

Thermischer Stress im Materialverbund

Am Beispiel von FR4 + CU

FEM II – Prof. Dr. Hagen - B4MST

Christian Weidner

Inhaltsverzeichnis

Einführung.....	3
Aufgabenstellung/Vorbetrachtung.....	6
Umsetzung.....	7
Nachbetrachtung.....	8

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Classification Profile Reflow (nicht maßstabsgerecht).....	3
Abbildung 2: Reflowlöten MLCC am Anfang des Lötprozesses.....	4
Abbildung 3: Reflowlöten MLCC kurz vor Erreichen der min. Lötstellentemperatur.....	4
Abbildung 4: Reflowlöten MLCC am Ende der Abkühlphase.....	4
Abbildung 5: MLCC vor und nach dem Reflow-Lötprozess.....	5
Abbildung 6: Simulationsergebnis ANSYS für eine aufgebrauchte Oberflächentemperatur von 230°C.....	7

Quellennachweis

http://www.jedec.org/standards-documents/docs/j-std-020d1 (gesichtet am 24.07.2012).....	3
Ceramic Capacitor Failures on the Rise- http://www.calce.umd.edu/general/newsletter/news/NewsF01.htm#ceramic (gesichtet am 23.06.2012).....	4
http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/file/KEM_C1012_X7R_OPENMODE_SMD/\$file/KEM_C1012_X7R_OPENMODE_SMD.pdf	5
http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/WebEn/CB70055B7F7D79B3852578E0006E344F (gesichtet am 20.07.2012).....	5
B6MST Komplexlabor – Thermische Systemgestaltung und Applikation.....	6

Einführung

Verbindet man n unterschiedliche Materialien stoff- und/oder formschlüssig miteinander, kommt es aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu einer Verbiegung. Handelt es sich bei diesen Materialien ($n = 2$) um Metalle, spricht man von einem Bimetall (auch Thermobimetall). Genutzt wird dieser Effekt in vielerlei Hinsicht, z.B. als Bimetallthermometer oder Temperaturschalter (Thermostat).

Letztgenannte Beispiele sind nicht Bestandteil der Untersuchung, vielmehr geht es um produktions- und verfahrenstechnische Punkte/Probleme im Zusammenhang mit kupferkaschierten Leiterplatten bei Anwendung des Reflow-Lötverfahrens nach IPC/JEDEC J-STD-020D¹.

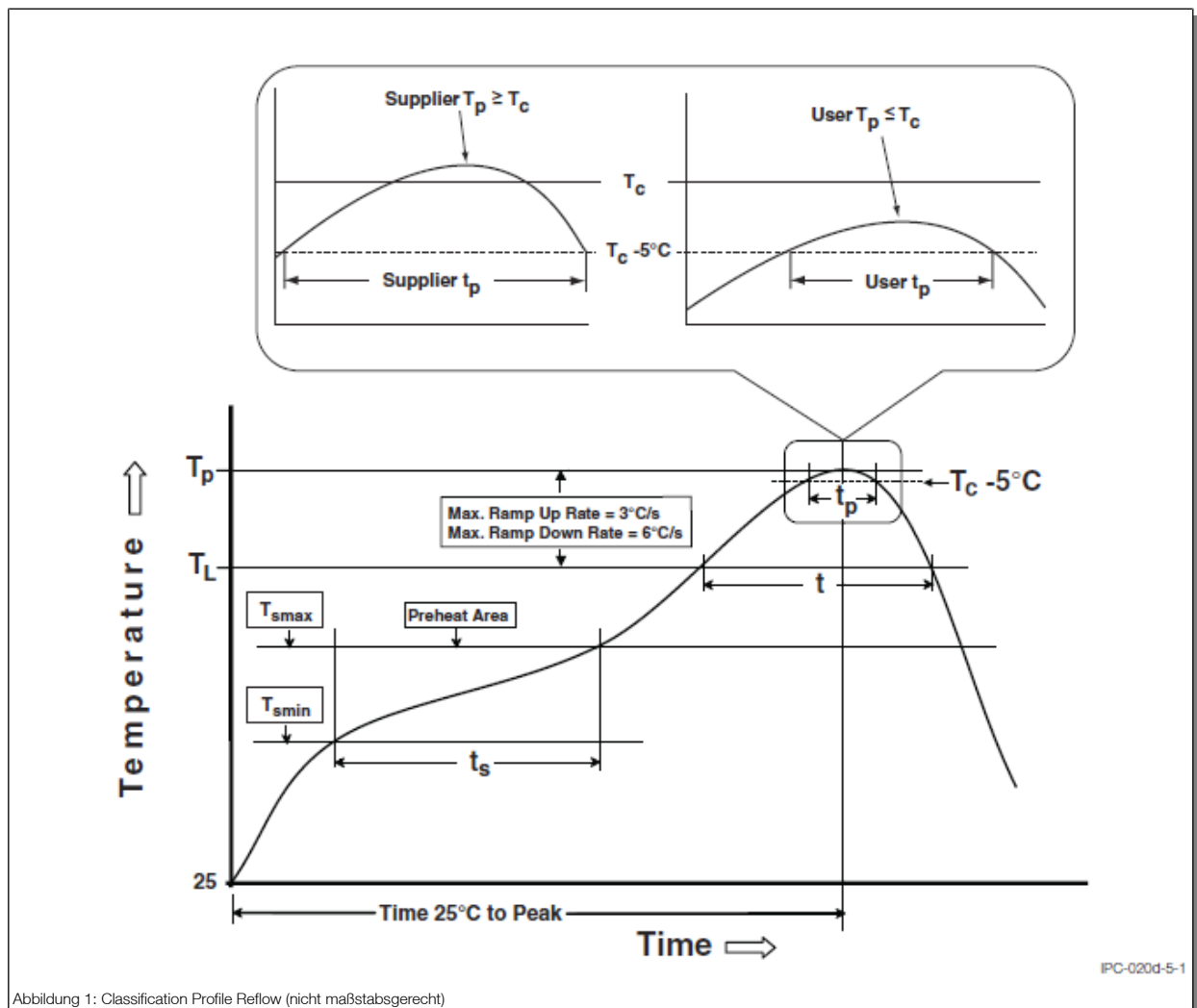
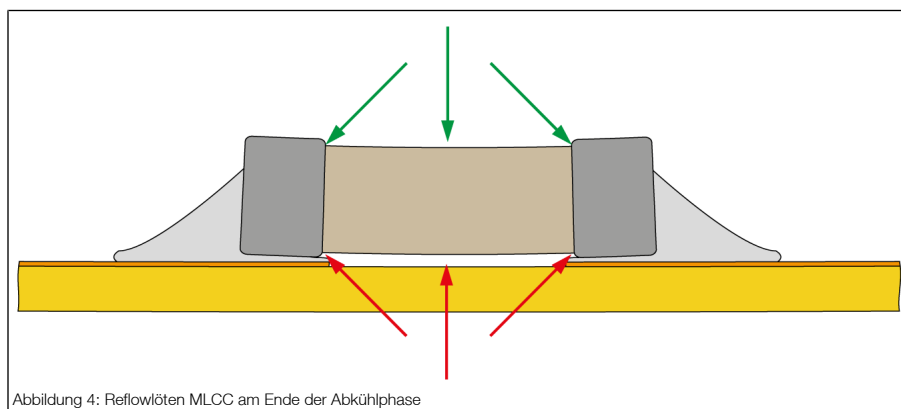
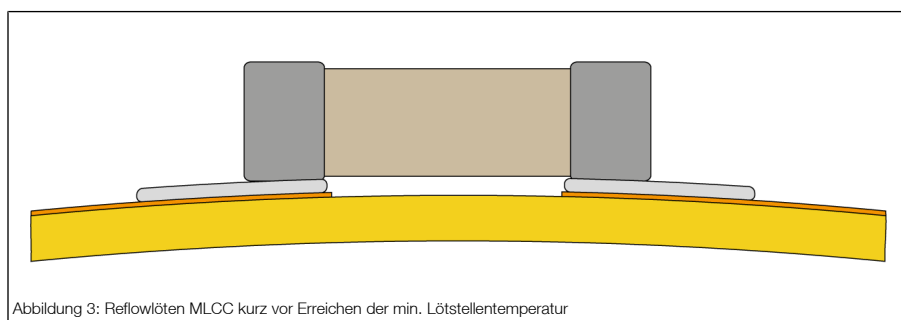
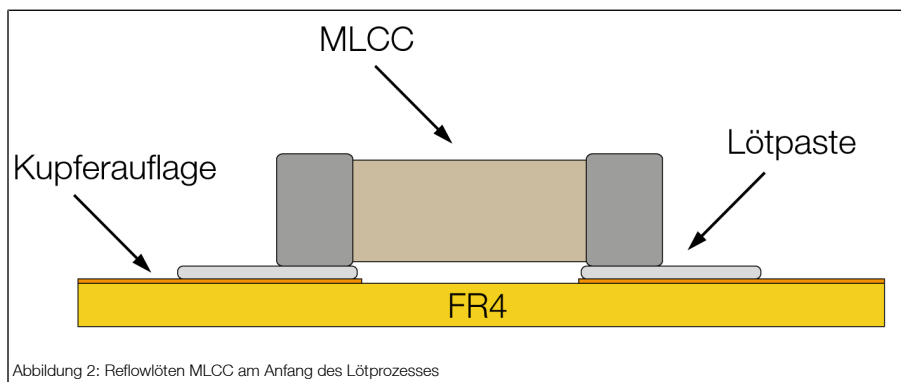


Abbildung 1: Classification Profile Reflow (nicht maßstabsgerecht)

¹ <http://www.jedec.org/standards-documents/docs/j-std-020d1> (gesehen am 24.07.2012)

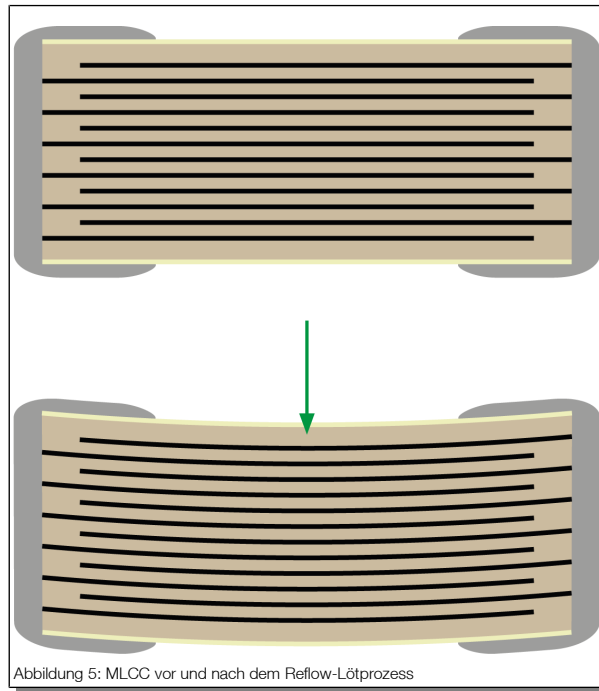
Bringt man im klassischen Reflow-Verfahren (Infrarotstrahler, Vollkonvektions-Reflow-Löten) eine für den Lötprozess eingerichtete Leiterplatte in den Reflow-Ofen, wird diese mit den darauf bestückten Bauteilen durch Abfahren des in Abbildung 1 gezeigten Temperaturprofils verlötet. Die für das Ausbilden guter Lötstellen erforderliche minimale Lötstellentemperatur (t_L) liegt für Pb-freies Lötzinn im Bereich 225°C – 235°C, für Pb-haltige naheutektische Lote gelten 205°C – 220°C. Da dieser Lötprozess wenig selektiv ist, erwärmt sich auch das Basismaterial dem Temperaturprofil folgend und es kommt zu einer Verbiegung der Leiterplatte. Es wird angenommen, dass in der nachfolgenden Abkühlphase die Zeit bis zum Erstarren des Lotes kürzer ist als die Zeit bis zur vollständigen Rückbildung der Verbiegung im Basismaterial. Nach vollständiger Abkühlung kann hierbei aus der Verbiegung des Basismaterials eine Verbiegung der Bauteile resultieren, oder anders gesagt, Thermischer Stress impliziert mechanischen Stress² - die folgenden Abbildungen sollen dies verdeutlichen.



Die Pfeile zeigen kritische Spannungsangriffspunkte. (Grün: Druckspannung, Rot: Zugspannung)

² Ceramic Capacitor Failures on the Rise- <http://www.calce.umd.edu/general/newsletter/news/NewsF01.htm#ceramic> (gesichtet am 23.06.2012)

Für den inneren Aufbau des beispielhaft gewählten MLCC-Kondensators (Multi-Layer Ceramic Capacitor) ergibt sich folgende Situation.



Grundlegend kann die vorgenannte Annahme auf Bauteile abweichender Geometrie- und Materialparameter abstrahiert werden. Hierbei kann es zu Delamination (Trennung der einzelnen Komponenten) von Grenzflächen sowie Rissen im Gehäuse kommen. In Konsequenz ergibt sich ein Verlust der Gehäuseintegrität.

Die Firma KEMET bietet mit ihren „FO-Caps“ Keramikkondensatoren an, welche das Risiko eines Kurzschlusses durch starke Biegebeanspruchung (FlexCrack) minimieren³.

Zitat KEMET⁴:

„The FO-CAP combines two existing KEMET technologies–Open Mode Chip Design and Flexible Termination. The Open Mode component utilizes an internal electrode design which minimizes the possibility of a short circuit condition if mechanically damaged (cracked). The Flexible Termination component utilizes a conductive silver epoxy in order to establish pliability while maintaining terminal strength, solderability and electrical performance. The combination of these two technologies provides the highest level of protection against the onset of mechanical failures that may occur during extreme environmental or handling conditions.“

3 [http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/file/KEM_C1012_X7R_OPENMODE_SMD/\\$file/KEM_C1012_X7R_OPENMODE_SMD.pdf](http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/file/KEM_C1012_X7R_OPENMODE_SMD/$file/KEM_C1012_X7R_OPENMODE_SMD.pdf)

4 <http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/WebEn/CB70055B7F7D79B3852578E0006E344E> (gesichtet am 20.07.2012)

Aufgabenstellung/Vorbetrachtung

Untersucht werden soll die thermische Verbiegung eines 2-Komponenten-Materials im transient-/strukturmechanischen Fall. Grundlage der Untersuchung bilden die geometrischen sowie materialabhängigen Randbedingungen der Basisplatte des Komplexlabors „elektromagnetischer Spiegelsteller“⁵.

- Geometrische Randbedingungen

Länge: 17cm Breite: 10cm Tiefe: 1.5mm

- materialabhängige Randbedingungen

Kupfer

Parameter	Wert	Einheit
Dichte	$8.96 \cdot 10^3$	Kg/m ³
E-Modul	$12 \cdot 10^{10}$	N/m ²
Längenausdehnungskoeffizient	$1.6 \cdot 10^{-5}$	1/K
spezifische Wärmekapazität	400	J/KgK
Wärmeleitfähigkeit	398	W/mK

Basismaterial FR4

Parameter	Wert	Einheit
Dichte	$1.9 \cdot 10^3$	Kg/m ³
E-Modul	$25 \cdot 10^9$	N/m ²
Längenausdehnungskoeffizient	$12 \cdot 10^{-6}$	1/K
spezifische Wärmekapazität	1150	J/KgK
Wärmeleitfähigkeit	0.294	W/mK

⁵ B6MST Komplexlabor – Thermische Systemgestaltung und Applikation

Umsetzung

Die analytische Betrachtung folgt dem Lösungsansatz für die Lage der Materialgrenzschicht

Differentialgleichung

Biegeradius

$$\frac{d^2 u_{zII}}{dx^2} = -\frac{1}{R_{II}} \quad R_{II} = -\frac{4(h_1 + h_2)^2 - 2h_1h_2 + \frac{E_1h_1^3}{E_2h_2} + \frac{E_2h_2^3}{E_1h_1}}{6\Delta T(h_1 + h_2)(\alpha_1 - \alpha_2)}$$

$$u_{zII}(x) = \frac{3\Delta T(h_1 + h_2)(\alpha_1 - \alpha_2)x^2}{4(h_1 + h_2)^2 - 2h_1h_2 + \frac{E_1h_1^3}{E_2h_2} + \frac{E_2h_2^3}{E_1h_1}}$$

Mit $h_1 = 1.5\text{mm}$ $h_2 = 48\mu\text{m}$ ergibt sich am nicht eingespannten Ende der Platine ($x=170\text{mm}$)

$$u_{zII(170\text{mm})} = \frac{3 \cdot 210 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3} + 48 \cdot 10^{-6}) \cdot (12 \cdot 10^{-6} - 1.6 \cdot 10^{-5}) \cdot 1.7 \cdot 10^{-1}}{4(1.5 \cdot 10^{-3} + 48 \cdot 10^{-6})^2 - 2 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 10^{-6} + \frac{25 \cdot 10^9 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3})^3}{12 \cdot 10^{10} \cdot 48 \cdot 10^{-6}} + \frac{12 \cdot 10^{10} \cdot (48 \cdot 10^{-6})^3}{25 \cdot 10^9 \cdot 1.5 \cdot 10^{-43}}}$$

$$u_{zII(170\text{mm})} = -4.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Die Simulation mit ANSYS liefert für eine aufgebrauchte Oberflächentemperatur von 230°C folgendes Bild:

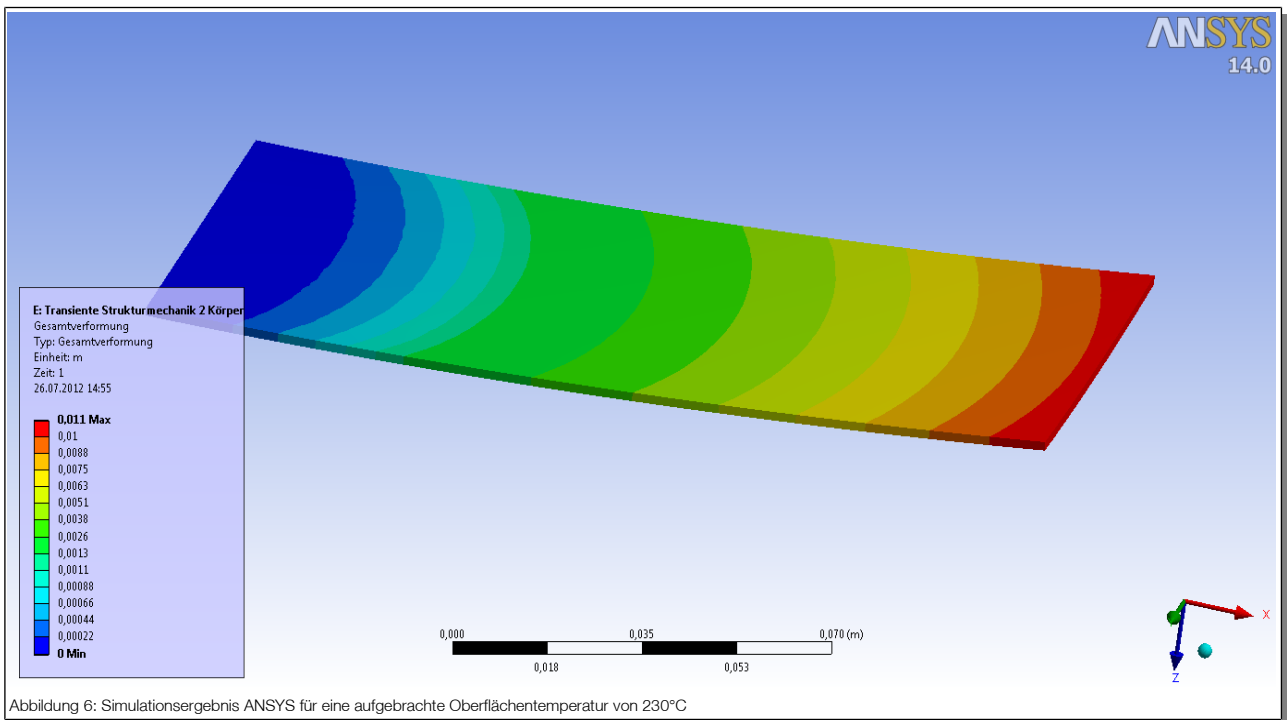


Abbildung 6: Simulationsergebnis ANSYS für eine aufgebrauchte Oberflächentemperatur von 230°C

Nachbetrachtung

Man stellt fest, dass das analytische Ergebnis im Bereich des Simulationsergebnisses (Transiente Strukturmechanik) liegt. Ebenfalls angesetzt wurden die thermisch-transiente sowie die statisch-mechanische Analyse. Letztere liefert nahezu gleiche Ergebnisse. Je nachdem in welche Körper/Flächen die Temperatur eingebracht wird, ergeben sich größere Abweichungen im Endergebnis. Grundlegend geht es darum, den kompletten Materialverbund homogen zu erwärmen.

Ein weiterer (verworfenener) analytischer Lösungsansatz ist

$$\frac{M}{E \cdot w} = \frac{24 \cdot M}{E \cdot b \cdot h^2}$$

$$M_1 = -\frac{\ddot{w}_1 \cdot E_1 \cdot b \cdot h^3}{36} \quad M_2 = -\frac{\ddot{w}_2 \cdot E_2 \cdot b \cdot h^3}{36}$$

$$F = -\frac{\ddot{w} \cdot (E_1 + E_2) \cdot b \cdot h^2}{36} \cdot \frac{3}{2}$$

mit $\ddot{w} = \ddot{w}_1 = \ddot{w}_2$ ist

$$\alpha_1 \Delta T - \frac{\ddot{w} \cdot (E_1 + E_2) \cdot b \cdot h^2 \cdot 3}{36 \cdot b \cdot h \cdot E_1} - \frac{\ddot{w} \cdot 2 \cdot h}{3} = \alpha_2 \Delta T + \frac{\ddot{w} \cdot (E_1 + E_2) \cdot b \cdot h^2}{12 \cdot b \cdot h \cdot E_2}$$

weiterhin folgt

$$(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T = \frac{\ddot{w} \cdot (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \cdot h}{12 \cdot E_1 \cdot E_2} + 2 \cdot \frac{\ddot{w} \cdot 2 \cdot h^3 \cdot 4 \cdot E_1 \cdot E_2}{12 \cdot E_1 \cdot E_2}$$

$$\ddot{w} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \cdot 12 \cdot E_1 \cdot E_2}{h \cdot (E_1^2 + 18 \cdot E_1 \cdot E_2 + E_2^2)}$$

wobei hier die Schichtdicken unberücksichtigt bleiben.