

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	V
Erklärung des Autors.....	VI
Abstract .....	VII
Kurzfassung.....	VIII
Inhaltsverzeichnis.....	X
Abbildungsverzeichnis.....	XIV
Tabellenverzeichnis.....	XXI
Symbolverzeichnis .....	XXII
1 Einleitung und Vorbetrachtungen .....	1
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Beschreibung der Versuchsreihe „Testboard 1“ des Projekts LIVE.....	8
1.2.1 Allgemeine Einführung.....	8
1.2.2 Ausgewählte Bauelemente und Lote.....	9
1.2.3 Temperaturwechseltests .....	11
1.2.4 Durchgeführte Versuche zur Charakterisierung von Lotwerkstoffen im Rahmen des Projekts LIVE.....	13
1.3 Projekt W5 .....	18
2 Entwicklung von Gleichungen zur Bestimmung der Lebensdauern von Loten bei zyklischen Belastungen.....	22
2.1 Wöhlerkurven.....	23
2.2 Das Coffin-Manson-Gesetz.....	29
2.3 Das Coffin-Manson-Gesetz nach Engelmaier .....	32
2.4 Das Norris-Landzberg-Gesetz.....	32
2.5 Das Lau-Pao-Gesetz für SnPb37 und SAC .....	33
2.6 Das Coffin-Manson- und das Morrow-Gesetz anhand von Experimenten und FE-Simulationen .....	33
2.7 Physikalische Bedeutung der Coffin-Manson-Parameter .....	35
2.8 Rissinitiierung und Rissausbreitung in einer Volumeneinheit.....	36
2.9 Die Relation zwischen plastischen Dehnungen und Bruchlastspielzahlen .....	39
3 Zusammenfassung und Diskussion der Literatur zum Thema Schädigungsexponenten und -koeffizienten bei Loten .....	43
3.1 Fatigue of 60/40 solder (Solomon, 1986).....	43
3.2 Computational parametric analyzes on the solder joint reliability of bottom leaded plastic (BLP) package (Zhang et al., 2002).....	45
3.3 Design considerations on solder joint reliability of dual row quad flat no-lead packages (Ying et al., 2004) .....	47
3.4 Reliability of SnPb and Pb-free flip-chips under different test conditions (Spraul et al., 2007).. ..	49
3.5 Fatigue life models for SnAgCu and SnPb solder joints evaluated by experiments and simulation (Schubert et al., 2003) .....	51
3.6 The effects of underfill and its material models on thermomechanical behaviors of a flip chip package (Chen et al., 2001).....	54
3.7 Integrated flow-thermomechanical and reliability analysis of a low air cooled flip chip-PBGA package (Hong et al., 1998) .....	57
3.8 An analytical elasto-creep model of solder joints in leadless chip resistors: Part 2. applications in fatigue reliability predictions for SnPb and lead-free solders (Ghorbani et al., 2007).....	61
3.9 Acceleration factors for lead-free solder materials (Salmela, 2007).....	67

---

3.10	Crack initiation and growth in solder joints under cyclic shear deformation using piezomechanical actuation (Shim et al., 2007) .....	70
3.11	Universal fatigue life prediction equation for ceramic ball grid array (CBGA) packages (Perkins et al., 2007) .....	73
3.12	Low cycle fatigue of Sn-based lead-free solder joints and the analysis of fatigue life prediction uncertainty (Andersson et al., 2006) .....	78
3.13	Low-cycle fatigue behavior of Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, and Sn-Ag-Cu-Bi lead-free solders (Miyashita et al., 2002) .....	82
3.14	A comparative study of solder fatigue evaluated by microscopic in-situ analysis, on-line resistance measurement and FE calculations (Dudek et al., 2005) .....	85
3.15	Harsh solder joint reliability tests by impact drop and highly accelerated life test (HALT) (Che et al., 2004).....	87
3.16	A study of cyclic bending reliability of bare-die-type chip-scale packages (Lai et al., 2004).....	88
3.17	Low cycle fatigue models for lead-free solders (Pang et al., 2004).....	91
3.18	Creep and fatigue characterization of lead free 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu solder (Xiong et al., 2004) .....	94
3.19	Fatigue life model of SnPb & SnAgCu solder joints with experimental correlation (Ying et al., 2004) .....	95
3.20	Comparison of isothermal mechanical fatigue properties of lead-free solder joints and bulk solders (Andersson et al. 2005).....	98
3.21	Low-cycle fatigue characteristics of Sn-based solder joints (Lee et al., 2004).....	103
3.22	Low cycle fatigue analysis of temperature and frequency effects in eutectic solder alloy (Shi et al., 2000) .....	105
3.23	On enhancing eutectic solder joint reliability using a second-reflow-process approach (Chiang et al., 2000).....	105
3.24	Fatigue of 60/40 solder: Ein Spezialfall der Solomon Ergebnisse (Solomon, 1986).....	108
3.25	Low cycle fatigue behavior and mechanisms of a eutectic Sn-Pb solder 63Sn/37Pb (Mutoh et al., 2002).....	108
3.26	Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints (Syed, 2004).....	109
3.27	Acceleration factors and thermal cycling test efficiency for lead-free Sn-Ag-Cu assemblies (Clech, 2005).....	112
3.28	Predicting solder joint reliability for thermal, power, & bend cycle within 25% accuracy (Syed, 2004).....	115
3.29	Chip scale package (CSP) solder joint reliability and modeling (Masazumi, 1998).....	117
3.30	Fatigue analysis of flip chip assemblies using thermal stress simulations and a coffin-manson relation (Darveaux et al., 1991).....	119
3.31	Correlation of uniaxial tension-tension, torsion, and multiaxial tension-torsion fatigue failure in a 63Sn-37Pb solder alloy (Cortez et al., 1992) .....	121
3.32	Mechanical behaviors of 60/40 tin-lead solder lap joints (Enke et al., 1989).....	122
3.33	Thermomechanical fatigue life prediction of 63Sn/37Pb solder (Guo, 1991) .....	124
3.34	Mechanical fatigue characteristics of Sn-3.5Ag-X (X = Bi, Cu, Zn and In) solder alloys (Kariya et al., 1998) .....	124
3.35	Cyclic softening of the Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder alloy with equiaxed grain structure (Zeng, et al., 2005).....	125
3.36	Thermal fatigue life prediction of solder joints using stress analysis (Mukai et al., 1997).....	125

---

4	FE-Simulation an Widerstände bzw. Kondensatoren.....	128
4.1	Vorbereitungen für die FE-Simulationen der Widerstände und Kondensatoren.....	128
4.1.1	Abmessungen.....	129
4.1.2	3D-FE-Modell, Randbedingungen.....	135
4.1.3	Vernetzung des Modells.....	136
4.1.4	Thermische Lastzyklen bei den Widerständen.....	141
4.1.5	Thermische Lastzyklen bei den Kondensatoren.....	143
4.1.6	Materialdaten.....	143
4.1.7	Materialdaten der Kondensatoren.....	149
4.2	Ergebnisse der FE-Simulationen der Widerstände.....	150
4.2.1	Verformungen.....	150
4.2.2	Resultierende Spannungs-Dehnungs-Kurve.....	150
4.2.3	Kriechenergiedichte und Kriechdehnung an einem einzigen Element.....	154
4.2.4	Spannungsergebnisse an der Keramik und am Lot.....	156
4.2.5	Kriechdehnung ( <i>CEEQ</i> ) und Kriechenergiedichte ( <i>CENER</i> ) am ganzem Lotfuß.....	158
4.2.6	Mittelung der Kriechdehnungen und Kriechenergiedichten für die Lebensdauerberechnung bei Widerständen.....	162
4.3	Ergebnisse der FE-Simulationen der Kondensatoren.....	165
4.3.1	Verformungen.....	165
4.3.2	Kriechenergiedichte und Kriechdehnung an einem Element.....	166
4.3.3	Spannungsergebnisse an der Keramik und am Lot.....	167
4.3.4	Kriechdehnung ( <i>CEEQ</i> ) und Kriechenergiedichte ( <i>CENER</i> ) am ganzen Lotfuß.....	169
4.3.5	Mittelung der Kriechdehnungen und Kriechenergiedichten für die Lebensdauerberechnung.....	171
4.3.6	Mittelung der Kriechdehnungen und Kriechenergiedichten für die Lebensdauerberechnung bei den Kondensatoren.....	172
5	Eigene Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten sowie -Koeffizienten und Vergleich mit der Literatur.....	175
5.1	Bestimmung der Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten sowie -Koeffizienten mit Hilfe von FE-Simulationen und experimentellen Daten aus dem Projekt LIVE.....	175
5.1.1	Experimentelle Ergebnisse des Projekts LIVE.....	176
5.1.2	Vorgehensweise zur Bestimmung von Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten auf Basis des Projekts LIVE.....	180
5.1.3	Experimentell und theoretisch berechnete Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten anhand des Projekts LIVE.....	181
5.2	Bestimmung der Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten mit Hilfe der FE-Simulationen und experimenteller Daten aus dem Projekt W5.....	184
5.2.1	Experimentelle Ergebnisse des Projekts W5.....	184
5.2.2	Vorgehensweise zur Bestimmung von Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten auf Basis des Projekts W5.....	188
5.2.3	Experimentell und theoretisch berechnete Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten anhand des Projekts W5.....	190
5.3	Berechnete Coffin-Manson-Exponenten anhand von Messdaten im Projekt LIVE.....	192
5.4	Literaturdaten und prognostizierte Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten für SnPb und SAC-Lote.....	194
5.4.1	Literaturdaten, Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten für SnPb und SAC-Lote.....	194
5.4.2	Prognostizierte Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten für SnPb und SAC-Lote.....	199
5.5	Berechnung von Spannungs-Dehnungs-Parametern mit Hilfe von Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten.....	200

---

5.5.1	Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Parameter mit Hilfe von Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten bezüglich des Projekts LIVE .....	201
5.5.2	Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Parameter mit Hilfe von Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten bezüglich der Literaturquellen .....	202
5.5.3	Berechnung von Bruchdehnungen mit Hilfe von Coffin-Manson-Koeffizienten und der zugehörigen Verfestigungsexponenten anhand der Literaturquellen .....	206
6	Zusammenfassung.....	209
Anhang	.....	212
Literaturverzeichnis.....		222