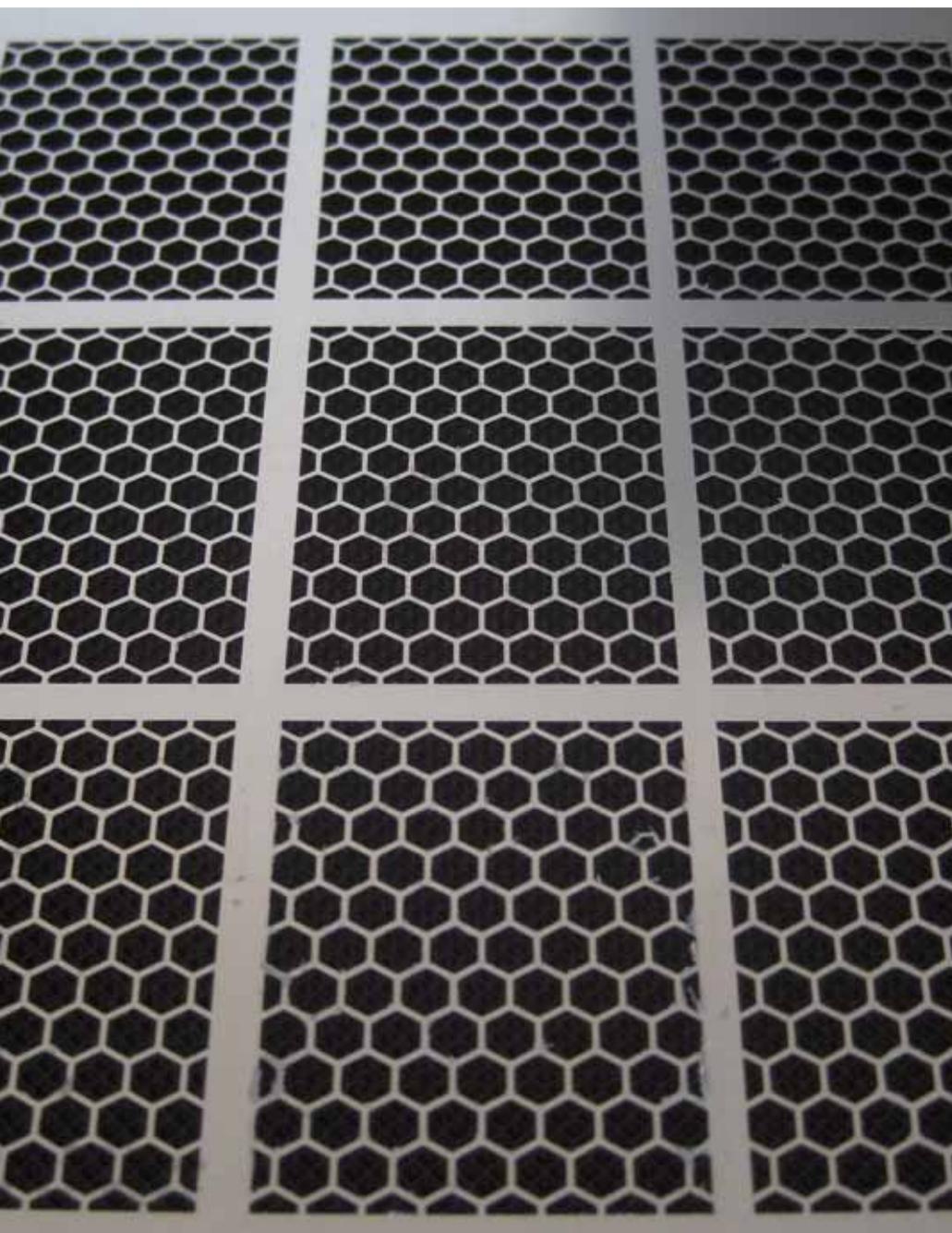


# Aufbau- und verbindungstechnisch optimierter Wärmepfad

*Vorapplizierte Phasenwechselmaterialien weisen zahlreiche Vorteile gegenüber Wärmeleitpasten, aushärtenden Klebern oder gestanzten Folien auf. Der Beitrag gibt einen Überblick zum Stand der Technik.*

DR. WILHELM POHL UND FRANK AULENBACHER \*



Die steigende Leistungsdichte von Leistungsmodulen oder anderen Substraten, wie z.B. LED Platinen oder Peltierelementen erfordert die ständige Verbesserung dieses Abschnittes im thermischen Pfad. Der Anteil des Interface-Materials am Temperaturgradienten beträgt je nach Aufbau ca. 20 bis 65% [1]. Steigende Leistungsdichte und Lebensdauererwartungen sind Zielkonflikte [2]. Thermische Widerstände steigen, wenn das wärmeleitende Interface-Material zu dick oder zu dünn oder an den falschen Stellen aufgebracht ist.

Wegen der Komplexität des Themas und um diesen Abschnitt des thermischen Pfades zu optimieren, bietet es sich an, mit druckbaren Phasenwechselmaterialien vorapplizierte thermische Kontaktflächen zu liefern. Diese Materialien unterscheiden sich grundlegend von anderen Wärmeleitmedien, z.B. wärmeleitenden dauerhaft fluiden Wärmeleitpasten, aushärtenden Klebern oder gestanzten Folien. Phasenwechselnde Materialien sind bei Raumtemperatur trocken und werden erst bei Erwärmung weich, um die Kontaktflächen vollständig zu benetzen. Der Druckprozess findet in Zusammenarbeit mit Modul- und Substratherstellern oder auf Anlagen im eigenen Haus statt [3], [4].

Die Berührtrockenheit der Kontaktfläche unterhalb der Phasenwechseltemperatur und bei normalen klimatischen Bedingungen ermöglicht ein einfaches Handling und erleichtert den Transport. Verschmieren und damit die Zerstörung des Druckbildes wie sie bei Wärmeleitpasten auftreten, werden vermieden.

In der ersten Ausführungsform als stanzbarer 0,2 mm dicker Phase Change Film ließ sich eine Vielzahl von Elektronikkomponen-



\* Dr. Wilhelm Pohl  
... ist Geschäftsführer bei HALA Contec GmbH & Co. KG in Ottobrunn.  
\* Frank Aulenbacher ist Key Account Manager im Unternehmen.

**Vorapplizieren von Phase-Change-Materialien:** Wabenstrukturen stellen die geometrisch beste Lösung beim Schablonendruck dar

ten thermisch anbinden. Homogene Schichtstärken erzeugen nie das beste thermische Ergebnis. Mit Folien lassen sich daher keine oberflächenoptimierten und sehr dünnen thermischen Zwischenschichten realisieren. Toleranzen werden nicht ausreichend ausgeglichen. Wärmeleitmaterial sollte nur die Hohlräume füllen und darf durch Filmbildung nicht die Ausbildung von Metall-Metall-Kontakten bei Aufbauten von Kühlkörper-Leistungsmodulen mit Bodenplatten bzw. Substrat-Metall Kontakten bei bodenlosen Leistungs- oder Keramiksubstraten wie thermoelektrischen Modulen verhindern [6].

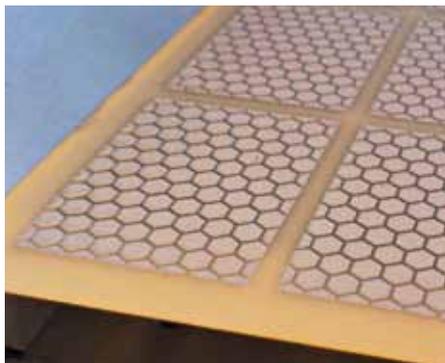


Bild 1: Wabenstrukturbedruckte Keramikplatte

### Massenproduktion multimodaler Füllsysteme

In diesen Zonen ist der Wärmeübergang am besten. Wesentliche Materialvoraussetzungen dafür sind kleine Füllerkorngrößen und enge konstante Korngrößenverteilungen sowie ein sehr gutes Benetzungsverhalten zur Bildung möglichst großer thermischer Kontaktflächen. Multimodale Füllsysteme tragen dazu entscheidend bei.

Auf dem Weg zur Massenproduktion durch herkömmliche Druckverfahren wurden Material und Aufbringungs- sowie Trocknungsprozess in Einklang gebracht. Der Lotpastendruck ist als technische Grundlage anwendbar (J-STD-001 und 003) [3]. Bereits existierende dispensierbare Typen wurden zu druckbaren Varianten weiterentwickelt [5]. Hauptforderungen dabei waren die Minimierung des thermischen Kontaktwiderstands zwischen Elektronikkomponenten z.B. Leistungsmodulen bzw. Substraten und Kühlkörpern, eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit sowie die Druckprozesseignung für Schablonen- und Siebdruck.

Die optimale Schichtdicke ist bei jedem Modul oder Substrat unterschiedlich und muss vom Anwender im Test definiert werden. Es gilt: So dünn wie nur möglich aber so dick wie nötig [7]. Nur durch abgestimmte

Druckbilder können Oberflächenbereiche mit Hot Spots punktgenau gekühlt werden. Um einen guten Druck und genaue Druckbilder ohne Verwischungen zu erzeugen, liegt die Viskosität der Materialien zwischen 150.000 und 200.000 mPas, was im Bereich druckbarer Lotpasten ist.

Zwei Lösungsmittel kommen in der Formulierung zum Einsatz, um unterschiedlich lange Trocknungszeiten zu ermöglichen. Im Fall von TPC-Z-PC-P7 eröffnet dies die Möglichkeit der Trocknung bei Raumtemperatur, hingegen ist die Schabloneinsatzzeit bis zur Reinigung und damit die Schichtzeit kürzer als bei TPC-Z-PC-P8. Hier ist der Schabloneinsatz länger, aber die Trocknung erfordert einen Wärmeprozess.

Die vollständige Trocknung der aufgedruckten Materialien ist für das optimale Wirken wesentlich. Anderenfalls bleiben Gaseinschlüsse, die sich bei Erwärmung negativ auf den thermischen Kontakt auswirken. Nach Trocknung ist das Phase Change Material vorappliziert und berührtrocken. Das vereinfacht die Handhabung und Montage ohne die Gefahr der Verschmierung wie sie bei Wärmeleitpasten besteht. Weil ein Montageschritt entfällt, vereinfacht sich die Produktionslogistik [8]. Der Anwender spart Kosten und Zeit.

	Dicke	Trockenzeit @ 22°C	Trockenzeit @ 60°C	Trockenzeit @ 125°C
<b>TPC-Z-PC-D</b> Schnell trocknende Formulierung für Dispens	150 µm	15 h	8 Min.	3 Min.
	250 µm	30 h	21 Min.	4 Min.
<b>TPC-Z-PC-P7</b> Formulierung mit mittlerer Trockenzeit für Schablonen-, Siebdruck	50 µm	30 h	22 Min.	3 Min.
	150 µm	50 h	50 Min.	5 Min.
	250 µm	65 h	65 Min.	8 Min.
<b>TPC-Z-PC-P7</b> Formulierung mit langer Trockenzeit für Schablonen-, Siebdruck	50 µm	Nicht möglich	4h	7 Min.
	150 µm		11½ h	12 Min.
	250 µm		18½ h	18 Min.

Tabelle 1: Trocknungszeiten dispensier- und druckbarer Phase Change Materialien

**Bild 2:** TPC-Z-PC-P Druckbilder (Durchmesser 7 mm) am Beginn und nach 20 Druckvorgängen



**Bild 3:** TPC-Z-PC-P Druckbilder (Durchmesser 7 mm) nach 30 min, 1 h und 2 h Standzeit

Materialspezifikation:

- Dichte (vor / nach Trocknung): ~1,8 / 2,0 g/cm<sup>3</sup>
- Wärmeleitfähigkeit: 3,4 W/mK
- Phase Change Temperatur: ~45 °C
- Viskosität (vor Trocknung): ~150.000 bis 200.000 mPas (1/min)

Tabelle 1 zeigt die unterschiedlichen Trocknungszeiten für dispensier- und druckbare Typen bei unterschiedlichen Dicken.

### Das thermische Verhalten von Phasenwechselmaterialien

Die Materialtypen kombinieren die Vorteile hoher thermischer Leistungsfähigkeit zusammen mit der Zuverlässigkeit eines Phase Change Materials und mit der einfachen Aufbringung wie bei Wärmeleitpasten. Gegenüber Phase Change Folien und Wärmeleitpasten lassen sich um 25% bis über 50% verbesserte thermischen Widerstände erzielen. Materialmenge, Schichtdicke und Druckmuster beeinflussen den thermischen Widerstand als Ergebnis [9], [10], [11].

Einmal trocken wird das Material oberhalb der Phase Change Temperatur von ca. 45 °C weich und passt sich an die Oberflächen von Kühlkörper und Bauelement an. Beim Benetzen entweicht die Luft aus dem Bereich der

Grenzschicht, was zur Verringerung der thermischen Impedanz führt. Die Matrix-Füller-Kombination schafft einen guten Wärmeübergang schon bei kaltem Material. Dadurch dass die Phase Change Temperatur niedrig ist, findet die Oberflächenbenetzung bereits beim ersten Erwärmungsgang und Anlauf sehr gut ist. Ein ausgeprägtes thermisches Überschwingen kann dadurch vermieden und die Chips beim Hochlaufen geschont werden. Mit jedem weiteren Zyklus vollzieht sich eine iterative Verbesserung wobei Restluft entweicht. Für Kühlkörperoberflächen werden häufig von den Modulen abhängige Richtwerte z.B. Ebenheiten im Bereich  $\leq 10$  bis  $50 \mu\text{m}$  und Rauigkeiten  $R_z \leq 30 \mu\text{m}$  angegeben [4], [12]. Auch bei Abkühlung unter die Phase Change Temperatur bleibt der gute Wärmewiderstand erhalten.

### Der Druckprozess von Phasenwechselmaterialien

Im Schablonen- und Siebdruck können weitaus bessere Ergebnisse als im Aufrollprozess erzielt werden [1]. Für das Layout von Druckbild und Schablone ist die genaue Kenntnis der Oberflächentopographie der Kontaktflächen, z.B. des Substrates oder der

Bodenplatte entscheidend. Wabenstrukturen stellen die geometrisch beste Lösung dar, die den Einfluss von Luft in den Wärmeleitmaterialien weitestgehend verhindert [13]. Äquidistante Zellenabstände führen zur homogen geschlossenen Oberflächenbenetzung. Die Verteilung kann durch das Druckbild, das Volumen durch die Schablonendicke beeinflusst werden [14].

Bild 1 zeigt das mit Wabenstruktur durch eine Schablone mit Mehrfachnutzen auf einer Keramikplatte aufgetragene Material. Um optimierte, sehr dünne effektive Enddicken zu erzielen, werden meistens Schablonen mit Dicken von weniger als  $100 \mu\text{m}$  verwendet.

In einem ersten Schritt kann das Rakel fluten, in einem zweiten Schritt wird beim Druck Überschussmaterial entfernt. Bild 4 zeigt den Druckvorgang.

Aufgrund der hohen Viskosität wird für die gute Füllung der Schablonenöffnungen und für ein gutes Abrollen eine niedrige Druckgeschwindigkeit und ein hoher Rakelruck [6] sowie ein angemessener Absprung bei niedriger Geschwindigkeit empfohlen. Bei Leistungsmodulen mit Schraubverbindungen an den Ecken kann es vorteilhaft sein, die Ecken nicht zu beschichten, da hier Metall-Metall Kontakte durch hohe Schraubkräfte entstehen [9] und für definiert hohe Vorspannungen und Wärmübergänge sorgen.

Standard FR4 Leiterplatten eignen sich durch ihren Kontrast gut zur Evaluierung des Druckbildes. Um die Schablonenstandzeit zu prüfen wurde ein zweiter Druck nach dreißig Minuten mit darauffolgenden weiteren Drucken durchgeführt. Alle 30 Minuten wurde die Druckqualität optisch auf Verwischen überprüft.

Bild 2 zeigt die Konturstabilität beim Druckvorgang von zwanzig Leiterplatten ohne Druckpausen und ohne Reinigung der Schablonenunterseite. In Bild 3 ist das Druckbild von für dreißig Minuten, eine und zwei Stunden ruhen gelassenen Leiterplatten und nach weiteren Drucken zu sehen.

Die Prozessparameter, u.a. Rakelgeschwindigkeit, Anstellwinkel, Abhebegeschwindigkeit, werden dokumentiert und bleiben bei jedem Druckprozess konstant. Damit wird eine gleichbleibende Qualität



**Bild 4:** Druckvorgang

erzielt und die Reproduzierbarkeit gewährleistet [10].

Allerdings bietet die Verwendung dieser Phase Change Materialien selbst noch keine Gewähr für die Druckergebnisse, da falsche Parametereinstellungen der Druckmaschine oder die falsche Auswahl der Druckwerkzeuge qualitativ unbefriedigende Ergebnisse wahrscheinlich machen.

### Vorteile der Drucktechnik von Phase Change Materialien

Für den Druck von Phase Change Materialien des Typs TPC-Z-PC-P lässt sich zusammenfassen:

- Sehr gute Druckfähigkeit der Materialtypen mit hoher Konturstabilität,
- Zwanzig aufeinanderfolgende Drucke ohne Schablonenreinigung sind für die meisten Druckapplikationen ausreichend,
- Zwei Stunden Schablonenstandzeit sind für die Massenproduktion ausreichend,
- Der Rückgang der Druckmenge während den Druckvorgängen ist vernachlässigbar,
- Hoher Druck, langsame Druckgeschwindigkeit, Absprung werden empfohlen,
- Geringe Materialverluste während des Trocknens von ca. 5% durch Entweichen des Lösungsmittels werden durch Anpassen der Schablonendicke kompensiert,
- Modul bzw. Substrat, Schablone und Phase Change Material sollten als Einheit betrachtet, gemeinsam getestet und qualifiziert werden [13].

Beim Einsatz von vorapplizierbaren Phase Change Materialien werden zahlreiche Vorteile erzielt [3]: Es lassen sich ein optimaler thermischer Kontakt und die optimale Schichtdicke einstellen sowie der Wirkungsgrad verbessern und die Lebensdauer von Bauteilen verlängern.

Die Materialien können direkt vorappliziert werden auf thermisch aktive Oberflächen ohne Vorwärmung. Bedruckte Module, Substrate (Leiterplatten, Keramiken, Peltierelemente) lassen sich schnell und einfach

montieren. Im Gegensatz zu Wärmeleitpasten wird das bedruckte Bauteil brühtrocken gehandhabt. Schon vor dem ersten Erwärmungsvorgang entsteht ein optimaler Kontakt. Der Schablonen- oder Siebdruck garantiert eine hohe Reproduzierbarkeit des Verfahrens.

Kosten können durch das gezielte Aufbringen der Phase Change Materialien mit üblichen Druckverfahren eingespart werden. Im Falle einer Reparatur lassen sich die Materialien einfach entfernen und das Bauteil kann mittels Isopropylalkohol und Mikrofasertuch leicht gereinigt werden. // KR

#### Hala

+49(0)89 66547783

#### Literatur

- [1] Esau, D. Strube, M.: Wärmeleitpastenauftrag richtig gemacht, *Elektronik Praxis* Nr. 6, März 2010
- [2] Schulz, M.: *Thermal Interface, A Key Factor in Improving Lifetime in Power Electronics*, Bodo's Power Systems, 12-2012
- [3] *Power Modules with Phase Change Material*, Vincotech AN 2012\_07
- [4] *Module mit appliziertem thermischen Interface*, Infineon, IFA IPC APS, AN No. 2012-07
- [5] Pohl, W.: *Optimizing the Thermal Behavior of Power Modules and Substrates with Printable Phase Change Compounds as a Pre-Applied Structural Design*, PCIM, Nürnberg 2009
- [6] Schulz, M., Pohl, W., Scott, T. A.: *Optimizing Thermal Interface Material for the Specific Needs of Power Electronics*, PCIM, Nürnberg 2012
- [7] Esau, D.: *Thermal Paste Application*, Semikron AN-10-001
- [8] Strube, M.: *Wärmeleitpastenauftrag als Dienstleistung*, *Elektronik Praxis* Nr. 10, Mai 2007
- [9] Schulz, M.: *The Challenging Task of Thermal Management*, PCIM, Nürnberg 2011
- [10] Schulz, M.: *The Thermal Challenge*, Bodo's Power Systems, 10-2011
- [11] Schulz, M.: *Thermal Interface - The Flawless Solution*, Bodo's Power Systems, 07-2010
- [12] *Mounting instructions of EUPEC for IHM and IHV modules*, EUPEC AN Note AN2004-05
- [13] Schulz, M.: *Herausforderung Thermisches Management*, *Elektronik Praxis*, Nr. 14, Juli 2011
- [14] Schulz, M.: *Maximizing Precision in Thermal Interface Layers*, Bodo's Power Systems, 01-2013