

FAU Studien aus dem Maschinenbau 313

**Miriam Rauer**

# Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden



Miriam Rauer

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen  
von Hochleistungs-Leuchtdioden

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 313**

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Miriam Rauer

# Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und  
Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen  
FAU University Press  
2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Rauer, Miriam. 2018. *Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 313. Erlangen: FAU University Press.

DOI: 10.25593/978-3-96147-157-7

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.  
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.  
Sie sind nutzbar unter der Creative Commons Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:  
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-157-7 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-158-4 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-157-7

# **Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden**

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Miriam Rauer, M. Eng.  
aus Offenbach

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen  
Prüfung: 09.01.2018

Vorsitzender des  
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke  
Prof. Dr. Randolph Hanke,  
Universität Würzburg  
Prof. Dr. Michael Kaloudis,  
Hochschule Aschaffenburg

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer kooperativen Promotion an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Aschaffenburg und an dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, für das in mich gesetzte Vertrauen und die engagierte Förderung. Herrn Prof. Dr. Randolph Hanke, Leiter des Lehrstuhl für Röntgenmikroskopie an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Mein größter Dank geht an meinen Betreuer Herrn Prof. Dr. Michael Kaloudis, Dekan der Fakultät Ingenieurwissenschaften an der Hochschule Aschaffenburg, für die ständige Bereitschaft zur fachlichen Unterstützung und den wertvollen Anregungen. Ein besonderer Dank gehört auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Feldmann, ehemaliger Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Diese Dissertation entstand im Rahmen des Forschungsprojekts VoReSo (engl. Influence of Voids on the Reliability of Solder joints, Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen), das von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert wird. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank für ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Unterstützung aussprechen.

Bei meinen Kollegen an der Hochschule Aschaffenburg, insbesondere bei Herrn M.Sc. Timo Schreck, Herrn Wolfgang Ruppert und Herrn M.Eng. Christian Schwarzer, bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen. Auch bei den Kollegen am FAPS möchte ich mich für die freundliche Aufnahme in den Forschungsbereich Elektronikproduktion und die technische Unterstützung bedanken, die die Durchführung meiner Arbeit ermöglicht haben. Vor allem Frau M.Sc. Ping Xu hat durch ihr Engagement wesentlich zur Qualität dieser Arbeit beigetragen. Weiter danke ich allen Studenten, die meine Arbeit unterstützt haben.

Für die gewissenhaften Durchsichten und die konstruktiven Anmerkungen in der letzten Phase meiner Arbeit danke ich ganz besonders Herrn Werner Kleefeld und Frau M.Eng. Monika Hellenthal.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, insbesondere bei meiner Mutter, und meinem Bruder bedanken, die mich stets uneingeschränkt unterstützt haben. Besonderer Dank gilt meinem Partner Michael Schillinger, der mir immer den nötigen persönlichen Rückhalt gegeben hat.

Aschaffenburg, im Juli 2017

Miriam Rauer

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage.....	1
1.2 Ziel der Arbeit .....	5
<b>2 Handlungsbedarf in der bleifreien Löttechnologie .....</b>	<b>9</b>
2.1 Grundlegende Aspekte zu Poren.....	10
2.1.1 Entstehung und Ursache von Poren.....	11
2.1.2 Auswirkungen von Poren.....	13
2.1.3 Bisherige Studien und Grenzwerte von Poren.....	15
2.2 Grundlegende Aspekte zu Rissen.....	19
2.2.1 Ursache von Rissen .....	19
2.2.2 Entstehung von Rissen.....	20
2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs .....	24
<b>3 Entwicklung anwendungsbezogener Testbaugruppen .....</b>	<b>27</b>
3.1 Auswahl der Materialien und Komponenten .....	27
3.1.1 Das Bauteil.....	27
3.1.2 Die Leiterplatte .....	29
3.1.3 Die Lotlegierung.....	32
3.2 Erzeugung porenarmer und porenreicher Lötverbindungen .....	32
3.2.1 Aufbau von Testbaugruppe A.....	33
3.2.2 Aufbau von Testbaugruppe B .....	36
<b>4 Einsatz der Computertomographie zur quantitativen Erfassung der Poren .....</b>	<b>39</b>
4.1 Computertomographie als zerstörungsfreie Prüfmethode ....	40
4.2 Möglichkeiten und Grenzen der Computertomographie .....	42
4.3 Die zwei- und dreidimensionale Auswertung der Porenanteile .....	45

<b>5</b>	<b>Zuverlässigkeitsbetrachtungen unter der Berücksichtigung der Poren.....</b>	<b>53</b>
5.1	Auswirkungen des Luft/Luft-Temperaturschocktests .....	54
5.1.1	Beurteilung der Testbaugruppe A .....	55
5.1.2	Beurteilung der Testbaugruppe B .....	74
5.2	Auswirkungen des flüssig/flüssig-Temperaturschocktests ...	87
5.2.1	Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{Fläche} > 15 \%$ .....	88
5.2.2	Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{Fläche} \leq 5 \%$ .....	91
5.2.3	Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil .....	93
5.3	Auswirkungen des aktiven Lastwechseltests .....	95
5.3.1	Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{Fläche} > 15 \%$ .....	98
5.3.2	Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{Fläche} \leq 5 \%$ .....	102
5.3.3	Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil .....	104
5.4	Auswirkungen des überlagerten Lastwechseltests .....	107
5.4.1	Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{Fläche} \geq 25 \%$ .....	109
5.4.2	Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{Fläche} \leq 5 \%$ .....	111
5.4.3	Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil .....	113
5.5	Auswirkungen des zyklischen Biegetests.....	115
5.5.1	Beurteilung der Testbaugruppe A .....	118
5.5.2	Beurteilung der Testbaugruppe B .....	122
5.6	Auswirkung der unterschiedlichen Zuverlässigkeitstests auf die mechanische Festigkeit der Lötstellen.....	127



<b>6</b>	<b>Simulation des Einflusses von Poren mittels der Finiten-Elemente-Methode .....</b>	<b>131</b>
6.1	Vorgehensweise zum Aufbau eines realitätsnahen Simulationsmodells .....	133
6.2	Simulation des aktiven Lastwechseltests .....	136
6.2.1	Verifikation des Simulationsmodells .....	136
6.2.2	Identifizierung kritischer Porenpositionen und -größen.....	140
6.3	Simulation der kritischen Lotspaltdicke.....	144
6.4	Auswirkungen von Fehlstellen im thermischen Pad auf das Wärmeableitvermögen .....	149
<b>7</b>	<b>Konsequenzen für die Elektronikproduktion.....</b>	<b>155</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	155
7.1.1	Analyse der Rissentstehung.....	155
7.1.2	Analyse der Lotspaltdicke.....	155
7.1.3	Analyse der Porenpositionen.....	156
7.1.4	Analyse der Porengrößen .....	156
7.2	Leitlinien für die Elektronikproduktion .....	157
7.2.1	Ableitung von Design-Vorgaben .....	158
7.2.2	Ableitung von Prozess-Vorgaben .....	158
7.2.3	Ableitung von Prüfleitlinien .....	159
7.3	Allgemeine Vorgehensweise.....	163
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>167</b>
8.1	Resümee .....	167
8.2	Schlussfolgerungen für die Elektronikfertigung.....	170
8.3	Ausblick.....	172
<b>9</b>	<b>Summary.....</b>	<b>175</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>181</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>189</b>



# Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
$A_{Lot,max}$	mm <sup>2</sup>	maximale Lotfläche
$A_{Pore}$	mm <sup>2</sup>	Porenfläche
$C$	-	Materialkonstanten für Coffin-Manson- und Garofalo-Gleichung
$d$	µm	Lotspaltdicke
$\Delta d$	µm	Lotspaltdickenunterschied
$F_{dyn}$	N	dynamische Kraft
$F_{stat}$	N	statische Kraft
$I_o$	cps	ursprüngliche Intensität
$I_x$	cps	geschwächte Intensität
$k$	-	Materialspezifischer Exponent für Coffin-Manson-Gleichung
$\Delta l$	mm	Längenänderungen
$l_o$	mm	ursprüngliche Länge
$I_F$	mA	Durchlassstrom
$m$	°C/V	Steigung
$N_f$	-	Zyklenzahl bis zum Ermüdungsbruch (Bruchzyklenzahl)
$\Delta p$	bar	Druckdifferenz
$P_{total}$	W	Gesamtleistung
$PA_{Fläche}$	%	Porenflächenanteil
$PA_{Volumen}$	%	Porenvolumenanteil
$r$	µm	Radius
$R_{th}$	°C/W	thermischer Widerstand
$t_{an/aus}$	min	Ein- und Ausschaltzeit

## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

$\Delta T$	°C, K	Temperaturbereich
$T$	°C, K	Temperatur
$T_H$	K	homologe Temperatur
$T_j$	°C	Sperrschichttemperatur
$T_{Lot}$	°C	Lottemperatur
$T_{min}$	°C	Minimaltemperatur
$T_{max}$	°C	Maximaltemperatur
$T_S$	°C, K	Schmelztemperatur
$U_F$	V	Vorwärtsspannung
$V_{Lot}$	mm <sup>3</sup>	Lotvolumen
$V_{Pore}$	mm <sup>3</sup>	Porenvolumen
$x$	cm	Objektdicke
$\alpha$	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizienten
$\varepsilon$	-	Dehnung
$\varepsilon_{pl}$	-	plastische Verformung
$\lambda$	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	1/cm	Schwächungskoeffizient
$\sigma$	N/m <sup>2</sup>	Spannung
$\sigma$	N/m	Oberflächenspannung
$\gamma$	-	Scherdehnung

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
2D, 3D	Dimensionalität
AOI	Automated Optical Inspection
AXI	Automated X-ray Inspection
BGA	Ball Grid Array
CAD	Computer-Aided Design
CSP	Chip Scale Package
CT	Computertomographie
EDX	energiedispersiven Röntgenspektroskopie
FEM	Finite-Elemente-Methode
IMC	Intermetallic Compound
IMS	Insulated Metal Substrate
IPC	Association Connecting Electronics Industries
LED	Light-Emitting Diode
NiAu	Nickel-Gold
PA	Porenanteil
QFN	Quad Flat No Leads Package
REM	Rasterelektronenmikroskop
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SAC, SnAgCu	Zinn-Silber-Kupfer
SMD	Surface Mounted Device
SMT	Surface Mounted Technology
SnZnBi	Zinn-Zink-Bismut
SnPb	Zinn-Blei

STL	Standard Triangulation Language
SPI	Solder Paste Inspection
TBG	Testbaugruppen
TST	Temperaturschocktest
VoReSo	Influence of Voids on the Reliability of Solder joints

## **Formeln**

(2-1)	Porenflächenanteil	10
(2-2)	Young Laplace Gleichung	12
(2-3)	Längenänderung	20
(2-4)	Scherdehnung	20
(2-5)	Coffin-Manson-Beziehung	22
(2-6)	Garofalo Gleichung	23
(4-1)	Exponentielles Schwächungsgesetz nach Lambert-Beer	40
(4-2)	Porenvolumenanteil	42
(5-1)	Sperrschichttemperatur	97
(6-1)	Geradengleichung der Sperrschichttemperatur	152

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Sowohl Elektromobilität als auch Ressourcen- und Energieeffizienz sind Antriebe der deutschen Wirtschaft, die es ermöglichen, sich den globalen Herausforderungen in der Elektronikindustrie zu stellen. Neue Technologien werden entwickelt oder bereits bestehende optimiert.

Leuchtdioden (engl. Light-Emitting Diode, LED) werden in den nächsten Jahren die herkömmlichen Leuchtmittel vom Markt verdrängen, da diese mit ihren energiesparenden sowie ressourceneffizienten Eigenschaften und ihrer Langlebigkeit zukunftsweisend sind [1]. Um ihr gesamtes Wertschöpfungspotenzial ausnutzen zu können, ist eine qualitativ hochwertige Lötverbindung zwischen der LED und dem Leiterplattensubstrat nötig [2]. Die Lötverbindung stellt die mechanische, elektrische und thermische Verbindung zwischen den elektronischen Bauteilen und der Leiterplatte dar [3].

Seit 2006 sind mit dem Inkrafttreten der RoHS-Richtlinie (Restriction of Hazardous Substances) bleihaltige Lotwerkstoffe zum Schutz der Umwelt und des Menschen in Elektro- und Elektronikgeräten mit wenigen Ausnahmen verboten [4]. Das Verbot der bleihaltigen Lote hat zur Folge, dass neue bleifreie Lotlegierungen auf dem Markt angeboten werden, welche hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit zu erproben sind [5], [6], [7].

Die neuen Lotlegierungen haben zu einer Zunahme von Poren in den Lötverbindungen geführt, welche den Verbindungsquerschnitt der Lötverbindung reduzieren. Dadurch wird zum einen die mechanische Stabilität der elektronischen Baugruppen herabgesetzt und zum anderen das Wärmeableitvermögen reduziert [3], [8] [9]. Die Folge ist der frühzeitige Ausfall der elektronischen Baugruppe aufgrund der sowohl mechanisch als auch thermisch unzureichenden Lötstellenqualität. Vor allem die elektrischen Eigenschaften von Halbleiterbauelementen korrelieren stark mit der Temperatur. Diese Temperaturabhängigkeit kann zu einer Überhitzung des gesamten Bauteils führen, wodurch sowohl die Kurz- als auch die Langzeitzuverlässigkeit beeinflusst werden [10]. Aufgrund der fortwährenden Miniaturisierung der elektronischen Bauelemente bei gleichbleibender oder sogar größerer Leistungsfähigkeit steigen die Anforderungen an die elektronischen Bauelemente, wodurch eine Vermeidung beziehungsweise Reduzierung des Porenaufkommens immer wichtiger wird [11].

Die Umstellung auf bleifreies Löten hat bei vielen Herstellern elektronischer Geräte eine Unsicherheit im Hinblick auf die Produktzuverlässigkeit und die Verarbeitbarkeit des bleifreien Lotes ausgelöst [12]. Die Einflussfaktoren und Mechanismen der Porenentstehung wurden daher in den letzten Jahren eingehend untersucht [3], [13], [14]. Dabei wurden stellenweise konträre Effekte bei unterschiedlichen Bauteilformen entdeckt. Maßnahmen, die bei Flächenlötungen eine Herabsetzung des Porenanteils bewirken, haben bei Ball-Lötungen mitunter eine Erhöhung des Porenanteils zur Folge [15], [16].

Die Empfehlungen internationaler Standards und Studien für den zulässigen Gesamtporenanteil gelten nur für ausgewählte elektronische Bauteile, meist Ball Grid Arrays (BGA) [16], wobei sich diese teilweise widersprechen. Studien zeigen, dass vor allem die Porenposition einen entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat und dass die untersuchten Porenanteile oftmals unter den empfohlenen 30 % der IPC-A-610-F Richtlinie liegen [17], [18], [19]. Bedingt durch diese Unklarheit über die tatsächliche Auswirkung des Porenanteils auf die Zuverlässigkeit der Lötstelle wird von der Industrie oftmals nur ein sehr geringer Porenanteil akzeptiert, dessen Realisierung mit hohem Aufwand verbunden ist. Für Baugruppen der Leistungselektronik liegt dieser bei weniger als 5 % [15]. Solche geringen Porenanteile sind mit Standard-Lötprozessen oftmals nicht zu verwirklichen, sodass neue Lötverfahren wie Vakuumlöten [15] oder Überdrucklöten [20] notwendig sind. In der Praxis werden diese Verfahren jedoch noch nicht standardmäßig eingesetzt. Dadurch kommt für die produzierende Industrie immer wieder die Frage nach dem tatsächlichen Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen auf. Die Definition eines verifizierten Porengrenzwertes, bis zu welchem die Zuverlässigkeit der Lötstelle garantiert ist, würde die Reduzierung des Ausschusses und somit eine Senkung der Produktions- und Prozesskosten ermöglichen.

Insbesondere in der Leistungselektronik sind porenfreie Lötverbindungen zu empfehlen, um eine einwandfreie Funktion der Halbleiterbauelemente ohne Überhitzung zu gewährleisten [10], [21]. Im Bereich der Optoelektronik lösen bereits seit einigen Jahren LEDs herkömmliche Glühlampen ab [1]. Aufgrund des gesetzlichen Verbots der Glühbirnen wird prognostiziert, dass in den nächsten 10 Jahren 70 % aller Beleuchtungen mit LEDs ausgestattet sein werden [22]. Immer mehr kommen hier sogenannte High-Power- oder High-Brightness-LEDs aufgrund ihrer umweltfreundlichen und energiesparenden Eigenschaften sowie ihrer langen Lebensdauer auf den Markt. Ihr Anwendungsfeld reicht von TV-Hintergrundbeleuchtungen, KFZ-Innen- und -Außenbeleuchtungen, großen Schildern und Displays über Signal- und



allgemeine Beleuchtungen [23] bis hin zur Konsumelektronik wie Handykameras [24]. Vor allem in der Fahrzeugindustrie werden LEDs immer beliebter. Nach den Leuchten im KFZ-Innenraum sowie den Rück- und Bremsleuchten werden nun auch die Scheinwerfer serienmäßig mit LEDs ausgestattet.

Je nach LED-Typ kann die Lebensdauer bis zu 50 000 Stunden und mehr betragen [25]. Um diese hohe Lebensdauer zu erreichen, ist ein gutes Wärmemanagement nötig, da sich eine LED durch den Lichtentstehungsprozess erwärmt [26]. Zu hohe Temperaturen haben zur Folge, dass sich wichtige Parameter und somit Eigenschaften der LED verändern und sich die Lebensdauer der LED drastisch verkürzt [25]. Hierzu zählen vor allem die Verschlechterung der Lichtausbeute, Delamination, Elektromigration und die Farbortverschiebung [27]. Da sich der Porenanteil in der Lötverbindung negativ auf das Wärmeverhalten und die elektrische Funktion der High-Power-LED auswirkt, ist eine zuverlässige Lötverbindung zwischen LED-Gehäuse und Leiterplatte für die gesamte Zuverlässigkeit der Leuchte entscheidend [2].

LEDs werden mittlerweile in den unterschiedlichsten Anwendungen im Außen- und Innenbereich eingesetzt und dadurch verschiedenen Einflüssen wie Temperatur, mechanischen Kräften, Chemikalien, Feuchtigkeit sowie elektrischer Belastung ausgesetzt [28], [29]. Die Lötverbindung wird durch thermo-mechanischen Stress aufgrund von Temperaturwechseln (Umgebungstemperaturen, Eigenerwärmung) stark beansprucht, wodurch Risse entstehen können. Infolge der Risse wird der stromführende Querschnitt der Anoden- und Kathodenlötstellen verringert, was zu einem Durchriss der Lötverbindungen führen kann [30].

Aspekte wie die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer der immer komplexer werdenden technischen Module und damit verbunden die Kosten für Austausch- und Revisionsarbeiten rücken immer stärker in den Fokus [29]. Speziell bei Frontscheinwerfern im Automobilbereich findet der Austausch des gesamten Scheinwerfers anstelle der einzelnen LED statt, wodurch hohe Kosten entstehen [31]. Ein hohes Maß an Zuverlässigkeit der gesamten LED-Baugruppe wird dadurch umso wichtiger. Denn nur eine Gewährleistung der Langlebigkeit und die Ausschöpfung der gesamten Lebensdauer der Baugruppen ermöglicht ein ressourceneffizientes Wirtschaften.

Durch die Wahl der Lotlegierung gibt es auch noch Potenzial, Ressourcen zu schonen und Kosten zu senken. Aus der Vielfalt der neuen Lotlegierungen haben sich als Standardlotlegierungen die SnAgCu-Lote (SAC) in der Oberflächenmontagetechnik (engl. Surface Mounted Technology, SMT) etabliert, welche aus Zinn (Sn), Silber (Ag) und Kupfer (Cu) bestehen. Die Association Connecting Electronics Industries (IPC) sprach 2005 als weltweiter Fachverband der Leiterplatten- und Elektronikindustrie die Empfehlung aus, die Legierung SAC305 (auch SnAg<sub>3.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> oder SA<sub>30</sub>C<sub>5</sub> genannt) in der Elektronikindustrie zu verwenden. Diese Empfehlung beruht auf den Testergebnissen eines Vergleichs mit der SAC387- und der SAC405-Legierung. Hierzu wurden Kriterien wie die quantitative und qualitative Bestimmung der Lötbarkeit, Sicht- und Röntgenprüfungen der Lötverbindungen, Zuverlässigkeitstests sowie metallographische Schliffe betrachtet [32].

Im Gegensatz zu den mittlerweile verbotenen bleihaltigen Legierungen (SnPb) ist das SAC305-Lot aufgrund seines Silberanteils von 3 % relativ teuer [33]. Silber ist als Edelmetall in Lotpasten ein Kostentreiber, welcher starken Schwankungen unterliegt [34]. Es bietet sich von daher an, Lotlegierungen mit einem geringeren Silberanteil wie die Legierung SAC105 (auch SnAg<sub>1.0</sub>Cu<sub>0.5</sub> oder SA<sub>10</sub>C<sub>5</sub>) zu verwenden, um die Kosten zu senken [35]. Die Lötbarkeit und Benetzungseigenschaften der silberreduzierten Lotlegierung SAC105 entsprechen weitgehend der Verarbeitung des Standardlotes SAC305 [36].

Neben dem Kostenaspekt ist eine Verringerung des Silberanteils auch aufgrund der begrenzten Ressourcen des Rohstoffs sinnvoll. Die statistische Reichweite beträgt 13 Jahre [37]. Hiermit ist die Reservenreichweite gemeint, die das Verhältnis der derzeitigen Reserven eines Rohstoffs und seiner Fördermenge darstellt [38]. Die Ressourcenreichweite des Silbers liegt bei 29 Jahren und berücksichtigt den technologischen Fortschritt und somit die derzeit noch nicht wirtschaftlich abbaubaren Reserven. Da Silber in starkem Maße in der industriellen Produktion verwendet wird, werden die Silberreserven in den nächsten Jahrzehnten erschöpft sein. Eine effiziente Nutzung des Rohstoffs Silber sowie dessen Recycling oder Substitution sind daher sinnvoll [39]. Die Reduzierung des Silberanteils in der Lotpaste ist ein Ansatzpunkt, um Kosten zu reduzieren und Rohstoffe zu schonen. Die Verarbeitung des SAC105-Lots wurde bereits untersucht und für gut befunden [36]. Allerdings stehen Untersuchungen über die Auswirkungen von Poren in dieser Lotpaste noch aus.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Übergreifendes Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen elektronischer Baugruppen. Hierzu werden kritische Porenpositionen und -größen mittels Zuverlässigkeitstests und Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) identifiziert und ein Porengrenzwert abgeleitet. Dieser soll einen zulässigen Porenanteil in Lötverbindungen angeben, bis zu welchem Poren die Zuverlässigkeit der elektronischen Baugruppen nur geringfügig oder gar nicht beeinträchtigen. Derzeit werden aufgrund der Unsicherheit des Einflusses von Poren oftmals nur sehr geringe Porenanteile akzeptiert. Die Umsetzung geringer Porenanteile in der Produktion ist aber oftmals mit einem hohen Aufwand verbunden. Mit einem akzeptierten Grenzwert kann der Ausschuss und somit die Kosten gesenkt werden. Im Folgenden wird der Aufbau der Arbeit beschrieben, wobei die Vorgehensweise an die Projektstruktur des Forschungsprojekts angelehnt ist.

Als Ausgangspunkt der Dissertation werden im zweiten Kapitel die wichtigsten Grundlagen zu Poren und Rissen in Lötverbindungen beschrieben und der sich daraus ableitende Forschungsbedarf. Hierzu wird die Porenproblematik dargestellt, indem die Entstehung und die Ursachen von Poren sowie deren Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen erläutert werden. Anschließend wird der Stand der Technik anhand internationaler Standards, Normen und Studien aufgeführt. Es zeigt sich, dass nur für ausgewählte Bauteile Grenzwerte vorliegen, welche oftmals nicht konsistent sind. Die Porenposition wird in den Studien als wichtiges Kriterium im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindung beschrieben. Die in der Literatur aufgeführten Grenzwerte sind häufig an eine Lotlegierung gebunden, während Normen stellenweise einen pauschalen Grenzwert angeben. Darüber hinaus resultieren die ermittelten Grenzwerte fast ausschließlich nur aus thermo-mechanischen Betrachtungen, wie dem Schertest mit vorgelagerter Temperaturbelastung beziehungsweise thermo-mechanischen Simulationen mittels FEM. Ein weiterer Aspekt in diesem Kapitel sind Risse, die nach Belastungen der Baugruppe wie Temperaturänderungen oder Biegung auftreten. Risse werden durch Poren begünstigt, können aber auch am Lötstellenrand sowie im Gefüge entstehen und sich innerhalb der Lötverbindung weiter ausbreiten. Infolge von Rissen wird die Lötverbindung zunehmend geschwächt, wodurch die gesamte elektronische Baugruppe ausfallen kann. Die Entstehungsmechanismen der Risse werden daher eingehend erläutert. Zusammen mit der Porenproblematik leitet sich hieraus der Forschungsbedarf ab, den Einfluss

von Poren auf mechanische sowie thermo-mechanische Aspekte hin zu untersuchen.

Im dritten Kapitel werden die Zusammenstellung der Materialien und die Herstellung zweier anwendungsbezogener Testbaugruppen mit verschiedenen Porenanteilen beschrieben. Die Wahl der Testbaugruppen schließt Literaturlücken und berücksichtigt aktuelle Trends und Fragestellungen in der Elektronikproduktion. Aus diesem Grund sowie wegen wirtschaftlicher und energieeffizienter Gesichtspunkte werden High-Power-LEDs und ein silberreduziertes Lot ausgewählt. Die Löt pads der LED sind flächige Anschlüsse, die in diesem Zusammenhang noch nicht untersucht wurden. Der Aufbau der Testbaugruppen hat zum Ziel, sowohl porenreiche als auch porenarme Lötverbindungen herzustellen, um später unterschiedliche Porenanteile in den Experimenten zu untersuchen. Für die Herstellung der porenarmen Lötverbindungen kommt eine neuartige Reflowlötanlage zum Einsatz, die mittels Überdruck das Porenaufkommen in den Lötverbindungen reduziert.

Neben der Charakterisierung der Lötverbindungen mittels der konventionellen Röntgentechnik wird die Computertomographie (CT) eingesetzt. Die Funktionsweise der Computertomographie sowie Grenzen und Möglichkeiten der zerstörungsfreien Testmethode sind im vierten Kapitel beschrieben. Mit der CT kann die bei der Röntgentechnik fehlende dritte Dimension erfasst werden. Aus dem Mehrgehalt an Informationen ist es möglich, kritische Porenverteilungen, -positionen und -volumina besser aufzudecken. Jedoch benötigt die Durchführung von Computertomographiemessungen mehr Zeit als Röntgenaufnahmen. Aus diesem Grund arbeiten Baugruppenhersteller in der Serienfertigung oftmals noch mit zweidimensionalen Röntgenbildern. Auch in dieser Arbeit erfolgt die Röntgenprüfung für alle Baugruppen, während die Computertomographien nur für ausgewählte Baugruppen durchgeführt werden. Die Lötverbindungen werden daher anhand der ausgewerteten Röntgenbilder in verschiedene Porenklassen eingeteilt. Der Unterschied zwischen den zweidimensionalen Röntgen- und den dreidimensionalen CT-Porenanteilen wird im vierten Kapitel herausgearbeitet sowie die Ursache für mögliche Abweichungen analysiert.

Nach der eingehenden Charakterisierung der Lötverbindungen werden im fünften Kapitel die Ergebnisse verschiedener Zuverlässigkeitstests vorgestellt. Neben den thermo-mechanischen Tests, wie den passiven Temperaturschocktests (Luft/Luft, flüssig/flüssig), dem aktiven Lastwechseltest und dem überlagerten Lastwechseltest, wird als mechanischer Test ein Biegetest

durchgeführt. Die Tests erfolgen für alle Porenklassen, um später die unterschiedlichen Porenanteile mit den Ergebnissen der Tests zu korrelieren. Mittels CT-Aufnahmen können die Lötverbindungen vor und nach den Zuverlässigkeitstests gegenübergestellt und somit die Schädigungen in den Lötverbindungen belegt werden. Zusätzlich erfolgen für ausgewählte Tests CT-Messungen nach einer definierten Zyklenzahl, um den Zeitpunkt und die Position der Rissentstehung zu dokumentieren. Abschließend erfolgt der Schertest mit anschließender Analyse der Ausfallart, um die mechanische Festigkeit zwischen Bauteilanschluss und Anschlussfläche der Leiterplatte beurteilen zu können.

Parallel zum experimentellen Vorgehen werden im sechsten Kapitel die zugehörigen FEM-Simulationen vorgestellt. Mit Hilfe von Simulationen können Entwicklungszeiten verkürzt werden, indem Aufbauten und Testreihen gezielter geplant und effizienter durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist ein verifiziertes Simulationsmodell, das der Wirklichkeit entspricht. Auf Basis der CT-Daten ist es möglich, ein realitätsnahes Simulationsmodell aufzubauen, indem eine reale Porenverteilung in die Simulation implementiert wird. Durch einen permanenten Vergleich der simulierten Ergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Experiment kann das Simulationsmodell verifiziert werden. In einem nächsten Schritt können mit Hilfe der FEM-Simulation gezielt bestimmte Porenpositionen und -volumina untersucht werden. Dies ist anhand der Experimente kaum möglich, da statistische Einflüsse dominieren und die reale Porenentstehung von Zufallsprozessen überlagert wird. In der Simulation können einzelne Poren isoliert oder Porenanhäufungen an verschiedenen Positionen in unterschiedlichen Porengrößen analysiert werden. Die Simulationsergebnisse ermöglichen somit die Identifikation kritischer Porenpositionen und -größen.

Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse aus dem fünften und sechsten Kapitel zusammengeführt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den experimentellen Daten und Simulationen werden im Hinblick auf die Rissentstehung, der Größe und der Position der Pore und der Lotspaltdicke zusammengefasst. Auf dieser Grundlage werden zunächst Leitlinien für den hier untersuchten Anwendungsfall für die Elektronikfertigung entwickelt und anschließend eine allgemeine Vorgehensweise aufgezeigt, um kritische und unkritische Bereiche, insbesondere für Poren, zu erkennen. Im Bereich der Elektronikfertigung trägt die Kenntnis kritischer Porenverteilungen zu einer zielgerichteteren Qualitätsprüfung bei.

Abschließend erfolgen im achten Kapitel eine Zusammenfassung der Arbeit und eine Erläuterung der Konsequenzen für die Elektronikfertigung. Im Ausblick werden zu weiteren Forschungsaktivitäten im Rahmen der behandelten Fragestellung angeregt.

## 2 Handlungsbedarf in der bleifreien Löttechnologie

Durch das Verbot von bleihaltigem Lot im Jahre 2006 mit der RoHS-Richtlinie und dem daraus resultierenden globalen Druck bleihaltiges Lot in der Mikroelektronik durch neue Lotlegierungen zu ersetzen wurde in den letzten Jahren ein enormer Fortschritt verzeichnet, um dies umzusetzen. Bleifreie Lote müssen einen geringen Schmelzpunkt ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ) bei gleichzeitig guter Benetzbarkeit und thermo-mechanischer Ermüdungsbeständigkeit haben [40].

Hier haben sich die SnAgCu-basierten Lote, bekannt als SAC-Lote, in mikroelektronischen Anwendungen durchgesetzt [40]. Das SAC<sub>305</sub>-Lot gewinnt hier immer mehr an Akzeptanz als bevorzugtes bleifreies Lot in der SMT [12], [32]. Aufgrund seines Silberanteils von 3 % ist dieses allerdings relativ teuer, weshalb neue SAC-Lote wie das SAC<sub>105</sub>-Lot mit einem Silberanteil von nur 1 % auf dem Markt angeboten werden [35].

Bei vielen Herstellern elektronischer Geräte hat die Umstellung auf eine bleifreie Lotlegierung eine Ungewissheit bezüglich der Verarbeitbarkeit des Lotes und die Produktzuverlässigkeit verursacht [12]. Der Vergleich der Schmelztemperatur  $T_S$  eines bleifreien SAC-Lots ( $T_S = 217^\circ\text{C}$ ) und eines SnPb-Lots ( $T_S = 183^\circ\text{C}$ ) zeigt, dass die Prozesstemperatur aufgrund des höheren Schmelzpunktes erhöht werden muss. Dadurch verkleinert sich das Prozessfenster, da die Bauteile auch nicht durch eine zu hohe Peaktemperatur geschädigt werden dürfen. Die zulässige Peaktemperatur ist bauteilabhängig und liegt zwischen  $245^\circ\text{C}$  und  $260^\circ\text{C}$  [41].

Lötverbindungen stellen sowohl die elektrische als auch die mechanische Verbindung zwischen Bauteil und Leiterplatte dar. Sie sind somit zyklischem Stress aufgrund von Temperaturunterschieden, Vibrationen und Stößen ausgesetzt, welcher zu Defekten in der Lötverbindung und letztlich zu einem Funktionsverlust oder Produktversagen führen kann [12].

Im Folgenden werden zwei Aspekte näher beschrieben, welche die Zuverlässigkeit einer Lötverbindung beeinflussen.

## 2.1 Grundlegende Aspekte zu Poren

Poren (englisch Voids) sind räumliche Gebilde mit einer meist glatten näherungsweise sphärischen Innenwand. Sie sind Hohlräume, die während des Lötens entstehen und beim Erstarren des flüssigen Lotes in diesem eingeschlossen werden [3].

Poren in Lötverbindungen sind keine neue Thematik, welche erst bei den bleifreien Loten auftrat. Bereits in bleihaltigen Loten befanden sich Poren in den Lötstellen, allerdings wurden diese zu der Zeit nur mittels Sichtprüfung kontrolliert und nicht mittels Röntgenverfahren, wodurch die Poren in bleihaltigen Loten nur selten detektiert und untersucht wurden [42]. Aufgrund von drei wesentlichen physikalischen Unterschieden neigen SAC-Lote im Vergleich zu SnPb-Loten vermehrt zur Porenbildung. Erstens erschwert die höhere Oberflächenspannung der SAC-Legierungen das Ausgasen eingeschlossener Gase in den Lotdepots. Zweitens führen die höheren Prozesstemperaturen zur vermehrten Bildung von potenziellen Gasen aus dem Flussmittel, der Leiterplatte und den Bauteilen. Drittens sind die Benetzungseigenschaften der SAC-Lote aufgrund des geringeren Abstands zwischen Prozesstemperatur und Schmelzpunkt schlechter [5].

Neben der Anzahl der Poren spielt das Verhältnis des Volumens der Gaseinschlüsse zum Gesamtvolumen der Lötstelle eine entscheidende Rolle. Da in der Praxis der Braugruppenfertigung Poren üblicherweise mittels 2D-Röntgenverfahren detektiert werden, wird der relative Flächenanteil zur Beurteilung herangezogen [3]. Der Porenflächenanteil  $PA_{Fläche}$  berechnet sich demnach aus

$$PA_{Fläche} = \frac{A_{Pore}}{A_{Lot,max}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Pore\ i}}{A_{Lot,max}} \quad (2-1)$$

wobei  $A_{Pore}$  die Porenfläche und  $A_{Lot,max}$  die maximale Lotfläche ist [43].

Poren reduzieren den Verbindungsquerschnitt der Lötverbindung, wodurch nicht nur die mechanische Stabilität [8], sondern auch das Wärmeableitvermögen herabgesetzt werden [3], [9]. Gleichzeitig stellen Poren ein zusätzliches Volumen in der Lötstelle dar, wodurch die Dicke des Lotspalts vergrößert wird [44]. Besonders bei miniaturisierten Bauelementen oder Leistungsbauteilen können Poren eine verheerende Wirkung auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindung und letztlich auf die gesamte Baugruppe haben [45]. Warum Poren entstehen und welche Auswirkung diese auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen haben, wird in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.



### 2.1.1 Entstehung und Ursache von Poren

Eine der häufigste Ursache für die Entstehung von Poren besteht darin, dass das ausgasende Flussmittel während des Lötens nicht aus der Lötverbindung entweichen kann und beim Erstarren des flüssigen Lotes in diesem eingeschlossen wird [3] (siehe Bild 2-1a, b, c). Der Anteil organischer Bestandteile in der Lotpaste beträgt 35 bis 65 Volumenprozent, wodurch die Porenentstehung begünstigt wird. Die organischen Bestandteile bestehen unter anderem aus Flussmittel und Aktivatoren, welche die Viskosität beeinflussen und somit den Fluss und das Verformungsverhalten der Lötverbindung bestimmen [46]. Die ausgasende Substanz entsteht üblicherweise durch die Verdunstung des Lösemittels und der Zusatzstoffe in der Lotpaste während des Aufheizens beim Reflowprozess. In manchen Fällen können Poren auch durch ausgasende Bestandteile entstehen, die auf eine schlechte Qualität des Bauteils oder der Leiterplattenoberflächen zurückzuführen sind [47].

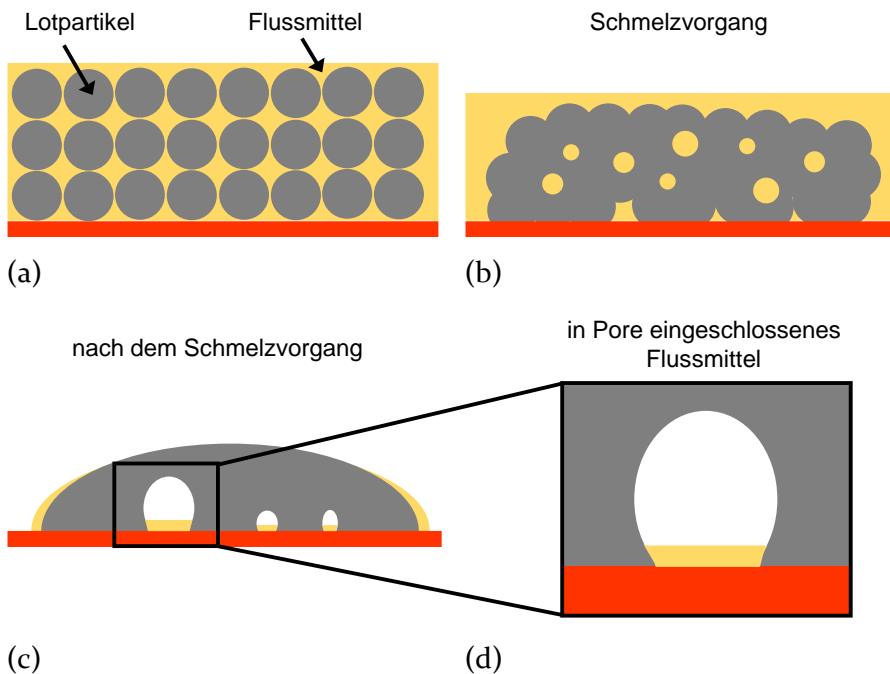


Bild 2-1: Entstehung von Poren nach [47]

Poren streben normalerweise eine sphärische Form an, welche sich ändern kann, wenn sich während des Lötprozesses kleine Poren zu einer großen Pore zusammenschließen. Die wachsende Pore flacht in ihrer Form ab,

sobald sie die Lotspaltdicke erreicht, und nimmt einen neuen Gleichgewichtszustand an [46].

Die Oberflächenspannung zwischen dem flüssigen Lot, dem Flussmittel und der Leiterplattenoberfläche beeinflusst den Grad der Benetzung, welcher die Bildung von Poren bestimmt [46]. Bild 2-1d zeigt, wie das Lot das Flussmittel an der Leiterplattenoberfläche in Form einer Halbkugel umschlossen hat. Aufgrund des Kräftegleichgewichts des Systems ist keine weitere Oberflächenbenetzung möglich [47]. Damit Poren entweichen können, muss

$$\Delta p > \frac{2\sigma}{r} \quad (2-2)$$

sein, wobei  $\Delta p$  die Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Pore und der Umgebung,  $\sigma$  die Oberflächenspannung und  $r$  der Radius der Pore ist. Diese Eigenschaft machen sich Vakuum- und Überdruck-Lötverfahren zu eigen. Beim Überdruck-Lötverfahren wird das flüssige Lot mit einem Überdruck beaufschlagt und nach kurzer Zeit wieder ruckartig abgebaut. Durch diese Druckdifferenz werden die Poren aus dem flüssigen Lot verdrängt. Um den reduzierten Porenanteil zu halten kann eine zweite Druckbeaufschlagung erfolgen, während der das Lot erstarrt [20], [48]. Aus dem Vergleich der Oberflächenspannungen von einem bleihaltigen Lot mit  $\sigma_{\text{Sn63Pb37}} = 0,47 \text{ N/m}$  und einem bleifreiem Lot mit  $\sigma_{\text{SnAg4Cu0,5}} = 0,54 \text{ N/m}$  lässt sich schlussfolgern, dass es eine Korrelation zwischen Oberflächenspannung und dem Anstieg der Poren in bleifreien Loten gibt [47].

Die Ursachen der Porenbildung wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht. In Bild 2-2 sind mögliche Faktoren in einem Ishikawa-Diagramm zusammengefasst, wobei die Haupteinflussfaktoren hervorgehoben sind. Verschiedene Studien zeigen, dass die Einflussfaktoren Leiterplattenmetallisierung, Temperaturprofil und Lotpastenzusammensetzung die größten Auswirkungen auf die Entstehung von Poren haben [3], [14], [49], [50], welche in Bild 2-2 hervorgehoben sind. Es empfiehlt sich das Temperaturprofil und das Flussmittel so aufeinander abzustimmen, dass flüchtige Bestandteile der Paste weitestgehend bereits vor dem Aufschmelzen des Lotes entweichen können und sich gleichzeitig die Aktivatoren noch nicht thermisch zersetzen [14]. Besonders bei Baugruppen mit unterschiedlichen Bauteilen ist ein einheitliches Lösungsrezept zur Vermeidung von Poren schwierig, da es gerade bei BGA- und Flächenbaugruppen wie Quad Flat No Leads Packages (QFN) konträre Effekte gibt. Maßnahmen, die eine Porenreduzierung bei BGAs bewirken, erhöhen den Porenanteil bei QFNs

beziehungsweise bei Chip-Lötstellen und Verfahren, die sich bei Flächenlötungen als wirksam erwiesen, führten bei BGAs zum gegenteiligen Effekt. Hier müssen bei den eingesetzten Materialien und Reflowparametern Kompromisse gefunden werden, um eine optimale Qualität zu erhalten [15], [16], [44]. Vielversprechend sind hier Vakuum- oder Überdruckverfahren zur Reduzierung von Poren, welche sich Gleichung (2-2) zu Nutze machen [51], [52].

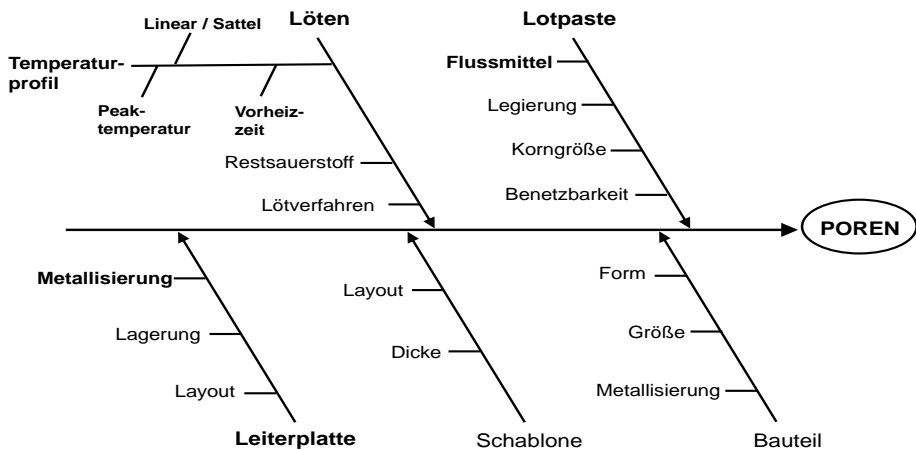


Bild 2-2: Ishikawa-Diagramm der Faktoren für die Entstehung von Poren nach [51], [3], [53]

### 2.1.2 Auswirkungen von Poren

Die Zuverlässigkeit einer Lötverbindung ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass die Lötverbindung die geforderte Funktion unter festgelegten Einsatzbedingungen für ein vorgegebenes Zeitintervall erfüllen kann [2]. Poren beeinflussen entsprechend ihrer Anzahl, Lage und Größe die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen, indem sie den Verbindungsquerschnitt reduzieren und somit die mechanische, elektrische und thermische Leistungsfähigkeit verschlechtern (siehe Bild 2-3) [54]. Auf Grund solcher mangelhafter Lötverbindungen kann sogar eine Baugruppe als Ganzes ausfallen [33].

Besonders in der Leistungselektronik ist die Vermeidung von Poren wichtig, da hier die Energieeffizienz eine zentrale Rolle spielt. Bedingt durch die Miniaturisierung bei gleichbleibender oder größerer Leistungsfähigkeit steigen die Anforderungen an elektronische Bauelemente. Aufgrund der durch die Poren bedingten Abnahme des effektiven Verbindungsquerschnitts der

Lötstelle wird nicht nur die mechanische Stabilität reduziert, sondern auch das Wärmeableitvermögen [3], [9].

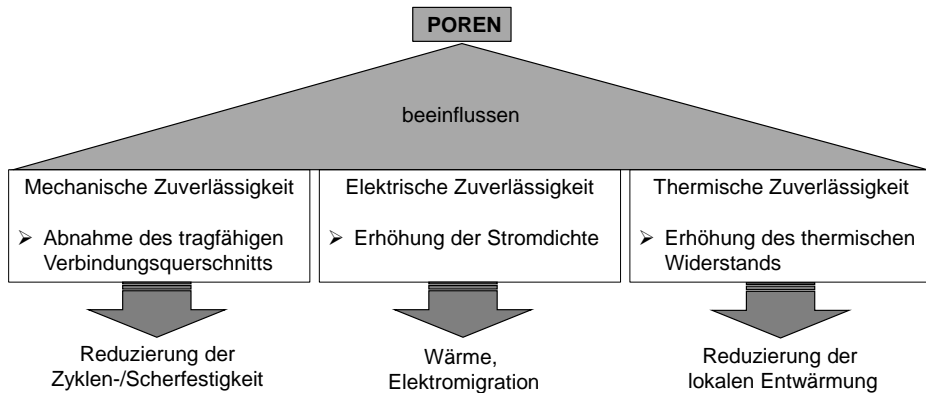


Bild 2-3: Einfluss von Poren in Lötverbindungen auf die Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppe nach [54]

Vor allem die elektrischen Eigenschaften von Halbleiterbauelementen werden stark von der Temperatur beeinflusst. Diese Temperaturabhängigkeit kann zu einer Überhitzung des gesamten Bauteils führen, wodurch sowohl kurzfristig die Leistung als auch langfristig die Zuverlässigkeit beeinflusst werden können [10]. Bild 2-4 zeigt die Verdrängung der Wärmeströme aufgrund von Poren in einer High-Power-LED. In Bild 2-4a ist der Wärmeflussweg anhand der roten Wärmeflusslinien durch eine porenfreie Lötverbindung dargestellt. Die Wärme entsteht am LED-Chip und wird in den darunter liegenden Schichten gleichmäßig über die gesamte Baugruppe verteilt. Die zwei Poren in Bild 2-4b bewirken, dass der Wärmestrom durch die Poren verdrängt wird und die vorhandene Wärme über einen kleineren Querschnitt abgeführt werden muss. Speziell bei Leistungshalbleitern kann eine Pore im thermischen Pfad den Wärmefluss erheblich stören. Bei ausreichender Größe der Pore kann der Anstieg des thermischen Widerstands zu einer Überhitzung des Halbleiters und dessen Zerstörung führen [55].

Das Problem einer ungleichmäßigen Verteilung von Strom und Wärme wird weiter verschärft, wenn Poren zu einem keilförmigen Lotspalt führen, wodurch das Bauteil in Schräglage gerät und verkippt [20]. Grund hierfür ist, dass Poren eine minimale Oberflächenenergie anstreben und somit eine sphärische Form [46]. Durch den keilförmigen Lotspalt werden letztlich Spannungen und Risse begünstigt [20].

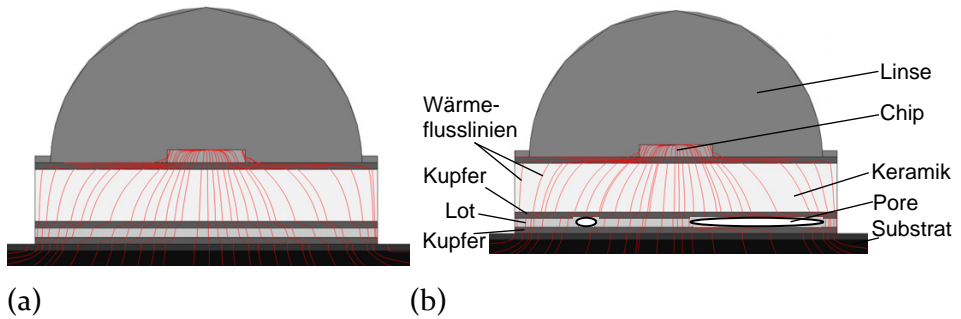


Bild 2-4: Einfluss von Poren auf den Wärmefluss in einer LED (a) ohne Poren, (b) mit Poren [56]

Die Porenproblematik verhindert eine effiziente Nutzung der Ressourcen, da die elektronischen Bauelemente aufgrund der mechanisch als auch thermisch unzureichenden Lötstellenqualität frühzeitig ausfallen.

Im nächsten Abschnitt werden Studien und Standards vorgestellt, welche bereits Akzeptanzkriterien für einen zulässigen Porenanteil untersucht und definiert haben.

### 2.1.3 Bisherige Studien und Grenzwerte von Poren

Angesichts der Unkenntnis der Auswirkungen des Porenaufkommens auf die Zuverlässigkeit der Lötstelle wird von der Industrie oftmals nur ein sehr geringer Porenanteil akzeptiert. Die Definition eines verifizierten Porengrenzwertes, bis zu dem die Zuverlässigkeit der Lötstelle garantiert ist, ermöglicht die Reduzierung des Ausschusses und somit eine Senkung der Produktions- und Prozesskosten. In einigen Standards und veröffentlichten Studien wurde der Frage nachgegangen, bis zu welchem Porenanteil eine Lötverbindung als zuverlässig gilt, und Grenzwerte für die Poren ermittelt. Der Stand der Technik wird im Folgenden dargestellt.

Für ausgewählte Bauteilanschlussgeometrien wie Ball-Anschlüsse bei BGAs sind bereits Standards vorhanden, welche einen Porengrenzwert definieren, unter dem die Lötverbindung weiterhin als zuverlässig gilt [17], [42], [43]. Gemäß der Richtlinie IPC-A-610-F ist ein Porenflächenanteil im Röntgenbild des BGA-Balls von maximal 30 % akzeptabel [17]. Dieser Grenzwert bezieht sich dabei nicht auf ein bestimmtes Lot, sodass er allgemeine Gültigkeit besitzt. Ob der genannte Porenanteil tatsächlich auf die unterschiedlichsten Lötverbindungen und somit Materialien übertragbar ist, ist jedoch fraglich.

Die Richtlinie IPC-7095C geht detaillierter auf die Porenposition bei BGAs ein und unterscheidet zwischen Poren im Ball und solchen an den Grenzflächen zum Gehäuse oder zur Montageoberfläche. In Abhängigkeit von der Position der Pore und dem Miniaturisierungsgrad des Bauteils definiert die IPC-7095C unterschiedliche Kennwerte. Diese sind zum einen auf das Verhältnis der Querschnittsfläche der Pore zur maximalen Querschnittsfläche der Lötverbindung (siehe Bild 2-5b) und zum anderen auf den prozentualen Porendurchmesser in Bezug zum Lötballdurchmesser, den sogenannten Bilddurchmesser, bezogen. Je nach Akzeptanzklasse und Miniaturisierungsgrad sollte der Porenanteil zwischen 5 % und 25 % und der Bilddurchmesser zwischen 22 % und 50 % liegen. Die IPC-7095-C weist darauf hin, dass nicht der Porenanteil, sondern vielmehr die Porenposition von größerem Interesse ist. Die empirischen Daten zeigen, dass Poren innerhalb des Balls keine Fehler verursachen, während Poren an den Grenzflächen das Risswachstum begünstigen [42]. Auch hier ist keine spezielle Legierung genannt, für welche die Grenzwerte gelten, sodass die Angaben nur als grobe Richtwerte dienen können.

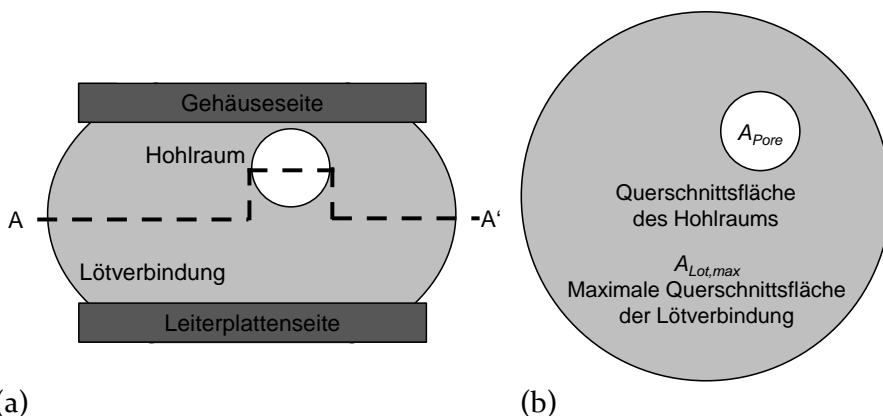


Bild 2-5: Ermittlung des Porenanteils in einer BGA-Lötverbindung (a) Seitenansicht, (b) Draufsicht auf den Querschnitt A-A' nach [43]

Sowohl für BGAs als auch für Land-Grid-Array-Bauformen liefert die DIN EN 61191-6 Bewertungskriterien für Poren in Lötverbindungen mit Ball-Anschlüssen. Die Norm klassifiziert genauso wie die IPC-7095-C die räumliche Lage der Poren und nutzt als Bewertungsgrundlage den Porenanteil sowie das Verhältnis der maximalen Durchmesser von Pore und Lötverbindung für zwei Legierungen. Für eine SnAgCu-Legierung gibt die Norm an, dass sich die Lebensdauer bei einem Porenanteil von weniger als 20 % marginal verringert, dass das Ziel jedoch ein Porenanteil unterhalb 5 % ist. Das zweite betrachtete Lot ist eine SnZnBi-Legierung, bei der bei einem Porenanteil von kleiner 30 % eine geringfügige Verringerung der Lebensdauer zu erwarten ist und für die als Ziel ein Porenanteil von unter 20 % genannt wird [43].

Neben den genannten Normen wurden international zusätzliche Studien experimentell oder mit FEM-Simulationen durchgeführt. Diese untersuchen meistens ebenfalls BGAs, deklarieren dabei einen anderen Porengrenzwert als die aufgeführten Normen und beziehen die Porenposition in ihre Untersuchungen mit ein. Eine Auswahl der wichtigsten internationalen Studien ist im Folgenden zusammengefasst.

Die Studien von R. Schwerz zeigen, dass die vertikale Position von Poren eine entscheidende Rolle spielt [18], [57]. Poren abseits der Grenzflächenregionen der Lötstelle zu Bauteil oder Leiterplatte haben keine Minderung der Lebensdauer bei BGAs zur Folge. Poren ab einer Porenfläche von 20 % führen an der Bauteil-Grenzfläche zu einer Reduzierung der Lebensdauer, während Poren an der Leiterplatten-Grenzfläche kaum einen Einfluss auf diese haben [18].

Ähnliche Ergebnisse bei großen Poren im Volumen erhält L. Ladani [58] bei BGAs. Hier wird als Grenzwert 15 % des Porenflächenanteils genannt, bis zu welchem die Lebensdauer ansteigt und danach abfällt. In einem späteren Artikel [19] untersucht die Autorin die Porenposition näher und resümiert, dass Poren, die vollständig im Lötball liegen und keinen Kontakt zu den Rändern der Lötverbindung haben, keinen negativen Einfluss auf die Lebensdauer haben, sondern diese sogar verlängern, wenn die Porengröße zunimmt. Poren, die aufgrund ihrer Größe nicht mehr komplett von Lot umgeben sind, sondern ihre Fläche durch die Kupferpads abgeschnitten wird, verkürzen dagegen die Lebensdauer.

Q. Yu [59] führt für BGA-Bauteile Untersuchungen durch, in denen er gezielt die Auswirkung der Porengröße, -position und -anzahl auf die Lebensdauer der Lötverbindung analysiert. Dabei zeigt sich, dass die Größe einer Pore, die sich an der Bauteil-Grenzfläche und somit im Rissausbreitungsweg befindet, die Lebensdauer reduziert. Der Autor vergleicht weiterhin einen Ball mit nur einer Pore an der Bauteil-Grenzfläche und einen Ball mit zwei Poren vertikal übereinander, d. h. eine an der Grenzfläche zum Bauteil und eine an der Grenzfläche zur Leiterplatte. Er stellt fest, dass sich die Lebensdauer bei einer Pore um 20 % verkürzt, während die Lebensdauer bei zwei Poren nur um 8 % sinkt. Eine weitere Untersuchung ermittelt den Einfluss von horizontal nebeneinander liegenden Poren an der Bauteil-Grenzfläche. Bei identischem Flächenanteil der Poren wird ein Ball mit einer Pore und einer mit zwei Poren gegenübergestellt. Resultat ist, dass zwei Poren einen erheblich größeren Effekt auf die Lebensdauer haben als eine größere Pore. Einen zulässigen Grenzwert für die Poren in der Verbindung gibt er jedoch nicht an.

M. Yunus [60] kommt für BGA- und Chip-Scale-Package-Bauteile (CSP) zum Ergebnis, dass eine Pore mit einer Fläche größer als 50 % der Lötfläche die Lebensdauer der Lötverbindung um 44 % reduziert. Auch die Porenposition und -anzahl werden hier als wichtige Einflussgrößen auf die Zuverlässigkeit genannt, dass beispielsweise viele kleine Poren an der Bauteil-Grenzfläche die Lebensdauer erheblich verringern, da sich Risse zwischen den Poren ausbilden.

In einer Studie vom National Physical Laboratory [61] werden neben Gehäuseformen wie Small Outline Integrated Circuits und Plastic Ball Grid Arrays auch Chip-Widerstände der Bauform R1206 und Ro603 untersucht. Dort liegen die erzeugten Porenanteile allerdings mit durchschnittlich 2 % bis 4 % und in Einzelfällen mit 13 % deutlich unter der damals festgelegten Marke von 25 % der IPC-A-610-D Richtlinie. Die Lötverbindungen zeigen nach 2 000 Temperaturwechselzyklen von -55 °C bis +125 °C keinerlei erkennbare Minderung der Zuverlässigkeit bei elektrischen Widerstandstests oder bei Schertests. Auch Th. Herzog [62] konnte in seinen Tests an Chip-Widerständen der Bauform Ro805 und Ro603 nachweisen, dass ein Porenanteil von 10 % bei einer SnBi58-Legierung und 29 % bei einer SnAg3.8Cu0.7-Legierung sich kaum auf die Scherkräfte auswirken.



Die aufgeführten Publikationen verdeutlichen, dass BGA-Bauteile hinsichtlich ihres Porenanteils und der Porenposition bereits umfassend untersucht wurden. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass die Porenposition eine entscheidende Rolle im Hinblick auf die Zuverlässigkeit spielt und dass die herausgearbeiteten Porengrenzwerte unter der von der IPC-A-610-F empfohlenen Obergrenze von 30 % liegen. Anschlussformen wie Beinchen, Anschlusskappen bei oberflächenmontierbaren Bauteilen (engl. Surface Mounted Device, SMD), Pins oder flächige Anschlüsse unterhalb des Bauteilgehäuses sind bisher unzureichend untersucht [16].

### 2.2 Grundlegende Aspekte zu Rissen

Poren können das Risswachstum begünstigen, da sich an ihnen hohe Spannungskonzentrationen unter Belastung bilden [63]. Aber auch am Lötstellenrand und im Gefüge entstehen Risse, die sich innerhalb der Lötverbindung weiter ausbreiten [64]. Infolge der Risse kann es zum Bruch der kompletten Lötverbindung kommen, wodurch im Extremfall die gesamte elektronischen Baugruppe ausfällt [65].

#### 2.2.1 Ursache von Rissen

Elektronische Baugruppen sind im Betrieb verschiedenen Belastungen, wie periodischen Temperaturänderungen, Vibrationen, Lastwechseln und Feuchtigkeit ausgesetzt, welche die Lebensdauer herabsetzen. Einzelne Fehlermöglichkeiten resultieren aus bestimmten Versagensmechanismen, bei denen Kombinationen aus Materialeigenschaften und der umgebenden Umwelt zusammenwirken. Neben elektrischen und chemischen Abnutzungserscheinungen ergeben sich die häufigsten Fehlermöglichkeiten aus thermo-mechanischen Spannungen [65]. Dabei werden mechanische Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien bei Temperaturänderungen thermisch erzeugt [66]. Bild 2-6 zeigt die Werte des Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  einer elektronischen Baugruppe mit einer Metallkernleiterplatte (engl. Insulated Metal Substrate, IMS) und schematisch dargestellt die Längenänderungen  $\Delta l$  aufgrund der Wärmeausdehnung des Keramik-Bauteils, des Lots als Verbindungsschicht und der Aluminiumleiterplatte für die Temperaturänderung  $\Delta T$  von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$  (233 K auf 398 K). Aluminium dehnt sich stärker als Keramik aus, wodurch im Lot mechanische Spannungen entstehen, die schließlich auch zu Rissen führen können [30].

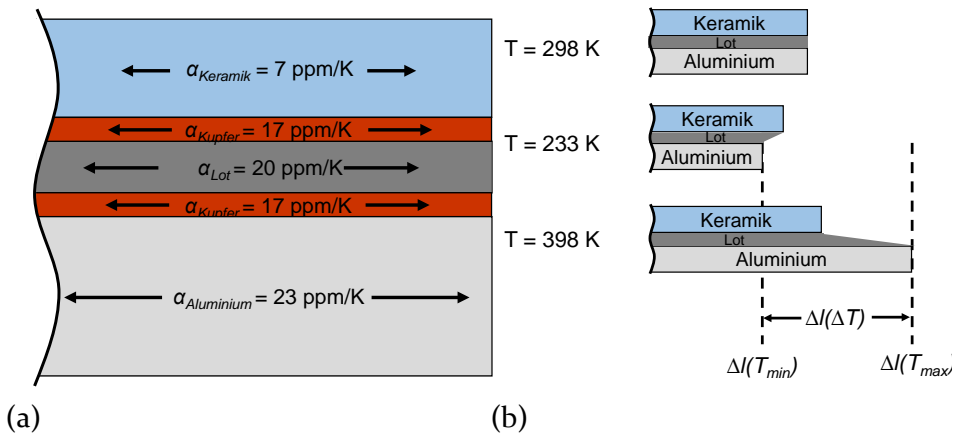


Bild 2-6: (a) Unterschiedliche Werte der Wärmeausdehnungskoeffizienten in einer elektronischen Baugruppe, (b) dadurch bedingte Längenänderungen aufgrund von Temperaturunterschieden nach [30]

Die Längenänderung  $\Delta l$  der einzelnen Materialien, die durch die Temperaturänderung  $\Delta T$  eintritt lässt sich durch die Formel

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2-3)$$

berechnen, wobei  $l_0$  die Ausgangslänge ist [67].

Wie in Bild 2-6b zu erkennen ist findet in der Lötverbindung eine Scherdehnung  $\gamma$  statt. Diese wird ermittelt indem die Deformation (hier die Längenänderung  $\Delta l$ ) durch die Dicke  $d$  der deformierten Schicht (hier der Lotspalt) dividiert wird:

$$\gamma = \frac{\Delta l}{d} \quad (2-4)$$

Die Scherdehnung gibt an, um wie viel jedes Volumenelement in der Schicht in die Länge gezogen wird [3].

### 2.2.2 Entstehung von Rissen

Die relevantesten Versagensmechanismen in Lötverbindungen sind die Ermüdung, das Kriechversagen und Veränderungen in der Mikrostruktur, die meistens durch thermo-mechanische Spannungen verursacht werden [65]. Diese werden im Folgenden näher betrachtet.

### 2.2.2.1 Ermüdung

Bei der thermischen Ermüdung der Lötstelle werden mechanische Spannungen durch die zyklische Änderung der Temperatur verursacht, wodurch Mikrorisse entstehen, die sich im Verlauf der wiederholenden Belastung weiter ausbreiten [65]. Das Ermüdungsversagen kann in drei Phasen eingeteilt werden (siehe Bild 2-7).

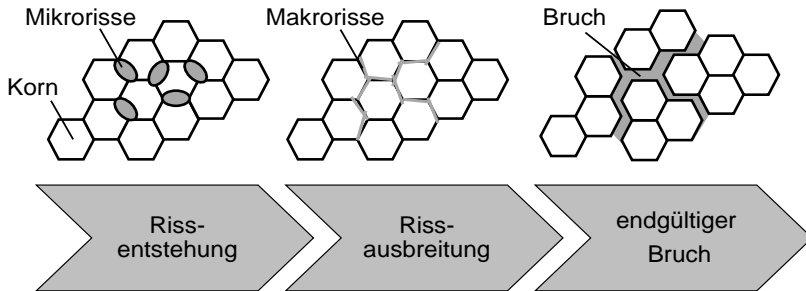


Bild 2-7: Entwicklung des Ermüdungsverhaltens in einer Lötstelle nach [65]

Während der Rissentstehung bilden sich in der Mikrostruktur der Lötverbindung zunächst kleine Risse an einer Stelle mit hoher Stresskonzentration, z. B. durch lokales Kornwachstum. Mit jedem Belastungszyklus schreiten die Risse zunehmend fort und führen letztlich, wenn eine kritische Größe erreicht ist, zum Bruch [65], [68].

Die verursachte Spannung hängt direkt mit der Steifigkeit der einzelnen Komponenten und des Substrats zusammen, wobei diese wiederum von der Geometrie und den Materialparametern bestimmt wird [69]. Die thermische Ermüdung lässt sich mit einer Hysteresekurve im Spannungs-Dehnungsdiagramm ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) darstellen (siehe Bild 2-8), die durch die Maximaltemperatur und deren Haltezeit beeinflusst wird. Die im Verlauf der Temperaturzyklen entstehenden plastischen Dehnungen  $\varepsilon_{pl}$  bewirken strukturelle Veränderungen im Werkstoff, aus denen Risse resultieren können. Während der Abkühlung entstehen Zugspannungen im Werkstoff, die Materialverformungen in Abhängigkeit von den jeweiligen Temperaturen verursachen. Bei einer Erwärmung von  $T_{min}$  auf  $T_{max}$  entstehen Druckspannungen, die den gleichen Einfluss haben [66]. Die Fläche innerhalb der Hysteresekurve ist ein Maß für die in der Lötstelle umgesetzte Deformationsenergie, die für jeden Zyklus zu einer gewissen Degradation der Lötstelle führt [3].

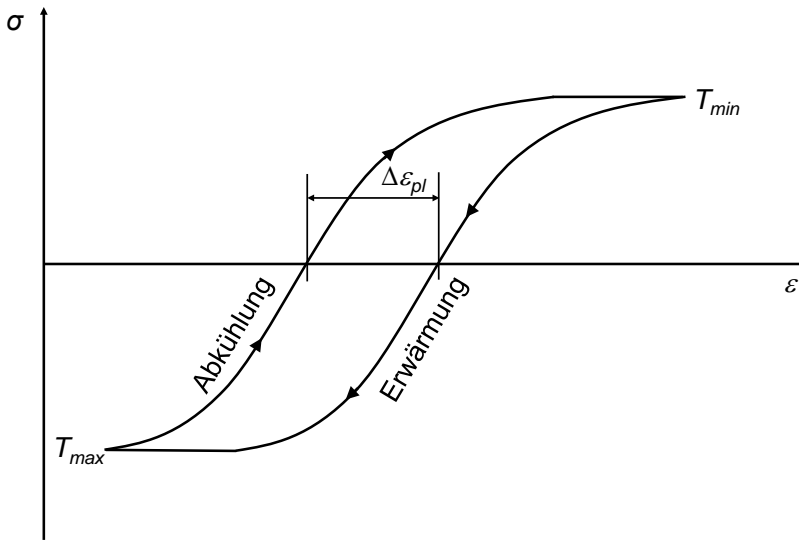


Bild 2-8: Spannungs-Dehnungsverlauf für einen thermisch beanspruchten Körper nach [66]

Die wiederholte zyklische Dehnung schädigt das Material. Das Coffin-Manson-Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Lebensdauer  $N_f$ , der plastischen Verformung pro Zyklus  $\Delta \epsilon_{pl}$ , einer Materialkonstanten  $C$  und einem vom Lotmaterial abhängigen Schädigungsexponenten  $n$  [70]:

$$\Delta \epsilon_{pl} \cdot N_f^n = C \quad (2-5)$$

Die Lebensdauer  $N_f$  ist hierbei die Zyklenanzahl bis zum Ausfall, wobei das Ausfallkriterium frei wählbar ist und eine Risslänge, ein elektrischer Ausfall oder eine von außen sichtbare Strukturveränderung sein kann [3]. Die Ermüdungslebensdauer wird hauptsächlich durch die Mikrostruktur des Materials (Korngröße, -struktur), die Verarbeitung, die Belastung, die Umgebungstemperatur und die Geometrie des Bauteils beeinflusst [65].

### 2.2.2.2 Kriechen

Neben der Ermüdung ist das Kriechen einer der Hauptausschlagsursachen von Lötverbindungen. Beim Kriechen treten zeitabhängige, plastische Verformungen eines Werkstoffs unter andauernder, permanenter Last auf, die als Dehnung in Abhängigkeit der Zeit gemessen werden können (siehe Bild 2-9) [65].

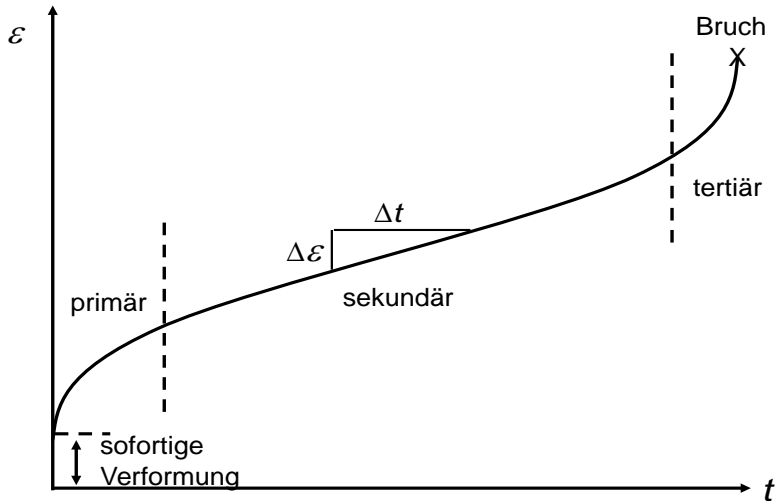


Bild 2-9: Kriechkurve nach [68]

Entscheidend für die plastische Verformung von Lötverbindungen ist die sekundäre Phase der Kriechkurve [65], [71]. Diese kann mit Hilfe der Garofalo-Gleichung beschrieben werden [72]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = C_1 (\sinh(C_2 \sigma))^{C_3} e^{-\frac{C_4}{T}} \quad (2-6)$$

Bei dieser sind  $d\varepsilon/dt$  die Kriechdehnungsrate bei stationärer Spannung,  $\sigma$  die Spannung,  $T$  die absolute Temperatur in Kelvin und  $C_1, C_2, C_3, C_4$  Materialkonstanten [73]. Die häufigsten Kriechverformungsmechanismen sind Versetzungskriechen, Diffusionskriechen und Korngrenzgleiten [74].

Anhand der homologen Temperatur können Kriechvorgänge bewertet werden. Die homologe Temperatur  $T_H$  ist der Quotient aus Anwendungs- und Schmelztemperatur  $T_S$  in Kelvin. Bei SAC-Loten ist das Kriechen die dominierende Ausfallursache, da die homologe Temperatur bei typischen Anwendungsbereichen relativ hoch ist. Ab einer Temperatur  $T > 0,4 T_S$  ist das Verhalten von Loten empfindlich gegenüber Kriechen. Dies entspricht bei einem SAC-Lot ( $T_S = 490 \text{ K}$ )  $T > 196 \text{ K}$ . Bei  $T > 0,6 T_m$  also  $T > 294 \text{ K}$  ist Kriechen der dominierende Effekte und führt zum Materialversagen [74].

### 2.2.2.3 Mikrostruktur

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ermüdung der Lötstelle und damit ihre Lebensdauer von der Entwicklung der Mikrostruktur abhängt. Rekristallisationsprozesse und Vergrößerungen finden während des Betriebs der elektronischen Baugruppe aufgrund von Temperaturänderungen statt [75]. Die Mikrostruktur in SAC-Legierungen besteht aus Zinnphasen, innerhalb derer  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ - und  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ -Phasen verteilt sind. Insbesondere große  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ -Partikel können die mechanischen Eigenschaften der Lotlegierung beeinflussen und reduzieren deren Duktilität. Aufgrund der Dekohäsion von großen, zweigartigen  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ -Partikeln wird die Homogenität der mechanischen Eigenschaften verschlechtert, wodurch Sprödbrüche verursacht, die Rissentstehung eingeleitet und die Kinetik des Ermüdungsrisswachstums beschleunigt werden [65]. Temperaturwechsel begünstigen die Rissbildung sowie -ausbreitung und beschleunigen die Vergrößerung, wodurch die Korngrenzen anwachsen und es zu interkristallinen Rissen kommt [75]. Intermetallische Phasen (engl. Intermetallic Compound, IMC) können ebenfalls die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen beeinflussen. Sie entstehen innerhalb der Lotmatrix und an der Lot-/Substrat-Grenzfläche und sind ein Maß für eine gute stoffschlüssige Verbindung. Allerdings sind sie sehr spröde, wodurch mechanischer Stress nicht ausreichend abgebaut werden kann [76]. Als intermetallische Phasen finden sich bei SAC-Löten, die auf einer Ni/Au-Oberfläche gelötet wurden,  $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ -,  $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_4$ - und  $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_2$ -Phasen [77], [78], [79].

Die Risse werden in dieser Arbeit hauptsächlich mittels der zerstörungsfreien Prüfmethode der Computertomographie analysiert (siehe Kapitel 4) und durch metallographische Schliffe und Rasterelektronenmikroskopie-Analysen ergänzt.

## 2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs

Wie im Abschnitt 2.1.1 dargestellt, haben zahlreiche Studien bereits die Einflussfaktoren auf die Porenentstehung untersucht und konnten aufzeigen, dass durch geeignete Materialkombinationen (Lotlegierung, Leiterplattenmetallisierung) und Prozessparameter beim Löten das Porenaufkommen minimiert werden kann. Allerdings ergeben die Untersuchungen konträre Empfehlungen für Ball- und Flächenlötungen [15], [16]. Da der Porenanteil durch Vakuum- oder Überdruckverfahren stark reduziert werden kann, sind diese Verfahren vielversprechend [51], [52]. In der Praxis werden diese jedoch noch nicht standardmäßig eingesetzt. Dadurch kommt für die produzierende Industrie immer wieder die Frage nach dem tatsächlichen

Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen auf und inwiefern der Porengrenzwert aus der IPC-A-610-F Richtlinie von 30 % angewendet werden sollte. Durch diese Unsicherheit wird von der Industrie häufig ein geringerer Porenanteil gefordert, dessen Realisierung mit hohem Aufwand verbunden ist. Vor allem bei Leistungsbauelementen zeigen Berechnungen einen Anstieg der Temperatur durch Poren, wodurch die Akzeptanz gegenüber Poren sinkt [15]. Wie in Abschnitt 2.1.3 aufgezeigt, wurden international Bestrebungen unternommen, auch die Porenposition und -größe mit in die Untersuchungen einzubinden. Der Großteil dieser Studien erfolgte für BGAs, wobei andere Anschlussformen kaum Gegenstand der Untersuchungen waren [16]. Oftmals werden bei diesen niedrigeren Porengrenzwerte als die aus der IPC-A-610-F stammenden 30 % deklariert. Die aufgezeigten Ergebnisse wurden überwiegend aus thermo-mechanischen Tests oder FEM-Simulationen gewonnen. Rein mechanische Belastungen, wie der Biegetest, werden selten betrachtet. Die ermittelten Grenzwerte basieren auf Radiographien, wodurch nur eine zweidimensionale Charakterisierung der Poren möglich ist. Folglich beziehen sich diese Grenzwerte ausschließlich auf die Porenfläche. Da die dritte Dimension nicht untersucht wurde, fehlt jede Information über die Tiefe der Poren. Somit ist es nicht möglich, die genaue Lage der Poren zu erfassen. Ein verifizierter Porengrenzwert, bis zu dem die Zuverlässigkeit der Lötstelle garantiert ist, würde dazu beitragen, den Ausschuss zu reduzieren und folglich die Produktions- und Prozesskosten zu senken.





### 3 Entwicklung anwendungsbezogener Testbaugruppen

Um den Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen zu untersuchen, wurden anwendungsorientierte Testbaugruppen (TBG) entwickelt. Die entwickelten Baugruppen schließen Literaturlücken und berücksichtigen aktuelle Trends und Fragestellungen aus der Elektronikproduktion bezüglich des Bauteils und der Lotlegierung sowie daraus resultierenden Anforderungen an das Leiterplattenmaterial. Zusätzlich sind die Baugruppen für computertomographische Untersuchungen optimiert, sodass sich die Poren in den Lötverbindungen gut detektieren lassen, ohne dass starke Absorber das Messergebnis negativ beeinflussen.

Das folgende Kapitel begründet die Auswahl der einzelnen Materialien und beschreibt den Aufbau zweier Testbaugruppen. Während Testbaugruppe A für umfassende Voruntersuchungen eingesetzt wurde, handelt es sich bei Testbaugruppe B um den optimierten Nachfolger von Testbaugruppe A.

Durch Variationen im Lötprofil und mit Hilfe unterschiedlicher Lötverfahren wurden zunächst verschiedene Porenanteile hergestellt, deren Beurteilung anschließend anhand von Zuverlässigkeitstests und FEM-Simulationen erfolgte (siehe Kapitel 5 und 6). Die Ergebnisse wurden zum Großteil im Rahmen des Forschungsprojekts VoReSo (engl. Influence of Voids on the Reliability of Solder joints, Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen)<sup>1</sup> erzeugt, welches von der Bayerischen Forschungstiftung (AZ-1126-14) gefördert wird [80].

#### 3.1 Auswahl der Materialien und Komponenten

##### 3.1.1 Das Bauteil

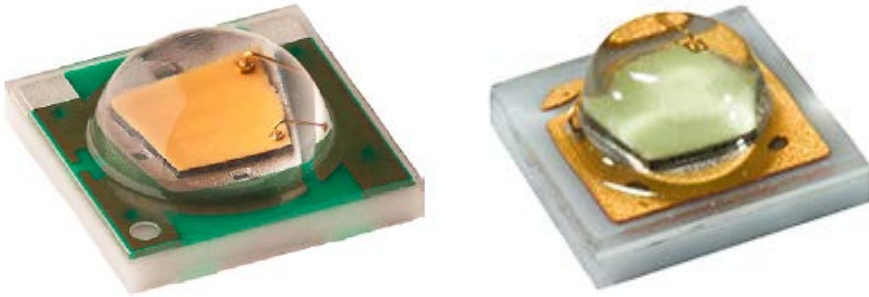
Wie in Abschnitt 2.1.3 erläutert sind Ball-Lötungen von BGA-Bauteilen bereits hinreichend untersucht. Allerdings finden sich Literaturlücken für Bauteile mit Beinchen, Anschlusskappen bei SMD-Bauteilen, Pins oder

---

<sup>1</sup> Das Projektkonsortium setzt sich aus der Hochschule Aschaffenburg, dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, dem Fraunhofer-Anwendungszentrum Ressourceneffizienz (AWZ) und den Firmen Heraeus, Kraus Hardware, Osram OS, Seho und Wenzel zusammen.

Flächenlötungen. Aus diesem Grund wurden für die folgenden Untersuchungen High-Power-LEDs mit Flächenlötungen ausgewählt. High-Power-LEDs können elektrische Leistungen über drei Watt mit typischen Strömen zwischen 350 mA und 1 000 mA erbringen [27]. Neueste Modelle haben einen Lichtstrom von bis zu 303 lm/W [81], während der Lichtstrom von herkömmlichen Glühlampen lediglich etwa 10 lm/W beträgt [82]. Die Nachfrage nach Anwendungen mit High-Power-LEDs wird in den nächsten Jahren wachsen, da diese mit ihren energiesparenden, ressourceneffizienten Eigenschaften und ihrer Langlebigkeit zukunftsweisend sind [22]. Für die Ausnutzung ihres gesamten Wertschöpfungspotenzials ist eine qualitativ hochwertige Fügeverbindung zwischen der gehäuteten LED und dem Leiterplattensubstrat notwendig [2]. Das Einsatzgebiet von High-Power-LEDs erstreckt sich von TV-Hintergrundbeleuchtungen, KFZ-Innen- und -Außenbeleuchtungen, bis hin zur Signal- und allgemeinen Beleuchtung [23]. In der Anwendung sind LEDs verschiedenen Einflüssen wie Temperatur, mechanischem Einwirken, Feuchtigkeit und Chemikalien ausgesetzt. Eine zu hohe Temperatur hat bei LEDs zur Folge, dass sich wichtige Parameter und Eigenschaften der LED verändern und dadurch ihre Lebensdauer drastisch verkürzt wird [25]. Hierzu zählen unter anderem eine Verschiebung des Farborts, Delaminationen und eine Reduzierung der optischen Leistung [27]. Die Wahl eines geeigneten Leiterplattensubstrates kann hierbei bereits gegensteuern (siehe Abschnitt 3.1.2).

Die LEDs für beide Testbaugruppen wurden nach Kriterien wie Trend, Anschlussfläche, Geometrie, Leistung sowie Größe ausgewählt und sind kostengünstige Hochleistungs-Keramik-Bauteile. Wie alle SMD-LEDs sind auch diese für die Verarbeitung in einem Standard-SMT-Prozess qualifiziert. Die Lötkontakte teilen sich in zwei äußere elektrische Pads und in ein elektrisch neutrales thermisches Pad auf, das zur besseren Wärmeverteilung über die Leiterplatte dient. Bei der LED von Testbaugruppe A handelt es sich um die XLamp® XP-E LED von Cree (siehe Bild 3-1a), die LED von Testbaugruppe B ist die OSOLON MX ECE LUW CN7N von Osram OS (siehe Bild 3-1b).



(a)

(b)

Bild 3-1: (a) Cree XLamp® XP-E LED [83] von Testbaugruppe A, (b) Osram OS OSLOX MX ECE LUW CN7N [84] von Testbaugruppe B

Die technischen Einzelheiten der LEDs sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Tabelle 3-1: LEDs der Testbaugruppe A und B [83], [84]

LED	Testbaugruppe A	Testbaugruppe B
Hersteller	Cree	Osram OS
Bezeichnung	XLamp® XP-E	OSLOX MX ECE LUW CN7N
Abmessungen	3,45 mm × 3,45 mm	3,10 mm × 3,10 mm
Anschlussflächen	Elektrische Pads: 3,30 mm × 0,50 mm Thermisches Pad: 3,30 mm × 1,30 mm	Elektrische Pads: 2,70 mm × 0,50 mm Thermisches Pad: 2,70 mm × 1,00 mm
Maximale Sperrschicht- temperatur $T_j$	150 °C	150 °C

#### 3.1.2 Die Leiterplatte

Mit Hilfe von FEM-Simulationen und unter Berücksichtigung einer Kosten-Nutzen-Analyse erfolgte die Auswahl des Leiterplattensubstrats. Da sich die High-Power-LEDs im Betrieb stark erwärmen und das Leiterplattenmaterial FR4 eine schlechte Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  besitzt, wurden IMS-Substrate eingesetzt. Diese leiten die Wärme besser ab, da sie über einen Metallkern

verfügen, der durch eine wärmeleitende Isolationsschicht (Dielektrikum) von den Leiterbahnen getrennt ist. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und eine dünne Dielektrikumsschicht liefern die geringste Temperaturerhöhung im Betrieb [85]. Allerdings sind diese beiden Faktoren auch die Kostentreiber bei IMS-Substraten [86].

In Tabelle 3-2 sind die Daten der IMS-Substrate für beide Testbaugruppen dargestellt. Beide IMS-Substrate haben einen Aluminiumkern von 1,6 mm Dicke, während sich die Wärmeleitfähigkeit, die Dicke der dielektrischen Schicht und die Kupferschichtdicke unterscheiden.

Tabelle 3-2: IMS-Substrate der Testbaugruppen A und B [88]

IMS-Substrat	Testbaugruppe A	Testbaugruppe B
Abmessungen Nutzen <sup>2</sup>	130,8 mm × 92,7 mm	150,0 mm × 99,0 mm
Abmessungen Leiterplatten	35,0 mm × 20,0 mm	38,5 mm × 10,0 mm
Anzahl Leiterplatten	10	22
Kupferschichtdicke	105 µm	35 µm
Wärmeleitfähigkeit dielektrische Schicht	1,6 W/mK	1,3 W/mK
Dielektrikums-schicht-dicke	50 µm	75 µm
Aluminiumschichtdicke	1,6 mm	1,6 mm
Oberflächen-metallisierung	chem. Ni/Au	chem. Ni/Au
Lieferant	IBR Leiterplatten	Andus Electronic Bergquist T-CLAD MP

---

<sup>2</sup> Ein Nutzen ist eine Grundplatte auf der mehrere Leiterplatten aus produktionstechnischen Gründen zusammengefasst sind. Die einzelnen Leiterplatten sind über Reststege oder komplett miteinander verbunden und werden am Ende des Produktionsprozesses aus dem Nutzen herausgetrennt [89].

Bei Testbaugruppe B wurde den Empfehlungen von Osram OS gefolgt und das IMS-Material T-CLAD MP-o6503 von Bergquist bezogen, während bei Testbaugruppe A ein Kosten-Nutzen-Vergleich handelsüblicher IMS-Substrate unter der Prämisse einer guten Wärmeabführung erfolgte. Bei beiden Testbaugruppen wurde die Oberflächenmetallisierung chemisch Nickel/Gold (NiAu) gewählt, da diese eine lange Lagerfähigkeit und gute Temperaturbeständigkeit aufweist [87].

Der Nutzen beider Testbaugruppen lassen sich in einzelne Leiterplatten für die CT-Messungen trennen, damit sie so nah wie möglich an der Röntgenröhre positioniert werden können und dadurch eine hohe Auflösung erreicht werden kann. In Bild 3-2 ist der Nutzen von Testbaugruppe B dargestellt. Der Nutzen, der aus 22 einzelnen Leiterplatten besteht, wurde zweckmäßig für Zuverlässigkeitstests konstruiert. So erlaubt die geringe Breite einer Leiterplatte hochauflösende CT-Messungen und der optionale Widerstand elektrische Messungen.

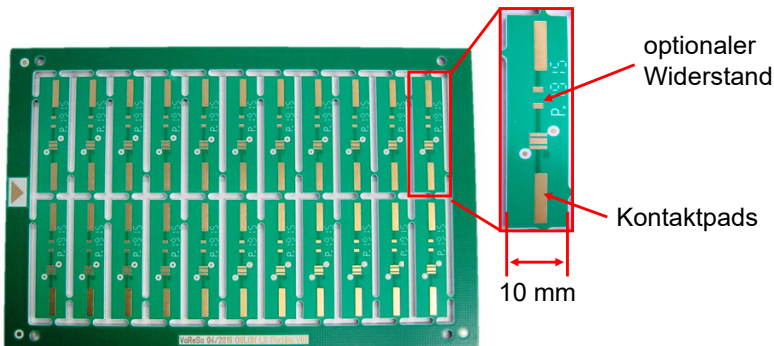


Bild 3-2: Nutzen von Testbaugruppe B

Eine Leiterplatte der Testbaugruppe A ist mit 20 mm doppelt so breit wie eine bei Testbaugruppe B. Dies ist darin begründet, dass zusätzlich noch vier Bohrungen zur Kontaktierung auf einem Kühlkörper vorgesehen waren (siehe Abbildung 14-1 im Anhang), die nach der Optimierung der Testbaugruppe als abkömmlich eingestuft und aus dem Layout entfernt wurden.

### 3.1.3 Die Lotlegierung

Bei beiden Testbaugruppen wurde die SAC105-Legierung Typ 3<sup>3</sup> verwendet, die sich durch deutlich geringere Kosten aufgrund des kleineren Silberanteils von einem Prozent auszeichnet. Im Gegensatz dazu hat die von der IPC empfohlene und mittlerweile weit verbreitete Legierung SAC305 einen Silberanteil von 3 %. Der Silberpreis unterliegt am Markt Schwankungen, die sich auf den Preis der Legierung auswirken. Diese Entwicklung wird sich durch den zunehmenden Verbrauch an SAC-Loten eher noch verschärfen. Durch die Verringerung des Silbergehalts in dem SAC105-Lot kann die Kostenentwicklung zumindest begrenzt werden. Insbesondere in Asien sind SAC-Lote mit einem reduzierten Silberanteil bereits bei der Massenproduktion in der mobilen Elektronik im Einsatz. Die Lötbarkeit und die Benetzungseigenschaften der silberreduzierten Lotlegierung SAC105 sind weitestgehend vergleichbar mit denjenigen des Standardlotes SAC305. Die etwas mattere Oberflächenstruktur muss allerdings bei der optischen Inspektion berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur gängigen SAC305-Lotpaste besitzt die SAC105-Legierung keinen Schmelzpunkt, sondern einen Schmelzbereich von 217 °C bis 227 °C. An diesen größeren Schmelzbereich muss die Löttemperatur angepasst werden. Bei ausreichend hoher Prozess-temperatur ist eine gute Lötbarkeit gewährleistet [35].

## 3.2 Erzeugung porenarmer und porenreicher Lötverbindungen

Zielsetzung bei dem Aufbau der Testbaugruppen ist es, sowohl porenreiche als auch porenarme Lötverbindungen herzustellen, um später unterschiedliche Porenanteile mit den Ergebnissen der Zuverlässigkeitstests und der FEM-Simulationen zu korrelieren. Um diese unterschiedlichen Porenanteile zu erhalten, wurden Prozessparameter mehrmals gezielt verändert und jeweils im Anschluss daran die entstandenen Lötverbindungen mit der Radiographie charakterisiert. Anhaltspunkte dafür, wie das Porenaufkommen in den Lötverbindungen zu beeinflussen ist, liefert hier die Literatur [14], [16]. Die Lötprofile zur Herstellung geeigneter Lötverbindungen, die im Folgenden vorgestellt werden, entsprechen keinen Industriestandards, sondern dienen nur dem Zweck der Untersuchung von Poren.

---

<sup>3</sup> Die Partikelgröße beträgt 25 - 45 µm [90].

### 3.2.1 Aufbau von Testbaugruppe A

Bei Testbaugruppe A erfolgte die Herstellung der Lötverbindungen an dem Vierzonen-Reflow-Ofen 4037 von Seho (Profil 1, 2, 3) und an der Überdruckanlage MaxiReflow 3.0 HP von Seho (Profil 4). Bei Profil 1 und Profil 3 wurden die bedruckten Leiterplatten zusätzlich eine Stunde bei 150 °C in einem Wärmeschrank vorgetrocknet. Der Lotpastendruck erfolgte mit einer 150-µm-Schablone<sup>4</sup> mit anschließender manueller Bestückung. Die Nassschichtdicke wurde mit dem Laser-Lichtschnitt-Verfahren gemessen und entsprach annähernd der Schablonendicke. In Bild 3-3 sind die einzelnen Lötprofile aufgezeigt.

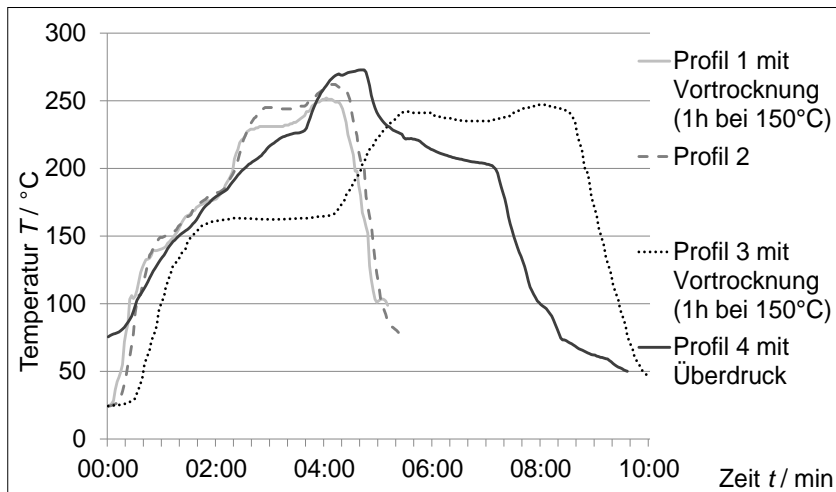


Bild 3-3: Lötprofile von Testbaugruppe A

Es ist zu erkennen, dass die Peaktemperaturen, die Aufheizgradienten, die Haltezeiten in der Vorheizzone und die Temperatur über Liquidus variiert wurden. Die Erzeugung der porenarmen Lötverbindungen (Profil 4) wurde an der Überdrucklötanlage durchgeführt. Es erfolgen zwei Überdruckphasen, wobei die Zeitpunkte der Druckbeaufschlagung und -entlastung direkt mit der Baugruppentemperatur in Verbindung steht. Die erste Druckbeaufschlagung erfolgt nach Aufschmelzen der Lotpaste. Durch den ruckartigen Druckabbau werden die Poren aus dem flüssigen Lot gedrängt. Die zweite Druckphase beginnt während das Lot immer noch flüssig ist. Die eingestellte Temperatur liegt hier bereits unter dem Solidus, sodass das Lot

<sup>4</sup> Die umlaufende Padreduktion beträgt gemäß Datenblatt 10 % (siehe Abbildung 14-2 im Anhang) [83].

unter Druck erstarren kann (siehe Abbildung 14-3 im Anhang) [20]. Die Druckdifferenz bei Testbaugruppe A belief sich auf 4 bar mit einer ersten Haltezeit von 15 Sekunden und einer zweiten Haltezeit von 60 Sekunden.

Die Klassifizierung der Lötverbindungen erfolgte mittels Röntgen nach Gleichung (2-1). In Tabelle 3-3 sind die aus den unterschiedlichen Lötprofilen resultierenden Porenanteile dargestellt. Bei Profil 1 und 3 wurde die bedruckte Leiterplatte eine Stunde bei 150 °C vorgetrocknet, wodurch die höchsten Porenanteile entstanden. Eine Erhöhung des Porenanteils durch Vortrocknung konnte auch in [91] bei einem bleihaltigen Lot beobachtet werden. In [52] wird der gegenteilige Effekt für bleifreie Lote beobachtet. Hier führte eine Vortrocknung zu einer Abnahme des Porenaufkommens, da die Feuchtigkeit der Materialien und der Anteil leichtflüchtiger Bestandteile der Lotpaste während der Vortrocknung reduziert wurden. Beiden Studien ist gemeinsam, dass der Effekt durch das Flussmittelsystem begründet wird. Profil 2 stimmt mit dem Lötprofil aus dem Datenblatt der Cree XLamp® XP-E überein, dementsprechend konnte hier auch der geringste Porenanteil an dem Vierzonen-Reflow-Ofen erzielt werden. Die Testbaugruppen aus der Überdrucklötanlage (Profil 4) liefern den geringsten Porenanteil.

Tabelle 3-3: Porenanteile aus den unterschiedlichen Lötprofilen von Testbaugruppe A

Lötprofil	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Mittelwert $PA_{Fläche}$	17,2 %	6,8 %	19,8 %	4,3 %
Standardabweichung	3,6 %	3,1 %	3,9 %	1,4 %

Das Histogramm in Bild 3-4 zeigt die Porenanteile aus den vier Lötprofilen. Daraus ergeben sich drei Klassen: Ein geringer Porenanteil mit  $PA_{Fläche} \leq 5 \%$ , ein mittlerer mit  $5 \% < PA_{Fläche} \leq 15 \%$  und ein hoher mit  $PA_{Fläche} > 15 \%$ .

Tabelle 3-4 zeigt die Zuordnung der Lötprofile zu den einzelnen Porenklassen. Die Einteilung in Porenklassen erfolgte strikt nach dem Porenanteil und nicht in Abhängigkeit vom Lötprofil. Dies bedeutet, dass zu den einzelnen Porenklassen unterschiedliche Lötprofile beitragen.



### 3.2 Erzeugung porenarmer und porenreicher Lötverbindungen

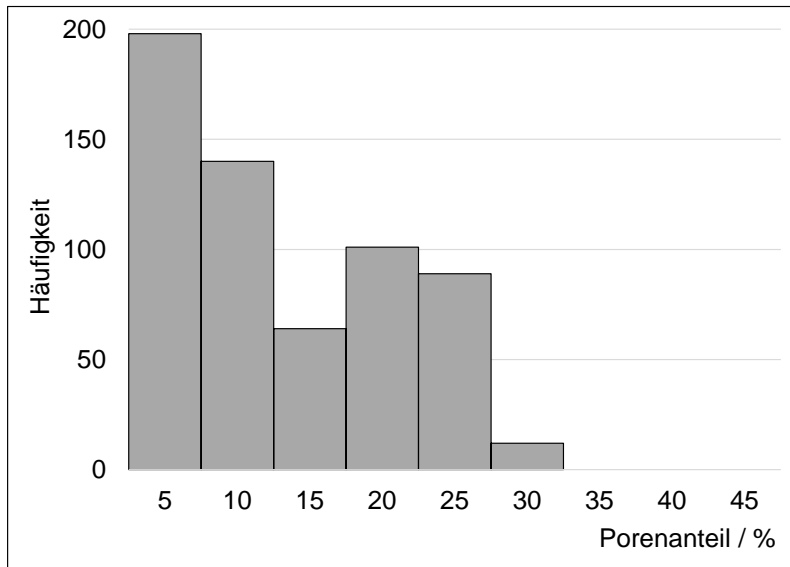


Bild 3-4: Histogramm der Porenanteile von Testbaugruppe A

Tabelle 3-4: Klasseneinteilung nach Lötprofil

Anzahl der Testbaugruppen			
<div> <div>Klasse</div> <div>Lötprofil</div> </div>	$PA_{Fläche} \leq 5 \%$	$5 \% < PA_{Fläche} \leq 15 \%$	$PA_{Fläche} > 15 \%$
Profil 1	0	30	70
Profil 2	49	97	4
Profil 3	0	21	128
Profil 4	149	56	0
Summe der TBG	198	204	202
Mittelwert $PA_{Fläche}$	3,8 %	8,6 %	20,2 %
Standard-abwei- chung	0,8 %	3,3 %	2,9 %

### 3.2.2 Aufbau von Testbaugruppe B

Für den Aufbau der Testbaugruppe B erfolgte sowohl die Herstellung der porenarmen als auch die der porenreichen Lötverbindungen an der Überdrucklötanlage, um Umgebungs- und Anlageneinflüsse weitestgehend auszuschließen. Die Lotpaste wurde mit dem Schablonendrucker DEK Horizon 03iX aufgetragen und stichprobenartig mit der Lotpasteninspektion von Koh Young (engl. Solder Paste Inspection, SPI) überprüft. Die aufgetragene Lotpastendicke entspricht nahezu der Schablonendicke von  $120\text{ }\mu\text{m}$  (siehe Abbildung 14-4 im Anhang). Schablonendicke und --design richten sich nach den Vorgaben des Bauteilherstellers [92]. Aus diesem Grund wurde neben einer umlaufenden Padreduktion von 10 % das thermische Pad in zwei gleichgroßen Lotpastendepots unterteilt (siehe Abbildung 14-2 im Anhang) [84]. Anschließend wurden die LEDs mittels des SIPLACE-SX2-Bestückers auf dem Lot platziert. Profil 1 dient dabei der Erzeugung der porenreichen und Profil 2 der Herstellung der porenarmen Lötverbindungen mit Überdruck. Bei Profil 1 wurde kein Überdruck angewendet, während bei Profil 2 die Druckdifferenz 4 bar, die erste Haltezeit 15 Sekunden und die zweite 45 Sekunden beträgt. Wie Bild 3-5 zeigt, hat Profil 1 im Vergleich zu Profil 2 eine geringere Peaktemperatur und eine verlangsamte Bandgeschwindigkeit.

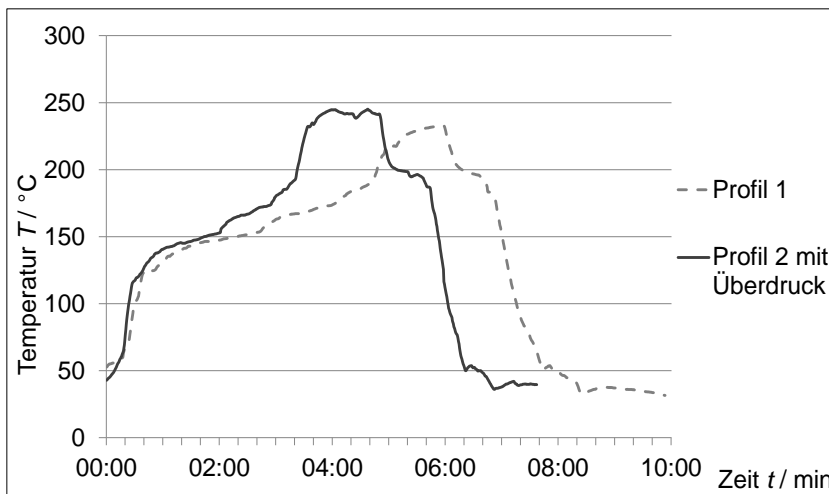


Bild 3-5: Lötprofile von Testbaugruppe B

Tabelle 3-5 zeigt die Porenanteile von Profil 1 und Profil 2. Wie zu erwarten, resultieren aus Profil 1 mit Überdruck kleine Porenanteile, während Profil 2 zu einem großen Porenaufkommen führt.

Tabelle 3-5: Porenanteile aus den unterschiedlichen Lötprofilen von Testbaugruppe B

Lötprofil	Profil 1	Profil 2
Mittelwert $PA_{Fläche}$	3,6 %	25,3 %
Standardabweichung	1,5 %	5,3 %
Anzahl der TBG	682	1 254

Das Histogramm in Bild 3-6 zeigt, dass der überwiegende Teil der Lötverbindungen der Testbaugruppe B einen Porenanteil von  $PA_{Fläche} \leq 5\%$  oder  $PA_{Fläche} \geq 25\%$  besitzt.

Aus den Ergebnissen der Zuverlässigkeitstests von Testbaugruppe A lässt sich folgern, dass zum einen ein Porenanteil von  $5\% < PA_{Fläche} \leq 15\%$  wenig Auswirkung auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindung hat und zum anderen eine Untersuchung höherer Porenanteile sinnvoll ist (siehe Kapitel 5).

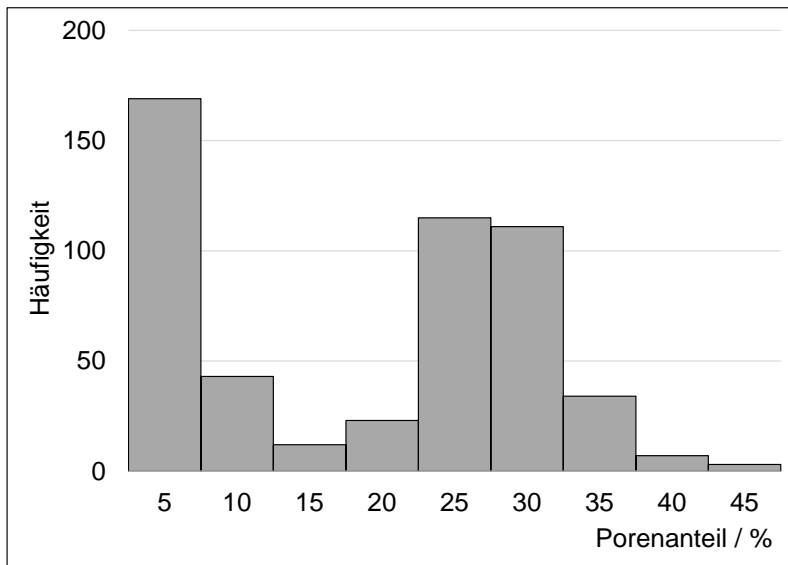


Bild 3-6: Histogramm der Porenanteile von Testbaugruppe B



## 4 Einsatz der Computertomographie zur quantitativen Erfassung der Poren

Steigende Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit von Werkstoffen und Bauteilen sowie deren fortschreitende Miniaturisierung erfordern neue Prüfverfahren. Bisher kamen in der Bauteilprüfung standardmäßig die Röntgeninspektion oder die Metallographie zum Einsatz, um Fehler wie Hohlräume, Risse oder Fehlkontakte innerhalb des Prüfobjekts zu detektieren. In der Elektronikfertigung wird die automatische Röntgeninspektion als zerstörungsfreie Testmethode für die inline-Prozessüberwachung und 100 %-Qualitätskontrolle serienmäßig eingesetzt [93]. In den letzten Jahren findet immer häufiger auch die Computertomographie Verwendung. Mit dieser Technik kann im Gegensatz zur konventionellen Röntgenprüfung ein dreidimensionales Abbild der elektronischen Baugruppe erstellt und verdeckte Strukturen im Inneren des Prüfobjekts analysiert werden [94]. Somit ermöglicht sie es, oben beschriebene Fehlerbilder, wie Poren und Risse, in den Lötverbindungen aufzudecken [64], [94], [95]. Speziell bei der Auswertung der Poren kann aufgrund der dreidimensionalen Ergebnisse die genaue Position und das Volumen der Poren bestimmt werden [96], [97]. Des Weiteren können Durchkontaktierungen in Leiterplatten [98] und Einpressverbindungen [99], Bonddrähte [95] oder das Innere von Bauteilen auf Defekte hin überprüft werden [96], [100], [101].

Die Untersuchung von Poren spielt allerdings nicht nur in der Elektronikfertigung eine wichtige Rolle, sondern auch im Druckguss wie beispielsweise bei Aluminium-Druckgussteilen [102], [103], bei der additiven Fertigung [104] oder in der Textilindustrie [105]. Mit Hilfe der Methode der Probability of Detection wird die Auffindwahrscheinlichkeit von Fehlern in Abhängigkeit von ihrer Strukturgröße statistisch ermittelt. Bei Computertomographen können damit Grenzvolumina bestimmt werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit gefunden werden [106], [107]. Je nach Anwendung können neben der Computertomographie andere zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie beispielsweise die Ultraschallmikroskopie, eingesetzt werden. Hier müssen die Vor- und die Nachteile im Anwendungsfall detailliert gegeneinander abgewogen werden [108].

## 4.1 Computertomographie als zerstörungsfreie Prüfmethode

An dieser Stelle wird lediglich auf das Funktionsprinzip der industriellen Computertomographie eingegangen. Für weitere physikalische Grundlagen und für die Hintergründe zum Bildentstehungsprozess wird auf die einschlägige Literatur [109], [110], [111] verwiesen.

Das Prinzip eines industriellen Röntgen-Computertomographen ist in Bild 4-1 dargestellt. Die Röntgenröhre emittiert die Röntgenstrahlung in Form eines Kegelstrahls, der das Bauteil durchdringt. Der Strahl wird nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz

$$I_x = I_o e^{-\mu x} \quad (4-1)$$

geschwächt und trifft auf den Detektor. Dabei ist  $\mu$  der Schwächungskoeffizient,  $I_o$  die Intensität vor dem Eintritt in die Materie und  $I_x$  die Intensität beim Austritt aus dem Objekt der Dicke  $x$ . Die Schwächung der Röntgenstrahlen hängt im Wesentlichen von der Wellenlänge beziehungsweise der Energie der Strahlung, der Ordnungszahl, der Dichte und der Dicke des zu durchstrahlenden Materials ab [109]. Für hochauflösende CT-Untersuchungen ist ein kleiner Brennfleck nötig, der durch eine niedrige Röntgenspannung realisiert werden kann. Hierdurch wird die Durchstrahlbarkeit stark absorbierender Materialien erschwert. Neben dem Brennfleck beeinflussen die Pixel-Matrix des Detektors und die geometrische Vergrößerung<sup>5</sup> des Testobjekts auf dem Detektor die Voxelauflösung [113]. Aus diesem Grund muss für eine große Voxelauflösung das Testobjekt so nah wie möglich vor der Röntgenquelle positioniert werden, wodurch eine starke Vergrößerung auf dem Detektor erreicht wird. Folglich kann für kleinere Objekte eine höhere Voxelauflösung als für große Prüfobjekte erzielt werden [114]. Während der Messung dreht sich das Prüfobjekt um 360° und der Detektor nimmt eine Vielzahl von zweidimensionalen Projektionsbildern aus unterschiedlichen Winkeln auf. Aus den Projektionsbildern wird mittels leistungstarker Rechner ein dreidimensionaler Datensatz von Volumenelementen (Voxeln) rekonstruiert [115].

---

<sup>5</sup> Die Vergrößerung ergibt sich aus dem Abstand der Quelle zum Messobjekt (FOA: Fokus-Objekt-Abstand) und dem Abstand des Objektes zum Detektor (ODA: Objekt-Detektor-Abstand) mit  $m = 1 + \text{ODA}/\text{FOA}$  [112].

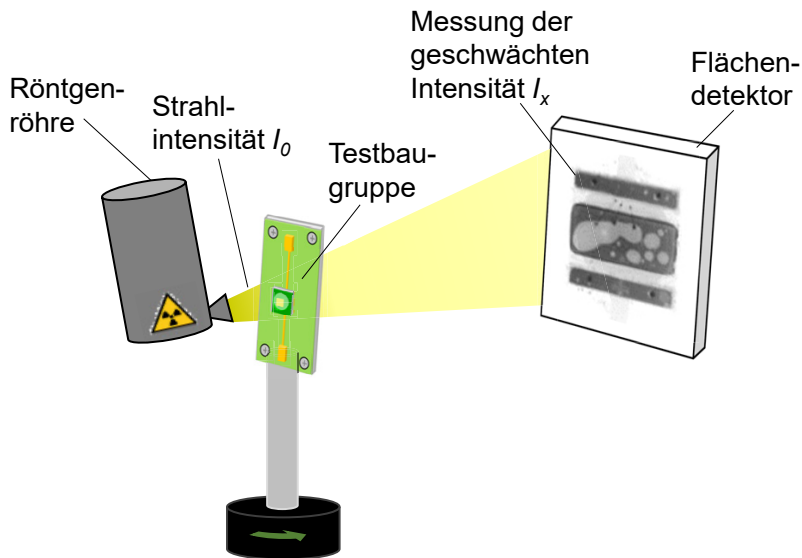


Bild 4-1: Prinzip eines Röntgen-Computertomographen nach [116]

Nach der Rekonstruktion des Datensatzes stehen neben dem dreidimensionalen Volumenmodell einzelne Schnittebenen durch das Testobjekt zur Verfügung, welche die innere Struktur des Objekts abbilden und die nun auf Defekte wie Poren und Risse untersucht werden können [94]. Die verschiedenen Materialien, Materialstärken und -dichten des Objekts werden dabei mit unterschiedlichen Grauwerten dargestellt [45], [117].

Abbildung 4-2a zeigt das Volumenmodell der High-Power-LED von Cree (3,45 mm × 3,45 mm) mit durchgeführter Porositätsanalyse mittels der Auswertesoftware VG Studio MAX 2.1 von Volume Graphics. Die gering absorbierenden Bestandteile der LED, wie der Keramikkörper, der LED-Chip oder die Linse, sind ausgeblendet und nur die stark absorbierenden Komponenten, wie die Kupferlagen und die Lötverbindung, sind zu sehen. Die beiden äußeren Lötstellen dienen der elektrischen Kontaktierung und stellen die Anode und Kathode dar, während das thermische Pad in der Mitte elektrisch neutral ist und der Wärmeableitung dient. Anode und Kathode sind mittels Durchkontaktierungen mit der oberen Kupferlage verbunden. Die Anode ist direkt durch die obere Kupferlage mit dem LED-Chip verbunden, während der elektrische Kontakt der Kathode mittels Bonddrähten erfolgt.

Der dreidimensionale Datensatz ermöglicht es im Gegensatz zu den 2D-Röntgenverfahren den Porenvolumenanteil  $PA_{Volumen}$  zu berechnen:

$$PA_{Volumen} = \frac{V_{Pore}}{V_{Lot}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{Pore\ i}}{V_{Lot}} \quad (4-2)$$

wobei  $V_{Pore}$  das Porenvolumen und  $V_{Lot}$  das Lotvolumen ist [118].

### 4.2 Möglichkeiten und Grenzen der Computertomographie

Die Computertomographie bietet der Elektronikproduktion Möglichkeiten, die mit 2D-Röntgen nicht zu realisieren sind. Sie stößt jedoch auch bei manchen Aspekten an ihre Grenzen. Im Folgenden werden die Möglichkeiten und die Grenzen für den hier betrachteten elektronischen Anwendungsfall gegenübergestellt.

Die Computertomographie liefert ein getreues dreidimensionales Abbild des Testobjekts (CT-Volumen), wodurch komplexe Bauteile und Volumenfehler wie Poren einfacher untersucht werden können. Da die Betrachtungsebene innerhalb des CT-Volumens frei gewählt werden kann, sind Inspektionen aus allen Blickwinkeln möglich. Die Poren in der Lötverbindung werden nach Gleichung (4-2) ausgewertet und größenabhängig in Falschfarbendarstellung abgebildet. Abbildung 4-2b zeigt die Ebene der horizontalen (blau) und vertikalen (rot) CT-Schnittebenen durch die Lötverbindung, die in Abbildung 4-2c und Abbildung 4-2d dargestellt sind. Neben dem Volumen jeder einzelnen Pore ist es möglich, auch ihre genaue Position zu ermitteln. So können anhand vertikaler CT-Schnitte, wie in Abbildung 4-2d, bauteil- oder substratseitige Poren von durchgehenden Poren, welche die gesamte Lotspaltdicke ausfüllen, unterschieden werden.

Neben der Analyse von Poren steht die Detektion von Rissen in den Lötverbindungen mittels CT im Fokus dieser Arbeit. In Bild 4-3a befindet sich in der vertikalen CT-Schnittebene ein Riss im Lot. Die Lage der vertikalen CT-Schnittebene ist im Volumenmodell in Bild 4-3b anhand der Schnittlinie A-B gekennzeichnet. Im Volumenmodell sind die Poren blau und die Risse rot gekennzeichnet. Hier ist deutlich zu erkennen, dass der Riss aus Bild 4-3a viele Verzweigungen hat und sich über einen Großteil der Lötstellenbreite erstreckt.



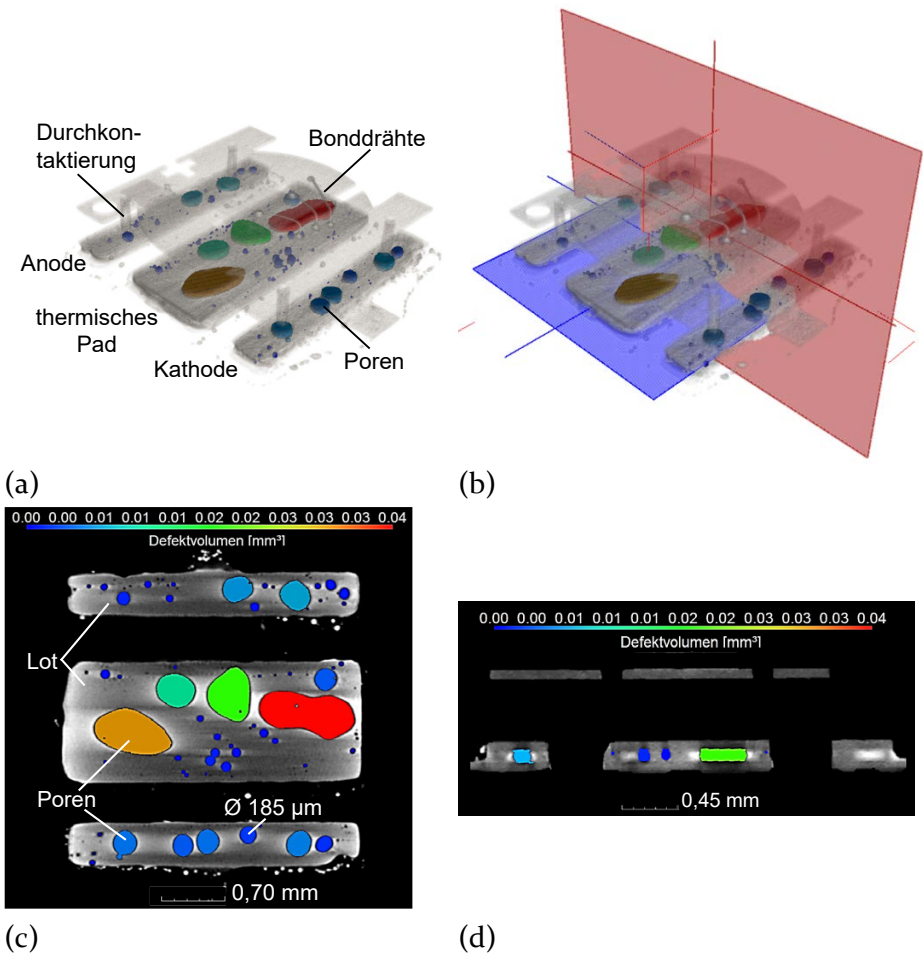


Bild 4-2: (a) Volumenmodell einer High Power LED mit (b) zusätzlich eingezeichneten Ebenen (c) der horizontalen und (d) vertikalen CT Schnittebene

Die Messdauer von Computertomographie-Untersuchungen kann wenige Minuten bis Stunden betragen [113]. Eine Verkürzung der Messdauer kann durch spezielle Varianten der Computertomographie wie der Laminographie für großflächige Leiterplatten in der Elektronikfertigung, sowie inline-CT-Systeme in der Gussteilprüfung, erreicht werden [113], [119]. In der Regel kommt in der Elektronikfertigung die konventionelle 2D-Röntgeninspektion zum Einsatz. Allerdings ist diese in der Detektion von Volumenfehlern begrenzt, da Röntgenbilder keine Informationen über die Tiefenlage der Fehler liefern. Vor allem bei komplexen vielschichtigen Überlagerungsbildern stößt die Röntgenprüfung an ihre Grenzen. Eine Aussage über die

Tiefenlage der Fehler ist schwierig beziehungsweise nur unter erheblichem Aufwand möglich [120].

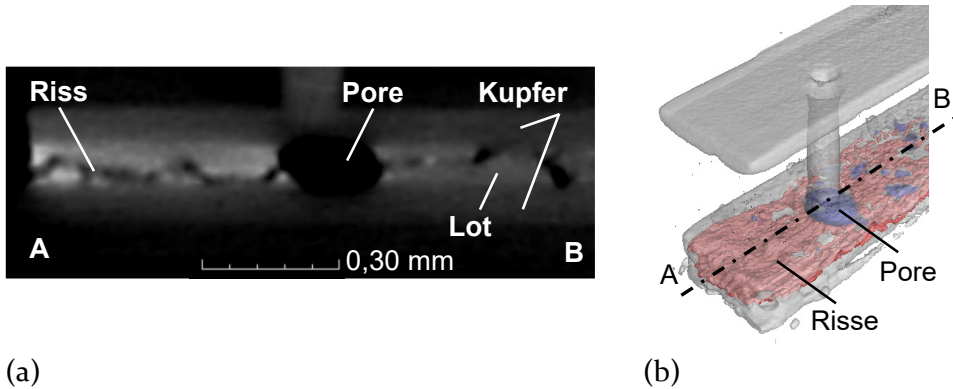
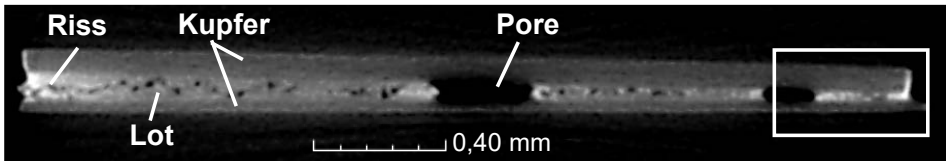


Bild 4-3: (a) Vertikale CT-Schnittebene, (b) zugehöriges Volumenmodell des Kathodenpads mit Poren (blau) und Rissen (rot) in der Lötverbindung

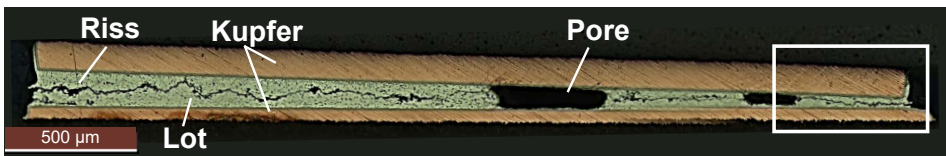
Weitere Grenzen der Computertomographie sind die Probengröße und die Auflösung. Wie zuvor bereits beschrieben muss das Prüfobjekt für hochauflösende Messungen bei vielen Computertomographen so nah wie möglich an der Röntgenquelle positioniert werden, wobei stets noch eine 360 °-Drehung möglich sein muss [120]. Nur dann kann die maximale geometrische Vergrößerung und somit die beste Voxelauflösung des jeweiligen Systems erzielt werden [113]. Die Durchstrahlbarkeit stark absorbierender Materialien wird bei hochauflösenden Messungen durch den notwendigen kleinen Brennfleck und der folglich begrenzten Röntgenspannung erschwert [109].

Eine hohe Auflösung kann mit metallographischen Schliffen und anschließender Rasterelektronenmikroskopie (REM) erzielt werden. Zusätzlich können durch eine energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) einzelne Materialien charakterisiert werden [99]. Neue Computertomographiemethoden wie die Sub- $\mu$ -CT oder das Dual-Energy-Verfahren treten allerdings auch hierzu in Konkurrenz [113]. Im Gegensatz zu der Computertomographie ist die Metallographie allerdings eine zerstörende Prüfmethode, die nur eine Schliffebene betrachtet. Durch Weiterschleifen ist zwar die Betrachtung mehrerer Ebenen möglich, jedoch ist das Vorbeischleifen an einem Fehler irreversibel [99].

In Bild 4-19 ist ein Grenzfall der Rissdetektion in einer CT-Schnittebene im Vergleich zu dem zugehörigen metallographischen Schliff dargestellt. Im CT-Bild ist der Riss durchaus zu erkennen, jedoch befindet sich dieser an der Auflösungsgrenze des hier verwendeten Computertomographen. Im zugehörigen metallographischen Schliff ist der Riss aufgrund der höheren Auflösung deutlich besser sichtbar. Die Markierung zeigt den Bereich, in dem ein Riss nicht mittels CT detektiert wurde.



(a)



(b)

Bild 4-4: Vergleich der (a) CT-Schnittebene mit (b) einem metallographischen Schliff am optischen Mikroskop

Mit Hilfe der Computertomographie ist es möglich, sowohl Poren als auch Risse zu detektieren. Diese zerstörungsfreie Prüfmethode bietet die Möglichkeit, die Qualität der Lötverbindung vor, während und nach den Zuverlässigkeitsuntersuchungen zu dokumentieren. Zur Detektion sehr kleiner Risse und zur Charakterisierung des Gefüges empfiehlt es sich jedoch, ergänzend einen metallographischen Schliff mit anschließender REM-EDX durchzuführen.

### 4.3 Die zwei- und dreidimensionale Auswertung der Porenanteile

Die Porenflächenanteile aus den Röntgenbildern wurden anhand der Gleichung (2-1) ausgewertet, wozu die maximalen Flächen der Poren aufsummiert und ins Verhältnis zur maximalen Lotpadfläche gesetzt wurden. Für ausgewählte Baugruppen erfolgten CT-Untersuchungen mit dem Mikro-Computertomographen exaCT<sup>®</sup>S von der Firma Wenzel. Die Anlagen- und Messparameter sind Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Die Röntgenprüfung der Testbaugruppe A wurde an einer Nordson-Dage-Anlage durchgeführt, wobei die Aufnahme der Röntgenbilder und gleichzeitig die automatische Auswertung der Porenflächenanteile mit der Nordson-Dage-Software erfolgten. Bild 4-20 zeigt die automatische Röntgenauswertung einer Lötverbindung von Testbaugruppe A. Sowohl die Lötpad- als auch die Porenränder sind auf Basis des automatischen Testablaufs farbig umrandet und bilden die Analysegrundlage. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Programmierung eines Testablaufs dar, der für den gesamten Probenumfang gilt. Zu diesem Zweck werden aufgrund der Grauwertunterschiede im Röntgenbild Schwellwerte definiert, die das Lot und die Poren voneinander abgrenzen. Anhand Markierung 1 ist in Bild 4-20a zu erkennen, dass Poren aufgrund störender Grauwerte in Form von Durchkontaktierungen oder Bonddrähten unzureichend detektiert werden<sup>6</sup>. Diesen Nachteil haben CT-Schnittbilder nicht, da sie nur die Struktur in der jeweiligen Schicht darstellen. Bei beiden Verfahren ist die Wahl des Schwellwerts<sup>7</sup> entscheidend für das Ergebnis. Ein Schwellwert, der zu weit in höhere Grauwerte gesetzt wird, also zu weit ins Material geht, führt zu einer Überschätzung der Poren- beziehungsweise der Lötpadgröße (siehe Markierung 2). Demgegenüber lässt ein Schwellwert mit zu niedrigem Grauwert die Poren zu klein erscheinen (siehe Markierung 3). Die Wahl eines zutreffenden Schwellwerts für den gesamten Probenumfang stellt eine Herausforderung dar. Markierung 4 kennzeichnet Mikroporen, die angesichts der Auflösungsgrenze nicht detektiert werden, da ihr Kontrast unzureichend ist.

Die automatischen Auswertungen mit der Nordson-Dage-Auswertesoftware wurden noch einmal manuell nachbearbeitet, falls die oben diskutierten Fehlerbilder einen zu großen Einfluss auf den ermittelten Porenflächenanteil hatten.

---

<sup>6</sup> Die Röntgenaufnahmen sind Überlagerungsbilder, in denen sich demnach alle übereinanderliegenden Strukturen an einer Position im Bild befinden [121].

<sup>7</sup> Der Schwellwert legt einen Grauwert fest, der im gesamten Objekt das Material, den Hintergrund und in diesem Fall die Poren voneinander abgrenzt [122].

### 4.3 Die zwei- und dreidimensionale Auswertung der Porenanteile

Tabelle 4-1: Anlagen- und Messparameter für die 2D-Röntgenprüfung und die Computertomographien

	Testbaugruppe A	Testbaugruppe B
<b>Röntgenprüfung</b>		
Anlage	Nordson Dage Ruby FP XD 7600 N	Yxlon Y.Cheetah
Auswertung	automatisch mit teilweiser manueller Nachbearbeitung (beides mit Nordson-Dage-Auswertesoftware)  manuell für die Gegenüberstellung mit der Software ImageJ	manuell mit der Software ImageJ
<b>Computertomographie</b>		
Anlage	Wenzel exaCT®S	Wenzel exaCT®S
Messspannung	130 kV	130 kV
Messstrom	61 $\mu$ A	61 $\mu$ A
Voxelauflösung	6,7 $\mu$ m	5,6 $\mu$ m
Anzahl der Projektionen	240	230
Messdauer	18 Minuten	18 Minuten
Auswertung	VGStudio MAX 2.1 von Volume Graphics	VGStudio MAX 2.1 von Volume Graphics

Testbaugruppe B wurde an einer Yxlon-Anlage geröntgt und manuell mit der frei erhältlichen Software ImageJ ausgewertet. Die automatische Auswertung lieferte hier kein zufriedenstellendes Ergebnis, da sie durch die unterschiedlichen Grauwerte innerhalb der Poren gestört wurde (siehe Bild 4-20b).

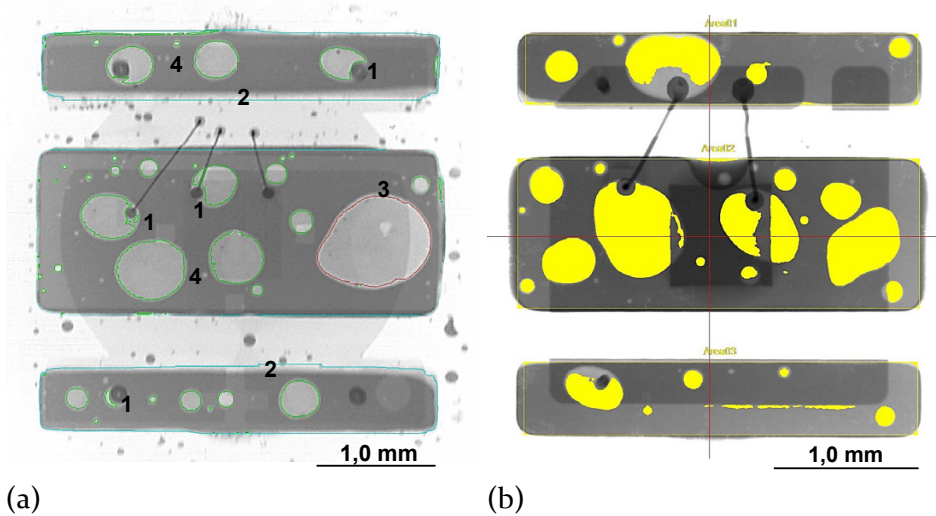


Bild 4-5: Automatische Röntgenauswertung (a) von Testbaugruppe A, (b) von Testbaugruppe B

Die Computertomographie-Messungen wurden für beide Testbaugruppen an der Wenzel-Maschine durchgeführt. Die Wahl der Einstellparameter erfolgte unter den Prämissen einer maximal zulässigen Auflösung aufgrund der Probengeometrie und einer kurzen Messdauer bei ausreichend guter Qualität, um Risse detektieren zu können. Die Durchstrahlungsrichtung der LEDs ist Bild 4-1 zu entnehmen.

Um den Unterschied zwischen den 2D- und 3D-Porenanteilen herauszuarbeiten, wurden die Porenflächen- und Porenvolumenanteile gegenübergestellt. Zu diesem Zweck erfolgte für beide Testbaugruppen eine manuelle Auswertung der Röntgenbilder mit ImageJ.

In Bild 4-21a ist die manuelle Auswertung mit der Software ImageJ und in Bild 4-21b die zugehörige horizontale CT-Schnittebene mit durchgeführter Porenanalyse dargestellt. Bei beiden Verfahren wurde die Detektion von Mikroporen vernachlässigt, da diese an der Auflösungsgrenze der jeweiligen Maschine liegen.

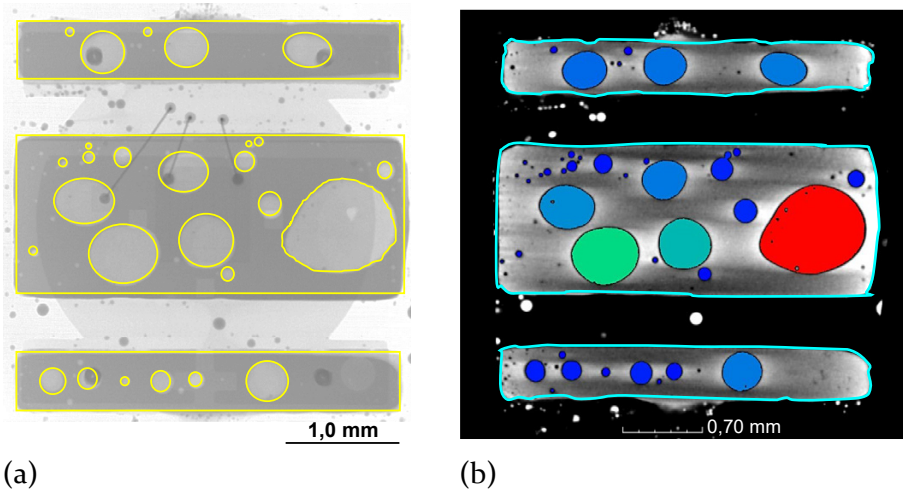


Bild 4-6: Gegenüberstellung von Testbaugruppe A (a) manuelle Röntgenauswertung mit ImageJ, (b) Porenanalyse mittels VGStudio

In Bild 4-22 ist die Gegenüberstellung der 2D- und 3D-Porenanteile (PA) für Testbaugruppe A und B dargestellt. Die durchschnittlichen Porenflächenanteile sind größtenteils für beide Testbaugruppen höher als die Porenvolumenanteile. Im Einzelnen bedeutet dies, dass die relative Abweichung<sup>8</sup> ausgehend von dem 3D-Porenanteil bei Testbaugruppe A im Durchschnitt 14 % (siehe Bild 4-22a) und bei Testbaugruppe B im Mittel 25 % beträgt (siehe Bild 4-22b). Die Abweichungen befinden sich bei beiden Testbaugruppen bei den niedrigeren Porenanteilen im Bereich der Fehlerbalken. Bei Testbaugruppe A trifft dies auch bei einem Porenanteil  $PA > 15 \%$  noch zu, während bei Testbaugruppe B bei einem Porenanteil  $PA \geq 25 \%$  die Diskrepanz zunimmt. Je höher der Porenanteil demnach ist, desto größer ist die Abweichung. Worin dies begründet ist, soll im Folgenden näher untersucht werden.

<sup>8</sup> Die absolute Messabweichung  $F$  ist hier:  $F = PA_{2D} - PA_{3D}$ . Daraus ergibt sich die relative Messabweichung  $f$  aus  $f = F \cdot 100 / PA_{3D}$  [123].

#### 4 Einsatz der Computertomographie zur quantitativen Erfassung der Poren

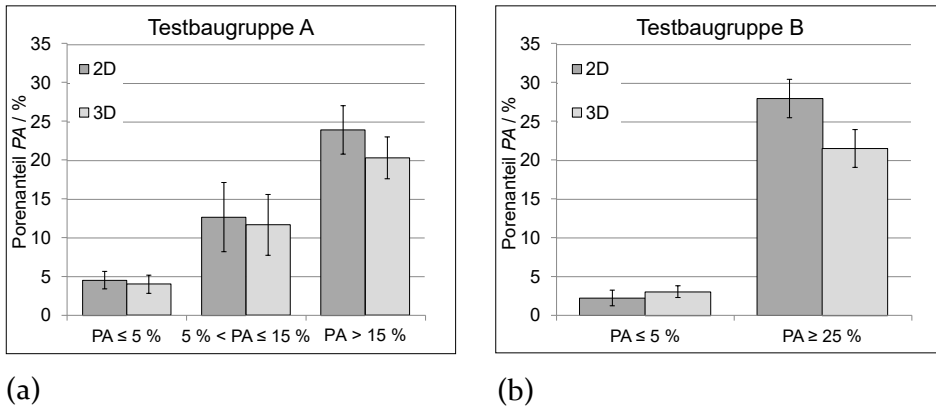


Bild 4-7: Gegenüberstellung der prozentualen 2D- und 3D-Porenanteile (a) Testbaugruppe A, (b) Testbaugruppe B, die Fehlerbalken stellen die  $\pm$  Standardabweichung dar

Anhand der vertikalen CT-Schnittebene durch das thermische Lötpad in Abbildung 4-23 ist zu sehen, dass bei den CT-Analysen der zu untersuchende Bereich manuell auf die Lötverbindung eingeschränkt wurde<sup>9</sup>. Ein entscheidender Vorteil bei der manuellen Selektierung des Lots besteht darin, dass die ungleichmäßige Dicke des Lotspalts erfasst wird. Ein keilförmiger Lotspalt kann aus dem Porenaufkommen resultieren, wodurch auch die LEDs verkippen. Des Weiteren zeigt der vertikale CT-Schnitt in Abbildung 4-23, dass auch kleine Poren existieren, die nicht den gesamten Lotspalt ausfüllen, sondern bauteil- oder leiterplattenseitig positioniert sind.

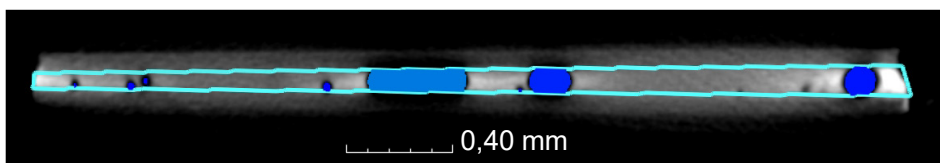


Abbildung 4-8: Vertikale CT-Schnittebene durch das thermische Lötpad

<sup>9</sup> Die Kupferlagen und die Lötverbindung führen zu einer ähnlichen Schwächung der Intensität und haben dementsprechend einen vergleichbaren Grauwert. Der gewählte Schwellwert selektiert demnach beide Materialien, weshalb eine manuelle Auswahl des zu untersuchenden Bereichs notwendig ist.



Bild 4-24 zeigt schematisch den Unterschied zwischen der Röntgen- und der CT-Auswertung. In Röntgenbildern wird zur Bestimmung des Flächeninhalts immer die maximale Ausdehnung der Pore herangezogen, da aufgrund der fehlenden Tiefeninformation kein Anhaltspunkt über die tatsächliche Porengeometrie existiert. Die CT-Daten zeigen, dass die Poren meist eine ellipsoid- oder kugelhähnliche Form aufweisen, die im Röntgenbild nicht erkannt werden kann. Folglich wird eine zu große Porenfläche angenommen. Wenn darüber hinaus Poren den Lotspalt nicht in seiner ganzen Dicke ausfüllen, wird dies in der 2D-Auswertung nicht erkannt, wodurch auch hier ein zu großer Beitrag am Gesamtporenanteil resultiert. Außerdem wird ein ungleichmäßiger Lotspalt, der sowohl Lot- als auch Porenfläche reduziert, ebenfalls nicht berücksichtigt.

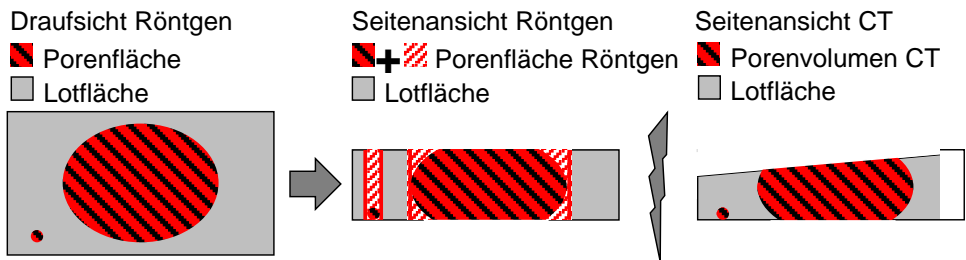


Bild 4-9: Unterschied zwischen der 2D- und 3D-Auswertung

Die dreidimensionale Auswertung bildet demnach die Realität besser ab, da sie sowohl die tatsächliche Porengeometrie und -position als auch die Lotgeometrie erfasst. In den nachfolgend beschriebenen Zuverlässigkeitsuntersuchungen erfolgt die Klassifizierung der Proben für die unterschiedlichen Porenklassen mittels der Röntgeninspektion, da die hochauflösenden CT-Untersuchungen an dieser Stelle zeitintensiver als die konventionelle Röntgenprüfung sind. Ergänzend zu der 100 %-Röntgenprüfung werden für ausgewählte Testobjekte Computertomographien durchgeführt. In Kapitel 5 und 6 werden kritische Porengrößen und -positionen anhand der Computertomographien nach den Zuverlässigkeitstests und FEM-Simulationen aufgedeckt. Mit diesen Daten können Prüfleitlinien für die Serienfertigung abgeleitet werden, wodurch kritische Baugruppen mittels der Röntgeninspektion aussortiert werden können.



## 5 Zuverlässigkeitsbetrachtungen unter der Berücksichtigung der Poren

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen soll mittels verschiedener Zuverlässigkeitstests untersucht werden. Zuverlässigkeitstests sind beschleunigte Tests, die Versagensmechanismen aus dem Betrieb des Produktes in kürzerer Zeit nachbilden. Die Ergebnisse resultieren aus kürzeren Zykluszeiten und härteren Belastungszuständen, wobei realitätsferne Schädigungen vermieden werden sollen [124]. Das Ziel von Zuverlässigkeitstests ist es, die Qualität eines Produktes unter verschiedenen Umwelteinflüssen sicherzustellen, indem sie durch eine beschleunigte Alterung eine gewisse Einsatzdauer der Baugruppen simulieren. Dadurch sollen Schwachstellen aufgedeckt werden, woraufhin es möglich ist, die Lebensdauer der Lötverbindung sowie der gesamten Baugruppe zu bewerten [125]. Dabei kann ein Ausfallkriterium frei definiert werden. Dies kann ein Abfall der Scherfestigkeit, ein elektrischer Ausfall, ein Anstieg der Vorwärtsspannung oder des Widerstands, ein Abfall der Lichtintensität, eine Risslänge oder eine von außen sichtbare Strukturveränderung sein [2], [3], [126], [127].

Die häufigste Belastung von Baugruppen ist die thermo-mechanische Spannung, die aus den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien resultiert (siehe Abschnitt 2.2.1) [66]. Die beschleunigten Temperaturwechsel sollen die Lötverbindung in kürzester Zeit möglichst stark beschädigen, ohne neue, irrelevante Mechanismen auszulösen [128]. Dabei sind die Anforderungen aus der Praxis zu beachten. So sollen zum Beispiel elektronische Systeme in Automobilanwendungen abhängig vom Einbauort einwandfrei im Temperaturbereich von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$  funktionieren. Zusätzlich ist die maximal zulässige Chiptemperatur von Halbleiterbauelementen zu beachten [25]. Thermo-mechanische Belastungen können sowohl aktiv als auch passiv in der Baugruppe erzeugt werden. Der Unterschied besteht in der Art der Wärmeübertragung. Beim passiven Test wird die Wärme von außen zugeführt, wodurch die Änderung der Umgebungstemperatur während der Produktlebensdauer simuliert wird. Im aktiven Test verursacht das Bauteil selbst die Temperaturänderung, wodurch das Ein- und Ausschalten der Komponente nach gebildet wird. Zusätzlich unterscheiden sich die Tests in der Dauer der Temperaturwechsel und dem Temperaturhub  $\Delta T$ . In der Praxis können eine interne und eine externe Erwärmung gleichzeitig vorkommen, sodass eine Überlagerung

beider Tests sinnvoll ist [64]. Je nach Anwendungsgebiet kommen unterschiedliche Temperaturzyklen mit verschiedenen Temperaturbereichen, Haltezeiten und Umgebungsmedien (Luft, Flüssigkeit) zum Einsatz [129]. Der Temperaturhub, die Haltezeit bei der minimalen und der maximalen Temperatur sowie die Rampenzeit beeinflussen die Ermüdungslebensdauer. Hierbei gilt, dass unabhängig voneinander ein großer Temperaturhub und eine kurze Rampenzeit die Lötverbindung mehr als ein kleiner Temperaturhub und eine lange Rampenzeit schädigen. Ein Temperaturschocktest (TST) reduziert die Lebensdauer demnach mehr als ein Temperaturwechseltest [130]. Es zeigt sich auch, dass eine längere Haltezeit bei den Peaktemperaturen zu einer größeren Kriechschädigung und somit zu einer kürzeren Lebensdauer führt [131]. Grund hierfür ist das die Spannungsrelaxation<sup>19</sup> bei langen Haltezeiten bei den Peaktemperaturen zunimmt [130].

Neben den thermo-mechanischen Tests nimmt aufgrund der zunehmenden Stückzahl der tragbaren Geräte, wie z. B. MP3-Player und Mobiltelefone, das Interesse an Biegetests zu. Diese stellen eine mechanische Belastung nach, die während des Produktionsprozesses, des Versands oder der Benutzung in Form von Verbiegung, Verdrehung oder durch das Drücken von Tasten entstehen kann [133].

Nach den Zuverlässigkeitstests wurden die LEDs einem Light-on-Test unterzogen und danach eine Scherfestigkeitsprüfung nach der Norm DIN EN 62137-1-2 durchgeführt. Diese bewertet die Haltbarkeit der Lötverbindung zwischen den Bauteil- und Leiterplattenanschlüssen mittels einer mechanischen Scherbeanspruchung. Die Scherfestigkeit ist die Höchstkraft, die senkrecht zum SMD-Bauteil und parallel zur Leiterplatte eingeleitet wird, um die Verbindung des SMD-Bauteils mit dem Substrat zu unterbrechen [134]. Der Schertest wird zur Bewertung von Temperaturzyklen und für den Vergleich zwischen den Belastungsfaktoren herangezogen. In Abbildung 14-5 im Anhang ist der Prüfaufbau des Schertests dargestellt. Da jeweils unterschiedliche Stichprobenumfänge zu Grunde liegen, wird zur Beurteilung der Scherkräfte die Student-*t*-Verteilung angewendet, die diese Unterschiede mit einbezieht [135]. Nach dem Schervorgang erfolgt eine Analyse der Ausfallart, indem die Bruchflächen an der LED und an der Leiterplatte mit dem Mikroskop beurteilt werden. Mögliche Ausfallarten nach DIN EN 62137-1-2 sind ein Bruch durch das Lot, an der Bauteil-Lot-

---

<sup>19</sup> Spannungsrelaxation ist der Abbau einer von außen angelegten Spannung bei konstanter Dehnung. Ursachen hierfür sind Versetzungsvorgänge und die Umwandlung von elastischer Verformung in Kriechverformung [132].

Schnittstelle, an der Lot-Anschlussflächen-Schnittstelle durch den Bauteilkörper oder ein Abreißen der Anschlussflächen [134].

Tabelle 5-1: Versuchsplan für Testbaugruppe A und B

Test	Testbaugruppe A	Testbaugruppe B
Luft/Luft-Temperaturschocktest	X	X
flüssig/flüssig-Temperaturschocktest	X	-
aktiver Lastwechseltest	X	-
überlagerter Lastwechseltest	-	X
zyklischer Biegetest	X	X

In Tabelle 5-1 sind die einzelnen Zuverlässigkeitstests für Testbaugruppe A und B dargestellt. Die zugehörigen Testbedingungen und Ergebnisse werden detailliert in den folgenden Abschnitten erläutert. Die unterschiedlichen Tests und Testbedingungen resultieren aus den Erkenntnisgewinnen während des Projekts.

Um die Schädigungen der Lötstellen zu begutachten, werden ausgewählte Baugruppen mit der Computertomographie untersucht. Ergänzend dazu werden auch metallographische Schliffe und Analysen am Rasterelektronenmikroskop angefertigt. Die Zuverlässigkeitstests erzeugen im Lot Risse an unterschiedlichen Stellen. Um diese zu klassifizieren, werden sie nach Tabelle 5-2 in Fehlercodes eingeteilt und anhand ausgewählter CT-Bilder diskutiert. Hierzu werden CT-Aufnahmen nach unterschiedlichen Belastungsdauern verglichen und das Auftreten der Schädigung wird mit einem Fehlercode gekennzeichnet. Je nachdem, ob die CT-Messung nur am Ende des Tests oder auch schon während des Versuchs erfolgte, bezeichnet der Fehlercode die endgültige Schädigung oder er gibt einen Anhaltspunkt dafür, bei welcher Zyklenzahl die Schädigung eintrat.

Tabelle 5-2: Einteilung der Fehler nach Fehlerarten mit zugehörigen Fehlercodes

Fehlercode	Fehlerart
1	Riss entsteht an einer Pore
2	Riss entsteht am Lötstellenrand
3	Riss verbindet Lötstellenrand mit einer Pore
4	Riss verbindet einzelne Poren
5	Riss entsteht direkt im Lot

Für die Ergebnisse von Testbaugruppe A und B wird an dieser Stelle folgende Bezeichnung der untersuchten LEDs eingeführt: Ein A beziehungsweise B gibt die Testbaugruppe und die darauffolgende Ziffer die fortlaufende Nummerierung an. LED#A2 ist also die zweite LED von Testbaugruppe A, deren Ergebnisse vorgestellt werden. Des Weiteren erfolgt anhand der Fehlercodes in Tabelle 5-2 die Zuordnung der Fehlerbilder in den Lötverbindungen.

### 5.1 Auswirkungen des Luft/Luft-Temperaturschocktests

Der Luft/Luft-Temperaturschocktest wurde für beide Testbaugruppen in einem Zweikammerofen durchgeführt. Die Tests erfolgten in Anlehnung an die Spezifikationen IPC-9701 [124], IEC 60810 [136] und JESD22-A104 [137]. Die Testbedingungen können der Tabelle 5-3 entnommen werden. Der Temperaturwechsel wird innerhalb weniger Sekunden von -40 °C bis +125 °C vollzogen und für 30 Minuten beziehungsweise 15 Minuten bei den Maximal- und Minimaltemperaturen gehalten.

Vor und nach der Belastung wurden an ausgewählten Baugruppen CT-Messungen durchgeführt, um die Lötstellenschädigungen zu dokumentieren. Zusätzlich wurden während der 1 000 Temperaturschocks jeweils nach 50 Zyklen CT-Aufnahmen an Testbaugruppe A durchgeführt, um einen Hinweis auf den Zeitpunkt der Rissentstehung und deren Position zu analysieren.

Tabelle 5-3: Testbedingungen des Luft/Luft-Temperaturchocktest

Temperatur- schocktest Luft/Luft	Testbedingungen		Spezifikation
Testbaugruppe A	Temperatur- bereich	-40 °C bis +125 °C	IPC-9701
	Haltezeit	30 min	
	Transferzeit	10 s	
	Zyklen	0, 500, 1 000 und Rissfortschritt alle 50 Zyklen	
	Anzahl der TBG	143 (56 davon CT)	
Testbaugruppe B	Temperatur- bereich	-40 °C bis +125 °C	IEC 60810 JESD22-A104
	Haltezeit	15 min	
	Transferzeit	10 s	
	Zyklen	0, 1 000	
	Anzahl der TBG	97 (10 davon CT)	

### 5.1.1 Beurteilung der Testbaugruppe A

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wurde, wurde die Testbaugruppe A in drei Klassen eingeteilt, nämlich mit einem geringen, mit einem mittleren und mit einem hohen Porenanteil. An dieser Stelle wird nur auf die wesentlichen Ergebnisse eingegangen und der mittlere Porenanteil nicht explizit beschrieben, da dieser keinen nennenswerten Zugewinn an Erkenntnissen liefert. Die Ergebnisse von Testbaugruppe A wurden bereits teilweise in [64] veröffentlicht.

### 5.1.1.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} > 15\%$

Bild 5-1 zeigt die horizontale CT-Schnittebene von LED#A1 mit einem Porenflächenanteil von 24 % vor und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks. Die größte Pore im thermischen Pad besitzt ein Volumen von  $0,0675 \text{ mm}^3$  und trägt damit 20 % zum Porenvolumenanteil des thermischen Pad bei. Werden alle Poren im thermischen Pad mit einbezogen, beträgt deren gesamter Volumenanteil 35 % und ihr Flächenanteil 34 %. Der Porenvolumen- und der Porenflächenanteil sind also fast gleich groß. Das thermische Pad ist im Vergleich zu den beiden elektrischen Pads nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks weniger geschädigt.

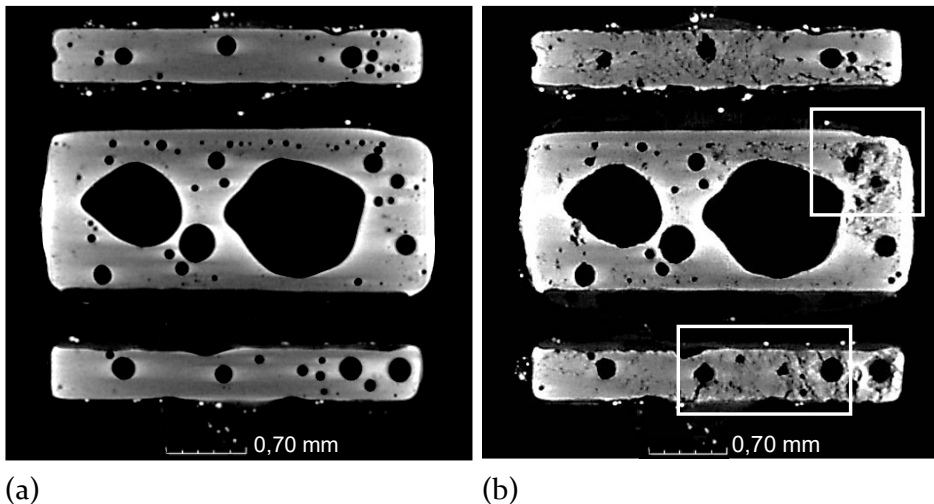


Bild 5-1: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A1 (a) vor und (b) nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks mit gekennzeichneten Positionen der Detailansichten

In Bild 5-1b sind zwei Bereiche von LED#A1 eingezeichnet, deren Vergrößerungen bei 0 und 1 000 Zyklen in den Bild 5-2a und Bild 5-2b gegenübergestellt sind. Mit Hilfe der Fehlercodes aus Tabelle 5-2 werden im Folgenden die auftretenden Defekte diskutiert. Anhand von Fehlercode 1 in Bild 5-2a ist in der Detailansicht des thermischen Pads zu sehen, wie sich während der 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks Risse am Rand der Pore gebildet haben, wodurch sich auch die Porengeometrie verformt hat. Die Detailansicht in Bild 5-2b zeigt nach 1 000 Zyklen ebenfalls Risse, die vom Porenrand ausgehen. Zusätzlich sind Risse am Lötstellenrand mit Fehler



code 2 gekennzeichnet, die sich bereits weit ins Lot hinein ausgebreitet haben. Der Vergleich mit der CT-Schnittebene vor der Belastung verdeutlicht, dass an dieser Stelle keine erkennbare Vorschädigung am Lötstellenrand vorhanden war, bevor der Riss entstanden ist. Befindet sich in ausreichender Nähe eine Pore, wie es bei Fehlercode 3 der Fall ist, so verbindet sich der Riss vom Lötstellenrand her mit der Pore. Dies stellt eine erhebliche Herausforderung für die Stabilität der dünnen Löt pads dar. Fehlercode 4 zeigt, dass auch einzelne Poren durch Risse verbunden werden. Darüber hinaus können sogar Risse mitten im Lot entstehen, ohne dass eine Pore daran beteiligt ist (siehe Fehlercode 5). Dies liegt an Ermüdungsvorgängen innerhalb der Mikrostruktur des Lotes (siehe Abschnitt 2.2.2.1).

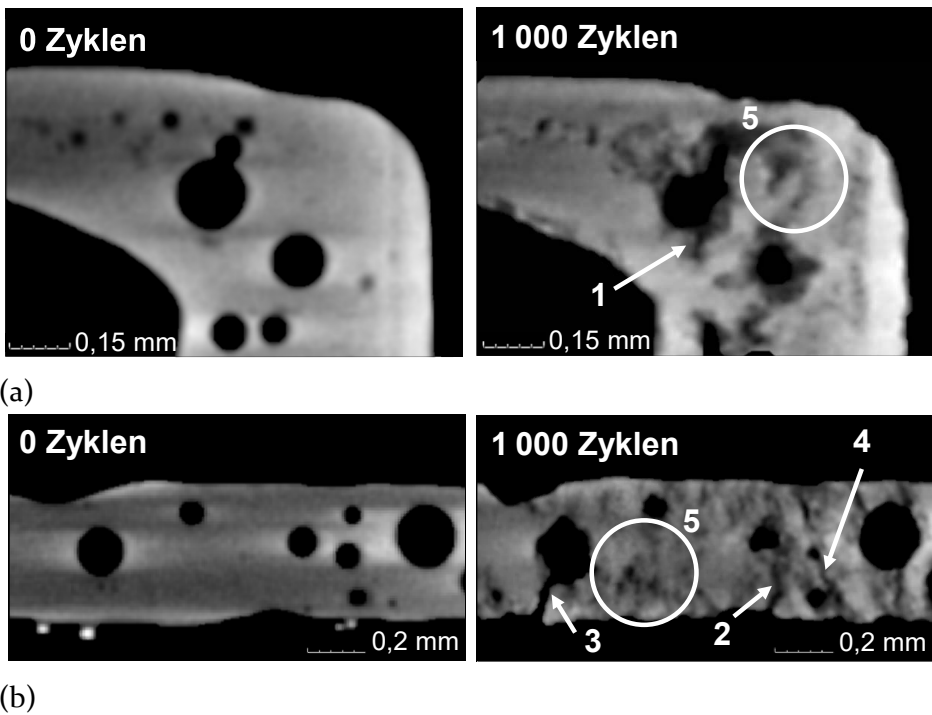


Bild 5-2: Gegenüberstellung der Detailansichten von LED#A1 vor und nach 1000 Luft/Luft-Temperaturchocks (a) im thermischen Pad, (b) im elektrischen Pad

Die metallographischen Schliffebenen in Bild 5-3 durch das obere und untere elektrische Löt pad von LED#A2 zeigen, dass die Lötverbindungen an diesen Stellen komplett durchgerissen sind. Bild 5-3a demonstriert den Fall, dass bereits eine Pore den Verbindungsquerschnitt erheblich reduziert

hat und die Risse die Lötverbindung zusätzlich schwächen. In Bild 5-3b hingegen ist zu sehen, dass ein Riss ohne die Beteiligung einer Pore entstanden ist.

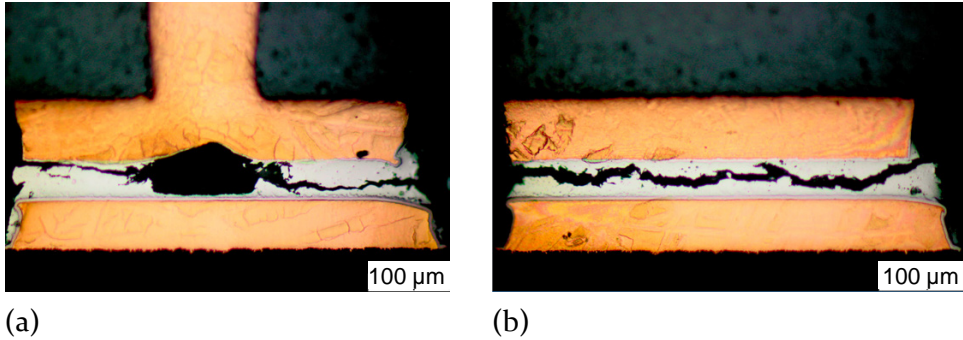
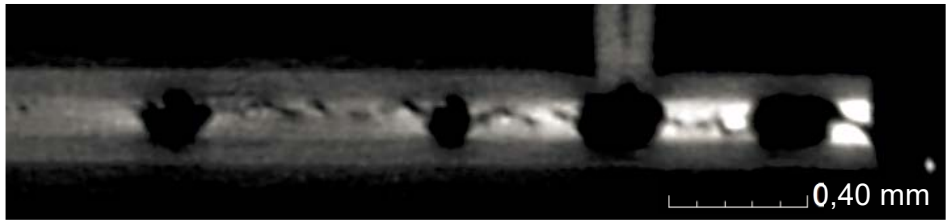


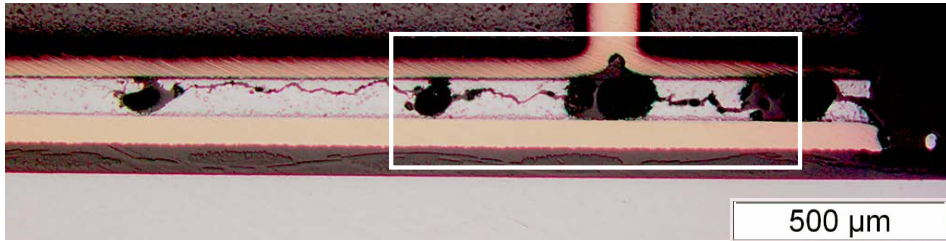
Bild 5-3: Lichtmikroskop-Bilder metallographischer Schliffebenen durch das (a) obere und (b) untere elektrische Lötpad von LED#A2

Die vertikale CT-Schnittebene durch das untere elektrische Lötpad von LED#A1 ist in Bild 5-4a dargestellt. Hier ist deutlich zu sehen, wie die einzelnen Poren durch Risse miteinander verbunden werden. Meistens beginnen die Risse an der Mitte des Porenrands und verlaufen dann weiter mittig durch die Lötverbindung. Bild 5-4b zeigt ein Lichtmikroskop-Bild des metallographischen Schliffs derselben Schnittebene und Bild 5-4c die zugehörige REM-Aufnahme mit einer höheren Auflösung. Der Vergleich der Bild 5-4a bis Bild 5-4c zeigt, dass die Detektion von Rissen mittels der berechneten CT-Bilder mit dem Schliffbild übereinstimmt und die entstandenen Risse zuverlässig nachgewiesen werden.

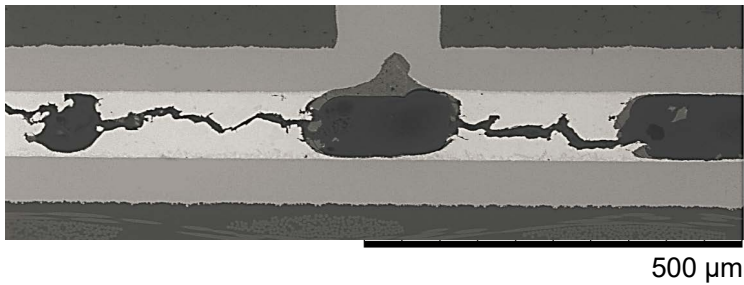
Erfolgen die CT-Untersuchungen erst nach den Zuverlässigkeitstests, dann kann nur die endgültige Schädigung dokumentiert werden. Daher sollen die folgenden Untersuchungen, in denen nach jeweils 50 Zyklen eine CT-Messung der Lötverbindungen erfolgte, genauen Aufschluss über die Entstehung und den Fortschritt der Risse geben.



(a)



(b)



(c)

Bild 5-4: Gegenüberstellung für LED#A1 nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks (a) vertikale CT-Schnittebene [73], (b) Lichtmikroskop-Bild des metallographischen Schliffs, (c) REM-Aufnahme an demselben Schliff

In Bild 5-5 ist die Lötverbindung von LED#A3 vor und nach 1 000 Temperaturschocks dargestellt. Die Fehlerbilder nach der Belastung ähneln denen von LED#A1 in Bild 5-1. Zusätzlich ist in Bild 5-5a die Position der Ausschnittsvergrößerungen aus Bild 5-6 sowie die Position der Schnittebene A-B von Bild 5-7 markiert.

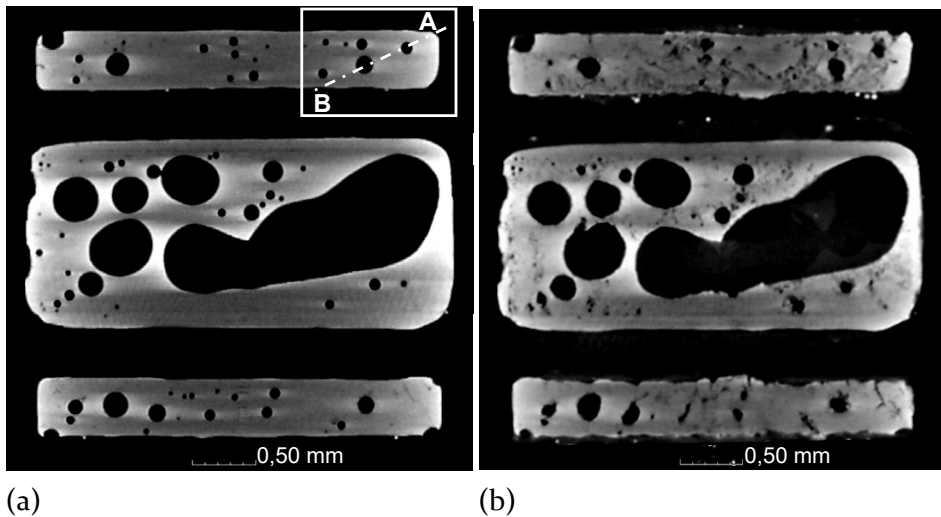


Bild 5-5: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A3 (a) vor und (b) nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturchocks

Mittels der CT-Messungen in Bild 5-6 wurde das Risswachstum in 50 Zyklenritten dokumentiert, bis 1 000 Temperaturschocks erreicht wurden. Es ist zu empfehlen, die im Folgenden diskutierten Risspositionen immer mit der Ausgangssituation oben links, mit dem vorangehenden und dem nachfolgenden CT-Bild zu vergleichen.

Bereits nach 50 Zyklen werden die Ränder der Poren und der Lötstellen (siehe Fehlercodes 1 und 2) ungleichmäßig, was darauf hinweist, dass sich aufgrund der plastischen Verformung Risse bilden. Nach weiteren 100 Zyklen können eindeutig Risse an den Porenrändern nachgewiesen werden (siehe Fehlercode 1). Darüber hinaus erscheint in der oberen linken Ecke nach 100 Zyklen ein Riss innerhalb des Lotes (siehe Fehlercode 5). Im weiteren Verlauf steigt das Risswachstum mit zunehmender Zyklenanzahl an und die Schadensbilder vermehren und verstärken sich. Außerdem ist den CT-Bildern in Bild 5-6 zu entnehmen, dass die Verformungen an den Lötstellen- und den Porenrändern zur gleichen Zeit entstehen.

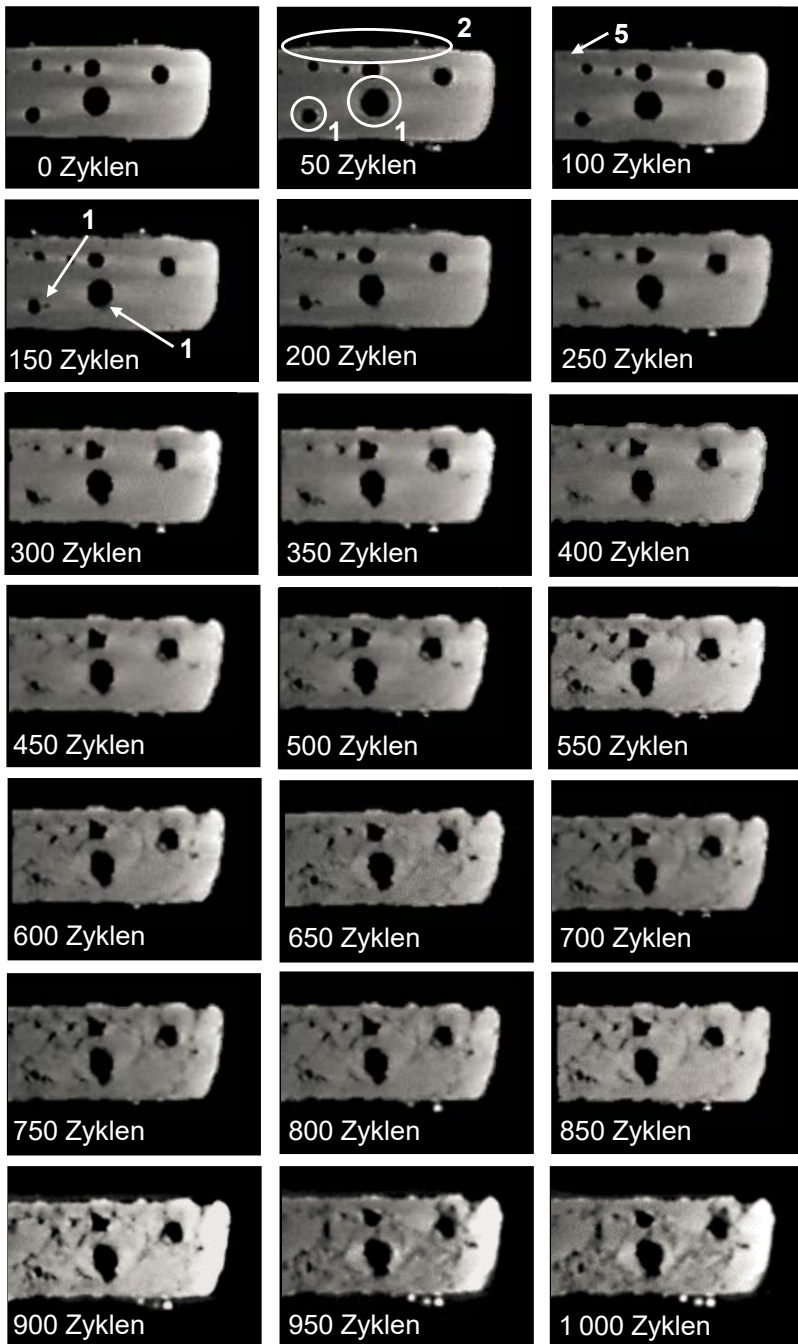


Bild 5-6: Horizontale CT-Schnittebenen von LED#A3 in jeweils 50 Zyklenschritten während des Luft/Luft-Temperaturschocktests

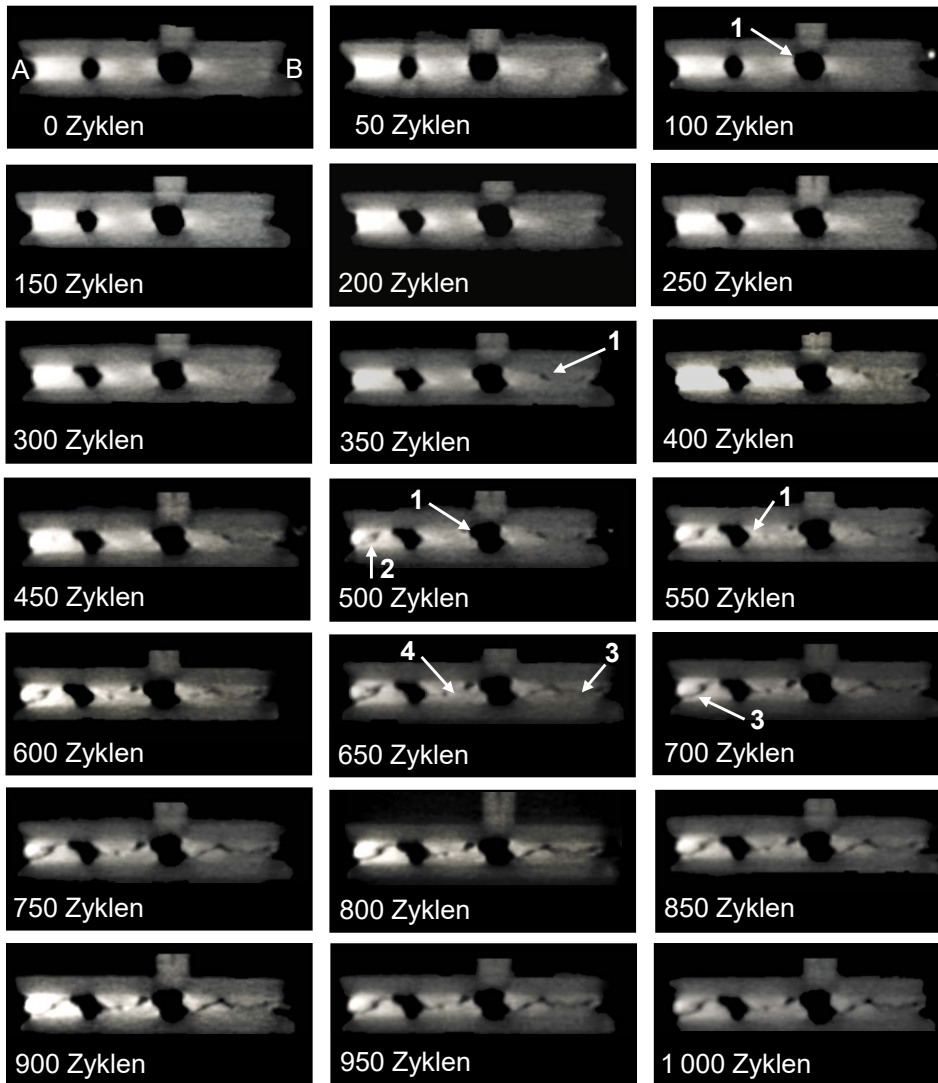


Bild 5-7: Vertikale CT-Schnittebenen von LED#A3 in jeweils 50 Zyklenschritten während des Luft/Luft-Temperaturschocktests

Bild 5-7 zeigt die vertikale CT-Schnittebene A-B, die diagonal durch das obere elektrische Lötpad in Bild 5-5 verläuft. In dieser Ebene ist bereits nach 100 Zyklen die Verformung der Porenränder an Fehlercode 1 zu erkennen, die durch beginnende Risse verursacht wird. Nach 350 Zyklen erscheint erstmalig ein Riss rechts im Lot. Dieser Riss ist mit dem Fehlercode 1 gekennzeichnet, da er an einer Pore im Hintergrund entsteht, die in dieser Ebene nicht sichtbar ist. Dieser Riss wächst mit zunehmender Zyklenzahl und verbindet sich erst mit dem Rand der Lötstelle und später bei 650 Zyklen mit dem unteren Rand der Pore (siehe Fehlercode 3). Nach 500 Zyklen kann ein Riss am linken Lötstellenrand (siehe Fehlercode 2) und am oberen linken Rand der rechten Pore (siehe Fehlercode 1) detektiert werden. Nach weiteren 50 Zyklen erscheint an Fehlercode 1 ein Riss am rechten Rand der linken Pore. Im CT-Bild von 650 Zyklen ist erkennbar, dass sich die Risse zusammenschließen und somit beide Poren durch einen Riss verbunden sind (siehe Fehlercode 4). Nach 700 Zyklen hat sich der Riss vom linken Lötstellenrand mit der linken Pore verbunden (siehe Fehlercode 3). Anhand der CT-Schnittebenen in 50 Zyklenritten wird deutlich, dass sich mit zunehmender Zyklenzahl die Risse ausbreiten und somit besser detektierbar werden.

Die Auswertungen des hohen Porenanteils  $PA_{Fläche} > 15\%$  von Testbaugruppe A nach der Belastung mit einem Luft/Luft-Temperaturschocktest zeigen, dass die Verformungen der Lötstellen- und der Porenränder in der horizontalen CT-Schnittebene nahezu gleichzeitig auftreten. Die Rissbildung direkt im Lot erscheint unmittelbar danach. In der hier gewählten vertikalen CT-Schnittebene zeigt sich, dass die Verbindung von Pore und Lötstellenrand beziehungsweise diejenigen einzelner Poren miteinander durch einen Riss erst nach 650 Temperaturschocks nachweisbar sind.

### **5.1.1.2. Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{Fläche} \leq 5\%$**

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen eines geringen Porenanteils  $PA_{Fläche} \leq 5\%$  vorgestellt. Bereits Bild 5-3b zeigt, dass Risse auch ohne die Präsenz von Poren entstehen können. In Bild 5-8 sind die horizontalen CT-Schnittebenen von LED#A4 mit einem Porenanteil von 4 % vor und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks gegenübergestellt.

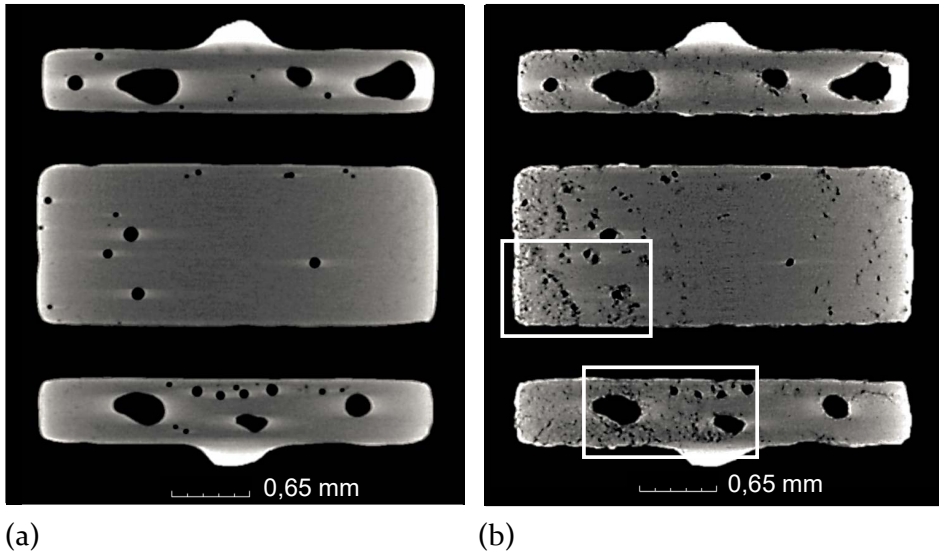
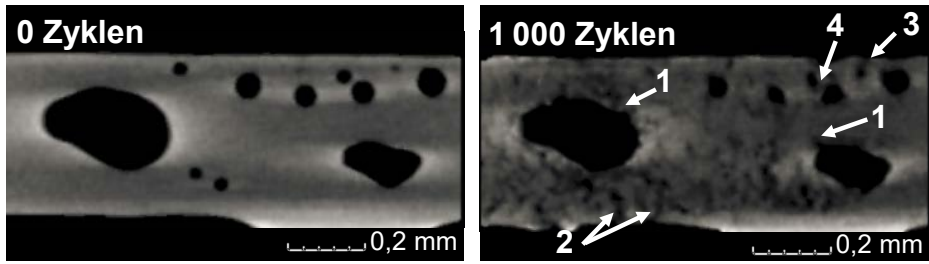


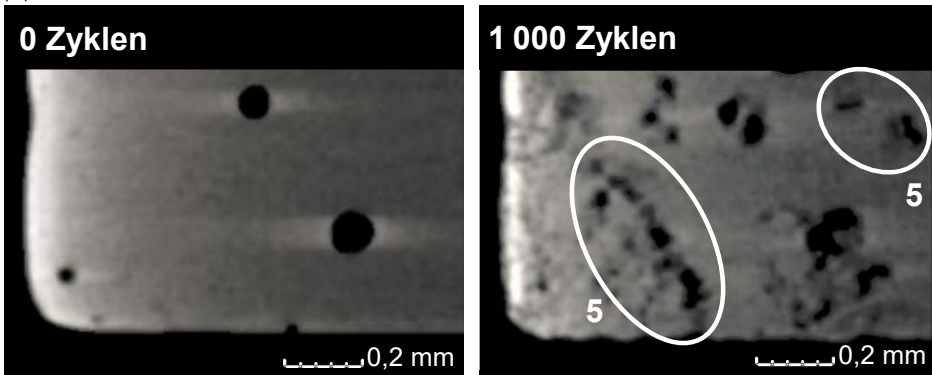
Bild 5-8: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A4 (a) vor und (b) nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturchocks mit gekennzeichneten Positionen der Detailansichten

Bild 5-9 zeigt detailliert einzelne Fehlerbilder von ausgewählten Bereichen. Wie schon bei den porenreichen Lötverbindungen in Abschnitt 1 sind die typischen Erscheinungsformen mit den Fehlercodes aus Tabelle 5-2 hervorgehoben. So kennzeichnet Fehlercode 1 Risse am Porenrand nach 1 000 Temperaturschocks, während Fehlercode 2 Risse am Lötstellenrand zeigt. Die Risse wandern ausgehend vom Lötstellenrand zur nächsten Pore (siehe Fehlercode 3) oder verbinden zwei Poren miteinander (siehe Fehlercode 4). Letzterer Fall tritt allerdings bei porenarmen Lötverbindungen seltener auf, da weniger Poren in der Lötverbindung vorhanden sind und somit die Porendichte geringer ist. In Bild 5-9b verdeutlicht der Vergleich von 0 und 1 000 Luft/Luft-Thermoschocks, dass in porenfreien Bereichen durch die Belastung flächige Risse entstanden sind (siehe Fehlercode 5).





(a)



(b)

Bild 5-9: Gegenüberstellung der Detailansichten von LED#A4 vor und nach 1 000 Luft/ Luft-Temperaturschocks (a) im elektrischen Pad, (b) im thermischen Pad

In Bild 5-10 lässt sich ein Grund für die Entstehung der flächigen Poren erkennen. Während die rechte Seite des Lotspalts eine Dicke von ungefähr 90  $\mu\text{m}$  hat, beträgt diejenige der linken Seite nur 60  $\mu\text{m}$ . Die flächigen Risse entstehen an der dünneren Seite des Lotspalts. Neben den Poren fördert der keilförmige Lotspalt die Entstehung von Rissen. Im Vergleich hierzu sind bei LED#A1 in Bild 5-1 weniger flächige Risse ersichtlich, was auf die gleichmäßige Lotspaltdicke von 90  $\mu\text{m}$  zurückzuführen ist.

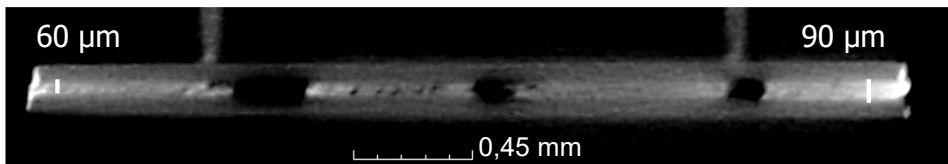


Bild 5-10: Vertikale CT-Schnittebene von LED#A4 nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks

Um den Rissentstehungsprozess näher zu analysieren, wurden auch hier ergänzend jeweils nach 50 Temperaturschocks CT-Messungen an LED#A5 durchgeführt. In Bild 5-11 ist die horizontale CT-Schnittebene von LED#A5 vor und nach 1 000 Temperaturschocks dargestellt. Der Porenanteil beträgt hier 3 %. Zusätzlich sind in Bild 5-11a derjenige Bereich und diejenige Schnittebene A-B markiert, die in Bild 5-12 beziehungsweise Bild 5-13 vergrößert in einer Bildfolge gezeigt werden.

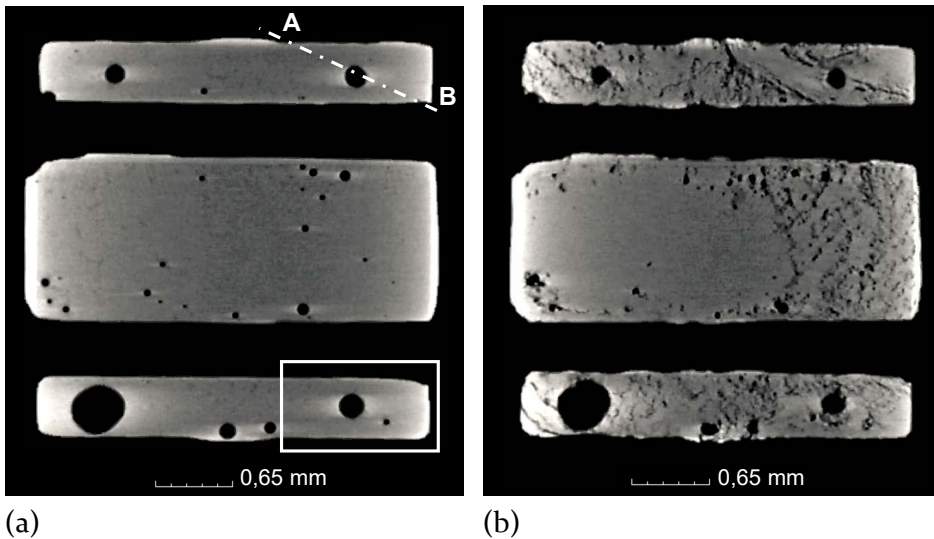


Bild 5-11: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A5 (a) vor und (b) nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks

Zunächst ist in Bild 5-11b zu erkennen, dass besonders die rechte Seite der Lötverbindung mehr Risse aufweist als die linke, obwohl dort die Lötverbindung nur wenige Poren hat. Jedoch beträgt der Unterschied zwischen rechter und linker Lotspaltdicke  $\Delta d = 60 \mu\text{m}$ , wobei die rechte Seite mit  $55 \mu\text{m}$  die dünnere ist. Folglich treten dort die flächigen Risse häufiger auf. Im Vergleich dazu beträgt dieser Unterschied bei LED#A3  $\Delta d = 20 \mu\text{m}$  ( $80 \mu\text{m}$  zu  $100 \mu\text{m}$ ). Hier konnten zwar auch flächige Risse nachgewiesen werden, allerdings bei weitem nicht in diesem Maße (siehe Bild 5-5).

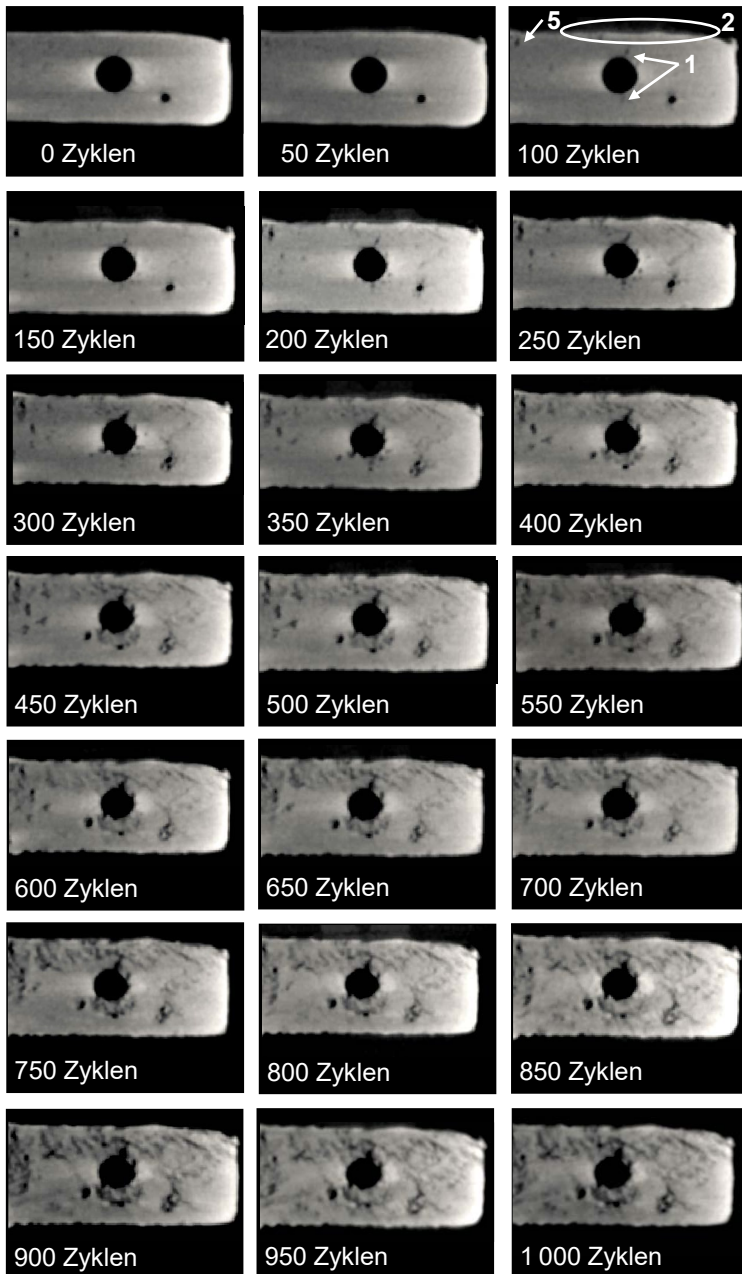


Bild 5-12: Horizontale CT-Schnittebenen von LED#A5 in jeweils 50 Zyklenschritten während des Luft/Luft-Temperaturschocktests

In den horizontalen CT-Schnittebenen von Bild 5-12 sind die ersten Risse nach 100 Zyklen an den Porenrändern zu erkennen (siehe Fehlercode 1). Mit steigender Zyklenzahl werden die Lötstellenränder (siehe Fehlercode 2) zunehmend ungleichmäßiger und Risse wachsen. Neben den Rissen, die vom Lötstellen- oder Porenrand einsetzen, sind die Risse direkt im Lot erstmals bei 100 Zyklen in der oberen linken Ecke an Fehlercode 5 nachweisbar. Im CT-Ausschnitt ist die dünnere Seite des Lotspalts dargestellt, die deutlich sichtbar zu flächigen Rissen neigt. Mit zunehmender Zyklenzahl bilden sich sogar immer mehr Risse im Lot.

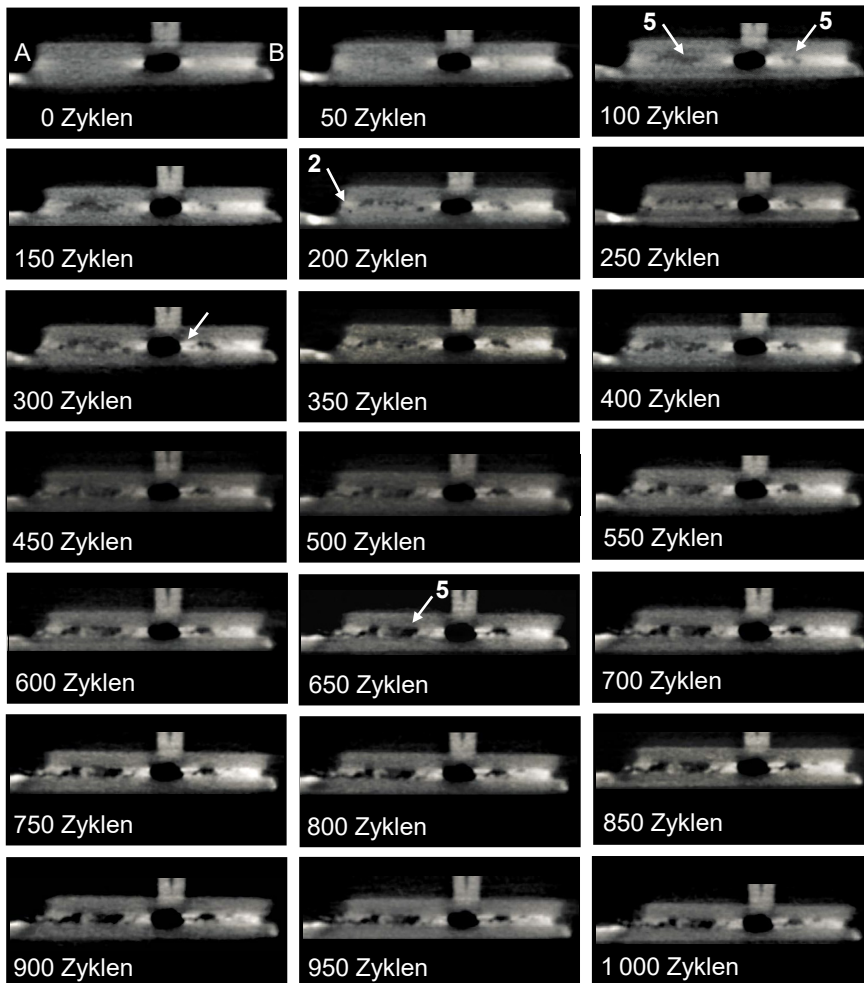


Bild 5-13: Vertikale CT-Schnittebenen von LED#A5 in jeweils 50 Zyklenritten während des Luft/Luft-Temperaturchocktests

Trotz des Risswachstums bestehen die LEDs den Light-on-Test bis auf zwei Ausnahmen. Eine LED mit niedrigem Porenanteil fällt bereits nach 250 Temperaturschocks aus und eine andere mit mittleren Porenanteil leuchtet nach 1 000 Temperaturschocks nicht mehr.

Aus der CT-Dokumentation der Rissausbreitung kann geschlossen werden, dass sowohl bei porenarmen als auch bei porenreichen Lötverbindungen die Poren und der Lötstellenrand Ausgangspunkte für Risse sind. Mit dieser Erkenntnis können Ergebnisse wie beispielsweise aus [2] konkretisiert werden, die mit Hilfe von metallographischen Schliffrissen gewonnen wurden und besagen, dass die Risse von den Ecken der Lötstelle ausgehen, weil hier die größte Spannungskonzentration auftritt.

Somit war es durch die schrittweise Dokumentation des Rissentstehungsprozesses mit CT möglich, den Startpunkt und die Anzahl der Zyklen herauszufinden, bei denen Risse erstmals nachgewiesen werden können. Beim geringen wie auch beim hohen Porenanteil ist die Deformation der Porengeometrie und des Lötstellenrandes bereits nach 50 bis 100 Zyklen deutlich zu erkennen. Nach 100 bis 150 Zyklen treten sogar erste Risse am Lötstellen- und Porenrand sowie innerhalb des Lotes auf. Folglich kann der Startpunkt des Risses eine Pore, der Rand der Lötverbindung oder eine Stelle innerhalb des Lotes sein. Da sich die Risse ausgehend von Poren und dem Lötstellenrand miteinander verbinden, kann der Startpunkt des Risses nach der Belastung nicht mehr zurückverfolgt werden. Je mehr Poren in der Lötstelle vorhanden sind, desto mehr Risse können entstehen. Allerdings garantiert umgekehrt ein geringer Porenanteil nicht, dass sich keine Risse entwickeln. Zwar führen weniger Poren zwangsläufig dazu, dass sich weniger Risse ausgehend von Poren bilden, aber die Risse können auch innerhalb des Lotes entstehen.

Die Untersuchungen zeigten, dass ein ungleichmäßiger Lotspalt, der bei einer verkippten LED auftritt, zu flächenartigen Rissen an der dünnen Lotspaltseite führt. Die Risse können sogar so sehr anwachsen bis sie die Dicke des Lotspalts erreicht haben. Folglich begünstigt ein ungleichmäßiger Lotspalt das Risswachstum an der dünneren Seite. Dies wird zusammen mit der kritischen Lotspaltdicke in Abschnitt 6.3 mittels FEM-Simulationen näher untersucht.

Die Untersuchung von Vandevelde et al. [138] demonstrierte bereits mit FEM-Simulationen, dass sich bei verkippten LEDs Risse schneller ausbreiten, wenn sie von der dünneren der beiden Lotspaltseiten ausgehen. Dagegen wachsen sie gleichschnell von beiden Seiten, wenn die LED nicht verkippt ist. Die Simulationsergebnisse zeigen auch, dass die verkippten und

nicht verkippten LEDs bei der gleichen Anzahl von Zyklen in einem vollständigen Bruch enden und es demnach keinen Unterschied in der zu erwarteten Lebensdauer gibt. Dieses Ergebnis wird in der Studie mittels Experimenten eindeutig bestätigt.

Dahingegen spielt die Verkipfung eine wichtige Rolle, wenn aus mehreren LEDs Module aufgebaut werden, bei denen Gestaltungsrichtlinien einen einheitlichen Abstrahlwinkel für die einzelnen LEDs fordern.

### 5.1.1.3 Untersuchung der Mikrostruktur

In den vorangegangenen Abschnitten konnte mittels CT-Analysen gezeigt werden, dass Risse auch innerhalb der Lötverbindung entstehen, ohne dass Poren beteiligt sind. Grund hierfür ist die Beschaffenheit des Lotgefüges. Mit zunehmender Miniaturisierung und mit steigender Leistungsaufnahme muss die Lötverbindung starke Dauerbeanspruchungen und hohe Temperaturen aushalten, sodass ihre Ermüdung ein kritischer Punkt in der Bestimmung der Lebensdauer geworden ist.

Die Ermüdung der Lötverbindung hängt von verschiedenen Verformungs- und Bruchprozessen ab, wie der Diffusion von Atomen, der Bewegung von Versetzungen, Aktivitäten an den Korngrenzen und der Entstehung von Ermüdungsrisen [71]. Der thermische Ermüdungs- und Verformungsprozess bewirkt bei den polykristallinen Lotlegierungen die Bildung, Annihilation und Bewegung von Punkt- und Liniendefekten innerhalb des Kristallgitters. Korngrenzen können sich aufgrund dynamischer Rekristallisationsprozesse bei hohen Betriebstemperaturen bewegen. Diese Bewegungen führen zu Versetzungen mit lokalen Spannungen, wodurch Mikrorisse eingeleitet werden. Diese wachsen zu Makrorissen an, die schließlich zu Ermüdungsdefekten führen [139].

Um die Elementzusammensetzung der Mikrostruktur zu erhalten, wurden die Proben zunächst mit einer Nitalsäure geätzt, um die intermetallischen Phasen hervorzuheben, und nachfolgend die Lötverbindungen mittels EDX untersucht. Das Ergebnis der EDX-Analyse wurde anschließend mit Literaturstellen verglichen und bestätigt.

In der REM-Aufnahme der Bild 5-14a ist zu sehen, dass sich an der Lot-/Substrat-Grenzfläche die intermetallische  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ -Phase gebildet hat. Das Gold der Oberflächenmetallisierung löst sich bereits im flüssigen Lot während des Lötprozesses auf, sodass die Nickel-Schicht frei liegt. Die Nickel-Schicht dient als Diffusionsbarriere, damit keine Kupferatome aus dem Kupferpad an die Grenzfläche zum Lot gelangen können. Das Kupfer

und das Zinn in der  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ -Phase stammen demnach aus der Lotlegierung sowie das Nickel aus der Ni/Au-Metallisierung [77]. Des Weiteren besteht die Mikrostruktur innerhalb des SAC105-Lots aus einer Sn-Matrix, in der sich  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ -Phasen und  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ -Partikel befinden [65].

In Bild 5-14 sind darüber hinaus typische Rissverläufe nach 1000 Luft/Luft-Temperaturschocks zu erkennen. Die Risse breiten sich meistens mittig und mit wenigen Ausnahmen leiterplatten- oder bauteilseitig im Lot aus. Bei letzterem verlaufen die Risse in der Nähe der IMCs und tangieren diese stellenweise.

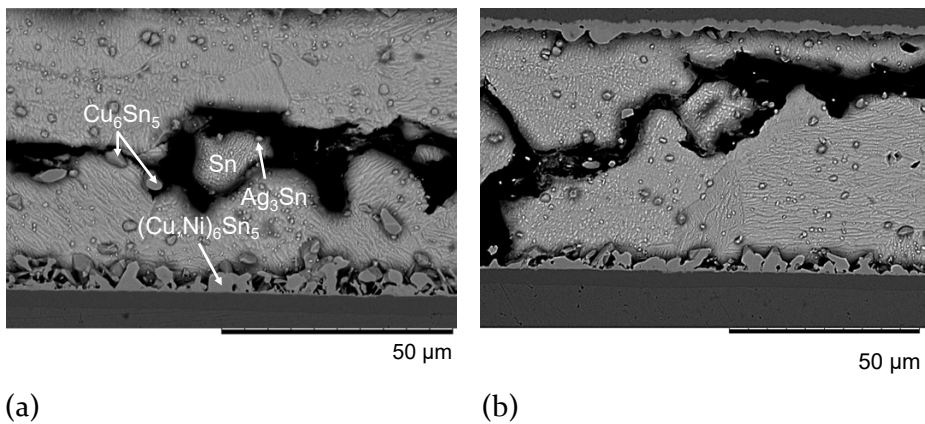


Bild 5-14: REM-Aufnahmen des Gefüges nach 1000 Luft/Luft-Temperaturschocks (a) EDX-Analyse und Rissverlauf mittig durch das Lot, (b) stellenweiser Rissverlauf nahe der intermetallischen Phasen

In Bild 5-14 aber auch schon in Bild 5-3 und Bild 5-4 ist zu sehen, dass der Riss wellenartig durch die Sn-Matrix verläuft und sich sowohl  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ - als auch  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ -Partikel am Riss befinden. Die  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ - oder  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ -Partikel können durchaus den Rissverlauf beeinflussen. Die Beteiligung intermetallischer Partikel an der Rissausbreitung wurde bereits in der Literatur beschrieben [79], [140]. Die Untersuchungen in [139] bestätigen, dass die Risse größtenteils interkristallin im Lot verlaufen. Stellenweise breitet sich der Riss nahe der intermetallischen Phase aus, befindet sich aber dennoch im Lot. In [139] konnte weiter nachgewiesen werden, dass die Korngrenzen nahezu parallel zur IMC verlaufen. Diese besondere Korngrenzenorientierung sowie die interkristalline Rissausbreitung scheinen der Grund dafür zu sein, dass die Risse sich in der Nähe der intermetallischen Phasen im Lot und nicht direkt an ihnen ausbreiten.

Aufgrund der Auflösungsgrenze des hier verwendeten REMs konnten Vorgänge im Gefüge wie Versetzungsbewegungen und dadurch entstehende interkristalline Risse innerhalb der Sn-Matrix nicht nachgewiesen werden. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle auf bereits veröffentlichte Untersuchungen verwiesen werden, die dies belegen [71], [69], [139].

Im Folgenden werden die Lötverbindungen hinsichtlich ihrer mechanischen Festigkeit mit Hilfe der Scherfestigkeitsprüfung in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil beurteilt.

#### **5.1.1.4 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil**

Risse in Lötverbindungen sind ein Hauptgrund für die Herabsetzung der Scherkräfte, jedoch kann sich diese auch ohne Rissbildung aufgrund der alterungsbedingten Änderungen der Mikrostruktur reduzieren [141]. Die folgenden Untersuchungen decken vor allem den Einfluss von Poren auf die Scherkräfte auf.

Zur Untersuchung der mechanischen Festigkeit wurden die Lötverbindungen zunächst durch Luft/Luft-Temperaturschocks zwischen  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$  belastet und anschließend nach 0, 500 und 1 000 Zyklen geschert. Die Scherfestigkeitsprüfung erfolgte für den geringen, mittleren und hohen Porenanteil. Das Diagramm in Bild 5-15 zeigt die mittleren Scherkräfte nach 0, 500 und 1 000 Zyklen für jeden Porenanteil. Hierbei stellen die Fehlerbalken die Student- $t$ -Verteilung dar.

Bild 5-15 zeigt den Abfall der maximalen Scherkräfte von 0 zu 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks, der je nach Porenanteil zwischen 53 % bis 60 % liegt. Nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks sind die maximalen Scherkräfte des geringen und mittleren Porenanteils annähernd gleich groß. Daraus folgt, dass die Auswirkung des Porenanteils auf die Scherkräfte erst bei einem Porenanteil größer als 15 % als kritisch bewertet werden kann. Hier vermindern sich die Scherkräfte gegenüber dem geringen Porenanteil bei 0 Zyklen um 29 % und nach 1 000 Zyklen um 34 %. Bei dem mittleren Porenanteil reduzieren sich die maximalen Scherkräfte bei 0 Zyklen um 10 % und nach 1 000 Zyklen um lediglich 2 % im Vergleich zum geringen Porenanteil.



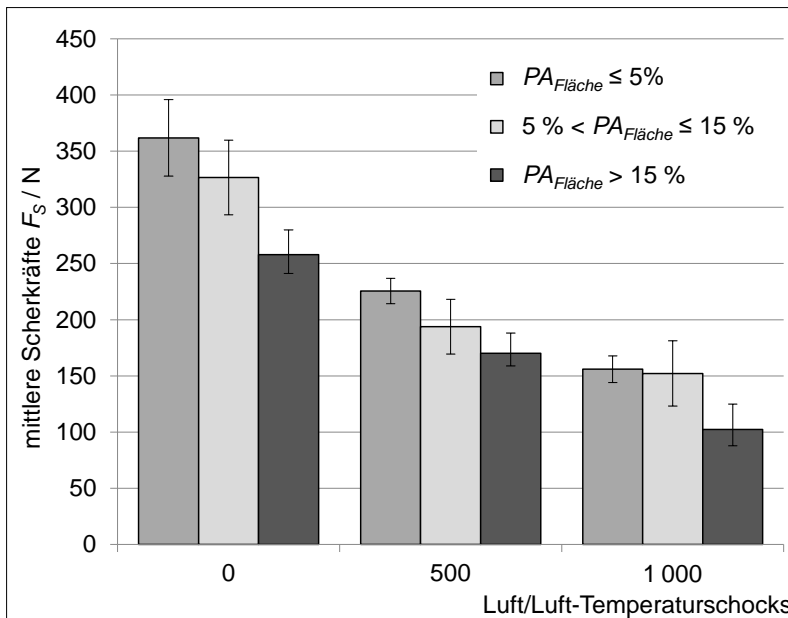


Bild 5-15: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe A mit klassifizierten Porenanteilen nach Luft/Luft-Temperaturschocks von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

Nach der Scherung der Lötverbindungen erfolgte die Analyse der Ausfallarten nach der Norm DIN EN 62137-1-2, welche die Ausfallart nach der Position des Bruches aufgrund der Scherung einteilt [134]. Bild 5-16 zeigt das Bruchverhalten der gescherten Lötverbindungen. Sowohl an der LED (siehe Bild 5-16a) als auch an der Leiterplatte (siehe Bild 5-16b) sind Rückstände des Lotes zu erkennen. Demnach erfolgte der Bruch direkt durch das Lot.

Die Scherergebnisse führen zu dem Resultat, dass eine erhebliche Reduzierung der Zuverlässigkeit und folglich der Lebensdauer erst bei einem Porenanteil von über 15 % beginnt. Deshalb wird bei Testbaugruppe B auf einen mittleren Porenanteil verzichtet und ein höherer Porenanteil untersucht.

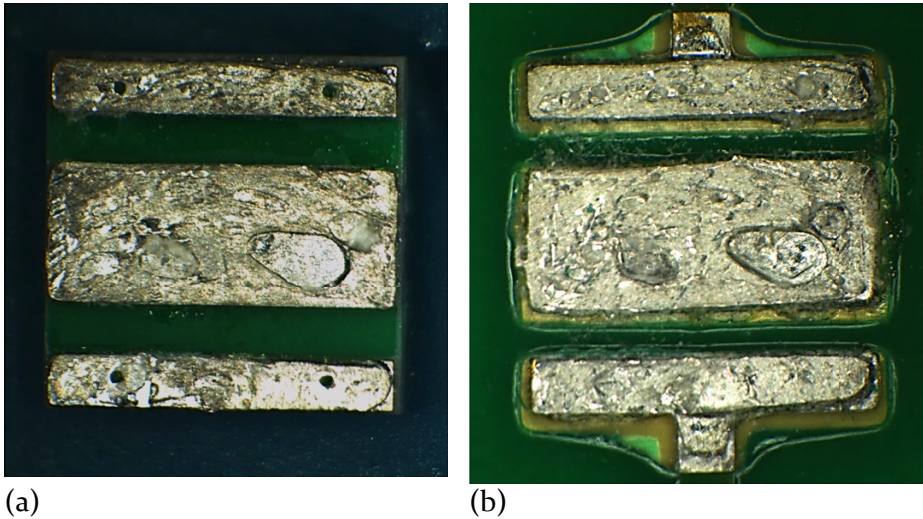


Bild 5-16: Bruchverhalten der Lötverbindungen der Testbaugruppe A nach der Scherung (a) bauteilseitig, (b) leiterplattenseitig

### 5.1.2 Beurteilung der Testbaugruppe B

Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, wurden die Testbaugruppen von Typ B in zwei Klassen eingeteilt, in eine mit einem geringen und eine mit einem hohen Porenanteil. Ein mittlerer Porenanteil wurde nicht betrachtet, da die Ergebnisse der Testbaugruppe A zeigen, dass dieser eher unkritisch zu bewerten ist. Außerdem wurde bei Testbaugruppe B ein weit höherer Porenanteil ( $PA_{\text{Fläche}} \geq 25\%$ ) als bei Testbaugruppe A ( $PA_{\text{Fläche}} \geq 15\%$ ) untersucht.

#### 5.1.2.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \geq 25\%$

In Bild 5-17a ist die horizontale CT-Schnittebene von LED#B1 mit einem Porenflächenanteil von 26 % vor und nach 1000 Luft/Luft-Temperaturschocks dargestellt. Die Alterung aufgrund der Temperaturschocks ist deutlich zu erkennen. Im Gegensatz zur Testbaugruppe A belief sich die Haltedauer bei Testbaugruppe B nur auf 15 Minuten und war also nur halb so lang. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.1.1 zeigt, dass trotz der kürzeren Haltedauer bei den Maximaltemperaturen dieselben qualitativen Fehlerbilder aufgrund der thermisch verursachten Spannungen auftreten. Die Resultate deuten darauf hin, dass im vorliegenden Fall eine 15-minütige Haltezeit eine ähnliche Kriechschädigung hervorruft wie eine 30-minütige Haltezeit bei der Minimal- und Maximaltemperatur.

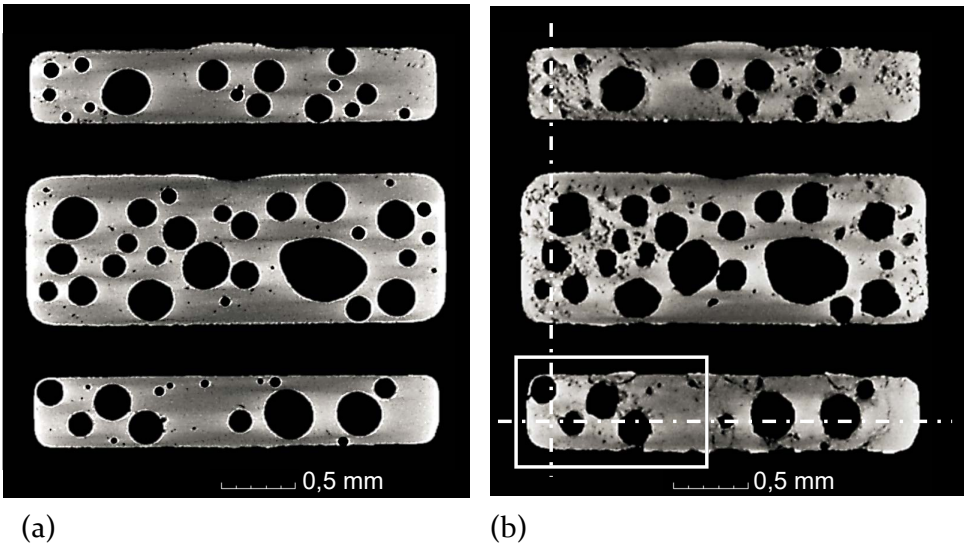
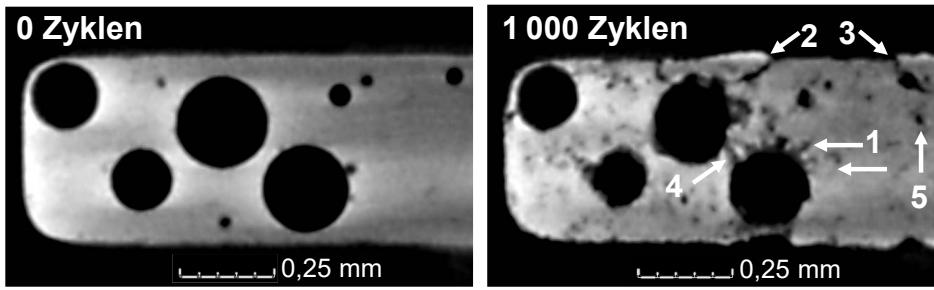
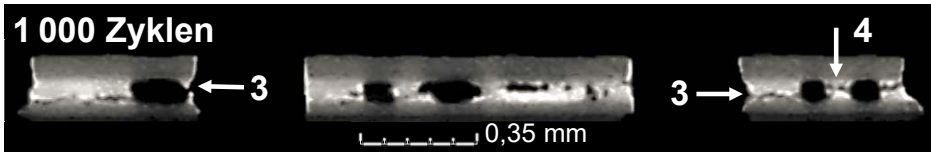


Bild 5-17: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#B1 (a) vor und (b) nach 1000 Luft/Luft-Temperaturchocks mit Position der Detailansicht und der vertikalen CT-Schnittebenen

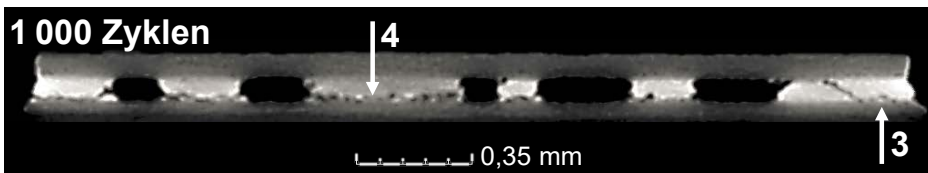
In Bild 5-17b sind der Bereich und die vertikalen CT-Schnittebenen eingezeichnet, die im Folgenden diskutiert werden. Bild 5-18 veranschaulicht die Fehlerbilder von LED#B1 nach 1000 Luft/Luft-Temperaturchocks, die dieselben wie diejenigen von der Testbaugruppe A sind. So zeigt der Fehlercode 1 in Bild 5-18a Risse, die nach 1000 Temperaturschocks von der Pore ausgehen, und Fehlercode 2 Risse, die vom Lötstellenrand ausgehen. Der Vergleich mit der unbelasteten Probe bestätigt, dass vorher keine sichtbaren Vorschädigungen in der Lötstelle vorhanden waren. Den Fall, dass sich Risse vom Lötstellenrand mit der nächstgelegenen Poren verbinden, stellt Fehlercode 3 dar. Darüber hinaus breiten sich Risse zwischen zwei Poren aus (siehe Fehlercode 4) und sie entstehen direkt im Lot ohne den Einfluss von Poren (siehe Fehlercode 5). In Bild 5-18b und Bild 5-18c ist in den vertikalen CT-Schnittebenen deutlich zu erkennen, wie Risse nach 1000 Zyklen einzelne Poren miteinander verbinden (siehe Fehlercode 4) beziehungsweise wie sie vom Lötstellenrand zur nächsten Pore wandern (siehe Fehlercode 3).



(a)



(b)



(c)

Bild 5-18: (a) Gegenüberstellung der Detailansichten von LED#B1 vor und nach 1000 Luft/Luft-Temperaturstößen, (b), (c) vertikale CT-Schnittebenen nach 1000 Zyklen

Die Risse verlaufen größtenteils mittig im Lot, aber auch am oberen und unteren Rand der Lötstelle (siehe Bild 5-18b, Bild 5-18c, Bild 5-19). In Bild 5-19 sind die vertikale CT-Schnittebene und das zugehörige Lichtmikroskop-Bild des metallographischen Schliffs von LED#B2 einander gegenübergestellt. Ausgeprägte Risse lassen sich gut mit CT darstellen. Der Vergleich mit dem metallographischen Schliff zeigt jedoch, dass feine Risse aufgrund der Auflösungsgrenze des hier verwendeten Computertomographen kaum darstellbar sind (siehe Markierung in Bild 5-19b). In der REM-Aufnahme desselben Schliffs (siehe Bild 5-19c) können solche feinen Risse hochauflösend dargestellt werden. Die REM-Aufnahme belegt, dass der hier betrachtete Riss nicht entlang der intermetallischen Phasen sondern im Lot verläuft.

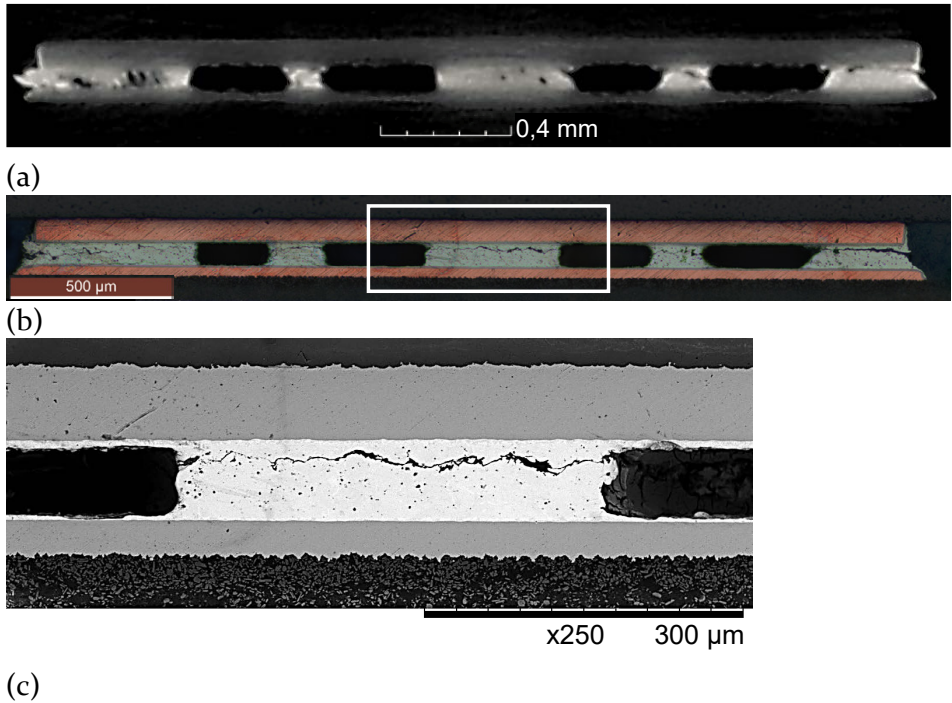


Bild 5-19: Gegenüberstellung für LED#B2 nach 1000 Luft/Luft Temperaturschocks (a) vertikale CT-Schnittebene, (b) Lichtmikroskop-Bild des metallographischen Schliffs, (c) REM-Aufnahme an demselben Schliff

### 5.1.2.2 Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \leq 5 \%$

Die in Bild 5-20 dargestellte Lötverbindung von LED#B3 hat einen Porenanteil von 5 %. Deutlich zeigt sich hier nach 1000 Luft/Luft-Temperaturschocks, dass sich direkt im Lot flächenartige Risse ausgebildet haben. Diese Rissart ist ebenfalls bei Testbaugruppe A an der dünneren Lotspaltseite bei verkippten LEDs aufgetreten (siehe Abschnitt 5.1.1.2). In Bild 5-20b sind wieder die Detailansicht und die vertikalen CT-Schnittebenen von LED#B3 eingezeichnet, die nachfolgend näher betrachtet und diskutiert werden.

Der Ausgangszustand der Lötstelle bei 0 Zyklen zeigt in Bild 5-21a, dass neben den drei großen Poren hier auch viele Mikroporen entstanden sind, die während der Überdruckphase in der Lötverbindung verblieben sind. Ein Grund dafür können die im Vergleich zur Testbaugruppe A unterschiedlichen Flussmittelsysteme und Lötprofile sein. Nach 1000 Luft/ Luft-Tempe-

ratursschocks haben sich Risse an den Porenrändern gebildet (siehe Fehlercode 1). Der ungleichmäßige Lötstellenrand ist ein Hinweis dafür, dass sich dort Risse befinden (siehe Fehlercode 2).

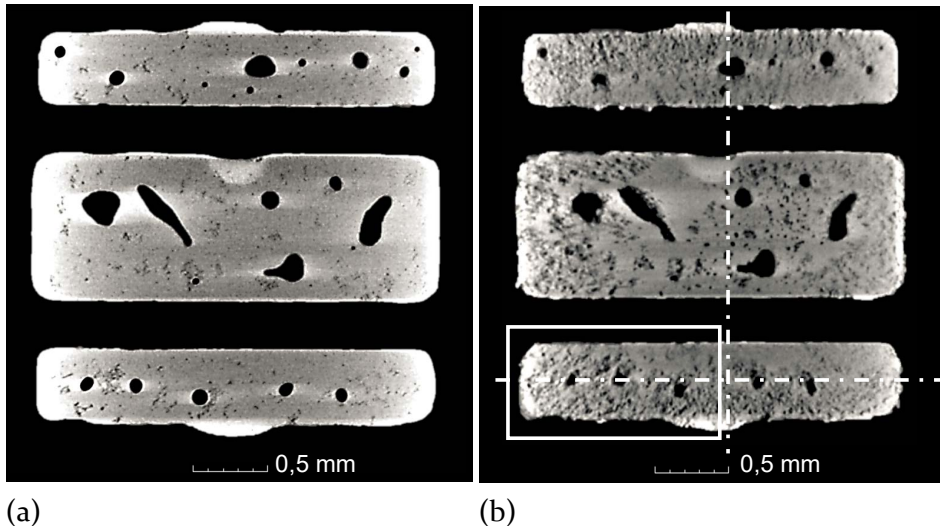
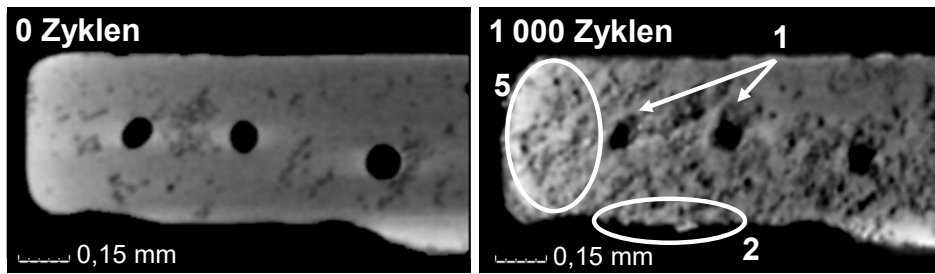


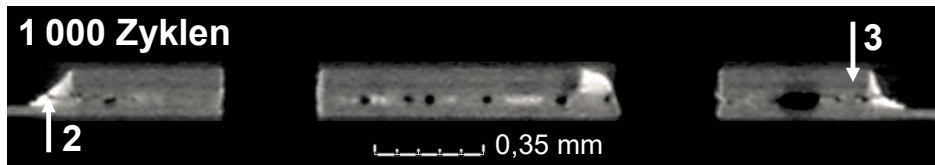
Bild 5-20: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#B3 (a) vor und (b) nach 1000 Luft/Luft-Temperatursschocks mit Position der Detailansicht und der vertikalen CT-Schnittebenen

In Bild 5-21b zeigt sich ein solcher Riss dann an Fehlercode 2 im Detail. Die Lötstellenqualität ist größtenteils von den flächigen Rissen im Lot geprägt (siehe Fehlercode 5). Die Dicke des Lotspalts beträgt rechts 45  $\mu\text{m}$  und links 55  $\mu\text{m}$ , womit sich ein Verkipfungswinkel der LED von  $0,2^\circ$  ergibt. In Bild 5-18c misst der Verkipfungswinkel ebenfalls  $0,2^\circ$ , wobei der Lotspalt rechts 60  $\mu\text{m}$  und links 70  $\mu\text{m}$  dick ist. Folglich ist die Ursache für die flächigen Risse nicht das ungleichmäßige Lotvolumen, sondern die kleine Lotspaltdicke. Da Poren ein zusätzliches Volumen im Lot darstellen [44], haben deshalb die Lötverbindungen mit einem kleinen Porenanteil auch eine geringere Lotspaltdicke und neigen daher eher zu flächigen Rissen. Im Abschnitt 6.3 wird die kritische Lotspaltdicke durch FEM-Simulationen ermittelt. In Bild 5-21b und Bild 5-21c sind in den vertikalen CT-Schnittebenen die Fehlerarten 3 und 4 ersichtlich. Risse verlaufen hier zwischen Lötstellenrand und Pore (siehe Fehlercode 3) oder sie verbinden einzelne Poren miteinander (siehe Fehlercode 4).





(a)



(b)

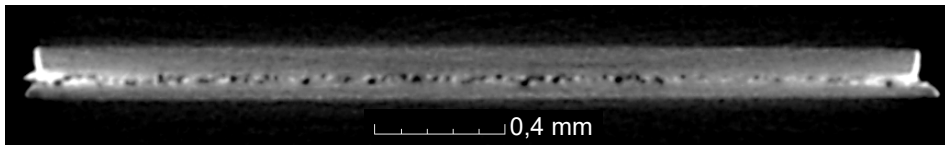


(c)

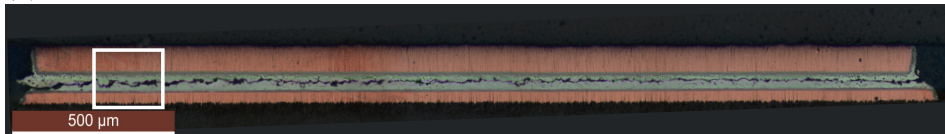
Bild 5-21: (a) Gegenüberstellung der Detailansichten von LED#B3 vor und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks, (b), (c) vertikale CT-Schnittebenen nach 1 000 Zyklen

In Bild 5-22 ist neben der vertikalen CT-Schnittebene von LED#B3 der zugehörige metallographische Schliff zu sehen. Die Risse ziehen sich auch ohne die Präsenz von Poren durch die gesamte Länge der Lötverbindung.

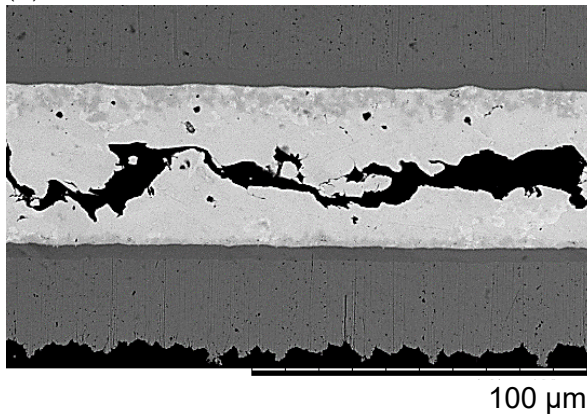
Trotz solcher Fehlerbilder leuchten die LEDs nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks noch. Das Lot stellt demnach immer noch eine ausreichende Kontaktierung zwischen Bauteil und Leiterplatte dar, durch die der Strom fließen kann. Anhand der REM-Aufnahme an demselben Schliff in Bild 5-22c ist zu erkennen, dass auch hier die Risse größtenteils mittig durch das Lot verlaufen.



(a)



(b)



(c)

Bild 5-22: Gegenüberstellung für LED#B3 nach 1 000 Luft/Luft Temperaturschocks (a) vertikale CT-Schnittebene, (b) Lichtmikroskop-Bild des metallographischen Schliffs, (c) REM-Aufnahme an demselben Schliff

Die Testbaugruppe B weist im Wesentlichen die gleichen Fehlerbilder wie die Testbaugruppe A auf. Die flächigen Risse sind jedoch bei Testbaugruppe B stärker ausgeprägt. Die Lotspaltdicken<sup>20</sup> und der maximale Unterschied der Lotspaltdicke  $\Delta d$  innerhalb einer Lötverbindung sind in Tabelle 5-4 für verschiedene Porenanteile dargestellt.

<sup>20</sup> Die Lotspaltdicke wurde in der Mitte der Lötverbindung gemessen.



Tabelle 5-4: Durchschnittliche Lotspaltdicke und maximaler Unterschied der Lotspaltdicke innerhalb einer Lötverbindung von Testbaugruppe A und B

Poren- anteil	Testbaugruppe A		Testbaugruppe B	
	Lotspalt- dicke $d$	Lotspaltdicken- unterschied $\Delta d$	Lotspalt- dicke $d$	Lotspaltdicken- unterschied $\Delta d$
gering	72 $\mu\text{m}$	48 $\mu\text{m}$	42 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$
mittel	75 $\mu\text{m}$	43 $\mu\text{m}$	-	-
hoch	90 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	62 $\mu\text{m}$	19 $\mu\text{m}$

Bei den Lötverbindungen mit einem geringen Porenanteil ist der Lotspalt bei Testbaugruppe B im Durchschnitt 30  $\mu\text{m}$  dünner als bei Testbaugruppe A. Bei beiden Testbaugruppen sind die Lotspaltdicken bei einem geringen Porenanteil niedriger als bei einem hohen. Der Grund dafür liegt darin, dass Poren zum Gesamtvolumen beitragen [44]. Die Diskrepanz in der Lotspaltdicke zwischen Testbaugruppe A und B erklärt sich aus den unterschiedlichen Schablonendicken (150  $\mu\text{m}$  beziehungsweise 120  $\mu\text{m}$ ) beim Pastendruck, der Bestückmethode (manuell beziehungsweise automatisch) sowie aus den verschiedenen Prozessanlagen und -parametern. Bei der Gegenüberstellung der Lotspaltdickenabweichungen beider Testbaugruppen muss hervorgehoben werden, dass bei Testbaugruppe A eine manuelle Bestückung erfolgte und die Lotpaste teilweise im Ofen vorgetrocknet wurde. Letzteres führt dazu, dass bereits vor dem Löten leichtflüchtige Bestandteile in der Lotpaste entweichen konnten und deshalb die Lotpaste an Zähigkeit verloren hat. Aus diesem Grund neigen die LEDs weniger stark zur Verkipfung. Die vorgetrockneten Baugruppen sind hauptsächlich im hohen aber auch stellenweise im mittleren Porenanteil zu finden (siehe Abschnitt 3.2.1). Bei der Herstellung von Testbaugruppe B wurden solche Einflussparameter beseitigt, die Lotpaste wurde nicht vorgetrocknet und sie wurde automatisch bestückt. Die resultierende Verkipfung von Testbaugruppe B deckt sich mit der Theorie, dass Poren eine Verkipfung der Bauteile begünstigen [20].

### 5.1.2.3 Untersuchung der Mikrostruktur

In Bild 5-23 sind die Mikrostruktur und der Rissverlauf anhand ausgewählter REM-Aufnahmen dargestellt. Die Analyse des Gefüges erfolgte mittels REM-EDX und wurde anhand von Literaturdaten überprüft.

Bild 5-23a zeigt an der Grenzfläche zur Ni/Au-Metallisierung eine  $(\text{Cu,Ni})_3\text{Sn}_2$ -Phase und innerhalb der Sn-Matrix  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ - und  $(\text{Au,Ni})\text{Sn}_4$ -Partikel. Diese Phasen wurden in [79] ebenfalls bei einem SAC-Lot auf einer NiAu-Oberfläche nachgewiesen. Das Gold stammt aus der NiAu-Metallisierung, das sich während des Lötprozesses im Lot auflöst. Folglich bildet sich diese Phase nicht an der Grenzfläche aus. Bild 5-23 zeigt, dass die Risse nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks wellenförmig meist mittig durch das Lot verlaufen und sich die  $(\text{Au,Ni})\text{Sn}_4$ - und  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ -Partikel stellenweise an den Rissen befinden.

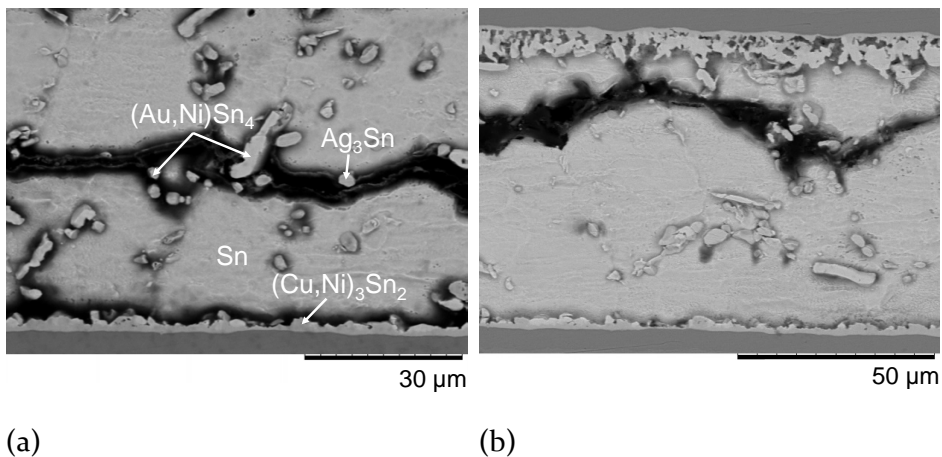


Bild 5-23: REM-Aufnahmen des Gefüges nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks (a) EDX-Analyse und Rissverlauf mittig durch das Lot, (b) Rissverlauf in der Nähe der intermetallischen Phase

Bei beiden Testbaugruppen hat sich gezeigt, dass Risse wellenförmig durch die Sn-Matrix verlaufen und es hier wahrscheinlich zu interkristallinen Rissen kommt [71], [139]. Intermetallische Partikel innerhalb der Sn-Matrix wie  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ -,  $(\text{Au,Ni})\text{Sn}_4$ - oder  $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ -Partikel können an dem Rissverlauf beteiligt sein [79], [140]. Nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks breiten sich die Risse bei beiden Testbaugruppen hauptsächlich mittig durch das Lot hindurch aus. In wenigen Fällen zeigt sich ein Riss in der Nähe der intermetallischen Phasen an der Grenzfläche, der diese teilweise

tangiert. Es konnte nicht beobachtet werden, dass ein Riss durchgehend entlang der Grenzfläche zur intermetallischen Phase verläuft. Dies wird auch in [139] bestätigt.

#### **5.1.2.4 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil**

Zur Beurteilung der mechanischen Festigkeit von Testbaugruppe B erfolgte auch hier die Scherfestigkeitsprüfung nach der Belastung mit 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks. Zum Vergleich wurde eine weitere Baugruppe herangezogen, bei der nicht die SAC105-Legierung, sondern die gängige SAC305-Lotlegierung verwendet wurde und die entsprechend Abschnitt 3.2.2 gelötet und klassifiziert wurde. Die Baugruppen mit der SAC305-Legierung zeigen die gleichen Fehlerbilder wie die Baugruppen mit dem SAC105-Lot, die in Abschnitt 1 und 5.1.2.2 beschrieben wurden.

Die Bild 5-24 zeigt die mittleren Scherkräfte für beide Lotpasten am Anfang und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks, wobei die Fehlerindikatoren die Student-*t*-Verteilung darstellen. Generell ist die Abnahme der maximalen Scherkräfte mit zunehmender Alterung zu erkennen. Bei der Gegenüberstellung des Porenanteils zeigen beide Lotpasten bei einem Porenanteil  $PA_{\text{Fläche}} \geq 25\%$  weitaus geringere Scherkräfte als mit einem Porenanteil  $PA_{\text{Fläche}} \leq 5\%$ . Der Rückgang der maximalen Scherkräfte von 0 zu 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks beträgt bei der SAC105-Paste bei den Baugruppen mit einem geringen Porenanteil 53 % und bei den Baugruppen mit einem hohen Porenanteil 67 %. Im Vergleich dazu verringert sich die maximale Scherkraft der SAC305-Legierung durch die Alterung bei dem niedrigen Porenanteil um 33 % und bei dem hohen Porenanteil um 62 %. Die Poren reduzieren die maximalen Scherkräfte bei der SAC105-Paste im Ausgangszustand um 30 % und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks um 51 %, während die Poren bei der SAC305-Paste die Scherkräfte im Ausgangszustand um 26 % und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks um 58 % vermindern. Die maximalen Scherkräfte sind für beide Lotpasten im Ausgangszustand nahezu identisch. Nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks weist die SAC105-Lotpaste im Vergleich zur SAC305-Lotpaste bei dem geringen Porenanteil um 33 % niedrigere Scherkräfte auf. Dies relativiert sich allerdings bei dem hohen Porenanteil, da hier der Unterschied zwischen den Scherkräften innerhalb der Fehlerbalken liegt.

Die Gegenüberstellung der Scherergebnisse der Testbaugruppe A (siehe Abschnitt 5.1.1.4) und denen der Testbaugruppe B zeigt, dass sich die maximalen Scherkräfte im Ausgangszustand um ungefähr 30 % durch die Poren

verringern. Dagegen reduzieren sich die maximalen Scherkräfte durch die Poren nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks um 34 % bei Testbaugruppe A und um 51 % bei Testbaugruppe B. Der geringe Porenanteil ist bei beiden Testbaugruppen mit  $PA_{Fläche} \leq 5\%$  etwa gleichgroß, während sich der hohe Porenanteil bei Testbaugruppe A auf  $PA_{Fläche} > 15\%$  und bei Testbaugruppe B auf  $PA_{Fläche} \geq 25\%$  beläuft. Hier zeigt sich noch einmal, dass mit höherem Porenaufkommen die Abnahme der mechanischen Festigkeit ausgeprägter ist.

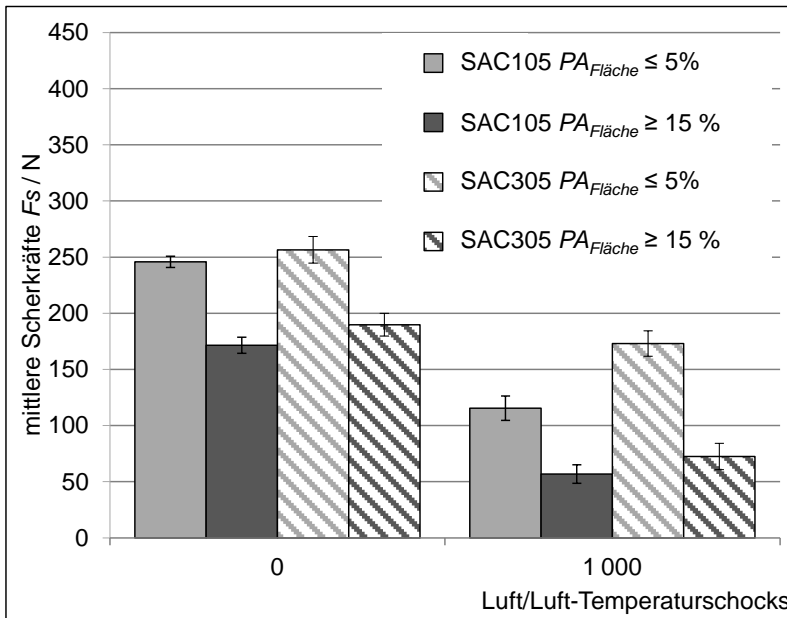


Bild 5-24: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe B mit klassifizierten Porenanteilen nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

Nachdem die Lötverbindungen gesichert wurden, erfolgte auch hier die Betrachtung der Ausfallarten nach der Norm DIN EN 62137-1-2 [134].

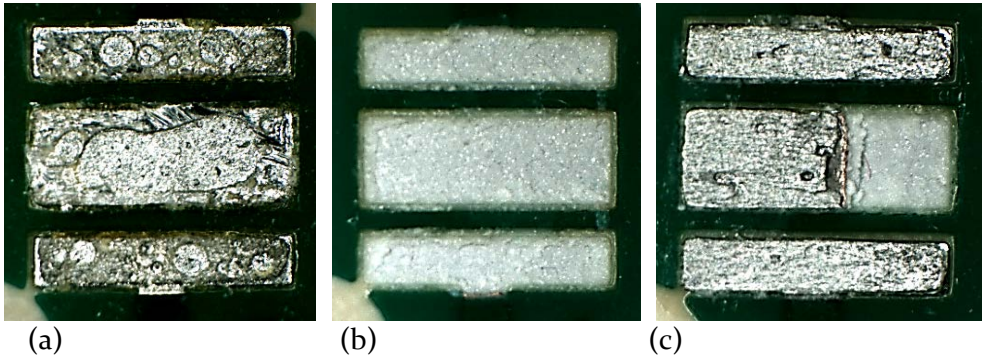


Bild 5-25: Bruchverhalten der Lötverbindungen der Testbaugruppe B nach der Scherung (a) im Lot, (b) an der Anschlussfläche, (c) Mischbruch

Bild 5-25 zeigt die Leiterplatte nach der Scherung und die unterschiedlichen Brucharten der Testbaugruppe B. Im Gegensatz zur Testbaugruppe A bricht diese nicht nur direkt im Lot (siehe Bild 5-25a), sondern auch an der Anschlussfläche der Leiterplatte (siehe Bild 5-25b) oder es kommt zu einem Mischbruch, der zum Teil im Lot und zum Teil an der Anschlussfläche erfolgte (siehe Bild 5-25c).

In Tabelle 5-5 ist das Bruchverhalten in Abhängigkeit der Lotlegierung, des Porenanteils und der Zyklenzahl eingeteilt. Es ist zu erkennen, dass sowohl bei der SAC105-Paste als auch bei der SAC305-Paste die Lötverbindungen mit geringem Porenanteil nach der Scherung vermehrt vollkommen oder zum Teil an der Anschlussfläche brechen. Nach der Belastung mit 1 000 Luft/Luft-Temperaturchocks brechen die Lötstellen größtenteils im Lot und vereinzelt in Form des Mischbruchs. Bei dem hohen Porenanteil der SAC105-Legierung verläuft sowohl bei 0 als auch nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturchocks der Bruch durch das Lot. Demgegenüber tritt bei der SAC305-Legierung mit einem hohen Porenanteil im Ausgangszustand der Bruch vermehrt im Lot oder als Mischbruch auf und nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturchocks alle Lötverbindungen im Lot brechen. Aufgrund dessen kann geschlussfolgert werden, dass bei dem geringen Porenanteil beide Legierungen im Ausgangszustand widerstandsfähiger sind als die Anschlussfläche der Leiterplattenmetallisierung. Bei der SAC305-Paste ist dies teilweise auch beim hohen Porenanteil der Fall.

Tabelle 5-5: Einteilung des Bruchverhaltens beim Schertest nach Lotlegierung, Porenanteil und Zyklenanzahl

Lotlegierung / Porenanteil	Zyklen	Bruch im Lot	Bruch an der Anschlussfläche	Mischbruch im Lot und an der Anschlussfläche
SAC <sub>105</sub> / $PA_{Fläche} \leq 5\%$	0	25 %	55 %	20 %
	1 000	95 %	0 %	5 %
SAC <sub>105</sub> / $PA_{Fläche} \geq 25\%$	0	100 %	0 %	0 %
	1 000	100 %	0 %	0 %
SAC <sub>305</sub> / $PA_{Fläche} \leq 5\%$	0	0 %	100 %	0 %
	1 000	71 %	0 %	29 %
SAC <sub>305</sub> / $PA_{Fläche} \geq 25\%$	0	40 %	7 %	53 %
	1 000	100 %	0 %	0 %

Die Scherergebnisse zeigen, dass die mechanische Festigkeit durch Poren stark vermindert wird. Nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks haben sich die maximalen Scherkräfte des hier untersuchten Porenanteils von  $PA_{Fläche} \geq 25\%$  bei der SAC<sub>105</sub>-Legierung um 51 % und bei der SAC<sub>305</sub>-Legierung um 58 % reduziert. Aus der Abnahme der Scherkräfte für einen Porenanteil von  $PA_{Fläche} \geq 25\%$  und somit der Verringerung der mechanischen Festigkeit resultiert, dass im Produktionsprozess ein Porenanteil von  $PA_{Fläche} \geq 25\%$  vermieden werden sollte. Der Porenanteil setzt sich aus allen drei Anschluss pads der LED zusammen, wobei das thermische Pad einen entscheidenden Beitrag daran hat. Das thermische Pad ist elektrisch neutral und dient der Wärmeableitung, sodass die elektrische Funktion der LED, außer bei einer Überhitzung, nicht gefährdet ist.

Inwiefern die Poren in den Lötverbindungen des thermischen Pads oder des Anoden- beziehungsweise Kathoden pads die mechanische Stabilität beeinflussen, wird in Kapitel 6 anhand von FEM-Simulationen überprüft.

## 5.2 Auswirkungen des flüssig/flüssig-Temperaturschocktests

Neben dem Luft/Luft-Temperaturschocktest erfolgte zusätzlich für Testbaugruppe A der flüssig/flüssig-Temperaturschocktest in Anlehnung an die Standards MIL-STD-883J und MIL-STD-202G [142], [143]. Bei diesem werden die Testbaugruppen für jeweils fünf Minuten in eine kalte Flüssigkeit von  $-30\text{ °C}$  und eine heiße Flüssigkeit von  $+125\text{ °C}$  getaucht, wobei die Transferzeit nur wenige Sekunden beträgt. Die Testbedingungen sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Als Flüssigkeit wurde Galden LS 200 verwendet.

Tabelle 5-6: Testbedingungen des flüssig/flüssig-Temperaturschocktest

Temperatur-schocktest flüssig/flüssig	Testbedingungen		Spezifikation
Testbaugruppe A	Temperaturbereich	$-30\text{ °C}$ bis $+125\text{ °C}$	MIL-STD-883J / 202G
	Haltezeit	5 min	
	Transferzeit	10 s	
	Zyklen	0, 500, 1 000	
	Anzahl der TBG	137 (47 davon CT)	

Bild 5-26 zeigt die Aufheiz- und Abkühlkurve des Luft/Luft- und flüssig/flüssig-Temperaturschocktests im Vergleich. Die Temperaturmessung erfolgte mittels Thermoelementen direkt an der Lötstelle und im Umgebungsmedium, also in der Ofenkammer beziehungsweise in der Galdenflüssigkeit. Es ist zu erkennen, dass sowohl bei der Aufheiz- als auch bei der Abkühlkurve die Lötstelle beim flüssig/flüssig-Temperaturschocktest die Umgebungstemperatur schneller annimmt, da Flüssigkeiten einen erheblich höheren Wärmeübergangskoeffizienten aufzeigen als Gase [144].

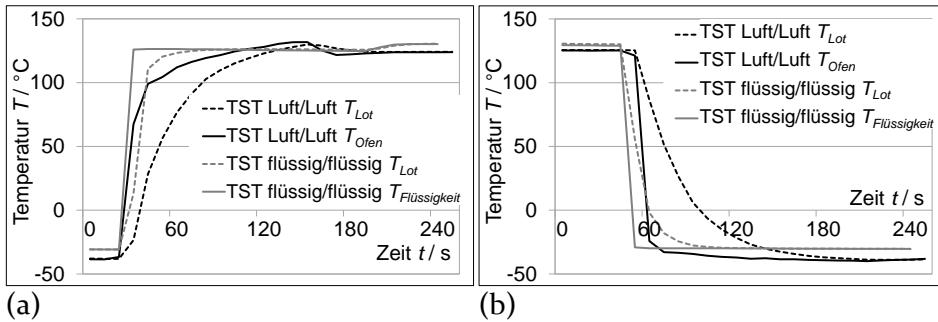


Bild 5-26: Vergleich der (a) Aufheiz- und der (b) Abkühlkurven des Luft/Luft- und flüssig/flüssig-Temperaturschocktests

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Testbaugruppe A für einen hohen und niedrigen Porenanteil vorgestellt, welche bereits in [64] veröffentlicht wurden.

### 5.2.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} > 15 \%$

Der Vergleich in Bild 5-27 zeigt die Auswirkung von 1000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks auf die Lötverbindungen von LED#A6 mit einem Porenanteil von 23 %. Die Lötverbindungen der zwei elektrischen Pads sind mehr als die des thermischen Pads geschädigt. Der Grund dafür liegt darin, dass in den Ecken größere Dehnungen als in der Mitte der Lötverbindung entstehen. Eine detaillierte Analyse der Dehnungsverläufe innerhalb der Lötverbindung wird in Kapitel 6 anhand der FEM-Simulation durchgeführt.

In Bild 5-27b sind die Positionen der Detailansicht und der vertikalen CT-Schnittebene von Bild 5-28 eingezeichnet. Dort ist zu sehen, wie stark sich die Porengeometrie nach 1000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks verformt hat und dass Risse an den Porenrändern entstanden sind (siehe Fehlercode 1). Fehlercode 5 kennzeichnet die Position, an der sich Risse direkt im Lot bilden, ohne dass sich Poren in der unmittelbaren Nähe befinden.



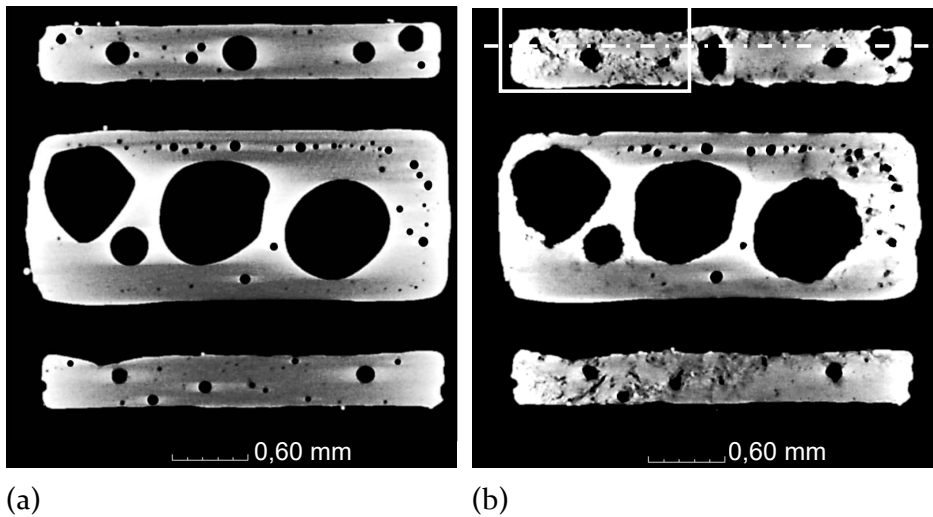
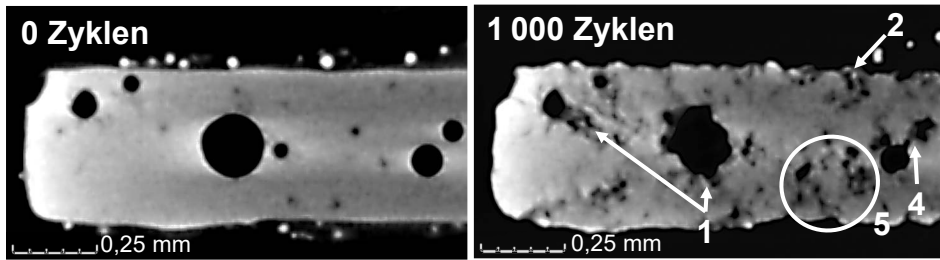


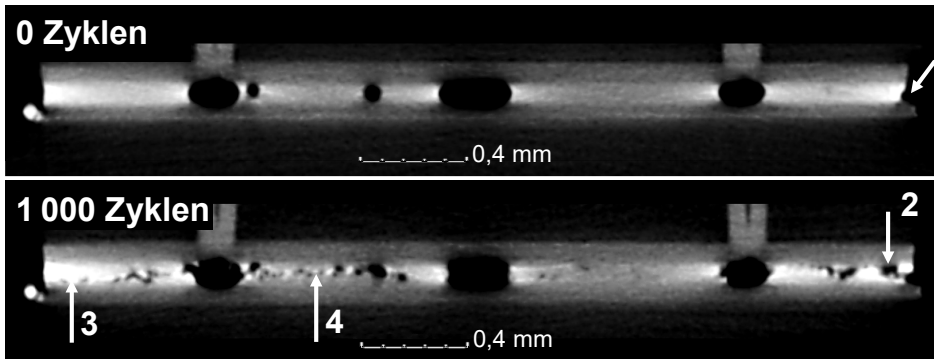
Bild 5-27: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A6 (a) vor und (b) nach 1000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks mit Positionen der Detailansicht und der vertikalen CT-Schnittebene nach [64]

Die Lotspaltdicke beträgt bei der LED#A6 auf der linken Seite 70  $\mu\text{m}$  und auf der rechten 80  $\mu\text{m}$ , sodass nur eine geringfügige Verkipfung der LED vorliegt. Auch an den Rändern der Lötverbindung sind deutlich Risse zu erkennen (siehe Fehlercode 2). Größtenteils entstehen die Risse am Lötstellenrand ohne jede Vorschädigung des Materials.

Der Fall in Bild 5-28b zeigt jedoch, dass die Einbuchtung am rechten Lötstellenrand der Startpunkt des Risses ist und diese die Rissentstehung begünstigt (siehe Fehlercode 2). An Fehlercode 3 verbinden sich Risse, die vom Lötstellenrand ausgehend, mit nahe gelegenen Poren. Darüber hinaus schließen sich zwei Poren durch Risse zusammen (siehe Fehlercode 4).



(a)



(b)

Bild 5-28: Gegenüberstellung von LED#A6 vor und nach 1 000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks (a) Detailansichten, (b) vertikale CT-Schnittebenen nach [64]

Die Risse verbinden auch einzelne Poren über eine größere Distanz miteinander, wie es bei der linken und der mittigen Pore im metallographischen Schliff der LED#A7 in Bild 5-29a geschehen ist. Mit wenigen Ausnahmen entstehen die Risse mittig an den Poren und verlaufen anschließend mittig im Lot (siehe Bild 5-29b) weiter. Stellenweise wandern die Risse auch zum oberen oder unteren Rand der Lötverbindung in Nähe der intermetallischen Phasen hin und berühren diese, ohne dauerhaft an den IMCs entlang zu laufen (siehe Bild 5-29c).

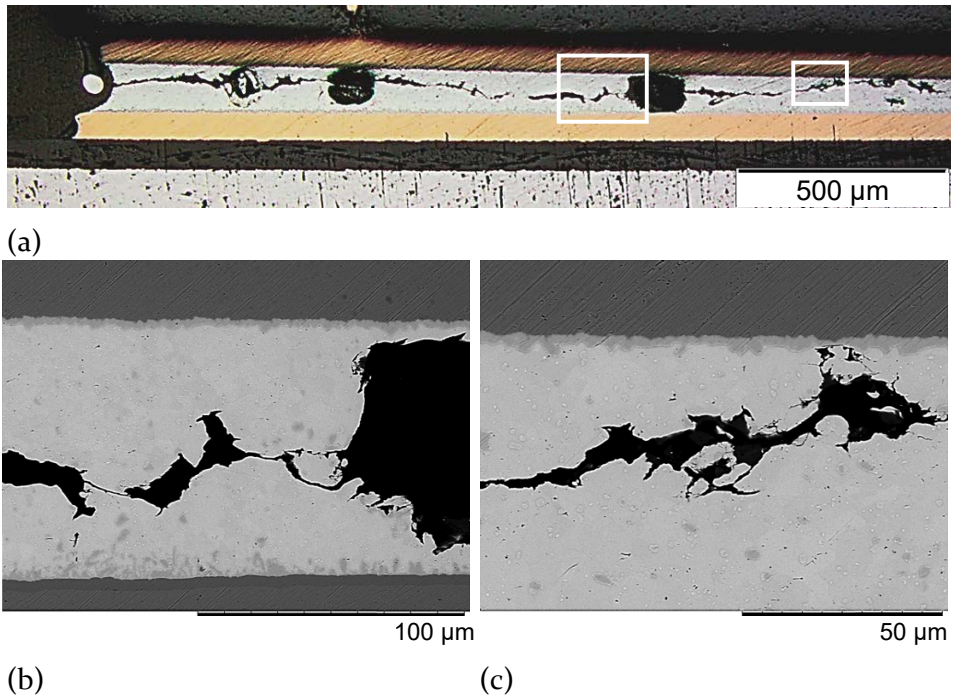


Bild 5-29: Gegenüberstellung für LED#A7 nach 1 000 flüssig/flüssig Temperaturschocks (a) Lichtmikroskop-Bild des metallographischen Schliffs, (b), (c) REM-Aufnahmen an demselben Schliff

### 5.2.2 Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \leq 5 \%$

LED#A8 mit einem Porenanteil von 4 % zeigt die gleichen Fehler nach 1 000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks wie die LED#A6 mit ihrem hohen Porenanteil, was in Bild 5-30b an den Fehlercodes 1 bis 5 gut zu sehen ist. Wie schon bei LED#A4 und LED#A5 nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks zu beobachten war (siehe Abschnitt 5.1.1.2), bilden sich auch hier Risse direkt im Lot, die bei porenarmen Lötverbindungen häufig vorkommen (siehe Fehlercode 5). Die Lotspaltdicke von LED#A8 beträgt auf beiden Seiten jeweils 60 µm und ist somit konstant. Die Lötverbindung des oberen Pads zeigt über die gesamte Länge Risse direkt im Lot, was auf eine zu dünne Lotspaltdicke hinweist, da diese LED nicht verkippt ist.

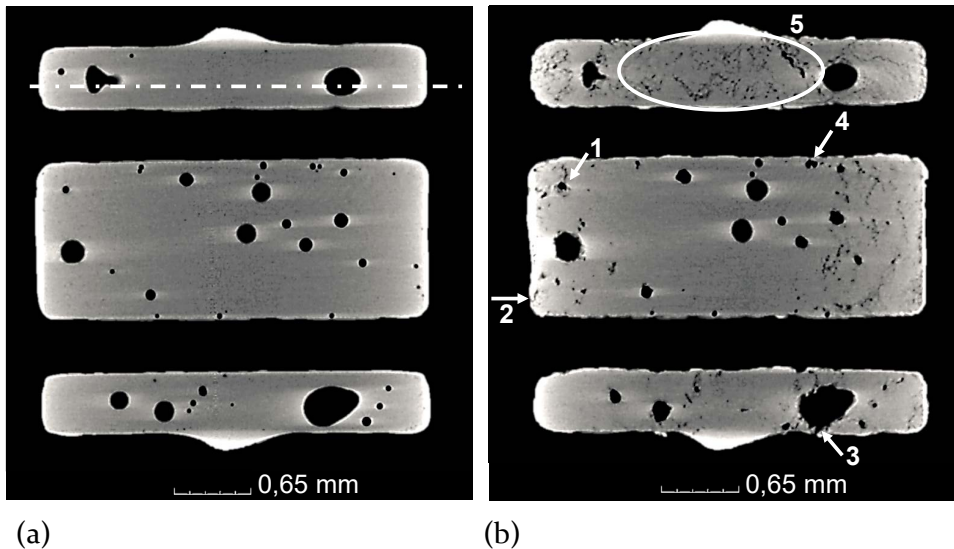


Bild 5-30: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A8 (a) vor und (b) nach 1 000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks

Bild 5-31a zeigt das Bild der vertikalen CT-Schnittebene, deren Position in Bild 5-30a eingezeichnet ist. Darauf ist gut zu erkennen, dass sich der Riss trotz des geringen Porenanteils fast vollständig über die gesamte Länge der Lötstelle erstreckt. Anhand eines weiteren Schnitts in der REM-Aufnahme in Bild 5-31b ist zu erkennen, dass auch hier die Risse zunächst mittig an den Poren entstehen und sich dann größtenteils mittig im Lot ausbreiten (siehe rechts von der Pore), stellenweise allerdings auch entlang der IMCs (siehe links von der Pore).

Wider Erwarten zeigen die Baugruppen des Luft/Luft- und flüssig/flüssig-Temperaturschocktests identische Fehlerbilder, obwohl die weitaus längere Haltezeit beim Luft/Luft-Temperaturschocktest (30 Minuten) eine stärkere Kriechdehnung verursachen sollte als der flüssig/flüssig-Temperaturschocktest mit einer kürzeren Haltezeit (5 Minuten). Inwiefern die unterschiedlichen Haltezeiten die mechanische Festigkeit beeinflussen, wird im Folgenden untersucht.

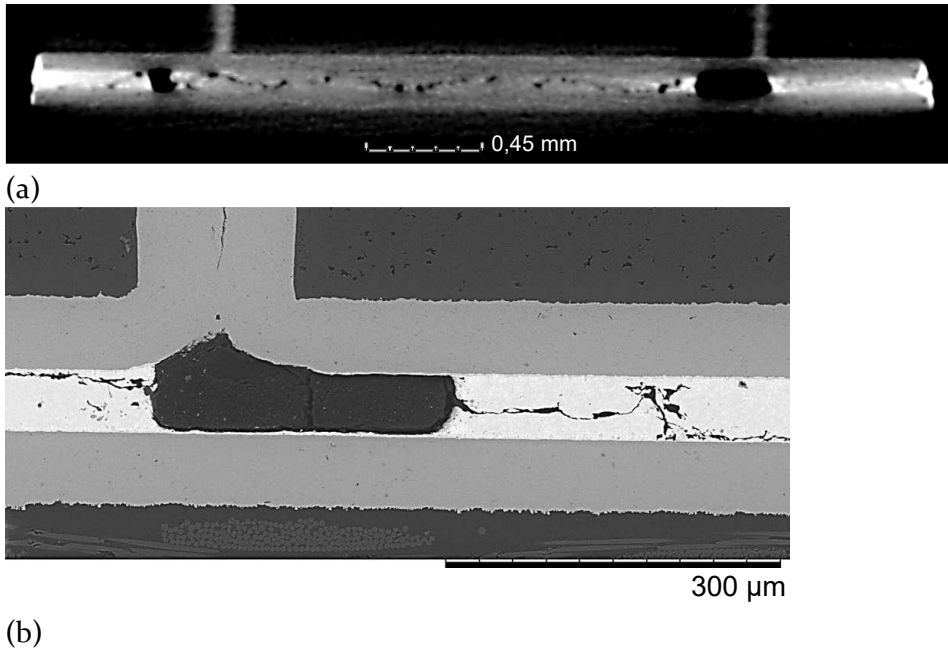


Bild 5-31: Gegenüberstellung für LED#A8 nach 1000 flüssig/flüssig Temperaturschocks (a) vertikale CT-Schnittebene, (b) REM-Aufnahme

### 5.2.3 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil

In Bild 5-32 sind die mittleren Scherkräfte nach 0, 500 und 1000 flüssig/flüssig-Temperaturschocks für die unterschiedlichen Porenanteile von Testbaugruppe A aufgetragen. Mit zunehmender Alterung sinken die maximalen Scherkräfte aufgrund des vorangeschrittenen Risswachstums, das in den vorigen Abschnitten aufgezeigt wurde. In Abhängigkeit vom Porenanteil wird eine steigende Abnahme der maximalen Scherkräfte festgestellt, wobei eine deutliche Reduzierung erst bei einem Porenaufkommen  $PA_{\text{Fläche}} > 15\%$  zu verzeichnen ist. Unter Berücksichtigung der Fehlerbalken erhält man für den mittleren Porenanteil  $5\% < PA_{\text{Fläche}} \leq 15\%$  ähnliche Scherkräfte wie für den geringen Porenanteil  $PA_{\text{Fläche}} \leq 5\%$ . Die Auswertung der Bruchflächen nach der Scherung zeigt, dass alle Lötverbindungen direkt im Lot gesichert wurden.

Die Gegenüberstellung der maximalen Scherkräfte des Luft/Luft- und flüssig/flüssig-Temperaturschocktests von Testbaugruppe A (siehe Bild 5-15 und Bild 5-32) weist kaum einen Unterschied in der Höhe der maximalen Scherkräfte auf. Die maximalen Scherkräfte des flüssig/flüssig-Temperaturschocktests sind hierbei in Abhängigkeit vom Porenanteil und von der

Zyklenzahl zwischen 1 % und 17 % höher als beim Luft/Luft-Temperatur-schocktest.

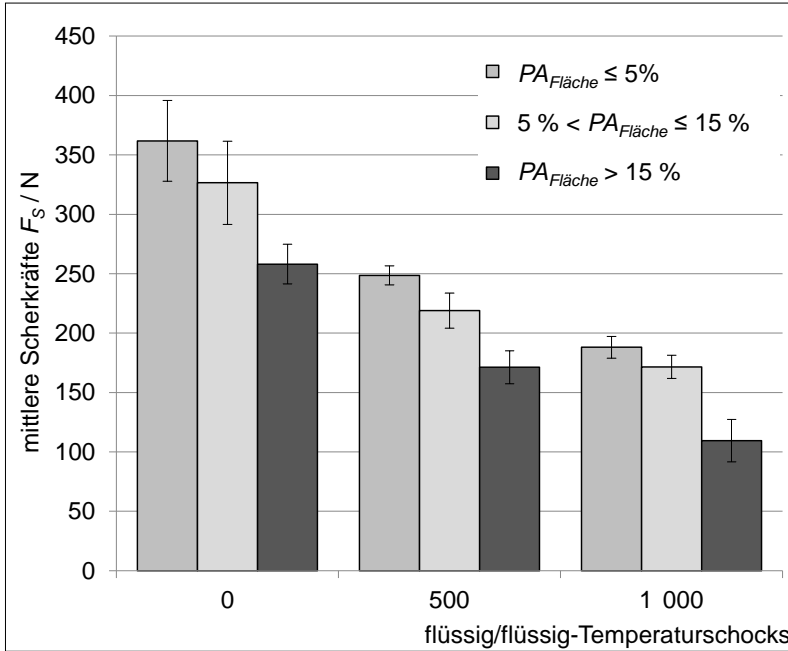


Bild 5-32: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe A mit klassifizierten Porenanteilen nach flüssig/flüssig-Temperaturschocks von -30 °C bis +125 °C, die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

Sowohl der Luft/Luft- als auch der flüssig/flüssig-Temperaturschocktest zeigen nach 1000 Zyklen dieselben Fehlerarten. Zu den Fehlerbildern gehören die Rissentstehung an der Pore, dadurch auch die Verformung der Porengeometrie, und die Rissbildung am Lötstellenrand. Die Risse verbinden anschließend einzelne Poren miteinander beziehungsweise sie breiten sich vom Lötstellenrand zur nächsten Pore aus. Auch ohne die Präsenz von Poren können sich Risse direkt im Lot bilden. Dieser Effekt wird durch einen dünnen Lotspalt begünstigt.

Nach 500 flüssig/flüssig-Temperaturschocks leuchten insgesamt vier LEDs mit mittleren und hohen Porenanteil nicht mehr. Dies ist allerdings nicht auf eine Schädigung der Lötverbindung zurück zu führen. Bereits bei der optischen Kontrolle fällt eine beschädigte LED-Linse auf. Weitere CT-Analysen ergeben, dass sich stellenweise die Bonddrähte gelöst haben.

Des Weiteren weisen die Baugruppen nach der Belastung mit den Luft/Luft- und flüssig/flüssig-Temperaturschocktests eine vergleichbare mechanische Festigkeit auf, da die maximalen Scherkräfte sich in der gleichen Größenordnung bewegen. Der flüssig/flüssig-Temperaturschocktest kann daher eine Alternative zum herkömmlichen Luft/Luft-Temperaturschocktest sein, da er bei gleicher Schädigung deutlich zeitsparender ist. Bei den hier gewählten Testkonditionen benötigen 1000 Zyklen des Luft/Luft-Temperaturschocktests sechs Wochen, während 1000 Zyklen des flüssig/flüssig-Temperaturschocktests nur eine Woche dauern. Neben der Zeitersparnis durch die kürzere Testdauer wird auch der Energieverbrauch reduziert. Eigens für diese Untersuchung wurde ein Prototyp für einen flüssig/flüssig-Temperaturschocktest-Prüfstand entwickelt und aufgebaut. Dabei entstehen allerdings hohe Betriebskosten, da das verwendete Galden LS 200 bei +125 °C verdampft und damit ein großer Teil verloren geht. Aus diesem Grund, wurde für die Testbaugruppe B nur der herkömmliche Luft/Luft-Temperaturschocktest angewandt, was auch deshalb naheliegend ist, weil sich die Ergebnisse des Luft/Luft-Temperaturschocktest und des flüssig/flüssig-Temperaturschocktests kaum voneinander unterscheiden.

### 5.3 Auswirkungen des aktiven Lastwechseltests

Neben den in den Abschnitten 0 und 5.2 bereits behandelten passiven Temperaturschocktests wird in diesem Abschnitt die Testbaugruppe A mit dem aktiven Lastwechseltest in Anlehnung an den Standard JESD22-A122 [145] belastet. Während bei dem passiven Test die Wärme von außen zugeführt wird, verursacht beim aktiven Test der LED-Chip die Temperaturänderung selbst durch das Ein- und Ausschalten. Für die Ein- und Ausschaltzeit  $t_{an/aus}$  wurde jeweils fünf Minuten gewählt. Sowohl Experimente als auch die FEM-Simulationen zeigen, dass die maximale Sperrschichttemperatur  $T_j$  von 150 °C bei 800 mA innerhalb von fünf Minuten erreicht wird [73]. Der maximal erlaubte Durchlassstrom der XLamp® XP-E beträgt laut Datenblatt 1000 mA [83]. Die Anwendung des maximalen Stroms ist bei diesem Testaufbau nur für eine kürzere Einschaltdauer oder nur mit einer zusätzlichen externen Kühlung ratsam. Die Sperrschichttemperatur  $T_j$  wurde nach

$$T_j = T_{Lot} + R_{th} \cdot P_{total} \quad (5-1)$$

berechnet. Hierbei ist  $T_{Lot}$  die Temperatur an der Lötstelle,  $R_{th}$  der Widerstand zwischen Lötstelle und Chip aus dem Datenblatt und  $P_{total}$  die

Gesamtleistung, die sich aus der gemessenen Vorwärtsspannung  $U_F$  und dem Vorwärtsstrom  $I_F$  zusammensetzt [146].

Die Testbedingungen sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst und der Testaufbau in Bild 5-33 dargestellt. Es wurden jeweils drei LEDs mit einem Vorwiderstand in Reihe geschaltet, bevor sie zu einer Parallelschaltung zusammengefasst wurden (siehe Abbildung 14-6 im Anhang)<sup>21</sup>.

Tabelle 5-7: Testbedingungen des aktiven Lastwechseltests

aktiver Lastwechseltest	Testbedingungen		Spezifikation
Testbaugruppe A	Temperaturbereich	+25 °C bis +150 °C	JESD22-A122
	$t_{an/aus}$	5 min	
	$T_{Lot}$	130 °C	
	$T_j$	150 °C	
	$R_{th}$	9 °C/W	
	$P_{total} = U_F \cdot I_F$	2,3 W	
	$U_F$	2,9 V	
	$I_F$	800 mA	
	Zyklen	0, 500, 1 000 und Rissfortschritt alle 50 Zyklen	
	Anzahl der TBG	91 (27 davon CT)	

<sup>21</sup> Die Anzahl Parallelschaltungen richteten sich nach der Anzahl der zu untersuchenden LEDs. Maximal wurden 51 LEDs gleichzeitig in 17 Parallelschaltungen getestet.



Mittels der Steuerungssoftware konnte die Spannungsversorgung während der Ein- und Ausschaltzyklen programmiert werden. Das zweite Netzteil schaltet einen externen Lüfter in dem Augenblick ein, wenn die LEDs ausgehen. Die Kühlung gewährleistet, dass die Sperrschichttemperatur während der fünf Minuten auf Raumtemperatur abkühlt. Um die Sperrschichttemperatur mit Gleichung (5-1) berechnen zu können, wurde die Temperatur am Lot  $T_{Lot}$  mit einem angelöteten Thermoelement gemessen.

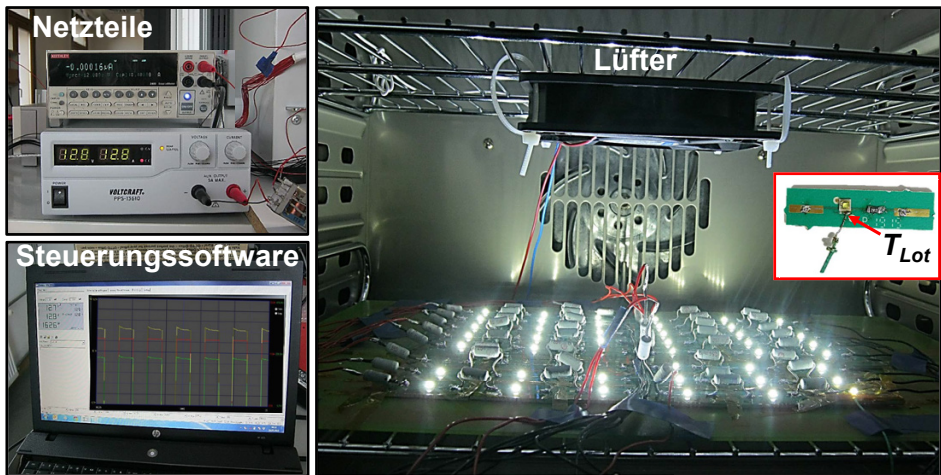


Bild 5-33: Testaufbau des aktiven Lastwechseltests

Im Gegensatz zu den passiven Tests wird die Wärme beim aktiven Lastwechseltest nicht einheitlich von außen zugeführt, sondern vom LED-Chip an den Bauteilkörper abgegeben. Die Aufheizkurven in Bild 5-34a zeigen, dass sich die Lötstelle beim aktiven Lastwechseltest im Vergleich zum Luft/Luft-Temperaturchocktest langsamer erwärmt. Beim Abkühlen sinkt die Temperatur durch die vom Lüfter bewirkte Konvektion innerhalb weniger Minuten auf Raumtemperatur ab (siehe Bild 5-34b). Der maximale Temperaturunterschied beträgt folglich für eine kurze Zeitspanne  $125^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Inwiefern sich die Fehlerbilder nach 1 000 aktiven Lastwechseln von denen der passiven Temperaturschocks unterscheiden und ob die ungleichmäßige Erwärmung ausgehend vom LED-Chip einen Einfluss hat, wird im Folgenden betrachtet. Die Ergebnisse wurden bereits in [64] und [97] veröffentlicht.

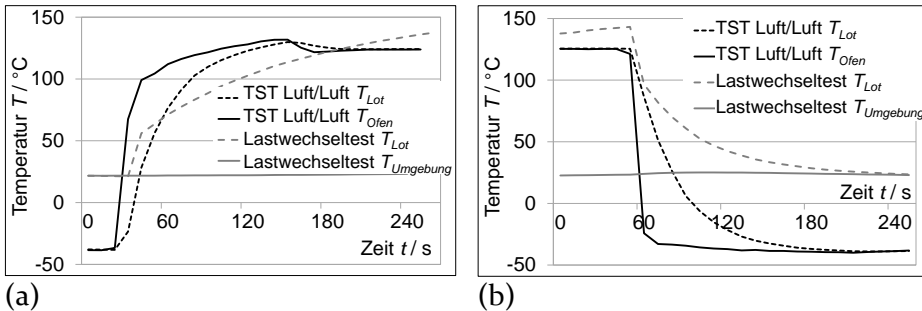


Bild 5-34: Vergleich der (a) Aufheiz- und der (b) Abkühlkurven des Luft/Luft-Temperatur-schocktests und des aktiven Lastwechseltests

### 5.3.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} > 15\%$

In Bild 5-35 ist die horizontale CT-Schnittebene durch die Löt pads von LED#A9 mit einem Porenanteil von 22% vor und nach 1 000 Lastwechseln gegenübergestellt.

Die Alterung der Lötverbindungen durch die Eigenerwärmung der LED ist deutlich zu erkennen. Sowohl an den Lötstellen- als auch an den Poren-rändern haben sich Risse gebildet. Der in Bild 5-35b eingezeichnete Bereich ist in Bild 5-36 vor und nach 1 000 Ein-/Ausschaltzyklen abgebildet.

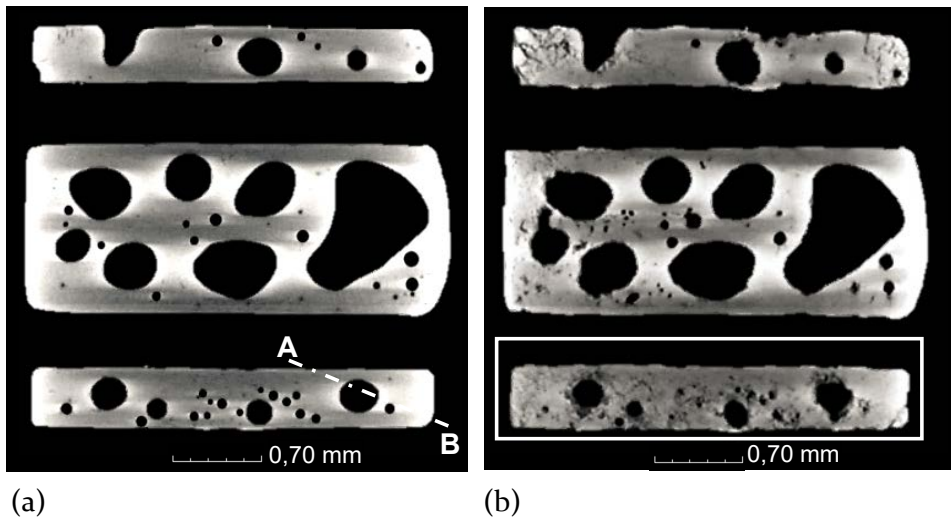


Bild 5-35: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A9 (a) vor und (b) nach 1000 aktiven Lastwechseln [97]

Gemäß Tabelle 5-2 kennzeichnet Fehlercode 1 von den Poren ausgehende Risse, woraus eine Verformung der Porengeometrie resultiert, und Fehlercode 2 Risse am Lötstellenrand. Anhand der CT-Aufnahme bei 0 Zyklen ist zu erkennen, dass hier vor der Belastung keine Vorschädigung der Lötverbindung bestand und sich die Risse erst aufgrund der Lastwechsel gebildet haben. Die Fehlercodes 3 und 4 zeigen, dass Risse aufgrund der thermischen Belastung vom Lötstellenrand zur nächsten Pore wandern beziehungsweise zwischen zwei benachbarten Poren entstehen, wodurch die Poren durch Risse verbunden werden. Wie schon bei den Temperaturschocktests zu beobachten war, bilden sich auch in diesem Fall an der dünneren Seite des Lotspalts Risse direkt im Lot (siehe Fehlercodes 5). Die rechte Lotspaltdicke beträgt 110  $\mu\text{m}$ , während die linke nur 65  $\mu\text{m}$  misst.

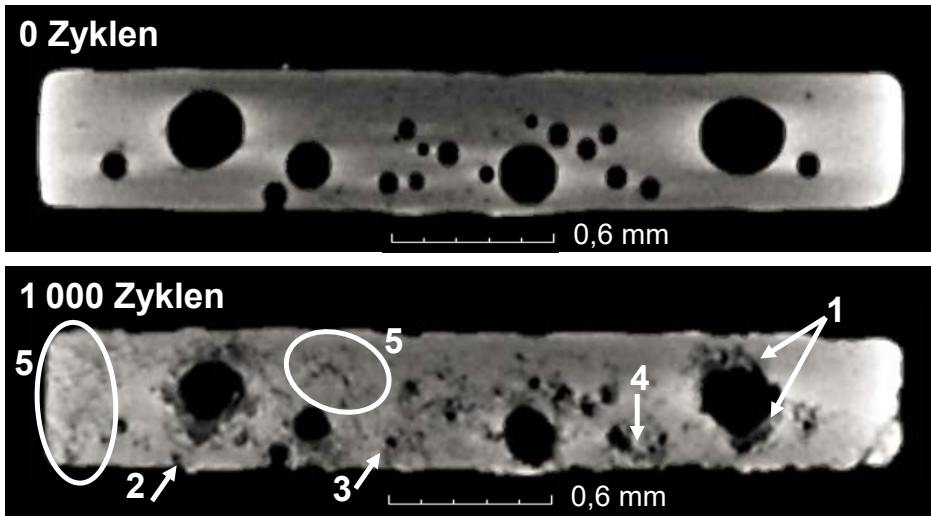


Bild 5-36: Horizontale CT-Schnittebene der unteren Lötverbindung von LED#A9 vor und nach 1 000 aktiven Lastwechseln [97]

Um ein besseres Verständnis darüber zu erhalten, ab welcher Lastwechselzahl die Risse entstehen und wo sich deren Ursprung befindet, wurde jeweils nach 50 Lastwechseln eine Computertomographie durchgeführt. Bild 5-37 zeigt die Entstehung und das Fortschreiten der Risse für die in Bild 5-35a eingezeichneten vertikalen Schnittebene A-B von LED#A9.

Nach 200 Lastwechseln sind deutlich von den Poren ausgehende Risse zu erkennen (siehe Fehlercode 1). Während die Risse an der großen Pore mittig an den Porenrändern starten, entsteht der Riss an der kleinen Pore am rechten oberen Rand. Dieser Riss breitet sich mit zunehmenden Lastwechseln weiter am oberen Rand der Lötstelle in der Nähe der intermetallischen Phasen aus. Am rechten Lötstellenrand sind nach 450 Lastwechseln zwei Risse detektierbar (siehe Fehlercode 2), wobei sich der untere Riss mit dem Riss von der kleinen Pore nach 700 Lastwechseln verbindet (siehe Fehlercode 3). Zudem wird nach 700 Zyklen sichtbar, dass sich der Riss ausgehend von dem linken Rand der großen Pore nun entlang dem oberen Teil der Lötverbindung ausbreitet, obwohl er in der Mitte der Pore entstanden ist.

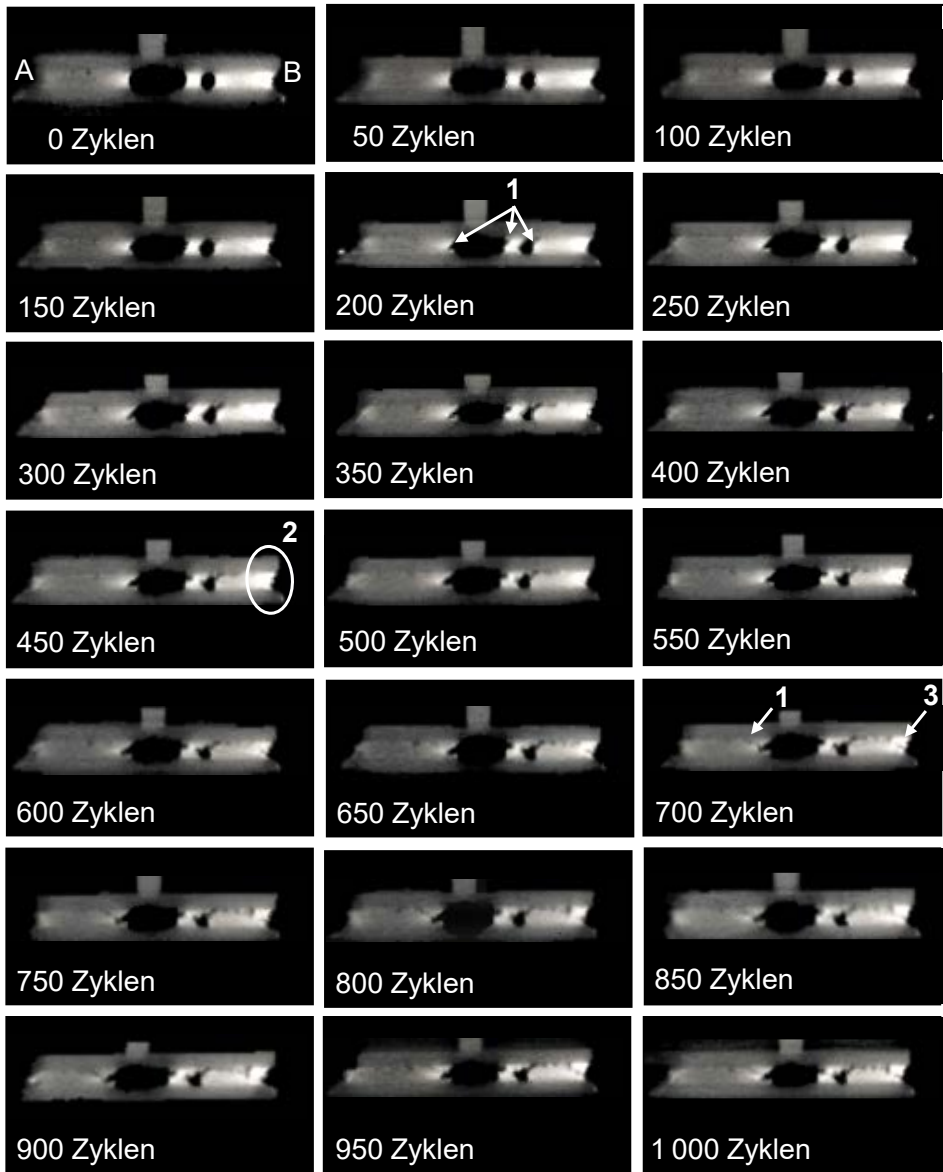


Bild 5-37: Vertikale CT-Schnittebenen von LED#A9 in jeweils 50 Zyklenschritten während des aktiven Lastwechseltests [97]

Mit den REM-Aufnahmen des Rissverlaufs von LED#A10 nach 1 000 Lastwechseln in Bild 5-38 kann die genaue Position der Risse detaillierter analysiert werden. Die Risse verlaufen nach dem Lastwechseltest häufig im oberen Bereich der Lötverbindung (siehe Bild 5-38a), auch wenn sie zunächst mittig an der Pore entstanden sind. Bild 5-38b zeigt deutlich, dass der Riss nur stellenweise direkt an den intermetallischen Phasen entlang läuft und sich größtenteils noch Lot zwischen Riss und IMC befindet.

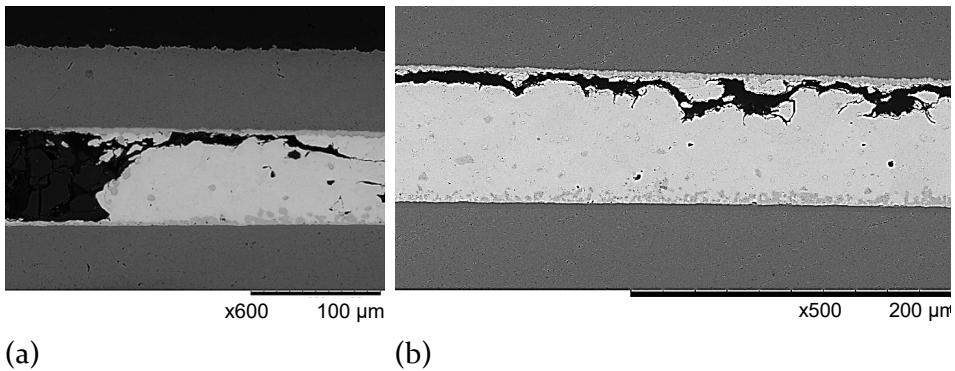


Bild 5-38: (a), (b) REM-Aufnahmen von LED#A10 nach 1 000 aktiven Lastwechseln [97]

### 5.3.2 Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \leq 5\%$

Die in Bild 5-39 dargestellte horizontale CT-Schnittebene zeigt LED#A11 mit einem Porenanteil von 5 % vor und nach den 1 000 Lastwechseln. Die rechte Seite mit einer Lotspaltdicke von 50 µm ist nach der Belastung stärker geschädigt als die linke Seite mit einer Dicke von 80 µm. Nach den 1 000 Lastwechseln finden sich auch hier wieder alle Fehlerarten aus Tabelle 5-2, wobei die Risse im Lot ohne Porenbeteiligung dominant sind (siehe Fehlercode 5). Diese horizontale CT-Schnittebene ist im oberen Bereich der Lötverbindung bauteilnah gewählt. Hier haben sich, wie bereits bei den porenreichen Lötverbindungen aus Abschnitt 5.3.1, die meisten Risse gebildet.

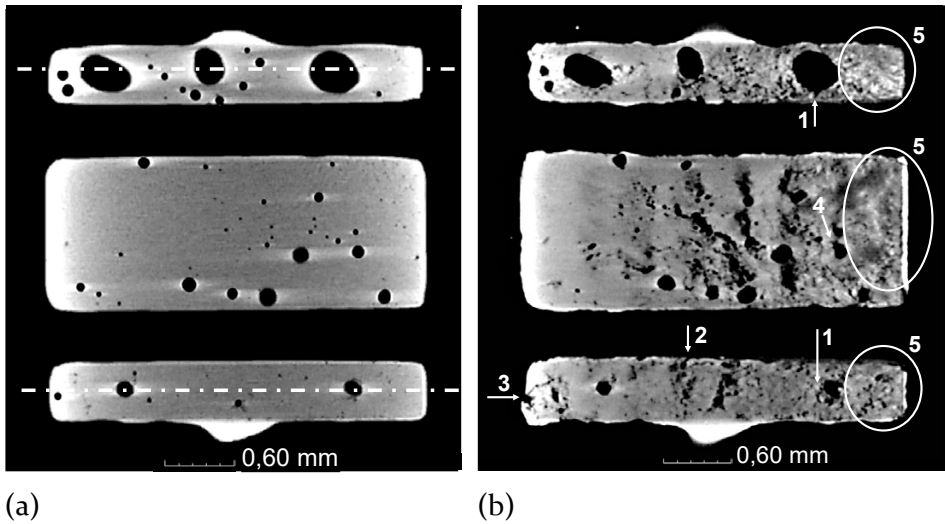


Bild 5-39: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A11 (a) vor und (b) nach 1 000 aktiven Lastwechseln

Bild 5-40 zeigt die vertikalen CT-Schnittebenen, die in Bild 5-39a eingezeichnet sind, nach 1 000 Lastwechseln. In Bild 5-40a ist zusätzlich der LED-Bauteilkörper skizziert.

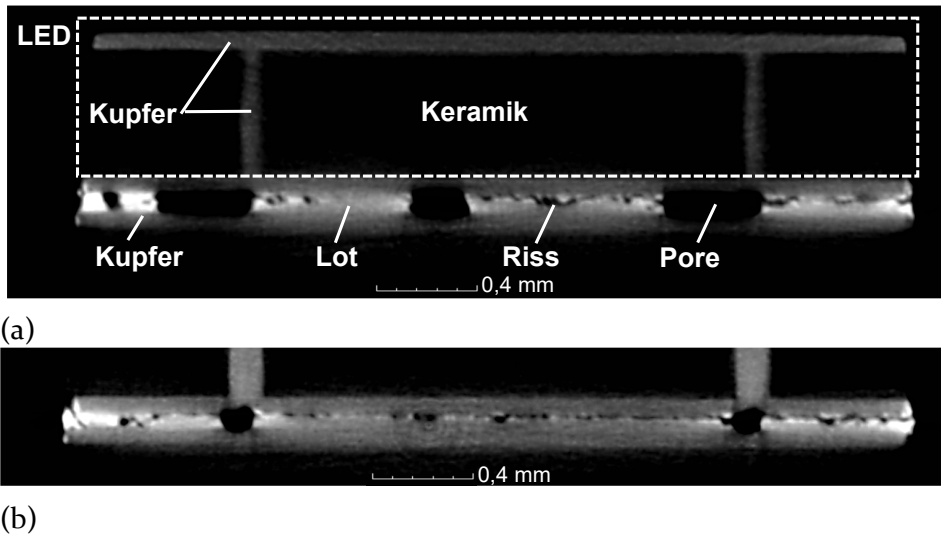


Bild 5-40: Vertikale CT-Schnittebene durch (a) die obere und (b) die untere Lötverbindung von LED#A11 nach 1 000 aktiven Lastwechseln

Bei beiden CT-Schnittebenen ist zu erkennen, dass die Risse oben in der Lötstelle und somit etwas unterhalb der LED verlaufen. Da beim aktiven Lastwechseltest die Wärme am LED-Chip entsteht, wird diese von oben in die Lötverbindung eingeleitet und nicht wie bei den passiven Tests gleichmäßig von außen zugeführt. FEM-Simulationen in Abschnitt 6.2.1 belegen, dass die Wärme durch den Keramikkörper der LED gleichmäßig an die Lötverbindung weitergegeben wird. Deshalb ist die Wärmeeinleitung über den Bauteilkörper Ursache der mechanischen Spannungen. Folglich bilden sich die Risse in der Nähe der Wärmequelle aus, nämlich im oberen Bereich der Lötstelle.

Sowohl die porenreichen als auch die porenarmen Lötverbindungen zeigen in diesem Test ähnliche Fehlerbilder, wie in dem Luft/Luft- und dem flüssig/flüssig-Temperaturschocktest. Während bei den passiven Tests die Risse vorwiegend mittig durch die Lötverbindungen verlaufen, breiten sich die Risse unter den aktiven Lastwechseln vermehrt im oberen Bereich der Lötverbindungen unmittelbar unterhalb des Bauteilkörpers aus. Dieses Phänomen konnte sowohl durch CT-Aufnahmen als auch mit Schlißbildern bestätigt werden und wurde auch in [147] beobachtet.

### 5.3.3 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil

In Bild 5-41 sind die mittleren Scherkräfte nach dem aktiven Lastwechseltest für 0, 500 und 1000 Ein- und Ausschaltzyklen dargestellt. Für jede Lastwechselanzahl wurden der hohe, mittlere und geringe Porenanteil untersucht. Nach 500 Lastwechseln zeigt sich ein Abfall der maximalen Scherkräfte für alle Porenanteile, wobei deutlich zu sehen ist, dass je höher der Porenanteil ist, desto niedriger die maximalen Scherkräfte sind. Nach 1000 Lastwechseln ist für den niedrigen und den mittleren Porenanteil eine weitere Abnahme der jeweiligen maximalen Scherkraft zu erkennen, während sie für den hohen Porenanteil noch etwa genauso groß wie nach 500 Zyklen ist. Die maximalen Scherkräfte haben sich für den hohen Porenanteil im Vergleich zum unbelasteten Zustand um 18 % reduziert, während sie sich für den geringen und den mittleren Porenanteil um 41 % beziehungsweise 44 % verringert haben. Allerdings streuen die Scherkräfte bei der Belastung mit 1000 aktiven Lastwechseln stark, was sich an den Fehlerbalken für den geringen und den mittleren Porenanteil ablesen lässt. Um die Ursache der Streuung herauszufinden, wurden die einzelnen Porenanteile innerhalb der Porenklasse und das Bruchverhalten näher betrachtet.



Jedoch konnte aus dieser Untersuchung die Streuung nicht begründet werden. Die Auswertung der Bruchflächen ergab, dass alle Lötverbindungen direkt durch das Lot gesichert worden sind.

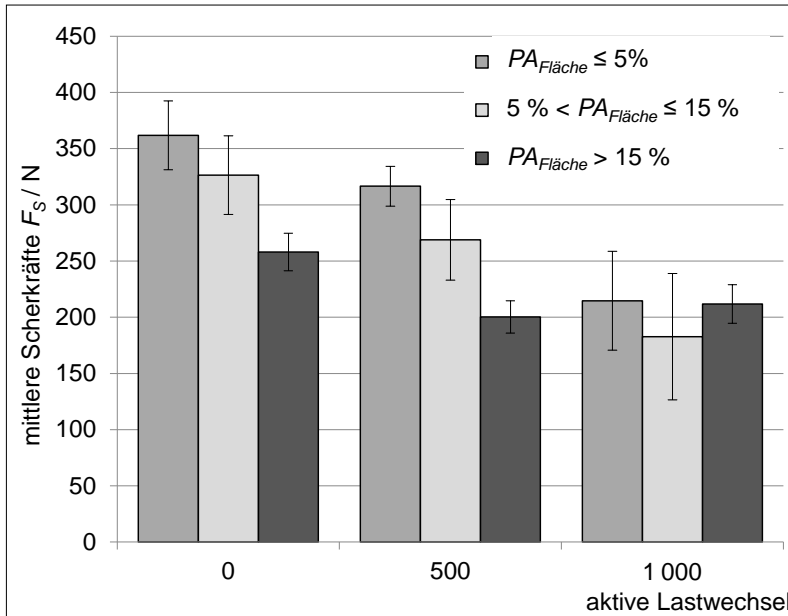


Bild 5-41: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe A mit klassifizierten Porenanteilen nach verschiedenen Lastwechseln, die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

In Bild 5-42 sind die zugehörigen Boxplots dargestellt. Innerhalb der Box liegen 50 % der mittleren Daten, die Mittellinie innerhalb der Box repräsentiert den Median und die äußeren Begrenzungslinien oben und unten zeigen den kleinsten und größten vorkommenden Wert an.

Anhand der Boxplots lassen sich Ausreißer als Ursache für die große Streuung der Scherkräfte nach 500 Lastwechseln beim mittleren und nach 1000 Lastwechseln beim geringen und mittleren Porenanteil verantwortlich machen. Zusätzlich zeigt die Höhe der Box beim mittleren Porenanteil nach 1000 Lastwechseln, dass die mittlere Hälfte der Daten weit verstreut um den Median liegen.

## 5 Zuverlässigkeitsbetrachtungen unter der Berücksichtigung der Poren

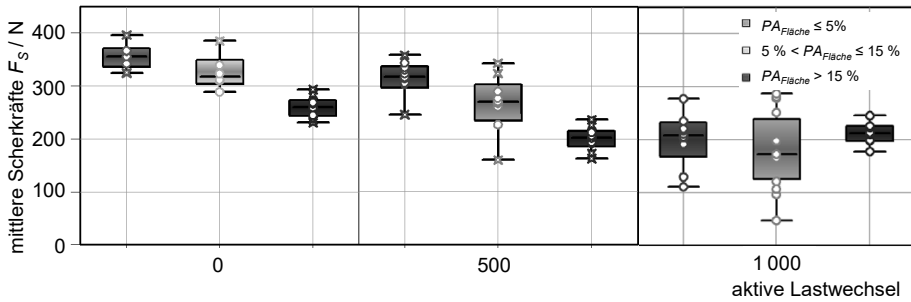


Bild 5-42: Boxplots von Testbaugruppe A mit klassifizierten Porenanteilen nach verschiedenen Lastwechseln. Die Mittellinie in der Box stellt den Median und die Begrenzungslinien außerhalb den Minimal- und den Maximalwert dar

In Bild 5-43 sind die Scherkräfte des aktiven Lastwechseltests, des Luft/Luft- und des flüssig/flüssig-Temperaturchocktest gegenübergestellt, und zwar sowohl zu Beginn als auch nach 1000 Zyklen der jeweiligen Tests.

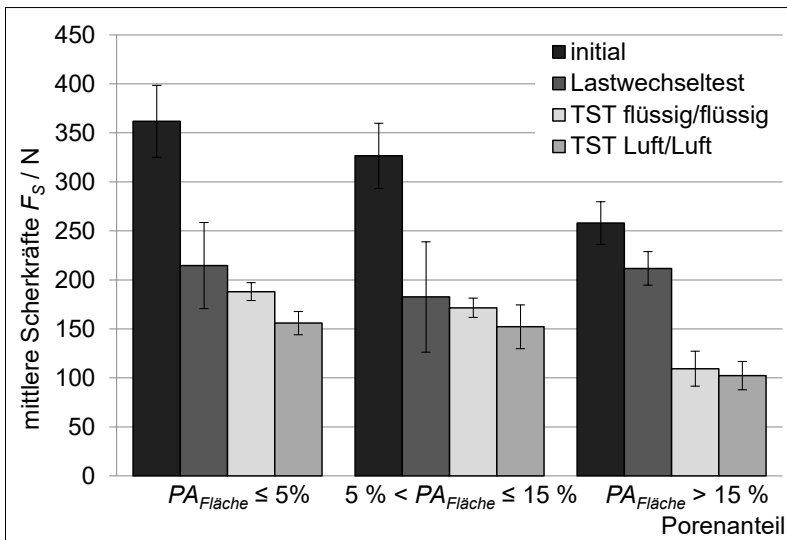


Bild 5-43: Vergleich der mittleren Scherkräfte von Testbaugruppe A mit klassifizierten Porenanteilen nach 1000 Zyklen der Zuverlässigkeitstests mit den Anfangswerten, die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student-t-Verteilung dar

Die Abnahme der maximalen Scherkräfte ist beim geringen und beim mittleren Porenanteil für alle Tests ähnlich, wobei hier wie bereits erörtert die Fehlerbalken des Lastwechseltests in Bezug auf die Plausibilität der Werte mit einbezogen werden müssen. Den stärksten Abfall der maximalen Scherkräfte weisen nach 1 000 Zyklen die passiven Tests mit einem Porenanteil von  $PA_{\text{Fläche}} > 15\%$  auf.

### 5.4 Auswirkungen des überlagerten Lastwechseltests

Der sogenannte überlagerte Lastwechseltest erfolgte an Testbaugruppe B. In diesem Test wird der Einfluss der Eigenerwärmung in Verbindung mit der Änderung der Umgebungstemperatur untersucht. Er bildet somit den realen Belastungsfall nach, in dem eine Baugruppe im Betrieb verschiedenen Umgebungstemperaturen ausgesetzt ist. Der überlagerte Lastwechseltest wurde in Anlehnung an den Standard JESD22-A105C durchgeführt [148]. Die Testbedingungen sind in Tabelle 5-8 aufgeführt.

Bild 5-44a zeigt den Testaufbau des überlagerten Lastwechseltests. Es wurden jeweils drei LEDs mit einem Vorwiderstand in Reihe geschaltet, bevor sie zu einer Parallelschaltung zusammengefasst wurden (siehe Abbildung 14-6 im Anhang). Die LEDs befinden sich in einem Temperaturschrank, der einen Temperaturwechsel von  $-35\text{ °C}$  bis  $+90\text{ °C}$  mit einer Übergangszeit von 45 Minuten und einer jeweiligen Haltezeit von 15 Minuten fährt. Ein Zyklus dauert somit zwei Stunden. Gleichzeitig werden die LEDs im 5-Minuten-Takt ein- und ausgeschaltet. Da sich die interne und externe Temperatur überlagern, wird der höchste Wert der Sperrschichttemperatur von  $140\text{ °C}$ <sup>22</sup> nur erreicht, wenn die Ofentemperatur  $90\text{ °C}$  beträgt. Die maximale Sperrschichttemperatur von  $150\text{ °C}$  wird nicht angestrebt, da die Temperatur am Chip mit zunehmender Schädigung der Baugruppen von selbst noch ansteigt. Bild 5-44b zeigt den Verlauf der Temperatur des Ofens und der Lötstelle, wobei die Temperaturmessungen mit Thermoelementen erfolgte.

---

<sup>22</sup> Die Berechnung erfolgte mit Gleichung (5-1).

## 5 Zuverlässigkeitsbetrachtungen unter der Berücksichtigung der Poren

Tabelle 5-8: Testbedingungen des überlagerten Lastwechseltests

überlagerter Lastwechseltest	Testbedingungen		Spezifikation
Testbaugruppe B	Temperaturbereich	-35 °C bis +90 °C	JESD 22-A105C
	Haltezeit	15 min	
	Transferzeit	45 min	
	$t_{an/aus}$	5 min	
	$T_{Lot}$	120 °C	
	$T_j$	140 °C	
	$R_{th}$	18 °C/W	
	$P_{total} = U_F \cdot I_F$ $U_F$ $I_F$	1,01 W 3,35 V 300 mA	
	Ein-/Aus-schaltzyklen (Temperaturzyklen)	0,5 283 (440) und Rissfortschritt alle ~1050 (88) Zyklen	
	Anzahl der TBG	50 (10 davon CT)	

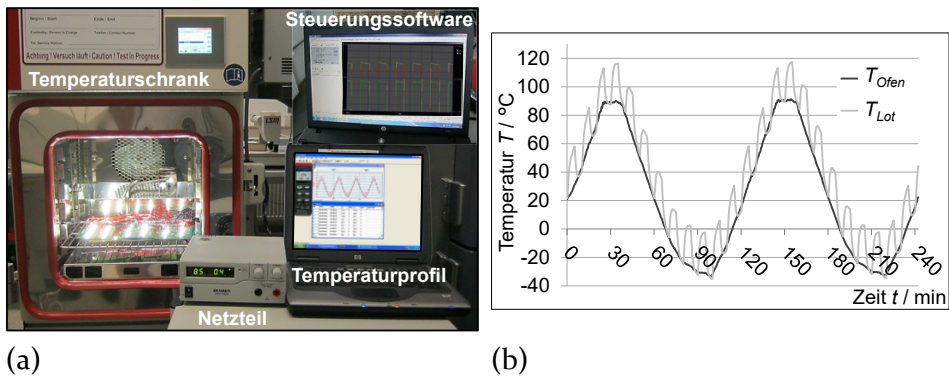


Bild 5-44: (a) Testaufbau des überlagerten Lastwechseltests und (b) Temperaturkurven während des Tests

Im Folgenden werden die Ergebnisse des überlagerten Lastwechseltestes für verschiedene Porenanteile dargestellt.

### 5.4.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \geq 25\%$

In Bild 5-45 ist die Rissentwicklung bei zunehmender Belastung für LED#B4 mit einem Porenanteil von 30 % dargestellt. Um die Schädigungsentwicklung zu dokumentieren, wurden in Schritten von ungefähr 1050 Ein- und Ausschaltzyklen, was 88 Temperaturzyklen entspricht, jeweils CT-Aufnahmen angefertigt.

Im Vergleich zum Ausgangszustand sind nach 1044 Ein- und Ausschaltzyklen bereits die ersten Risse an den Poren (siehe Fehlercode 1) und am Lötstellenrand (siehe Fehlercode 2) nachweisbar. Nach 2088 Ein- und Ausschaltzyklen ist an Fehlercode 3 die Verbindung einer Pore mit dem Lötstellenrand durch einen Riss zu sehen. Nach weiteren 1104 Ein- und Ausschaltzyklen sind in dieser CT-Betrachtungsebene Risse direkt im Lot entstanden (siehe Fehlercode 5). Fehlercode 4 kennzeichnet die Verbindung zweier Poren durch Risse nach 4236 Ein- und Ausschaltzyklen.

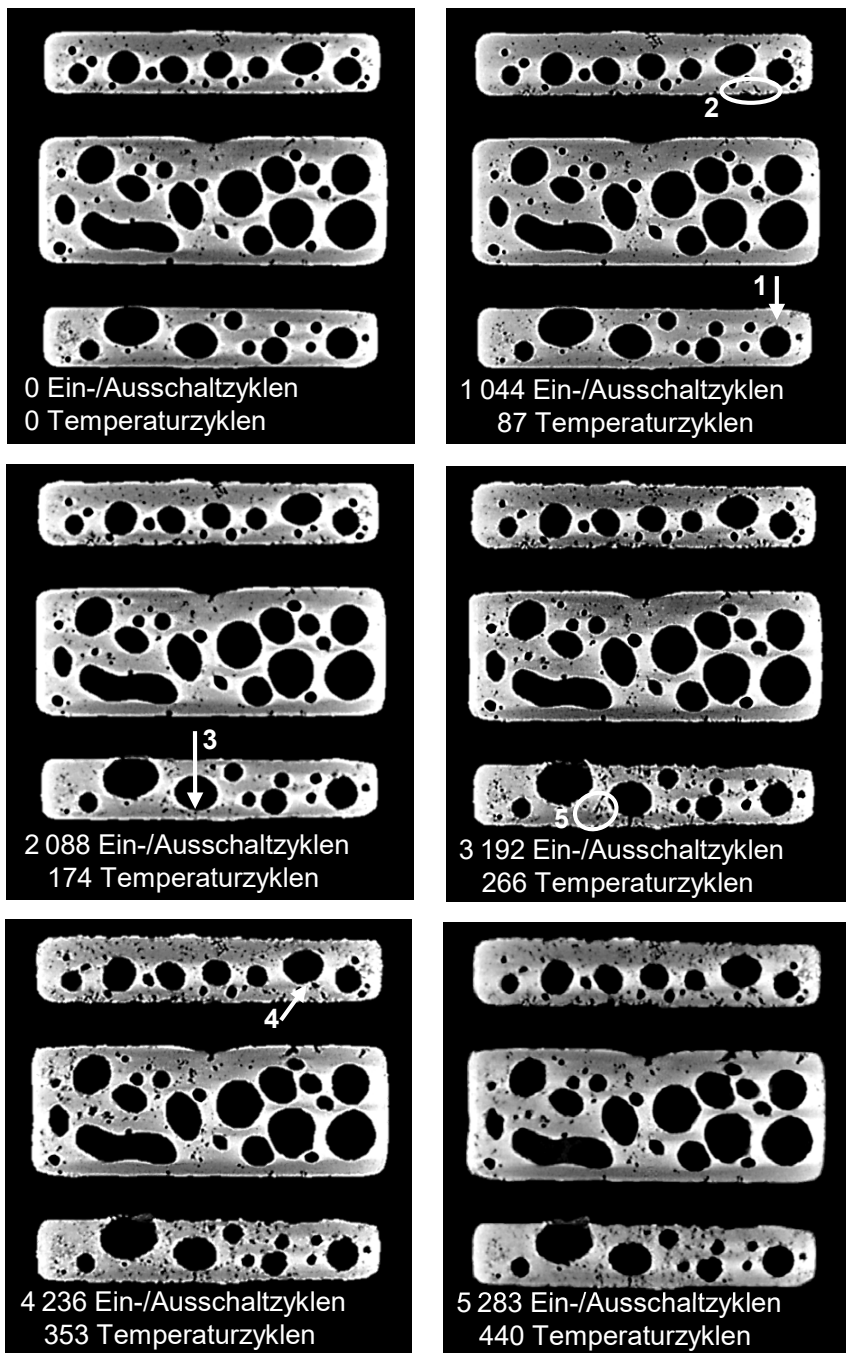


Bild 5-45: Horizontale CT-Schnittebenen von LED#B4 nach definierten Ein- und Ausschaltzyklen während des überlagerten Lastwechseltests

In der vertikalen CT-Schnittebene in Bild 5-46 ist zu erkennen, dass die Risse zwischen dem Lötstellenrand und den Poren verlaufen (siehe Fehlercode 3) und einzelne Poren durch Risse miteinander verbunden werden (siehe Fehlercode 4). Weiter ist zu sehen, dass die Risse sich mittig im Lot ausbreiten. Im Gegensatz dazu befinden sich die Risse beim aktiven Lastwechseltest, bei dem eine reine Eigenerwärmung stattfindet, bauteilseitig (siehe Abschnitt 5.3). Das ist darin begründet, dass beim aktiven Lastwechseltest die Wärme ausschließlich vom Chip ausgehend in das Bauteil eingebracht wird. Hierfür wird die LED immer an der Grenze der maximalen Sperrschichttemperatur betrieben. Auch beim überlagerten Lastwechseltest findet eine Erwärmung des Bauteils ausgehend vom Chip statt, diese erreicht jedoch nur während der maximalen Ofentemperatur annähernd die maximale Sperrschichttemperatur. Folglich sind die Schädigungen aufgrund der Eigenerwärmung beim überlagerten Lastwechseltest nicht so stark ausgeprägt wie beim aktiven Lastwechseltest. Der mittige Rissverlauf wurde bereits bei den passiven Temperaturwechseltests in den Abschnitten 5.1 und 5.2 beobachtet.

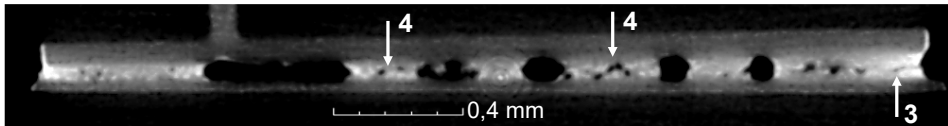


Bild 5-46: Vertikale CT-Schnittebene von LED#B4 nach 5 283 Ein- und Ausschaltzyklen

Ergänzend zum hohen Porenanteil wird im nächsten Abschnitt der niedrige Porenanteil der Testbaugruppe B analysiert.

### 5.4.2 Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \leq 5 \%$

Bild 5-47 zeigt LED#B5 mit einem Porenanteil von 3 %. Die ersten Schädigungen zeigen sich im CT-Bild nach 2 088 Ein- und Ausschaltzyklen in den Lötverbindungen. Dabei ist die Verformung der Porengeometrie deutlich zu erkennen (siehe Fehlercode 1), die ein Indikator für die Rissentstehung an den Porenrändern ist.

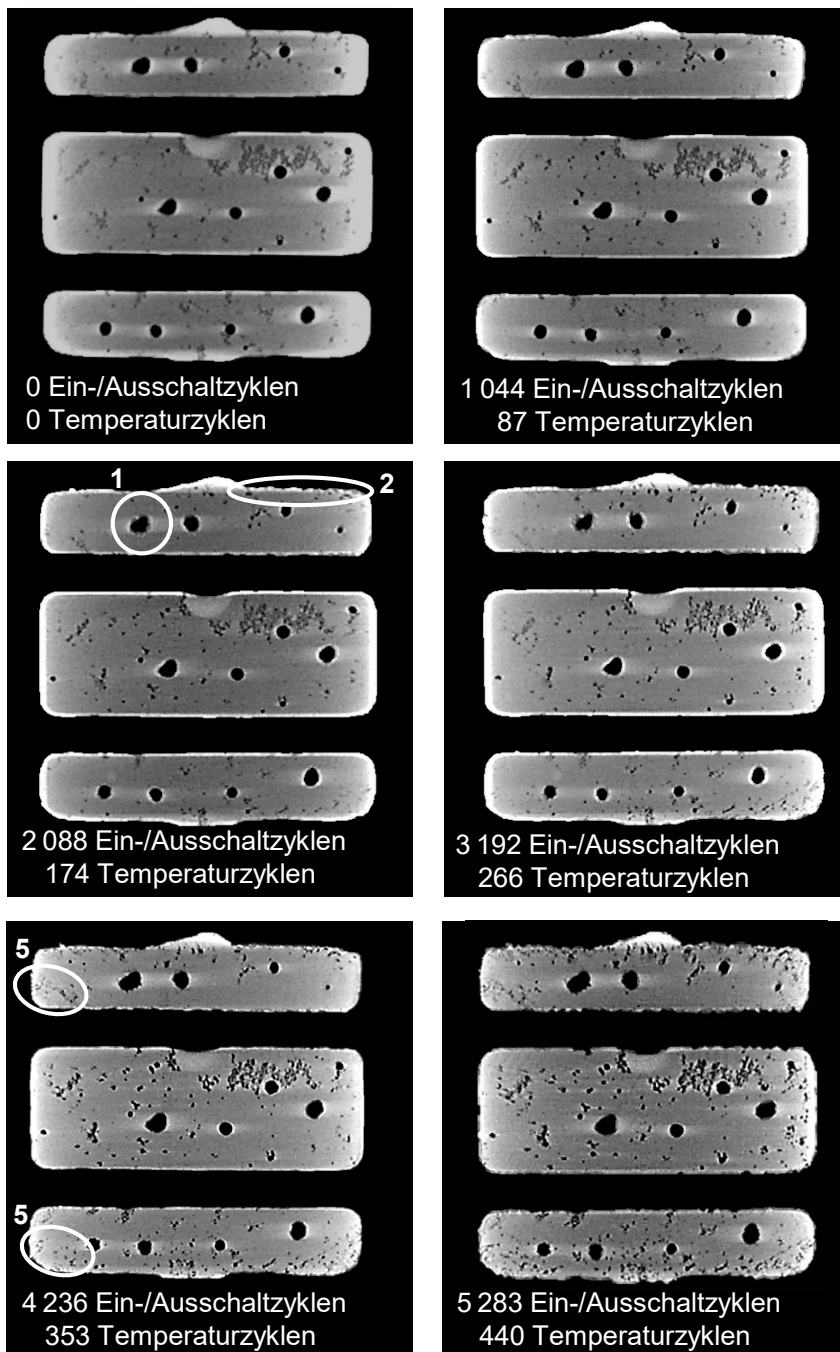


Bild 5-47: Horizontale CT-Schnittebenen von LED#B5 nach definierten Ein- und Ausschaltzyklen während des überlagerten Lastwechseltests



An Fehlercode 2 ist zu sehen, dass auch die Lötstellenränder unebener werden und sich hier erste Risse bilden. Mit zunehmender Zyklenanzahl nehmen die Schädigungen in der Lötstelle zu und nach 4 236 Ein- und Ausschaltzyklen sind im Vergleich zum vorherergehenden Bild auch Risse im Lot entstanden (siehe Fehlercode 5).

Bild 5-48 zeigt in der vertikalen CT-Schnittebene von LED#B5 an Fehlercode 1 einen Riss am Porenrand und an Fehlercode 2 einen Riss am Lötstellenrand. Die Analyse der Rissposition zeigt, dass auch bei einem niedrigen Porenanteil die Risse mittig im Lot verlaufen.

Sowohl für einen niedrigen als auch für einen hohen Porenanteil zeigen sich Risse, die vom Poren- oder vom Lötstellenrand ausgingen, und es entstanden Risse direkt im Lot. Die Risse können jedoch in den CT-Bildern beim hohen Porenanteil früher als beim niedrigen nachgewiesen werden. Bei den Lötverbindungen mit einem hohen Porenanteil breiten sich Risse zusätzlich zwischen einzelnen Poren und zwischen Poren und dem Lötstellenrand aus. Diese Schädigungen treten bei den untersuchten Lötverbindungen mit einem niedrigen Porenanteil kaum auf. Ein Grund hierfür ist, dass die Poren zu weit voneinander beziehungsweise vom Lötstellenrand entfernt liegen, ein anderer, dass die Schädigung noch nicht weit genug fortgeschritten ist. Folglich kann die Rissentstehung durch einen niedrigen Porenanteil nicht vermieden, aber herausgezögert werden.

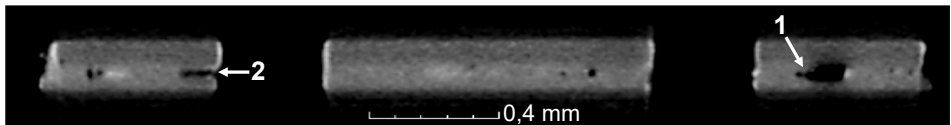


Bild 5-48: Vertikale CT Schnittebene von LED#B5 nach 5 283 Ein- und Ausschaltzyklen

#### 5.4.3 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil

Zusätzlich zur bereits durchgeführten qualitativen Bewertung der Lötverbindung erfolgt in diesem Abschnitt die quantitative Bewertung mit Hilfe des Schertests. In Bild 5-49 sind die mittleren Scherkräfte für den Ausgangszustand und nach 5 283 Ein- und Ausschaltzyklen dargestellt. Es zeigt sich, dass die maximalen Scherkräfte unabhängig vom Porenanteil nach Alterung der Lötverbindung abnehmen. Außerdem unterscheiden sie sich beim niedrigen und beim hohen Porenanteil sowohl im Ausgangszustand als auch nach dem überlagerten Lastwechseltest. Nach den 5 283 Ein- und Ausschaltzyklen beträgt die Abweichung bei den Porenanteilen 35 %, wobei

anhand der Fehlerbalken zu erkennen ist, dass die maximalen Scherkräfte stärker als im Ausgangszustand streuen.

Die Auswertung der Bruchflächen nach dem Schertest zeigt für die belasteten Lötstellen, dass die Brüche größtenteils durch das Lot verlaufen. Nur beim niedrigen Porenanteil ist es bei 20 % der Lötverbindungen zu einem Mischbruch durch das Lot und der Anschlussfläche der Leiterplatte oder zu einem Bruch an der Anschlussfläche gekommen. Die Analyse der Bruchflächen im Ausgangszustand ist Tabelle 5-5 zu entnehmen. Dort kann abgelesen werden, dass im unbelasteten Zustand der Bruch beim niedrigen Porenanteil verstärkt an der Anschlussfläche auftrat. In diesem Fall hält die Lötverbindung eine größere Scherkraft als die Leiterplattenmetallisierung aus, sodass die Anschlussfläche die entscheidende Schwachstelle ist und deshalb dort der Scherbruch erfolgte.

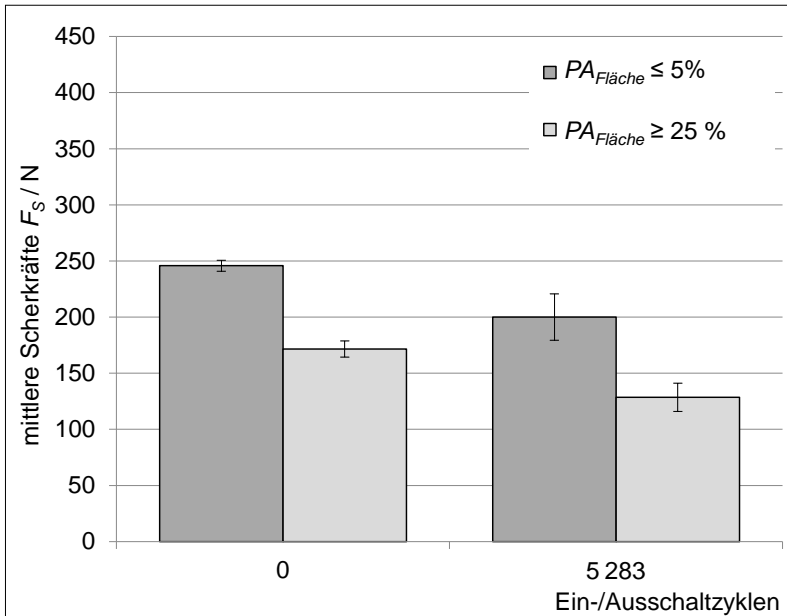


Bild 5-49: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe B mit klassifizierten Porenanteilen nach den überlagerten Lastwechseln, die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

Der überlagerte Lastwechseltest ist ein sehr realitätsnaher Test, der sowohl die Eigenerwärmung der Baugruppe im Betrieb berücksichtigt als auch den Wechsel der Umgebungstemperaturen. Er ruft bei der Rissentstehung die gleichen Schadensbilder wie die reinen passiven Temperaturtests hervor. Anders als beim aktiven Lastwechseltest befindet sich der Riss nicht an der Bauteilseite, sondern wie bei den passiven Tests mittig im Lot. Beim überlagerten Lastwechseltest spielt daher die vom LED-Chip ausgehende Erwärmung der Baugruppe für die Schadensentstehung eine untergeordnete Rolle. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Eigenerwärmung und der Temperaturwechsel milder sind als bei den rein passiven oder aktiven Tests, da bei der maximalen Ofentemperatur die maximale Sperrschichttemperatur nicht überschritten werden darf.

### 5.5 Auswirkungen des zyklischen Biegetests

Das Interesse nach einem Biegetest, einem rein mechanischen Test, nimmt aufgrund der steigenden Anzahl von tragbaren Geräten, wie z. B. MP3-Playern und Mobiltelefonen, zu. Er stellt eine mechanische Belastung nach, die während des Produktionsprozesses, z. B. bei der Nutzentrennung oder bei der Kontaktierung für elektrische Tests, während des Versands oder während der Benutzung durch Verbiegung, Verdrehung oder durch das Drücken von Tasten entstehen kann.

Voruntersuchungen zeigten, dass eine statische Biegebelastung über drei Stunden, die noch im elastischen Bereich liegt, keine nennenswerten Schädigungen der Lötverbindungen ergaben. Auch mit einer zusätzlichen thermischen Vorbelastung<sup>23</sup> der Baugruppen resultierten kaum Qualitätsminderungen in Form von Rissen, die mit Hilfe von CT-Aufnahmen dargestellt werden konnten. Infolgedessen wurde das Hauptaugenmerk der Untersuchung auf den zyklischen Biegetest für beide Testbaugruppen gerichtet.

Die Durchführung des zyklischen Biegetests wird wesentlich von den apparativen Voraussetzungen und der Geometrie der Testbaugruppen bestimmt. Anhaltspunkte für die Ausführung lieferten Spezifikationen wie die AEC-Q200-005 [149], die einen statischen Dreipunkt-Biegeversuch beschreibt oder die JESD22-B113 [150], die einen zyklischen Vierpunkt-Biegeversuch behandelt, sowie diverse Studien [133], [151], [152] und die Resultate aus den Vorversuchen.

---

<sup>23</sup> Die thermische Vorbelastung fand in Form einer 168 Stunden dauernden Lagerung im Wärmeofen bei 125 °C statt.

In Bild 5-50 ist der Testaufbau des zyklischen Biegetests an der Maschine EPLEXOR®150 N dargestellt, die die Baugruppen statisch beansprucht und gleichzeitig einer sinusförmigen mechanischen Anregung aussetzt. Hierzu werden die Baugruppen mit der LED nach unten auf eine Vorrichtung aufgelegt und von unten mit einer sinusförmigen dynamischen Kraft mit 10 Hz belastet. Gleichzeitig übt der Keil von oben an der Bauteilunterseite eine statische Kraft aus. Die Maschine kann eine Gesamtkraft von 150 N aufbringen, hierbei muss maschinenbedingt die dynamische Kraft immer kleiner sein als die statische Kraft. Für den zyklischen Biegetest wurde eine maximale Kraft von 140 N gewählt, da diese sich noch im elastischen Bereich bei einer Biegung befindet. In Abbildung 14-7 im Anhang ist das Kraft-Weg-Diagramm dargestellt, das im Rahmen der Voruntersuchungen an einer Zugprüfmaschine für eine Testbaugruppe aufgenommen wurde. Die Gesamtkraft von 140 N setzt sich aus der statischen Kraft  $F_{stat} = 80 \text{ N}$  und der dynamischen Kraft der Amplitude  $F_{dyn} = 60 \text{ N}$  zusammen.

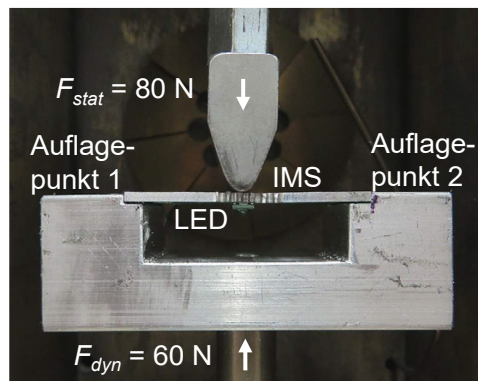


Bild 5-50: Testaufbau des zyklischen Biegetests nach [153]

Die detaillierten Testbedingungen des zyklischen Biegetests sind der Tabelle 5-9 zu entnehmen. In den Voruntersuchungen zeigte sich für beide Testbaugruppen nach 36 000 Zyklen eine Schädigung der Lötverbindung in Form von Rissen. Im Hauptversuch weist Testbaugruppe A nach 36 000 Zyklen keine Schädigung auf, sodass die Zyklenanzahl verdoppelt wurde. Testbaugruppe A ist aufgrund der Geometrie der Leiterplatte und der dickeren Kupferlage (siehe Tabelle 3-2) robuster gegenüber zyklischen Belastungen.

In den Voruntersuchungen war ohne eine Vorbelastung der Testbaugruppen keine Schädigung durch Biegung nachweisbar. Da die Baugruppen häufig während der Produktlebensdauer Temperaturänderungen ausgesetzt sind, wurden die Testbaugruppen thermisch vorbelastet, um eine Alterung zu simulieren. Zu diesem Zweck wurden sie 72 Stunden lang bei 125 °C im Wärmeofen gelagert.

Tabelle 5-9: Testbedingungen des zyklischen Biegetests

Zyklischer Biegetest	Testbedingungen		Spezifikation
	Belastungsart	sinusförmig	AEC-Q200-005, JESD22-B113 und diverse Studien
	Kraft	$F_{stat} = 80 \text{ N}$	
		$F_{dyn} = 60 \text{ N}$	
	Vorbelastung	72 h bei 125 °C	
Testbaugruppe A	Zyklen/Frequenz	72 000 / 10 Hz	
	Anzahl der TBG	30 (15 davon CT)	
Testbaugruppe B	Zyklen/Frequenz	36 000 / 10 Hz	
	Anzahl der TBG	20 (10 davon CT)	

In Bild 5-51 sind die horizontalen CT-Schnittebenen von LED#B6 dargestellt. Zur Untersuchung der Auswirkungen des zyklischen Biegetests mit thermischer Vorbelastung wurden jeweils CT-Bilder im Ausgangszustand (siehe Bild 5-51a), nach der thermischen Belastung (siehe Bild 5-51b), und nach der Biegung erstellt (siehe Bild 5-51c).

Die thermische Vorbelastung hat keine sichtbaren Auswirkungen auf die Lötstellenqualität, während nach 36 000 Biegezyklen eine vorangeschrittene Schädigung der äußeren Pads zu erkennen ist. Sowohl vor als auch nach der thermischen Vorbelastung und nach dem Biegetest erfolgte ein Schertest. Dieser bestätigt, dass die Wärmelagerung keine Auswirkung auf die maximalen Scherkräfte hat (siehe Abschnitte 5.5.1.3 und o).

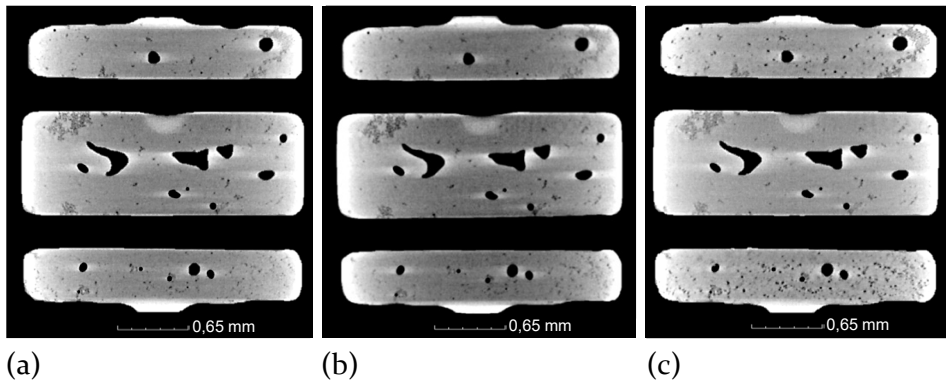


Bild 5-51: Gegenüberstellung der horizontalen CT-Schnittebenen der LED#B6 (a) Ausgangszustand, (b) nach 72 Stunden bei 125 °C, (c) nach 72 Stunden bei 125 °C mit zusätzlichen 36 000 Zyklen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Testbaugruppen A und B nach der thermischen Vorbelastung mit anschließender zyklischer Biegebelastung in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil vorgestellt.

### 5.5.1 Beurteilung der Testbaugruppe A

#### 5.5.1.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} > 15 \%$

In Bild 5-52 ist die Lötverbindung von LED#A12 mit einem Porenanteil von 23 % vor und nach der thermischen Belastung mit anschließenden 72 000 Biegezyklen gegenübergestellt. Die Schädigung der Lötverbindung erfolgte bei diesem Exemplar vor allem im unteren Lötpad. Bei anderen Lötverbindungen aus der Testreihe sind das untere und das obere Pad im gleichen Maße beeinträchtigt. Die CT-Aufnahme der vorgealterten und zyklisch belasteten Lötverbindung von LED#A12 zeigt im unteren Lötpad in Bild 5-52b deutlich die Risse im Lot (siehe Fehlercode 5) und die Deformationen der Ränder des Pads. Des Weiteren sind Risse an den Porenrändern sowie am Lötstellenrand neu entstanden (siehe Fehlercodes 1 und 2) und einzelne Poren werden durch Risse miteinander verbunden (siehe Fehlercode 4).

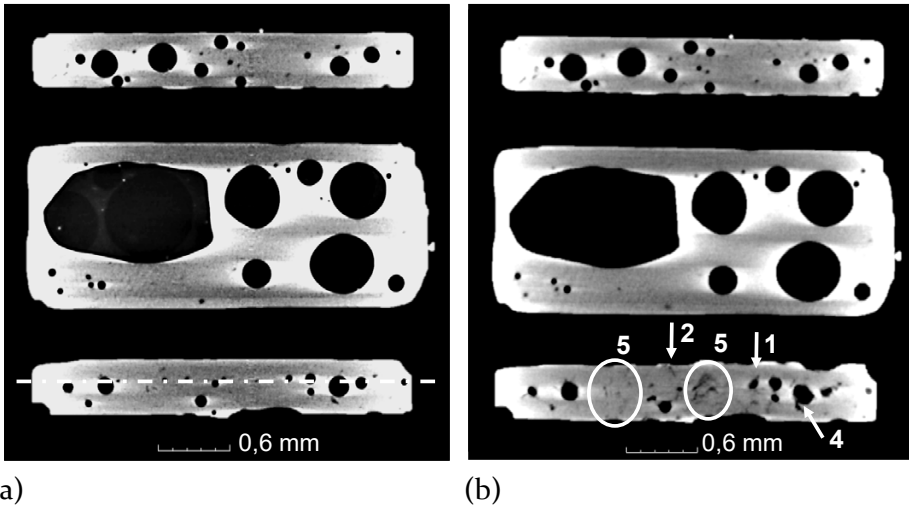


Bild 5-52: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A12 (a) vor und (b) nach dem zyklischen Biegetest mit 72 000 Zyklen nach [153]

In Bild 5-53 ist die in Bild 5-52 eingezeichnete vertikale CT-Schnittebene vor und nach dem zyklischen Biegetest dargestellt. Es ist zu erkennen, dass benachbarte Poren durch Risse miteinander verbunden werden (siehe Fehlercode 4). Fehlercode 5 zeigt ein Risswachstum im Lot, ohne dass an dieser Stelle eine Vorschädigung vorlag.

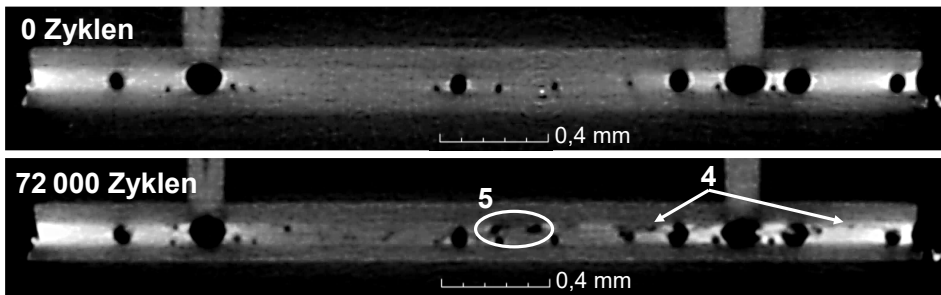


Bild 5-53: Vertikale CT-Schnittebene durch die untere Lötverbindung von LED#A12 vor und nach dem zyklischen Biegetest mit 72 000 Zyklen nach [153]

### 5.5.1.2 Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \leq 5\%$

Bild 5-54 zeigt die Lötverbindung von LED#A13 mit einem Porenanteil von 4 % vor und nach der thermischen Vorbehandlung mit anschließender Biegebelastung. Im unteren und oberen Lötpad sind Risse im Lot ohne Porenbeteiligung entstanden (siehe Fehlercode 5), wobei dieser Effekt im unteren Pad weitaus stärker ausgeprägt ist. Des Weiteren sind die Poren in den äußeren Pads aufgrund der Rissentstehung deformiert und es sind Risse an den Porenrändern entstanden (siehe Fehlercode 1). Risse entstehen zudem noch am Lötstellenrand, die sich mit nahen Poren verbinden (siehe Fehlercodes 2 und 3). Einzelne Poren verbinden sich bei den Lötverbindungen mit einem geringen Porenanteil eher selten, da die Poren zu weit auseinander liegen.

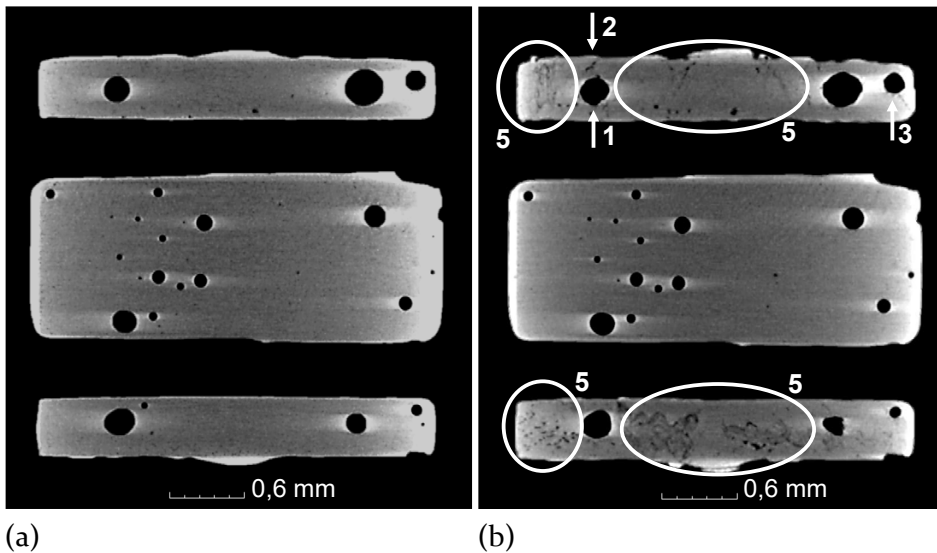


Bild 5-54: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A13 (a) vor und (b) nach dem zyklischen Biegetest mit 72 000 Zyklen nach [153]

Diese Fehlerarten entstehen unabhängig von den Porenanteilen in den Lötverbindungen. Es ist zu beobachten, dass sich auch in völlig schadens- und porenfreien Bereichen Risse bilden. Die Schädigungsmechanismen treten immer nur in den äußeren Löt pads auf, was sich auf die Breite des Prüfkopfs zurückführen lässt, da das von ihm bewirkte Biegemoment in den äußeren Pads am größten ist. Ein elektrischer Ausfall tritt nach der zyklischen



Biegebelastung nicht auf, da noch alle LEDs leuchten. Inwiefern die Poren die mechanische Festigkeit nach der Biegebelastung beeinflussen, wird im nächsten Abschnitt erörtert.

### 5.5.1.3 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil

Nach der zyklischen Biegebelastung erfolgte der Schertest, um die mechanische Festigkeit beurteilen zu können. Zum Vergleich wurden auch Proben im unbelasteten Ausgangszustand und Proben, die 72 Stunden lang einer Temperatur von +125 °C ausgesetzt waren, geschert. Die gemittelten Scherkräfte sind in Bild 5-55 dargestellt. Der Vergleich der maximalen Scherkräfte des Initialzustands und derjenigen nach der thermischen Belastung zeigt, dass durch die Wärmelagerung die größtmöglichen Scherkräfte nicht abnehmen. Diese Tatsache bekräftigt noch einmal die bei der Gegenüberstellung der CT-Aufnahmen vor und nach der thermischen Belastung gewonnen Erkenntnisse (siehe Bild 5-51a und Bild 5-51b). Die Wärmelagerung hat somit keine Auswirkung auf die Lötstellenqualität und die Schadensmechanismen können alleine auf die zyklische Biegebelastung zurückgeführt werden. Nach 72 000 Biegezyklen ist für alle Porenanteile ein Rückgang der maximalen Scherkräfte im Bereich zwischen 23 % und 28 % bezogen auf den Initialzustand zu erkennen. Der Unterschied zwischen den Scherkräften des niedrigen und mittleren Porenanteils ist zu vernachlässigen, da die Abnahme innerhalb der Fehlerbalken liegt. Erst bei einem Porenanteil von  $PA_{Fläche} > 15 \%$  ist nach der Biegebelastung ein deutlicher Rückgang von 30 % gegenüber des niedrigen Porenanteils zu verzeichnen. Alle Lötverbindungen wurden direkt im Lot geschert.

Nach der zyklischen Biegebelastung zeigt die Testbaugruppe A neue Risse in zuvor poren- und schadensfreien Bereichen. Die maximalen Scherkräfte zeigen, dass erst bei einem Porenanteil  $PA_{Fläche} \geq 15 \%$  die mechanische Festigkeit nachlässt und dass Lötverbindungen mit einem Porenanteil  $5 \% < PA_{Fläche} \leq 15 \%$  nahezu dieselben Scherkräfte aufweisen wie diejenigen mit einem geringen Porenanteil von  $PA_{Fläche} \leq 5 \%$ .

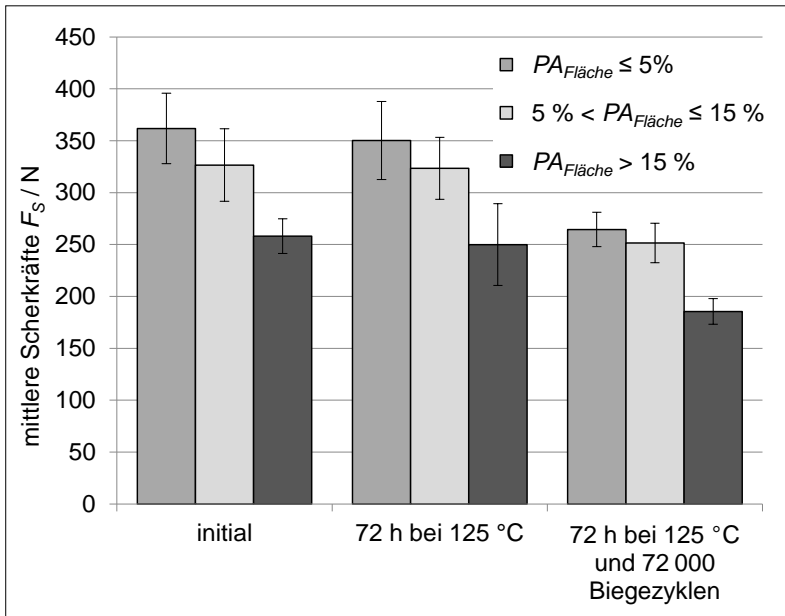


Bild 5-55: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe A mit klassifizierten Porenanteilen nach thermischer Belastung und zusätzlicher zyklischer Biegebelastung nach [153], die Fehlerindikatoren stellt die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

## 5.5.2 Beurteilung der Testbaugruppe B

Für die Testbaugruppe B treten bereits nach 36 000 Biegezyklen dieselben Schadensmechanismen wie bei der Testbaugruppe A nach 72 000 Biegezyklen auf. Nach 72 000 Biegezyklen sind nur noch wenige Risse dazu gekommen. Das bei der Testbaugruppe B die Schäden schon früher auftreten, lässt sich mit der andersartigen Geometrie des IMS-Substrats begründen, das im Gegensatz zur Testbaugruppe A länger und schmaler ist (siehe Tabelle 3-2)

### 5.5.2.1 Untersuchung von Lötstellen mit hohem Porenanteil $PA_{Fläche} \geq 25\%$

Die Gegenüberstellung von LED#B7 mit einem Porenanteil von 26 % vor und nach der Biegebelastung ist in Bild 5-56 dargestellt.

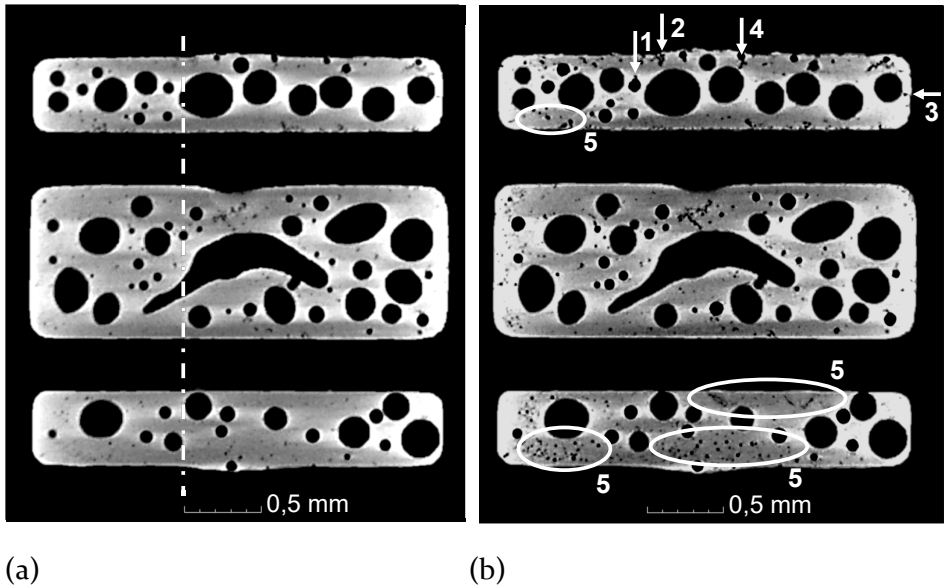


Bild 5-56: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#B7 (a) vor und (b) nach dem zyklischen Biegetest mit 36 000 Zyklen nach [153]

Mit Fehlercode 5 sind neue Risse im Lot gekennzeichnet, die durch die Biegebelastung entstanden sind. Im oberen Lötpad ist die Rissentstehung am Poren- und Lötstellenrand an den Fehlercodes 1 und 2 zu erkennen. Mit zunehmender Anzahl der Biegezyklen werden sich diese Risse ausbreiten und mit den nächsten Poren verbinden. Die Fehlercodes 3 und 4 zeigen bereits dieses Verhalten. Hier haben sich vom Lötstellenrand ausgehende Risse mit der nächsten Pore oder Risse haben zwei einzelne Poren miteinander verbunden. Der Vergleich mit dem Ausgangszustand in Bild 5-56a zeigt, dass diese Stellen bereits vorgeschädigt waren und die Schädigung sich durch die Biegebelastung weiter ausgebreitet hat.

Bild 5-57 vergleicht für die in Bild 5-56a eingezeichnete Schnittebene den Ausgangszustand der Lötverbindung mit dem Zustand nach der Belastung. Hier ist zu sehen, dass sich bereits vorhandene Schädigungen weiter verstärken. Fehlercode 2 zeigt, wie sich der Riss vom Lötstellenrand durch die Biegung in der Vertikalen und Horizontalen ausweitet und höchstwahrscheinlich mit zunehmender Zyklenzahl die Pore erreichen wird. Die Risse an Fehlercode 5 entstehen aus bereits zuvor vorhandenen Mikroporen. Eine Deformation der Poren ist hier nicht zu beobachten.

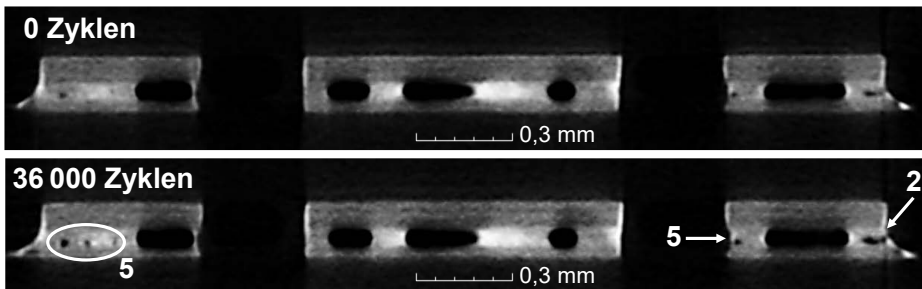


Bild 5-57: Vertikale CT-Schnittebene durch die Lötverbindung von LED#B7 vor und nach dem zyklischen Biegetest mit 36 000 Zyklen

#### 5.5.2.2 Untersuchung von Lötstellen mit geringem Porenanteil $PA_{\text{Fläche}} \leq 5 \%$

Die horizontale CT-Schnittebene von LED#B6 mit einem Porenanteil von 3 % ist in Bild 5-58 vor und nach 36 000 Biegezyklen dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Zunahme von Rissen und die Vergrößerung bestehender Mikroporen im oberen und unteren Lötpad (siehe Fehlercode 5). Die Porengeometrie ist noch nicht deformiert und es haben sich noch keine Risse gebildet, die vom Poren- oder vom Lötstellenrand ausgehen.

Die CT-Untersuchungen ergeben bei der Testbaugruppe B, dass bei den porenreichen Lötverbindungen alle Fehlerarten gemäß Tabelle 5-2 entstehen. Bei den porenarmen Lötverbindungen hingegen entstehen neue Risse direkt im Lot beziehungsweise Vorschädigungen dienen als Schadensquelle und bereits vorhandene Risse oder Mikroporen werden vergrößert. Am thermischen Pad sind unabhängig vom Porenanteil keine Defekte durch die zyklische Biegebelastung feststellbar. Sowohl in den porenarmen als auch in den porenreichen Lötverbindungen konnten Schädigungen aufgrund der Biegung festgestellt werden, die zu Qualitätseinbußen führen. Trotz der geschädigten Lötverbindungen leuchten alle LEDs nach der zyklischen Biegebelastung noch. Im Folgenden werden die maximalen Scherkräfte ermittelt, die als Maß für die mechanische Festigkeit dienen können.

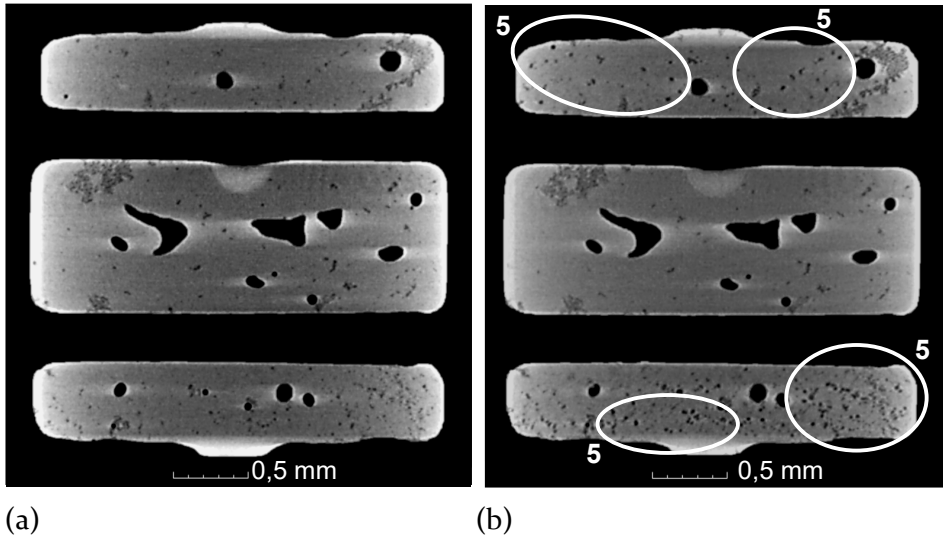


Bild 5-58: Horizontale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#B6 (a) vor und (b) nach dem zyklischen Biegetest mit 36 000 Zyklen nach [153]

### 5.5.2.3 Mechanische Festigkeit der Lötstellen in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil

Die Ergebnisse des Schertests sind in Bild 5-59 dargestellt. Am Diagramm lässt sich ablesen, dass die maximalen Scherkräfte mit der Biegebelastung sinken. Auch hier sind die Höchstwerte der Scherkräfte für den Anfangszustand und diejenigen nach der Wärmelagerung ungefähr gleich groß, sodass ein wesentlicher Einfluss der thermischen Wärmebehandlung auf die Lötstellenqualität ausgeschlossen werden kann. Nach 36 000 Biegezyklen nehmen die Scherkräfte jedoch bei den Lötverbindungen mit dem niedrigen Porenanteil um 40 % und mit dem hohen Porenanteil um 31 % ab. Während die porenreichen Lötverbindungen im Vergleich zu den porenarmen einer um 30 % kleineren maximalen Scherkraft standhält, beträgt der Unterschied nach 36 000 Biegezyklen nur noch 20 %.

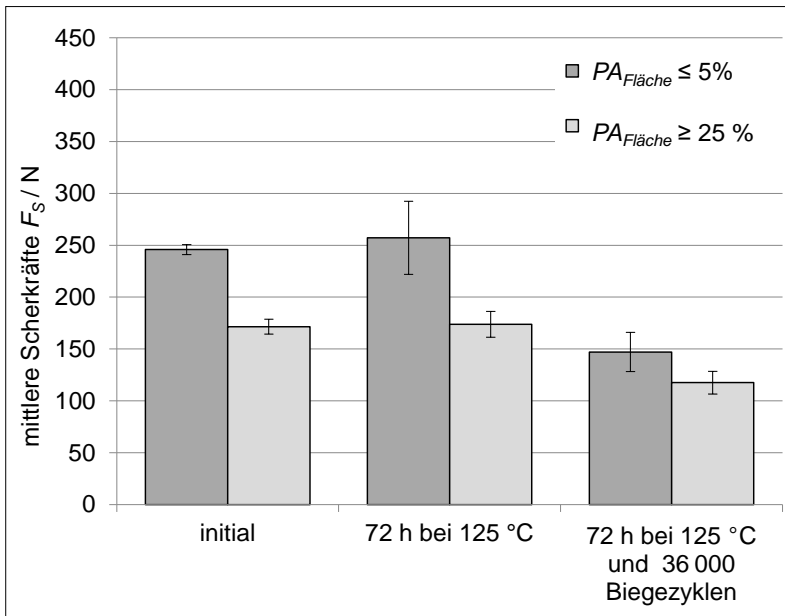


Bild 5-59: Mittlere Scherkräfte der Testbaugruppe B mit klassifizierten Porenanteilen nach thermischer Belastung und zusätzlicher zyklischer Biegebelastung nach [153], die Fehlerindikatoren stellen die  $\pm$ Student- $t$ -Verteilung dar

Anders als bei der Testbaugruppe A ergeben sich bei der Testbaugruppe B je nach Porenanteil und Belastung unterschiedliche Ausfallarten (siehe Tabelle 5-10). Bei den porenarmen Lötverbindungen erfolgte der Bruch im Ausgangszustand vermehrt an der Anschlussfläche der Leiterplattenmetallisierung, stellenweise trat er auch im Lot auf oder es kam zum Mischbruch. Nach der thermischen Belastung brechen alle Lötverbindungen direkt im Lot und nach der Biegebelastung taucht zusätzlich zum Bruch an der Anschlussfläche der Mischbruch wieder auf. Die Poren beeinflussen maßgebend das Bruchverhalten, da erst bei einem Porenanteil  $PA_{\text{Fläche}} \geq 25\%$  die Lötverbindungen im Lot brechen und daher das Lot die Schwachstelle ist. Beim geringen Porenanteil  $PA_{\text{Fläche}} \leq 5\%$  verläuft der Bruch überwiegend durch die Anschlussfläche, die hier als Schwachstelle gilt.

## 5.6 Auswirkung der unterschiedlichen Zuverlässigkeitstests auf die mechanische Festigkeit der Lötstellen

Tabelle 5-10: Einteilung des Bruchverhaltens nach Porenanteil, thermischer Vorbelastung und Biegezyklen nach [153]

Porenanteil	Belastung	Bruch im Lot	Bruch an der Anschlussfläche	Mischbruch im Lot und an der Anschlussfläche
$PA_{\text{Fläche}} \leq 5 \%$	initial	25 %	55 %	20 %
	72 h bei 125 °C	0 %	100 %	0 %
	72 h bei 125 °C und 36 000 Zyklen	0 %	40 %	60 %
$PA_{\text{Fläche}} \geq 25 \%$	initial	100 %	0 %	0 %
	72 h bei 125 °C	100 %	0 %	0 %
	72 h bei 125 °C und 36 000 Zyklen	80 %	0 %	20 %

Sowohl bei Proben mit einem niedrigen als auch mit einem hohen Porenanteil kann ein negativer Einfluss der zyklischen Biegebelastung auf die mechanische Zuverlässigkeit nachgewiesen werden. Die CT-Untersuchungen und der Schertest zeigen, dass die zyklischen Biegebelastungen die Lötstellenqualität herab setzen.

### 5.6 Auswirkung der unterschiedlichen Zuverlässigkeitstests auf die mechanische Festigkeit der Lötstellen

In [154] ist als Kriterium für den Ausfall der Lötstelle formuliert, wenn die maximale Scherkraft nach der Belastung nur noch 50 % der maximalen Scherkraft im unbelasteten Ausgangszustand beträgt. Dabei wird davon ausgegangen, dass ab diesem Wert die Lötverbindung durch die Bildung von Rissen dermaßen geschwächt ist, dass es bald zum elektrischen Ausfall kommt. Bei den hier untersuchten Testbaugruppen zeigt sich bereits im

Ausgangszustand ein erheblicher Einfluss des Porenanteils auf die Scherergebnisse. So sind im unbelasteten Zustand bei der Testbaugruppe A die maximalen Scherkräfte bei Lötverbindungen mit einem geringen Porenanteil ( $PA_{\text{Fläche}} \leq 5\%$ ) um 29 % kleiner als bei denen mit einem hohen ( $PA_{\text{Fläche}} > 15\%$ ). Ein ähnliches Ergebnis zeigt die Testbaugruppe B. Hier unterscheiden sich die maximalen Scherkräfte um 30 %, wobei der hohe Porenanteil mit  $PA_{\text{Fläche}} \geq 25\%$  größer als bei der Testbaugruppe A ist. Die Analyse des Bruchbildes nach dem Schertest ergibt bei der Testbaugruppe B, dass vor allem beim niedrigen Porenanteil die Scherung an der Anschlussfläche der Leiterplatte oder ein Mischbruch erfolgte. Die Scherfestigkeit des Lotes ist folglich viel höher und die initialen Scherkräfte sind nicht repräsentativ für die Lötverbindung. Das oben genannte Ausfallkriterium des 50-prozentigen Abfalls der Scherkraft ist infolgedessen ungeeignet, denn zum einen hängt der Ausgangswert der Scherkraft vom Porenanteil ab und zum anderen ist der Ausgangswert der Scherfestigkeit des Lotes nicht erfasst, wenn die Baugruppe an den Anschlussflächen der Leiterplattenmetallisierung gesichert wird und diese demnach die Schwachstelle ist und nicht das Lot.

In Tabelle 5-11 ist dargestellt, um wie viel Prozent die Scherkräfte beim hohen Porenanteil von denen beim niedrigen am Ende der durchlaufenen Zyklen abweichen. Nach 1 000 Luft/Luft-Temperaturschocks ist die mittlere Scherkraft für die Testbaugruppe A bei einem hohen Porenanteil um 34 % kleiner als bei einem niedrigen. Bei der Testbaugruppe B ist die Abweichung mit 51 % größer, hier befinden sich allerdings auch mehr Poren in der Lötstelle. Andere Zuverlässigkeitstests zeigen ebenfalls, dass sich die anfängliche Differenz der Scherkräfte von 30 % auch nach der Belastung widerspiegelt und meistens vergrößert wird. Ausnahmen davon zeigen sich beim aktiven Lastwechseltest, bei dem die maximalen Scherkräfte nach 1 000 Lastwechseln jedoch stark streuen, wie schon in Abschnitt 5.3.3 erläutert wurde.



## 5.6 Auswirkung der unterschiedlichen Zuverlässigkeitstests auf die mechanische Festigkeit der Lötstellen

Tabelle 5-11: Abweichung der Scherkräfte vom hohen zum niedrigen Porenanteil nach maximal durchlaufenen Zyklen in Prozent

Test	Zyklen	TBG A	TBG B
Luft/Luft-Temperaturschocktest	1 000	34 %	51 %
flüssig/flüssig-Temperaturschocktest	1 000	42 %	-
aktiver Lastwechseltest	1 000	1 %	-
überlagerter Lastwechseltest	5 283 Ein/Aus	-	35 %
zyklischer Biegetest	72 000 (TBG A) 36 000 (TBG B)	30 %	20 %

In Tabelle 5-12 werden die Scherkräfte nach und vor der Belastung miteinander verglichen. Dargestellt ist die prozentuale Abnahme der Scherkräfte aufgrund der thermo-mechanischen und der mechanischen Belastungen für den niedrigen und den hohen Porenanteil. Es ist zu erkennen, dass die Lötverbindungen aufgrund ihrer Alterung unabhängig vom Porenanteil an Festigkeit einbüßen. Ein hoher Porenanteil hat bei den meisten Tests einen stärkeren Abfall der Scherkräfte zur Folge. Außerdem ist der Anfangswert der Scherkräfte geringer.

Poren reduzieren den Verbindungsquerschnitt des Lotes und begünstigen zudem den Umstand, dass Risse den Lötstellenrand mit Poren oder zwei einzelne Poren miteinander verbinden. Dadurch entstehen weitläufige Risse schneller als es bei porenarmen Lötverbindungen der Fall ist. Der aktive Lastwechseltest und der zyklische Biegetest von Testbaugruppe B sind hier die Ausnahmen. Wie bereits erwähnt streuen dort die Scherkräfte nach 1 000 Lastwechseln so stark, dass der Fokus der Betrachtung nicht auf diesen liegen sollte. Bei der zyklischen Biegebelastung erfolgt die Scherung beim geringen Porenanteil größtenteils durch die Anschlussfläche oder als Mischbruch, während beim hohen Porenanteil in der Regel durch das Lot gesichert wird. Das bedeutet, dass ein Vergleich nicht ohne weiteres möglich ist. Die Analyse der Bruchflächen nach der Scherung zeigt bei der Testbaugruppe B häufig, dass nicht das Lot, sondern die Anschlussfläche die Schwachstelle ist.

Tabelle 5-12: Reduzierung der Scherkräfte in Prozent bedingt durch die Alterung

	Testbau- gruppe A		Testbau- gruppe B	
<b>Porenanteil</b>	$\leq 5 \%$	$> 15 \%$	$\leq 5 \%$	$\geq 25 \%$
<b>Test</b>				
Luft/Luft-Temperaturschocktest	57 %	60 %	53 %	67 %
flüssig/flüssig-Temperaturschock- test	48 %	58 %	-	-
aktiver Lastwechseltest	41 %	18 %	-	-
überlagerter Lastwechseltest	-	-	19 %	25 %
zyklischer Biegetest	27 %	28 %	40 %	31 %

Trotz der starken Abnahme der Scherkräfte aufgrund der thermo-mechanischen und mechanischen Belastungen leuchten die LEDs im Regelfall noch. Es muss überdacht werden, ob der Abfall der Scherkräfte und der Light-on-Test als Ausfallkriterium geeignet sind.

## 6 Simulation des Einflusses von Poren mittels der Finiten-Elemente-Methode

Ergänzend zu den in Kapitel 5 vorgestellten Zuverlässigkeitstests erfolgen in diesem Kapitel Simulationen mit der Finiten-Elemente-Methode. Mit Hilfe der FEM können physikalische Vorgänge durch Differentialgleichungen beschrieben und anschließend mittels numerischer Verfahren berechnet werden. Bei diesem Verfahren wird das zu untersuchende Gebiet in mehrere kleinere Teilgebiete, den sogenannten finiten Elementen, zerlegt [155]. In Bild 6-1 sind solche finiten Elemente zu sehen, die durch Knotenpunkte miteinander verbunden sind, wodurch ein Netz entsteht [156]. Grundsätzlich gilt, dass für Bereiche, die von großem Interesse sind, ein feineres Netz angewendet wird, während an unwichtigeren Positionen das Netz recht grob gewählt wird [157]. Das zeigt anschaulich Bild 6-1, in der ein Ausschnitt der LED dargestellt ist. Die Lötverbindung und die Kupferlagen sind fein vernetzt, wohingegen die abseits liegenden Bereiche der Leiterplatte nur grob vernetzt sind.

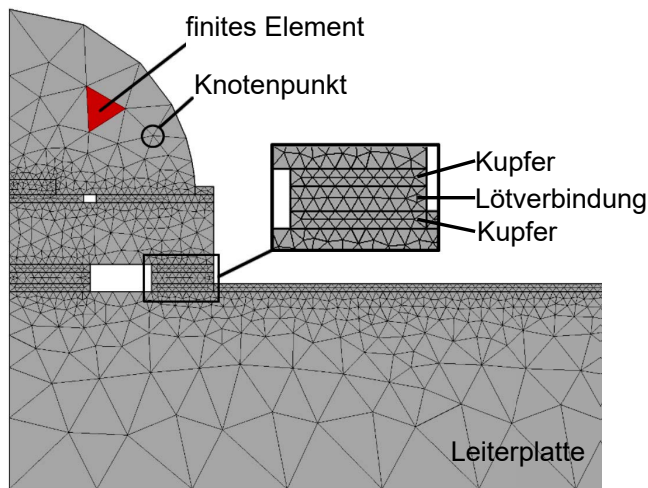


Bild 6-1: Vernetzung einer gelöteten LED [158]

Ein wichtiges Einsatzgebiet dieser Simulation ist die Strukturmechanik, in deren Rahmen die Berechnung von Verformungen, Spannungen und Temperaturen stattfindet [155]. Ausgehend von einem Simulationsmodell können Entwicklungszeiten verkürzt werden, indem Testaufbauten und Versuchsreihen gezielter geplant beziehungsweise der Aufwand dafür stark eingeschränkt wird. Nicht zielführende Aufbauten oder Tests werden dadurch von vornherein identifiziert und ausgeschlossen [159]. Mit Hilfe der FEM können Erwärmungs- und Kühlvorgänge sowie virtuelle Ermüdungsanalysen durch wiederholte Be- und Entlastungen simuliert und somit sowohl Temperatur- als auch Spannungsverteilungen untersucht werden [160].

Die FEM-Simulationen erfolgen im Rahmen des Forschungsprojekts VoReSo in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)<sup>24</sup> und dem Fraunhofer-Anwendungszentrum Ressourceneffizienz<sup>25</sup>. Die Simulationen am FAPS werden mit der Simulationssoftware ANSYS 15.0 und am Anwendungszentrum mit Comsol Multiphysics 5.2 durchgeführt.

Das Ziel ist es, durch einen iterativen Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit der Simulation ein möglichst realitätsnahes Simulationsmodell zu entwickeln und zu verifizieren. Durch die CT-Analysen der Lötverbindungen sind die genaue Lage, die Anzahl und die Größe der Poren bekannt. Auf der Grundlage dieser Daten können nun die Poren in die Simulationssoftware übertragen werden, um anschließend die simulierte Kriechdehnung<sup>26</sup> mit den im Experiment entstandenen Rissen zu vergleichen. Die Poren können in den CT-Aufnahmen manuell ausgemessen und einzeln in die Simulationssoftware eingebunden werden.

---

<sup>24</sup> Das FAPS ist ein Lehrstuhl an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

<sup>25</sup> Das Anwendungszentrum wurde in Kooperation zwischen dem Fraunhofer-Institut für Silikatforschung ISC, seiner Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS und der Hochschule Aschaffenburg gegründet.

<sup>26</sup> Kriechdehnung ist die auf die ursprüngliche Messlänge  $L_0$  bezogene Längenänderung  $\Delta L$  und wird in Prozent ausgedrückt [161].

## 6.1 Vorgehensweise zum Aufbau eines realitätsnahen Simulationsmodells

In Bild 6-2 sind die einzelnen Schritte dargestellt, um ein realitätsnahes Simulationsmodell zu erhalten. Zunächst wird ein dreidimensionales Modell der Testbaugruppe mit Hilfe der Geometriedaten aus dem CAD erstellt, dann werden die Poren anhand der CT-Daten eingefügt und schließlich den einzelnen Geometrien Materialien zugewiesen. Anschließend erfolgen thermische beziehungsweise strukturmechanische Simulationen unter Berücksichtigung der Randbedingungen des jeweiligen Zuverlässigkeitstests. Solche Randbedingungen können z.B. die Umgebungstemperatur, die Konvektion, die interne Wärmeerzeugung durch den LED-Chip oder die Vernetzung sein. Stimmt die Simulation mit den Ergebnissen des Zuverlässigkeitstests nicht überein, erfolgen eine Überprüfung der Geometrie- und Materialdaten, gegebenenfalls eine gezielte Vereinfachung der Vernetzung und eine Anpassung der Simulationsparameter wie beispielsweise dem Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion. Nachdem auf diese Weise ein wirklichkeitsgetreues Simulationsmodell entwickelt worden ist, erfolgen in einem nächsten Schritt Fallstudien, indem Poren gezielt in ihrer Größe, Anzahl und Position in der Lötverbindung platziert werden. Verschiedene Porenpositionen sowie diverse Porengrößen (Mikro-, Makroporen) und die Anzahl der Poren werden in der Simulation gezielt variiert und deren Auswirkungen auf die Rissentstehung untersucht. Im Experiment ist die gezielte Einbringung von Poren schwierig, da dort statistische Einflüsse dominieren und Zufallsprozesse ablaufen. Als Grundlage für die Fallstudien dienen CT-Aufnahmen in denen häufige Porenpositionen und -kombinationen identifiziert und für die Fallstudien abgeleitet werden. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, kritische Positionen, Größen sowie Anhäufungen von Poren zu identifizieren und deren spezifische Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindung herauszuarbeiten.

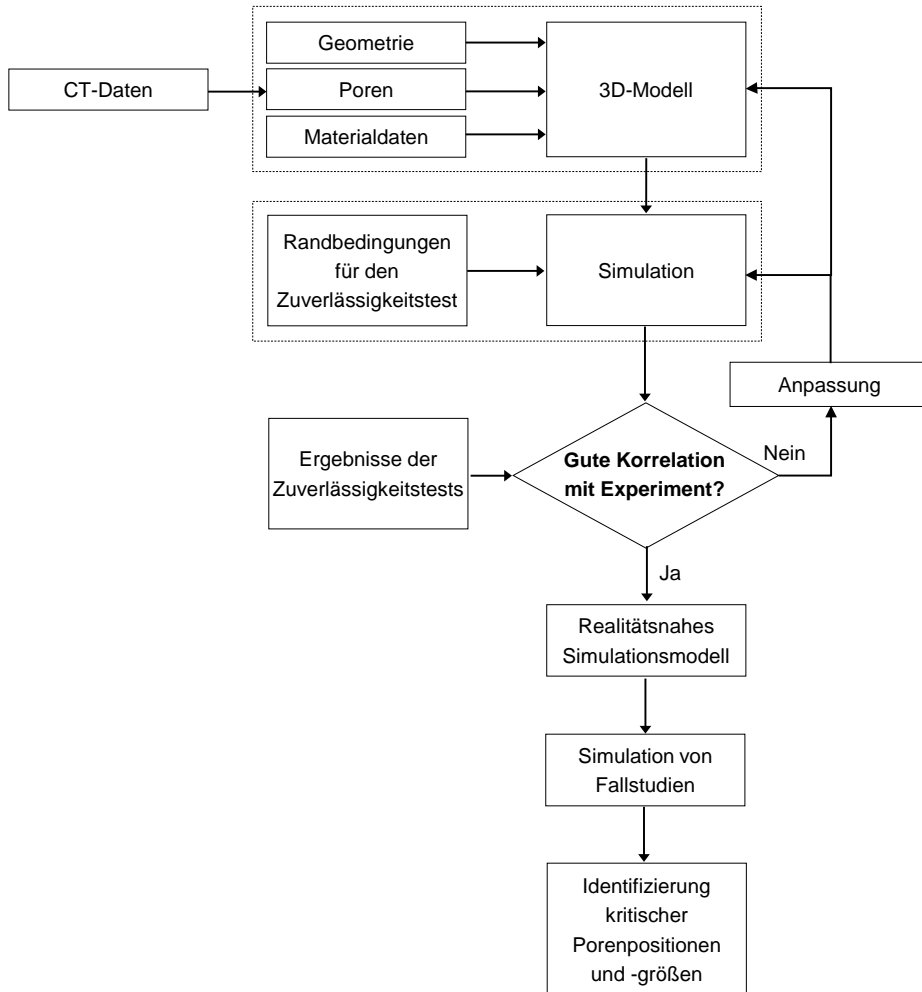


Bild 6-2: Vorgehensweise bei dem Aufbau des realitätsnahen Simulationsmodells nach [73]

In Bild 6-3a ist das Modell der Testbaugruppe A mit den einzelnen Schichten und den zugehörigen Materialien dargestellt. Die Abmessungen der einzelnen Schichten können der Tabelle 14-1 im Anhang entnommen werden. Um die Spannungsverteilungen in der Lötverbindung zu berechnen, werden im nächsten Schritt den einzelnen Schichten Materialeigenschaften, wie ein Wärmeausdehnungskoeffizient, ein Elastizitätsmodul und eine Querkontraktionszahl, zugeordnet. Die Materialdaten sind in Tabelle 14-2 im Anhang aufgeführt. Bei der Netzerstellung für das Modell werden verschiedene Elementgrößen festgelegt. Der LED-Chip, die Kupferlagen, die Lötverbindung und das IMS-Substrat in der Nähe der Lötverbindung werden feiner

als diejenigen Teile der IMS-Leiterplatte vernetzt, die nicht direkt mit der LED-Baugruppe verbunden sind. Auf diese Weise soll die Simulationszeit gesenkt werden und gleichzeitig die Qualität der Ergebnisse nicht beeinträchtigt werden. In Bild 6-3b sind eine CT-Schnittebene und das zugehörige FEM-Modell einer Lötverbindung zu sehen. Dabei wurde das FEM-Modell auf der Grundlage der CT-Schnittstelle erstellt und somit die Poren realitätsnah in die Simulation eingefügt.

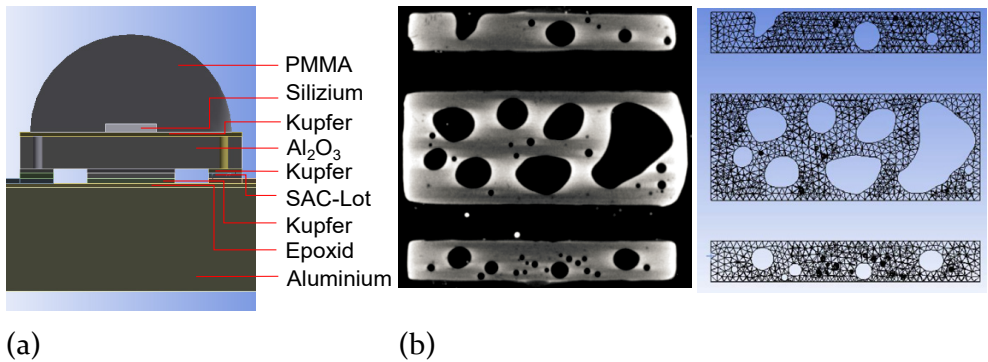


Bild 6-3: (a) Simulationsmodell der Testbaugruppe [73], (b) CT-Schnittebene der Lötverbindung als Vorlage zur Implementierung der Poren in die Simulationssoftware [97], [162]

Die Schädigungen in SAC-Loten werden vor allem durch das Kriechen während der Temperaturwechsel hervorgerufen. Hierbei bildet der sekundäre Bereich der Kriechkurve die Mechanismen, die im Lot vorgehen, am besten ab [163]. Um kritische Spannungsspitzen und günstige Lagen der Rissinitiierung zu ermitteln, wird die akkumulierte Kriechdehnung in der Lötverbindung als Maß für die inelastische Verformung verwendet [164]. Die akkumulierte Kriechdehnung ist einer der weitverbreitetsten Schadensindikatoren für die Ermüdung [57]. Sie beschreibt die über die Zeit aufsummierte Kriechdehnung für alle durchlaufenen Zyklen [163]. Um die akkumulierte Kriechdehnung zu ermitteln, wird die Garofalo-Gleichung für die Kriechdehnungsrate  $\dot{\epsilon}$  verwendet (siehe Gleichung (2-6)) [57]. Neben dem Garofalo-Modell existieren noch weitere Modelle zur Berechnung der akkumulierten Kriechdehnung [163], wobei die Garofalo-Gleichung häufig bei SAC-Loten eingesetzt wird [57], [165], [166], [167]. Die zum Lösen der Gleichung benötigten Materialkonstanten sind in Tabelle 14-3 im Anhang aufgeführt.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für den aktiven Lastwechseltest vorgestellt und wie bereits die CT-Aufnahmen der Zuverlässigkeitstests mit Hilfe der Fehlercodes aus Tabelle 5-2 bewertet.

## 6.2 Simulation des aktiven Lastwechseltests

In diesem Abschnitt wird der aktive Lastwechseltest mit den in Tabelle 5-7 aufgeführten Testbedingungen simuliert und mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5-3 verglichen. Die Ergebnisse wurden bereits in [73] und [97] veröffentlicht. Zunächst erfolgte die Anpassung der Simulationsparameter anhand der thermischen Simulation, um anschließend die Kriechdehnung innerhalb der Lötverbindung zu analysieren und mit den Ergebnissen der Zuverlässigkeitstests zu vergleichen.

### 6.2.1 Verifikation des Simulationsmodells

Beim aktiven Lastwechseltest wird die Temperaturänderung durch das Ein- und Ausschalten der LED bewirkt. Die Ein- und Ausschaltdauer beträgt hierbei jeweils fünf Minuten. Um sicherzustellen, dass die LED während der Ausschalphase wieder auf Raumtemperatur abkühlt, wird ein zusätzlicher Lüfter eingesetzt. Die durch den externen Lüfter verursachte Konvektion wird in der Simulation mittels einer Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten nachgestellt. Bild 6-4a zeigt die Temperaturverteilung der LED-Testbaugruppe während des Einschaltzyklus nach Anpassung der Simulationsdaten. Die höchste Temperatur von 149 °C herrscht hierbei während des Lastwechseltests am LED-Chip. Somit ist die laut Datenblatt maximal zulässige Sperrschichttemperatur von  $T_j = 150$  °C nahezu erreicht. In Bild 6-4b ist die Temperaturverteilung innerhalb der Lötverbindung dargestellt. Hierzu wurden die Umgebungstemperatur, die Konvektion und die interne Wärmeerzeugung in der Simulation nachbearbeitet, um eine gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der simulierten Temperatur zu erhalten. Am eingezeichneten Messpunkt beträgt die Temperatur im eingeschalteten Zustand der LED 128 °C in der Simulation, während 127 °C mit einem Thermoelement gemessen wurde.

Bild 6-4c zeigt, dass die simulierte mit der gemessenen Temperatur am Messpunkt während der Schaltzyklen nahezu übereinstimmt. Auf diese Weise wurde die Simulation an die gemessene Temperatur angepasst. Diese kann allerdings aufgrund von Messfehlern von der tatsächlichen Temperatur abweichen.



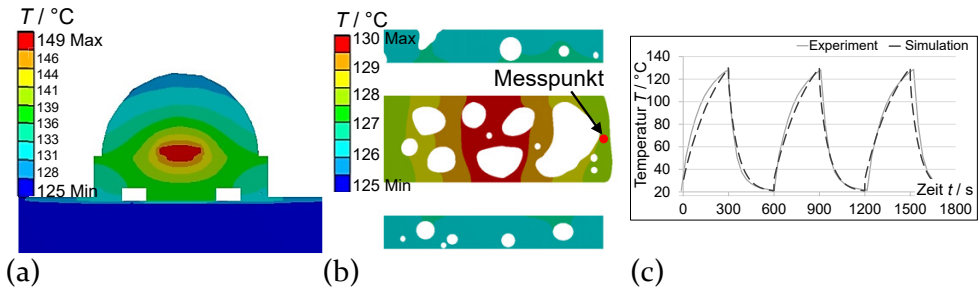


Bild 6-4: Temperaturverteilung (a) der LED-Testbaugruppe im eingeschalteten Zustand, (b) in der Lötverbindung, (c) die simulierten und gemessenen Temperaturkurven am Messpunkt [73]

Nachdem die Übereinstimmung des simulierten und des gemessenen Temperaturverlaufs erreicht wurde, erfolgte im nächsten Schritt die strukturelle Simulation, um die durch die Temperaturänderungen verursachten thermo-mechanischen Belastungen zu ermitteln. Hierfür wurden die Geometrie- und die Materialdaten sowie die aus der thermischen Simulation resultierenden Ergebnisse als Eingangsdaten in die strukturelle Analyse übernommen. Anschließend erfolgte der Vergleich der simulierten mit den experimentellen Daten, indem die akkumulierte Kriechdehnung nach drei simulierten Zyklen und die aufgrund der Lastwechsel entstandenen Risse gegenübergestellt wurden.

Bild 6-5 zeigt den Vergleich der experimentellen mit den simulierten Daten von LED#A9 nach 1 000 Lastwechseln. Die experimentellen Ergebnisse von LED#A9 wurden bereits ausführlich in Abschnitt 5.3.1 behandelt. Um ein möglichst realitätsnahes Simulationsmodell zu gewinnen, wurde ebenfalls die ungleichmäßige Lotspaltdicke berücksichtigt. So beträgt die linke Seite 65  $\mu\text{m}$ , während die rechte Seite eine Lotspaltdicke von 110  $\mu\text{m}$  aufweist. Beide Schnittebenen gehen durch den oberen Bereich der Lötverbindung, da sich hier die meisten Risse bilden (siehe Abschnitt 5-3). Die Farbskala stellt die akkumulierte Kriechdehnung in Prozent dar, wobei blau die geringste und rot die höchste Dehnung bedeutet. Die Dehnungswerte wurden nicht quantifiziert und sind nur für eine qualitative Betrachtung geeignet.

Es ist ersichtlich, dass das Lot im thermischen Pad weniger stark als in den beiden äußeren Lötpads kriecht. Anhand der Fehlercodes aus Tabelle 5-2 können die Übereinstimmungen und Abweichungen hervorgehoben werden. Die weißen beziehungsweise schwarzen Fehlercodes weisen auf eine Übereinstimmung hin, während rote Fehlercodes die Abweichungen kennzeichnen.

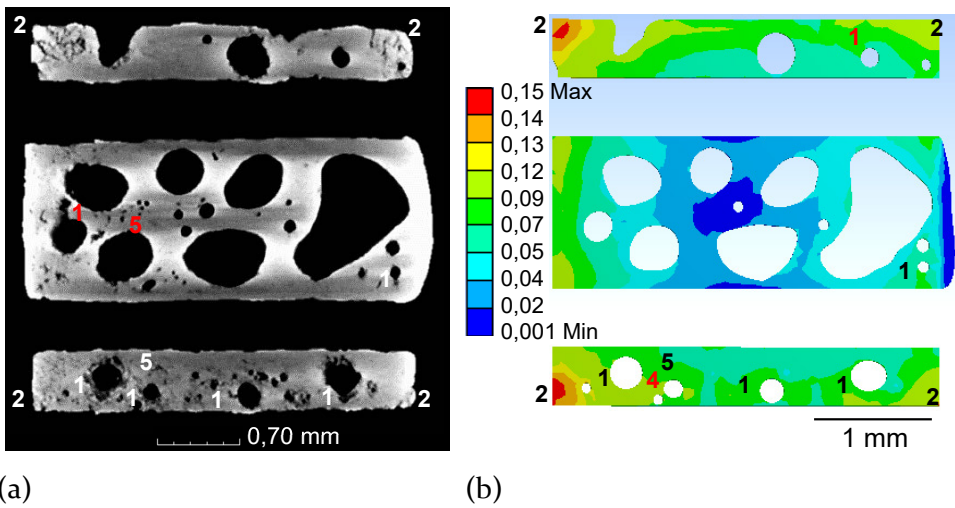


Bild 6-5: (a) Horizontale CT-Schnittebene von LED#A9 nach 1 000 Lastwechseln, (b) simulierte akkumulierte Kriechdehnung durch den oberen Teil der Lötverbindung [97], [162]

Es ist zu erkennen, dass sich durch die ungleichmäßige Lotspaltdicke die höchste akkumulierte Kriechdehnung in den linken Ecken der Lötstellen des Anoden- und Kathodenlötpads an Fehlercode 2 befindet. Diese Ecken sind auch durch Risse stark geschädigt, wie in den CT-Aufnahmen zu erkennen ist. Auch in der Umgebung der Poren kommt es zu einer höheren akkumulierten Kriechdehnung, die sich in den CT-Aufnahmen darin zeigt, dass Risse von den Poren ausgehen (siehe Fehlercode 1). Eine Ausnahme bildet die Pore im oberen Pad, die in der Simulation mit einer roten 1 markiert ist. Anhand der Simulationsergebnisse wäre zu erwarten, dass sich Risse am Porenrand bilden. Die CT-Aufnahme zeigt hier jedoch keine Auffälligkeiten. In der Simulation treten stellenweise zwischen den Poren hohe Kriechdehnungen im Lot auf, wie z.B. an der mit Fehlercode 4 markierten Stelle. In der CT-Aufnahme sind an dieser Position zunächst nur Risse an den Porenrändern zu erkennen, die sich jedoch noch nicht verbinden. Deshalb ist diese mit Fehlercode 1 markiert worden. Es ist zu erwarten, dass sich die Risse zwischen den Poren mit zunehmender Lastwechselanzahl ausbreiten. Die CT-Aufnahme zeigt in der linken Hälfte des thermischen Pads Risse im Lot und an den Porenrändern (siehe rote Fehlercodes 1 und 5), jedoch sind in den Simulationsergebnissen hierfür keine eindeutigen Hinweise ersichtlich.

Auch die Gegenüberstellung in Bild 6-6 der vertikalen CT-Schnittebene von LED#A9 nach 1 000 Lastwechseln mit der simulierten Kriechdehnung zeigt eine gute Analogie von Experiment und Simulation, da die Risse mit der akkumulierten Kriechdehnung korrelieren.

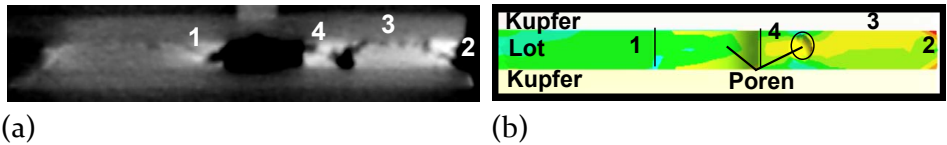


Bild 6-6: (a) Vertikale CT-Schnittebene der Lötverbindung von LED#A9 nach 1 000 Lastwechseln, (b) simulierte akkumulierte Kriechdehnung [97], [162]

In der Simulation zeigen die roten Bereiche am rechten Rand der Lötverbindung eine erhöhte Kriechdehnung an. Im Experiment sind hier während der 1 000 Lastwechsel zwei Risse entstanden (siehe Fehlercode 2). Der untere Riss wandert zunächst zum oberen Lötstellenbereich und dann weiter bis zur nächsten Pore und ist deshalb mit einer 3 gekennzeichnet. In der Simulation spiegelt sich dies dadurch wider, dass der obere Teil der Lötverbindung eine höhere akkumulierte Kriechdehnung als der untere Teil aufweist. Auch zwischen den Poren ist eine größere Kriechdehnung zu erkennen, die im Experiment zu einem Riss geführt hat (siehe Fehlercode 4). Ebenso kennzeichnet Fehlercode 1 einen Riss am linken Rand der großen Pore, wo an der gleichen Stelle in der Simulation die Kriechdehnung leicht erhöht ist.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Simulationsmodell gut mit den experimentell ermittelten Ergebnissen aus dem Lastwechseltest übereinstimmt. An Positionen mit einer erhöhten akkumulierten Kriechdehnung im Lot entstehen im Experiment Risse. Das Simulationsmodell kommt somit der Wirklichkeit sehr nahe. Noch bestehende Abweichungen zwischen Simulation und Experiment können durch Vereinfachungen im Simulationsmodell begründet werden. So wird das Lot als homogene Schicht ohne Berücksichtigung der Mikrostruktur und der intermetallischen Phasen angenommen. Des Weiteren kann bei der manuellen Implementierung der Poren ihre Wölbung nicht in der vertikalen Ansicht modelliert werden. Ein Grund hierfür ist, dass die komplexen Umrisse der Poren in der Simulation manuell nachgezeichnet und anschließend in die Tiefe zu einem Volumenkörper ausgedehnt werden, wodurch in der vertikalen Ansicht ein gerader Porenrand entsteht.

Nachdem das Simulationsmodell verifiziert wurde, erfolgt im nächsten Schritt die Untersuchung kritischer Porenpositionen und -größen.

### 6.2.2 Identifizierung kritischer Porenpositionen und -größen

Auf der Grundlage des realitätsnahen Simulationsmodells werden nun Fallstudien mit verschiedenen Porengrößen und -positionen durchgeführt. Diese werden anhand von CT-Aufnahmen ausgewählt, indem häufig auftretende Größen, Positionen und Kombinationen von Poren sowohl in den Lötverbindungen des thermischen Pads als auch des Anoden- und Kathodenpads schematisch vereinfacht und diese anschließend untersucht werden. Analysen der CT-Daten ergaben, dass Poren mit einem Durchmesser der kleiner als die Lotspaltdicke ist, vernachlässigt werden können.

Da beim Lastwechseltest der obere Bereich der Lötverbindung direkt unterhalb der LED kritisch ist, wurden die Schnittebenen entsprechend gewählt. Bild 6-7a zeigt zunächst die Simulation einer porenfreien Lötverbindung mit einer Lotspaltdicke von  $90\text{ }\mu\text{m}$ , welche die Ausgangssituation darstellt. In der Lötverbindung des thermischen Pads findet eine deutlich geringere Kriechdehnung statt als in der Lötverbindung des Anoden- und Kathodenpads. Die akkumulierte Kriechdehnung in der Mitte des thermischen Pads ist am geringsten und nimmt zum Bauteilrand hin zu. Der Lötstellenrand des thermischen Pads, der am Anoden- und Kathodenpad anschließt, weist eine ähnliche Kriechdehnung wie die Mitte des thermischen Pads auf. Die höchste Kriechdehnung erfahren die äußeren Ecken der Lötstelle des Anoden- und Kathodenpads. Im Folgenden werden zunächst in die Lötstellen des Anoden- und Kathodenpads und später in die Lötverbindung des thermischen Pads Poren eingebracht und mit der Ausgangssituation verglichen.

In Bild 6-7b sind in der Lötverbindung des Anoden- und Kathodenpads Poren mit einem Durchmesser von  $170\text{ }\mu\text{m}$  in einem Abstand von  $340\text{ }\mu\text{m}$  (obere Lötstelle) und  $170\text{ }\mu\text{m}$  (untere Lötstelle) eingefügt. Die maximale akkumulierte Kriechdehnung erhöht sich kaum im Vergleich zur Ausgangssituation ohne Poren. Die höchste Stresskonzentration findet weiterhin in den Ecken der Lötverbindungen der elektrischen Pads und am Bauteilrand statt. Die akkumulierte Kriechdehnung zwischen den Poren ist nicht höher als im Ausgangszustand ohne Poren. Mehrere Poren mit einer Größe von  $170\text{ }\mu\text{m}$  in den Lötverbindungen der elektrischen Pads scheinen demnach keinen negativen Einfluss zu haben.

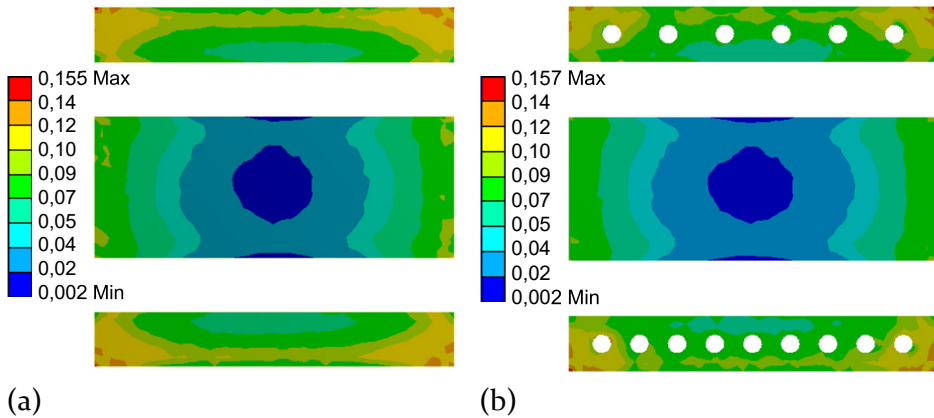


Bild 6-7: Vergleich der akkumulierten Kriechdehnung (a) in einer Lötverbindung ohne Poren als Ausgangssituation, (b) mit kleinen Poren im Anoden- und Kathodenpad [73], [162]

Neben den kleinen Poren mit einem Durchmesser von  $170\ \mu\text{m}$  wurde der Einfluss von größeren Poren mit einem Durchmesser von  $280\ \mu\text{m}$  untersucht. Hierzu wurden, wie in Bild 6-8 dargestellt, die Porenpositionen variiert. In Bild 6-8a ist eine Pore in die Mitte und eine zweite am Rand der Lötstelle eingebracht. Die maximale akkumulierte Kriechdehnung hat sich hier im Vergleich zum Ausgangszustand (siehe Bild 6-7a) um 11 % erhöht. In diesem Fall ist die Pore am Rand kritischer einzustufen als die Pore in der Mitte. In der Umgebung der Randpore ist eine erhöhte Kriechdehnung zu sehen, die darauf schließen lässt, dass am Rand der Pore Risse entstehen werden, die sich bis zum Lötstellenrand erstrecken.

In Bild 6-8b werden die Wechselwirkungen zwischen zwei in der Lötstellenecke liegenden Poren untersucht. Diese führen im mittleren Bereich der Lötverbindung zwar zu einer geringeren Kriechdehnung, allerdings erhöht sich die Kriechdehnung in der Ecke der Lötverbindung durch die Poren. Die äußere Pore wird fast vollständig durch eine erhöhte Kriechdehnung im Lot umschlossen, wodurch sich hier Risse bilden werden. Bild 6-8c zeigt einen Schnitt durch die beiden Poren in der Ecke von Bild 6-8b und Bild 6-8d eine vergleichbare CT-Schnittebene, die diese Porenkombination im Experiment darstellt. Der Vergleich von Simulation und Experiment zeigt, dass im Experiment nach 1 000 Lastwechseln genau an denjenigen Stellen Risse entstanden sind, an denen in der Simulation eine höhere akkumulierte Kriechdehnung zu beobachten ist. Das sind die Bereiche zwischen den beiden Poren und zwischen rechter Pore und Lötstellenrand.

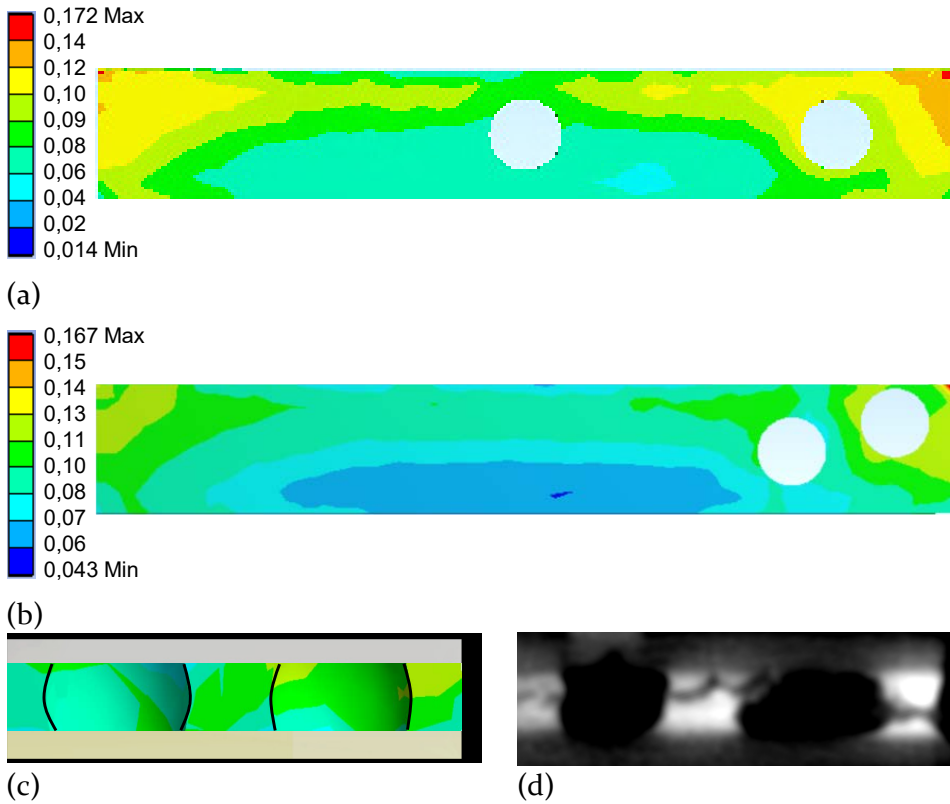


Bild 6-8: Vergleich der akkumulierten Kriechdehnung im Anoden- und Kathodenpad (a) eine Pore mittig und eine in der Ecke, (b) zwei Poren in der Ecke, (c) Schnitt durch die zwei Poren in der Ecke, (d) vergleichbare CT-Aufnahme [162]

Nach den Fallstudien an den elektrischen Pads erfolgen ähnliche Untersuchungen am thermischen Pad. Bild 6-9 zeigt die FEM-Ergebnisse zur Untersuchung verschiedener Porenpositionen, -häufigkeiten und -größen im Lot des thermischen Pads. Hierzu wurden unterschiedliche Ellipsoide in das Lot eingebracht, die sich hinsichtlich ihrer Größe unterscheiden<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Die Halbachsen des ersten Ellipsoids betragen 0,60 mm und 0,45 mm, die des zweiten Ellipsoids 1,20 mm und 0,35 mm. Die dritte Halbachse beider Ellipsoide ist jeweils auf die Höhe der Lotspaltdicke zugeschnitten, sodass sich eine Wölbung der Porenkontur in der vertikalen Ansicht wie in der Wirklichkeit ergibt.

In Bild 6-9a ist zu sehen, dass die Pore ( $PA_{\text{Fläche}} = 20\%$ ) in der Ecke der Lötstelle des thermischen Pads einen Anstieg der akkumulierten Kriechdehnung sowohl in der linken Hälfte des Lots im thermischen Pads als auch im Lot der elektrischen Pads zur Folge hat. Zudem kann beobachtet werden, dass die Erhöhung der Kriechdehnung nicht direkt an der Pore stattfindet, sondern in der unteren Ecke der Lötverbindung des thermischen Pads. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurden die Position, die Anzahl und die Größe der Poren verändert (siehe Bild 6-9b). Hierzu wurde die gleiche Pore zunächst in die Mitte der Lötverbindung positioniert und anschließend eine zweite Pore dergleichen Größe hinzugefügt. Beide Varianten hatten keine Erhöhung der akkumulierten Kriechdehnung zur Folge. Selbst eine Vergrößerung der Pore ( $PA_{\text{Fläche}} = 31\%$ ) ergab keinen negativen Einfluss auf die akkumulierte Kriechdehnung.

Die Ergebnisse der Fallstudien des aktiven Lastwechseltests belegen, dass sich in den Ecken des Lots des Anoden- und des Kathodenpads die größte akkumulierte Kriechdehnung befindet. Dieser Effekt wird durch Poren in den Ecken ab einem Durchmesser von  $170\ \mu\text{m}$  verstärkt. In der Lötverbindung des thermischen Pads tritt sowohl im Experiment als auch in der Simulation die geringste Schädigung auf. In den Fallstudien über verschiedene Porenanzahlen, -positionen und -größen ist nur die Pore in der Ecke der Lötstelle des thermischen Pads als kritisch anzusehen. Die Größe und die Anzahl der Poren wirken sich kaum auf die akkumulierte Kriechdehnung aus, solange die Poren in der Mitte der Lötverbindung des thermischen Pads sitzen. Aus den Fallstudien lässt sich somit schlussfolgern, dass sowohl im Lot des thermischen als auch im Lot der elektrischen Pads nur die Poren in den Ecken als kritisch einzustufen sind.

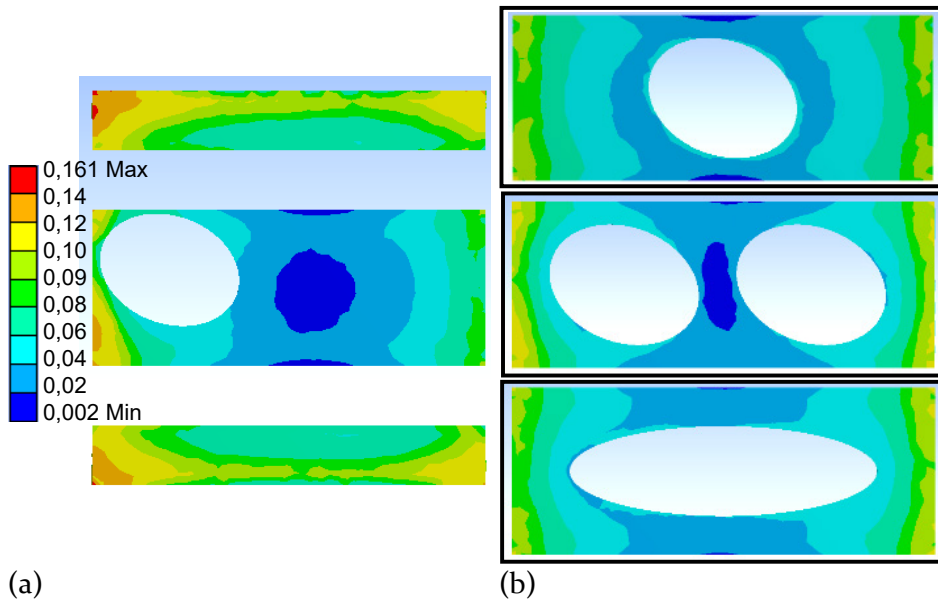


Bild 6-9: Vergleich der akkumulierten Kriechdehnung im thermischen Pad (a) eine Pore in der Ecke, (b) Variationen der Porenposition, -anzahl und -größe [162]

### 6.3 Simulation der kritischen Lotspaltdicke

Die großen rechteckigen Padgeometrien von High-Power-LEDs begünstigen die Verkipfung der LEDs während des Lötprozesses, wodurch eine ungleichmäßige Lotspaltdicke erzeugt wurde. Gründe hierfür sind die Benetzungseigenschaften und Oberflächenspannungen des flüssigen Lotes sowie ausgasende Flussmittel [168]. Eine unregelmäßige Verteilung der Poren im Lotspalt unterstützt zusätzlich eine Verkipfung der Komponenten, sodass es zu einer ungleichmäßigen elektrischen Stromdichte und Temperaturverteilung, vor allem aber zu thermo-mechanischen Spannungen kommt. Verformungen und damit verbundene Spannungen innerhalb der Lötstelle können durch die Lotspaltdicke reduziert werden [52]. Die Verkipfung des Bauteils bewirkt, dass sich an einzelnen Stellen mechanische Spannungen aufbauen können, die letztlich die Lebensdauer des Bauteils verkürzt [168], [169].

In [168] wird an CSP-LEDs eine Erhöhung der maximalen Spannung in der Lötverbindung durch eine Verkipfung mittels Simulation nachgewiesen. In [138] belegen Experimente und Simulationen, dass es keinen Unterschied in der zu erwarteten Lebensdauer gibt, weil die verkippten und nicht verkippten LEDs bei der gleichen Anzahl von Zyklen vollständig brechen. Dies lässt sich damit erklären, dass sich bei verkippten LEDs ein Riss schneller



ausbreitet, wenn er von der dünneren statt von der dickeren Seite ausgeht, während sich bei nicht verkippten LEDs die Risse von beiden Seiten aus gleich schnell ausbreiten.

Durch das Design der Schablonenöffnung, der Schablonendicke und dem daraus resultierenden Lotpastendruck kann die Verkipfung positiv beeinflusst werden. So zeigen Untersuchungen bei Osram OS eine geringere Verkipfung der LEDs, wenn eine 100- $\mu\text{m}$ -Schablone mit zwei Lotdepots anstelle einer 120- $\mu\text{m}$ -Schablone mit nur einem Lotdepot eingesetzt wird [92].

In Kapitel 5 wurde bereits durch die experimentellen Ergebnisse nachgewiesen, dass ein ungleichmäßiger Lotspalt durch die Verkipfung der LED an seiner dünnen Seite zu flächenartigen Risse führt. Allerdings liegt die Ursache für die flächigen Risse nicht in der Ungleichmäßigkeit der Lotspaltdicke selbst, sondern vielmehr in der zu geringen Lotspaltdicke. Im Folgenden werden nun bei der Testbaugruppe A typische Lotspaltdickenunterschiede und verschiedene Lotspaltdicken simuliert, um eine kritische Lotspaltdicke abzuleiten. Die Studien stellen einen Zusammenhang zwischen den simulierten und experimentellen Ergebnissen her, dabei wurde die Größenordnung der akkumulierten Kriechdehnung nicht verifiziert. Die Simulationsdaten basieren auf drei Zyklen<sup>28</sup>.

Bild 6-10 zeigt die Simulationsergebnisse für einige ungleichmäßige Lotspaltdicken, wobei sich links jeweils die dünnere und rechts die dickere Seite befindet. Der Lotspaltdickenunterschied beträgt in Bild 6-10a  $\Delta d = 20\text{ }\mu\text{m}$  mit einer maximalen Dicke von 100  $\mu\text{m}$  und einer minimalen von 80  $\mu\text{m}$ . Die ungleichmäßige Lotspaltdicke führt zu einer Erhöhung der akkumulierten Kriechdehnung in den linken, dünneren Ecken der Lötverbindungen der elektrischen Pads. Bild 6-10b hat zwar den gleichen Lotspaltdickenunterschied von  $\Delta d = 20\text{ }\mu\text{m}$ , aber mit einer dünneren Lotspaltdicke (links: 60  $\mu\text{m}$ , rechts: 80  $\mu\text{m}$ ). Dies bewirkt, dass die maximale akkumulierte Kriechdehnung um 33 % im Vergleich zu Bild 6-10a ansteigt. Die Zunahme der Kriechdehnung ist zwar an der dünnen Lotspaltseite am höchsten, betrifft hier aber auch die dickere Seite, was auf die geringeren Lotspaltdicken zurückzuführen ist.

---

<sup>28</sup> Drei Zyklen ermöglichen eine Ermittlung des Kriechinkrements bei gleichzeitig kurzer Simulationszeit. Für die Ermittlung des Kriechinkrements werden zwei Zyklen benötigt. Der dritte Zyklus dient seiner Überprüfung. Die Simulation von beispielsweise zehn Zyklen ergibt das gleiche Kriechinkrement, verlängert jedoch entsprechend die Simulationszeit.

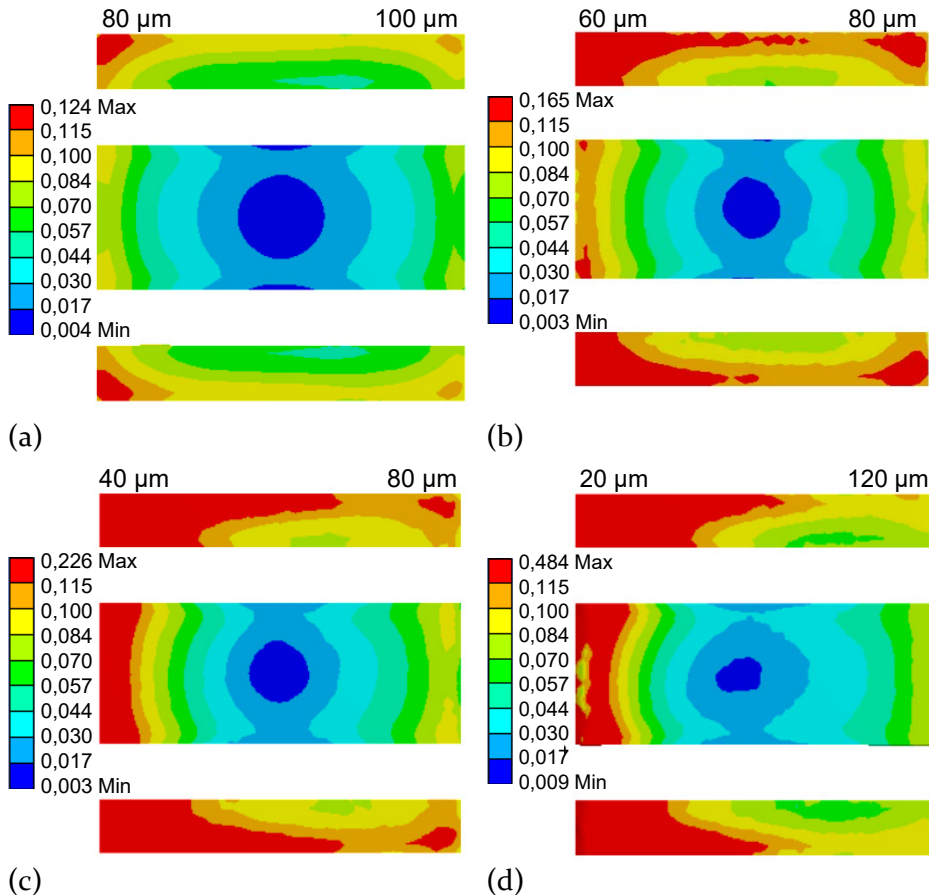


Bild 6-10: Vergleich von ungleichmäßigen Lotspaltdicken (a) links 80 µm und rechts 100 µm, (b) links 60 µm und rechts 80 µm, (c) links 40 µm und rechts 80 µm, (d) links 20 µm und rechts 120 µm [162]

Die Lötverbindung in Bild 6-10c hat links eine Lotspaltdicke von 40 µm, rechts eine von 80 µm, somit beträgt der Unterschied  $\Delta d = 40$  µm. Jetzt steigt die akkumulierte Kriechdehnung im Gegensatz zur Bild 6-10a sogar um 82 % an, wobei die höchste Belastung an der dünneren Seite auftritt. Daher ist die Lotspaltdicke von 40 µm bereits als kritisch anzusehen. In Bild 6-10d ist eine sehr ungleichmäßige Lotspaltdicke mit  $\Delta d = 100$  µm simuliert, die tatsächlich auch in den experimentellen Daten gefunden wurde. Die Lotspaltdicke beträgt links 20 µm und rechts 120 µm. Im Vergleich zu Bild 6-10a steigt die akkumulierte Kriechdehnung sehr stark, nämlich um 290 % an. Ein derart großer Unterschied in den Lotspaltdicken ist sicherlich nicht mehr akzeptabel.

Die experimentellen Daten der untersuchten keilförmigen Lotspalte aus Bild 6-10 konnten die Hypothese belegen, dass die Dicke des Lotspalts eine größere Rolle als die Ungleichmäßigkeit des Lotspalts an sich spielt. So zeigen die Bild 6-10a und Bild 6-10b beide denselben Lotspaltdickenunterschied aber mit unterschiedlichen Lotspaltdicken, woraus sich bei den dünneren Lotspalten eine erhöhte Kriechdehnung ergibt. Ein Dickenunterschied von  $\Delta d = 20 \mu\text{m}$  kann bei ausreichender Dicke des Lotes noch akzeptiert werden, jedoch sind größere Differenzen in den Lotspaltdicken als kritisch zu bewerten. Ab welcher Lotspaltdicke dies zutrifft, wird im Folgenden untersucht. An dieser Stelle beziehen sich die Empfehlungen nur auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen. Ist bei einem Modul-Aufbau ein einheitlicher Abstrahlwinkel für jede einzelne LED vorgegeben, so sind ungleichmäßige Lotspaltdicken zu vermeiden.

Die Lötverbindungen elektronischer Bauteile werden im Zuge der Miniarisierung bei gleichbleibender oder größerer Leistungsfähigkeit immer kleiner. Für die Dicke der in der Produktion eingesetzten Schablone spricht die Richtlinie IPC-7525 die Empfehlung aus, dass das kleinste Rastermaß beziehungsweise das kritischste Bauteil auf der Leiterplatte entscheidend für die Schablonenstärke sind<sup>29</sup> [170]. Studien belegen, dass die Lebensdauer von Lötverbindungen mit steigenden Lotspaltdicken zunimmt [171], [172]. Zusätzlich kann ein dicker Lotspalt wiederum das Ausgasen von Poren begünstigen [3].

Die Bild 6-11 stellt verschiedene simulierte Lotspaltdicken dar, um die kritische Lotspaltdicke zu ermitteln. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Lotspaltdicke die akkumulierte Kriechdehnung abnimmt. Lotspalte mit einer Dicke von  $40 \mu\text{m}$  bis  $70 \mu\text{m}$  sind bei Testbaugruppe A als kritisch einzustufen. Der Vergleich mit den experimentellen Daten (siehe Abbildung 5-8 links:  $60 \mu\text{m}$ , Abbildung 5-11 rechts:  $55 \mu\text{m}$ , Abbildung 5-27 links:  $70 \mu\text{m}$ , Abbildung 5-30 beidseitig:  $60 \mu\text{m}$  und Abbildung 5-39 rechts:  $50 \mu\text{m}$ ) zeigt, dass sich bei diesen Lotspaltdicken vermehrt flächige Risse im Lot bilden. Ab einer Lotspaltdicke von  $80 \mu\text{m}$  werden im Experiment weniger flächige Risse detektiert (siehe Abbildung 5-5 rechts:  $100 \mu\text{m}$ , links:  $80 \mu\text{m}$ , Abbildung 5-8 rechts:  $90 \mu\text{m}$  und Abbildung 5-35 rechts:  $110 \mu\text{m}$ ). Bei einer Lotspaltdicke zwischen  $100 \mu\text{m}$  und  $120 \mu\text{m}$  ist die Reduzierung der akkumulierten Kriechdehnung schließlich zu vernachlässigen, sodass für den hier untersuchten Anwendungsfall die optimale Lotspaltdicke zwischen  $80 \mu\text{m}$  und  $90 \mu\text{m}$  liegt

---

<sup>29</sup> Das Verhältnis von Schablonenöffnung zu Schablonendicke soll größer als 1,5 sein.

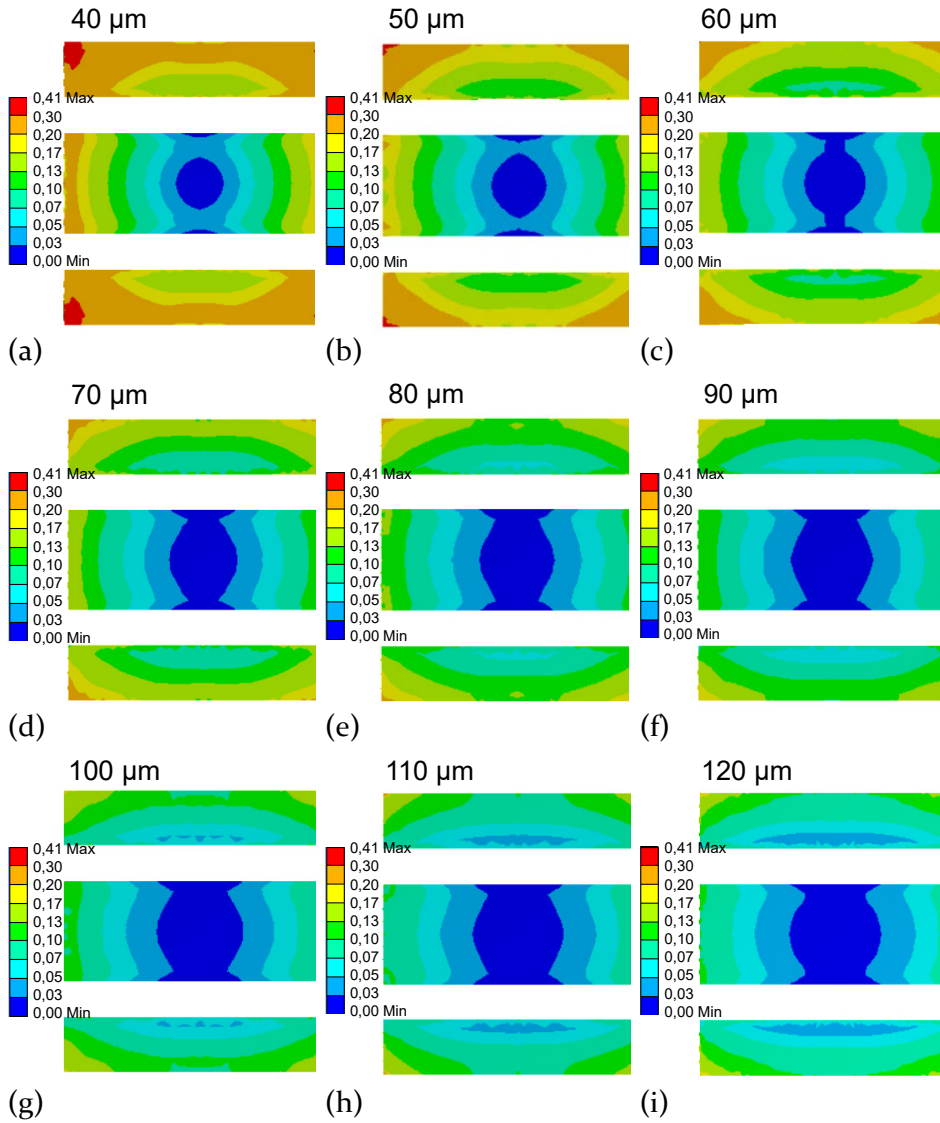


Bild 6-11: Vergleich von Lotspaltdicken (a) 40  $\mu\text{m}$ , (b) 50  $\mu\text{m}$ , (c) 60  $\mu\text{m}$ , (d) 70  $\mu\text{m}$ , (e) 80  $\mu\text{m}$ , (f) 90  $\mu\text{m}$ , (g) 100  $\mu\text{m}$ , (h) 110  $\mu\text{m}$ , (i) 120  $\mu\text{m}$  [162]

Die Ergebnisse der Simulationen und die experimentellen Daten können nun für die kritischen Lotspaltdicken und die ungleichmäßigen Lotspaltdicken bei verkippten LEDs zusammengefasst werden. So ist eine Lotspaltdicke unter  $80\text{ }\mu\text{m}$  als kritisch einzustufen. Überdiesem dagegen zeigen sich weniger flächige Risse in den Experimenten, weil hier das Lot Spannungen und Verformungen besser abbauen kann. Die optimale Lotspaltdicke liegt somit zwischen  $80\text{ }\mu\text{m}$  und  $90\text{ }\mu\text{m}$ . Darüber hinaus ist keine signifikante Verbesserung zu erkennen. Dickenunterschiede im Lotspalt sind bis zu  $20\text{ }\mu\text{m}$  noch tolerierbar, sofern die dünnere Lotspaltseite mindestens  $80\text{ }\mu\text{m}$  beträgt.

## 6.4 Auswirkungen von Fehlstellen im thermischen Pad auf das Wärmeableitvermögen

Aus den Zuverlässigkeitstests in Kapitel 5 resultiert, dass die meisten Risse in den Lötverbindungen der elektrischen Pads entstehen. Die Lötstelle des thermischen Pads hingegen weist auch bei hohem Porenaufkommen kaum Risse auf. Die Simulationen in den vorangegangenen Abschnitten bestätigen dies. Aus diesem Grund soll in diesem Abschnitt die Auswirkung von Fehlstellen im thermischen Pad auf das Wärmeableitvermögen untersucht werden. Hierzu wurde ein eigener Testaufbau realisiert, in dem zwei Baugruppen mit einer FR4-Leiterplatte und der XLamp® XP-E LED von Cree aufgebaut wurden. Um die Auswirkungen von Fehlstellen im thermischen Pad auf das Wärmeableitverhalten zu untersuchen, wurden zwei Situationen gegenübergestellt. Das thermische Pad wurde einmal angelötet und einmal blieb der Kontakt frei. Die elektrischen Pads waren hierbei stets kontaktiert. Anschließend erfolgten indirekte elektrische Messungen der Sperrschichttemperatur an der Baugruppe und thermische Simulationen.

In Abschnitt 5-3 wurde bereits das von Cree empfohlene Verfahren für die Ermittlung der Sperrschichttemperatur vorgestellt [173]. Im Folgenden wird nun eine Methode beschrieben, welche die Sperrschichttemperatur über die Vorwärtsspannung bestimmt. Hierbei wird die Sperrschicht selbst als Temperatursensor verwendet, indem die Korrelation zwischen Vorwärtsspannungsabfall und Sperrschichttemperatur ausgenutzt wird. Zunächst wird dafür die Vorwärtsspannung für unterschiedliche Umgebungstemperaturen gemessen. Hierzu wird die LED bei verschiedenen Temperaturen in einem Wärmeofen platziert. Nachdem der LED-Chip die Ofentemperatur angenommen hat (mindestens 10 Minuten), wird die Vorwärtsspannung durch einen kurzen Strompuls, der die Sperrschicht nicht zusätzlich erwärmt, gemessen. Hieraus resultiert eine  $T_f$ - $U_f$ -Kennlinie [174]. Als Dauer des Strompulses wurde 2,5 ms gewählt. Gemäß den Angaben des LED-Herstellers Cree

ist eine Erwärmung der Sperrschicht erst nach 25 ms zu erwarten [175]. Die Beziehung zwischen Sperrschichttemperatur  $T_j$  in °C und Vorwärtsspannung  $U_f$  kann mit folgender Geradengleichung beschrieben werden:

$$T_j = m \cdot U_f + T_o \quad (6-1)$$

Anhand der aufgenommenen Kennlinie kann nun die Steigung  $m$  sowie der y-Achsenabschnitt  $T_o$  in °C berechnet werden. Mit der Gleichung (6-1) ist es möglich, die Sperrschichttemperatur bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen durch Messung der Vorwärtsspannung zu bestimmen [174].

Im Anhang sind in Abbildung 14-8 die  $T_j$ - $U_f$ -Kennlinien für LEDs mit und ohne Kontaktierung des thermischen Pads dargestellt. Wie oben schon erwähnt, können mit den zugehörigen Geradengleichungen die Steigung  $m$  und der y-Achsenabschnitt  $T_o$  berechnet werden. In Tabelle 6-1 sind die gemessenen Vorwärtsspannungen bei einem Betriebsstrom von 100 mA nach 30 Minuten Betrieb aufgeführt. Daraus lässt sich die Sperrschichttemperatur  $T_j$  berechnen, die in Tabelle 6-1 der simulierten Sperrschichttemperatur gegenübergestellt wurde. Es zeigt sich, dass zwischen den berechneten und den simulierten Werten eine gute Übereinstimmung besteht. Die Sperrschichttemperatur nimmt aufgrund des nicht kontaktierten thermischen Pads im Experiment um 3,8 °C und in der Simulation um 2,9 °C zu. Das thermische Pad hat demnach nur einen geringen Einfluss auf das Wärmeableitvermögen.

Tabelle 6-1: Simulierte und berechnete Sperrschichttemperatur für LEDs mit und ohne Kontaktierung des thermischen Pads nach [158]

	<b>LED mit Kontaktierung des thermischen Pads</b>	<b>LED ohne Kontaktierung des thermischen Pads</b>
gemessene Spannung $U_f$	2,79 V	2,77 V
berechnete $T_j$	68,2 °C	72,0 °C
simulierte $T_j$	69,4 °C	72,3 °C

#### 6.4 Auswirkungen von Fehlstellen im thermischen Pad auf das Wärmeableitvermögen

In Bild 6-12 ist die thermische Simulation mit und ohne Kontaktierung des thermischen Pads sowie der Wärmefluss anhand der blauen Linien zu sehen. Es zeigt sich, dass die Wärme auch bei kontaktiertem thermischen Pad über die elektrischen Pads abtransportiert wird. Die Wärmestromlinien beschreiben allerdings nur den qualitativen Wärmestrom innerhalb der Baugruppe und stellen keinen quantitativen Wert dar.

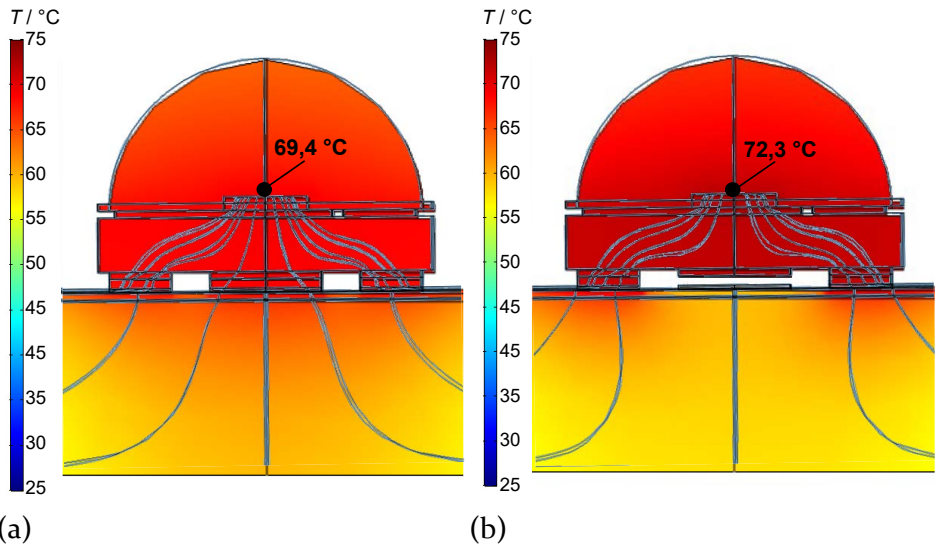


Bild 6-12: Thermische Simulation einer LED auf FR4 (a) mit und (b) ohne Kontaktierung des thermischen Pads [56]

Da die simulierten und die indirekt gemessenen Sperrschichttemperaturen gut übereinstimmen, wird im nächsten Schritt der hier verwendete Testaufbau in der Simulation an die Testbaugruppe A angepasst. Dies bedeutet im Detail, dass die FR4-Leiterplatte durch das IMS-Substrat ersetzt und die Cree-LED mit einem Strom von 350 mA betrieben wird.

Bild 6-13 zeigt die thermische Simulation einer LED auf IMS-Substrat mit und ohne Kontaktierung des thermischen Pads. Die Temperaturdifferenz am Chip beträgt 8,3 °C. Somit kann auch in diesem Fall ein entscheidender Einfluss des thermischen Pads auf das Wärmeableitvermögen ausgeschlossen werden. Ein Großteil der Wärme wird nämlich über die elektrischen Pads abgeführt, wodurch sich die fehlende Kontaktierung des thermischen Pads nur in einer geringen Erhöhung der Chiptemperatur bemerkbar macht.

Von den drei Löt pads hat das thermische Pad das größte Lotvolumen und ist somit prädestiniert dafür, dass sich in ihm große Poren bilden. Folglich liefern die Poren in der Lötverbindung des thermischen Pads einen hohen Beitrag zum Gesamtporenanteil, da dieser aus allen drei Löt pads ermittelt wurde.

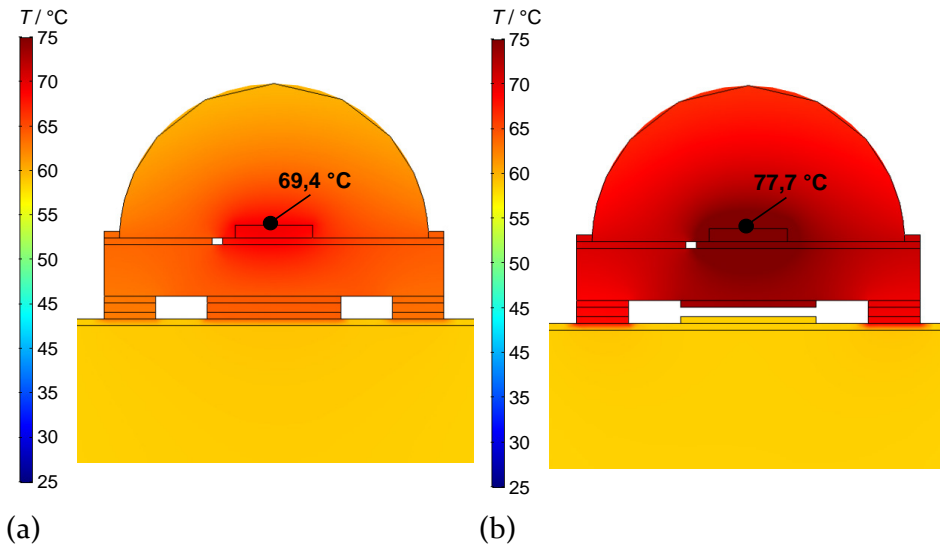


Bild 6-13: Thermische Simulation einer LED auf IMS (a) mit und (b) ohne Kontaktierung des thermischen Pads [56]

Die strukturmechanische Simulation sowie die Ergebnisse der Zuverlässigkeitstests haben gezeigt, dass Poren im thermischen Pad nur einen geringen Einfluss auf das Kriechverhalten und auf die Rissentstehung haben. Das thermische Pad ist elektrisch neutral und dient bei diesen LEDs lediglich der Wärmeableitung, sodass deren elektrische Funktion nicht gefährdet wird. Darüber hinaus fördert das thermische Pad aufgrund seiner Größe die mechanische Stabilität.

Sowohl die experimentell ermittelte als auch die simulierte Sperrschichttemperatur zeigen bei diesem Testaufbau, dass sich die Temperatur bei einer Nichtkontaktierung des thermischen Pads nur geringfügig erhöht. Interne Studien und Simulationen bei Osram OS [92] belegen, dass ein Porenanteil von bis zu 50 % im thermischen Pad nur einen geringen Einfluss auf den thermischen Widerstand hat.



#### 6.4 Auswirkungen von Fehlstellen im thermischen Pad auf das Wärmeableitvermögen

Die Grenze für ein akzeptables Porenaufkommen hängt jedoch immer von der Verlustleistung und vom Wärmeverhalten des gesamten Systems ab [92]. Folglich wird bei diesem Anwendungsfall empfohlen, das Hauptaugenmerk auf die Poren in den elektrischen Pads zu legen und einen Porenanteil in der Lötverbindung des thermischen Pads zunächst zu vernachlässigen.



## **7 Konsequenzen für die Elektronikproduktion**

In diesem Kapitel werden nun Prüfleitlinien für die Baugruppeninspektion in der Elektronikproduktion erarbeitet. Die Grundlagen dafür bilden die Ergebnisse aus den Zuverlässigkeitstests (siehe Kapitel 5) und den FEM-Simulationen (siehe Kapitel 6). Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen nicht nur von ihrem Porenanteil bestimmt wird, sondern es müssen aufgrund ihrer Komplexität noch weitere Faktoren in die Betrachtung der Lebensdauer mit einbezogen werden. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und daraus kritische Porenpositionen und -größen sowie Porengrenzwerte ermittelt.

### **7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse**

#### **7.1.1 Analyse der Rissentstehung**

Unabhängig vom Porenanteil entstehen Risse an der Pore, am Lötstellenrand oder direkt im Lot (Fehlercodes 1, 2, 5). Zusätzlich werden bei porenreichen Lötverbindungen der Lötstellenrand und die Poren beziehungsweise zwei einzelne Poren durch Risse miteinander verbunden (Fehlercodes 3, 4). Bei porenarmen Lötverbindungen treten diese Fehlerarten seltener auf, da die Poren großräumiger verteilt sind und sich die Risse weit ausbreiten müssen, um auf eine Pore zu treffen. Dagegen kommen Risse direkt im Lot (Fehlercode 5) bei Lötstellen mit geringem Porenanteil und folglich kleinerer Lotspaltdicke häufiger vor. Die CT-Aufnahmen während des Luft-/Luft-Temperaturschocktests, während des aktiven Lastwechseltests und während des überlagerten Lastwechseltests zeigen, dass Risse in porenreichen Lötstellen etwas früher als in porenarmen Lötstellen nachgewiesen werden können.

#### **7.1.2 Analyse der Lotspaltdicke**

Risse können nicht alleine durch die Minimierung des Porenanteils vermieden werden, sondern ihre Entstehung hängt auch im starken Maß von der Lotspaltdicke ab. Eine zu geringe Lotspaltdicke führt zu einer vermehrten Rissentstehung im Lot. Kleine Lotspaltdicken treten vor allem bei porenarmen Lötstellen auf, da die Lotspaltdicke vom Lot- und vom Porenvolumen bestimmt wird.

FEM-Simulationen und experimentelle Daten haben gezeigt, dass eine Lotspaltdicke unter  $80\text{ }\mu\text{m}$  als kritisch einzustufen ist. Hier haben sich im Experiment vermehrt flächige Risse im Lotspalt gebildet. Als optimale Lotschichtdicke wurden  $80\text{ }\mu\text{m}$  bis  $90\text{ }\mu\text{m}$  ermittelt (siehe Abbildung 6-11). Solange die optimale Lotspaltdicke nicht unterschritten wird, ist auch ein ungleichmäßiger Lotspalt zwischen linker und rechter Seite von  $20\text{ }\mu\text{m}$  Differenz tolerierbar.

### 7.1.3 Analyse der Porenpositionen

Neben einer optimalen Lotspaltdicke beeinflusst die Porenposition ganz entscheidend die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen. Die Lötstellen der elektrischen Pads sind kritischer als die des thermischen Pads zu bewerten (siehe Abbildung 6-7a). Vor allem die Ecken der elektrischen Pads sind einer erhöhten akkumulierten Kriechdehnung ausgesetzt. Poren in den Ecken der Lötverbindungen der elektrischen Pads erhöhen die akkumulierte Kriechdehnung, während sich Poren in der Mitte kaum negativ auswirken (siehe Abbildung 6-8).

Im Gegensatz zu den elektrischen Pads spielen Poren in der Lötstelle des thermischen Pads, unabhängig von ihrer Größe, eine untergeordnete Rolle. Einzig im Randbereich des thermischen Pads wirken sich die Poren negativ auf die akkumulierte Kriechdehnung aus (siehe Abbildung 6-9). Durch die thermischen Simulationen in Abschnitt 6.4 mit und ohne Kontaktierung des thermischen Pads konnte nachgewiesen werden, dass ein Großteil der Wärme über die elektrischen Pads abgeführt werden kann. Eine fehlende Kontaktierung des thermischen Pads hat nur eine geringe Erhöhung der Chiptemperatur zur Folge. Aus diesem Grund kann das Hauptaugenmerk der Lötstelleninspektion auf den elektrischen Kontakten liegen.

### 7.1.4 Analyse der Porengrößen

In Abschnitt 6.2.2 wurde dargelegt, dass die Porenposition oftmals einen größeren Einfluss auf die Zuverlässigkeit als die Porengröße hat.

In den Lötverbindungen der elektrischen Pads sind Poren mit einem Durchmesser von  $170\text{ }\mu\text{m}$  selbst in den Ecken der Lötverbindung als unkritisch anzusehen (siehe Abbildung 6-7b). Im Gegensatz dazu sind Poren mit einem Durchmesser von  $280\text{ }\mu\text{m}$  kritisch, sofern sie sich in den Ecken der Lötverbindung befinden (siehe Abbildung 6-8).

Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass große Poren mit einem Flächenanteil von 31 % in der Lötverbindung des thermischen Pads die Zuverlässigkeit nicht beeinträchtigen, sofern sie in der Mitte des thermischen Pads liegen. Dagegen können sich Poren am Rand der Lötverbindung des thermischen Pads sogar negativ auf die Lötverbindungen der elektrischen Pads auswirken. Auch hier zeigte sich, dass die Position kritischer zu bewerten ist als die Porengröße.

## 7.2 Leitlinien für die Elektronikproduktion

In diesem Abschnitt werden Vorgaben für das Bauteil-Design, dem Fertigungsprozess und für die Inspektion von flächigen Lötstellen aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet. Die Leitlinien konzentrieren sich auf die Schwachstellen der Lötstelle und sollen zu einer Reduzierung des Ausschusses in der Elektronikfertigung führen. Hierzu werden Leitlinien für gängige Untersuchungssysteme in der Elektronikfertigung wie für die Röntgeninspektion (engl. Automated X-ray Inspection, AXI) oder die optische Inspektion (engl. Automated Optical Inspection, AOI) formuliert.

Die Röntgeninspektion kann außerhalb der Fertigungslinie oder bei einer 100 %-Prüfung inline nach dem Lötprozess erfolgen. Dabei werden die Elektronikbaugruppen von einem kegelförmigen Röntgenstrahl durchstrahlt und dadurch vergrößert auf einen Detektor projiziert. Die Durchstrahlungsrichtung ist normalerweise senkrecht zur Probe oder die Probe wird bei einer Schrägdurchstrahlung unter unterschiedlichen Winkeln durchstrahlt. Ein Vorteil der Schrägdurchstrahlung liegt darin, dass ein dreidimensionaler Eindruck der Probe erreicht wird und somit verdeckte Strukturen sichtbar werden, die bei senkrechter Durchstrahlung nicht erscheinen [120].

AOI-Systeme hingegen sind eine automatisierte Methode der manuellen Sichtprüfung. Sie bestehen aus optischen Bildaufnehmern wie Kameras oder Scannern mit entsprechenden Winkelsystemen und Softwarealgorithmen, in denen die Prüfmerkmale definiert werden [120]. Mit Hilfe der AOI können unter anderem der Lotpastendruck, die Koplanarität von Bauteilen und die Bauteilhöhe überprüft werden [176]. Die AOI-Prüfung kann vor dem Bestücken als Lotpasteninspektion, nach dem Bestücken als Bauteilinspektion oder am Ende des gesamten SMD-Prozesses zur Bauteil- und Lötstelleninspektion erfolgen [177].

### 7.2.1 Ableitung von Design-Vorgaben

Im Rahmen des Bauteilauswahlprozesses sind Bauelemente mit einer Vertiefung im Kupfer an der Bauteilunterseite zu vermeiden. Bei Testbaugruppe A hat sich in den Röntgenaufnahmen gezeigt, dass sich stets Poren in den Ecken der Lötstellen der elektrischen Pads befinden. Diese entstehen unterhalb der vier Durchkontaktierungen der elektrischen Pads (siehe Abbildung 4-2a) und haben deshalb eine kritische Position. Das ist eine Folge des LED-Designs, weil die Kupferschicht unterhalb der Durchkontaktierungen eine Vertiefung besitzt (siehe Abbildung 5-3a, Abbildung 5-4, Abbildung 5-31b). Diese Mulde im Kupfer wirkt als Ausgangspunkt für die Entstehung von Gasblasen und fixiert diese. Zum einen kann in der Vertiefung Gas eingeschlossen werden und zum anderen werden hier Flussmittelrückstände während des Lötprozesses angezogen. Selbst nach dem Überdrucklötverfahren befinden sich an dieser Stelle häufig noch Poren.

Auch die LED von Testbaugruppe B hat eine Vertiefung unterhalb ihrer beiden Durchkontaktierungen im Kupfer. Die Röntgenaufnahmen von Testbaugruppe B belegen jedoch, dass von der Mulde selten Poren ausgehen, weil diese bei weitem nicht so stark ausgeprägt wie bei der Testbaugruppe A ist (siehe Abbildung 14-9 im Anhang). Bereits bei der Komponentenauswahl sollte dies berücksichtigt werden und ein Bauelement mit einer Vertiefung im Kupfer an der Bauteilunterseite vermieden werden.

### 7.2.2 Ableitung von Prozess-Vorgaben

Sowohl die Ergebnisse der Zuverlässigkeitstests als auch der FEM-Simulationen belegen, dass eine ungleichmäßige Lotspaltdicke zu einem stärkeren Risswachstum an der dünneren Lotspaltseite führt. Aus diesem Grund muss die Verkipfung der Bauteile bereits im Prozess verhindert und eine Mindest-Lotspaltdicke eingehalten werden. Dies setzt voraus, dass die Verkipfung und die Lotspaltdicke bereits während der Prozessqualifizierung ermittelt und kritische Größen identifiziert wurden. Das Erkennen von beiden kann mit Analysen in Form von CT-Untersuchungen oder metallographischen Schliffen erfolgen. Kritische Lotspaltdicken und Verkipfungen können durch FEM-Simulationen ermittelt werden. Ausgehend davon können geeignete Maßnahmen im Fertigungsprozess abgeleitet und z. B. der Lotpastendruck oder der Bestückprozess angepasst werden. Ein geeignetes Design der Schablonenöffnung und der Schablonendicke kann eine Verkipfung der Bauteile positiv beeinflussen. Die Lotspaltdicke wird durch die Schablonendicke verändert. Bei Leiterplatten mit unterschiedlichen Bauelementen und kleinen Rastermaßen können Stufenschablonen verwendet werden, um verschiedene Lotspaltdicken zu realisieren.

### 7.2.3 Ableitung von Prüfleitlinien

Die Prüfleitlinien dienen dazu, die bisherigen Porengrenzwerte zu überdenken und neue Empfehlungen zu geben. Vor allem der Porengrenzwert von 30 % für BGAs der IPC-A-610-F Richtlinie, der auch auf andere Bauformen übertragen wird, sollte überdacht werden.

#### 7.2.3.1 Entwicklung einer Prüfmaste für die automatische Röntgeninspektion

Die Untersuchungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass das Hauptaugenmerk der Lötstelleninspektion vor allem auf den Porenpositionen liegen muss. Die AXI-Prüfung zur Bestimmung des Porenanteils soll sich aus diesem Grund nicht auf die gesamte Lötverbindung konzentrieren, sondern nur auf die kritischen Bereiche. Dazu zählen vor allem die Lötstellen der elektrischen Pads und die Außenseiten der Lötstelle des thermischen Pads. Sowohl die experimentellen Daten als auch die thermischen und thermo-mechanischen Simulationen haben bewiesen, dass Poren in der Mitte der Lötverbindung des thermischen Pads vernachlässigt werden können.

In dieser Arbeit wurde bisher der Porenanteil aus den Lötflächen und den Poren von allen drei Löt pads zusammengesetzt. Bild 7-1 zeigt jedoch an zwei ausgewählten Baugruppen, dass ein Gesamtporenanteil nicht unbedingt repräsentativ ist. Die beiden Beispiele wurden ausgesucht, um zu demonstrieren, dass eine pauschale Definition eines Porengrenzwertes nicht möglich ist. Der Gesamtporenanteil in der Lötverbindung in Bild 7-1a beträgt 9 % und setzt sich aus einem 16 %- beziehungsweise 17 %-Porenanteil der elektrischen Pads und einem 4 %-Porenanteil des thermischen Pads zusammen. Im Gegensatz dazu hat die Lötverbindung in Bild 7-1b einen Gesamtporenanteil von 20 %, der aus einem 5 %- beziehungsweise 6 %- Porenanteil für die elektrischen Pads und einem 30 %-Porenanteil für das thermische Pad resultiert. Trotz des niedrigeren Gesamtporenanteils hat die Lötverbindung in Bild 7-1a mehr Poren in den kritischen Bereichen der elektrischen Pads als die in Bild 7-1b. Daraus folgt, dass der Gesamtporenanteil nicht stellvertretend für alle drei Lötverbindungen verwendet und auch nicht zur Bewertung der Lötverbindungen herangezogen werden sollte.

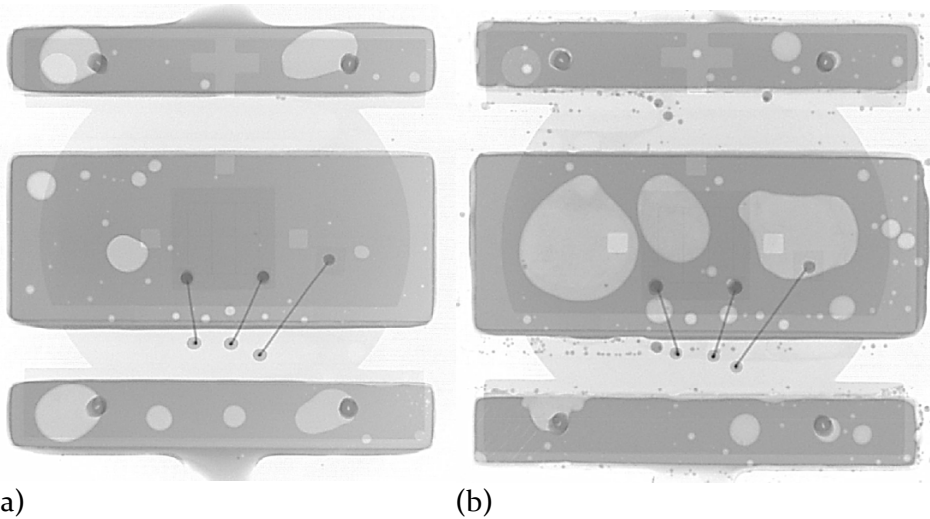


Bild 7-1: Der Gesamtporenanteil ist nicht repräsentativ für alle drei Lötverbindungen (a) 9 % Gesamtporenanteil, (b) 20 % Gesamtporenanteil

Zur Abgrenzung der kritischen von den nicht relevanten Bereichen der Lötverbindung wurde eine Prüfmaste erarbeitet (siehe Bild 7-2). Diese setzt sich aus einem unkritischen (grün), einem kritischen (rot) und einem Bereich zusammen, in dem der Porenanteil 15 % nicht übersteigen sollte (gelb). Die Einordnung und die Größe der einzelnen Zonen wurden aus den Ergebnissen der Simulationen und aus den experimentellen Daten abgeleitet und aus der Beobachtung, in welchen Bereichen Poren einen negativen Einfluss auf das thermische und thermo-mechanische Verhalten der Lötverbindung zeigen.

Der Porengrenzwert von 15 % ergibt sich aus den FEM-Simulationen in Abbildung 6-7b. Diese machen deutlich, dass ein Porenanteil von 12 % in den elektrischen Pads noch keine Erhöhung der Kriechdehnung zur Folge hat. Die Größe der mittleren Bereiche beträgt 70 % und die der Randbereiche 15 % der Länge der Lötverbindung und sie erstrecken sich jeweils über die gesamte Breite der Lötverbindung. Die unkritische Zone umschließt die Mitte des thermischen Pads. Im Gegensatz dazu sind die Randgebiete der Lötverbindung des thermischen Pads bei Belastungen anfälliger für Schäden. Aus diesem Grund soll der Porenanteil an dieser Stelle 15 % nicht überschreiten. Die Obergrenze von 15 % gilt ebenfalls für die Mitte der elektrischen Pads. Da die Ecken der elektrischen Pads kritisch sind, sollten dort Poren möglichst vermieden werden. In Ausnahmefällen kann noch ein Porenanteil von höchstens 10 % zugelassen werden. Dies



zeigen die Simulationen in der Abbildung 6-7b, in denen der Porenanteil in den Ecken 9 % bezogen auf die kritische Fläche (rot) beträgt.

In Bild 7-2 sind die CT-Aufnahmen der beiden Baugruppen aus Bild 7-1 nach 1 000 Lastwechseln mit der Prüfmaske dargestellt. Die Lötverbindungen in Bild 7-2a zeigen ein hohes Porenaufkommen in der Mitte der elektrischen Pads, das die Obergrenze von 15 % übersteigt. Die Poren in den kritischen Eckbereichen links haben einen Porenanteil von 28 % beziehungsweise 38 % und sind somit nicht mehr akzeptabel. Die Poren in der Lötverbindung des thermischen Pads übersteigen nicht die kritischen Grenzwerte oder sie befinden sich im unkritischen Bereich. Da die Grenzwerte in den elektrischen Pads überschritten werden, gehört diese Baugruppe zum Ausschuss.

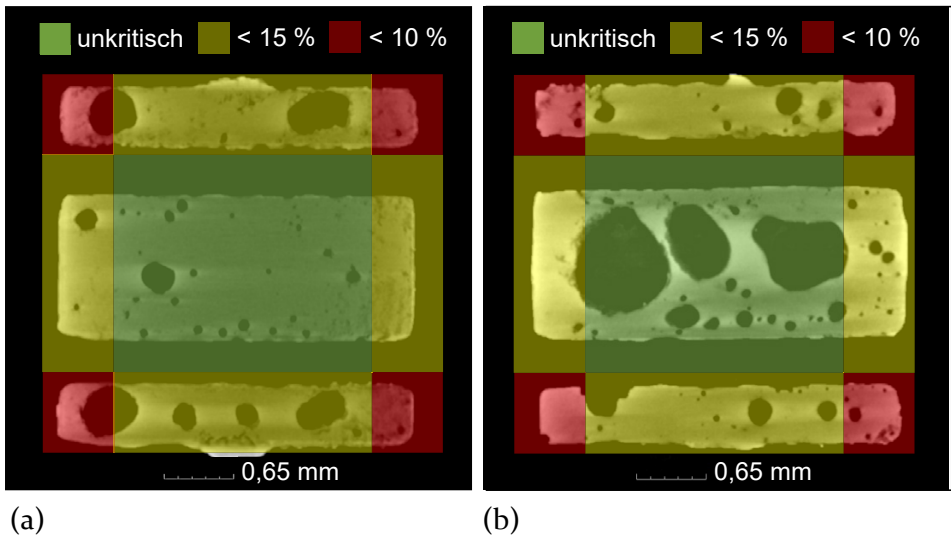


Bild 7-2: Prüfmaske identifiziert kritischen Porenanteil (a) Schlechtteil, (b) Gutteil

Die Lötverbindung in Bild 7-2b zeigt ein völlig anderes Bewertungsergebnis. Die Porenanteile in der Mitte des elektrischen Pads befinden sich mit 7 % und 12 % unterhalb des Grenzwertes und auch der Porenanteil in den Ecken befindet sich im tolerierbaren Bereich. In den Randbereichen des thermischen Pads wird der Grenzwert mit 14 % und 5 % ebenfalls nicht erreicht. Trotz eines um 11 % höheren Gesamtporenanteils ist die Baugruppe in Bild 7-2b als Gutteil und die in Bild 7-2a als Schlechtteil zu bewerten.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung eines Gesamtporenanteils irreführend und deshalb nicht zu empfehlen ist. In der hier betrachteten Lötstellengeometrie gibt es kritische und weniger kritische Bereiche. Vor allem die Poren in den Lötstellen der elektrischen Pads haben einen größeren Einfluss auf die Zuverlässigkeit als die Poren im thermischen Pad. Am unkritischsten ist der mittlere Bereich des thermischen Pads, dessen Porenanteil daher vernachlässigt werden kann. FEM-Simulationen und CT-Aufnahmen nach den Zuverlässigkeitstests zeigen, dass hier die Wahrscheinlichkeit für eine Rissentstehung gering ist. Allerdings trägt ein hoher Porenanteil in der Mitte des thermischen Pads zu einer Reduzierung der Querschnittsfläche und folglich zu einer Abnahme der mechanischen Stabilität bei. Denkbar wäre es, auch hier einen Porengrenzwert einzuführen. Dann wäre gemäß den FEM-Simulationen in Abbildung 6-9b eine Obergrenze von 30 % durchaus noch zulässig.

Das Programmieren der Prüfmaste für die Röntgenauswertung stellt zu Prozessbeginn zwar einen Mehraufwand dar, aber daraus resultiert ein fundiertes Verfahren zur Erkennung von Gut- und Schlechteilen. Das Arbeiten mit einer Prüfmaste eignet sich vor allem für Standard-Lötprozesse ohne Vakuum- oder Überdrucktechnologie, da auf eine vollkommene porenfreie Lötverbindung verzichtet werden kann.

### 7.2.3.2 Umsetzung der Prüflinien in der Elektronikfertigung

Auf Grundlage der Analysen aus dem Abschnitt 7 werden Prüflinien zur Inspektion der Baugruppen in der Elektronikfertigung erarbeitet und im Folgenden vorgestellt. Einerseits muss eine Verkipfung der Bauteile frühzeitig erkannt und geeignete Maßnahmen abgeleitet werden, andererseits sollen Gut- und Schlechteile besser bewertet werden können.

In Abschnitt 7.2.2 wurde bereits erläutert, dass der Prozess dahingehend eingestellt werden muss, dass eine ausreichende Lotspaltdicke gewährleistet und eine Verkipfung der LEDs vermieden wird. In der Serie muss dies durch gängige Inspektionssysteme kontrolliert werden. Eine Verkipfung der Bauteile bedingt durch einen ungleichmäßigen Lotpastendruck kann mittels der SPI erkannt und durch die Anpassung des Lotpastenauftrags verhindert werden. Die Lotspaltdicke lässt sich mit AOI-Systemen untersuchen, indem der Standoff<sup>30</sup> der gelöteten Bauelemente überprüft wird. Denn ein höherer

---

<sup>30</sup> Der Abstand zwischen Gehäusekante des Bauteils und Auflagefläche wird „Standoff“ genannt [178].

Standoff bedeutet gleichzeitig einen dickeren Lotspalt. Kommt es während des Lötens durch die Entstehung von Poren zu einer Verkipfung, kann diese nach dem Löten mit Hilfe von 3D-AOI-Systemen erfasst werden. Größere Lotspaltdickenunterschiede müssen vermieden werden, indem das Porenaufkommen durch geeignete Maßnahmen reduziert wird (siehe Abbildung 2-2). AOI-Systeme sind demzufolge nach dem Druckprozess als SPI und nach dem Lötprozess als 3D-AOI einzusetzen. Darüber hinaus soll eine 100 %-AXI-Inspektion nach dem Löten erfolgen, um die Schlechteile mit der vorgestellten Prüfmaste zu identifizieren. Diese bietet die Möglichkeit auf eine porenfreie Lötstelle zu verzichten, da die Porenposition stärker gewichtet ist als der Gesamtporenanteil.

Zur Prozessqualifizierung und zur Prozessüberwachung sind metallographische Schliffe und Computertomographien anzuwenden. Metallographische Schliffe mit anschließenden REM-EDX-Analysen erzielen eine hohe Auflösung und die Mikrostruktur des Lots kann charakterisiert werden. Die Computertomographie hat als dreidimensionales Verfahren den entscheidenden Vorteil, dass sie mehr Informationen über die tatsächliche Porenform und -position als die AXI-Prüfung zur Verfügung stellt.

### **7.3 Allgemeine Vorgehensweise**

Die erarbeitete Methodik zur Identifizierung kritischer Porengrößen und -positionen und die Entwicklung einer Prüfmaste ist auch auf andere elektronische Baugruppen übertragbar. Eine allgemeine Herangehensweise ist in Bild 7-3 dargestellt.

Zunächst müssen die porenarmen und porenreichen Lötverbindungen mit 2D-Röntgenprüfsystemen und mit Computertomographie charakterisiert werden. Von Interesse sind hierbei die Porenflächen- und Porenvolumenanteile und insbesondere bei der CT-Auswertung auch die Positionen und die Geometrien der Poren. Auf Grundlage der zwei- und dreidimensionalen Auswertungen können die Porenanteile miteinander verglichen und die Ursachen für mögliche Unterschiede analysiert werden.

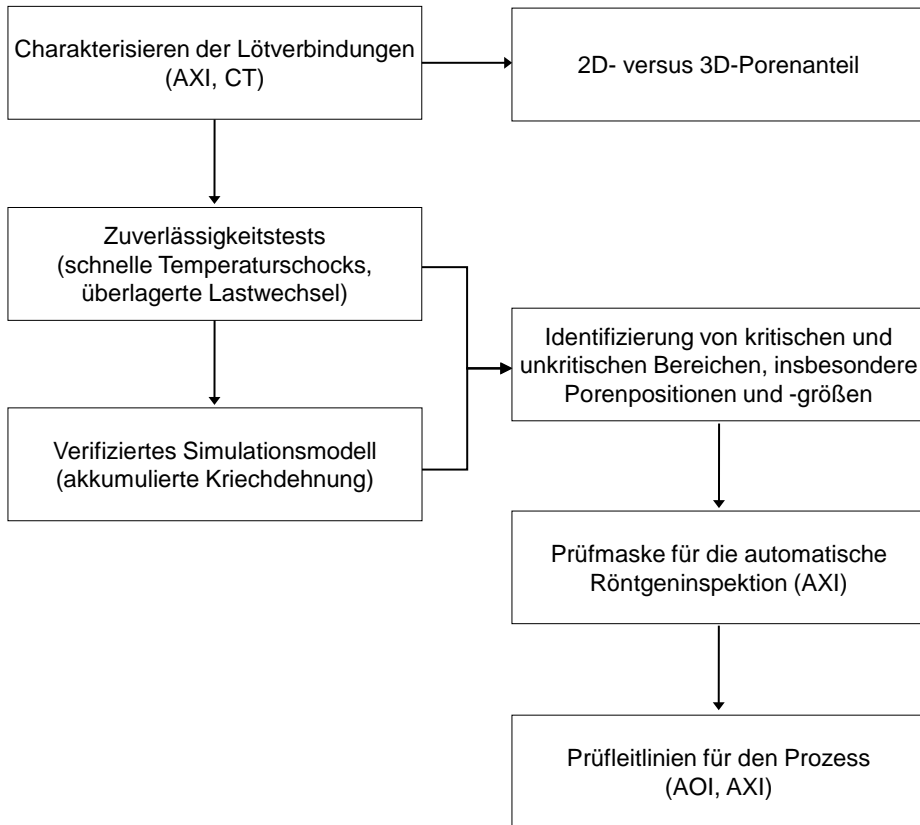


Bild 7-3: Allgemeine Herangehensweise zur Entwicklung einer Prüfmaske und Ableitung von Prüfleitlinien

Um ein verifiziertes Simulationsmodell zu erhalten werden die mit CT detektierten Poren in die Simulation übertragen und die simulierten den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Dies kann z. B. der Vergleich der akkumulierten Kriechdehnung mit den infolge der Belastungen (schnelle Temperaturschocks, überlagerte Lastwechsel) entstandenen Rissen sein. Bei Abweichungen werden die Simulationsparameter angepasst (siehe Abschnitt 6.1). Anhand des verifizierten Simulationsmodells können nun Fallstudien durchgeführt und kritische sowie unkritische Bereiche, insbesondere Porengrößen und -positionen identifiziert werden. Auf dieser Grundlage kann nun eine Prüfmaske für die automatische Röntgeninspektion entwickelt und Prüfleitlinien für den Prozess definiert werden, die die kritischen Positionen in der Lötstelle mit bestehenden Inspektionssystemen überwachen und dort nur Poren bis zu einem definierten Porenanteil zulassen.

Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich ein tieferes Verständnis über die Schwachstellen einer Lötverbindung zu erhalten und daraus eine angepasste Prüfung in der Elektronikfertigung umzusetzen, die den Ausschuss und die Kosten reduziert. Mit der vorgestellten Methode können kritische und unkritische Bereiche sowie der Einfluss von Poren in den Lötverbindungen durch geeignete Methoden wie der Computertomographie und der FEM-Simulation ermittelt werden.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Forschungsmethoden, die Ergebnisse dieser Arbeit und die Folgen für die Elektronikproduktion zusammengefasst. Zur Abrundung erfolgt schließlich noch ein Ausblick über weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Themengebiet.

### 8.1 Resümee

Die Forderung nach einer immer größer werdenden Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Miniaturisierung elektronischer Bauelemente verlangt eine erhöhte Zuverlässigkeit des gesamten Systems und vor allem der Lötverbindungen. Der industrielle Einsatz neuartiger bleifreier Weichlote hat zur Zunahme von Poren in den Lötverbindungen elektronischer Baugruppen geführt, was insbesondere bei leistungselektronischen Anwendungen die Funktion und die Zuverlässigkeit der Baugruppen erheblich beeinträchtigen kann. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Poren in den Lötverbindungen zu reduzieren. Dies ist jedoch fertigungstechnisch nur mit großem Aufwand und unter Einsatz spezieller Lötverfahren, wie dem Überdruck- und dem Vakuumlöten, möglich. Die bestehenden internationalen Standards und Studien für einen zulässigen Gesamtporenanteil gelten nur für ausgewählte elektronische Bauteile und widersprechen sich sogar teilweise. Aus diesem Anlass entstand das Forschungsprojekt VoReSo (engl. Influence of Voids on the Reliability of Solder joints, Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen), das von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert wird. Ziel des Projekts ist es, den Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen elektronischer Baugruppen zu untersuchen. Hierzu werden kritische Porenpositionen und -größen mit Zuverlässigkeitstests und mit Simulationen identifiziert und daraus Porengrenzwerte abgeleitet. Ein besonderer Fokus liegt dabei zum einen auf der Hochleistungs-LED-Technik, die aktuell Einzug in zahlreiche Anwendungen hält, und zum anderen auf dem silberreduzierten SAC105-Lot. Die vorliegende Arbeit entstand zum großen Teil im Rahmen des VoReSo-Projekts.

Zunächst wurden die wichtigsten Grundlagen zu Poren und Rissen in Lötverbindungen beschrieben. Es wurde ihre Entstehung, ihre Ursachen und ihre Auswirkung auf die Zuverlässigkeit erläutert. Poren reduzieren den Verbindungsquerschnitt der Lötverbindung und verschlechtern dadurch ihre mechanische, elektrische sowie thermische Leistungsfähigkeit und begünstigen Risse. Risse können allerdings auch im Lot entstehen, ohne dass

Poren daran beteiligt sind. Gründe für die Rissentstehung sind die verschiedenen Belastungen (Temperaturänderungen, Vibrationen, Lastwechsel), denen eine elektronische Baugruppe im Betrieb ausgesetzt ist und die zu einer Alterung des Lots führen. Risse können die Lötstelle derart schwächen, dass sogar die gesamte Baugruppe ausfallen kann. Durch Vakuum- oder Überdruckverfahren können Poren zwar deutlich reduziert werden, aber in der Praxis kommen diese Verfahren noch nicht serienmäßig zum Einsatz. Der Stand der Technik wurde anhand internationaler Studien und Standards analysiert und daraus wurde der Forschungsbedarf abgeleitet. Aufgrund der widersprüchlichen Aussagen der Studien und Standards drängt sich für die produzierende Industrie immer wieder die Frage auf, welchen Einfluss die Poren tatsächlich auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen haben. Häufig wird von der Elektronikindustrie ein geringerer Porenanteil als der in der IPC-A-610-F-Richtlinie definierte Grenzwert für Ball Grid Arrays (BGAs) von 30 % gefordert. Überhaupt betrachtet der Großteil der bisherigen Untersuchungen nur BGA-Lötverbindungen. Die internationalen Studien kommen zu dem Ergebnis, dass nicht der Porenanteil, sondern vielmehr die Porenposition ausschlaggebend für die Zuverlässigkeit ist.

Ausgehend vom Stand der Technik wurden im Rahmen dieser Arbeit zunächst anwendungsbezogene Testbaugruppen mit dem Ziel entwickelt, Literaturlücken zu schließen und aktuelle Trends sowie Fragestellungen aus der Elektronikindustrie zu berücksichtigen. Die zu untersuchenden Bauelemente sind Hochleistungs-Leuchtdioden (LEDs) mit flächigen Lotanschlüssen, die auf Metallkern-Substrate gelötet wurden. Um in den Experimenten unterschiedliche Porenanteile untersuchen zu können, wurden porenreiche und porenarme Lötverbindungen hergestellt. Die porenarmen mit einem Porenanteil unter 5 % wurden durch ein Lötverfahren mit Überdruck realisiert. Dem gegenüber stehen die porenreichen Lötverbindungen mit einem Porenanteil über 15 % beziehungsweise über 25 %, die durch Variationen des Reflowlötprofils und teilweiser Vortrocknung der Lotpaste vor dem Löten erzeugt wurden. Der Porenanteil wurde durch 2D-Röntgen ermittelt.

Zusätzlich zum konventionellen 2D-Röntgen wurden Computertomographien (CT) durchgeführt, aus denen der Porenvolumenanteil bestimmt werden konnte. Ein Vergleich des 2D- und des 3D-Porenanteils ergab, dass die dreidimensionale Auswertung die Realität besser abbildet. Sie erfasst nämlich sowohl die tatsächliche Porengeometrie und -position als auch die Lotgeometrie. Der 3D-Porenanteil war in der Regel niedriger als der 2D-Porenanteil. Deshalb kann für diese Testbaugruppen bei einer 2D-Auswertung von einer Überbewertung des Porenanteils ausgegangen werden.



Bei einer zweidimensionalen Auswertung fehlen Informationen über die Tiefe, die exakte Form und die Position der Pore sowie Informationen über die ungleichmäßige Lotspaltdicke. Diese Eigenschaften können nur mit CT erfasst werden. Die CT-Untersuchungen sind augenblicklich noch zeitaufwändiger als die Röntgeninspektion. Aus diesem Grund wurden die Proben in dieser Arbeit mit der Röntgeninspektion klassifiziert. Ergänzend zur 100 %-Röntgenprüfung schlossen sich für ausgewählte Testobjekte Computertomographien an. Aus den CT-Daten konnten mehr Informationen über die Lötstellenqualität wie etwa die Detektion von Rissen und damit zusammenhängend kritische Positionen und Größen von Poren gewonnen werden.

Als nächstes wurden verschiedene thermo-mechanische Tests, wie die passiven Temperaturschocktests (Luft/Luft, flüssig/flüssig), der aktive Lastwechseltest und der überlagerte Lastwechseltest, sowie ein mechanischer Test in Form eines zyklischen Biegetests, durchgeführt. Die Tests erfolgten für alle Porenklassen, um den Einfluss der Poren auf die Lötstellenqualität zu ermitteln. Aus diesem Grund wurden zusätzlich, stellenweise während und nach den Zuverlässigkeitstests Computertomographien aufgenommen. Auf die Zuverlässigkeitstests folgten Schertests mit denen nachgewiesen wurde, dass Poren die mechanische Festigkeit reduzieren.

Durch die CT-Aufnahmen während der Zuverlässigkeitstests war es möglich, den Zeitpunkt der Rissentstehung einzugrenzen. Außerdem wurde herausgefunden, dass Risse nahezu gleichzeitig an Poren und am Lötstellenrand entstehen. Unabhängig vom Porenanteil konnten Risse an den Poren, am Lötstellenrand oder direkt im Lot beobachtet werden. Vor allem bei einem hohen Porenanteil verbinden Risse häufig den Lötstellenrand mit Poren oder auch einzelne Poren miteinander. Letzteres tritt bei porenarmen Lötverbindungen seltener auf, weil hier die Poren weiter auseinander liegen. Ein Risswachstum direkt im Lot wird durch einen kleinen Lotspalt begünstigt. Dieser kommt oft bei einem geringen Porenanteil vor, weil die Lotspaltdicke vom Lot- und vom Porenvolumen bestimmt wird. Mit Hilfe von FEM-Simulationen wurde für die optimale Lotspaltdicke der Bereich von 80  $\mu\text{m}$  bis 90  $\mu\text{m}$  ermittelt.

Die Basis aller Simulationen bildete ein verifiziertes Simulationsmodell, das die Wirklichkeit möglichst genau abbildet. Hierzu wurde eine Verfahren entwickelt, das die Simulation von realen Poren ermöglicht. Durch die CT-Untersuchungen waren die Lötverbindungen schon eingehend charakterisiert sowie die Position und die Größe der Poren bestimmt worden. Mit diesen Kenntnissen konnten die Poren manuell in die Simulation übertragen

werden. Durch einen iterativen Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit der Simulation war es möglich, ein realitätsnahes Simulationsmodell zu entwickeln und dieses zu verifizieren. Dabei wurde die simulierte Kriechdehnung mit den Rissen in den CT-Bildern verglichen. Traten hier große Abweichungen auf, wurden Simulationsparameter geeignet angepasst.

Auf der Grundlage des verifizierten Simulationsmodells konnten als nächstes Fallstudien durchgeführt werden, in denen die Größe, die Anzahl und die Position der Poren in den Lötverbindungen variiert wurden. Aus den in der Simulation und aus den Zuverlässigkeitstests gewonnen Erkenntnissen konnten kritische Porengrößen und -positionen abgeleitet werden. Es zeigte sich, dass vor allem die Porenposition einen entscheidenden Einfluss auf die Rissentstehung hat. So sind Poren in den Lötverbindungen der elektrischen Pads kritischer zu bewerten als die im thermischen Pad. Hier führten nur Poren im Randbereich zu einer Erhöhung der Kriechdehnung. Besonders in den Ecken der Lötstelle der elektrischen Pads erhöhten die Poren die Kriechdehnung und begünstigen folglich die Rissentstehung.

Ausgehend von den in dieser Arbeit erfolgten Untersuchungen wurden Leitlinien für die Elektronikfertigung entwickelt, um eine zielgerichtete Qualitätsprüfung in der Elektronikfertigung zu verwirklichen.

### 8.2 Schlussfolgerungen für die Elektronikfertigung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Vorgaben für das Bauteil-Design, dem Fertigungsprozess und für die Inspektion von Lötstellen mit gängigen Untersuchungssystemen (automatische Röntgeninspektion, automatische optische Inspektion) aus der Elektronikfertigung erarbeitet, um eine schnelle, effiziente und präzise Fehlerdetektion zu gewährleisten.

Es hat sich gezeigt, dass durch Vertiefungen im Kupfer an der LED-Unterseite die Porenentstehung begünstigt wird, weshalb bei der Auswahl der Bauteile auf eine ebene Kupferschicht zu achten ist.

Die Verkipfung der Bauteile, die daraus resultierende ungleichmäßige Lotspaltdicke und die Lotspaltdicke an sich haben einen wesentlichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Baugruppe. Eine zu geringe Lotspaltdicke führt zu einer verstärkten Rissbildung. Der Prozess, insbesondere der Lotpastendruck und die Bestückung der Bauteile, ist dahingehend zu optimieren, dass eine Verkipfung der Bauteile verhindert und eine ausreichende Lotspaltdicke sichergestellt wird.

Die Lötstelleninspektion muss sich hauptsächlich auf die Position der Poren konzentrieren. Die Untersuchungen haben nachgewiesen, dass die Lötverbindungen der elektrischen Pads kritischer als diejenigen des thermischen Pads sind. Da der Gesamtporenanteil keinen Hinweis auf die Porenverteilung zwischen den drei Lötverbindungen gibt, kann eine pauschale Definition eines Porengrenzwertes eine falsche Bewertung der Baugruppe zur Folge haben. Einerseits führen wenige Poren in den Lötverbindungen des thermischen Pads wegen des im Vergleich zu den elektrischen Pads größeren Flächenanteils zu einem geringeren Porenanteil. Andererseits kann trotz eines niedrigeren Gesamtporenanteils ein höherer Porenanteil in den Lötverbindungen der elektrischen Pads vorhanden sein.

Um eine Fehlbeurteilung zu vermeiden, wurde eine Prüfmaste erarbeitet, die kritische von nicht relevanten Bereichen der Lötverbindung abgrenzt. Zusätzlich wurde für jeden Bereich ein Porengrenzwert ermittelt. Am kritischsten sind die Ecken der Lötverbindung der elektrischen Pads zu bewerten. Dort sollten Poren vermieden werden oder nicht mehr als 10 % des Flächenanteils der Ecken einnehmen. Unkritischer sind die Bereiche der Lötverbindungen in der Mitte der elektrischen Pads und an den Rändern des thermischen Pads, bei denen ein Porenflächenanteil von 15 % noch toleriert werden kann. Das Lot in der Mitte des thermischen Pads ist als vollkommen unkritisch einzustufen, sodass Poren hier vernachlässigt werden können. Mit zusätzlichen thermischen Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass sich die LED-Chiptemperatur ohne Kontaktierung des thermischen Pads nur geringfügig erhöht, weil die Wärme über die elektrischen Pads abtransportiert wird.

Die Umsetzung der in dieser Arbeit vorgestellten Leitlinien ist eine Möglichkeit die Erkennung von Gut- und Schlechteilen während der Elektronikfertigung zu verbessern. Auf eine porenfreie Lötverbindung kann verzichtet werden, wenn die kritischen Positionen der Lötstelle bekannt sind und sich in diesen nur Poren bis zu einem definierten Porenanteil befinden. Auf diese Weise können eine qualifizierte Ausschussbewertung und eine gezielte Einstellung des Lötprozesses erreicht werden.

Die an den LED-Baugruppen erarbeitete Methode mit einem verifizierten Simulationsmodell kritische Porengrößen und -positionen zu identifizieren, kann auch auf andere elektronische Baugruppen übertragen werden. Dafür wurde eine allgemeine Vorgehensweise definiert, um zu einer Prüfmaste für die automatische Röntgeninspektion zu gelangen und entsprechende Prüfleitlinien abzuleiten.

Diese Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zur Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer Baugruppen. Dabei wurden neue Erkenntnisse über den Einfluss von Poren und über den Rissentstehungsprozess in flächigen Lötverbindungen präsentiert, die in Prüflinien für die Elektronikproduktion eingeflossen sind.

### 8.3 Ausblick

Um die in dieser Arbeit aufgezeigten Möglichkeiten in der Zukunft noch weiter auszubauen, müssen weiterführende Untersuchungen erfolgen.

Die Poren mussten aus den CT-Daten manuell in die Simulationssoftware übertragen werden, um auf der Basis eines verifizierten Simulationsmodells kritische Porenbereiche und -größen identifizieren zu können. Dieser Schritt ist sehr zeitintensiv, weil die teilweise komplexen Porengeometrien nachmodelliert und die genauen Positionen ausgemessen werden müssen. Um diese Methode auf andere Materialsysteme und elektronische Baugruppen zu übertragen, ist eine effektivere Herangehensweise wünschenswert. Es sind bereits erste Ansätze im Rahmen des VoReSo-Projekts seitens der Projektpartner am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik und dem Fraunhofer-Anwendungszentrum Ressourceneffizienz erfolgt, um diesen Schritt zu vereinfachen. Die mittels CT charakterisierten Poren können als Standard-Triangulation-Language-Datensatz (STL) aus der CT-Auswertesoftware exportiert werden. Da jedoch das auf der Basis der Grauwerte aus den CT-Daten erstellte Netz für die Simulation fehlerhaft ist, muss der Datensatz nachbearbeitet werden. Mit Hilfe von 3D-CAD-Programmen (wie z. B. Meshmixer, SolidWorks) kann das Netz aufbereitet werden, um die Datenqualität der STL-Daten zu verbessern und dadurch ein simulationsfähiges Modell zu erhalten. Erste Versuche zeigen, dass Fehler in der Datei repariert und Störfaktoren eliminiert werden müssen, um mit den Daten in der Simulation zu arbeiten. So müssen z. B. störende Komponenten gelöscht, die Anzahl der Elemente reduziert sowie die Porenoberfläche geglättet werden. Sowohl die manuelle Implementierung als auch der Export der CT-Daten sind zielführend. Der Export der CT-Daten besitzt eine höhere Präzision, da die Porengeometrie vollständig übernommen werden kann, und sie ist schneller. Deshalb wird diese Vorgehensweise weiter verfolgt.

Als Ausfallkriterium für die LEDs wurde in dieser Arbeit der Light-on-Test gewählt. Es hat sich gezeigt, dass die LEDs trotz des starken, durch die Belastungen verursachten Risswachstums im Regelfall noch leuchten. Die Abweichungen der maximalen Scherkräfte zwischen den unterschiedlichen Porenanteilen haben demonstriert, dass ein Abfall der Scherkräfte immer nur mit Berücksichtigung des Porenanteils als Ausfallkriterium gewählt werden darf. Die maximalen Scherkräfte des hier betrachteten größten Porenanteils von über 25 % zeigen bereits im unbelasteten Zustand 30 % niedrigere Scherkräfte als es bei einem Porenanteil unter 5 % der Fall ist. Ausfallkriterien sind somit sorgfältig zu wählen. In weiterführenden Arbeiten wird ein Ansatz verfolgt, um das Risswachstum anhand einer elektrischen Messung zu bewerten. Dabei wird das Risswachstum bei steigender Zahl der Temperaturschocks mit CT-Analysen dokumentiert und mit der Messung der Vorwärtsspannung korreliert. Ziel ist es, als Ausfallkriterium einen Anstieg der Vorwärtsspannung zu definieren, der die Rissentwicklung überwacht und zerstörungsfrei, ohne großen Aufwand durchgeführt werden kann.



## 9 Summary

The demand of increasing efficiency and the simultaneous miniaturisation of electronic components require a more reliable system, especially reliable solder joints. The new lead-free solders that have been introduced in the market increase the formation of voids in the solder joints of electronic devices. In the case of power-electronic applications, voids significantly influence reliability. Thus, a reduction of voids is necessary. However, special soldering processes such as overpressure or vacuum are required. Existing international standards and studies deliver different void limits for just a few electronic components. For this reason, the research project VoReSo (Influence of Voids on the Reliability of Solder joints), funded by the Bavarian Research Foundation, was established. The aim of the project is to investigate the influence of voids on the reliability of solder joints of electronic devices. For this purpose, different reliability tests and finite-element simulations should reveal critical void positions and sizes from which a void limit can be derived. Thereby, the focuses are on high-power light-emitting diode (LED) technique and on the silver reduced SAC105 solder paste. The main part of this work was generated during the VoReSo-project.

Firstly, the most important basics of voids and cracks in solder joints such as their formation, their reasons and their influence on the reliability are described. Voids reduce the connection between the substrate and the LED; consequently, they deteriorate the mechanical, electrical and thermal performance. Voids support the initiation of cracks, but they can also occur without voids. Reasons for cracks are different stresses in operation such as temperature changes, vibrations and load changes which result in an ageing of the solder joints. Cracks weaken the solder joint which can lead to the failure of the whole electronic device. Vacuum and overpressure solder processes strongly reduce voiding but these solder processes are not available in practice in all electronic productions. International studies and standards show inconsistent results on acceptable void limits. The producing industries are doubtful regarding the real influence of voids on the reliability of solder joints, and in many cases, a very low-voiding level is accepted by the industry and not the 30 % void limit of the IPC-A-610-F guideline for Ball Grid Arrays (BGAs). Most studies have investigated BGA solder joints, and some of them presented that the void positions are more important than the void level.

At the beginning of this thesis, an application-oriented test assembly was established for the investigations, which considers the current trends of the electronic industry and gaps in the literature. The investigated components are high-power LEDs with flat solder connections which were soldered on an insulated metal substrate. Solder joints below 5 % voiding and above 15 % and above 25 % voiding were fabricated. The low-voiding solder joints are produced by the overpressure-soldering process and the high-voiding solder joints are produced by variations of the reflow profile and partial predrying of the solder paste before soldering. The void levels were determined by the two-dimensional (2D) X-ray technique.

In addition to the conventionally X-ray inspection, computer tomography (CT) investigations were performed and three-dimensional (3D) void volume ratios were calculated. Comparing the 2D- and 3D-void ratios shows that the void volume ratio is lower than the void area ratio. The 3D-evaluation is more realistic, because the exact position and geometry of the voids and the uneven solder gap thickness are captured. The 2D-void level was larger than the 3D void level because of the missing information of the depth, the exact shape and position of the void and the uneven solder joints gap. At present, CT is more time consuming than X-ray inspection. Consequently, the classification of the different void levels in the solder joints were based on X-ray technique, and for selected test samples, CT analyses were performed. By means of the CT data, the detection of cracks and thereby the identification of critical void sizes and positions were possible.

Next, different thermo-mechanical tests such as the passive thermal shock test (air/air, liquid/liquid), the active power cycle test, the power and temperature cycling test and the mechanical bending test were performed. The tests were performed for different void levels to investigate the influence of voids on the solder joint quality. Therefore, CT investigations were done before, partly during and after the reliability tests. After the reliability tests, shear tests were performed which show that voids reduce the mechanical strength.

With the help of the CT investigations, the time of crack formation can be estimated. Cracks appeared nearly at the same time at the voids and at the border of the solder joints. Independently from the void level, cracks occurred on voids, on the border of the solder and directly in the solder. Especially at high-voiding levels, cracks connected the border of the solder joints with voids or single voids with each other. The latter at a low-voiding level was more unusual, because the voids are located further from each



other. A small solder joint gap supports cracks directly in the solder. This appears more often at a low-voiding level, because the solder joint gap includes the solder volume and the additional void volume. By means of simulations with the finite-element method, the ideal height of the solder joint gap is between 80  $\mu\text{m}$  and 90  $\mu\text{m}$ .

The base of all simulations is a verified simulation model, which represents reality. Therefore, a method was developed that enables the simulation of real voids. The voids and their sizes and their positions were characterised by CT. Based on the CT data, the voids were implemented manually in the simulation. The iterative comparison of the experimental results and the simulations lead to a simulation model, which is close to reality. Therefore, the simulated creep strain was compared with the cracks in the CT images. In the case of large deviations, the simulation parameters were modified.

Based on this verified simulation model, in a next step, different case studies were investigated in which the size, the amount and the position of the voids in the solder joints were varied. The findings of the reliability tests and simulations result in identifying critical void positions and sizes and show that the void position has a great influence in crack initiation. Voids in the solder joints of the electrical pads are more critical than in the thermal pad. In the solder joint of the thermal pad, just voids in the border region lead to cracks. Voids in the corners of the solder joints of the electrical pads increase the creep strain and produce crack formation. Based on the investigations and results of this work, test guidelines for electronic production are developed to realise better quality management.

In this work, specifications for the component design, the production process and the inspection of the solder joints with common inspection systems (automated X-ray inspection, automated optical inspection) in electronic productions are developed to achieve a fast, efficient and accurate failure detection in practice.

The hollow in the copper at the LED-bottom increases the void development. Therefore, this must be considered at the selection of the component and an even copper layer is preferred.

The tilting of the component, the resulting uneven solder gap and the solder gap by itself have a great influence on the reliability of the electronic assembly. A small solder gap strengthens the crack formation. Consequently, the manufacturing process, especially the solder paste printing and the component assembly, must be optimised to prevent the tilting of the parts and ensure a sufficient solder gap.

The focus of solder joint inspection should be the void position. The studies in context of this thesis verify that solder joints of the electronic pads are more critical than the one of the thermal pad. A general definition of a void limit can lead to a false evaluation of the assembly, because an overall void limit for the whole test component does not indicate the void distribution in each solder joint. Less voids in the solder joints of the thermal pad often results in a low total void ratio because of the area proportion of the solder pad. However, a large void ratio in the solder joints of the electrical pad is still possible. To avoid such incorrect assessments, an inspection template has been introduced which separates critical areas from non-critical areas. Additionally, for each area, a void limit was determined. The most critical position for voids are the corners of the solder joints of the electrical pads. Voids should be prevented there or amount for not more than 10 % of the area ratio of the corners. In contrast, voids in the middle of the solder joints of the electrical pads and at the edges of the thermal pad are less critical. Therefore, a void limit of 15 % is acceptable. In addition, the solder in the middle of thermal pad is uncritical and voids can be neglected. Thermal simulations prove that large voids in the solder joints of the thermal pad influence the temperature on the LED-chip in a minor way, because the thermal energies are removed via the electrical pads.

The implementation of the test guidelines is an opportunity to improve the detection of good and bad parts during the electronic production. The realisation of void-free solder joints is not required if critical positions in the solder joints are noted, and the void occurrence is restricted up to a certain void level. As a result, a qualified reject evaluation and an aimed setting of the solder process is possible.

The method to identify critical void sizes and positions by a verified simulation model, which was developed on the LED-assembly, can be transferred to other electronic assemblies. For this, a general approach was defined to receive an inspection template for the automatic X-ray inspection and to derive appropriate test guidelines.

This work outlines an important input to the packaging and interconnection technology of electronic components. Thereby, new findings regarding the influence of voids and the crack formation process in flat solder joints are presented, which feed into test guidelines for the electronic production.

Further studies are necessary to expand the discussed results. Based on a verified simulation model, critical void sizes and positions can be identified. However, the voids currently must be transferred manually from the CT data to the simulation software. This step is very time consuming, because the

complex void geometries have to be copied and the exact void positions have to be measured. Because this method should be transferred to other material systems and electronic assemblies, a more effective strategy is desirable. First approaches have already occurred within the VoReSo-project by the project partners Institute for Factory Automation and Production Systems and the Fraunhofer Application Centre for Resource Efficiency to simplify this step. The voids, which are characterised by CT, can be exported as a Standard Triangulation Language (STL) dataset. However, this dataset needs to be reworked, because the simulation cannot work with it due to the incorrect mesh based on the CT data. With 3D-CAD-programs (such as Meshmixer and SolidWorks), the mesh needs to be prepared to improve the quality of the data. First tests show that it is necessary to delete disruptive factors such as noise, smoothen the void surface of the STL data and reduce elements. The manually implementation and the exporting of CT data are expedient but the last method is more precise and faster.

A further topic is the failure criterion, and in this work, the light-on-test was chosen. Despite the crack growing because of the applied loads, the LEDs were still shining. The reduction of the shear forces as the failure criterion is allowed if the void ratio is considered. The various void ratios resulted in a difference of the maximum shear forces. In the unloaded condition, the maximum shear forces of the greatest voiding (above 25 % void ratio) leads to 30 % lower shear forces. Consequently, the default criterion needs to be chosen carefully. In further studies, the crack formation should be assessed by an electrical measurement. Therefore, the crack development is documented by CT during ongoing thermal shocks and is correlated with the measurement of the forward voltage. The aim is to define an increase of the forward voltage as the failure criterion which can monitor the crack development as a non-destructive test without great effort.



## 10 Anhang

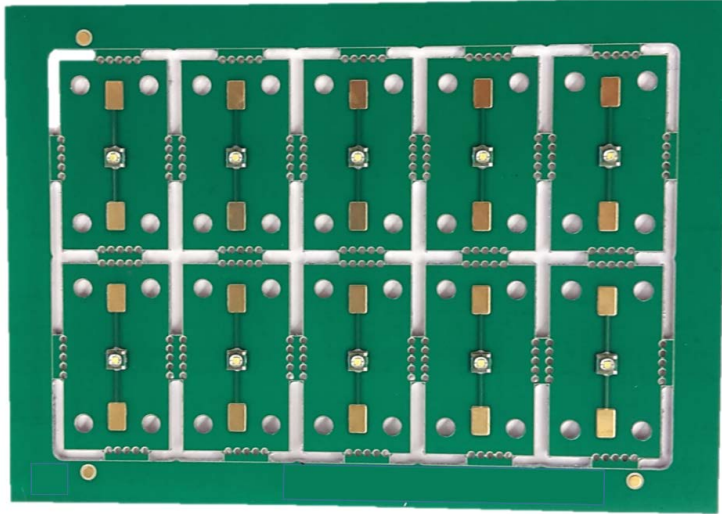


Bild 10-1: Nutzen von Testbaugruppe A

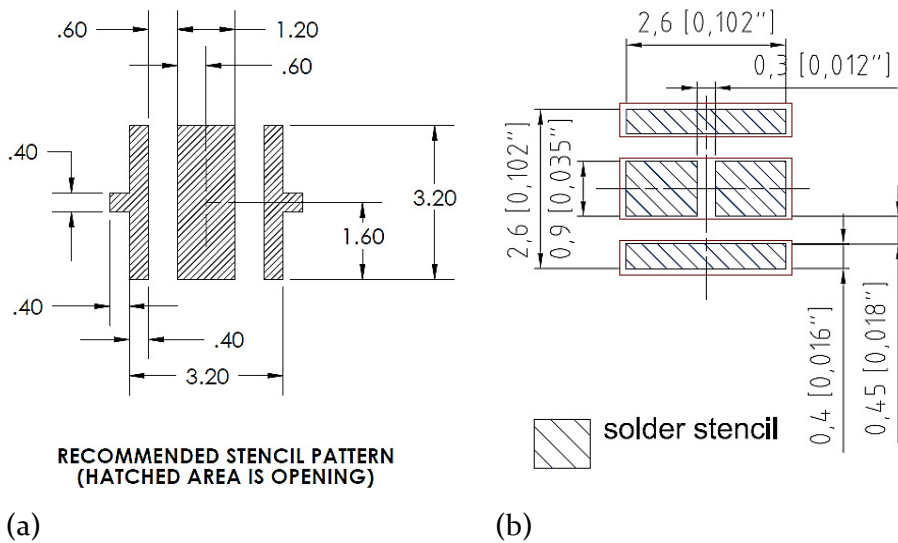
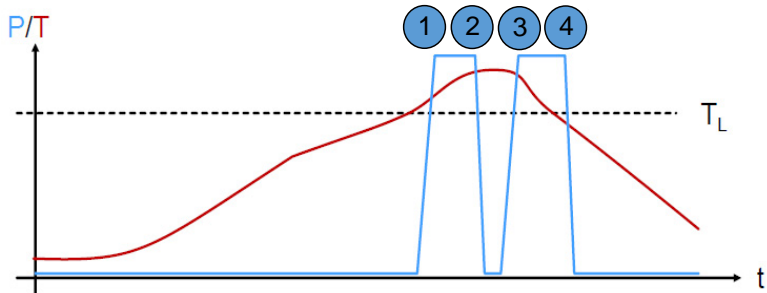


Bild 10-2: Schablonendesign gemäß Datenblatt in mm (a) Testbaugruppe A [83], (b) Testbaugruppe B [84]



- 1 das bereits flüssige Lot wird erstmals mit Druck beaufschlagt
- 2 Druck wird abgelassen
- 3 das immer noch flüssige Lot wird ein zweites Mal mit Druck beaufschlagt
- 4 Druck wird abgelassen wenn das Lot erstarrt ist

Bild 10-3: Schematischer Prozessablauf der MaxiReflow 3.0 HP von Seho nach [20]

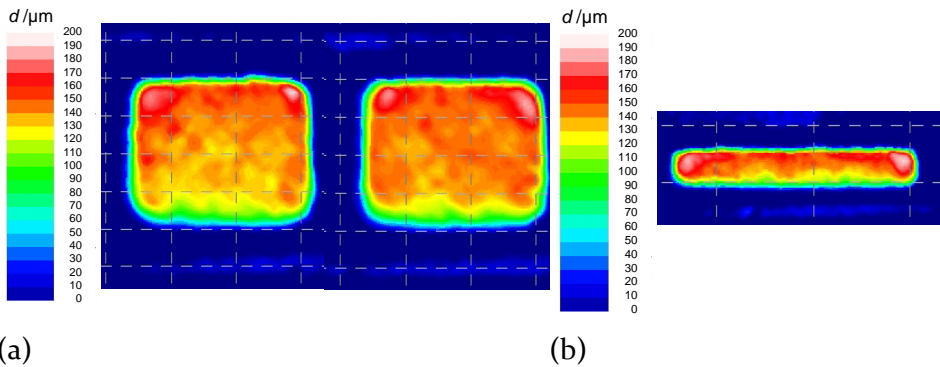


Bild 10-4: Lotpasteninspektion (a) Lotpastendepots des thermischen Pads, (b) Lotpastendepot des elektrischen Pads

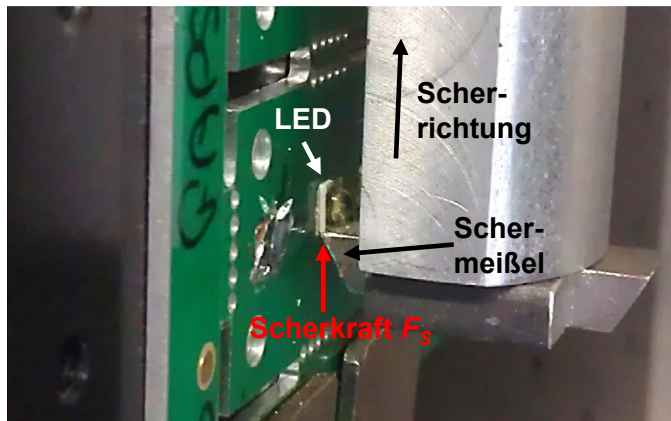


Bild 10-5: Prüfaufbau des Schertests zur Ermittlung der mechanischen Festigkeit

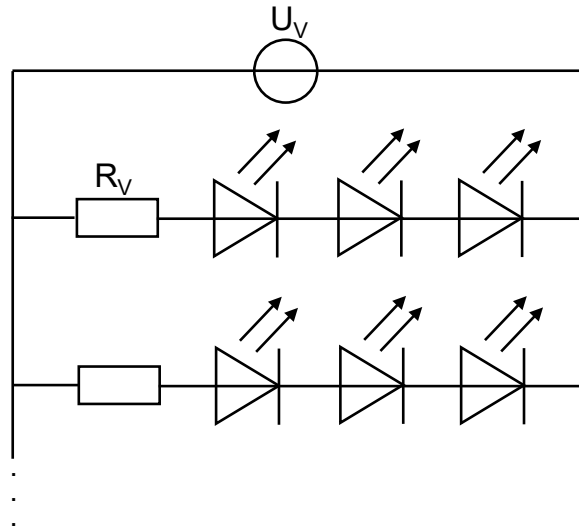


Bild 10-6: Schaltung des aktiven und überlagerten Lastwechseltests

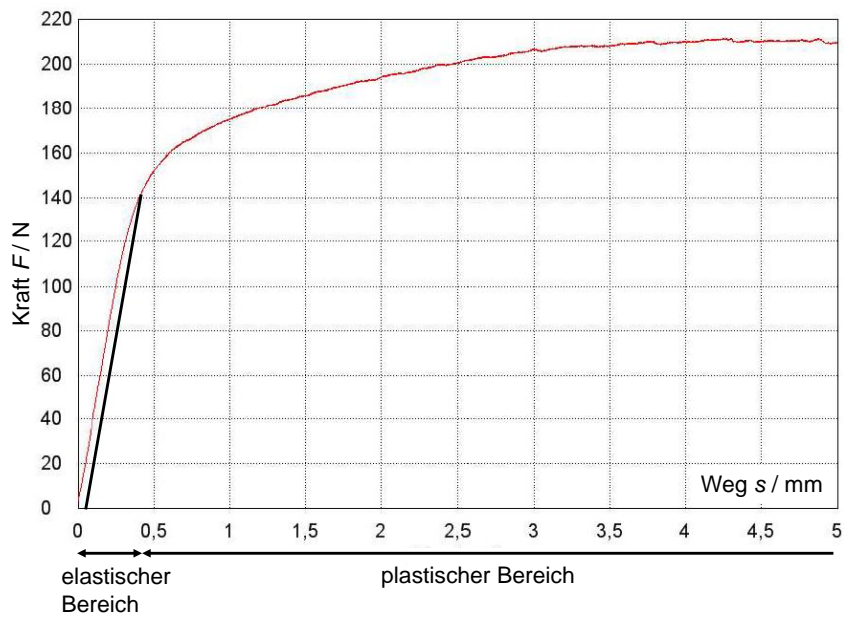


Bild 10-7: Kraft-Weg-Diagramm



Tabelle 10-1: Abmessungen der simulierten Testbaugruppe

Parameter	Abmessungen
Länge der IMS-Leiterplatte	35 mm
Breite der IMS-Leiterplatte	20 mm
Dicke der Aluminiumschicht	1,6 mm
Dicke des Dielektrikums	50 $\mu\text{m}$
Dicke der Kupferschicht	105 $\mu\text{m}$
Dicke der Lötverbindung	90 $\mu\text{m}$
Länge und Breite der LED	3,3 mm
Höhe der LED	50 $\mu\text{m}$
Durchmesser der Durchkontaktierung	130 $\mu\text{m}$
Länge und Breite des Chips	75 $\mu\text{m}$
Höhe des Chips	125 $\mu\text{m}$
Radius der Linse	1,5 mm

Tabelle 10-2: Materialdaten der simulierten Testbaugruppe

Material	Wärmeausdehnungskoeffizient	Elastizitätsmodul	Poissonzahl	Quelle
Linse	$7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$	$3 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	0,40	[179]
LED-Cip (Silizium)	$2,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$	$1,7 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$	0,28	[179]
Keramik ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	$6,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$	$4 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$	0,22	[179]
SAC105-Lot	$2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$	$3,7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$	0,35	[180]
Kupfer	$1,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$	$1,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$	0,35	[179]
Dielektrikum	$1,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$	$2,2 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$	0,28	[179]
IMS (Aluminium)	$2,31 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$	$7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$	0,35	[179]

Tabelle 10-3: Materialkonstanten für die Garofalo-Gleichung für das SAC-Lot [181]

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
SAC105-Lot	2 310 000 1/s	0,026 1/MPa	6,5	6 962,7 K

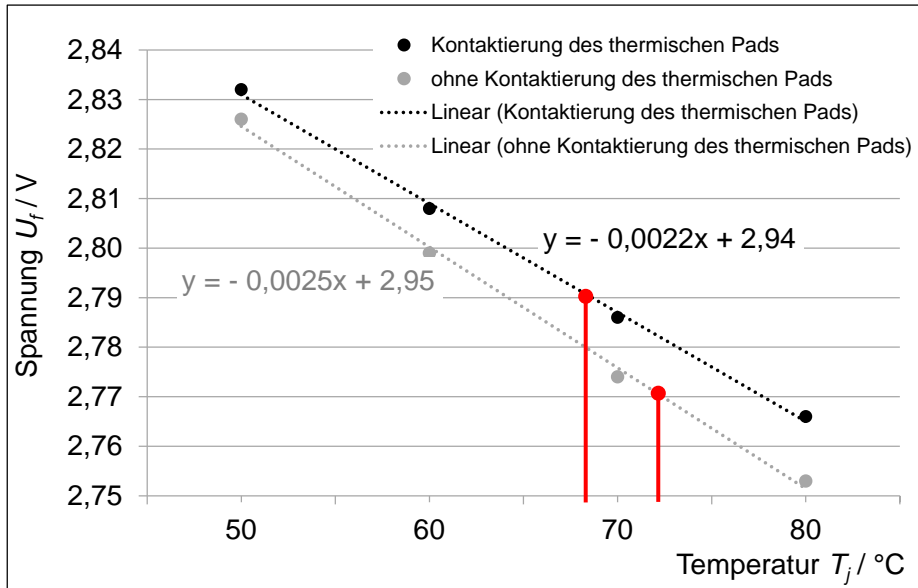
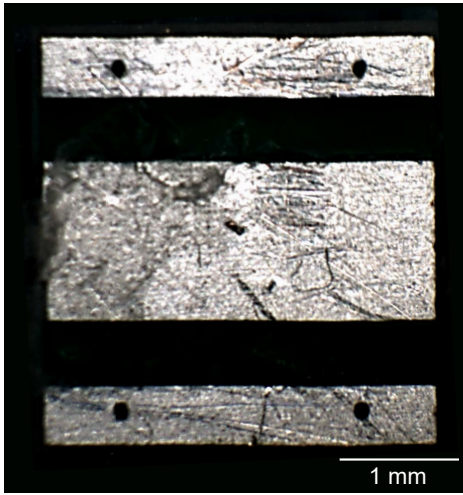
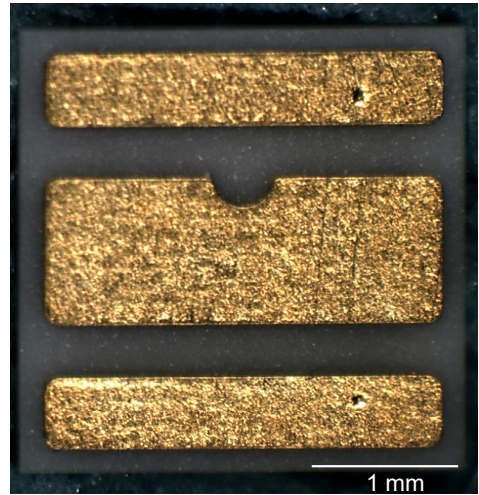


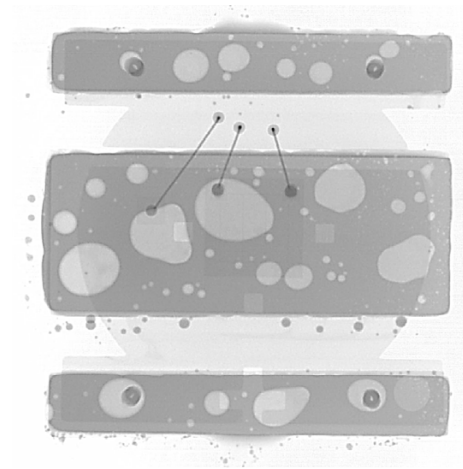
Bild 10-8: Gemessene  $T_j$ - $U_f$ -Kennlinien für LEDs mit und ohne Kontaktierung des thermischen Pads [158]



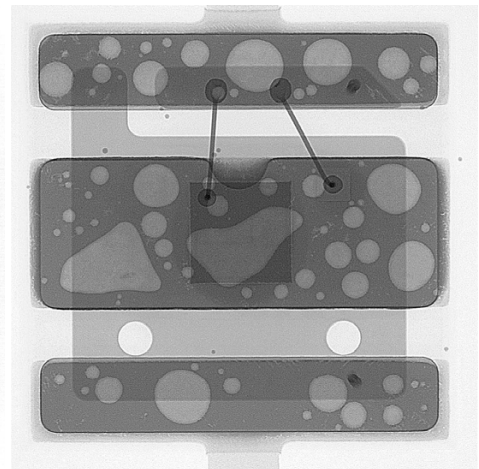
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 10-9: Kupfervertiefung unterhalb der Durchkontaktierungen (a) LED-Unterseite von Testbaugruppe A, (b) LED-Unterseite von Testbaugruppe B, (c) Röntgenbild von Testbaugruppe A, (d) Röntgenbild von Testbaugruppe B



# Literaturverzeichnis

- [1] GAO, S.; HONG, J.; SHIN, S.; LEE, Y.; CHOI, S.; YI, S.: Design optimization on the heat transfer and mechanical reliability of High Brightness Light Emitting Diodes (HBLED) package. In: 58th Electronic Components, 2008, S. 798–803
- [2] N. N.: Cree® XLamp® LEDs - Solder Joint Reliability Study. URL <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/XLamp-Application-Notes/Solder-Joint-Reliability.pdf> – Überprüfungsdatum 02.07.2016
- [3] BELL, H.; GROSSMANN, G.; WOHLRABE, H.: Reflow-Technologie: Grundlagen des Reflowlötens: Teil 3: Zuverlässigkeit und Fehlermanagement. 2. Aufl.: Rehm Thermal Systems GmbH, 2013
- [4] 2002/95/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, 2003
- [5] AHRENS, T.; ANDREAE, H.; SCHRUTTKER, W.: RoHS-Handbuch für Hersteller und Zulieferer: Praktische Umsetzungshilfen, alternative Materialien und innovative Verfahren. Losebl.-Ausg. Merching: Forum Verlag Herkert, 2006
- [6] FREAR, D. R.: Microstructure and Thermomechanical Behaviour PF-Free Solders. In: SUBRAMANIAM, K. N. (Hrsg.): Lead-free solders: Materials reliability for electronics. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012, S. 233–250
- [7] KANG, S.: Effects of Minor Alloying Additions on the Properties and Reliability of Pb-Free Solders and Joints. In: SUBRAMANIAM, K. N. (Hrsg.): Lead-free solders: Materials reliability for electronics. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012, S. 121–159
- [8] PAPE, U.: Reduzierung von Poren in Lötverbindungen durch neue Löttechnologien. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten: EBL 2008; Systemintegration und Zuverlässigkeit; 4. DVS/GMM-Fachtagung vom 13. bis 14. Februar 2008 in Fellbach. Berlin: VDE-Verlag, 2008, S. 151–156

- [9] LAUER, T.: Porenarme Lötverbindungen zur Zuverlässigkeitssteigerung und optimierten Entwärmung von Flachbaugruppen in Elektronische Baugruppen und Leiterplatten. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten: EBL 2010; Zuverlässigkeit und Systemintegration; 5. DVS/GMM-Tagung am 24. und 25. Februar 2010 in Fellbach. Düsseldorf: DVS Media, 2010, S. 6–9
- [10] ZHU, N.: Thermal impact of solder voids in the electronic packaging of power devices. In: Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM); 9. - 11. März 1999 in San Diego, USA, 1999, S. 22–29
- [11] N. N.: Überdruck statt Vakuum - Mehr als nur porenfreie Lötverbindungen. URL [http://www.seho.de/documents/Aktuelles\\_Events/Seho-UeberdruckstattVakuum.pdf](http://www.seho.de/documents/Aktuelles_Events/Seho-UeberdruckstattVakuum.pdf) – Überprüfungsdatum 19.09.2016
- [12] OSTERMANN, M.; DASGUPTA, A.: Life expectancies of Pb-free SAC solder interconnects in electronic hardware. In: SUBRAMANIAN, K. N. (Hrsg.): Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics. Norwell: Springer Science+ Business Media LLC, 2007, S. 229–236
- [13] WOHLRABE, H.: Void Expert: TU Dresden, 2011
- [14] PAPE, U.; AHRENS, T.; WEGE, S.; LAUER, T.: Einfluss der Prozessparameter auf die Porenbildung. In: SCHEEL, W. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen: Aufbau- und Fertigungstechnik; die Trends von heute - die Chancen von morgen; DVS/GMM-Fachtagung vom 4. bis 5. Februar 2004 in Fellbach. Berlin: VDE-Verlag, 2004, S. 361–366
- [15] BELL, H.; HOLLE, N.; HUTTER, M.; LANGE, B.; LAUER, T.; NIKLAS, U.; NOWOTTNICK, M.; POECH, M.; SCHALLER, K.-H.; TRODLER, J.; WOHLRABE, H.: Grundlegende Mechanismen der Porenbildung – ein kurzer Ergebnis-bericht des AK „Poren“. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten: EBL 2010; Zuverlässigkeit und Systemintegration; 5. DVS/GMM-Tagung am 24. und 25. Februar 2010 in Fellbach. Düsseldorf: DVS Media, 2010, S. 148–150
- [16] WOHLRABE, H.: Poren in bleifreien Lötverbindungen - Ergebnisse des AK Poren (44. Treffen des Arbeitskreises "Zuverlässige, bleifreie Systeme"). Berlin, 14.03.2012

- [17] IPC-A-610F: Acceptability of electronic assemblies, 2014
- [18] SCHWERZ, R.; ROELLIG, M.; MEIER, K.; WOLTER, K.-J.: Lifetime assessment of BGA solder joints with voids under thermo-mechanical load. In: 13th Intl. Conference on Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE) in Cascais, Portugal, 2012, S. 1–7
- [19] LADANI, L. J.; RAZMI, J.: Interaction Effect of Voids and Standoff Height on Thermomechanical Durability of BGA Solder Joints. In: IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2009, S. 348–355
- [20] SEHO Systems GmbH: Maxi Reflow HP: Porenfreie Löttechnologie. URL [http://www.seho.de/documents/Prospekte/deutsch/MaxiReflow\\_HP\\_dt.pdf](http://www.seho.de/documents/Prospekte/deutsch/MaxiReflow_HP_dt.pdf) – Überprüfungsdatum 03.06.2016
- [21] BISWAL, L.; KRISHNA, A.; SPRUNGER, D.: Effect of Solder Voids on Thermal Performance of a High Power Electronic Module. In: 7th Electronic Packaging Technology, 2005, S. 526–531
- [22] KRÜTT, N.: LED-Systeme - Integrierte Gesamtlösungen für das Thermomanagement. URL <http://www.elektroniknet.de/optoelektronik/ledlighting/artikel/107084/> – Überprüfungsdatum 04.06.2016
- [23] DENG, H.; FENG, S.; GUO, C.; QIAO, Y.; ZHANG, G.: Reliability of solder joints in High-power LED package in power cycling tests. In: 10th IEEE International Conference, 2010, S. 1683–1685
- [24] IT Wissen: LED-Blitz. URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/LED-Blitz-LED-flash.html> – Überprüfungsdatum 20.09.2016
- [25] KRÜCKEBERG, J.: Hochleistungs-LEDs in der Praxis: Grundlagen, Ansteuerung, allgemeine Beleuchtung mit LEDs, LEDs im Automobil. s.l.: Franzis Verlag, 2007
- [26] KRÜTT, N.: Von ganzheitlichen Wärmelösungen bis hin zu integrierten Steuer- und Regelsystemen – IMS Technologie von Morgen. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2012: Hochentwickelte Baugruppen aus Europa; 6. DVS/GMM-Tagung vom 14. bis 15. Februar 2012 in Fellbach. Düsseldorf: DVS Media, 2012, S. 57–59
- [27] LASANCE, C. J. (Hrsg.); POPPE, A. (Hrsg.): Thermal Management for LED Applications. New York, NY, s.l.: Springer New York, 2014

- [28] POHLMANN, W.: Robustness of LED Components and LED Systems. In: KHANH, T. Q. (Hrsg.): Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting: 26. - 28. September 2011 in Darmstadt. München: Utz, 2011
- [29] N. N.: Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LEDs: Applikations-schrift. URL [http://www.osram-os.com/Gra-phics/XPic1/00102558\\_o.pdf/Zuverl](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00102558_o.pdf/Zuverl) – Überprüfungsdatum 19.07.2016
- [30] SCHEUBECK, M.: Lötstellenzuverlässigkeit von LEDs in Beleuch-tungsanwendungen. In: Innovative Beleuchtung mit LED 2012: 10. VDI-Fachtagung; 08. und 09. November 2012 in Düsseldorf. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2012, S. 89–95
- [31] WALTER, C.: LED-Scheinwerfer – die elegante Kostenfalle. URL <http://www.welt.de/motor/article108617980/LED-Scheinwerfer-die-elegante-Kostenfalle.html> – Überprüfungsdatum 14.07.2016
- [32] N. N.: Final Report – Round Robin Testing and Analysis of Lead Free Solder Pastes with Alloys of Tin, Silver and Copper. IPC Association Connecting Electronics Industries. 2005
- [33] N. N.: Cost of lead-free solder materials: a research report by the IPC solder products value council. Adhesives & Sealants Industry. 2007
- [34] SANDY, B.; LASKY, R.: Choosing A Low-Cost Alternative To Sac Alloys For Pcb Assembly: Preliminary Work. In: Surface Mount Technology Association (Hrsg.): SMTA International Conference; 16. - 20. Oktober in Texas. New York: Curran, 2011, S. 755–759
- [35] NOWOTTNICK, M.; TRODLER, J.: Prozessierung und Zuverlässigkeit von SAC-Loten mit reduziertem Silbergehalt. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten: EBL 2010; Zuverlässigkeit und Systemintegration; 5. DVS/GMM-Tagung am 24. und 25. Februar 2010 in Fellbach. Düsseldorf: DVS Media, 2010, S. 161–166
- [36] NOWOTTNICK, M.; NOVIKOV, A.; TRODLER, J.: Processing and Reliability of Low-Silver-Alloys. In: Surface Mount Technology Association (Hrsg.): SMTA International 2009 Proceedings; 4. - 8. Oktober 2009 in San Diego, 2009



- [37] N. N.: Kurzportraits wichtiger Metalle. URL <https://www.muenchen.ihk.de/de/innovation/Anhaenge/kurzportraits-ueber-wichtige-metalle.pdf> – Überprüfungsdatum 07.06.2016
- [38] DEHIO, J.: Ressourcen an Gold und Silber - so lange reichen sie noch. URL <https://www.goldsilbershop.de/ressourcen-gold-silber.html> – Überprüfungsdatum 04.11.2016
- [39] N. N.: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. URL [http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwiprojektberichte/PB\\_Mineralische-Rohstoffe.pdf](http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwiprojektberichte/PB_Mineralische-Rohstoffe.pdf) – Überprüfungsdatum 07.06.2016
- [40] SUBRAMANIAM, K. N. (Hrsg.): Lead-free solders: Materials reliability for electronics. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012
- [41] STICH, A.; LANG, K.-J.: Weitere Hinweise zum bleifrei Reflow-Löten von LEDs: Application Note. URL [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00102652\\_o.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00102652_o.pdf)/Zus – Überprüfungsdatum 19.07.2016
- [42] IPC-7095C: Design and Assembly Process Implementation for BGAs, 2013
- [43] DIN EN 61191-6:2011-01: Elektronikaufbauten auf Leiterplatten - Teil 6: Bewertungskriterien für Hohlräume in Lötverbindungen von BGA und LGA und Messmethode (IEC 61191-6:2010), 2010
- [44] WOHLRABE, H.: Analyse von Einflussgrößen zur Minimierung von Voids beim Reflowlöten. In: Weichlöten: Forschung & Praxis für die Elektronikfertigung; 10. Februar 2009 in Hanau. Düsseldorf: DVS Media, 2009, S. 10–17
- [45] ALBRECHT, H.-J.: Fehlermechanismen und Prüfverfahren miniaturisierter Lötverbindungen: Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojekts nanoPAL: Zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechnik für die Charakterisierung von nanoskaligen Alterungsmechanismen an hochminiaturisierten Lötverbindungen im Rahmenkonzept "Forschung für die Produktion von morgen", BMBF Förderkennzeichen 02PG2300 - 02PG2308. 1. Auflage. Templin: Detert, 2009

- [46] GSCHOHSMANN, W.; SMETANA, W.; FLEISCHER, W.: Pore formation in lead-free solders on Cu- and Ag-metallization. In: 28th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 19. - 20. Mai 2005 in Wien Austria, 2005, S. 265–271
- [47] EWALD, T. D.; HOLLE, N.; WOLTER, K.-J.: Void Formation During Reflow Soldering. In: IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 29. Mai - 1. Juni 2012 in San Diego, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2012, S. 1677–1683
- [48] ESFANDYARI, A.; SYED-KHAJA, A.; LANDSKRONE, T.; FRANKE, J.: An Exergy-Based Analysis of Temperature Profiles for an Over-Pressure Reflow Oven Technology. In: International Mechanical Engineering Congress and Exposition (ASME 2015); 13. November 2015 in Houston, USA.
- [49] ECHEVERRIA, G.; SANTOS, D.: Effect of Lead-Free Assembly Processing on Solder Joint Voiding. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.544.7879&rep=rep1&type=pdf> – Überprüfungsdatum 20.07.2016
- [50] WOHLRABE, H.; HERZOG, T.; WOLTER, K.-J.: Optimization of SMT solder joint quality by variation of material and reflow parameters. In: 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference in Greenwich, 2008, S. 1185–1192
- [51] LIN, W.: The Void-free Reflow Soldering of BGA with Vacuum. In: 8th International Conference on Electronic Packaging Technology; 14. - 17. August 2007 in Shanghai, China, 2007, S. 1–5
- [52] DIEHM, R.; NOWOTTNICK, M.; PAPE, U.: Porenfreie Löttechnologie - Eine Alternative zum Vakuum. In: SMT, 2012, S. 20–24
- [53] LADANI, L.: Damage Initiation and Evolution in Voided and Unvoided Lead Free Solder Joints Under Cyclic Thermomechanical Loading. Maryland, USA, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering: Dissertation, 2006
- [54] WILKE, K.: Einfluss von Voids auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen. In: Weichlöten: Forschung & Praxis für die Elektronikfertigung; 10. Februar 2009 in Hanau. Düsseldorf: DVS Media, 2009, S. 18–26

- [55] BRAUN, A.; KOCK, M.: Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik für Leistungsmodule. In: Weichlöten: Forschung & Praxis für die Elektronikfertigung; 10. Februar 2009 in Hanau. Düsseldorf: DVS Media, 2009, S. 5–11
- [56] SCHWARZER, C.: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC - AWZ Ressourceneffizienz an der Hochschule Aschaffenburg, 2016
- [57] SCHWERZ, R.; MEYER, S.; ROELLIG, M.; MEIER, K.; WOLTER, K.-J.: Finite element modeling on thermal fatigue of BGA solder joints with multiple voids. In: 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) in Trstanska Lomnica, Slovakia, 2011, S. 380–385
- [58] LADANI, L. J.; DASGUPTA, A.: Damage Initiation and Propagation in Voided Joints: Modeling and Experiment. In: Journal of Electronic Packaging, 2008
- [59] YU, Q.; SHIBUTANI, T.; KOBAYASHI, Y.; SHIRATORI, M.: The Effect of Voids on Thermal Reliability of BGA Lead Free Solder Joint and Reliability Detecting Standard. In: Thermal and Thermomechanical 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems (ITHERM 2006); 30. Mai - 2. Juni in San Diego, USA, 2006, S. 1024–1030
- [60] YUNUS, M.; PRIMAVERA, A.; SRIHARI, K.; PITARRRESI, J. M.: Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints. In: Twenty Sixth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium; 2. - 3. Oktober 2000 in Santa Clara, USA, 2000, S. 207–213
- [61] WICKHAM, M.; DUSEK, M.; ZOU, L.: Effect of Voiding on Lead-Free Reliability (NPL report DEPC-MPR). 2005
- [62] HERZOG, T.; WOLTER, K.-J.; POETZSCH, F.: Investigations of void forming and shear strength of Sn<sub>42</sub>Bi<sub>58</sub> solder joints for low cost applications. In: 53rd Electronic Components and Technology Conference; 27. - 30. Mai 2003 in New Orleans, USA, 2003, S. 1738–1745
- [63] GROSS, D.; SEELIG, T.: Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikromechanik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011

- [64] RAUER, M.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: The effect of thermal stress on the reliability of low Ag solder joints in high-power LEDs. In: IMAPS / EMPC (Hrsg.): European Microelectronics Packaging Conference (EMPC); 14. -16. September in Friedrichshafen, Germany, 2015
- [65] LIU, J.: Reliability of microtechnology: Interconnects, devices, and systems. New York, London: Springer, 2011
- [66] SCHOTT, G. (Hrsg.): Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit: 19 Tabellen. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1997
- [67] HERING, E.; MARTIN, R.; STOHRER, M.: Taschenbuch der Mathematik und Physik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [68] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G.: Fundamentals of materials science and engineering. Hoboken, NJ: Wiley, 2013
- [69] ANDERSSON, C.; ANDERSSON, D. R.; TEGEHALL, P.-E.; Johan Liu: Effect of different temperature cycle profiles on the crack propagation and microstructural evolution of lead free solder joints of different electronic components. In: Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE 2004); 10. - 12. Mai 2004 in Brussels, Belgium, 2004, S. 455-464
- [70] ANDERSSON, C.; Peng Sun; LIU, J.: Low cycle fatigue of Sn-based lead-free solder joints and the analysis of fatigue life prediction uncertainty. In: Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis in Shanghai, China, 2006, S. 272-279
- [71] SHANG, J. K.; ZENG, Q. L.; ZHANG, L.; ZHU, Q. S.: Mechanical fatigue of Sn-rich Pb-free solder alloys. In: Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2006, S. 211-227
- [72] SCHUBERT, A.; DUDEK, R.; WALTER, H.; JUNG, E.; GOLLHARDT, A.; MICHEL, B.; REICHL, H.: Reliability assessment of flip-chip assemblies with lead-free solder joints. In: 52nd Electronic Components and Technology Conference; 28. - 31. Mai 2002 in San Diego, USA, 2002, S. 1246-1255
- [73] XU, P.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; FRANKE, J.: Simulation-aided analysis of the influence of voids on the reliability of solder-joints for LED-applications. In: 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC) in Grenoble, France, 2016, S. 1-5

- [74] KEßLER, U.; SCHÖBER, M.: Simulationsunterstützte Auslegung von Kontaktelementen zur SMT-kompatiblen Montage von 3D-MID Packages auf Leiterplatten, 2011
- [75] FIX, A. R.; NÜCHTER, W.; WILDE, J.: Microstructural changes of lead-free solder joints during long-term ageing, thermal cycling and vibration fatigue. In: Soldering & Surface Mount Technology, 2008, S. 13–21
- [76] SCHRECK, T.; SCHNORPFEIL, A.; KALOUDIS, M.: Analysing the growth of intermetallic compounds in lead-free solder joints by differential scanning calorimetry measurements. In: Journal of Materials Science, 2013, S. 2479–2484
- [77] HO, Y. P.; LUO, J. T.; HSU, K.; CHEN, A.: Reliability test and IMC investigation of lead and lead free solder joints on different surface finish processes. In: 4th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT) in Taipei, Taiwan, 2009, S. 637–640
- [78] PARK, Y.-S.; KWON, Y.-M.; MOON, J.-T.; LEE, Y.-W.; LEE, J.-H.; PAIK, K.-W.: Effects of fine size lead-free solder ball on the interfacial reactions and joint reliability. In: Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) in Las Vegas, USA, 2010, S. 1436–1441
- [79] RATCHEV, P.; VANDEVELDE, B.; DEWOLF, I.: Reliability and Failure Analysis of Sn-Ag-Cu Solder Interconnections for PSGA Packages on Ni/Au Surface Finish. In: IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2004, S. 5–10
- [80] N. N.: Jahresbericht 2014 Bayerische Forschungstiftung. München, 2015
- [81] N. N.: Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier. URL <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier> – Überprüfungsdatum 25.11.2016
- [82] IT Wissen: Power LED. URL <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Power-LED-power-LED.html> – Überprüfungsdatum 25.11.16

- [83] N. N.: Cree® XLamp® XP-E LEDs. URL <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampXPE.pdf> – Überprüfungsdatum 14.07.2016
- [84] N. N.: OSRON MX ECE LUW CN7N. URL [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00181144\\_o.pdf/LUW%20CN7N%20-%20OSRON%20MX%20ECE.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00181144_o.pdf/LUW%20CN7N%20-%20OSRON%20MX%20ECE.pdf) – Überprüfungsdatum 14.07.2016
- [85] AMRHEIN, F.; BOCHTLER, U.; HELLMANN, R.; KALOUDIS, M.; KALOUMENOS, M.: Vergleich der thermischen Eigenschaften unterschiedlicher Insulated Metal Substrate (IMS). In: PLUS, 2010, S. 1758–1763
- [86] HEINZ, B.: Insulated Metal Substrate (IMS) im Porträt: Webinar am 2. Februar 2016. URL [https://www.we-online.de/web/de/index.php/show/media/04\\_leiterplatte/2016\\_2/webinare\\_5/praesentationen\\_7/160202\\_WE\\_CBT\\_Insulated\\_Metal\\_Substrate\\_IMS\\_im\\_Portraet.pdf](https://www.we-online.de/web/de/index.php/show/media/04_leiterplatte/2016_2/webinare_5/praesentationen_7/160202_WE_CBT_Insulated_Metal_Substrate_IMS_im_Portraet.pdf) – Überprüfungsdatum 12.09.16
- [87] SCHMIDT, R.: Zuverlässigkeitsbetrachtungen der Leiterplattenoberfläche chemisch NiP/Au (49. Treffen des sächsischen Arbeitskreises Elektronik-Technologie). 2007
- [88] N. N.: Thermal Clad® Technical Data MP-06503 (MULTI-PURPOSE). URL [http://www.bergquistcompany.com/pdfs/dataSheets/PDS\\_MP\\_1113.pdf](http://www.bergquistcompany.com/pdfs/dataSheets/PDS_MP_1113.pdf) – Überprüfungsdatum 14.07.2016
- [89] N. N.: Herausforderung Nutzentrennen. In: productronic, 2002
- [90] N. N.: Product Overview: Heraeus Electronics - Assembly Materials: Automotive & Industrial. URL [https://www.heraeus.com/media/media/het/doc\\_het/products\\_and\\_solutions\\_het\\_documents/solder\\_materials\\_docs/Brochure\\_Automotive\\_and\\_Industrial.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/solder_materials_docs/Brochure_Automotive_and_Industrial.pdf) – Überprüfungsdatum 05.01.2017
- [91] HANCE, W. B.; LEE, N. C.: Voiding Mechanisms in SMT. In: Soldering & Surface Mount Technology, 1993, S. 16–21
- [92] LANG, K.-J.; STICH, A.: Processing of SMD LEDs - Application Note. URL [http://www.osram-os.com/Graphics/XPico/00091433\\_o.pdf/Proces-sing%20of%20SMD%20LEDs.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPico/00091433_o.pdf/Proces-sing%20of%20SMD%20LEDs.pdf) – Überprüfungsdatum 14.12.16
- [93] NEUBAUER, C.: Intelligent X-ray inspection for quality control of solder joints. In: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C, 1997, S. 111–120

- [94] RAUER, M.; VOLKERT, A.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: Computed-Tomography-Based Analysis of Voids in SnBi<sub>57</sub>Ag<sub>1</sub> Solder Joints and Their Influence on the Reliability. In: Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014, S. 272–281
- [95] CASON, M.; ESTRADA, R.: Application of X-Ray MicroCT for non-destructive failure analysis and package construction characterization. In: 18th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA 2011) in Incheon, Korea (South), 2011, S. 1–6
- [96] HE, Z.; WEN, Q.; HUANG, X.: Inspection of miniaturised inter-connections in IC packages with nanofocus X-ray tubes and nanoCT. In: High Density Packaging (ICEPT-HDP); 9. - 12. Dezember 2008 in Beijing, China, 2008, S. 996–1001
- [97] RAUER, M.; XU, P.; REINHARDT, A.; KALOUDIS, M.; FRANKE, J.: Einfluss von Poren in Lötverbindungen bei LED-Anwendungen: Influence of Voids in Solder Joints for LED-Applications. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2016: Multifunktionale Baugruppen - Leistungsdichte am Limit? 8. DVS/GMM-Tagung, 16. - 17. Februar 2016 in Fellbach. Berlin: VDE-Verlag, 2016, S. 135–139
- [98] OPPERMAN, M.; ZERNA, T.; WOLTER, K.-J.: X-ray computed tomography on miniaturized solder joints for nano packaging. In: 11th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC) in Singapore, 2009, S. 70–75
- [99] RAUER, M.; SCHRECK, T.; KALOUDIS, M.: X-Ray Computed Tomography as Supporting Technology in The Failure Analysis of Press-In Connections for Electronic Assemblies. In: Practical Metallography, 2013, S. 205–221
- [100] AMRHEIN, S.; VOLKERT, A.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Tutorial: Untersuchungen elektronischer Bauelemente mit Hilfe industrieller Röntgencomputertomographie auf der SMT Hybrid Packaging; 16. - 18. April 2013 in Nürnberg
- [101] RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Hinter der Fassade - Ausfallanalyse an einem Lithium-Ionen-Akkumulator mittels CT. In: Qualität und Zuverlässigkeit, 2013

- [102] CATY, O.; BUFFIERE, J.-Y.; MAIRE, E.; ADRIEN, J.: 3D Characterization of the Influence of Porosity on Fatigue Properties of a Cast Al Alloy. In: *Advanced Engineering Materials*, 2011, S. 194–198
- [103] YOUSSEF, Y. M.; CHAIJARUWANICH, A.; HAMILTON, R. W.; NAGAUMI, H.; DASHWOOD, R. J.; LEE, P. D.: X-ray microtomographic characterisation of pore evolution during homogenisation and rolling of Al–6Mg. In: *Materials Science and Technology*, 2013, S. 1087–1093
- [104] SIDDIQUE, S.; IMRAN, M.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; WYCISK, E.; EMMELMANN, C.; WALTHER, F.: Computed tomography for characterization of fatigue performance of selective laser melted parts. In: *Materials & Design*, 2015, S. 661–669
- [105] UHLMANN, N.; NACHTRAB, F.; SALAMON, M.; BURTZLAFF, S.; FUCHS, T.; HANKE, R.: High resolution applications in nondestructive testing. In: *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging conference (NSS/MIC)*, 2008, S. 511–514
- [106] AMRHEIN, S.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Characterization of Computer Tomography Scanners Using the Probability of Detection Method. In: *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, S. 643–650
- [107] RAUER, M.; VOLKERT, A.; AMRHEIN, S.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: Die Charakterisierung von Poren in Weichlötverbindungen mittels Computertomographie vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen. In: CHRIST, H.-J. (Hrsg.): *Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis; Tagung Werkstoffprüfung 28. - 29. November 2013 in Neu-Ulm, Germany*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2013, S. 343–348
- [108] DRESSLER, K.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; DAUWE, S.; HERGUTH, A.; HAHN, G.: Nondestructive Characterization of Voids in Rear Local Contacts of PERC-Type Solar Cells. In: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, S. 70–76
- [109] BUZUG, T. M.: *Computed tomography: From photon statistics to modern cone-beam CT*. Berlin: Springer-Verlag, 2010
- [110] HSIEH, J.: *Computed tomography: Principles, design, artifacts, and recent advances*. Hoboken, NJ, Bellingham, Wash.: Wiley Interscience; SPIE Press, 2009



- [111] KASPERL, S.; HILLER, J.: Artefaktkorrekturen beim dimensionellen Messen mit industrieller Röntgen-Computertomographie. In: tm - Technisches Messen, 2009
- [112] HILLER, J.; FUCHS, T. O. J.; KASPERL, S.; REINDL, L. M.: Einfluss der Bildqualität röntgentomographischer Abbildungen auf Koordinatenmessungen: Grundlagen, Messungen und Simulationen. In: tm - Technisches Messen, 2011, S. 334-347
- [113] SACKEWITZ, M. (Hrsg.): Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik: Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015
- [114] STOCK, S. R.: MicroComputed tomography: Methodology and applications. Boca Raton, Fla.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009
- [115] BOSSI, R. H. (Hrsg.); IDDINGS, F. A. (Hrsg.); WHEELER, G. C. (Hrsg.): Nondestructive testing handbook. Columbus, Ohio: ASNT, 2002
- [116] BARTSCHER, M.; HILPERT, U.; NEUSCHAEFER-RUBE, U.: Industrielle Computertomographie auf dem Weg zur Koordinatenmesstechnik. In: Physikalisch-technische Bundesanstalt (Hg.)– PTB-Mitteilungen 117, 2007, S. 397-406
- [117] OPPERMAN, M.; ZERNA, T.; WOLTER, K.-J.: X-ray computed tomography for nano packaging - a progressive NDE method. In: 12th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2010) in Singapore, 2010, S. 853-858
- [118] Volume Graphics: VGStudio MAX 2.1. URL <http://www.volumegraphics.com/de/produkte/vgstudio-max/grundfunktionen/> – Überprüfungsdatum 15.07.2016
- [119] STOCKER, T.; OECKL, S.; WENZEL, T.; BEHRENDT, R.: Einsatz neuer Technologien zur automatischen Inline-Inspektion: Prüfung von Leicht-metallgussteilen mit der Inline-Röntgentechnik. In: Giesserei-Erfahrungs-austausch, 2011, S. 27-29
- [120] BERGER, M.: Test- und Prüfverfahren in der Elektronikfertigung: Vom Arbeitsprinzip bis Design-for-Test-Regeln. Berlin: VDE-Verlag, 2012
- [121] N. N.: Durchblick in der Fertigung - Flächendeckende 3D-Röntgen-Inspektion im Linientakt. In: Elektronik Information, 2009, S. 46-48
- [122] N. N.: VGStudio MAX 2.1 Handbuch

- [123] ADUNKA, F.: Messunsicherheiten: Theorie und Praxis. Essen: Vulkan-Verlag, 2007
- [124] IPC-9701: Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments, 2002
- [125] PERKINS, A. E.; SITARAMAN, S. K.: Solder Joint Reliability Prediction for Multiple Environments. Berlin: Springer US, 2009
- [126] N. N.: Cree® LED Lamp Reliability Test Standard. URL [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/HB/Application%20Notes/LED\\_Lamp\\_Reliability\\_Test\\_Standard.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/HB/Application%20Notes/LED_Lamp_Reliability_Test_Standard.pdf) – Überprüfungsdatum 01.02.2017
- [127] SPAHR, M.; KREITLEIN, S.; HAAS, R.; JAUMANN, A.; GLASEL, T.; SPRENG, S.; FRANKE, J.: Application and comparison of analytic accelerated test-models for lifetime prediction of a novel contacting method. In: 62nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), 2016, S. 94–99
- [128] CHAN, Y. S.; LEE, S. W. R.: Detailed investigation on the creep damage accumulation of lead-free solder joints under accelerated temperature cycling. In: Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2010, S. 1–6
- [129] LIU, C.; BREM, F.; RIEDEL, G.; EICHELBERGER, E.; HOFMANN, N.: The influence of thermal cycling methods on the interconnection reliability evaluation within IGBT modules. In: 4th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC) in Amsterdam, Netherlands, 2012, S. 1–5
- [130] LAU, J.; DAUKSHER, W.: Effects of Ramp-Time on the Thermal-Fatigue Life of SnAgCu Lead-Free Solder Joints. In: 55th Electronic Components and Technology Conference; 31. Mai - 3. Juni 2005 in Lake Buena Vista, USA, 2005, S. 1292–1298
- [131] FAN, X.; RASIER, G.; VASUDEVAN, V. S.: Effects of Dwell Time and Ramp Rate on Lead-Free Solder Joints in FCBGA Packages. In: 55th Electronic Components and Technology Conference: 31. Mai - 3. Juni 2005 in Lake Buena Vista, USA, 2005, S. 901–906
- [132] BÜRCEL, R.; RICHARD, H. A.; RIEMER, A.: Werkstoffmechanik: Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014

- [133] Ilho Kim; Soon-Bok Lee: Reliability and Failure Analysis of Lead-Free Solder Joints for PBGA Package Under a Cyclic Bending Load. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, S. 478–484
- [134] DIN EN 62137-1-2: Oberflächenmontage-Technik - Verfahren zur Prüfung auf Umgebungseinflüsse und zur Prüfung der Haltbarkeit von Oberflächen-Lötverbindungen - Teil 1-2: Scherfestigkeitsprüfung (IEC 62137 -1-2:2007), 2007
- [135] PAPULA, L.: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Mit Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel. Wiesbaden: Vieweg, 2003
- [136] IEC 60810: Lamps for road vehicles – Performance requirements, 2014
- [137] JESD22-A104B: Temperature Cycling, 2000
- [138] VANDEVELDE, B.; ZANON, F.; GRIFFONI, A.; LI, X.; WILLEMS, G.; MENEGHINI, M.: Impact of solder-joint tilting on the reliability of LED-based PCB assemblies: A combined experimental and FEM analysis. In: 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (Euro SimE) in Budapest, Hungary, 2015, S. 1–4
- [139] ANDERSSON, C.; TEGEHALL, P.-E.; ANDERSSON, D. R.; WETTER, G.; Johan Liu: Thermal Cycling Aging Effect on the Shear Strength, Microstructure, Intermetallic Compounds (IMC) and Crack Initiation and Propagation of Reflow Soldered Sn-3.8Ag-0.7Cu and Wave Soldered Sn-3.5Ag Ceramic Chip Components. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, S. 331–344
- [140] REID, M.; PUNCH, J.; COLLINS, M.; RYAN, C.: Effect of Ag content on the microstructure of Sn - Ag - Cu based solder alloys. In: Soldering & Surface Mount Technology, 2008, S. 3 – 8
- [141] ELGER, G.; KANDASWAMY, S. V.; DERIX, R.; CONTI, F.: Detection of Solder Joint Cracking of High Power LEDs on Al-IMS During Temperature Shock Test by Transient Thermal Analysis. In: 2014 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC): 24 - 26 Sept. 2014, Greenwich, London, UK. Piscataway, NJ: IEEE, 2014

- [142] MIL-STD-202G: Test Method Standard: Electronic and Electrical Component Parts, 2002
- [143] MIL-STD-883J: Department of Defense Test Method Standard: Microcircuits, 2014
- [144] MAREK, R.; NITSCHKE, K.: Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen; Anwendungen; Übungsaufgaben. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2015
- [145] JESD22-A122: Power Cycling, 2007
- [146] N. N.: Solder-Point Temperature Measurement of Cree® XLamp® LEDs: Application Note. URL [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Appli-cation%20Notes/Solder\\_Point\\_Temp.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Appli-cation%20Notes/Solder_Point_Temp.pdf) – Überprüfungsdatum 23.08.2016
- [147] MUELLER, M.; FRANKE, J.: High performance accelerated test methods for reliability and life time analyses of power electronic packages. In: IEEE 17th Electronics Packaging, 2015, S. 1–5
- [148] JESD22-A105C: Power and Temperature Cycling, 2004
- [149] AEC-Q200-005: Board Flex Test, 2010
- [150] JESD22-B113: Board Level Cyclic Bend Test Method for Interconnect Reliability Characterization of Components for Handheld Electronic Products, 2006
- [151] CHEN, S.; SUN, P.; WEI, X.; CHENG, Z.; LIU, J.: Studies of Solder Joint Reliability under Mechanical Bending Test on FR-4 PCBs with Sn-4.0Ag-0.5Cu Solder Paste. In: International Symposium on High Density Design Packaging and Microsystem Integration, 2007, S. 1–6
- [152] PARK, J.: Effects of test conditions on bending impact of lead free solder. In: European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2009); 15. - 18. Juni 2009 in Rimini. Piscataway, NJ: IEEE, 2009
- [153] HOVINGH, K.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Lötverbindungen von Hochleistungs-LEDs unter mechanischer Belastung. Bachelorarbeit. 27.0616

- [154] SCHIMANSKI, H.: Einfluss des Lotpastendrucks auf die Zuverlässigkeit der Lötstellen kritischer keramischer SMD-Komponenten auf FR4-Leiterplatten: Abschlussbericht AiF-Vorhaben Nr. 17.405N. 2015
- [155] MATHIAK, F.: Die Methode der finiten Elemente (FEM) - Einführung und Grundlagen. URL [http://www.mechanik-info.de/dokumente/Skript\\_FEM.pdf](http://www.mechanik-info.de/dokumente/Skript_FEM.pdf) – Überprüfungsdatum 23.09.16
- [156] STEINBUCH, R.: Finite Elemente - Ein Einstieg. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998
- [157] KLEIN, B.: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau; mit 12 Fallstudien und 19 Übungsaufgaben. Wiesbaden: Vieweg, 2005
- [158] DÜMIG, S.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Simulation des thermischen Verhaltens von Leistungselektronikmodulen mittels der Finite-Elemente-Methode. Masterarbeit. 25.03.15
- [159] WILDE, J.; ZUKOWSKI, E.; DEIER, E.: Simulation in der Aufbau- und Verbindungstechnik. In: SCHEEL, W. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen: Aufbau- und Fertigungstechnik; die Trends von heute - die Chancen von morgen; DVS/GMM-Fachtagung vom 4. bis 5. Februar 2004 in Fellbach. Berlin: VDE-Verlag, 2004, S. 109-116
- [160] N. N.: Multiphysics Software Product Suite. URL <https://www.comsol.com/products> – Überprüfungsdatum 23.09.2016
- [161] Euronorm 123-75: Versuche bei hoher Temperatur Zeitstandversuch an Stahl, 1975
- [162] XU, P.; et al.: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), 2016
- [163] SYED, A.: Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints. In: 54th Electronic Components and Technology Conference; 1. - 4 Juni 2004 in Las Vegas, USA, 2004, S. 737-746
- [164] ZUKOWSKI, E.: Probabilistische Lebensdauermodelle für thermomechanische Ermüdung von Lötverbindungen in CSP-Bauelementen. 2014
- [165] N. N.: Thermal Fatigue of a Surface Mount Resistor. URL [https://www.comsol.de/model/download/323401/models.fatigue.surface\\_mount\\_resistor.pdf](https://www.comsol.de/model/download/323401/models.fatigue.surface_mount_resistor.pdf) – Überprüfungsdatum 03.01.2017

- [166] WILDE, J.; DALIN, J.: Zuverlässigkeit bleifrei gelöteter Leistungsbau-  
gruppen. 2007
- [167] YUAN, W.; ALTIERI-WEIMAR, P.: Modeling of LED solder joint crack-  
ing during temperature cycling with Finite Element. In: 16th Inter-  
national Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics  
Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems  
(EuroSimE) in Buda-pest, Hungary, 2015, S. 1–5
- [168] LIU, E.; ANKIT, B. R.; ELGER, G.: Assessment of assembly quality  
of Chip scale Package LEDs on insulated metal substrate. In: 17th  
International Conference on Electronic Packaging Technology  
(ICEPT) in Wuhan, China, 2016, S. 119–124
- [169] NOWOTNICK, M.; PAPE, U.; DIEHM, R.: Porenfrei Löten: Löttechno-  
logie für die Leistungselektronik. In: productronic, 2007, S. 64–67
- [170] IPC-7525B: Stencil Design Guidelines, 2011
- [171] ZHU, Y.; LI, X.; GAO, R.; WANG, C.: Investigate influence of solder  
thickness on the fatigue failure behavior of solder joint under  
high temperature. In: 15th International Conference on Electronic  
Packaging Technology (ICEPT) in Chengdu, China, 2014,  
S. 940–944
- [172] HAYASHI, K.; IZUTA, G.; MURAKAMI, K.; UEGAI, Y.; TAKAO, H.:  
Improvement of fatigue life of solder joints by thickness control  
of solder with wire bump technique [power modules]. In: 52nd  
Electronic Components and Technology Conference; 28. - 31. Mai  
2002 in San Diego, USA, 2002, S. 1469–1474
- [173] N. N.: Cree® XLamp® LED Long-Term Lumen Maintenance. URL  
[http://www.cree.com/~media/Fi-  
les/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLam  
p%20Application%20Notes/XLamp\\_lumen\\_maintenance.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_lumen_maintenance.pdf) –  
Überprüfungsdatum 14.12.2016
- [174] CHONKO, J.: Using Forward Voltage to Measure Semiconductor  
Junction Temperature. URL  
[https://www.newark.com/wcsstore/ExtendedSitesCatalogAs-  
setStore/cms/asset/images/americas/common/storefront/keith-  
ley\\_instruments/Forward\\_Voltage\\_Measures.pdf](https://www.newark.com/wcsstore/ExtendedSitesCatalogAssetStore/cms/asset/images/americas/common/storefront/keithley_instruments/Forward_Voltage_Measures.pdf) – Überprüfungs-  
datum 09.12.2016

- [175] N. N.: Cree® XLamp® LEDs - Testing and Characterization. URL [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/XLamp-Application-Notes/XLamp\\_Test\\_Cal.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/XLamp-Application-Notes/XLamp_Test_Cal.pdf) – Überprüfungs-datum 09.12.2016
- [176] STINY, L.: Fertigung und Test elektronischer Baugruppen: Technologie; Fertigungskonzepte; Prüftechnik. Konstanz: Christiani, 2010
- [177] HÄRTER, S.; KLINGER, T.; FRANKE, J.; BEER, D.: Comprehensive correlation of inline inspection data for the evaluation of defects in heterogeneous electronic assemblies. In: Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), 2016, S. 1–6
- [178] BERNDT, D. (Hrsg.); BAUER, N. (Hrsg.): Leitfaden zu praktischen Anwendungen der Bildverarbeitung. Erlangen: Fraunhofer-Allianz Vision, 2002
- [179] N. N.: Comsol Multiphysics: Datenbank, 2016
- [180] Young-Bae Kim; NOGUCHI, H.; AMAGAI, M.: Vibration fatigue reliability of BGA-IC package with Pb-free solder and Pb-Sn solder. In: 53rd Electronic Components and Technology Conference; 27. - 30. Mai 2003 in New Orleans, USA, 2003, S. 891–897
- [181] DARVEAUX, R.; REICHMAN, C.: Solder Alloy Creep Constants for Use in Thermal Stress Analysis. In: SMTA Journal, 2013, S. 11–20

## **Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen**

- [P1] RAUER, M.; SCHRECK, T.; KALOUDIS, M.: X-Ray Computed Tomography as Supporting Technology in The Failure Analysis of Press-In Connections for Electronic Assemblies. In: Practical Metallography, 2013, S. 205–221
- [P2] AMRHEIN S.; KALOUDIS M.; RAUER M.: Systematic Evaluation of CT Scanners (Poster), 5th European-American Workshop on Reliability of NDE, 07. - 10.10.2013, Berlin
- [P3] RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Hinter der Fassade - Ausfallanalyse an einem Lithium-Ionen-Akkumulator mittels CT. In: Qualität und Zuverlässigkeit, 2013
- [P4] RAUER, M.; VOLKERT, A.; AMRHEIN, S.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: Die Charakterisierung von Poren in Weichlötverbindungen mittels Computertomographie vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen. In: CHRIST, H.-J. (Hrsg.): Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis; Tagung Werkstoffprüfung 28. - 29. November 2013 in Neu-Ulm, Germany. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2013, S. 343–348
- [P5] AMRHEIN, S.; VOLKERT, A.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Tutorial: Untersuchungen elektronischer Bauelemente mit Hilfe industrieller Röntgencomputertomographie auf der SMT Hybrid Packaging; 16. - 18. April 2013 in Nürnberg
- [P6] AMRHEIN, S.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Characterization of Computer Tomography Scanners Using the Probability of Detection Method. In: Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, S. 643–650
- [P7] RAUER, M.; VOLKERT, A.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: Computed-Tomography-Based Analysis of Voids in SnBi<sub>57</sub>Ag<sub>1</sub> Solder Joints and Their Influence on the Reliability. In: Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014, S. 272–281
- [P8] DRESSLER, K.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; DAUWE, S.; HERGUTH, A.; HAHN, G.: Non-destructive Characterization of Voids in Rear Local Contacts of PERC Type Solar Cells, 5th Workshop on Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells, 20.10.2014
- [P9] SIDDIQUE, S.; IMRAN, M.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; WYCISK, E.; EMMELMANN, C.; WALTHER, F.: Computed tomography for characterization of fatigue performance of selective laser melted parts. In: Materials & Design, 2015, S. 661–669



- [P10] DRESSLER, K.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; DAUWE, S.; HERGUTH, A.; HAHN, G.: Nondestructive Characterization of Voids in Rear Local Contacts of PERC-Type Solar Cells. In: IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, S. 70–76
- [P11] RAUER, M.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: The effect of thermal stress on the reliability of low Ag solder joints in high-power LEDs. In: IMAPS / EMPC (Hrsg.): Euro-pean Micro-electronics Packaging Conference (EMPC); 14. -16. September in Friedrichs-hafen, Germany, 2015
- [P12] RAUER, M.; XU, P.; REINHARDT, A.; KALOUDIS, M.; FRANKE, J.: Einfluss von Poren in Lötverbindungen bei LED-Anwendungen: Influence of Voids in Solder Joints for LED-Applications. In: LANG, K.-D. (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL 2016: Multi-funktionale Baugruppen - Leistungsdichte am Limit? 8. DVS/GMM-Tagung, 16. - 17. Februar 2016 in Fellbach. Berlin: VDE-Verlag, 2016, S. 135–139
- [P13] XU, P.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.; FRANKE, J.: Simulationaided analysis of the influence of voids on the reliability of solder-joints for LED-applications. In: 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC) in Grenoble, France, 2016, S. 1–5

### **Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten\***

- [S1] SPARN, J.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Simulation der thermischen Belastung einer elektronischen Baugruppe mittels der Finite-Elemente-Methode zur Bewertung ihrer Zuverlässigkeit. Bachelorarbeit (2013), Aschaffenburg
- [S2] DÜMIG, S.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Simulation des thermischen Verhaltens von Leistungselektronikmodulen mittels der Finite-Elemente-Methode. Masterarbeit (2015), Aschaffenburg
- [S3] HOVINGH, K.; RAUER, M.; KALOUDIS, M.: Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Lötverbindungen von Hochleistungs-LEDs unter mechanischer Belastung. Bachelorarbeit (2016), Aschaffenburg

---

\* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 10/2018):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://www.mb.fau.de/diss/)

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger  
Innovationspotentiale in der  
rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme  
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe  
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität  
automatisierter Montagesysteme  
durch Sensorintegration und erweiterte  
Steuerungskonzepte  
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
Projektierung von Montagesystemen  
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter  
Nutzungsgradsteigerung von  
Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik  
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
Aufbau von Modellen zur Lageregelung  
von Industrierobotern  
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss  
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-  
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-  
schneiden  
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz  
Modell zur datenbankgestützten Planung  
automatisierter Montageanlagen  
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-  
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele  
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von  
Planungssystemen in der Produktion  
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
Technologisch orientierte  
Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik  
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.  
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer  
Verteilte Planungssysteme zur  
Flexibilitätssteigerung der  
rechnerintegrierten Teilefertigung  
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam  
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-  
feinplanung  
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen  
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines  
übereutektoiden verschleißfesten Stahls  
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.  
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann  
Untersuchungen zur Anlagen- und  
Prozeßdiagnostik für das Schneiden  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler  
Material- und Datenfluß in einer flexiblen  
Blechbearbeitungszelle  
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake  
Entwicklung eines rechnergestützten  
Diagnosesystems für automatisierte  
Montagezellen  
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel  
Optimierung der Werkzeugbereitstellung  
durch rechnergestützte  
Arbeitsfolgenbestimmung  
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller  
Modellierung und Einsatz von  
Softwaresystemen für rechnergeführte  
Montagezellen  
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende  
Untersuchungen zum Biegeumforme mit  
elastischer Matrizze  
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid  
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten  
von Keramikguß mit Industrierobotern  
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer  
Multiprozessorsteuerung für  
kooperierende Industrieroboter in  
Montagezellen  
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer  
Entwicklung problemspezifischer  
Verfahrensketten in der Montage  
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr  
Beitrag zur optimalen  
Verbindungstechnik in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief  
Untersuchungen zur Verfahrensfolge  
Laserstrahlschneiden und -schweißen  
in der Rohkarosseriefertigung  
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim  
Rechnerunterstützte Optimierung  
von Materialflußstrukturen in der  
Elektronikmontage durch Simulation  
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller  
CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von  
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer  
Integrierte Informationsverarbeitung  
bei der Montageplanung  
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann  
Entwicklung einer  
CAD/CAM-Prozesskette für die  
Herstellung von Blechbiegeteilen  
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann  
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen: Prozeßführung und  
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-  
beitung von Blechformteilen  
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel  
Flexible Werkstattsteuerung mit  
objektorientierten Softwarestrukturen  
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch  
Planungs- und Steuerungswerkzeuge  
zur impliziten Geräteprogrammierung  
in Roboterzellen  
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther  
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-  
kationsverhaltens von Automatisierungs-  
geräten in flexiblen Produktionszellen  
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless  
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel  
Entwicklung und Einsatz eines Simula-  
tionsverfahrens für operative und  
strategische Probleme der  
Produktionsplanung und -steuerung  
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann  
Operatives Fertigungscontrolling durch  
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-  
tungsabläufe in der Elektronikfertigung  
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra  
Entwicklung eines benutzerorientierten  
Werkstattprogrammiersystems für das  
Laserstrahlschneiden  
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels  
Modellierung und Optimierung von  
Montageanlagen in einem integrierten  
Simulationssystem  
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel  
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-  
der Durchgangslöcher  
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz  
Oberflächenfeinbearbeitung  
keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung  
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.  
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp  
Rechnerunterstützung bei Test und  
Schulung an Steuerungssoftware von  
SMD-Bestücklinien  
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch  
Wissensbasierte Unterstützung der  
Angebotsbearbeitung in der  
Investitionsgüterindustrie  
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp  
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim  
Schneiden mit einem gepulsten  
Nd:YAG-Laser  
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel  
Optische 3D-Konturerfassung und  
on-line Biegewinkelmessung mit  
dem Lichtschnittverfahren  
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt  
Modulares Planungssystem zur  
Optimierung der Elektronikfertigung  
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner  
Adaptive Diagnose in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann  
Beitrag zur automatisierten  
Handhabungsplanung komplexer  
Blechbiegeteile  
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf  
Zielkostenorientierte Montageplanung  
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher  
Konzept zur rechnerintegrierten  
Materialversorgung in flexiblen  
Fertigungssystemen  
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska  
Wissensbasierte Analyse und  
Klassifizierung von Blechteilen  
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke  
Integrierte Entwicklung neuer  
Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
Sensorplanung und schnelle  
Sensorregelung für Industrieroboter  
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie  
Zeitbehandlung und  
Multimedia-Unterstützung in  
Feldkommunikationssystemen  
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.  
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel  
Reengineering in der Elektro- und  
Elektronikindustrie  
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn  
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung  
mit Excimerlasern - Systemkomponenten  
und Verfahrensoptimierungen  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth  
Laserstrahlhartlöten mit  
Zweistrahlschweißtechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr  
Steuerung und Sensordatenintegration  
für flexible Fertigungszellen mit  
kooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer  
Berührungslose Formgebung mit  
Laserstrahlung  
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz  
Fertigungsqualität beim  
3D-Laserstrahlschweißen von  
Blechformteilen  
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs  
Integration elektromechanischer  
CA-Anwendungen über einem  
STEP-Produktmodell  
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm  
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6.



Band 61: Andreas Brand  
Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen  
(3D-MID)  
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf  
Regelung der Laserstrahlleistung und  
der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser  
Modulares Informationsmanagement  
in der integrierten Produkt- und  
Prozeßplanung  
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl  
Integriertes Automatisierungskonzept  
für den flexiblen Materialfluß in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto  
Transiente Prozesse beim  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl  
Erweiterte Informationsbereitstellung  
an offenen CNC-Steuerungen zur  
Prozeß- und Programmoptimierung  
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
Verbesserte Prozeßführung und  
Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim  
Spulenwickeln  
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes  
Technologieorientierte Bahnplanung  
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung  
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus  
Laserstrahlumformen von Profilen  
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer  
Adaptive Strahlführungen für  
CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber  
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler  
Schraubstationen in der  
automatisierten Montage  
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf  
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen  
in der Umformtechnik  
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke  
Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung  
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller  
Automatisierte Demontagesysteme  
und recyclinggerechte Produktgestaltung  
elektronischer Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner  
Kaltmassivumformung metallischer  
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,  
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung  
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher  
Prozeß- und Systemtechnik zum  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind  
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer  
Eigenschaften von Feinblechen mit  
dem Wirbelstromverfahren  
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard  
Qualitätssteigerung in der  
Elektronikproduktion durch  
Optimierung der Prozeßführung  
beim Löten komplexer Baugruppen  
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh  
Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und  
Entscheidungsabläufe  
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn  
Meßeinrichtung zur Untersuchung  
der Wirkflächenreibung bei umformtech-  
nischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert  
Regelung der Fokusslage beim Schweißen  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern unter  
Einsatz von adaptiven Optiken  
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo  
Development and Implementation of  
Hierarchical Control Structures of  
Flexible Production Systems Using High  
Level Petri Nets  
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt  
Effizienzsteigerung bei Demontage  
und Recycling durch flexible  
Demontagetechnologien und optimierte  
Produktgestaltung  
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz  
Modelle und effiziente Modellbildung  
zur Qualitätssicherung in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs  
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT  
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau  
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals  
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes  
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn  
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion  
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger  
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen  
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher  
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten  
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet  
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung  
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart  
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper  
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler  
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung  
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker  
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken  
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein  
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung  
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger  
Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger  
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach  
Beitrag zur rechnerunterstützten  
verursachungsgerechten  
Angebotskalkulation von Blechteilen  
mit Hilfe wissensbasierter Methoden  
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach  
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung  
der Anschlußgeometrie elektronischer  
SMT-Bauelemente  
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk  
Simulationsbasierte  
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge  
der Kaltmassivumformung  
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl  
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und  
Anlagenplanung  
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel  
Ermüdungsbruchversagen  
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle  
in der Kaltmassivumformung  
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert  
Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen  
von Blechpaaren  
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer  
Modulares Planungswerkzeug zum  
Produktionsmanagement in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.  
Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige  
Flexible Formgebung von Blechen  
durch Laserstrahlumformen  
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel  
Wissensbasierte Methoden für die  
rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer  
Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel  
Kommunikationstechnische Integration  
der Prozeßebene in Produktionssysteme  
durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter  
Verfügbarkeitssteigerung von  
Werkzeugmaschinen durch Einsatz  
mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli  
Integration lokaler CAP-Systeme in  
einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -  
Prozeßparameter und Modelle zur  
Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-  
tion neuer Bauelementetechnologien in  
die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger  
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten  
alternativer Elektroniklote in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber  
Justieren vormontierter Systeme mit dem  
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren  
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi  
Analyse und Optimierung von Montage-  
systemen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein  
Laserstrahlumformen von  
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung  
der Mikrostruktur und  
der mechanischen Eigenschaften  
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi  
Ein informationslogistisches  
Architekturkonzept zur Akquisition  
simulationsrelevanter Daten  
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch  
Rationalisierung und ergonomische  
Optimierung im Innenausbau durch  
den Einsatz moderner  
Automatisierungstechnik  
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt  
Prozeßregelung für das Laserstrahl-  
Punktschweißen in der Elektronikpro-  
duktion  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Fließpressen metallischer Kleinstteile  
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche  
Methoden zur technologieorientierten  
Programmierung für  
die 3D-Lasermikrobearbeitung  
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
Prozeßkontrolle beim  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel  
Prozeßkontrolle und -steuerung beim  
Laserstrahlschweißen mit den Methoden  
der nichtlinearen Dynamik  
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer  
Laserstrahlunterstützte Erzeugung  
metallischer Leiterstrukturen auf  
Thermoplastsubstraten für die  
MID-Technik  
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein  
Qualität laserstrahl-gefügter  
Mikroverbindungen elektronischer  
Kontakte  
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium  
für Komponenten der Optoelektronik  
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich  
Simultanes Löten von Anschlußkontak-  
ten elektronischer Bauelemente mit  
Diodenlaserstrahlung  
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann  
Erweiterung der Formgebungsgrenzen  
beim Umformen von  
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-  
satz prozessangepasster Platinen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch  
3 - D MID Technologie in der  
Automobilelektronik  
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl  
Fertigungsqualität und Umformbarkeit  
laserstrahlgeschweißter Formplatinen  
aus Aluminiumlegierungen  
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk  
Entwicklung eines konfigurierbaren  
Steuerungssystems für die flexible  
Sensorführung von Industrierobotern  
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck  
Neue Sensorik und Aktorik für  
Bearbeitungsköpfe zum  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis  
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-  
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-  
men, Trennen und Laserstrahlschweißen  
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und  
multimediale Präsentation  
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner  
Technische Umsetzung produktbezoge-  
ner Instrumente der Umweltpolitik bei  
Elektro- und Elektronikgeräten  
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier  
Strategien für einen produktorientierten  
Einsatz räumlicher spritzgegossener  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich  
Kostensimulation - Simulationsbasierte  
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer  
Produktionssysteme  
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny  
Innenhochdruck-Umformen von Blechen  
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-  
rungen bei erhöhter Temperatur  
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha  
Flexible Montageautomatisierung zur  
Komplettmontage flächenhafter Produkt-  
strukturen durch kooperierende  
Industrieroboter  
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth  
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und  
Verbindungstechnik für mechatronische  
Baugruppen  
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph  
Durchgängige simulationsgestützte  
Planung von Fertigungseinrichtungen der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah  
Simulationsbasierte Bestimmung der  
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das  
Blechbiegen  
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein  
Scherschneiden und Biegen metallischer  
Kleinstteile - Materialeinfluss und  
Materialverhalten  
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff  
Excimerlaserstrahlbiegen dünner  
metallischer Folien mit homogener  
Lichtlinie  
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach  
Rechnergestützte Anpassung von  
Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen  
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl  
System- und Prozesstechnik für das  
simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung  
von elektronischen Bauelementen  
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker  
Tribologische Eigenschaften keramischer  
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer  
Oberflächenendbearbeitung mittels  
Excimerlaserstrahlung  
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger  
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik  
durch innovative maschinenbauliche und  
regelungstechnische Ansätze  
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama  
Effizienzsteigerung in der Montage durch  
marktorientierte Montagestrukturen und  
erweiterte Mitarbeiterkompetenz  
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm  
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung  
von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung  
und Optimierung von komplexen  
Aktorsystemen in der Mikrotechnik  
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini  
Wirkmedienbasierte Blechumformung:  
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss  
von Werkstoff und Bauteilgeometrie  
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein  
Entwurf hochdynamischer Sensor- und  
Regelsysteme für die adaptive  
Laserbearbeitung  
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer  
Entwicklung prozessüberwachender  
Regelkreise für flexible  
Formgebungsprozesse  
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer  
Massivumformen metallischer Kleinstteile  
bei erhöhter Prozesstemperatur  
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann  
Strategien zur nachhaltigen Optimierung  
von Qualität und Zuverlässigkeit in  
der Fertigung hochintegrierter  
Flachbaugruppen  
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock  
Biegeumformen mit  
Elastomerwerkzeugen Modellierung,  
Prozessauslegung und Abgrenzung des  
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-218-7.



Band 156: Frank Niebling  
Qualifizierung einer Prozesskette zum  
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile  
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler  
Großserientauglichkeit trockenschmier-  
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im  
Presswerk Grundlegende Untersuchun-  
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-  
ten und Bauteilversuche  
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto  
Solution Approaches for Planning of  
Assembly Systems in Three-Dimensional  
Virtual Environments  
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger  
Hochleistungssysteme für die Fertigung  
elektronischer Baugruppen auf der Basis  
flexibler Schaltungsträger  
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz  
Laserunterstütztes Biegen höchstfester  
Mehrphasenstähle  
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl  
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des  
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-  
Umformen von Blechen  
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus  
Plattformstrategien - Realisierung  
einer varianz- und kostenoptimierten  
Wertschöpfung  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser  
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-  
lyse und -modellierung  
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-  
turen mit Aluminiumschaumkern  
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos  
Mechatronische Ansätze zur Optimie-  
rung von Vorschubachsen  
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark  
Auslegung und Fertigung hochpräziser  
Faser-Kollimator-Arrays  
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou  
Kollaboratives Engineering Management  
in der integrierten virtuellen Entwicklung  
der Anlagen für die Elektronikproduktion  
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser  
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen  
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer  
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle  
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz  
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall  
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann  
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick  
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi  
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods  
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp  
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen  
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel  
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl  
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse  
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo  
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang  
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion  
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß  
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere  
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker  
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten  
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer  
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse  
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht  
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge  
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß  
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen  
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch  
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten  
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber  
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick  
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht  
Werkstoffcharakterisierung und  
Prozessauslegung für die wirkmedienba-  
sierte Doppelblech-Umformung von  
Magnesiumlegierungen  
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl  
Stochastische Simulation zur Werkzeug-  
lebensdaueroptimierung und Präzisions-  
fertigung in der Kaltmassivumformung  
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi  
Innenhochdruck-Umformen verstärkter  
Blech-Rahmenstrukturen  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff  
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen  
beim Presshärten des höchstfesten  
Vergütungsstahls 22MnB5  
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez  
Simulationsgestützte Methoden zur  
effizienten Gestaltung von Lötprozessen  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze  
Automatisierte Montage von makrome-  
chatronischen Modulen zur flexiblen  
Integration in hybride  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter  
Grundlegende Untersuchungen zur  
experimentellen Ermittlung und zur  
Modellierung von Fließortkurven bei  
erhöhten Temperaturen  
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl  
Entwicklung, angepasste Herstellungs-  
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-  
rung von einsatzgerechten elektroni-  
schen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter  
Flüssigkeitsfilmen  
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera  
Prozesstechnische Untersuchungen  
zum Rührreibschweißen metallischer  
Werkstoffe  
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler  
Beschreibung und Modellierung  
des Werkstoffverhaltens von  
presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl  
Untersuchungen zur Erhöhung der  
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-  
druck-Umformung von flächigen Halb-  
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten  
Laserstrahlfügeoperationen  
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller  
Modellierung eines nachfrageorientierten  
Produktionskonzeptes für mobile  
Telekommunikationsgeräte  
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf  
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-  
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-  
beitsprozessen in der Elektronikproduk-  
tion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich  
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-  
mung der optischen Prozessemissionen  
beim Laserstrahltiefschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf  
Entwicklung eines agentenbasierten  
Steuerungssystems zur  
Materialflussorganisation im  
wandelbaren Produktionsumfeld  
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster  
Laserdurchstrahlenschweißen  
transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler  
Rührreibschweißen von walzplattiertem  
Halbzeug und Aluminiumblech zur  
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-  
Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt  
Seriennahe Auslegung von Aluminium  
Tailored Heat Treated Blanks  
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann  
Qualitative und quantitative Bewertung  
der Crashtauglichkeit von höchstfesten  
Stählen  
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl  
Größeneffekte bei Biegeprozessen-  
Entwicklung einer Methodik zur  
Identifikation und Quantifizierung  
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud  
Effiziente Prozesskettenauslegung für das  
Umformen lokal wärmebehandelter und  
geschweißter Aluminiumbleche  
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann  
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-  
schweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Kontaktzustand zwischen Werkstück  
und Werkzeug bei umformtechnischen  
Prozessen unter tribologischen  
Gesichtspunkten  
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer  
Entwicklung eines mesoskopischen  
Modells zur Abbildung von Größeneffek-  
ten in der Kaltmassivumformung mit  
Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner  
Konzeption produktspezifischer Lösun-  
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-  
scher Systeme gegen die Einwirkung von  
Betaung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler  
Verbindungs- und Systemtechnik für  
thermisch hochbeanspruchte und  
miniaturisierte elektronische Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti  
Strategien zur Erweiterung der Prozess-  
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-  
ung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke  
Mehrkriterielle Optimierung komplexer  
Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren  
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke  
Flexible Automatisierungslösungen für  
die Fertigung wickeltechnischer Produkte  
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam  
Optical Tissue Differentiation for  
Sensor-Controlled Tissue-Specific  
Laser Surgery  
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch  
Potenziale und Strategien zur Optimie-  
rung des Schablonendruckprozesses in  
der Elektronikproduktion  
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald  
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von  
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine  
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-  
scher Aspekte am Beispiel PEEK  
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan  
Prozesse und Systemlösungen für die  
SMT-Montage optischer Bauelemente auf  
Substrate mit integrierten Lichtwellenlei-  
tern  
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner  
Beanspruchungsangepasste  
Kaltmassivumformwerkzeuge durch  
lokal optimierte Werkzeugoberflächen  
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber  
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-  
sagens von Punktschweißverbindungen  
bei höchstfesten Stahlgüten  
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser  
Ein Ansatz zur Herstellung von  
pressgehärteten Karosseriekomponenten  
mit maßgeschneiderten mechanischen  
Eigenschaften: Temperierte Umform-  
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-  
lation und funktionale Untersuchung  
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak  
Material Adapted Design of Cold Forging  
Tools Exemplified by Powder  
Metallurgical Tool Steels and Ceramics  
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz  
Beschleunigte Simulation des  
Laserstrahlumformens von  
Aluminiumblechen  
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm  
Prozessanalyse und -überwachung des  
Laserstrahlhartlötens mittels optischer  
Sensorik  
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper  
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-  
stoffen - Umformverhalten und Grenzen  
der Biegebarkeit  
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß  
Modellbasierte Prozessauslegung für  
die Kaltmassivumformung unter  
Brücksichtigung der Werkzeug- und  
Pressenauffederung  
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth  
Analyse und Optimierung der Entwick-  
lung und Zuverlässigkeit räumlicher  
Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler  
Ganzheitliche Automatisierung  
mechatronischer Systeme in der Medizin  
am Beispiel Strahlentherapie  
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert  
Automatisiertes Laserstrahllöten  
und -reparaturlöten elektronischer  
Baugruppen  
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr  
Analyse und Beschreibung des  
mechanischen Werkstoffverhaltens  
von presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler  
Prozessdynamik beim  
Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche im Überlappstoß  
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger  
Seriennahe Auslegung der Prozesskette  
zur wärmeunterstützten Umformung  
von Aluminiumblechwerkstoffen  
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel  
Herstellung prozessangepasster  
Halbzeuge mit variabler Blechdicke  
durch die Anwendung von Verfahren  
der Blechmassivumformung  
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade  
In-vivo Monitoring of Epithelium  
Vessel and Capillary Density for the  
Application of Detection of Clinical  
Shock and Early Signs of Cancer Develop-  
ment  
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse  
Entwicklung und Qualifizierung eines  
Schneidclinchverfahrens  
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz  
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz  
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl  
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen  
technischen Diagnose  
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm  
Einfluss von Chargenschwankungen  
auf die Verarbeitungsgrenzen von  
Stahlwerkstoffen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-357-3.



Band 244: Christian Neudel  
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften  
widerstandspunktgeschweißter  
Aluminium-Stahl-Verbindungen für  
den Fahrzeugbau  
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann  
Konzept zur Beherrschung der  
Prozessschwankungen im Presswerk  
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin  
Laserbasierte Nanostrukturierung mit  
optisch positionierten Mikrolinsen  
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht  
Der Einfluss der Fertigungsverfahren  
auf die Wirbelstromverluste von  
Stator-Einzelzahnblechpaketen für den  
Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel  
Wirkmedienbasierte Umformung von  
Blechhalbzeugen unter Anwendung  
magnetorheologischer Flüssigkeiten als  
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen  
Simulative Prognose der Geometrie  
indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung  
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil  
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren  
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl  
Flexible Automatisierung der  
Statorenmontage mit Hilfe einer  
universellen ambidexteren Kinematik  
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht  
Optimierte Fertigungstechnologien  
für Rotoren getriebeintegrierter  
PM-Synchronmotoren von  
Hybridfahrzeugen  
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch  
Planning and Production Concepts for  
Contactless Power Transfer Systems for  
Electric Vehicles  
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl  
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen  
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder  
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen  
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt  
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger  
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck  
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation  
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.  
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller  
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen  
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke  
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren  
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner  
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium  
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock  
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition  
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter  
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode  
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl  
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung  
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke  
Transiente physikalische Mechanismen  
bei der Laserablation von dünnen  
Metallschichten  
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz  
Community-basierte Optimierung des  
Anlagenengineerings  
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen  
Qualifizierung des Potentials von  
Verfestigungseffekten zur Erweiterung  
des Umformvermögens aushärtbarer  
Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert  
Erweiterung und Verbesserung von Ver-  
suchs- und Auswertetechniken für die  
Bestimmung von Grenzformänderungs-  
kurven  
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus  
Erstellung eines Werkstofforientierten  
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung  
des Formgebungsvermögens von Alumi-  
niumlegierungen unter Anwendung einer  
zwischen geschalteten Wärmebehandlung  
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec  
Untersuchungen zur Herstellung von  
funktionsoptimierten Bauteilen im  
partiellen Presshärtprozess mittels lokal  
unterschiedlich temperierter Werkzeuge  
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Verschleißcharakterisierung beschichte-  
ter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela  
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-  
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-  
fungsoptimierung und Fehlerdetektion  
an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland  
Entwicklung einer Methode zur Prognose  
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen  
für das direkte Presshärten  
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm  
Strukturierte additive Metallisierung  
durch kaltaktives  
Atmosphärendruckplasma  
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner  
Herstellung beanspruchungsangepasster  
Aluminiumblechhalbzeuge durch  
eine maßgeschneiderte Variation der  
Abkühlgeschwindigkeit nach  
Lösungsglühen  
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas  
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit  
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim  
Kaltfließpressen  
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum  
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles  
for the Generation of Thin Conductive  
Layers on Transparent Substrates  
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider  
Umformtechnische Herstellung  
dünnwandiger Funktionsbauteile  
aus Feinblech durch Verfahren der  
Blechmassivumformung  
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof  
Sematische Modellierung automatisierter  
Produktionssysteme zur Verbesserung  
der IT-Integration zwischen Anlagen-  
Engineering und Steuerungsebene  
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller  
Erarbeitung von Grundlagen zur  
Abbildung des tribologischen Systems  
in der Umformsimulation  
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler  
Einsatz technologischer Versuche zur  
Erweiterung der Versagensvorhersage  
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten  
Stählen  
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig  
Integration des Systemverhaltens von  
Automobil-Hochvoltleitungen in die  
virtuelle Absicherung durch  
strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl  
Automatisierte Datenerfassung für disk-  
ret ereignisorientierte Simulationen in  
der energieflexiblen Fabrik  
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold  
Mikroschockwellenumformung mittels  
ultrakurzer Laserpulse  
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger  
Laserstrahlschweißen thermoplastischer  
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit  
spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl  
Methods-Energy Measurement - Eine  
Methode zur Energieplanung für  
Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow  
Erweiterung des Unternehmenscontrol-  
lings um die Dimension Energie  
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung zyklisch-symmetrischer  
Bauteile mit Nebenformelementen durch  
Blechmassivumformung  
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann  
Beitrag zur Untersuchung der  
tribologischen Bedingungen in der  
Blechmassivumformung - Bereitstellung  
von tribologischen Modellversuchen und  
Realisierung von Tailored Surfaces  
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner  
Methodik zur virtuellen Absicherung  
der formgebenden Operation des  
Nasspressprozesses von  
Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein  
Der grundoperationsspezifische  
Mindestenergiebedarf als Referenzwert  
zur Bewertung der Energieeffizienz in  
der Produktion  
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos  
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis  
Thermisch unterstützte Umformung von  
Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel  
Flexible Systems for Permanent  
Magnet Assembly and Magnetic Rotor  
Measurement / Flexible Systeme zur  
Montage von Permanentmagneten und  
zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis  
Schädigungs- und Versagensverhalten  
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter  
Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozessverhalten von Silizium als  
Werkzeugwerkstoff für das  
Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck  
Zeitliche Pulsformung in der  
Lasermikromaterialbearbeitung –  
Grundlegende Untersuchungen und  
Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto  
Mechatronic Simulation Approach for  
the Process Planning of Energy-Efficient  
Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel  
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik  
für verteilte Wicklungen im  
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung  
montageführender Werkerinformations-  
systeme simultan zum  
Produktentstehungsprozess  
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus  
Hochpräzise adaptive Steuerung und  
Regelung robotergeführter Prozesse  
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer  
Erzeugung von thermoplastischen  
Werkstoffverbunden mittels simultanem,  
intensitätsselektivem  
Laserstrahlschmelzen  
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger  
Untersuchung einer thermisch unter-  
stützten Fertigungskette zur Herstellung  
umgeformter Bauteile aus der höherfes-  
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020  
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellan  
Design of Manufacturing Processes for  
the Cold Bulk Forming of Small Metal  
Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy  
Experimental Investigation, Modeling,  
Simulation and Optimization of Molded  
Interconnect Devices (MID) Based on  
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-  
mentelle Untersuchung, Modellierung,  
Simulation und Optimierung von Molded  
Interconnect Devices (MID) basierend  
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren  
für flachleiterbasierte  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner  
Charakterisierung und Modellierung  
des spannungszustandsabhängigen  
Werkstoffverhaltens der Magnesium-  
legierung AZ31B für die numerische  
Prozessauslegung  
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar  
A reliable methodology to deduce  
thermo-mechanical flow behaviour of  
hot stamping steels  
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler  
Steuerung von Blechmassivumformpro-  
zessen durch maßgeschneiderte  
tribologische Systeme  
LFT, vi u. 166 Seiten, 90 Bilder, 6 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller  
Untersuchung des kombinierten Trenn-  
und Umformprozesses beim Fügen art-  
ungleicher Werkstoffe mittels  
Schneidclinchverfahren  
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.  
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-  
technologie für integrierte Leistungs-  
module in harschen Umgebungs-  
bedingungen  
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc  
Eine Simulationsmethode für das  
3-Rollen-Schubbiegen  
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer  
Arbeitsraumüberwachung und autonome  
Bahnplanung für ein sicheres und  
flexibles Roboter-Assistenzsystem  
in der Fertigung  
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 312: Miriam Rauer  
Der Einfluss von Poren auf die  
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen  
von Hochleistungs-Leuchtdioden  
FAPS, xii u. 205 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Die Forderung nach einer immer größer werdenden Leistungsfähigkeit bei gleichzeitiger Miniaturisierung elektronischer Bauelemente verlangt eine erhöhte Zuverlässigkeit des gesamten Systems und vor allem der Lötverbindungen. Der industrielle Einsatz neuartiger bleifreier Weichlote hat zur Zunahme von Poren in den Lötverbindungen elektronischer Baugruppen geführt, was insbesondere bei leistungselektronischen Anwendungen die Funktion und die Zuverlässigkeit der Baugruppen erheblich beeinträchtigen kann.

Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit von Lötverbindungen elektronischer Baugruppen zu untersuchen. Ein besonderer Fokus liegt dabei zum einen auf der Hochleistungs-LED-Technik, die aktuell Einzug in zahlreiche Anwendungen hält, und zum anderen auf dem silberreduzierten SAC105-Lot.

Kritische Porenpositionen und -größen werden mit Hilfe von Zuverlässigkeitstests sowie mit FEM-Simulationen identifiziert und daraus Porengrenzwerte abgeleitet. Neben der Charakterisierung der Lötverbindungen mittels der konventionellen Röntgentechnik wird die Computertomographie (CT) eingesetzt. Mittels CT-Aufnahmen können die Lötverbindungen vor und nach den Zuverlässigkeitstests gegenübergestellt und somit die Schädigungen in den Lötverbindungen belegt werden. Parallel zum experimentellen Vorgehen werden FEM-Simulationen durchgeführt durch die gezielt bestimmte Porenpositionen und -volumina untersucht werden können. Die Simulationsergebnisse ermöglichen somit die Identifikation kritischer Porenpositionen und -größen.

