

Untersuchung der Variation der Materialkennwerte zur Lebensdauerabschätzung für Durchkontaktierungen in Leiterplatten

B. E. Abali, P. Lofink und W. H. Müller, Berlin

Die semi-empirische Methode der Lebensdauerabschätzung von Durchkontaktierungen in Leiterplatten basiert auf einer numerischen Lösung, welche anschließend mittels einer Fitfunktion ausgewertet wird. Die Güte der Abschätzung hängt von der numerischen Lösung ab, welche bei der Modellbildung durch Annahmen beeinflusst wird. Grundsätzlich gilt es zwei wesentliche Materialien zu beachten: Platine und Kupfer. Die Platine wird als ein linear-elastisches, orthotropes Material behandelt. Kupfer ist ein plastisches, als Einkristall kubisches Material. Da bei der Herstellung der Durchkontaktierung die Materialorientierung von Kupfer in einem gewissen Rahmen zufällig erfolgt, wird auch bei der numerischen Berechnung die Annahme der Isotropie getroffen. Darüber hinaus ändert die Reinheit des Kupfers nicht nur die elektrische Leitfähigkeit, sondern auch die Fließgrenze des Materials. Diese Arbeit präsentiert numerische Berechnungen mittels finiter Elementmethode mit dem kommerziellen Programm Abaqus™, welche die Variation der Materialkennwerte aufgrund der Kristallklasse und aufgrund der Reinheit des Kupfers auf die Einflüsse zur Lebensdauer untersuchen.

1 Einführung und Motivation

Designoptimierung in der Leiterplattenindustrie bringt Kostenreduktion bei der Herstellung. Dazu werden numerische Methoden wie finite Elementmethode (FEM) zur Berechnung des optimierten Herstellungsprozesses angewandt. Nach der Produktion möchte der Hersteller die Lebensdauer der Leiterplatte kennen. Dazu gibt es keine exakte Methode und experimentelle Untersuchungen sind aufgrund hoher Kosten möglichst zu vermeiden. Die semi-empirische Methode der Abschätzung der Lebensdauer benutzt eine Fitfunktion:

$$N_f = a \langle \Delta \varepsilon \rangle^b, \quad (1)$$

welche in ähnlicher Form schon vor 60 Jahren von COFFIN und MANSON benutzt wurde, s. Manson (1953). Die Parameter a, b , werden als reine Materialkonstanten angenommen und aus zyklischen Experimenten mit der Amplitude $\Delta \varepsilon$ bestimmt. Dadurch kann später die Lebensdauer N_f (*number of cycles to failure*) anhand der numerisch mit FEM gemittelten Größe $\langle \Delta \varepsilon \rangle$, s. Gleichung 4, berechnet werden. Sie ist ein Maß der Lebensdauer, welche infolge von Dissipation durch jeden Zyklus verringert wird. Ein Teil der Deformation führt zu einer verbleibenden, plastischen Formänderung. Deshalb wird der plastische Anteil der Dehnung als Maß für die Lebensdauer benutzt. Die plastische Dehnung ist ein symmetrischer Tensor zweiter Stufe und die sechs unabhängigen Komponenten können mit der von MISES Vergleichsdehnungsrate:

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} \dot{\varepsilon}_{ij}^{pl}}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

auf einen Skalar reduziert werden, wobei bei den doppelt vorkommenden Indizes gemäß der EINSTEINschen Summationskonvention aufsummiert wird. Die

plastische, verbleibende Dehnung akkumuliert sich während der zyklischen Belastung:

$$\varepsilon_{akk} = \int_{\text{Periode}} \dot{\varepsilon} dt, \quad (3)$$

wobei wir die gesamte Periode einer zyklischen Belastung als Integrationsintervall auswählen. Um ein von Singularitäten und numerischen Ungenauigkeiten freies Maß für die Lebensdauerabschätzung zu ermitteln, wird ε_{akk} für einen ausgewählten Bereich V gemittelt:

$$\langle \Delta \varepsilon \rangle = \frac{\int_V \varepsilon_{akk} dV}{\int_V dV}. \quad (4)$$

Damit findet man die semi-empirische Lebensdauer mit Gleichung 1. Dieses Maß hängt von den Materialparametern ab. Insbesondere Kupfer kann auf verschiedene Weisen modelliert werden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkung der Materialparametervariation auf die Lebensdauer einer Durchkontaktierung per FEM, welche die plastische Dehnung liefert und somit das Maß der Lebensdauerabschätzung zu berechnen erlaubt.

2 Modellbildung

Das vereinfachte Modell einer Leiterplatte besteht aus der Durchkontaktierung und aus den in der Platte eingebetteten Innenlagen. Die Leiterplatte besteht aus FR4 der Firma Isola™ und die Durchkontaktierung sowie die Innenlagen sind aus Kupfer. Aus Symmetriegründen kann das Berechnungsgebiet reduziert werden. Da die Leiterplatte ein orthotropes Material ist, kann höchstens eine Reduktion des Modells auf ein Achtel erfolgen, s. Abbildung 1.

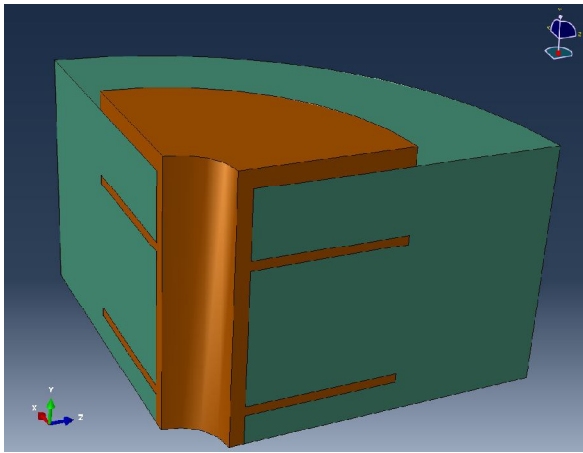


Abbildung 1 Achtelmodell der Leiterplatte, orthotropes FR4 Material in Grün und Kupfer in Orange

Die Geometriedaten, insbesondere die Dicke der Innenlagen, sind in Absprache mit FraunhoferTM IZM (Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration) in Berlin festgelegt worden. Daraus wurde ein FE-Modell in AbaqusTM CAE (*Computer Aided Engineering*) 6.12 erstellt. Symmetrierandbedingungen an den drei orthogonalen Ebenen wurden berücksichtigt. Zwischen Kupfer und Platine ist eine perfekte Verbindung angenommen worden, so dass die Knoten an den Zwischenflächen übereinstimmen. Damit wird eine perfekte Haftung ohne Kontaktbedingungen modelliert. Wir begründen diese Vereinfachung durch experimentelle Rissuntersuchungen. Diese zeigen, dass die Risse in der Innenwand der Durchkontaktierung auftreten und nicht zwischen Kupfer und Platine.

Die numerische Berechnung mittels finiter Elementmethode konvergiert immer monoton zur exakten Lösung. Deshalb können wir aus einem Konvergenztest die Genauigkeit der numerischen Approximation abschätzen. Dabei wird die Vernetzung verfeinert und damit die Lösungsapproximation verbessert und die Genauigkeit berechnen lässt. Dies ist möglich, weil die monotone Konvergenz eine Verbesserung der Lösung in jeder Verfeinerungsstufe sichert. Die erwartete lineare Konvergenz im doppel-logarithmischen Diagramm wurde durch Halbieren der Elemente erstellt, s. Abbildung 2. Die Werte beziehen sich auf das Ende der Simulation.

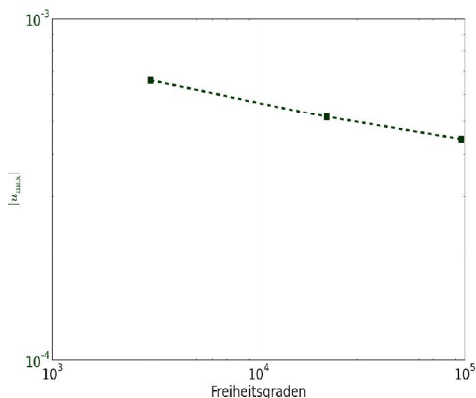


Abbildung 2 Konvergenzstudie in doppel-logarithmischer Skala: Anzahl der Freiheitsgraden über Betrag der maximalen Verschiebung

Die feinste Vernetzung der Konvergenzstudie wird im Folgenden benutzt und kann in Abbildung 3 betrachtet werden. Wir benutzen lineare Tetraederelemente mit vier Knoten. Da die Konvergenz gezeigt wurde, hängt die Genauigkeit der Lösung (des Verschiebungsfeldes) nicht vom Typ der ausgewählten Elementinterpolation sondern nur von der Anzahl der Freiheitsgrade ab. Dies entspricht der dreifachen Anzahl der gesamten Knoten, weil in jedem Knoten drei Verschiebungskomponenten (in drei Raumrichtungen) berechnet werden.

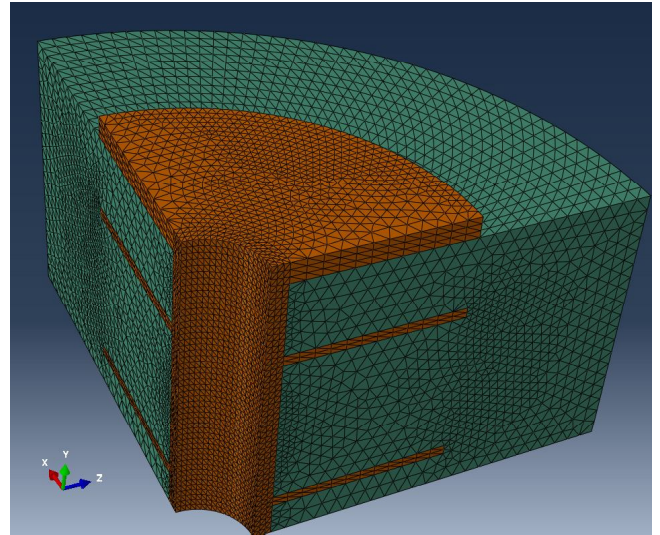


Abbildung 3 Vernetzung des Achtelmodells

Eine quasi-statische Analyse wird durchgeführt, wobei die Trägheits- und Volumenkräfte vernachlässigt werden. Somit bleibt von der Impulsbilanz nur noch die Divergenz der Spannungen übrig:

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = 0. \quad (5)$$

Diese Differentialgleichung wird inkrementell mit den unterschiedlichen Spannungsmodellen, σ_{ji} , für Platine und Kupfer simultan gelöst.

Das Material für Platine haben wir linear-elastisch, orthotrop modelliert. Da wir die Ermüdungsschäden nicht in der Platine erwarten, ist die Annahme linearer Elastizität für kleine Deformationen geeignet. Somit wird das HOOKESCHE Gesetz mit der thermischen DUHAMEL-NEUMANN Erweiterung angewendet. Die Nachgiebigkeitsmatrix in VOIGTSCHER Schreibweise zeigt die Gleichung 6.

Der thermische Ausdehnungskoeffiziententensor zeigt die Gleichung 7.

Damit müssen für orthotrope Materialien 12 Materialkonstanten bestimmt werden. Die Materialkennwerte in der Tabelle 1 stammen alle aus Messungen am FraunhoferTM IZM in Berlin.

$$S_{IJ} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & & & \\ & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_z} & & & \\ & & \frac{1}{E_z} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_x & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_z \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Bei der Durchkontaktierung aus Kupfer nehmen wir ein ratenunabhängiges, plastisches Materialverhalten mit kinematischer Verfestigung an. Somit wird die zyklische Belastung angemessen modelliert. Plastizität erfordert eine inkrementelle Belastung, wobei iterativ die Vergleichsdehnung zur gegebenen Vergleichsspannung angepasst wird. Dazu ist der Spannungsverlauf bezüglich der plastischen Dehnung notwendig, welche der Tabelle 2 zu entnehmen ist. Die Werte sind aus Srikanth et al. (2007, Fig. 3) abgelesen.

Tabelle 2: Variation des Spannungsverlaufes nach Anfang des Fließens für das Kupfermaterial

Plastische Vergleichsdehnung	Vergleichsspannung [MPa]	
0	150	100
0,04	180	130
0,05	190	140
0,07	200	150
0,1	220	170
0,13	230	180

Wir variieren die Fließspannung für die Untersuchung. Dabei wird die Verfestigung gleich gehalten. Während der plastischen Deformation verhält sich das Material isotrop, unabhängig von seiner Kristallklasse. Das Kupfer ist eigentlich ein kubisches Material, so dass die thermische und elastische Antwort durch vier Materialkennwerte, E, ν, G, α bestimmt werden. In Analogie zur Gleichung (6) entspricht dies:

$$\begin{aligned} E &= E_x = E_y = E_z, \\ \nu &= \nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz}, \\ G &= G_x = G_y = G_z, \\ \alpha &= \alpha_x = \alpha_y = \alpha_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Somit ist die Orientierung des Materials in der Herstellung zwar formal wichtig, jedoch schwierig zu beeinflussen. Somit stellt sich die Frage, wie groß die Änderung des Maßes zur Lebensdauerabschätzung, $\langle \Delta \varepsilon \rangle$, wegen der Reduktion vom kubischen auf isotropes Material ist. Beim isotropen Material sind von den mechanischen Kennwerten nur noch E und ν unabhängig und der Schubmodul ergibt sich durch:

Tabelle 1: Materialdaten der Leiterplatte aus Isola™ 410 Material, gemessen in Fraunhofer™ IZM

Temperatur [K]	233	268	308	348	368	388	398	403	443
E_x [MPa]	21450	20786	20200	19419	19001	17391	14927	11642	6780
E_y [MPa]	18434	17327	16778	15935	15490	13840	11619	9231	5576
E_z [MPa]	7055	7055	7055	7055	7055	5695	5000	4420	4420
ν_{xy}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
ν_{xz}	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
ν_{yz}	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
G_{xy} [MPa]	6630	6630	6630	6630	6630	6290	6000	5822	5822
G_{xz} [MPa]	2250	2250	2250	2250	2250	2122	2100	2040	2040
G_{yz} [MPa]	2250	2250	2250	2250	2250	2122	2100	2040	2040
α_x [10^{-6} 1/K]	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	8,1	8,1	8,1
α_y [10^{-6} 1/K]	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	11	11	11
α_z [10^{-6} 1/K]	39	39	39	39	39	39	39	302	302

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (9)$$

Um das Ausmaß der Reduktion zu analysieren, brauchen wir die maximalen und minimalen Materialkennwerte in dem kubischen Material. Dabei vernachlässigen wir die Änderung der Querkontraktionszahl, ν . E-Modul ändert sich gemäß der Kristallorientierung. Deshalb spannen wir den E-Modul in Kugelkoordinaten durch Drehungen um die Achsen des Kristalleigensystems, wo wir die Materialkennwerte S_{11} , S_{12} , S_{44} kennen:

$$\frac{1}{E(\vartheta, \varphi)} = S_{11} - 2 \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} S_{44} \right) \times \left((l_1 l_2)^2 + (l_2 l_3)^2 + (l_3 l_1)^2 \right), \quad (10)$$

mit

$$\begin{aligned} l_1 &= \cos(\varphi) \sin(\vartheta), \\ l_2 &= \sin(\varphi) \sin(\vartheta), \\ l_3 &= \cos(\vartheta). \end{aligned} \quad (11)$$

Der Winkel φ identifiziert die Drehung um die z -Achse, anschließend wird um die neue y -Achse mit ϑ gedreht, vgl. Nye (1967, § 6.2). Für das kubische Material ist die Nachgiebigkeitsmatrix in dem Kristalleigensystem gegeben durch die Gleichung 6 mit den Bedingungen 7. Dadurch können wir von den Hauptrichtungen durch Drehungen mittels φ und ϑ alle Richtungen mit der Gleichung 10 berechnen und in kartesischen Koordinaten visualisieren. Die Darstellung des richtungsabhängigen E-Moduln ist der Abbildung 4 zu entnehmen.

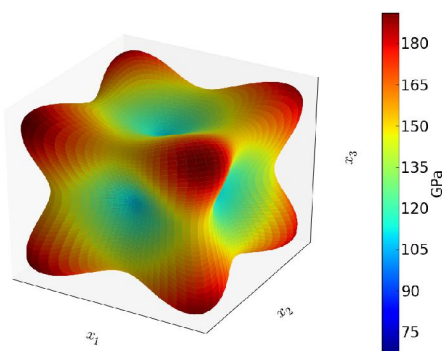


Abbildung 4 Richtungsabhängigkeit des E-Moduln vom Kupfer als kubische Kristallklasse

Somit spielt die Orientierung der Gitterstruktur eine signifikante Rolle bei der Antwort der Materie auf die Belastung. Abhängig von der Raumrichtung ändert sich der E-Modul zwischen 67 und 191 GPa. Wir nehmen im Modell zur finiten Elementmethode das Kupfermaterial als isotrop mit den in der Tabelle 3

gegebenen drei unterschiedlichen E-Modul Werten an.

Tabelle 3: Variation des E-Moduln für Kupfermaterial und die restlichen Kennwerte für die thermische und elastische Antwort

E-Modul [GPa]			ν	α [10^{-6} 1/K]
67	120	191	0,3	1,76

Für die Querkontraktionszahl wird der Wert $\nu = 0,3$ angenommen. Der Ausdehnungskoeffizient stammt aus Messdaten des FraunhoferTM IZMs.

Die Leiterplatte mit Durchkontaktierung leidet unter Ermüdung bei einer wechselnden Temperaturbelastung. Die Temperaturänderung wird durch die Wärme verursacht, die bei der Leitung des elektrischen Stroms freigesetzt wird. Der Vorgang ist eine reine thermomechanische Ermüdung, s. Park, Mönig und Volkert (2006). Um diesen Ermüdungsvorgang zu beschleunigen, gibt es unterschiedliche Temperaturwechselbelastungen, die in der Industrie verwendet werden. Wir benutzen eine zyklische Temperaturbelastung zwischen -40°C und 125°C . In einem Experiment wird die Temperatur durch Aufheizen und Abkühlen der Leiterplatte mit der Durchkontaktierung in einer Heizkammer erreicht. Dabei wird angenommen, dass der schnelle Wärmetransport zu gleichen Bedingungen in der Kammer wie in der Realität sorgt. In der Simulation wird die Temperatur in allen Knoten gleichzeitig geändert. Es wird keine Differentialgleichung für die Wärmeentwicklung gelöst. Stattdessen wird der Temperaturverlauf als eine Bedingung im gesamten Körper implementiert. Dies ist wiederum darin begründet, dass die hohe Leitfähigkeit des Kupfermaterials eine schnelle Wärmeverteilung verursacht. Somit kann man annehmen, dass die Temperatur instantan mit der Änderung des elektrischen Signals einhergeht.

Die Rate der Temperaturbelastung ist in der Simulation nicht entscheidend, weil wir das Kupfermaterial mit einem raten-unabhängigen Plastizitätsmodell beschreiben. Die maximale Betriebstemperatur ist geringer als 40% der Schmelztemperatur des Kupfers. Diese sogenannte homologe Temperatur:

$$\frac{T_{\max}}{T_{\text{Schmelz}}} < 0,4 \quad (12)$$

gilt als Begründung eines raten-unabhängigen Materialmodells, d.h. kein Kriechen. Aufgrund der zyklischen Belastung wenden wir das Modell mit kinematischer Verfestigung an.

3 Auswertung

Die Simulation beginnt mit der undeformierten Initialgeometrie und wird durch Änderung der Temperatur belastet. Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von dem Kupfer- und Platinenmaterial verursachen unterschiedliche thermische Dehnungen, die im Kör-

per innere Spannungen erzeugen. Die Spannungen hängen von dem Temperaturhub ab, der in diesem Fall 165 K ist und dadurch höhere Spannungen als die Fließspannung im Kupfer induziert. Die zyklische Belastung führt in jedem Zyklus zu Dissipation, die wir mit der akkumulierten plastischen Vergleichsdehnung (PEEQ in Abaqus™) messen. Für das Ermitteln der gemittelten Größe $\Delta\varepsilon$ aus der Gleichung 4 haben wir die gesamte innere Wand der Durchkontaktierung ausgewählt. Für verschiedene Variationen werden Simulationen durchgeführt. Jede Simulation enthält drei Temperaturzyklen. Dehnungshub, $\Delta\varepsilon$, entstanden in jedem Zyklus einer Simulation, ist angegeben in der Tabelle 4.

Tabelle 4: Dehnungshub $\Delta\varepsilon$ in jedem Zyklus

$\Delta\varepsilon [10^{-4}]$		
Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3
31,13	24,13	23,92

Daraus können wir uns überzeugen, dass der eingeschwungene Zustand mit dem dritten Zyklus erreicht ist. Alle weiteren Zyklen werden den gleichen plastischen Dehnungshub einhergehen, welcher als Maß der Lebensdauerabschätzung geeignet ist.

Für die Auswertung sind die Ausgabedateien von Abaqus™ durch einen Code in Python™ ausgelesen und durch Nutzung von Matplotlib Paketen, s. Hunter (2007), dargestellt worden. Der Code kann unter Abali (2013) gefunden werden. Die Berechnung der Gleichung 4 liefert für jeden Zyklus den Dehnungshub. Wir benutzen den Wert vom dritten Zyklus.

Zwei unterschiedliche Variationen sind durchgeführt worden. Wegen der kubischen Kristallklasse des Kupfermaterials ist der E-Modul in drei Simulationen mit den Werten aus der Tabelle 3 benutzt worden. Die Ergebnisse können der Abbildung 5 entnommen werden.

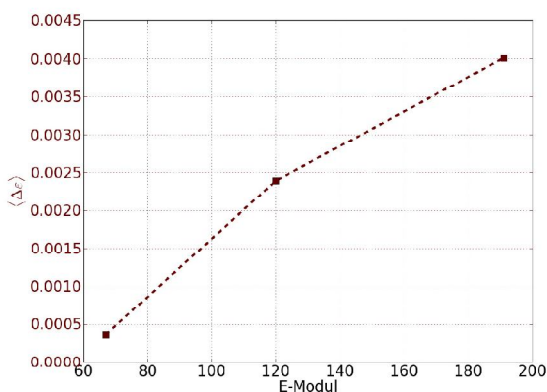


Abbildung 5 Variation des E-Moduls in GPa in drei Simulationen, ausgewertet im gleichen Bereich

Durch die Reinheit des Kupfers ändert sich auch die Fließspannung, s. Srikanth et al. (2007). Mittels der Tabelle 2 haben wir zwei Simulationen mit den unterschiedlichen Fließspannungen, aber gleichen Verfestigungseigenschaften durchgeführt. Die Abbildung 6

zeigt den Einfluss auf den Dehnungshub bei Veränderung der Fließspannung.

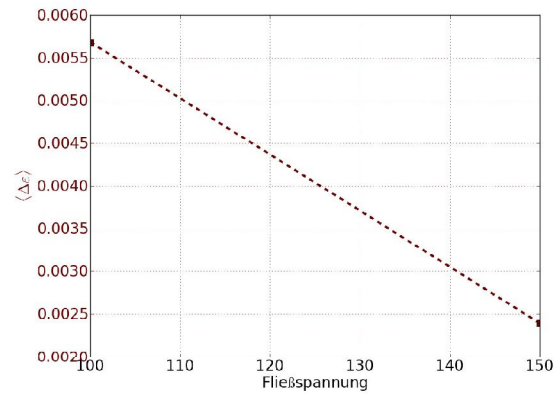


Abbildung 6 Variation der Fließspannung in MPa in zwei Simulationen, ausgewertet im gleichen Bereich

Die Ergebnisse zeigen eine Tendenz längerer Lebensdauer bei erhöhter Fließspannung und weicherer Durchkontaktierung. Kleinerer Dehnungshub bedeutet längere Lebensdauer, siehe Gleichung 1. Die Verifikation der Ergebnisse können wir durch eine logische Argumentationskette erreichen. In einem einachsigen Zugtest können wir gedanklich E-Modul verringern und für drei unterschiedliche Werte die Resultate zusammentragen. In der Abbildung 7 haben wir ein lineares Plastizitätsmodell mit den gleichbleibenden Tangentenmodul benutzt und die plastische Dehnung bei gleicher Spannung gekennzeichnet. Verringerung der Elastizitätsmodul führt zur Verringerung der plastischen Dehnung in voller Analogie zu den FE-Ergebnissen, s. Abbildung 5. Ein weiches Kupfermaterial kann die Bewegung der Platine mitmachen, welche die inneren Spannungen reduziert.

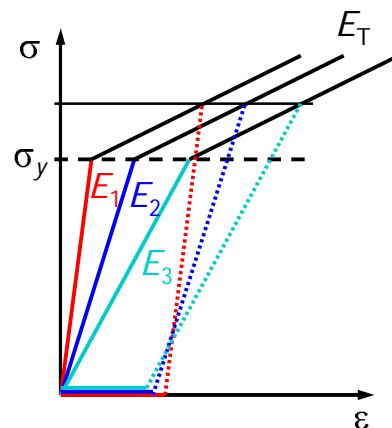


Abbildung 7 Änderung der verbleibenden Deformation durch Variation der E-Moduln in einachsiger Belastung

Eine höhere Fließspannung bedeutet, dass die durch den Temperaturunterschied erzeugten Dehnungen von der Durchkontaktierung mehr im elastischen Bereich angenommen werden als im plastischen Bereich. Dadurch sinkt die dissipierte Energie, folglich auch die plastische akkumulierte Dehnung in jedem Zyklus.

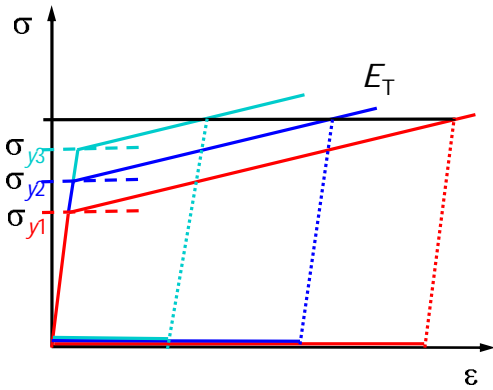


Abbildung 8 Änderung der verbleibenden Deformation durch Variation der Fließspannung in einachsiger Belastung

Das gleiche Gedankenexperiment in einem Zugtest in Abbildung (8) deutet auf eine Verringerung der plastischen Dehnung bei vergrößerter Fließspannung hin. Dieses stimmt mit den FE-Ergebnissen, s. Abbildung 6, überein.

Es ist offensichtlich, dass Variationen der E-Moduln und der Fließspannungen das Maß der Lebensdauer manipulieren. Jedoch ist es schwierig abzuschätzen, wie groß der Einfluss der Veränderung des Maßes auf die Lebensdauer N_f ist. Dazu sind die Parameter a und b in der Gleichung 1 nötig. Die Parameter a und b werden aus experimentellen Messungen bei äquivalenten Bedingungen mittels einer logarithmischen Regression für die Fitfunktion (1) ermittelt. Obwohl wir keine solchen Experimente parat haben, können wir eine für Legierungen angemessene Approximation aus der Arbeit Manson (1968) benutzen:

$$\langle \Delta \varepsilon \rangle = D^{0,6} (N_f)^{-0,6}, \quad (13)$$

wobei wir den elastischen Anteil der Dehnungen vernachlässigt haben. Der Koeffizient:

$$D = \ln \left(\frac{100}{100 - R} \right), \quad (14)$$

wird durch die Reduktion des Querschnittes, R , (in Prozent) beim Bruch mittels eines axialen Zugexperimentes ermittelt. Wir können die elastische Dehnung vernachlässigen und die plastische Deformation volumentreu annehmen. Folglich ist die Reduktion des Querschnittes gleich wie die Bruchdehnung (in Prozent). Unter der Annahme, dass die Bruchdehnung vom Kupfer 60% ($R = 60$) sei, haben wir die Werte aus den Simulationen in den Tabellen 5 und 6 gegenübergestellt.

Tabelle 5: Abschätzung der Lebensdauer unter Variation des E-Moduln

E-Modul [GPa]	$\langle \Delta \varepsilon \rangle [10^{-4}]$	N_f
67	3,62	376790
120	23,91	16209
191	40,11	6846

Tabelle 6: Abschätzung der Lebensdauer unter Variation der Fließspannung

Fließspannung [MPa]	$\langle \Delta \varepsilon \rangle [10^{-4}]$	N_f
150	56,83	3830
100	23,91	16209

Selbstverständlich ermöglicht die Abschätzung nur eine grobe Approximation der Lebensdauer. Eine genauere Berechnung benötigt sorgfältig experimentell bestimmte Parameter.

4 Zusammenfassung

Durchkontaktierungen in der Leiterplatte leiden bei einer thermischen Belastung unter Ermüdung. Dieses Verhalten kann simuliert werden. Aus der numerischen Berechnung wird die Lebensdauer mittels semi-empirischer Methoden abgeschätzt. Die Ermüdungsrisse treten in der Durchkontaktierung auf, deshalb ist eine korrekte Modellierung der Durchkontaktierung aus Kupfer von besonderer Bedeutung. Kupfer ist ein kubisches Material und kann mit hoher Reinheit produziert werden. Dabei treten zwei wichtige Einschränkungen bei der Herstellung. Kubische Gitterstruktur bringt die Anisotropie, d.h. Richtungsabhängigkeit in das Bauteil, welche bei der Herstellung nicht berücksichtigt wird. Wir haben durch eine Ermüdungsanalyse im Anschluss einer numerischen Berechnung mittels finiter Elementmethode festgestellt, dass die Auswahl der Richtung in Bezug auf das Kristalleigensystem keinen zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Lebensdauer hat.

Die zweite Frage bei der Herstellung des reinen Kupfers betrifft die Reinheit. Eine höhere Reinheit ist von Vorteil, weil die Leitfähigkeit zunimmt. Um den Einfluss der Reinheit zur thermomechanischen Ermüdung zu bestimmen, haben wir die Fließgrenze reduziert. Dies ist der Fall bei einer höheren Reinheit. Dadurch sinkt die Lebensdauer signifikant ab. Zusammenfassend verbessert eine höhere Reinheit die Leitfähigkeit, aber gleichzeitig beschleunigt die thermomechanische Ermüdung. Jedoch produziert eine verbesserte Leitfähigkeit weniger Wärme. Um dieses Phänomen in der Lebensdauerabschätzung zu berücksichtigen, sind weitere Studien erforderlich.

Schlussendlich soll der Herstellungsprozess optimiert werden, um die Orientierung des Kristalls zu beeinflussen. Der Einfluss der Reinheit auf die thermomechanische Ermüdung benötigt weitere Studien.

Danksagung

Wir bedanken uns bei den Herrn M. Schneider-Ramelow, H. Walter, O. Wittler, O. Bochow-Neß vom FraunhoferTM IZM in Berlin für die angenehme Kooperation.

5 Referenzen

- Abali, B. E. 2013
Computational Reality, Technische Universität Berlin,
Institut für Mechanik, Lehrstuhl für Kontinuums-
mechanik und Materialtheorie.
<http://www.lkm.tu-berlin.de/ComputationalReality/>
- Hunter, J. D. 2007
Matplotlib: A 2d graphics environment.
Computing In Science & Engineering, 6(3):90-95
- Manson, S. S. 1953
Behavior of materials under conditions of thermal
stress.
NACA TN 2933
- Manson, S. S. 1968
A simple procedure for estimating high-temperature
low-cycle fatigue.
Experimental Mechanics, Volume 8, Issue 8, S. 349-
355
- Nye, J. F. 1967
Physical properties of crystals: their representation by
tensors and matrices.
Oxford at Clarendon Press
- Park, Y., Mönig, R., Volkert, C. A. 2006
Thermal fatigue as a possible failure mechanism in
copper interconnects.
Thin Solid Films, 504, S. 321-324
- Srikanth, N., Premkumar, J., Sivakumar, M., Wong, Y. M.
und Vath III, C., J. 2007
Effect of wire purity on copper wire bonding,
9th Electronics Packaging Technology Conference,
755-759, IEEE