagerung von Sauerstoff polarer, sodass diese besser benetzt werden können [57]. Neben der Art des eingesetzten Gases besteht der Unterschied zwischen den verwendeten Plasmaarten darin, dass für die  $O_2$ -Plasmaanwendung eine Niederdruckkammer der Firma *diener Femto* verwendet wird und die  $N_2/O_2$ -Plasmaanwendung mit dem Plasmatreat 210251 der Firma *Plasmatreat* bei Atmosphärendruck durchgeführt wird. Zudem fährt bei dem  $N_2/O_2$ -Plasma die Kegeldüse in einer definierten Höhe  $h$ , mit einem definierten Vorschub und Stich über die Substratfläche. Abb.7.3.2-1 zeigt den prinzipiellen Überfahrtweg über die PCB-Oberfläche. Es zeigt sich, dass aufgrund von Überlappungsbereichen der Plasma spur nach der  $N_2/O_2$ -Plasmaaktivierung Stellen auf dem Substrat stärker und schwächer aktiviert werden. Anders verhält es sich beim  $O_2$ -Plasma, bei dem die Oberfläche annähernd homogen aktiviert wird. In Tab.7.3.2-1 sind die verwendeten Plasmaparameter dargestellt. Als Stufe ist hierbei die über einen Regler einstellbare Plasmaintensität gemeint, die von 0-10 einstellbar ist und die Einwirkzeit ist die Zeit, in der das Substrat dem Plasma ausgesetzt ist. Die Höhe der Kegeldüse beim  $N_2/O_2$ -Plasma steuert die auf die Oberfläche wirkende

Plasmaintensität. Für diese Untersuchung wird die Höhe der Kegeldüse auf  $8\text{ mm}$  eingestellt.

Zum Umfang dieser Untersuchung gehört neben den Oberflächenaktivierungen mittels eines Plasmas die Überprüfung des Einflusses vom Aushärte­druck  $p_c$  auf die Anhaftung des Prüfkörpers. Dabei wird als niedrigster Wert  $p_c = 30\text{ bar}$  und als höchster Wert  $p_c = 60\text{ bar}$  beim FAM-Prozess angewendet. Grund für die Wahl sind Erfahrungswerte aus diversen Untersuchungen. Bei  $p_c = 30\text{ bar}$  wird sichergestellt, dass Lufteinschlüsse in der Fließfront vermieden werden, und  $p_c = 60\text{ bar}$  ist als höchster Nachdruck zu betrachten, der für das leiterplattenbasierte Packaging verwendet werden kann, sodass sichergestellt ist, dass das PCB unversehrt den Prozess übersteht.

Es werden jeweils sechs Muster von PCB 1 im FAM-Prozess verarbeitet und damit eine Ausbeute von max. 18 Prüfkörpern pro Oberfläche (LL, FR4, S-Au) erzielt. Nach der optischen Inspektion des Herstellungsergebnisses werden die Prüfkörper, die ein Fehlerbild nach Tab.7.1-1 aufweisen, aussortiert. In Abb.7.3.2-2 und Tab.7.3.2-2 ist das Ergebnis der gemessenen Haftfestigkeiten im Vergleich der Varianten dargestellt.

Werden die Mittelwerte der Oberflächen miteinander verglichen, stellt sich heraus, dass die Änderung des Aushärte­drucks  $p_c$  keine Auswirkung auf die Haftung des EMC auf den PCB-Oberflächen hat. Dies wird durch einen T-Test an den Messergebnissen bestätigt. Deshalb ist diese Parametereinstellung nicht signifikant für die Haftfestigkeit des EMC. Jedoch zeigt sich, dass die Art der Vorbehandlung eine signifikante Größe für die Haftung ist. Ohne Plasmavorbehandlung sind die gemittelten Scherspannungen kleiner als bei den durch die Plasmabehandlung aktivierten Oberflächen. Dabei stellt sich heraus, dass das eingesetzte Plasma die Haftung auf der S-Au-Oberfläche um ca.  $4\text{ MPa}$  anhebt. Da Au als Edelmetall nicht zur Oxidation neigt, ist dieser Effekt überraschend. Das könnte mit der oberflächennahen Ni-Schicht zusammenhängen. Denn aus dem Draht-Bonding ist bekannt, dass eine Ni-Schicht zwischen Kupfer und Gold zur Oxidation neigt. Damit kann das Benetzungsverhalten von der EMC-Schmelze verbessert werden, was die Haftfestigkeit steigern würde. Mit der Anzahl der Messungen wird in Tab.7.3.2-2 die Anzahl der gescherten Prüfkörper bezeichnet. Die fehlenden Messungen zu 18 kommen zum einen durch die Aussortierung (Fehlerbild 1-3 und 5) und zum anderen durch das Auftreten des Fehlerbildes 4 zustande, das überwiegend bei S-Au ohne Plasma zu beobachten ist. Deshalb kann abgeleitet werden, dass eine Plasmavorbehandlung des S-Au notwendig ist, um die Oberfläche zu reinigen, indem sie von organischen Rückständen befreit wird.

Auf dem LL kann eine ähnliche Beobachtung zur Haftfestigkeit wie bei S-Au gemacht werden. Die Plasmaaktivierung steigert die gemittelte Scherspannung um ca.  $4\text{ MPa}$  und zudem sinkt die Standardabweichung unterhalb von  $10\%$ , wodurch die Qualität der Haftung des EMC auf LL durch die Vorbehandlung verbessert wird. Eventuell

wird der LL durch die Plasmaeinwirkung aufgeraut, was zu einer zusätzlichen Verankerung des EMC auf dieser Oberfläche führen könnte [57]. Bei den bisherigen Beobachtungen spielt die Art der Plasmabehandlung keine Rolle.

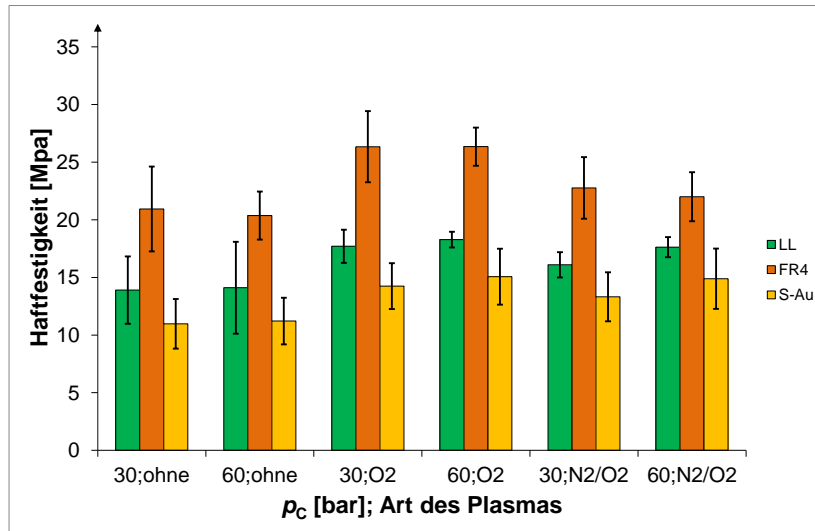


Abb.7.3.2-2: Säulendiagramm zu den Ergebnissen der Untersuchung zum Einfluss des Aushärtedrucks  $p_c$  und verschiedener Oberflächenaktivierungsmaßnahmen auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au.

Tab.7.3.2-2: Mittelwerte und Standardabweichung der Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au für verschiedene Aushärtedrucke und Oberflächenaktivierungen.

$p_c$ [bar]	Plasma	LL	FR4	S-Au	
30	ohne	13,9	20,9	11,0	Mittelwert [MPa]
		2,9	3,7	2,2	Standardabweichung [MPa]
		14	18	9	Anzahl Messungen
60	ohne	14,1	20,4	11,2	Mittelwert [MPa]
		4,0	2,1	2,0	Standardabweichung [MPa]
		17	18	12	Anzahl Messungen
30	O <sub>2</sub>	17,7	26,3	14,2	Mittelwert [MPa]
		1,4	3,1	2,0	Standardabweichung [MPa]
		18	18	14	Anzahl Messungen
60	O <sub>2</sub>	18,3	26,3	15,1	Mittelwert [MPa]
		0,7	1,7	2,4	Standardabweichung [MPa]
		18	18	18	Anzahl Messungen
30	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	16,1	22,8	13,3	Mittelwert [MPa]
		1,1	2,7	2,1	Standardabweichung [MPa]
		18	18	14	Anzahl Messungen
60	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	17,6	22,0	14,9	Mittelwert [MPa]
		0,9	2,1	2,6	Standardabweichung [MPa]
		17	17	15	Anzahl Messungen

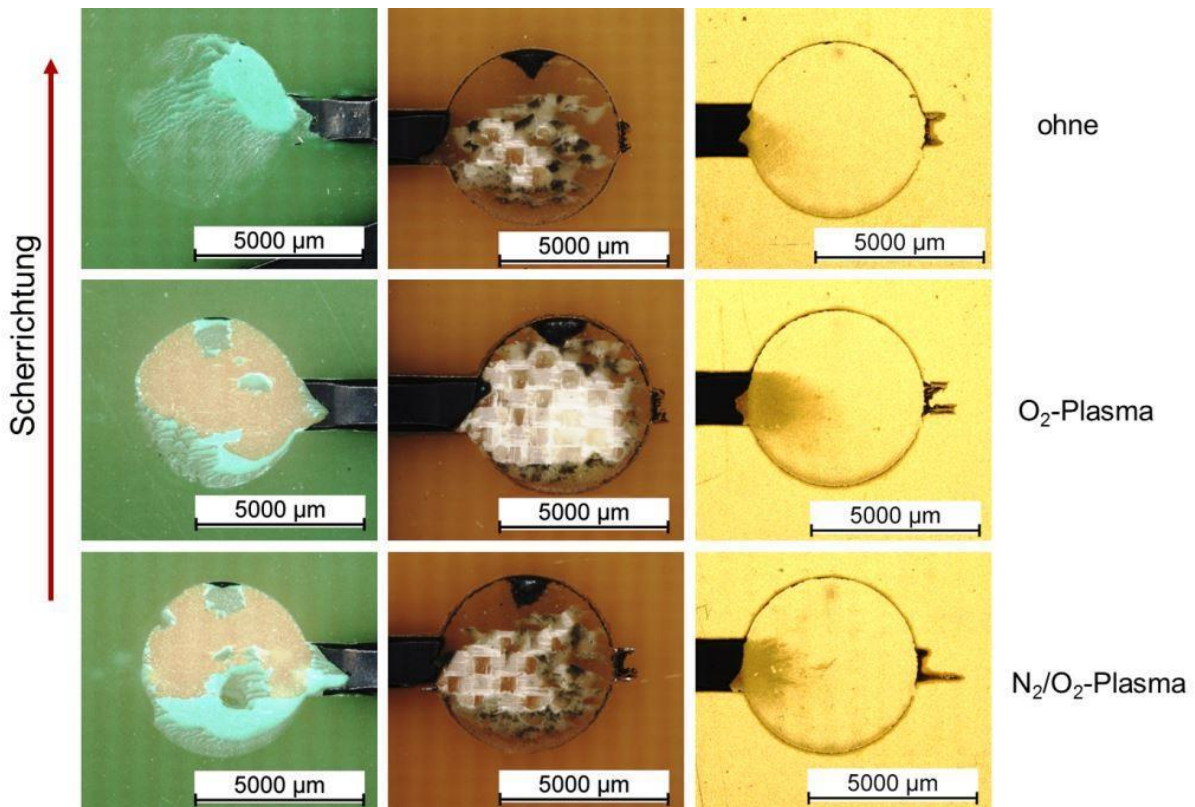


Abb.7.3.2-3: Repräsentative Bruchflächen aus der Untersuchung zum Einfluss des Aushärtedrucks  $p_c$  und verschiedener Oberflächenaktivierungsmaßnahmen auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und S-Au.

Dies verhält sich bei der FR4-Oberfläche anders. Hier zeigt sich schon ohne Plasmaaktivierung die höchste Haftung des EMC auf der Oberfläche. In Relation heißt das, dass die Haftfestigkeit von FR4 im Gegensatz zu LL fast um ein Drittel höher und zu S-Au nahe doppelt so hoch ist. Die Haftung ist ausgezeichnet und benötigt keine Erhöhung durch eine Oberflächenaktivierung. Im Vergleich zur ersten Untersuchung aus Tab.7.3.1-1 wird hier ohne O<sub>2</sub>-Plasma annähernd der gleiche Haftfestigkeitswert erreicht. Möglicherweise hängt das mit verschiedenen äußeren Einflussfaktoren auf den FAM-Prozess, wie Werkzeugeinstellung, PCB-Dickenverhältnis und Raumklima, zusammen. Dies wird hier nicht näher betrachtet. Beim Vergleich der Wirkung der benutzten Plasmabehandlungen kann festgestellt werden, dass das Niederdruck-O<sub>2</sub>-Plasma den größten Anstieg der Haftung des EMC auf FR4 bewirkt. Atmosphären- N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Plasma hingegen erhöht die Haftwirkung des EMC nur gering, wobei der Einfluss nicht als signifikant eingestuft werden kann, da sich die Fehlerbalken auf Basis der Standardabweichungen stark überlappen. Die Ausbeute der Prüfkörper ist bei FR4 99,1 %. Vermutlich hängt dies mit der Flächenhöhe zusammen, die im Vergleich zu S-Au ca. 20 µm und zu LL etwa 40 µm tiefer liegt. So wirkt beim FAM-Prozess die geringste Auflagespannung auf dieser Oberfläche und dies hat den Vorteil, dass die Folie entspannter aufliegt, das FR4 nicht zu stark gepresst wird sowie die Ventings offen liegen. Das sind präventive Bedingungen, um die Fehlerbilder 1 bis 5 zu vermeiden. Die beiden anderen Oberflächen werden stärker belastet, was

im schlimmsten Fall zu einer mechanischen Vorschädigung führen kann. Dies kann aber für die hier durchgeführte Untersuchung durch die Betrachtung der Bruchbilder ausgeschlossen werden (Abb.7.3.2-3). Die dargestellten Bruchflächen sind repräsentativ für die jeweilige Oberflächenaktivierung zusammengestellt. Der unterschiedliche Aushärteindruck  $p_c$  zeigte dabei keinen Unterschied.

Bei der Analyse der Bruchfläche wird deutlich, dass ohne eine Plasmaaktivierung der LL größtenteils auf der FR4-Oberfläche verbleibt und überwiegend Adhäsionsbrüche zu beobachten sind. Beim FR4 ohne Vorbehandlung liegt ein kleinerer Kohäsionsbruch auf der FR4-Oberfläche vor als bei den mittels Plasma behandelten FR4-Oberflächen. Die Oberfläche, die mit O<sub>2</sub>-Plasma vorbehandelt wurde, zeigt überwiegend Kohäsionsbruch des FR4, wobei teilweise das Epoxid aus den Maschen der darunter liegenden Glasfasermatten abgetrennt wird. Auf den S-Au-Oberflächen ist überwiegend eine Bruchfläche zu sehen, die typisch für den Adhäsionsbruch ist.

Als Fazit dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass sich eine Oberflächenaktivierung mittels Plasma zur Steigerung der Haftfestigkeit, die sich in einer höheren Scherspannung ausdrückt, auf allen untersuchten Oberfläche eignet, im Fall der FR4-Oberfläche aber nicht nötig ist. Die Wirkung des Aushärte drucks  $p_c$  auf die Haftfestigkeit ist nicht signifikant und kann für weitere Betrachtungen vernachlässigt werden.

### **7.3.3 Einfluss der Pd-Barriere und des Halogenanteils im FR4 auf die Haftfestigkeit**

Im Folgenden wird die Haftung des EMC auf ENEPIG überprüft. Dafür werden die PCB 2-Muster verwendet, die vom selben Hersteller wie im Fall von PCB 1 bezogen wurden. Da die in Kapitel 5 diskutierten FlexPac zum größten Teil mittels Au-Draht-Bonds zwischen ASIC und PCB aufgebaut werden, sind die Ergebnisse dieser Untersuchung relevant für die Eignung des FlexPac als Serienprozess. Des Weiteren wird der Einfluss eines geringen Halogenanteils in der FR4-Oberfläche auf die Haftung des EMC hin überprüft. Dies geschieht aus dem Grund, dass Halogene im Kunststoff dazu führen können, dass Feuchte aus der Umgebung über Osmose in den Kunststoff eindringen kann und damit ein Zuverlässigkeitsrisiko darstellt. Um die Haftungsergebnisse besser mit den vorhergehenden Untersuchungen vergleichen zu können, werden zudem die Oberflächenaktivierungsmaßnahmen wie in Kapitel 7.3.2 angewandt und mit einer Nassreinigung erweitert. Dabei handelt es sich um eine Reinigung mittels einer Mucasollösung 2,5 % (M). Das ist eine Seifenlösung, die Fette und Verunreinigungen von Oberflächen beseitigt. Sie soll den Erkenntnisraum zur Steigerung der Haftfestigkeit eines EMC auf den PCB-Oberflächen erweitern. Die Reinigung mit M wird mittels eines Ultraschallbads für 15 min bei 80°C durchgeführt.

Anschließend wird für *2 min* eine Spülung mit de-ionisiertem Wasser durchgeführt und danach folgt eine Trocknung der gereinigten Substrate für *3 h* bei  $80^{\circ}\text{C}$ .

Die Prüfvorschrift wird bei dieser Untersuchung verändert, da der Einfluss der Prüfvorschrift auf die Haftfestigkeitsergebnisse untersucht werden soll. Dabei drückt der Schermeißel auf die angussferne Seite des Prüfkörpers mit einer Geschwindigkeit von  $100\ \mu\text{m/s}$  und einer Scherhöhe von  $50\ \mu\text{m}$  über der Substratoberfläche. Damit soll überprüft werden, ob die Scherspannung durch die Anpassungen beeinflusst wird und der Prüfkörper am Ansatz des Angusses bricht. Die Scherhöhe zu minimieren, hat den Vorteil, dass der Anteil der wirkenden Zugspannung beim Schertest durch den niedrig angesetzten Meißel minimiert wird und überwiegend eine Scherspannung wirkt. Dies sollte auf unnachgiebigen Oberflächen möglich sein, jedoch ist zu erwarten, dass die Polymeroberfläche der PCB diese Maßnahme relativiert. Die schnellere Fahrgeschwindigkeit des Meißels könnte dazu beitragen, dass die Trägheit des Prüfkörpers eine stärkere Gegenkraft beim Prüfkörperauftreffen bewirkt und die Messung um die Hälfte der Messzeit verkürzt wird.

Da die Atmosphärenplasma-Anlage für einen Serienfertigungsprozess besser geeignet ist als ein Niederdruckplasma, wird damit in dieser Untersuchung eine größere Messreihe mit max. 64 Prüfkörpern je Oberfläche erhoben. Auch hierbei werden die PCB nach dem FAM inspiziert und Prüfkörper, die fehlerhaft sind, aussortiert. In Abb.7.3.3-1 und in Tab.7.3.3-1 ist das Ergebnis dieser Untersuchung gezeigt. Die mittlere Haftfestigkeit von EMC auf ENEPIG liegt am Grenzwert von  $5\ \text{MPa}$  und einzelne Messwerte aufgrund der großen Standardabweichung sogar darunter. Die Haftfestigkeit wird nicht signifikant durch eine der Oberflächenmodifikationen angehoben. Die Pd-Schicht zwischen Au und Ni könnte dies verursachen. Da aus dem Draht-Bonding-Prozess bekannt ist, dass für das Au-Draht-Bonding eine oxidarme Au-Oberfläche vorliegen muss, fungiert die Pd-Schicht als Sperrschicht für die Ni-Schicht. Das Ni kann damit nicht mehr mit Sauerstoffmolekülen aus der Atmosphäre interagieren, wie in Kapitel 7.3.2 erwähnt. Deshalb könnte das Benetzungsverhalten der EMC-Schmelze unbeeinflusst von der Oberflächenmodifizierung sein. Aus diesem Grund wäre eine großflächige ENEPIG-Oberfläche für ein FlexPac mit dem Risiko der Delamination zwischen den Grenzflächen verbunden.

Für die Polymeroberflächen zeigt sich ohne und mit  $\text{O}_2$ -Plasma das gewohnte Bild aus der vorhergehenden Untersuchung (Kapitel 7.3.2), nur mit einer höheren Standardabweichung. Für diesen Fall scheint die veränderte Prüfvorschrift keinen Effekt zu haben.

Bei FR4 hingegen zeigt sich ein schwächeres Haftverhalten bei der Vorbehandlung mit Atmosphärenplasma ( $\text{N}_2/\text{O}_2$ -Plasma). Dies hängt vermutlich mit der Halogenarmut der FR4-Oberfläche zusammen, die durch  $\text{N}_2/\text{O}_2$ -Plasma nicht gleichwertig zu der FR4-Oberfläche der PCB 1 aktiviert wird. Das lässt den Schluss zu, dass das Fehlen von Halogenen in der FR4-Oberfläche eine Abnahme der Polarität beim Ein-

satz des  $N_2/O_2$ -Plasmas bewirkt. Damit ist dieser Plasmotyp für eine halogenarme Kunststoffoberfläche ungeeignet.

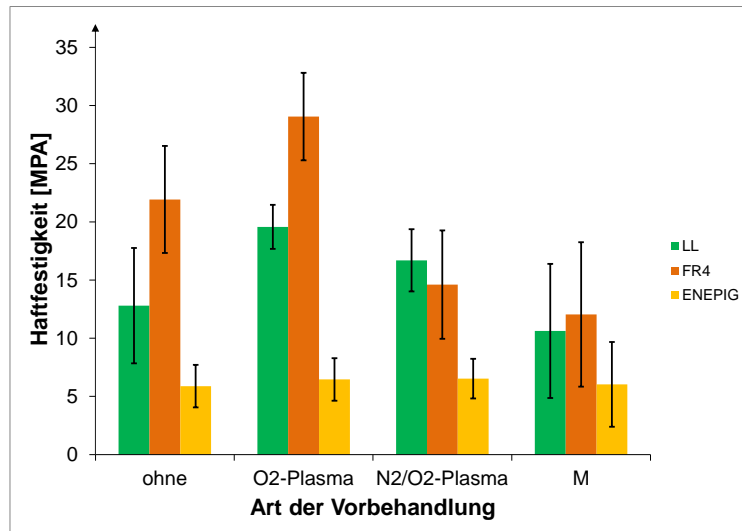


Abb.7.3.3-1: Säulendiagramm zum Einfluss der verschiedenen Oberflächenaktivierungsmaßnahmen auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und ENEPIG.

Tab.7.3.3-1: Mittelwert und Standardabweichung der Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und ENEPIG für verschiedene Oberflächenaktivierungen.

Vorbehandlung	LL	FR4	ENEPIG	
ohne	12,8	21,9	5,9	Mittelwert [MPa]
	5	4,6	1,8	Standardabweichung [MPa]
	18	18	18	Anzahl Messungen
O <sub>2</sub>	19,6	29,1	6,5	Mittelwert [MPa]
	1,9	3,8	1,8	Standardabweichung [MPa]
	18	18	18	Anzahl Messungen
N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	16,7	14,6	6,5	Mittelwert [MPa]
	2,7	4,7	1,7	Standardabweichung [MPa]
	63	64	63	Anzahl Messungen
M	10,6	12,0	6,0	Mittelwert [MPa]
	5,8	6,2	3,6	Standardabweichung [MPa]
	16	14	16	Anzahl Messungen

Die Reinigung mit M ergibt für alle Oberflächen, im Vergleich zu allen hier diskutierten Untersuchungen, die höchste Standardabweichung, größer 50 % der gemittelten Scherspannung. Dies könnte daran liegen, dass trotz eines Spülungsschritts M-Reste auf den Oberflächen zurückbleiben, die die Benetzung durch die EMC-Schmelze verringern. Dies muss jedoch an anderer Stelle untersucht werden. Damit ist eine solche Reinigung der Oberfläche für die Herstellung eines FlexPac ungeeignet, da keine reproduzierbare Haftung gewährleistet werden kann.

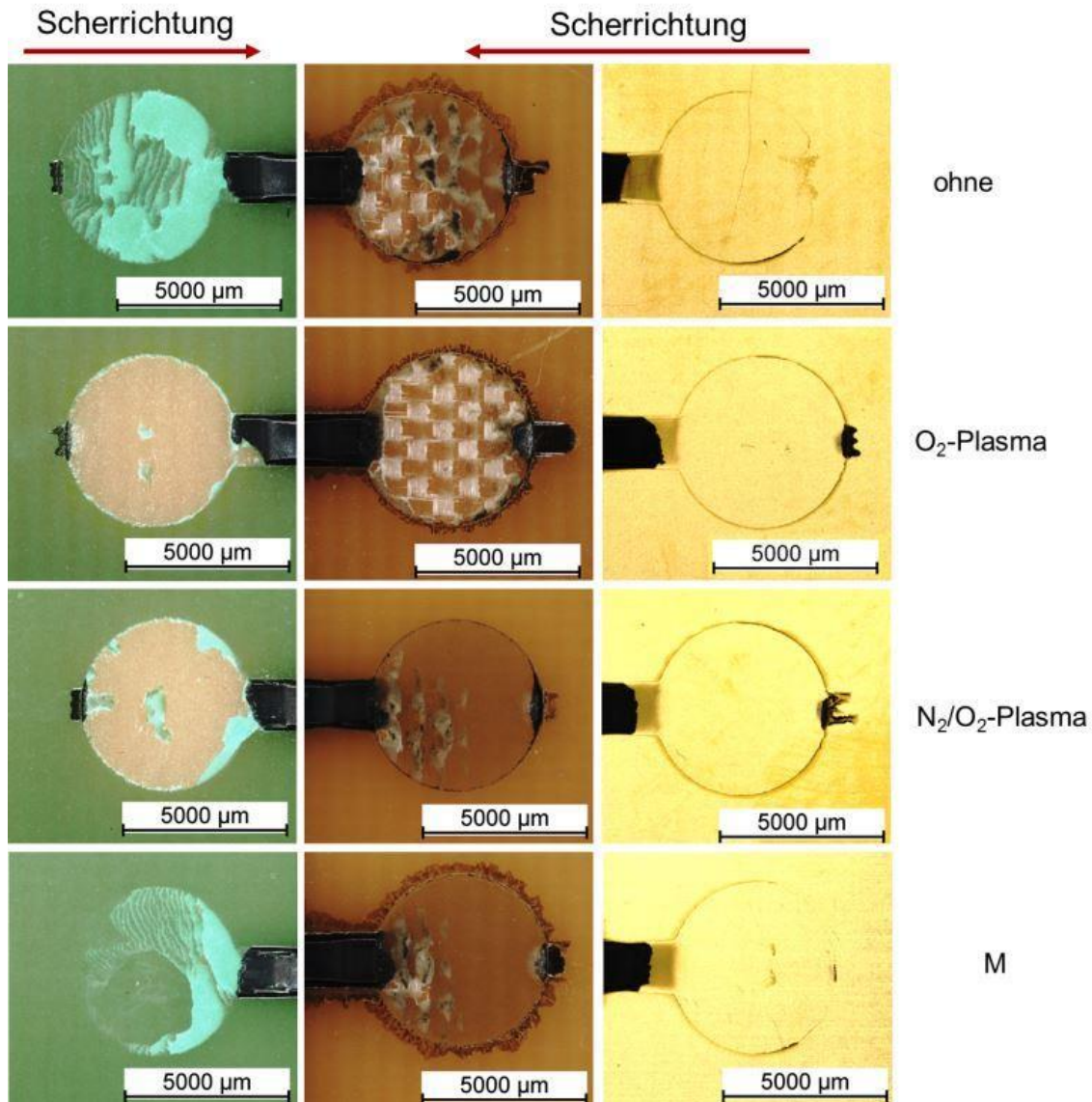


Abb.7.3.3-2: Repräsentative Bruchflächen zum Einfluss der verschiedenen Oberflächenaktivierungsmethoden auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und ENEPIG.

Anhand der Inspektion der Bruchflächen zeigt sich, dass ENEPIG ohne Vorbehandlung keinen vollständig kreisrunden Mold Flash aufweist (Abb.7.3.3-2). Das deutet darauf hin, dass die Luft während des FAM-Prozesses nicht aus der Kavität entweichen konnte und damit die tatsächliche Bruchfläche verringert wurde. Deshalb ist vermutlich die gemittelte Haftfestigkeit etwas niedriger, als wenn die tatsächliche Bruchfläche zur Bestimmung herangezogen worden wäre. Dennoch zeigt die ermittelte Standardabweichung keinen zu großen Unterschied zu den vorherigen Untersuchungen auf einem Goldfinish.

Besonders auffällig sind die kreisrunden Bruchflächen von LL und FR4 bei einer O<sub>2</sub>-Plasma Vorbehandlung. Bei LL deutet das auf einen überwiegend reinen Adhäsionsbruch des LL auf FR4 hin, was bedeuten würde, dass im Experiment die Haftung des LL auf FR4 bestimmt wurde. Demnach ist die Haftung zwischen dem EMC-



Prüfkörper und LL höher, kann jedoch durch die schwächere Haftung des LL auf FR4 nicht gemessen werden. Bei FR4 handelt es sich um einen reinen Kohäsionsbruch des FR4. Es kann davon ausgegangen werden, dass hier ebenfalls nicht die tatsächliche Haftung zwischen EMC-Prüfkörper und FR4 ermittelt werden konnte. Deshalb ist bei diesen beiden PCB-Oberflächen das PCB die Schwachstelle.

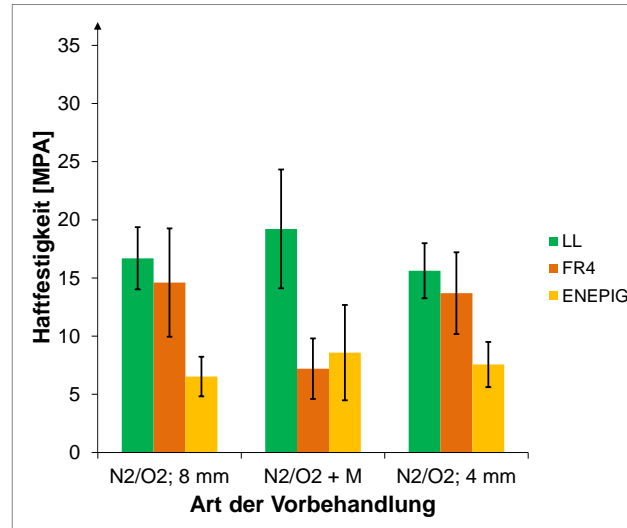


Abb.7.3.3-3: Säulendiagramm zu den Ergebnissen der erweiterten Untersuchung zum Einfluss der verschiedenen Oberflächenaktivierungsmaßnahmen auf die Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und ENEPIG.

Tab.7.3.3-2: Mittelwert und Standardabweichung der Haftfestigkeit eines EMC auf LL, FR4 und ENEPIG für verschiedene Oberflächenaktivierung.

Vorbehandlung	LL	FR4	ENEPIG	
N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	16,7	14,6	6,5	Mittelwert [MPa]
	2,7	4,7	1,7	Standardabweichung [MPa]
	63	64	63	Anzahl Messungen
N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> + M	19,2	7,2	8,6	Mittelwert [MPa]
	5,1	2,6	4,1	Standardabweichung [MPa]
	17	18	17	Anzahl Messungen
N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ; 4 mm	15,6	13,7	7,6	Mittelwert [MPa]
	2,4	3,5	1,9	Standardabweichung [MPa]
	21	21	21	Anzahl Messungen

Einen weiteren Kontrast zu den vorher diskutierten Untersuchungen zeigt die FR4-Bruchstelle bei einer N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Plasmavorbehandlung. Es ist ein überwiegend reiner Adhäsionsbruch zwischen EMC-Prüfkörper und FR4 zu beobachten. Eventuell sind die Muster im linken Teil der Bruchfläche auf dieser Oberfläche Anzeichen für den ansonsten beobachteten Kohäsionsbruch von FR4. LL hingegen wird durch die N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Plasmavorbehandlung so aktiviert, dass ein kreisrunder Adhäsionsbruch zwischen LL und FR4 beobachtet werden kann. Jedoch verbleibt mehr LL auf der Bruchfläche, als es bei der Bruchfläche im Fall einer O<sub>2</sub>-Plasmavorbehandlung der Fall ist. Nichts

desto trotz ist dieser Effekt positiv zu bewerten, da die Anwendung von Atmosphären-N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Plasma zur Herstellung von FlexPac leichter in den Prozess eingebunden werden kann als Niederdruckplasma.

Die Bruchflächen der Substrate, die mit M vorbehandelt wurden, zeigen Adhäsionsbrüche. Hierbei kann von einer Haftminderung auf Kunststoffoberflächen gesprochen werden.

Die Anpassung der Prüfvorschrift für diese Untersuchung zeigt in Bezug auf die erhobenen Messdaten keine signifikante Änderung der Messergebnisse. Auf den ENEPIG-Oberflächen bewirkt das Ansetzen des Schermeißels an der angussabgewandten Seite des Prüfkörpers einen größeren, aber dafür homogenen Ausbruch des Prüfkörperangusses als bei dem senkrecht dazu scherenden Meißel. Bei FR4 bricht der Prüfkörper am Angussansatz und der gesamte Angussstrang bleibt stehen. LL zeigt beim Ausbruch des Angusses keine wesentliche Veränderung zu der vorhergehenden Prüfvorschrift. Dadurch sollte der Messfehler für die Haftfestigkeit, der auf den Anguss zurückzuführen ist, gering sein. Dies kann anhand der gezeigten Ergebnisse allerdings nicht bestätigt werden und muss an anderer Stelle untersucht werden.

Die Messergebnisse für ENEPIG sind, wie bereits dargestellt, nicht ideal für den Einsatz in einem FlexPac. Deshalb wird eine weiterführende Untersuchung durchgeführt. Dabei wird versucht, durch Atmosphären-N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Plasma die Haftung zu verbessern, indem zum einen der Abstand der Kegeldüse von der PCB-Oberfläche von *8 mm* auf *4 mm* verringert und zum anderen eine Plasmavorbehandlung in Kombination mit M verwendet wird. In Abb.7.3.3-3 und in Tab.7.3.3-2 ist das Ergebnis dieser Untersuchung dargestellt. Es zeigt sich, dass die mittlere Haftfestigkeit auf ENEPIG durch die durchgeführten Maßnahmen gesteigert wird. Durch einen T-Test stellt sich das Ergebnis für jede Maßnahme um die Haftfestigkeit des EMC auf ENEPIG zu verbessern als signifikant heraus. Bei der Kombination mit M zeigt der T-Test, dass die mittlere Haftfestigkeit auf LL signifikant verbessert und auf FR4 signifikant verschlechtert wird. Die Veränderung des Kegeldüsenabstands besitzt auf die Haftfestigkeit des EMC auf den Polymeroberflächen laut T-Test keinen signifikanten Effekt.

Das Annähern der Kegeldüse bewirkt eine leichte Verbesserung der gemittelten Scherspannung auf ENEPIG um etwa *1 MPa*. Des Weiteren ist die Standardabweichung der Messung ähnlich der mit *8 mm* Kegeldüsenabstand von der PCB-Oberfläche. Aus diesem Grund wird der Grenzwert von *5 MPa* zumindest nicht mehr unterschritten, sodass die verwendete Plasmavorbehandlung für den Fertigungsprozess von FlexPac eine Lösung sein könnte.

Zusammenfassend kann nach dieser Untersuchung festgehalten werden, dass ENEPIG die schwächste Haftung mit dem EMC G770H zeigt. Zudem zeigt sich, dass dieses Goldfinish durch eine Plasmavorbehandlung schwer zu aktivieren ist. Eine

geringe Verbesserung der Haftung wird nur mittels Intensivierung des Atmosphären- $N_2/O_2$ -Plasmas beobachtet. FR4 hingegen benötigt keine Vorbehandlung, da die gemittelte Scherspannung oberhalb von  $20\text{ MPa}$  liegt und so über eine hervorragende Haftung des G770H auf dieser Oberfläche verfügt. Bei LL wäre eine Oberflächenvorbehandlung nicht unbedingt nötig, da eine gemittelte Scherspannung von  $12,8\text{ MPa}$  ausreichend ist, jedoch kann mit einer  $O_2$ -Plasmavorbehandlung die Haftung von G770H so gesteigert werden, dass sie stärker ist als die Haftfestigkeit von LL auf FR4. Mukasol ist ungeeignet für diese Anwendung, da es die Haftung auf den Kunststoffoberflächen verschlechtert. Das Fazit der Untersuchung ist, dass je nach Flächenanteil der hier diskutierten Oberflächen auf dem späteren FlexPac-LN die jeweils geeignetste Vorbehandlungsvariante verwendet werden sollte. Deshalb wird für die FlexPac, die in Kapitel 5 diskutiert werden, ein LN verwendet, der keinen LL, sondern überwiegend FR4 auf der Top-Lage besitzt, damit ein Vorbehandlungsschritt eingespart werden kann.

### 7.3.4 Einfluss des Entformungshilfeanteils im EMC auf die Haftfestigkeit

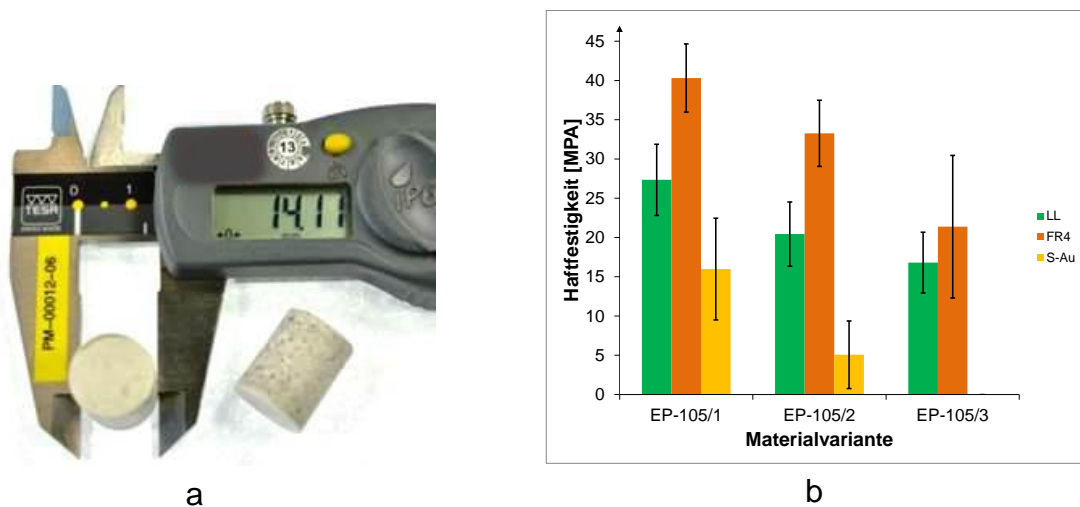


Abb.7.3.4-1: a) zeigt das in einer Laborpresse zu einem Pellet gepresste EP-105 und b) das Säulendiagramm zu den Ergebnissen der Untersuchung zum Einfluss verschiedener Entformungshilfeanteile auf die Haftfestigkeit des EP-105 auf LL, FR4 und S-Au.

Der letzte Teil der Haftfestigkeitsuntersuchungen wird durchgeführt, um den Entformungshilfeanteil im Hinblick auf die Haftfestigkeit des EMC auf den PCB-Oberflächen zu bewerten. Dafür steht ein rieselfähiges Duroplastgranulat EP-105 der Raschig GmbH zur Verfügung. Dieses wird in drei verschiedenen Formulierungen verwendet, wobei der Entformungshilfeanteil  $0,0\text{ Gew.-%}$  (EP-105/1),  $0,3\text{ Gew.-%}$  (EP-105/2) und  $0,6\text{ Gew.-%}$  (EP-105/3) beträgt. Da es als rieselfähiges Granulat angeliefert wird, muss es noch zu einem Pellet geformt werden. Dies geschieht mit einer Laborpresse, die  $8\text{ t}$  Presskraft aufbringen kann. Dafür wird das Granulat abgewogen und in

eine Matrize mit einem Durchmesser von  $14\text{ mm}$  gefüllt. Anschließend wird ein Stempel in die Matrize gefahren und das Granulat mit  $4\text{ t}$  bis  $6\text{ t}$  zu einem Pellet verdichtet. Kleinere Presskräfte führen dazu, dass das Material beim Entformen zerbröselt. In Abb.7.3.4-1a ist ein so hergestelltes Pellet gezeigt.

Tab.7.3.4-1: Mittelwert und Standardabweichung der Haftfestigkeit von EP-105 mit verschiedenen Entformungshilfeanteilen auf LL, FR4 und S-Au.

Vorbehandlung	LL	FR4	S-Au	
EP-105/1	27,3	40,3	16,0	Mittelwert [MPa]
	4,5	4,3	6,5	Standardabweichung [MPa]
	12	18	16	Anzahl Messungen
EP-105/2	20,4	33,3	5,1	Mittelwert [MPa]
	4,1	4,2	4,3	Standardabweichung [MPa]
	13	18	11	Anzahl Messungen
EP-105/3	16,8	21,4	0	Mittelwert [MPa]
	3,9	9,1	0	Standardabweichung [MPa]
	10	18	0	Anzahl Messungen

Für die Untersuchung werden Muster von PCB 1 verwendet. Es werden pro Variante je sechs PCB 1-Muster zur Prüfkörperherstellung eingesetzt, die vor dem FAM-Prozess mittels  $\text{O}_2$ -Plasma gereinigt und aktiviert werden. Daher ergibt sich eine mögliche Ausbeute von 18 Prüfkörpern je Oberfläche und Material. Geprüft wird mit der Prüfvorschrift der ersten beiden Untersuchungen und nach optischer Inspektion der Prüfkörper auf Anzeichen von Fehlern. In Abb.7.3.4-1b und Tab.7.3.4-1 ist das Ergebnis der Untersuchung zu sehen. Es zeigt sich, dass das EMC ohne Entformungshilfe auf den Polymeroberflächen die bislang höchsten Scherspannungen erzielt. Auf der S-Au-Oberfläche ist der gemessene Scherspannungswert groß; aber dies wird durch eine hohe Standardabweichung relativiert. Dennoch ist das Ergebnis gut, denn durch den Einsatz der ETFE-Folie beim FAM-Prozess wird im EMC keine Entformungshilfe benötigt.

Bei EP-105/2 sind die gemessenen Scherspannungen für Kunststoffoberflächen geringer als bei EP-105/1. Das ist zu erwarten, jedoch sind die erzielten Werte immer noch hoch. Der Effekt des  $0,3\text{ Gew.}\%$ - Entformungshilfeanteils auf S-Au ist hingegen überraschend. Die Scherspannung reduziert sich um mehr als  $2/3$  des Wertes von EP-105/1. Mit der angeführten Standardabweichung von über  $90\%$  des Mittelwerts ist diese EMC-Formulierung ungeeignet für LN mit überwiegend S-Au-Oberfläche.

EP-105/3 haftet nicht auf S-Au. Deshalb konnten keine Schertests durchgeführt werden. Auf den Polymeroberflächen zeigt es jedoch eine gute Haftung.

Wie in Tab.7.3.4-1 zu sehen ist, variiert die Anzahl der Messungen bei LL und S-Au stark. Das liegt daran, dass bei LL nach dem FAM-Prozess der letzte Haftkegel fehlt

(Fehlerbild 3 und 4) und bei S-Au mit der Zunahme des Entformungshilfeanteils das Auftreten von Fehlerbild 2 und 4 zunimmt. Möglicherweise waren die Herstellungsbedingungen nicht ideal, sodass das Werkzeug zu stark auf das PCB drückt und damit Ventings auf S-Au sowie auch den Anguss auf LL verschließt. Es kann auch sein, dass der Werkzeugeinsatz nicht plan auflag und es so zu den genannten Effekten kam.

Beim Vergleich der Bruchbilder fällt auf, dass auf S-Au und FR4 ein sehr ausgeprägter Mold Flash zu sehen ist (Abb.7.3.4-2). Die Bruchfläche des FR4 zeigt bei EP-105/1 überwiegend einen Kohäsionsbruch von FR4. Bei Verwendung von EP-105/2 sind zudem auch Rückstände vom EMC selbst auf der Kohäsionsbruchfläche des FR4 zu sehen. Bei der Verwendung von EP-105/3 liegt ein Mischbruch vor, wobei wieder EMC-Rückstände zu beobachten sind. Des Weiteren ist der Ventingkanal durch einen klaren Mold Flash abgeformt.

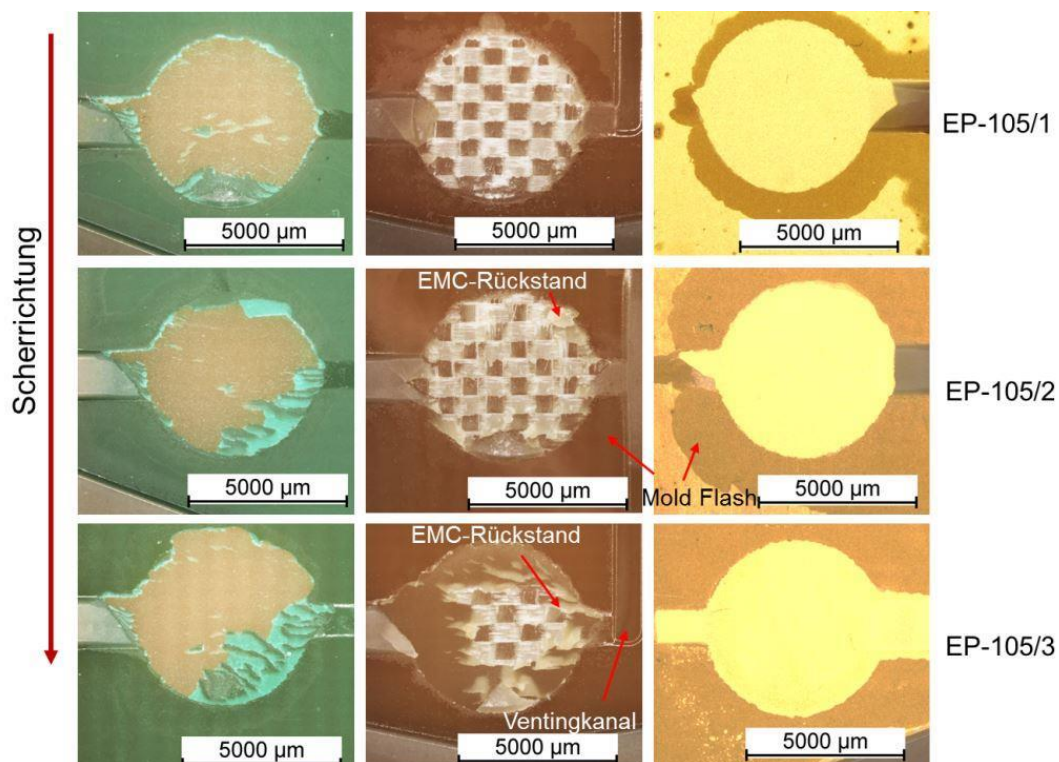


Abb.7.3-11: Repräsentative Bruchflächen zum Einfluss verschiedener Entformungshilfeanteile auf die Haftfestigkeit des EP-105 auf LL, FR4 und S-Au.

Bei LL ist das beobachtete Bruchbild bei allen EMC-Varianten annähernd gleich, wobei mit zunehmendem Entformungshilfeanteil mehr LL auf der Bruchfläche verbleibt.

S-Au zeigt durchweg einen Adhäsionsbruch. Bei EP-105/3 ist beim Entformen aus dem FAM-Werkzeug teilweise selbst der Anguss von der Oberfläche abgefallen.

Das Fazit dieser Untersuchung ist, dass der Entformungshilfeanteil für die FlexPac-Herstellung mittels FAM nicht nötig ist und ohne Entformungshilfe eine solide Haftfestigkeit auf allen Untersuchten PCB-Oberflächen erzeugt wird.

## 8. Neuartige Integrationstechnologien für System-In-Package

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit komplexer Systemintegration im Hinblick auf leiterplattenbasierte System-in-Packages (SIP). Es werden beispielhaft Entwicklungen angeführt, mit welchen Möglichkeiten eine hohe Systemintegration gelingen kann. Denn um SIP zu entwickeln und zu fertigen werden smarte Ansätze gefordert, die den Endanwender in Bezug auf Design und Funktionalität überzeugen. In naher Zukunft werden mehr und mehr autarke und selbstständige Sensorsysteme gefordert, die die Felder „Internet of Things“, „Cyberphysical Systems“, „Smart Home“ und „Sensors Everywhere“ bedienen. Dafür müssen die SIP drahtlos kommunizieren und zuverlässig, robust, miniaturisiert und energieautark sein. Gerade beim Packaging-Prozess sind diese Anforderungen mit herausfordernden Spezifikationen zur Herstellung eines SIP verbunden. Der Prozess zur Herstellung eines Package muss reproduzierbare, qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern und modular gehalten sein, damit auf die Anwendung zugeschnittene SIP zu niedrigen Kosten produziert werden können.

Die bereits diskutierten Kapitel zeigen, dass die FAM-Technologie gekoppelt mit der PCB-Technologie für diese Anforderungen geeignet ist. Die Ressourcen beider Technologien, wie PCB, EMC und ETFE-Folie, sind leicht verfügbar und zu moderaten Kosten zu beziehen. Der Anspruch an den Werkzeugbau ist für einen Großteil der Anwendungen aufgrund des folienbasierten Transfer Moldings gering, da die ETFE-Folie Ungenauigkeiten kompensieren kann.

Aufgrund der FAM-Technologie besteht die Möglichkeit, ganze Sensorsysteme als Chip on Board direkt aufzubauen, somit platzsparende Packages zu generieren, weniger Prozessschritte bei der Herstellung zu benötigen und damit den Herstellungsprozess eines SIP zu vereinfachen.

Bei den PCB-Herstellern ist der Trend zu sehen, dass die Dicke der FR4-Leiterplatte schon weitgehend reduziert wird, um der Anforderung der Miniaturisierung zu genügen. Statt  $1,6\text{ mm}$  werden teilweise PCB für leiterplattenbasierte Packages, die dünner als  $500\text{ }\mu\text{m}$  sind, verwendet. Für das QFN-FlexPac wird z.B. ein Vier-Lagen-PCB mit  $300\text{ }\mu\text{m}$  Dicke verwendet. Diese Entwicklung der PCB-Technologie ist ideal für die Erzeugung von SIP als FlexPac.

Das EMC als Packagingmaterial ist schon heute die tragende Säule für ein robustes Kunststoff-Package. Da die EMC für das First Level Packaging überwiegend nur aus Fernost bezogen werden können, wäre es vorteilhaft, auch über Hersteller in Europa zu verfügen, damit die Transportwege verkürzt werden und damit eine schnellere Verfügbarkeit sichergestellt werden kann. Dann würden kleine und mittlere Unternehmen am Standort Deutschland ihre innovativen und speziellen Mikrosysteme in Europa hausen lassen. So könnte der Entwicklungsvorsprung der kleinen und middle-

ren Unternehmen in der Mikrosystemtechnik mit besonderen Alleinstellungsmerkmalen in Europa gehalten werden können.

Die in diesem Kapitel diskutierten Beispiele für eine hohe Systemintegration zeigen nur einen kleinen Bereich der Möglichkeiten und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es soll aber ein Ausblick geliefert werden, mit welchen Systemelementen eine Erweiterung der Systemintegration auf dem Weg zum SIP gelingen kann. Dafür werden Systemelemente für die elektrische, mikrofluidische, optische Integration und das Mehrkomponenten-FAM besprochen.

## 8.1 Elektrische Integration

Bei der elektrischen Integration ist die Fragestellung, wie die EMC-Oberfläche mit der bestückten PCB elektrisch funktional verbunden werden kann. Dafür werden zwei unterschiedliche Varianten für die Realisierung von Ankontaktierungen und ein Beispiel für eine Antennenanwendung besprochen.

Es werden dabei Konzepte diskutiert, die mit der additiven Technologie des Inkjet-Druckens einer Silbertinte (Ag-Tinte) gekoppelt werden. Die Ag-Tinte wird nach dem Druckprozess thermisch gesintert, um Leiterstrukturen auf der EMC-Oberfläche herzustellen. Dies stellt eine Low-Cost-Technologie dar, die sich für die modularen SIP-Konzepte eignet, da sie mit einem geringen Aufwand flexibel anwendbar ist.

Der Fokus der hier gezeigten elektrischen Integration ist auf den Packaging-Prozess beschränkt. Detaillierte Ergebnisse zum Inkjet-Druck auf EMC-Oberflächen liefern die angeführten Referenzen [21], [23], [25], [58], welche im Rahmen der Entwicklung der neuen Packaging-Konzepte mit erarbeitet wurden.

### 8.1.1 Federkontakte

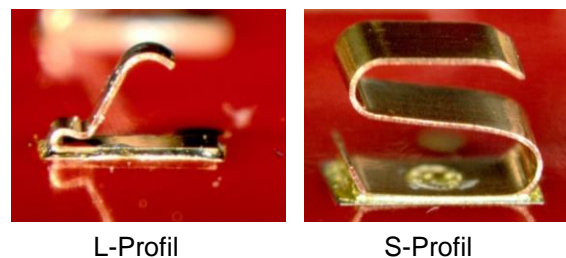


Abb.8.1.1-1: Auf einem PCB aufgebaute Federkontakte mit L- und S-Profil.

Federkontakte stellen SMD-Bauteile dar, die eine definierte Geometrie und eine leitfähige Oberfläche besitzen. Sie können so den elektrischen Kontakt zwischen PCB und EMC-Oberfläche herstellen. In Abb.8.1.1-1 sind zwei Beispiele dafür gezeigt. Die Bezeichnung dabei ist nach deren Profil gewählt (L- und S-Profil). Bei der Eignung des Federkontakts als elektrischen Kontakt zwischen PCB und EMC-Oberfläche für

SIP sind einige Kriterien zu erfüllen. Der Federkontakt muss leicht auf dem PCB montiert werden können und über eine gute Federwirkung verfügen. Mit dieser Aufbauvariante lassen sich nach dem FAM-Prozess Kontaktpads auf der EMC-Oberfläche freistellen, ohne dass zusätzliche Freistellungselemente verwendet werden. Die zwei Federtypen aus Abb.8.1.1-1 unterscheiden sich nicht nur in ihrem Profil, sondern auch in der Bauteilhöhe. Sie lassen sich mit nicht leitfähigen Klebstoffen (NCA), isotrop leitfähigen Klebstoffen (ICA) und durch Lötten auf eine PCB montieren. Jeder Federkontakt lässt sich bis zu einem definierten Maß stauchen, sodass Höhenunterschiede der PCB bei der Montage vernachlässigbar sind.

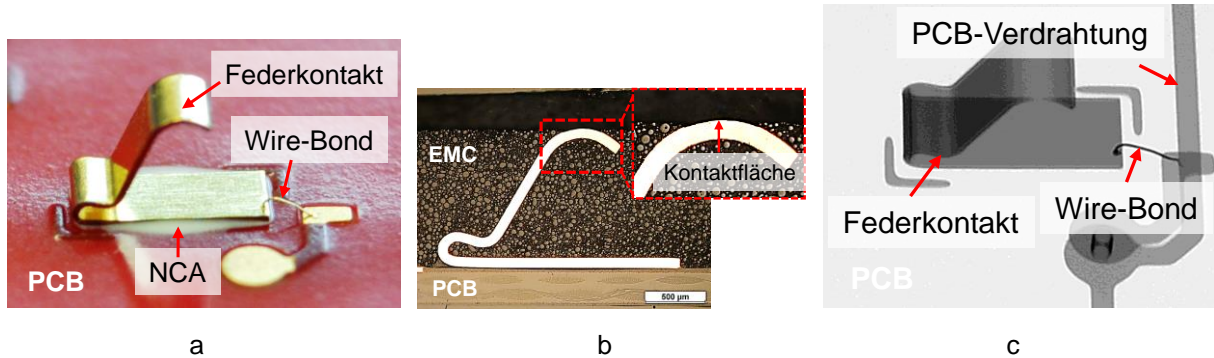


Abb.8.1.1-2: Darstellung eines aufgebauten L-Profil-Federkontakts a) mittels NCA auf einer PCB montiert und mittels Au-Draht mit dieser kontaktiert. Das Bild b) zeigt einen Querschliff für die Package-Bewertung und c) zeigt eine Röntgendurchstrahlungsaufnahme, um die Au-Draht-Verdrahtung zu überprüfen.



Abb.8.1.1-3: Repräsentative Querschliffaufnahmen zur Bewertung der Benetzung der Fügemedien NCA, ICA und Lot am C-Profil-Federkontakt.

Das L-Profil besitzt eine Bauteilhöhe von  $1,3\text{ mm}$  und ist für den Draht-Bond-Prozess geeignet, da das Draht-Tool auf dem Sockel des Federkontakts ausreichend Platz hat um einen Draht-Bond zu setzen (Abb.8.1.1-2a). Nach dem FAM-Prozess erreicht der Federkontakt die Oberfläche des Packages außerhalb des EMC (Abb.8.1.1-2b). In dem Querschnitt lassen sich die Stauchung der Feder wie auch der Überstand der Feder über der EMC-Oberfläche bewerten. Es zeigt sich, dass die Rundung um ca.  $20\text{ }\mu\text{m}$  aus der Oberfläche heraussteht. Das bedeutet, dass vermutlich der Federkontaktscheitel während des FAM-Prozesses stark in die ETFE-Folie drückt und es so zu diesem Überstand kommt. Da diese Freistellung gerundet aus dem EMC heraussteht, eignet sich dieser Federkontakt nicht für die Funktion eines Montage- oder Draht-Bond-Pad, sondern für die additive Kontaktierung mittels Ag-Tinte.



Nach dem FAM-Prozess sind optisch keine Auffälligkeiten festzustellen. Durch eine Röntgendurchstrahlungsanalyse wird bewertet, wie die Au-Draht-Bonds gehaust sind (Abb.8.1.1-2c). Bei der Überprüfung, welches Fügemedium eine gute Benetzung des Federkontakts zeigt, werden Querschliffe in Abb.8.1.1-3 miteinander verglichen. Dabei ist festzustellen, dass der NCA einen kleinen Meniskus ausbildet. Es zeigt sich zudem, dass der Fügespalt beim NCA kleiner ist als beim ICA. Das kann damit zusammenhängen, dass der NCA keine Füllstoffe enthält und so durch das Eigengewicht des Federkontaktes beim Fügen stärker verdrängt wird. Dies kann in Abb.8.1.1-2a durch den Austritt des NCA unter dem Federkontakt beobachtet werden. Die Füllstoffpartikel im ICA könnten dem Einsinken des Federkontakts entgegenwirken und so den Fügespalt definiert auf eine Dicke einstellen. Dies ist aber nicht allzu wahrscheinlich, da die Partikelgröße im ICA nicht konstant ist.

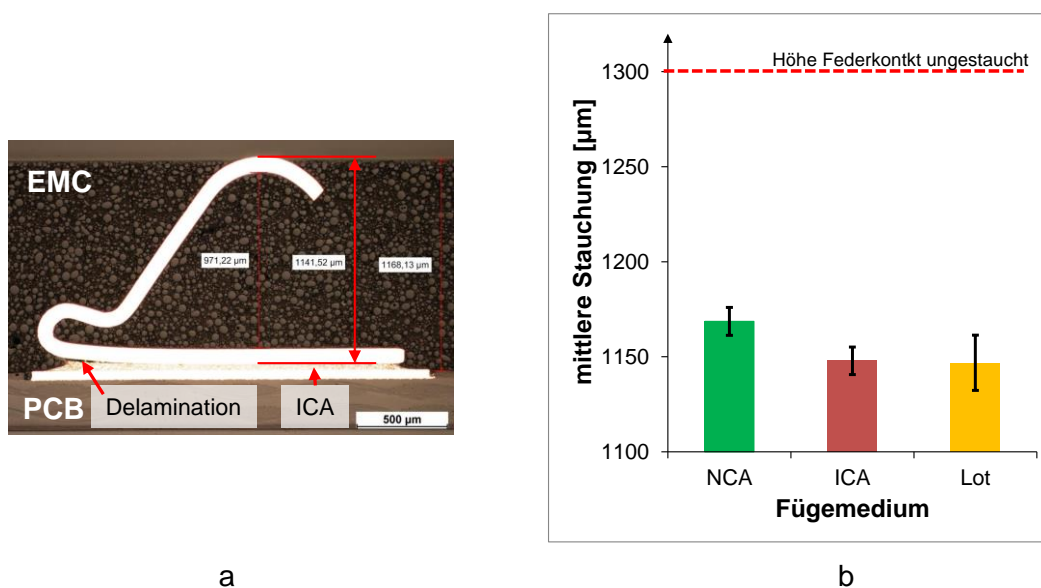


Abb.8.1.1-4: a) Zeigt repräsentativ die Messung der Stauchung der Federkontakte am Querschliff und b) das Messergebnis über die Fügemedien.

Der ICA zeigt beim Vergleich aller sechs Federkontakte in einem Querschliff eine Delamination am Fuß des Federkontakts (siehe auch Abb.8.1.1-4a). Dies bedeutet, dass der verwendete ICA keine gute Haftung am Federkontakt besitzt und während der Stauchung beim FAM sich von diesem löst. Jedoch könnte ein anderer ICA gewählt werden, der diesen Effekt nicht zeigt. Das Lot zeigt eine gute Benetzung, da der Lotmeniskus bis zum Scheitel der ersten Biegestelle des Federkontakts reicht. Hierbei jedoch von einer besseren Benetzung als bei den anderen Fügemedien zu sprechen, ist aufgrund des höheren Mengenanteils des Lotes im Vergleich zu NCA und ICA nicht möglich. Der Fügespalt ist ähnlich dem des ICA.

Da die verschiedenen Fügemedien eine Auswirkung auf die Gesamthöhe des Federkontakts besitzen, wird in einer Untersuchung der Querschliffe die Stauchung der L-Profil-Federkontakte durchgeführt. Dabei wird der Federkontakt ohne Klebespalt im Mikroskop ausgemessen (Abb.8.1.1-4a), die gemessene Höhe gemittelt und in Rela-

tion zur Ausgangshöhe gesetzt. In Abb.8.1.1-4b ist das Ergebnis dieser Messung graphisch dargestellt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, sind die Federkontakte etwa gleich gestaucht. Das Lot weist, aufgrund der größten Standardabweichung der hier gemessenen Federkontakte, eine größere Schwankung des Fügespalts auf als bei den anderen Medien. Die Federkontakte, die mit dem NCA-Klebstoff montiert werden, zeigen eine geringere Stauchung. Dies liegt daran, dass diese auf dem Lötstopplack und nicht wie die anderen auf das für den Fügeprozess erforderliche höhere Montagepad aufgebracht wurden. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Stauchung des L-Profil-Federkontakts auf variable Montagehöhen reagieren kann.

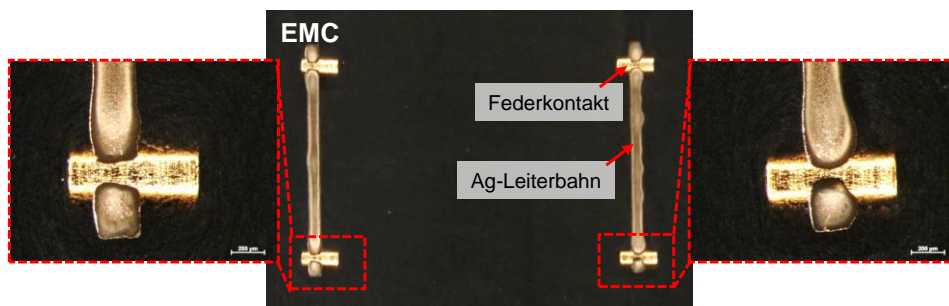


Abb.8.1.1-5: Mittels Ag-Tinte bedruckte EMC-Oberfläche die den L-Profil-Federkontakt elektrisch kontaktiert.

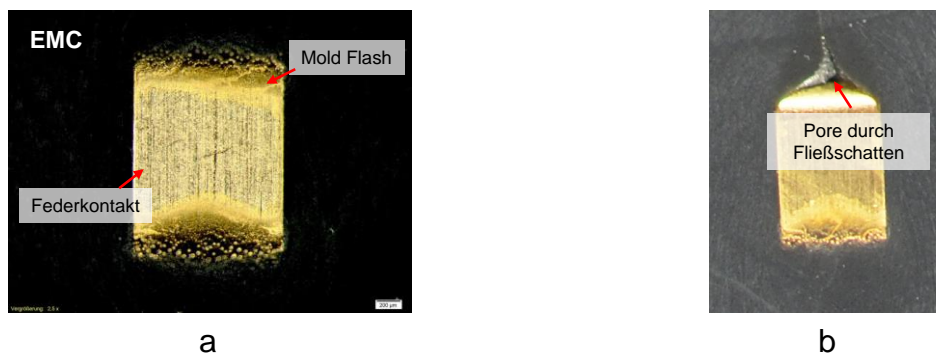


Abb.8.1.1-6: Darstellung des im ausgehärteten EMC freigestellten a) S-Profil-Federkontakts und b) S-Profil-Federkontakts mit Pore aufgrund eines Fließschattens.

Die Kontaktierung des ins EMC eingebetteten L-Profil-Federkontakts mittels Ag-Tinte ist in Abb.8.1.1-5 dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass die gewählte Ag-Tinte nicht auf dem Scheitel des herausstehenden Federkontakts verbleibt, sondern davon abfließt. Jedoch zeigen die Widerstandsmessungen mit Messergebnissen zwischen  $3 \Omega$  bis  $6 \Omega$ , dass eine elektrische Leitung vorhanden ist [23].

Der Federkontakt mit dem S-Profil ist im Vergleich zum L-Profil mit  $2,2 \text{ mm}$  Bauteilhöhe größer und von der Bauform ideal für die Realisierung von Pads auf der EMC-Oberfläche. Durch das S-Profil eignet sich dieser Federkontakt nicht für den Draht-Bonding-Prozess und wird daher in der NCA-Aufbauvariante nicht betrachtet. Dieser Federkontakt ist wie der L-Profil-Federkontakt auch SMD-tauglich. Der S-Profil-Federkontakt lässt sich problemlos stauchen. Nach dem FAM-Prozess ist eine plane

und größtenteils freie Kontaktfläche zu sehen (Abb.8.1.1-6a). Aufgrund der Bauteilgeometrie des S-Profil-Federkontakts sollte das S-Profil senkrecht zur Fließrichtung der EMC-Schmelze positioniert werden, damit keine Lunker hinter den S-Bögen eingeschlossen werden oder Luft als Folge eines Fließschattens am in die ETFE-Folie eingedrückten Federkontaktpad zurückbleibt. Ein Fließschatten kann in der Schmelze dadurch entstehen, dass ein Hindernis umflossen wird und sich die Schmelzfront in einem größeren Abstand zu diesem trifft, bevor die Luft entweichen kann. Damit wird die Luft eingeschlossen und ist dann als Pore auf der EMC-Oberfläche sichtbar oder als Lunker im Bauteil (Abb.8.1.1-6b). Weiterhin kann beobachtet werden, dass Mold Flash am Übergang zum Federkontaktpad austritt. Dies ist an dieser Stelle zu vernachlässigen, jedoch für Anwendungen, die ein definiertes Kontaktpad an der EMC-Oberfläche benötigen, muss in der Spezifikation des Federkontakts eine plane Fläche gefordert werden. Der hier vorgestellte Federkontakt ist in seine Fuß- und Kopffläche leicht gebogen, was durch einen Querschliff belegt werden kann (Abb.8.1.1-7).

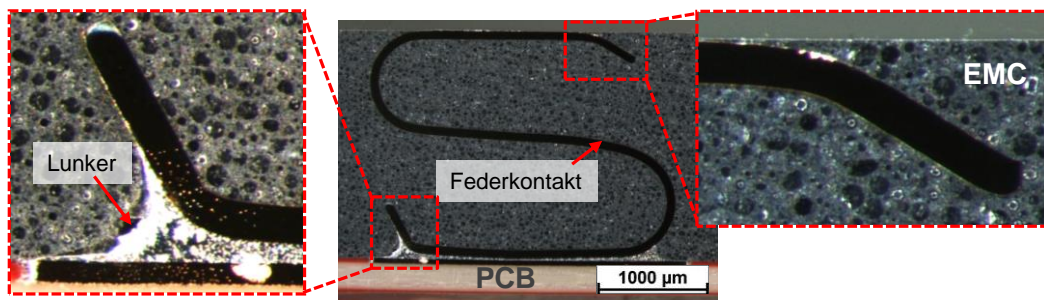


Abb.8.1.1-7: Querschliff eines mittels EMC gehausten S-Profil-Federkontakts.

In der Auswertung des FAM-Prozessergebnisses anhand der Schliffbilder zeigen sich zwischen Lot und EMC Lunker. Möglicherweise entstehen diese durch das nicht entfernte Flussmittel des Lotes während des FAM-Prozesses. Das Flussmittel könnte die Haftung des EMC am Lot verhindern oder Restbestände könnten während des FAM-Prozesses abdampfen und einen Lunker an dieser Stelle bei gefüllter Kavität erzeugen. Einen ähnlichen Effekt könnte auch das Abdampfen von Feuchte während des FAM-Prozesses hervorrufen, allerdings müsste dann die Delamination auch an den Grenzflächen zwischen EMC und Leiterplatte auftreten, was aber nicht beobachtet werden kann. Als Maßnahmen zur Vermeidung solcher Lunker sind das Reinigen der Lötstellen nach dem Montage-Prozess und das Trocknen der Systeme vor dem FAM-Prozess denkbar.

Aufgrund der großen, planen Kontaktfläche des S-Profil-Federkontakts, die im EMC freigestellt ist, kann die Ag-Tinte gut darauf gedruckt werden (Abb.8.1.1-8). Die Ag-Tinte zeigt mitunter ein unterschiedliches Benetzungsverhalten auf EMC und Federkontakt. Grund hierfür ist wahrscheinlich unterschiedlich starke Polarität der beiden Oberflächen. Dies kann durch eine Variation der Formulierung der Ag-Tintenbestandteile und eine Oberflächenbehandlung mittels Plasma optimiert wer-

den. Durch den Mold Flash kann es jedoch zu Druckfehlern in den Übergängen von EMC und Federkontakt kommen, da dieser an dessen Oberfläche aufgrund einer partiell entmischten sowie partiell mit Füllern gefüllten Epoxidmatrix bestehen und so ein undefiniertes Oberflächenprofil besitzen kann. Das Auftreten von Mold Flash kann durch plane, weniger gerundete Flächen des Federkontakts verhindert werden.

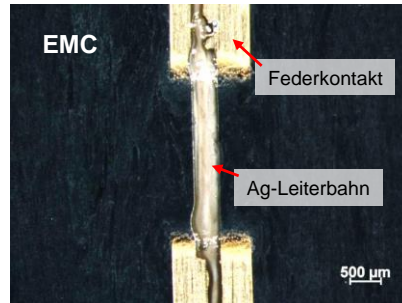


Abb.8.1.1-8: Draufsicht auf zwei mittels Ag-Tinte elektrisch kontaktierte S-Profil-Federkontakte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Federkontakte eine gute Variante darstellen, einen elektrischen Kontakt zwischen PCB und EMC-Oberfläche zu realisieren. Sie sind in ihrer Höhe variabel, da sie gestaucht werden können. In einem SIP ist die Realisierung eines elektrischen Kontakts mittels Federkontakten eine gute Variante, um platzsparende Aufbauten umzusetzen.

### 8.1.2 FAM-Vias

Eine weitere Variante zur Erzeugung eines elektrischen Kontakts von PCB zur EMC-Oberfläche sind mittels eines FAM-Prozesses erzeugte Vias (FAM-Via). Dafür werden Freistellungs-elemente, die die FAM-Vias erzeugen sollen, in einem Insert eingebracht. Da laut Herstellerangaben der FAM-Technologie für diese Anwendung Freistellungs-elemente in Frage kommen, die ein Aspektverhältnis von 1:1 besitzen, wird an dieser Stelle herausgearbeitet, ob größere Aspektverhältnisse möglich sind. Dafür wird zunächst ein Insert hergestellt, auf dem die Freistellungs-elemente in vier Quadranten angeordnet sind. Dabei ist je Quadrant eine Anzahl von acht Freistellungs-elementen eingebracht, die sich in der Freistellungsfläche sowie den Flanken unterscheiden. Daher zeigen diese eine asymmetrische Kegelstumpfform. Über zwei Flanken soll mittels Ag-Tinte über einen Inkjet-Prozess das PCB-Pad elektrisch mit der EMC-Oberfläche verbunden werden. Die Freistellungs-elemente variieren zu den anderen Quadranten in der Höhe. In der Mitte des Inserts werden die Freistellungs-elemente in Gestalt von Kegelstümpfen und einem großen Pyramidenstumpf gefertigt.

Die Untersuchung zeigt, dass bei der Erzeugung eines FAM-Via Form und Größe der Auflagefläche sowie die Entfernung dieser vom Au-Pad auf dem PCB maßgebliche

Faktoren sind. In Abb.8.1.2-1 ist das Insert als CAD-Entwurf (Computer-Aided Design) dargestellt und Tab.8.1.2-1 fasst die Parameter zusammen.

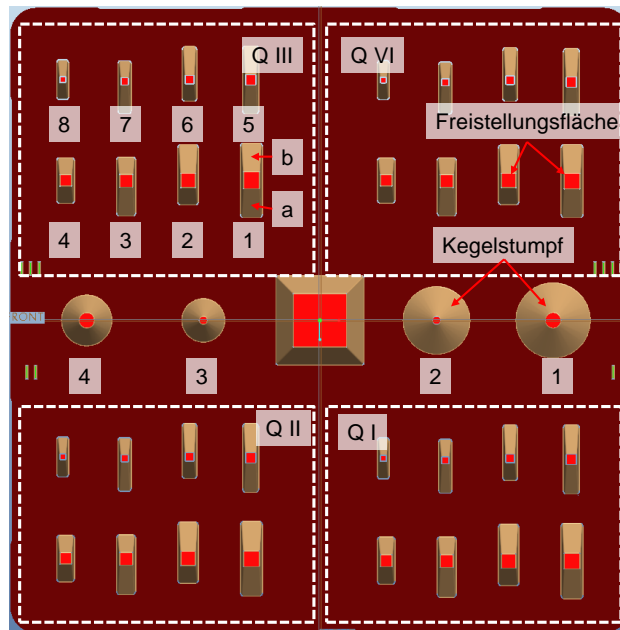


Abb.8.1.2-1: CAD-Darstellung des Inserts für die Untersuchung der Realisierung eines FAM-Vias mit Nummerierung und Zuweisung der Quadranten (Q), um die Tab.8.1.2-1 zu vervollständigen.

Tab.8.1.2-1: Parameter für die Zuweisung der einzelnen Freistellungselemente gemäß der Abb.8.1.2-1.

Element	Flankenwinkel a-b [°]	Kantenlänge Auflagefläche [mm]
1	45 - 45	1
2	60 - 45	0,9
3	45 - 60	0,8
4	60 - 60	0,7
5	45 - 45	0,6
6	60 - 45	0,5
7	45 - 60	0,4
8	60 - 60	0,3

Quadrant	Höhe asymmetrischer Pyramidenstumpf [mm]	Kegelstumpf	Winkel [°]	Durchmesser Auflagefläche [mm]	Kegelhöhe [mm]
I	2	1	45	1	2
II	1,98	2	45	0,5	2
III	1,95	3	60	0,5	2
IV	1,92	4	60	1	2

Nach der Fertigung des Inserts stellt sich heraus, dass die einzelnen Freistellungselemente zu nah aneinander positioniert sind, sodass sich die ETFE-Folie wie ein Zelt darüber spannt. Dennoch lässt sich eine Abformung der Freistellungselemente durchführen (Abb.8.1.2-2b). Dabei kann beobachtet werden, dass die ETFE-Folie häufig bricht und die EMC-Schmelze das Werkzeug verunreinigt, was zu Abformfehlern führt. Des Weiteren zeigen die FAM-Vias auf der EMC-Oberfläche eine umlaufende abgerundete Kante. Diese wird durch die beim FAM-Prozess komprimierte Luft unter der ETFE-Folie verursacht. Die Kegelstümpfe wie auch der große Pyramiden-

stumpf in der Insertmitte werden immer reproduzierbar gut abgeformt. Runde umlaufende Kanten um diese FAM-Vias sind auch zu beobachten, jedoch verteilt sich die Luft unter der ETFE-Folie ideal um die Kante, sodass während des FAM-Prozesses kein Folienbruch entsteht. Damit ist eine geometrische Variante des Kegelstumpfes eine Möglichkeit zur FAM-Via-Erzeugung.

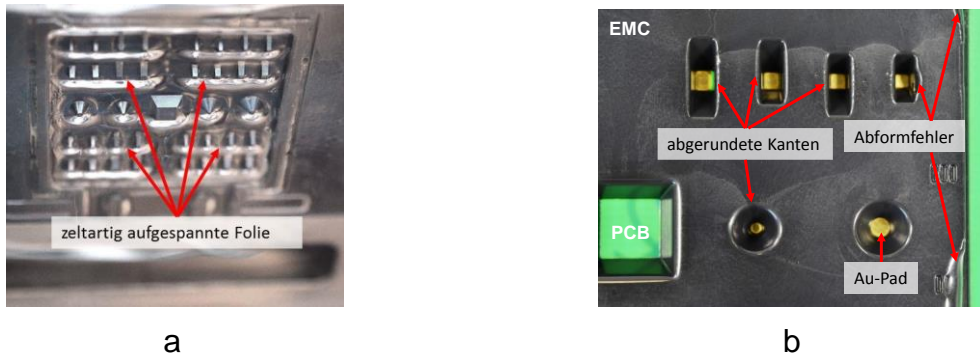


Abb.8.1.2-2: a) Zeigt das ins Werkzeug eingebaute Insert mit den Freistellungselementen und der darüber, zeltartig gespannten ETFE-Folie und b) zeigt die Abformung der Freistellungselemente im EMC nach dem FAM-Prozess.



Abb.8.1.2-3: a) Zeigt das ins Werkzeug eingebaute optimierte Insert mit den Freistellungselementen und der darüber gelegten ETFE-Folie und b) zeigt die Abformung der Freistellungselemente im EMC nach dem FAM-Prozess.

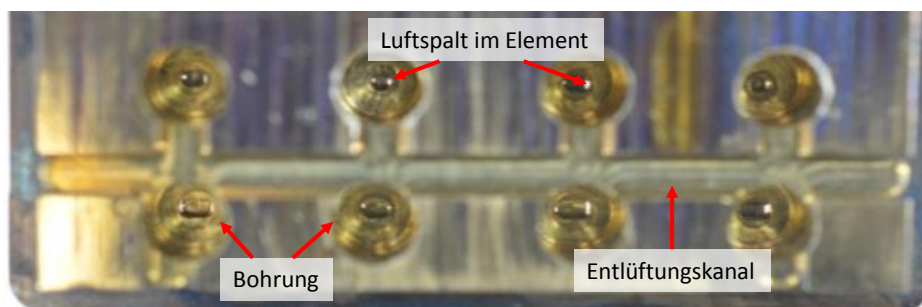


Abb.8.1.2-4: Zweiter Optimierungsschritt des Inserts zur Erzeugung von FAM-Vias.

Das Ergebnis ist nicht ideal, deshalb werden je Quadrant vier Freistellungselemente entfernt. Danach ist zwar immer noch Luft unter der Folie eingeschlossen, jedoch sind die Lufteinschlüsse rund um einzelne Elemente angeordnet, anstatt mehrere Elemente zu überspannen (Abb.8.1.2-3a). Bei der Analyse des Abformergebnisses

der FAM-Vias fällt auf, dass sich durch die Luft einschlüsse unter der ETFE-Folie weiterhin abgerundete Kanten entlang des FAM-Vias in der EMC-Oberfläche abformen und zudem Abformfehler aufgrund von Foliendurchbrüchen während des FAM-Prozesses auftreten.

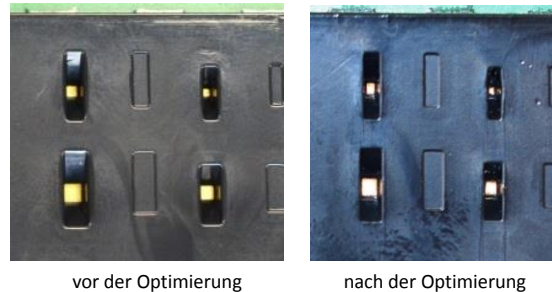


Abb.8.1.2-5: Vergleich der Abformung der Freistellungs-elemente vor und nach der Optimierung des Inserts.

Aufgrund dieses Ergebnisses wird ein weiterer Optimierungsschritt vorgenommen, um die Luft unter der ETFE-Folie zu vermeiden. Dabei wird unter den Quadranten I und II eine Bohrung durchgeführt, um an den Freistellungs-elementen Luftabzugspalten zu öffnen (Abb.8.1.2-4). Diese Bohrungen werden über einen Entlüftungskanal an das Vakuumsystem des Werkzeugs angeschlossen. Das Abformungsergebnis ist in Abb.8.1.2-5 vergleichend zwischen Quadrant IV vor und nach der Optimierung dargestellt. Die Abformung der Kante ist genauer als ohne den Luftspalt. Daraus folgt, dass die Luft unter der Folie während des FAM-Prozesses durch den geöffneten Luftspalt entweichen kann und so kein Bruch der Folie auftritt. Damit kann geschlossen werden, dass die Luft unter der ETFE-Folie entfernt werden muss, um reproduzierbar gut abgeformte asymmetrische FAM-Vias zu erzeugen.

Die Auswirkung der Höhenvariation der asymmetrischen Pyramidenstümpfe auf die Freistellung der PCB-Pads beim FAM-Prozess zeigt Abb.8.1.2-6. Bei dem Vergleich fällt auf, dass die Freistellungs-elemente im Quadranten I überwiegend keine Anzeichen von Mold Flash zeigen. Durch die starke Pressung der ETFE-Folie durch das Freistellungs-element zeigt Quadrant I häufig auftretende Abformfehler aufgrund von Folierversagen, da dabei vermutlich die ETFE-Folie während des FAM-Prozesses so stark komprimiert wird, dass sie nahezu gestanzt wird, deshalb beim Einsetzen des Aushärtdrucks  $p_c$  nicht weiter nachgeben kann und aufreißt. Quadrant II hingegen zeigt Mold Flash auf dem PCB-Pad, der nicht das gesamte Pad überzieht. Mit der Regulierung des Aushärtdrucks lässt sich dies jedoch verringern. Bei Quadrant III zeigt sich überwiegend ein klarer Mold-Flash, der das gesamte PCB-Pad überzieht. Vereinzelt kann auch eine größere freie Fläche auf dem PCB-Pad beobachtet werden. Quadrant IV ist größtenteils vom EMC überzogen. Wenig Mold Flash tritt auf und auch eine freigestellte Fläche im PCB-Pad ist selten zu beobachten.

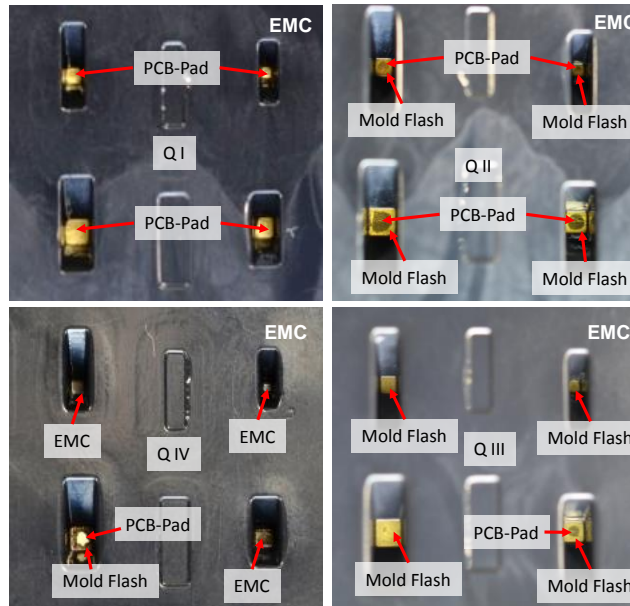


Abb.8.1.2-6: Freistellungsvergleich der PCB-Pads anhand der asymmetrischen Pyramidenstümpfe in den vier Quadranten.

Dass bei Quadrant III und IV ein paar PCB-Pads freigestellt werden, kann mit der z-Toleranz der PCB zusammenhängen. Für die Untersuchung werden PCB mit einer Dicke von  $0,5\text{ mm}$  verwendet, die damit in deren Dicke um  $\pm 0,05\text{ mm}$  schwanken können. Wenn die PCB dicker sind als die Soll-Dicke, dann werden teilweise die PCB-Pads der Quadranten III und IV freigestellt mit Mold Flash, und wenn diese dünner sind, wird das PCB-Pad mit Mold Flash oder EMC überdeckt. Des Weiteren zeigt sich dann auch im Quadranten I Mold Flash.

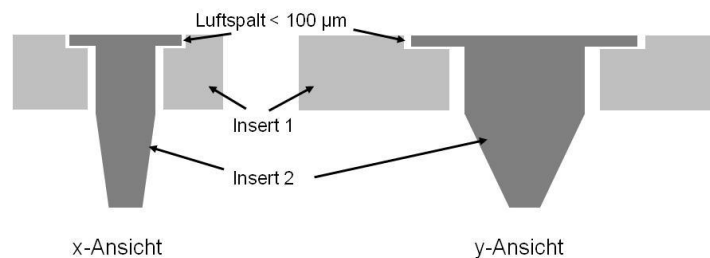


Abb.8.1.2-7: Konzept des Freistellungselements zur Realisierung eines FAM-Vias.

Die kleinste Fläche von  $0,3 \times 0,3\text{ mm}^2$  wird im Quadranten I freigestellt, sodass geschlossen werden kann, dass dies nicht die kleinstmögliche Fläche für ein FAM-Via darstellt. Damit sind alle anderen untersuchten Flächen nicht kritisch für das Erzeugen eines FAM-Via. Möglicherweise kann diese Beobachtung deshalb gemacht werden, da sich die ETFE-Folie aufgrund der unterschiedlichen Flankenwinkel der asymmetrischen Freistellungselemente an zwei Flanken ohne zu starke Spannung der Folie anlegen lässt. Weiterführende Untersuchungen zeigen, dass ein Flankenwinkel bis  $75^\circ$  zu einem guten Ergebnis führt. Für den Fall, dass die Höhe der Freistellungselemente kleiner wird, könnte mit einem größeren Flankenwinkel gearbeitet werden. Das größte Aspektverhältnis der hier untersuchten FAM-Via ist  $20:3$  ( $2\text{ mm}$



Höhe und  $0,3\text{ mm}$  Breite). Damit zeigt sich, dass Aspektverhältnisse der Freistellungselemente größer  $1:1$  mittels FAM reproduzierbar hergestellt werden können.

Beim FAM-Prozess stellt sich zudem heraus, dass eine  $50\ \mu\text{m}$  dicke ETFE-Folie weniger zum Versagen neigt als eine  $100\ \mu\text{m}$  dicke ETFE-Folie. Das kann daran liegen, dass die dünnere Folie flexibler verformbar ist als die dickere. Des Weiteren ist der Aushärte- $p_c$  maßgeblich für das Auftreten von Mold Flash im Quadranten I. Deshalb ist es notwendig, im Einrichtprozess des FAM  $p_c$  zu wählen, dass eine gute Füllung der Kavität mit EMC-Schmelze eingestellt wird. Damit die ETFE-Folie auf die EMC-Schmelze beim FAM-Prozess reagieren kann, ist es nötig, nach dem Füllvorgang eine Wartezeit im Bereich von  $2...4\text{ s}$  einzustellen, bevor der Aushärte- $p_c$  aufgebracht wird. So kann die Trägheit der Folie, die gegen deren Verformung durch die EMC-Schmelze wirkt, kompensiert werden, sodass der Folienbruch verhindert wird. Diese Vorgehensweise eignet sich immer bei der Beobachtung von Luftein-schlüssen unter der Folie.

Das Ergebnis der Untersuchung zur Erzeugung von FAM-Vias zeigt, dass dafür ein Werkzeugkonzept benötigt wird, indem die unter der ETFE-Folie verbleibende Luft während des FAM-Prozess entweichen kann. Das Konzept ist schematisch in Abb.8.1.2-7 zu sehen und wird in Kapitel 8.1.3 als Umsetzung für die elektrische Kontaktierung einer Antennenstruktur diskutiert. Das neue Konzept sieht vor, dass im Insert ein weiteres Insert eingebracht wird. Dieses besitzt umlaufend einen  $100\ \mu\text{m}$  breiten Luftabzugsspalt. Damit kann unter der Folie verbleibende Luft während des FAM-Prozesses beim Füllvorgang durch die EMC-Schmelze über den Luftspalt entweichen.

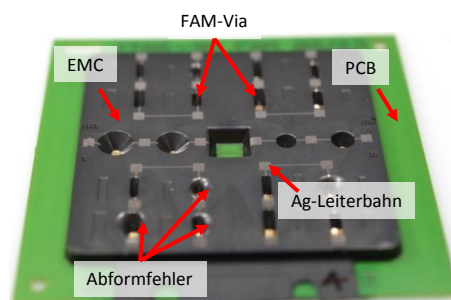


Abb.8.1.2-8: Repräsentative Darstellung der elektrischen Funktionalisierung der EMC-Oberfläche durch Inkjet-Druck von Leiterbahnen.

Wie bei den Federkontakten wird ebenfalls eine elektrische Ankontaktierung der EMC-Oberfläche mit dem PCB-Pad mittels Inkjet-Druck durchgeführt. Dabei werden die unterschiedlichen Flankenwinkel zur Eignung für dieses additive Verfahren bewertet, indem die Benetzung der Ag-Tinte und deren elektrische Leitfähigkeit nach einem Sinterprozess überprüft werden. In Abb.8.1.2-8 ist repräsentativ ein Substrat nach dem Inkjet-Prozess dargestellt. Dieses stammt aus der Substratherstellung nach der ersten Insert-Optimierung. Es sind Abformfehler in den ersten beiden Quadranten zu sehen, die aber den Inkjet-Prozess nicht negativ beeinflusst haben. Es

kann auf jede der erzeugten FAM-Via-Flanken Ag-Tinte gedruckt werden. Aus diesem Grund sind die gewählten Flankenwinkel sowohl auf- als auch abwärts bedruckbar.

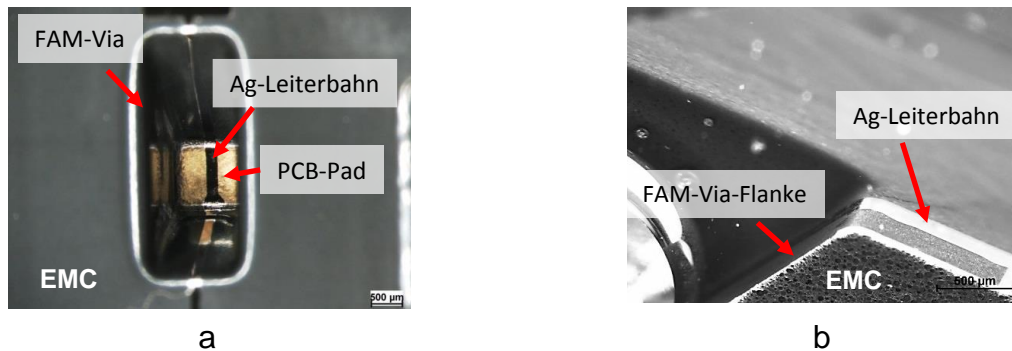


Abb.8.1.2-9: Darstellung des elektrischen ankontaktierten FAM-Via aus a) der Draufsicht mit einem FAM-Via-Flankenwinkel von  $60^\circ$  und b) einem Querschliff, um den Übergang der Ag-Leiterbahn von der EMC-Oberfläche zur FAM-Via-Flanke zu bewerten.

In Abb.8.1.2-9a ist repräsentativ eine gedruckte und gesinterte Ag-Leiterbahn auf der  $60^\circ$  FAM-Via-Flanke zu sehen. Dabei zeigt sich, dass es einen undefinierten verbreiterten Leiterbahnteil direkt am Mold Flash auf dem PCB-Pad gibt. Dieser ist nur dann als kritisch zu betrachten, wenn sich in der Nähe der Ag-Leiterbahn eine weitere Leiterbahn befindet. Für diesen Fall würde an der Stelle ein Risiko für Kurzschlüsse bestehen. Deshalb ist es notwendig, den Mold Flash bei der Prozesseinrichtung einzudämmen.

Die abgerundeten, umlaufenden FAM-Via-Kanten, die durch die Luft unter der ETFE-Folie entstehen, sind ideal für den Inkjet-Prozess. Der Übergang zwischen EMC-Oberfläche und FAM-Via-Flanke erfolgt nicht abrupt, sodass die Ag-Tinte dort homogen benetzt (Abb.8.1.2-9b). Alle Ag-Leiterbahnen zeigen bei der Messung des elektrischen Widerstands über eine Via-Länge einen Wert zwischen  $7 \Omega$  bis  $9 \Omega$  [23].

### 8.1.3 Antennenstruktur als Anwendungsbeispiel

Nachdem die Herstellung von elektrischen Kontakten zwischen PCB und EMC-Oberfläche diskutiert wurde, wird hier die Anwendung am Beispiel der elektrischen Funktionalisierung der EMC-Oberfläche mit einer Antennenstruktur besprochen. Antennen auf der EMC-Oberfläche haben den Vorteil, dass sie nicht von elektromagnetischen Störsignalen der gehausten Systemkomponenten beeinflusst werden. Zudem wird dadurch ihre Sende- wie Empfangsleistung heraufgesetzt und Platz gespart. Dazu ist die Inkjet-Technologie ein bewährtes Low-Cost-Verfahren und ideal für die Anwendung in der Herstellung von SIP.

Zunächst wird die Antenne an einen S-Profil-Federkontakt kontaktiert und damit mit der PCB elektrisch verbunden (Abb.8.1.3-1). Die elektrische Funktionsmessung der mittels Ag-Tinte gedruckten Antenne zeigt keine Auffälligkeit und ist funktional. Es

zeigt sich zudem, dass die Antenne frequenzstabil bleibt, selbst über eine beschleunigte Alterung mittels Temperaturschocktest, Temperatur- und Feuchtwärmelagerung [21].

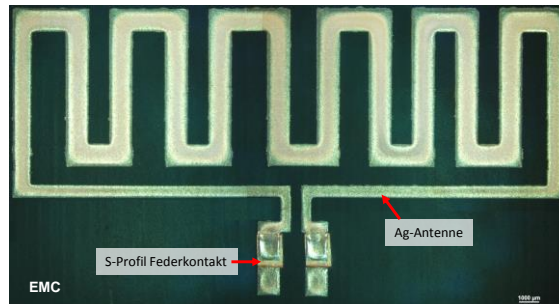


Abb.8.1.3-1: Inkjet-gedruckte Ag-Antenne auf der EMC-Oberfläche, die mittels S-Profil-Federkontakt elektrisch mit dem PCB kontaktiert wird.



Insert im Insert

Abb.8.1.3-2: Darstellung der umgesetzten Inserts im Insert-Konzept, um ein FAM-Via zu erzeugen.

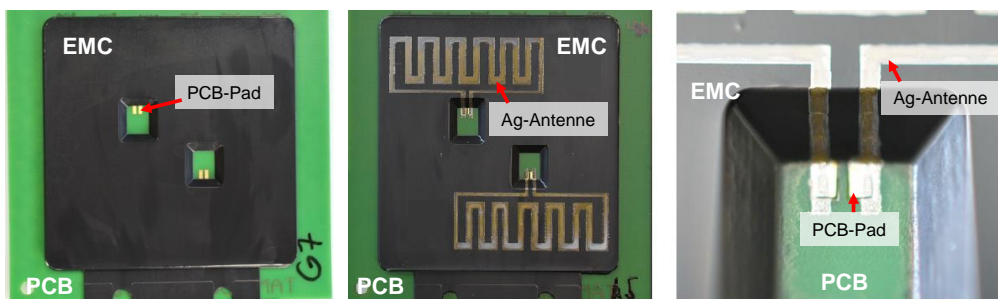


Abb.8.1.3-3: Darstellung des durch FAM hergestellten FAM-Via im EMC und der mittels Inkjet-Druck erzeugten Ag-Antenne, die von der EMC-Oberfläche über das FAM-Via mit PCB elektrisch kontaktiert ist.

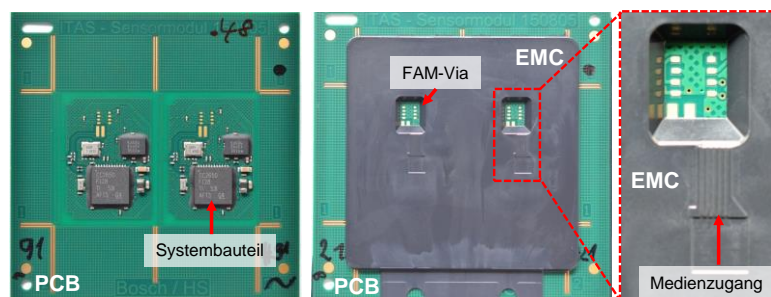


Abb.8.1.3-4: Rechts wird der bestückte LN für das SIP aus dem BMBF-Vorhaben ITAS und links der LN nach dem FAM-Prozess dargestellt.

Bei der Antennenkontaktierung mittels FAM-Via ist das Insert im Insert-Konzept umgesetzt (Abb.8.1.3-2). Das umgesetzte FAM-Via ist in der Fläche größer als die in Kapitel 8.1.2 untersuchten Vias, da zusätzlich eine Freistellung für einen Umweltsensor erzeugt werden soll. Bei der Untersuchung zeigt sich, dass die Kanten scharfkantig im EMC abgeformt werden und die Ag-Tinte darüber abgeschnürt wird, sodass kein Kontakt zwischen den Ag-Partikeln herrscht. Als Gegenmaßnahme wird eine Rundung in das Freistellungsinsert eingebracht, um den schonenden Übergang für die Ag-Tinte von der EMC-Oberfläche auf die FAM-Via-Flanke zu ermöglichen.

In Abb.8.1.3-3 ist die Umsetzung des FAM-Via nach dem FAM-Prozess gezeigt. Hierbei werden zwei Antennen auf eine EMC-Oberfläche gedruckt und geprüft. Auch mit diesem Konzept wurde eine Antenne über das FAM-Via zuverlässig mit der PCB kontaktiert. Die Antenne ist Bluetooth-geeignet und kann in ein SIP eingebracht werden.

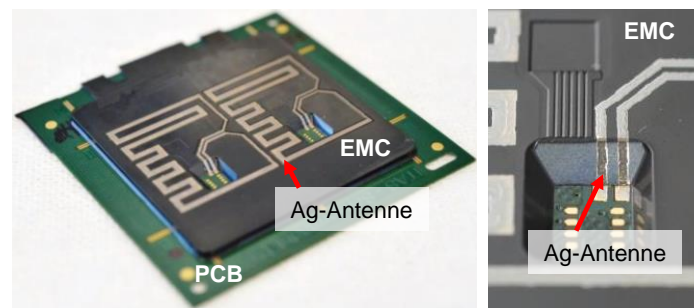


Abb.8.1.3-5: Darstellung des SIP im LN nach dem Inkjet-Prozess.

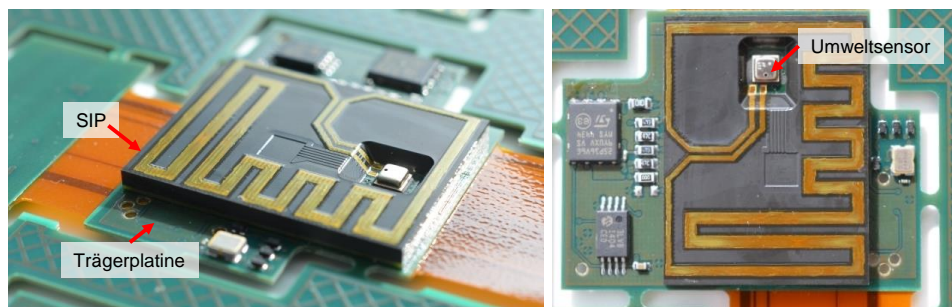


Abb.8.1.3-6: Darstellung des auf einer Trägerplatine montierten SIP mit integriertem Umweltsensor im FAM-Via. Die Verfärbung der Ag-Antenne hängt vermutlich mit dem Aufbringen eines Schutzlacks zusammen oder kann oxidationsbedingt sein.

Ein SIP wurde mittels der hier dargestellten Ergebnisse hergestellt [23]. Die Funktion des SIP ist Teil eines Monitoringsystems, welches beispielsweise für die Überwachung von Industrieanlagen in Industriehallen, die vollautomatisiert produzieren, eingesetzt werden kann. Dabei soll das aufgebaute SIP die Umgebungsbedingungen wie Druck, Temperatur und Feuchte aufnehmen sowie gleichzeitig ein Signal an einen Host via Bluetooth senden, falls ein außergewöhnliches Ereignis detektiert wird. Das SIP basiert auf dem FlexPac-Ansatz. Wie in Abb.8.1.3-4 gezeigt ist, werden die Systemelemente auf den LN via SMD aufgebracht. Beim FAM-Prozess stellt das

FAM-Via eine Fläche frei, auf die nach dem Inkjet-Prozess ein Umweltsensor montiert wird.

Zudem wird ein Medienzugang im Insert ausgelegt, der sich nach dem FAM-Prozess in der EMC-Oberfläche abbildet. Dieser soll dem Umweltsensor den Kontakt zur Umgebung sichern und ihn zusätzlich vor Staub und anderen Partikel schützen. Deshalb verlaufen dabei fünf Kanäle von einer Vertiefung im EMC zum FAM-Via. Hintergrund dieser Erzeugung eines Medienzugangs ist, dass das gesamte Monitoringsystem in ein weiteres Gehäuse eingebaut wird, um die anderen Module zu schützen. Die Vertiefung in der EMC-Oberfläche wird in diesem Gehäuse unter einer Öffnung positioniert, sodass die Umgebungsbedingungen überwacht werden können. Die FAM-Via-Flanke für die Ag-Antennen ist hierbei mit einem Flankenwinkel von  $45^\circ$  ausgelegt und die aufgebrachten Ag-Antennen arbeiten mit einer Frequenz von 2,45 GHz und sind damit Bluetooth-geeignet. In Abb.8.1.3-5 werden die auf die EMC-Oberfläche gedruckten und zur PCB mittels FAM-Via geführten Ag-Antennen dargestellt. Im nicht gehausten Zustand besitzen diese eine Sendereichweite von etwa 8 m und im gehausten Zustand verringert sich die Sendereichweite um etwa 2 m. Das SIP als Modulaufbau mit integriertem Umweltsensor zeigt Abb.8.1.3-6.

Diese Anwendung für eine komplexe Systemintegration in Gestalt eines SIP zeigt das Potential der FlexPac-Technologie auf. Der vorgestellte Prozess ist reproduzierbar, zuverlässig und für die Umsetzung in einer Serienproduktion geeignet.

## 8.2 Optische Integration

In diesem Abschnitt wird die Möglichkeit der komplexen Systemintegration mittels eines transparenten EMC beschrieben und an einem Beispiel demonstriert. Für diese Anwendung ist das FAM essentiell, da durch den Einsatz einer ETFE-Folie eine Basis für eine optimale Abformung eines optischen Elements wie z.B. einer Linse gegeben ist. Zusätzlich kann dies auch mit einem gefrästen Werkzeugeinsatz durchgeführt werden. Neben einem transparenten EMC kann auch ein silikonbasiertes Compound verwendet werden, da es bei EMC zur Vergilbung kommen kann. Jedoch sind die transparenten EMC aus Fernost so formuliert, dass Additive zugesetzt werden, die den Vergilbungsprozess verhindern sollen.

Eine optische Integration in einem SIP ist immer dann notwendig, wenn optisch aktive und filigrane Systemelemente mit einem optischen Element wie z.B. einer Linse kombiniert werden sollen und dabei Platz gespart werden muss. Eine solche Integration würde meist ein Mehrkomponenten-Packaging erfordern, was in Kapitel 8.3 behandelt wird.

Als Zielanwendung eines solchen SIP wäre z.B. eine Abstandssensorik für das autonome Fahren, für Industrieroboter in der Fertigung und für Anwendungen in der Consumerelektronik (berührungslose Bedienen von Smartphones, Tablets und Spielsys-

temen) sowie selbstfahrende Rasenmäher, Staubsauger und andere Haushaltsgeräte denkbar. Weitere Anwendungen wären lichtgebende Anwendungen wie z.B. Beleuchtungen für ein SIP, das als Monitoringsystem dient, um bei ungünstigen Sichtverhältnissen die integrierte Kamera zu unterstützen, oder ein Blitzlicht im Smartphone.

### 8.2.1 FAM transparenter EMC

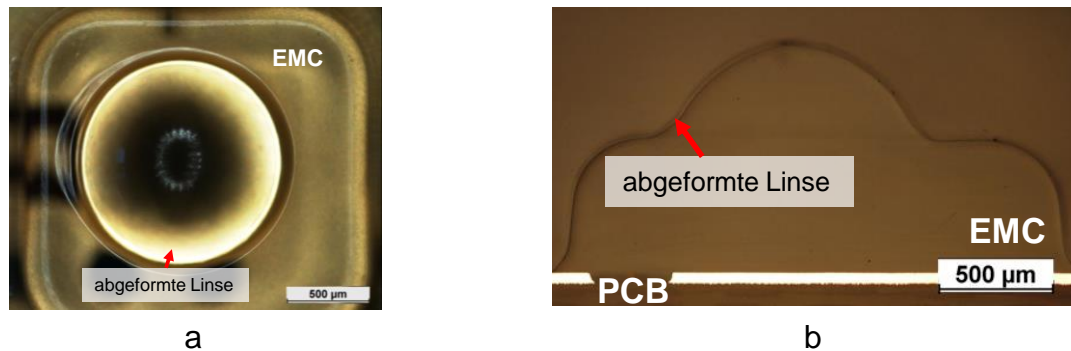


Abb.8.2.1-1: Darstellung der mittels FAM und transparentem EMC auf einem PCB abgeformten Linse als a) Draufsicht und b) Querschliff.

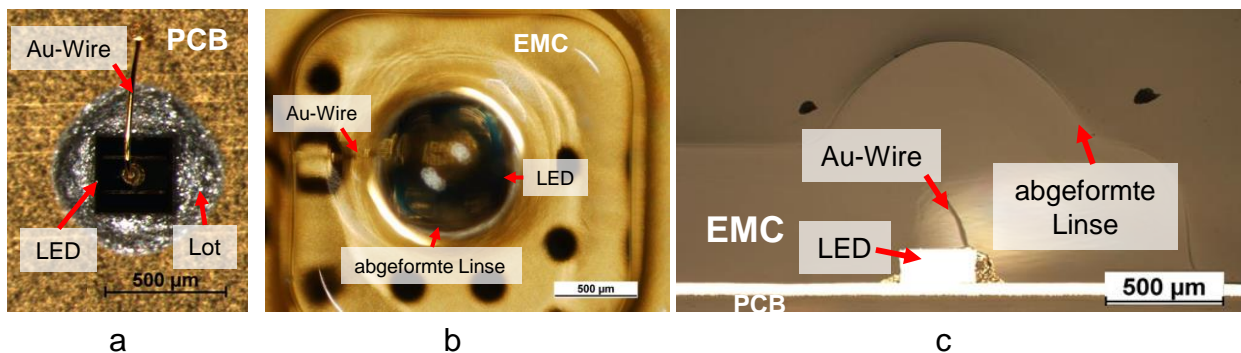


Abb.8.2.1-2: Darstellung von a) der auf dem PCB montierten LED und der mittels FAM und transparentem EMC auf einem PCB abgeformten Linse über dieser als b) Draufsicht und c) Querschliff.

Am Beispiel einer LED, die unter einer mittels FAM erzeugten Linse liegt, wird der prinzipielle Herstellungsprozess erläutert. Als EMC für diese Untersuchung wird das NT-8523-10000 der Nitto Denko Corporation verwendet. Die Verarbeitungstemperatur des transparenten EMC beträgt etwa  $150^{\circ}\text{C}$ . Das anschließende Tempern wird für  $2\text{ h}$  bei Verarbeitungstemperatur vom Hersteller des transparenten EMC empfohlen.

Für die Prozesskette muss ein AVT-Prozess ähnlich dem des Bildsensor-FlexPac durchgeführt werden, um die LED an einer vom Werkzeug definierten Stelle auf dem LN zu positionieren. Das FAM-Werkzeug wird aufgebaut und der FAM-Prozess eingerichtet. Der LN mit der LED wird vor dem FAM bei  $100^{\circ}\text{C}$  für  $3\text{ h}$  getrocknet und dann optional mit Niederdruck- $\text{O}_2$ -Plasma behandelt, um die Haftung auf der PCB-

Oberfläche zu steigern. Die transparenten EMC zeigen grundsätzlich eine gute Haftung auch ohne Plasmavorbehandlung.

In Abb.8.2.1-1a ist die abgeformte Linse als Draufsicht zu sehen. Dabei wurde noch keine LED verkapselt. Die Abbildung soll zeigen, dass die Abformung der Linse im EMC gelungen ist. Ein Querschliff zeigt zudem, dass die Linse in z-Richtung gut abgeformt ist (Abb.8.2.1-1b). Bei der Herstellung des Querschliffs ist es aufgrund der Transparenz des EMC komplex, genau die Mitte der Linse zu treffen. Daher zeigt der Querschliff einen Ausschnitt um die Mitte der Linse. Das dargestellte Ergebnis der Linsenabformung ist gut und der ins FAM-Werkzeug eingebrachten Kavität entsprechend. Die Kanten um die Linse sind aufgrund der ETFE-Folie rund, was die Funktion der Linse nicht weiter beeinträchtigt.

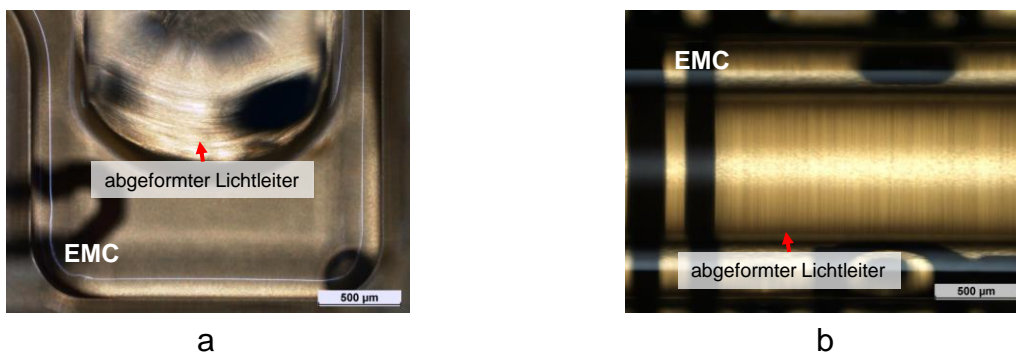


Abb.8.2.1-3: Darstellung des mittels FAM und transparentem EMC auf einem PCB abgeformten Lichtleiters als a) Draufsicht am Ansatz und b) Draufsicht im Leiter.

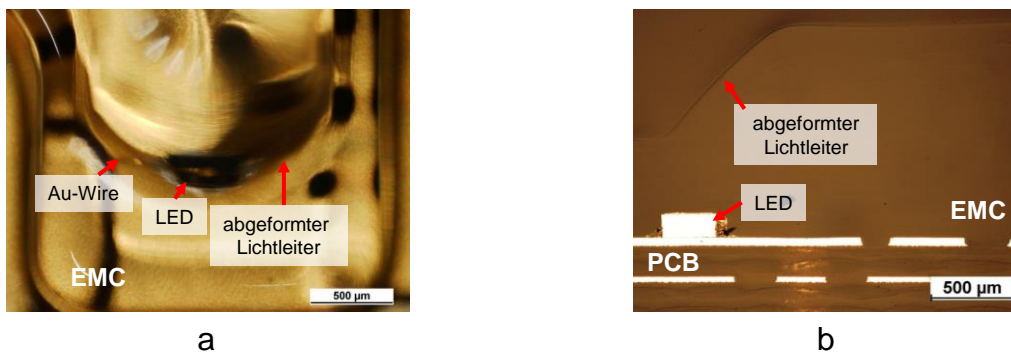


Abb.8.2.1-4: Darstellung des mittels FAM und transparentem EMC auf einer PCB abgeformten Lichtleiters über einer LED als a) Draufsicht und b) Querschliff.

Die eingebrachte LED unter der Linse wird in Abb.8.2.1-2 gezeigt. Zum besseren Verständnis des LED-Aufbaus ist in Abb.8.2.1-2a die auf das PCB gelötete und mittels Au-Draht elektrisch kontaktierte LED gezeigt.

Es zeigt sich eine gute Zentrierung der LED unter der Linse (Abb.8.2.1-2b und c). Der Querschliff zeigt einen Ausschnitt hinter der Linsenmitte, da der Au-Draht als von der LED losgelöster Draht zu sehen ist. Dennoch ist gut zu sehen, dass die LED unter der Linse positioniert ist.

Das zweite Anwendungsbeispiel, das in diesem Kapitel gezeigt wird, ist die Umsetzung eines Lichtleiters. Das Einbringen eines Lichtleiters in das SIP könnte verschiedene Gründe haben. Beispielsweise kann es erforderlich sein, dass Licht einer definierten Wellenlänge als Referenz für ein Optiksystem benötigt wird und dieses von einer LED über den Lichtleiter auf den Sensor geleitet wird. Des Weiteren kann ein Lichtleiter eingesetzt werden, um im SIP eine Datenschnittstelle nach außen zu realisieren. Die Applikation ist anwendungsspezifisch und vielseitig. In Abb.8.2.1-3 sind zwei Ausschnitte eines Lichtleiters gezeigt. Dabei ist die Geometrie so gehalten, dass möglichst viel Licht an der Grenzfläche zwischen optisch dünnem und dickem Medium reflektiert werden kann.

Der gezeigte Ansatz des Lichtleiters ist mit einer Kugelkalotte im EMC abgeformt. Damit kann das Licht einer LED in den Lichtleiter reflektiert und entlang des Lichtleiters geführt werden. Den beschriebenen Aufbau zeigt Abb.8.2.1-4.

Beim FAM-Prozess zur Herstellung von optischen Elementen zeigt sich, dass das transparente EMC leichter durch geringe Spalten fließen, sodass empfohlen wird entlang des Angusses keine Leiterbahnstrukturen oder ein Oberflächenprofil vorzusehen, ansonsten fließt dort EMC-Schmelze ab und kann tief ins Werkzeug gelangen und freizustellenden Flächen kontaminieren. Deshalb muss bei der Prozessentwicklung ein geeigneter Angusspfad entwickelt werden. Aufgrund der CTE-Unterschiede zwischen transparentem EMC und PCB sowie konventionellem hochgefülltem EMC erzeugt ein vollflächiger Überzug des transparenten EMC einen starken Bauteilverzug. Aus diesem Grund sollte es nur für lokale hier demonstrierte Anwendungen verwendet werden.

Transparentes EMC zur Herstellung von Linsen und Lichtleitern mittels FAM in einem SIP als optische Integration ist serienprozessstauglich. Dies zeigen die hier diskutierten Beispiele.

### **8.2.2 Mehrkomponenten-FAM**

Bei einem SIP könnte es gefordert sein, mehrere FAM-Prozesse zu fahren. Im vorigen Kapitel wurden die Lichtleiter und Linsen mittels FAM hergestellt. Die weiteren Systemelemente sind bei diesem Prozessschritt evtl. noch nicht aufgebaut, sodass ein weiterer AVT-Prozess durchgeführt wird und ein weiterer FAM-Prozessschritt folgt.

Der Vorteil bei einem Mehrkomponenten-FAM ist, dass zum einen mit verschiedenen EMC das SIP realisiert werden kann, wie z.B. einem transparenten EMC im ersten Prozessschritt und einem hochgefüllten schwarzen EMC im zweiten Prozessschritt. Dieses Beispiel ist in Abb.8.3-1 gezeigt. Zum anderen kann ein SIP aufgebaut werden, dessen Systemkomponenten in mehreren FAM-Prozessschritten verkapselt werden können.



Das Mehrkomponenten-FAM ist mit additiven oder Galvanikverfahren kombinierbar, sodass auch mehrere Verdrahtungsebenen eingebracht werden können. Bei einer Antennenstruktur könnte so mittels eines FAM-Prozesses eine dünne EMC-Schicht als Schutzfunktion aufgebracht werden. Dabei kann dasselbe EMC als zweite Komponente verwendet werden und damit der CTE beider EMC gleich gehalten werden.

Bei der Werkzeuggestaltung zeigt sich bei einem modularen Werkzeugkonzept nur ein geringer Aufwand, denn die Kavitäten-Inserts sind schnell austauschbar. Die zusätzlichen FAM-Prozessschritte erhöhen die Zykluszeiten und müssen deshalb ins Aufbaukonzept des SIP passen, ansonsten sind die Mehrkosten nicht zu rechtfertigen.

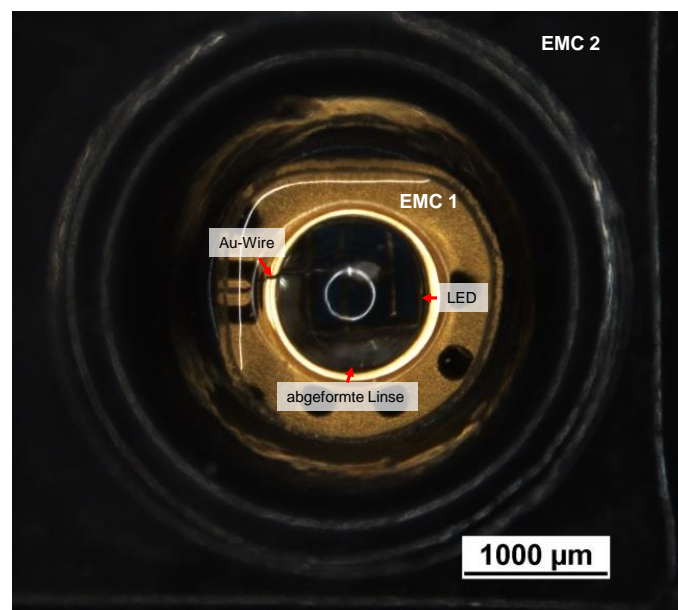


Abb.8.3-1: Mehrkomponenten-FAM für eine LED, die im ersten Prozessschritt mit einem transparenten EMC (EMC 1) und im zweiten Prozessschritt mit einem hochgefüllten schwarzen EMC (EMC 2) verkapselt wird.

Mehrkomponenten-FAM sind dafür geeignet, in einen Serienprozess implementiert zu werden. Jedoch besteht Entwicklungsbedarf, um die Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Anbindung der beiden EMC ist nicht einfach, da es auch bei mehrfachem Einsatz des gleichen EMC möglich ist, dass aufgrund der zugesetzten Additive keine stoffschlüssige Verbindung mit guter Haftung erreicht wird.

Bei gefüllten und ungefüllten EMC ist eine Delamination aufgrund unterschiedlich hoher CTE wahrscheinlich.

### 8.3 Mikrofluidische Integration

Eine weitere Oberflächenintegration stellt die mikrofluidische Integration dar. Dabei können auf der EMC-Oberfläche Fluide aus einem Reservoir über einen Kanal zu einem anderen Reservoir geführt werden. So lassen sich beispielsweise Suspensionen über einen im transparenten EMC verkapselten Sensor transportieren, der diese

analysiert. Für eine weitere Form der elektrischen Funktionalisierung der EMC-Oberfläche wäre diese Integrationsform ebenfalls geeignet. In diesem Abschnitt wird die Abformung und Funktion der im EMC abgeformten mikrofluidischen Strukturen betrachtet und diskutiert.

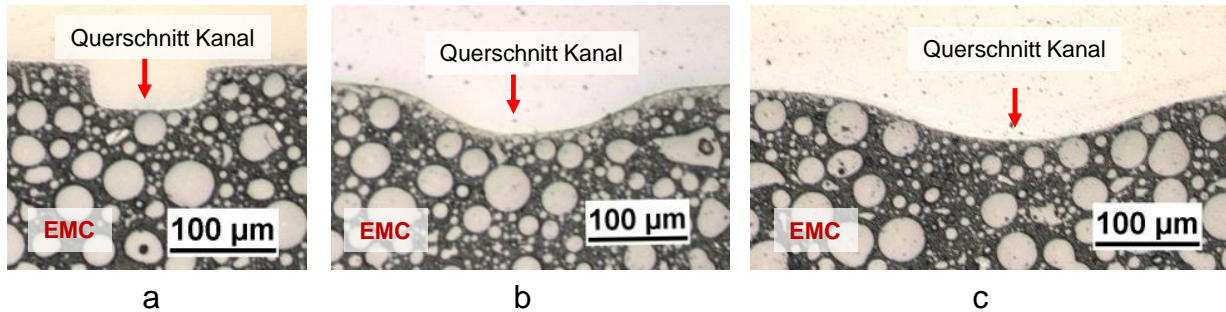


Abb.8.4-1: Querschliff der Abformung eines Kanals mit einer Querschnittsfläche von  $100 \times 50 \mu\text{m}^2$  im EMC, dabei geschieht die Abformung a) ohne, b) mit  $50 \mu\text{m}$  und c) mit  $100 \mu\text{m}$  dicker ETFE-Folie.

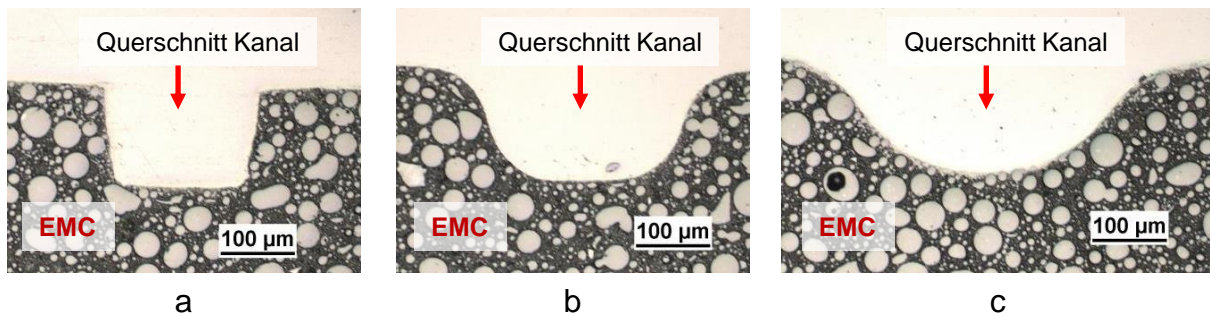


Abb.8.4-2: Querschliff der Abformung eines Kanals mit einer Querschnittsfläche von  $200 \times 150 \mu\text{m}^2$  im EMC, dabei geschieht die Abformung a) ohne, b) mit  $50 \mu\text{m}$  und c) mit  $100 \mu\text{m}$  dicker ETFE-Folie.

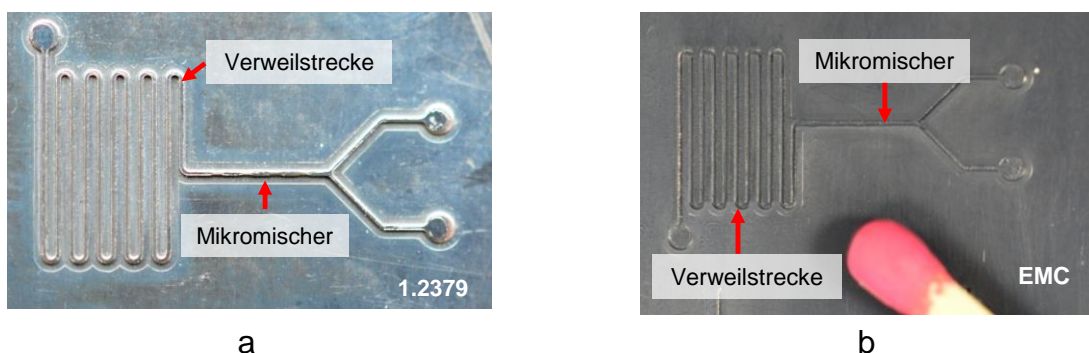


Abb.8.4-3: Draufsicht eines a) in St 1.2379 geätzten Mikromischers mit Verweilstrecke und b) mittels  $50 \mu\text{m}$  ETFE-Folie Abformung in der EMC-Oberfläche.

Da ein EMC in seiner Verarbeitung niederviskos ist und um beliebige Formen fließen kann, ist die Eignung zur Abformung dünner Kanäle zu erwarten. Im Medienzugang des SIP aus Kapitel 8.1.3 ist dies in Abb.8.1.3-5 rechts zu erkennen. Dies zeigt die grundsätzliche Eignung zur Abformung von mikrofluidischen Kanälen auf der EMC-Oberfläche. Der Einsatz einer ETFE-Folie zur Abformung von solchen Strukturen

bildet die Kanalform gerundet ab (Abb.8.4-1). Dabei ist die verwendete Foliendicke ein maßgeblicher Parameter. Ein Kanal von  $100 \times 50 \mu\text{m}^2$  Querschnittsfläche, der mit einer ETFE-Folie, die  $50 \mu\text{m}$  oder  $100 \mu\text{m}$  dick ist, im Werkzeug abgedeckt wird, kann nicht formtreu abgebildet werden und besitzt im Querschliff eine Mulden- statt einer Rechtecksquerschnittsfläche. Diese ausgewölbten Kanäle besitzen keine mikrofluidische Funktion. Ohne ETFE-Folie abgeformt ist eine mikrofluidische Funktion gegeben, da der Querschnitt des Kanals einem Rechteck gleicht. Dieser Kanal kann mit Hilfe einer PTFE-Beschichtung der Kanalstruktur im Werkzeug hergestellt werden.

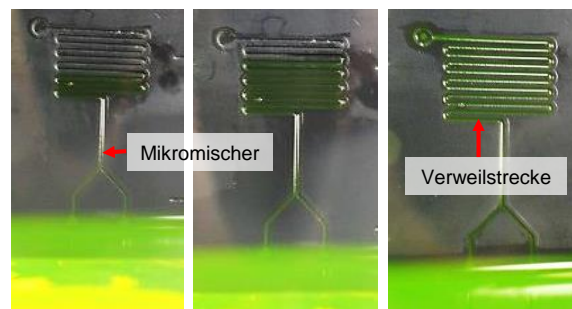


Abb.8.4-4: Funktionstest des in der EMC-Oberfläche abgeformten Mikromischers mit mäanderförmiger Verweilstrecke mittels gefärbtem Isopropanol. Der Test erfolgt gegen die Schwerkraft.

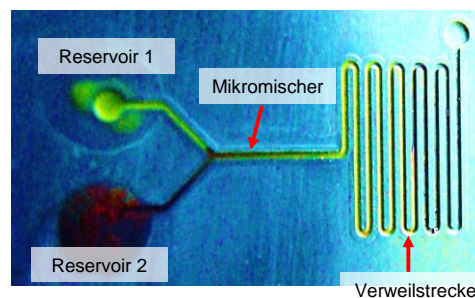


Abb.8.4-5: Funktionstest des in der EMC-Oberfläche abgeformten Mikromischers mittels gelb und rot gefärbtem Isopropanol.

Des Weiteren wird bei der Verwendung einer ETFE-Folie die Kanalstruktur aufgrund der Foliendicke breiter als ausgelegt abgeformt. Dies muss bei der Kanalauslegung berücksichtigt werden. Zusätzlich kann die verbleibende Luft unter der ETFE-Folie beim FAM-Prozess zur starken Abrundung des Kanals führen. Bei dem  $50 \mu\text{m}$  tiefen Kanal entsteht die runde Kanalform überwiegend durch die Folie, da diese genauso dick wie die Kanaltiefe ist oder dicker.

Ab einer Querschnittsfläche von  $200 \times 150 \mu\text{m}^2$  sind die mittels einer  $50 \mu\text{m}$  dicken ETFE-Folie abgeformten mikrofluidischen Kanäle für den Transport eines Fluids geeignet, denn deren Fläche bleibt einem Rechteck ähnlich (Abb.8.4-2). Die dickere Folie zeigt eine muldenförmige Querschnittsfläche, die aufgrund von deren Tiefe mikrofluidisch funktional sein kann. Bei der Betrachtung der Kanten der Kanäle fällt auf,

dass diese durch die Folie radial zulaufen. Dies bewirkt bei einer guten Benetzung des Fluids, dass dieses aus dem Kanal fließen könnte.

Als Anwendungsbeispiel wird in Abb.8.4-3 ein in der EMC-Oberfläche abgeformter Mikromischer gezeigt. Der Mikromischer besitzt einen Kanalquerschnitt von  $200 \times 150 \mu\text{m}^2$  und wird mit einer  $50 \mu\text{m}$  dicken ETFE-Folie abgeformt. Die mäanderförmige Verweilstrecke dient zur Demonstration des Füllstands der Kanäle. Bei dieser Untersuchung zeigt sich, dass Isopropanol mit Lebensmittelfarbe versetzt durch die Kapillarwirkung und Benetzung gegen die Schwerkraft in den Mikromischer gezogen wird und den Mäander bis zum Endreservoir hin füllt (Abb.8.4-4). Es ist dabei zu sehen, dass aufgrund der abgerundeten Kanten, diese auch benetzt werden. Dies führt zu einem Fluidverlust auf der Fließstrecke. Dies kann durch einen zusätzlichen Verschluss der mikrofluidischen Struktur mittels Abdecken kompensiert werden. Die Zeit, die das Isopropanol zum Füllen des gesamten Kanals benötigt, beträgt etwa 55 s. Der Mikromischer stellt einen Kanal dar, in dem Hindernisse für das Fluid eingebracht sind. Diese stellen Verengungen und Aufweitungen der Fließstrecke dar und sorgen für eine Verwirbelung innerhalb des fließenden Fluides. So kann aus Reservoir 1 ein anderes Fluid als aus Reservoir 2 in den Mikromischer einströmen und dort vermischt werden. Dies ist beispielhaft in Abb.8.4-5 festgehalten. Dabei wird zusätzlich zu dem gelb gefärbten Isopropanol rot gefärbtes verwendet. Bei der Betrachtung der Abbildung ist gut zu sehen, dass am Ansatz des Mikromischers der rote Anteil überwiegt und sich im weiteren Fließverlauf farblich verliert. Damit bestätigt sich die Funktionalität des Mikromischers.

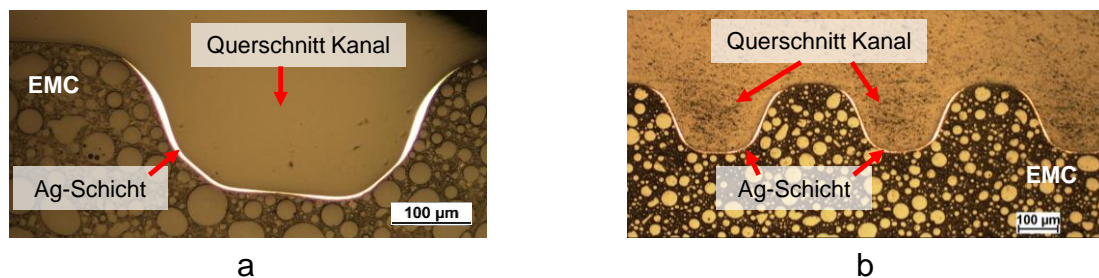


Abb.8.4-6: Querschliffe eines a)  $150 \mu\text{m}$  tiefen mikrofluidischen Kanals im EMC, welcher eine Ag-Schicht enthält und b) die Mäanderstruktur zum Vergleich mit a).

Da Alkohole, wie Isopropanol, auch bei Ag-Tinten-Formulierungen als Trägerfluid verwendet werden, ist es ebenso möglich, die mikrofluidischen Kanäle in der EMC-Oberfläche elektrisch zu funktionalisieren. Dies könnte beispielsweise für Anwendungen in der Leistungselektronik eingesetzt werden. Des Weiteren kann durch einen mit Ag-Tinte gefüllten mikrofluidischen Kanal ein passives Bauelement wie Spule, Antenne, Widerstand und Kondensator aufgebaut werden. Für den Fall eines geforderten Wärmeabtransports in einem SIP könnten solche mit Ag-Tinte gefüllten Kanäle als Abwärmepfade genutzt werden.

Um die Fließgeschwindigkeit der Ag-Tinte im Kanal zu erhöhen, eignet sich eine Oberflächenbehandlung mit einem Niederdruckplasma mit Sauerstoffatmosphäre ( $O_2$ -Plasma). In Abb.8.4-6a ist im Querschnitt ein mit Ag-Tinte gefüllter  $150\ \mu\text{m}$  tiefer Kanal, der mittels Niederdruck- $O_2$ -Plasma vorbehandelt ist, nach dem Sinterprozess dargestellt. Die verwendete Ag-Tinte hat die gesamte Kanalwand benetzt und ist durchschnittlich  $8\ \mu\text{m}$  dick. Interessanterweise befinden sich die dicksten Stellen der Ag-Schicht an den Flanken des Kanals. Möglicherweise könnte aufgrund der Niederdruck- $O_2$ -Plasmavorbehandlung der Flankenbereich des Kanals stärker aktiviert worden sein, sodass die Ag-Tinte dahin fließt und einen großen Anteil der mitgeführten Ag-Partikel ansammelt. Somit dünnt sich der Ag-Partikelanteil am Kanalboden aus und hinterlässt nach dem Sinterprozess eine dünnere Ag-Schicht als an den Flanken. Dass die Ag-Tinte beim Fließvorgang nicht über die Kanalfanke fließt, könnte mit dem Eigengewicht der an den Flanken angesammelten Ag-Partikel zusammenhängen, die das Fluid an den Flanken beschweren und somit am Weiterfließen hindern. Dieser Effekt steht im Zusammenhang mit der Abformung der Kanäle mittels ETFE-Folie (Abb.8.4-6). Bei Kanälen ohne Folie kann dies nicht beobachtet werden.

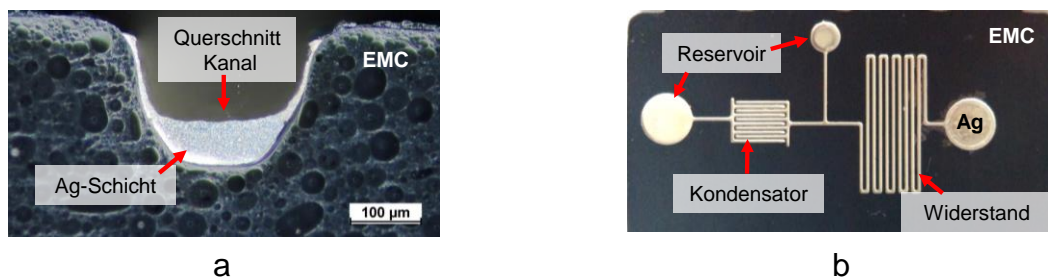


Abb.8.4-6: Querschliffe eines a)  $150\ \mu\text{m}$  tiefen mikrofluidischen Kanals im EMC, welcher eine Ag-Schicht, die durch Nachtropfen von Ag-Tinte verstärkt ist, enthält und b) ein in der EMC-Oberfläche abgeformtes RC-Glied, welches mit Ag-Tinte gefüllt ist [59].

Durch Nachtropfen von Ag-Tinte können dickere Ag-Schichten nach dem Sinterprozess erreicht werden (Abb.8.4-7a) [59]. Des Weiteren wurde ein RC-Glied abgeformt (Abb.8.4-7b) und dessen Funktion untersucht. Bei dieser Anwendung ist der Einsatz einer ETFE-Folie erforderlich, da sonst die EMC-Schmelze trotz PTFE-Beschichtung in den Lamellen haften bleibt und keine zerstörungsfreie Entformung möglich ist. Der elektrische Widerstand  $R$  wird durch die Länge des Mäanders definiert und die Kapazität  $C$  wird in der verzahnten Struktur, die eine Kondensatorplattengeometrie darstellt, bestimmt.  $R$  liegt in einem Bereich von etwa  $5,8\ \Omega$  und  $C$  beträgt ungefähr  $3,5\ \text{pF}$ . Daher zeigt ein solches RC-Glied eine Zeitkonstante von ca.  $20,3\ \text{ps}$ . Dieser Wert ist für eine sinnvolle Anwendung um drei Größenordnungen zu gering, sodass hier einige Optimierungsschritte anstehen indem  $R$  und  $C$  vergrößert werden müssen. Z.B. könnte die Kondensatorstruktur vergrößert und die Ag-Schichtdicke verstärkt sowie für einen höheren Widerstand die Ag-Querschnittsfläche verringert werden. Dennoch zeigt sich durch dieses Ergebnis, dass es möglich ist,

elektrisch funktionale Leiterstrukturen mittels mikrofluidischer Strukturabformung in die EMC-Oberfläche zu integrieren.

Das Fazit des Abschnitts ist, dass die mikrofluidische Integration auf EMC-Oberflächen erfolgreich demonstriert wurde und für SIP-Anwendungen bereitsteht.

## 9. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Systemintegration von mikroelektronischen Bauteilen in leiterplattenbasierten Packages mittels Film-Assisted Molding (FAM) erfolgreich anhand eines QFN-, Bildsensor- und Inertialsensor-FlexPac sowie einiger System-in-Package-Anwendungen (SIP) demonstriert. Dabei wurde eine Prozesskette zur Herstellung von FlexPac (flexible leiterplattenbasierte Packages) entwickelt und deren Plausibilität dargestellt. Die entwickelte Prozesskette stellt sich wie folgt dar:

1. Konzeption eine PCB-Layouts,
2. Fertigung der PCB,
3. Konzeption und Fertigung eines FAM-Werkzeugs,
4. Aufbau- und Verbindungstechnik der mikroelektronischen Komponenten auf der PCB,
5. FAM-Prozess,
6. Temper-Prozess,
7. Vereinzelung in diskrete FlexPac,
8. Charakterisierung.

Eine Toleranzbetrachtung der Leiterplattentechnologie (PCB) zeigte, dass die Toleranzen der PCB für präzise Bestückungsanforderungen ungeeignet sind. Dies belegten Vermessungen ausgewählter PCB-Nutzen. Daher wurde ein Bestückungsverfahren entwickelt, das die Toleranzen in der x/y-Ebene kompensiert, und erfolgreich anhand der präzisen Bestückung eines Bildsensors auf einem PCB-Nutzen demonstriert. Zudem wurden Wege diskutiert, welche die z-Toleranz eines PCB-Loses kompensiert. Der vielversprechendste Weg ist dabei mit gefederten Werkzeugeinsätzen zu arbeiten.

Anhand des QFN-FlexPac wurde die Grundlage für die Erzeugung von leiterplattenbasierten Packages geschaffen und deren Gleichwertigkeit zu leadframebasierten QFN-Packages aufgezeigt. Eine ausführliche Beweisführung anhand von Charakterisierungs- und Zuverlässigkeitstests bestätigte dieses hervorragende Ergebnis.

Mit dem erfolgreich umgesetzten Bildsensor- sowie Inertialsensor-FlexPac wurde das große Potential dieser leiterplattenbasierten Packages gegenüber herkömmlichen Packages aufgezeigt. Die als Sonderlösung vorgestellten FlexPac haben dabei demonstriert, wie unkompliziert zuverlässige Packages, die keinem Standardgehäuse entsprechen, mittels PCB und FAM hergestellt werden können, um den Anforderungen der kleinen und mittleren Unternehmen flexibel entgegenzukommen und dabei Kosten einzusparen. Zudem wurden die hergestellten Bildsensor-FlexPac mit Referenzpackages verglichen und aufgezeigt, dass die FlexPac-Aufbauvariante nur das Sensorfeld freistellt und damit die optische Funktionalität des Sensors verbessert. Beim Inertialsensor-FlexPac wurde gezeigt, dass selbst MEMS mittels FAM funktional verarbeitet werden können. Durch den FAM-Prozess wurde lediglich eine geringe

Offsetkapazität in den Inertialsensor eingebracht. Damit wurde die schonende Verkapselung, die mittels FAM möglich ist, demonstriert.

Es wurden neuartige Integrationstechnologien für die Herstellung von leiterplattenbasierten SIP besprochen. Die Integrationstechnologien wurden dabei in elektrische, optische und mikrofluidische Integration eingeteilt. Bei der elektrischen Integration wurde gezeigt, wie Federkontakte einen elektrischen Kontakt zwischen PCB und EMC-Oberfläche (Epoxy Molding Compound) herstellen können. Des Weiteren wurden FAM-Vias demonstriert, die den elektrischen Kontakt zwischen PCB- und EMC-Oberfläche mittels einer Rampe und dem Einsatz der Inkjet-Technologie mit elektrisch leitfähigen Tinten herstellen können. Dabei wurde gezeigt, dass FAM-Vias unsymmetrisch sein und ein großes Aspektverhältnis haben können. Ein Anwendungsbeispiel für FAM-Vias in einem SIP wurde gezeigt und diskutiert. Dabei handelte es sich um ein Modul eines Monitoringsystems. Dieses Modul ist für die Messsignalübertragung via Bluetooth verantwortlich. Die Bluetooth-Antenne wurde erfolgreich mittels Inkjet-Technologie auf die EMC-Oberfläche gedruckt und über das FAM-Via mit der PCB elektrisch kontaktiert.

Anhand der optischen Integration wurde gezeigt, dass mittels des Verarbeitens eines transparenten EMC im FAM-Prozess Linsen formtreu abgeformt werden können. Damit ist es möglich, lichtgebende oder -empfangende mikroelektronische Komponenten funktional zu verkapseln und optische Elemente herzustellen. Um den Einsatz für ein SIP aufzuzeigen, wurde zudem die Möglichkeit eines Mehrkomponenten-FAM aufgezeigt, wobei das transparente EMC teilweise in einem weiteren FAM-Schritt durch ein herkömmlich schwarzes EMC abgedeckt wurde, sodass das einfallende oder abgehende Licht nur an einer dafür vorgesehener Stelle das Package verlassen kann.

Mit der mikrofluidischen Integration wurde gezeigt, auf welche Weise die EMC-Oberfläche mikrofluidisch funktionalisiert werden kann. Dabei wurden fluidische Anwendungen diskutiert, bei denen Lösungen über die im EMC abgeformten mikrofluidischen Kanäle transportiert oder gemischt werden können, sowie die erfolgreiche elektrische Funktionalisierung der Kanäle unter Verwendung einer Ag-Tinte.

Des Weiteren wurde eine Prüfmethode zur Bestimmung der Haftfestigkeit eines EMC auf diversen Oberflächen entwickelt. Die Prüfmethode lehnte sich an den Button Shear Test an, der für die Haftung eines EMC auf Leadframe-Oberflächen entwickelt wurde. In der dargestellten Untersuchung wurde gezeigt, dass die Haftwirkung des EMC auf unbehandelten und beschichteten Werkzeugoberflächen hervorragend ist. Nur eine dispersive PTFE-Beschichtung verhindert das Anhaften des EMC am Werkzeug. Deshalb sollte bei der Einrichtung eines Prototypenwerkzeugs im FAM-Prozess, trotz ETFE-Folie, dieses mit PTFE beschichtet werden, denn dann kann ein Reinigungsschritt beim Foliendurchbruch der EMC-Schmelze nach dem FAM-Prozess erheblich vereinfacht werden.



Weiterhin wurde eine ausführliche Untersuchung zur Haftung eines EMC auf fünf verschiedenen PCB-Oberflächen durchgeführt. Dabei wurden Oberflächenaktivierungen mittels Plasmabehandlung untersucht. Es stellt sich heraus, dass die beste Haftung eines EMC auf der Basismaterialoberfläche der PCB erzielt wird. Weiterhin hat sich herausgestellt, dass eine Plasmaaktivierung der Polymeroberflächen die Haftung häufig verbessert, aber nicht notwendig ist, da die Haftung auch ohne Plasmaaktivierung auf diesen Oberflächen hervorragend ist.

Zudem zeigte sich, dass die Art des Goldfinishes einen signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit des EMC ausübt. Ein Goldfinish, welches im Schichtaufbau eine Sperrschicht aus Palladium zwischen Nickel und Gold aufweist, zeigt nach der Plasmabehandlung keinen Unterschied bei der Haftung des EMC, d.h. die Haftung verändert sich nicht und bleibt gleich. Verfügt das Goldfinish jedoch nicht über eine Sperrschicht zwischen Nickel und Gold, so wird durch die untersuchten Plasmaaktivierungen die Haftung signifikant erhöht.

## Literatur

- [1] J. Fjelstad, "Materials and Methods for IC Package Assemblies | Solid State Technology," *Materials and Methods for IC Package Assemblies*. [Online]. Available: <http://electroiq.com/blog/2005/08/materials-and-methods-for-ic-package-assemblies/>. [Accessed: 12-Jul-2016].
- [2] Lerch, David, "Mikroelektronik: Die große Verlockung aus Fernost," *handelsblatt.com*. [Online]. Available: <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand/mikroelektronik-die-grosse-verlockung-aus-fernost/3166292.html>. [Accessed: 26-Jul-2016].
- [3] H. Ardebili and M. G. Pecht, *Encapsulation technologies for electronic applications*. Burlington, MA: William Andrew, 2009.
- [4] J. Rösler, H. Harders, and M. Bäker, *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe: mit 34 Aufgaben mit Lösungen*, 3., Durchges. und korrigierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [5] D. Lu and C. P. Wong, Eds., *Materials for advanced packaging*. New York, NY: Springer, 2009.
- [6] "JESD30D, 7/06." .
- [7] M. Pecht, L. T. Nguyen, and E. B. Hakim, Eds., *Plastic-encapsulated microelectronics: materials, processes, quality, reliability, and applications*. New York: Wiley, 1995.
- [8] M. Iji and Y. Kiuchi, "Flame-retardant epoxy resin compounds containing novolac derivatives with aromatic compounds," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 12, no. 7, pp. 393–406, 2001.
- [9] M. Iji and Y. Kiuchi, "Self-extinguishing epoxy molding compound with no flame-retarding additives for electronic components," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 12, no. 12, pp. 715–723, Dec. 2001.
- [10] Y. Kiuchi and M. Iji, "Environmentally conscious IC molding compound without toxic flame-retardants," in *Proceedings of ISSM2000. Ninth International Symposium on Semiconductor Manufacturing (IEEE Cat. No.00CH37130)*, 2000, pp. 147–150.
- [11] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure*. München: Hanser, 2006.
- [12] H.-J. Hanke, Ed., *Baugruppenttechnologie der Elektronik. [...] Leiterplatten*, 1. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1994.
- [13] G. Mennig and C. Bader, Eds., *Werkzeugbau für die Kunststoffverarbeitung: Bauarten, Herstellung, Betrieb*, 5. Aufl. München: Hanser, 2008.
- [14] G. Mennig and M. Lake, Eds., *Verschleißminimierung in der Kunststoffverarbeitung: Phänomene und Schutzmaßnahmen*, 2. Aufl. München: Hanser, 2008.
- [15] L. Wang, A. Bos, T. van Weelden, and F. Boschman, "The next generation advanced MEMS& sensor packaging," in *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2010 11th International Conference on*, 2010, pp. 55–60.
- [16] D. Lerch, "Die große Verlockung aus Fernost," *Handelsblatt*, p. 3, 28-Apr-2009.
- [17] "MEMS Technology Solution." Amkor Technology, 2010.
- [18] D. Hera, A. Berndt, J. D. Schulze Spüntrup, and C. Reuter, "Flexibles Packaging von mikro-systemtechnischen Bauelementen basierend auf Leiterplattenträgern mittels Film-Assisted Molding," *AiF*, Schlussbericht 17602 N, May 2015.
- [19] D. Hera, T. Günther, A. Berndt, C. Harendt, J. D. Schulze Spüntrup, C. Reuter, K. P. Fritz, H. Kück, A. Zimmermann, "Flexible packaging by film assisted molding for micro assembly technologies based on PCB," in *Proceedings Smart Systems Integration*, Kopenhagen, 2015, pp. 93–100.
- [20] D. Hera, T. Günther, A. Berndt, C. Harendt, J. D. Schulze Spüntrup, C. Reuter, K. P. Fritz, H. Kück, A. Zimmermann, "Flexible packaging by film assisted molding for microintegration of

- MEMS based sensors,” in *Microelectronics Packaging Conference (EMPC), 2015 European*, Friedrichshafen, 2015, pp. 93–100.
- [21] D. Juric, J. Keck, D. Hera, R. Ehrenpfordt, B. Polzinger, W. Eberhardt, A. Zimmermann, “Inkjet-printed antennas on PCB based thermoset packages,” presented at the Proceedings Smart Systems Integration, München, 2016.
- [22] J. Keck, D. Hera, D. Juric, B. Polzinger, L. Liedtke, W. Eberhardt, H. Kück, A. Zimmermann, R. Ehrenpfordt, J. D. Schulze Spüntrup, “Aufbau hochintegrierter Sensorsysteme mittels Inkjet-Druck und Film Assisted Molding,” in *MikroSystemTechnik 2015*, 2015.
- [23] J. Keck, D. Hera, D. Juric, L. Liedtke, and A. Zimmermann, “Integrationstechnologie für autonome Sensorsysteme,” VDI/VDE/IT, BMBF Schlussbericht 16SV5969, Oct. 2015.
- [24] B. Polzinger, V. Matic, L. Liedtke, J. Keck, D. Hera, T. Günther, W. Eberhardt, H. Kück, “Printing of Functional Structures on Molded 3D Devices,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 1038, pp. 37–42, Sep. 2014.
- [25] J. Keck, D. Hera, D. Juric, B. Polzinger, W. Eberhardt, and A. Zimmermann, “Integrations-technologie für autonome Sensorsysteme (ITAS) - Prozesstechnologien zur Funktionsintegration,” Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Stuttgart, Abschlussbericht 16SV5969, Dec. 2015.
- [26] Keck, “Datenblatt PlanoTek komplett.” NovoPlan GmbH.
- [27] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID, Ed., *Technologie 3D-MID: räumliche elektronische Baugruppen ; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Hanser, 2004.
- [28] K.-F. Becker *et al.*, “Duromer MID technology for system-in-package generation,” *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, vol. 28, no. 4, pp. 291–296, Oct. 2005.
- [29] W. Eberhardt and S. Weser, “MID aus Duroplast,” *Elektronik*, vol. 2013, no. 02, p. 1, Apr. 2013.
- [30] “EME-G770H Type CD,” SUMITOMO BAKELITE CO., LTD., Tokyo, Materialdatenblatt # 070897, Apr. 2012.
- [31] G. Gerlach, Ed., *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*. München: Hanser, 1997.
- [32] G. G. Harman and G. G. Harman, *Wire bonding in microelectronics*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [33] D. P. Seraphim, R. Lasky, and C.-Y. Li, Eds., *Principles of electronic packaging*. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [34] “multi-cb: Fertigungstoleranzen unserer Leiterplatten,” [www.multi-circuit-boards.eu](http://www.multi-circuit-boards.eu), 2015. .
- [35] “WEdirekt.: Leiterplatten - Spezifikationen,” [www.wedirekt.de](http://www.wedirekt.de), 2008. .
- [36] “Allgemeine Kenndaten PFM 24 CC Compact Cell Positioniergenauigkeit nach VDI / DGQ 3441.” PRIMACON Maschinenbau GmbH, 2009.
- [37] “fab1.” AMADYNE GmbH, 2008.
- [38] Klafki, “NP-155F.” TECHNOLAM GmbH.
- [39] Wolfer, “Datenblatt halogenarmes Material TG150 gefüllt.” Würth Elektronik GmbH.
- [40] L. Wang, “Film assisted technology for the advanced encapsulation of MEMS/sensors and LEDs,” in *Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2012)*, 2012, pp. 106–110.
- [41] A. Bos, L. Wang, and T. van Weelden, “Encapsulation of the next generation advanced mems& sensor microsystems,” in *Microelectronics and Packaging Conference, 2009. EMPC 2009. European*, 2009, pp. 1–5.
- [42] D. Hera, A. Berndt, T. Günther, S. Schmiel, C. Harendt, and A. Zimmermann, “Flexible Packaging by Film Assisted Molding for Microintegration of Inertia Sensors,” *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1511, Jun. 2017.

- [43] J. M. Gottfried, "CO Oxidation over Gold," Freie Universität Berlin, Freie Universität Berlin, Germany, 2003.
- [44] E. N. Ngnetiwe, "Experimental and Simulation-based Investigation on the Influence of Thermal Aging and Humidity on the Warpage of Molded Plastic Packages," Universität Stuttgart, 2012.
- [45] "MIL-STD-883E." Department of Defense, 05-Jan-1997.
- [46] "JEDEC J-STD-020C." IPC, 07-Jan-2004.
- [47] "SEMI G69-0996 - Test Method for Measurement of Adhesive Strangth Between Lead-frames and Molding." SEMI Internationals Standard, Japanese Packaging Committee, 1996.
- [48] S. Kim, "The role of plastic package adhesion in performance," *IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 809–817, Dec. 1991.
- [49] W. K. Szeto, M. Y. Xie, J. K. Kim, M. M. F. Yuen, P. Tong, and S. Yi, "Interface failure criterion of button shear test as a means of interface adhesion measurement in plastic packages," in *International Symposium on Electronic Materials and Packaging, 2000. (EMAP 2000)*, 2000, pp. 263–268.
- [50] N. Srikanth, L. Chan, and C. J. Vath III, "Adhesion improvement of EMC–leadframe interface using brown oxide promoters," *Thin Solid Films*, vol. 504, no. 1–2, pp. 397–400, May 2006.
- [51] Ian McEnteggart, "Characterisation Interfacial Cracking in Microelectronic Packaging." [Online]. Available: <http://www.instron.us/~media/literature-library/whitepapers/2004/12/characterisationinterfacialcrackinginmicroelectronicpackagingpdf.pdf?la=en>. [Accessed: 11-Aug-2016].
- [52] A. A. O. Tay, J. S. Phang, E. H. Wong, and R. Ranjan, "A modified button-shear method for measuring fracture toughness of polymer-metal interfaces in IC packages," 2003, pp. 1165–1169.
- [53] "Datenblatt\_12379.pdf." Stauberstahl GmbH.
- [54] R. Hennersdorf, "Verarbeitungs- und Werkzeuggestaltunghinweise.pdf." Raschig GmbH.
- [55] "Materialdaten Silicon, Si," 26-Apr-2017. [Online]. Available: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7d1b56e9e0c54ac5bb9cd433a0991e27&ckck=1>.
- [56] Contag AG, "oberflaechenubersicht\_kundeninfo." [Online]. Available: [http://www.contag.eu/uploads/techniks/oberflaechenubersicht\\_kundeninfo.pdf](http://www.contag.eu/uploads/techniks/oberflaechenubersicht_kundeninfo.pdf).
- [57] K. L. Mittal and T. Ahsan, Eds., *Adhesion in microelectronics*. Hoboken, New Jersey: Scrivener Publishing/Wiley, 2014.
- [58] B. Polzinger *et al.*, "Printing of Functional Structures on Molded 3D Devices.," *Adv. Mater. Res.*, no. 1038, 2014.
- [59] H. Bott, "Untersuchung zur elektrischen Funktionalisierung von in einem Thermoset abgeformten mikrofluidischen Kanälen," Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., Stuttgart, Studienarbeit, Aug. 2016.

## **Danksagung**

Ich danke Prof. Dr.-Ing. A. Zimmermann für das entgegengebrachte Vertrauen, die gute Betreuung und die hilfreichen Diskussionen während des Entstehungsprozesses der Arbeit sowie die Bereitschaft diese Ausarbeitung zu Begutachten.

Besonders danke ich Prof. Dr.-Ing. J. N. Burghartz für das Erstellen eines Zweitgutachtens und die damit geopfert Zeit.

Ganz herzlich danke ich meiner Frau Anne-Kathrin für die aufopfernde Nachsicht mit mir und den damit entstandenen Freiraum für den Schreibprozess dieser Promotionsausarbeitung.

Weiterhin danke ich PhD. T. Günther für die fortwährend gute Unterstützung und Bereitschaft, Fragen und Herausforderungen zum Entstehungsprozess dieser Arbeit zu diskutieren.

Ein herzlicher Dank geht an alle Mitarbeitenden der Projekte IGF FlexPacFAM und BMBF ITAS, deren überragend gute Zusammenarbeit den Inhalt für diese Promotion erst ermöglicht hat.

Dem gesamten Hahn-Schickard Institut für Mikroaufbautechnik sei ganz besonders gedankt für die Bereitstellung aller Gerätschaften, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Der Lektorin dieser Arbeit, H. Stanullo, möchte ich sehr für ihre aufgebrachte Zeit während der sprachlichen Korrektur danken.

## Lebenslauf

### *Daniel Hera*

---

Geburtstag/-ort 06.04.1985 in Eisenmarkt

### *Angestellter*

---

04.2012 - dato wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

### *Wissenschaftliche Veröffentlichungen*

- 
- 2018 M. Röder, P. Schilling, D. Hera, T. Günther, A. Zimmermann, "Influences on the Fabrication of Diffractive Optical Elements by Injection Compression Molding", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, no. 1, p. 5
- 2017 D. Hera, A. Berndt, T. Günther, S. Schmiel, C. Harendt, A. Zimmermann, "Flexible Packaging by Film Assisted Molding for Microintegration of Inertia Sensors", *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1511
- R. Kulkarni, D. Hera, M. Soltani, T. Günther, T. Grözinger, A. Zimmermann, "Feasibility of manufacturing packaged electronic systems by thermoset injection molding", in *Proceedings Smart Systems Integration*, Cork
- 2016 D. Juric, J. Keck, D. Hera, R. Ehrenpfordt, B. Polzinger, W. Eberhardt, A. Zimmermann, "Inkjet-printed antennas on PCB based thermoset packages", presented at the *Proceedings Smart Systems Integration*, München
- 2015 D. Hera, A. Berndt, J. D. Schulze Spüntrup, C. Reuter, "Flexibles Packaging von mikrosystemtechnischen Bauelementen basierend auf Leiterplattenträgern mittels Film-Assisted Molding," *AiF*, Schlussbericht 17602 N
- D. Hera, T. Günther, A. Berndt, C. Harendt, J. D. Schulze Spüntrup, C. Reuter, K. P. Fritz, H. Kück, A. Zimmermann, "Flexible packaging by film assisted molding for micro assembly technologies based on PCB", in *Proceedings Smart Systems Integration*, Kopenhagen
- D. Hera, T. Günther, A. Berndt, C. Harendt, J. D. Schulze Spüntrup, C. Reuter, K. P. Fritz, H. Kück, A. Zimmermann, "Flexible packaging by film assisted molding for microintegration of MEMS based sensors", in *Microelectronics Packaging Conference (EMPC)*, 2015 European, Friedrichshafen
- J. Keck, D. Hera, D. Juric, B. Polzinger, L. Liedtke, W. Eberhardt, H. Kück, A. Zimmermann, R. Ehrenpfordt, J. D. Schulze Spüntrup, "Aufbau hochintegrierter Sensorsysteme mittels Inkjet-Druck und Film Assisted Molding", in *MikroSystem-Technik 2015*
- J. Keck, D. Hera, D. Juric, L. Liedtke, A. Zimmermann, "Integrationstechnologie für autonome Sensorsysteme," *VDI/VDE/IT*, BMBF Schlussbericht 16SV5969
- 2014 B. Polzinger, V. Matic, L. Liedtke, J. Keck, D. Hera, T. Günther, W. Eberhardt, H. Kück, "Printing of Functional Structures on Molded 3D Devices", *Adv. Mater. Res.*, vol. 1038

### *Studium*

---

10.2006 – 03.2012 Friedrich-Schiller-Universität Jena - Diplom-Ingenieur Werkstoffwissenschaft

### *Schulische Ausbildung*

---

2002 – 2005 Marie-Curie-Gymnasium in Bad Berka, Abschluss: Abitur  
 1994 – 2002 Klosterbergschule in Bad Berka, Abschluss: Realschulabschluss